

YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW

特 集

楽しさの追求と社会課題の解決で、
みんなの未来を創る

特集テーマ

技術ビジョン **楽しさの追求と社会課題の解決で、みんなの未来を創る**

ヤマハ発動機は、2023年に策定した技術ビジョンを2024年にブラッシュアップし、「楽しさの追求と社会課題の解決で、みんなの未来を創る」としました。

企業目的である「感動創造企業」を楽しさの追求で実現し、加えて社会課題の解決を楽しさと対立するものとしてせず、楽しみながら解決するヤマハ発動機らしいソリューションを提供します。人間研究を感動の主体としての人間と感動の作り手としての人間の本質的な理解と捉え、これを新たな価値創造の道しるべを提供するヤマハ発動機の基礎研究と位置づけました。また、知能化、エネルギーマネジメント、ソフトウェアサービスを新たなコア技術とし、当社の培ってきた基盤技術と組み合わせることで、お客さまや当社だけでなく、当社製品が使われるフィールドである自然環境も含めたすべてのステークホルダーに向けて「みんなの未来」を創っていきます。

今号では、技術ビジョン実現に向けた様々な取り組みについてご紹介します。

巻頭言

楽しさの追求と社会課題の解決で、みんなの未来を創る	5
小松 賢二	

製品紹介

週末と寄り道が楽しい！「PG-1」の開発	8
八木 恭平 伊藤 和久 木下 貴章 若林 優貴 峰 豊 吉見 健太	
「XSR900GP」の開発	12
橋本 直親	
船外機「F350B」の開発	17
笠井 慎也 大石 真也 中村 圭佑	
フィッシングボート「YFR330」	21
児島 慎平 服部 孝史 勝又 弘貴 八木 美教 チョン ジェフン 山下 航輝 杉山 智哉 伏屋 志緒梨 筒井 健	
船位方位保持機能を持つ操船支援システム「Y-FSH」を搭載した「DFR シリーズ」の開発	26
池田 拓 福山 美洋 井原 博英 内藤 健司 鶴羽 巧	
「WaveRunner FX Series, VX/GP Series」の開発	31
原田 直樹 鈴木 正吉	
「WaveRunner New JetBlaster」の開発	35
森江 厚志 野寄 歩 袴田 涼介	
2025年モデル ROV「WOLVERINE RMAX4」の開発	40
植木 勇一 日高 史博 田中 大輔	
速度監視ユニット「RCX3-SMU」（機能安全認証）の紹介	45
上野 賢治 三重野 幸介 磯野 真滋 坪井 康太郎 保科 大樹 荒澤 聖人 堀田 敦 西村 祐樹 中西 菜緒	
国内向け電動アシスト自転車「PAS CRAIG」の開発	49
杉山 峻平	
電動アシストホースカー「X-Quicker（クロスクイッカー）」	53
藤井 勲 杉山 和弘 向井 勇貴	

技術紹介

走りの幅を広げる 新型「NMAX」用「YECVT」の開発	56
勝山 祐紀 大塚 一樹 水澤 幸司 松島 秀洋 吉村 剛 江口 和也	
進化した自動化マニュアルトランスミッション「Y-AMT」の開発	60
林田 勇武 鈴木 満宏 福嶋 健司 南 健吾	
陸海空の制御・プラントモデルと可視化の連成技術	64
堀川 雅弘 太田 博康 松清 一樹	
社会共創による新価値創造「Town eMotion」Vol. 1 まちなか R&D クリエイティブフィールドの可能性	70
榊原 瑞穂	

技術論文

フレーム変形が二輪車の運動に及ぼす影響に関する研究（第1報）	75
坂本 和信 草刈 政宏 中谷 友輝 北川 洋	
A Study on Optimal Combinations of Winding and Cooling Methods for Downsizing Power Units in Motorcycles	81
大滝 亮太 土屋 照之 酒井 悠 山内 拓也 清水 司	
三次元磁路と非対称磁石配置をもつ可変界磁 PM モータの運転特性評価	95
日吉 祐太郎 土井 康太朗 野口 季彦	
船外機の市場不具合低減活動（パワーチルト&トリム）	101
高林 亮介 山下 敏之 青木 崇浩 岡本 守央 山口 淳	
平準化・ハイサイクル生産を実現する MC 組立の革新	106
友田 祐介 小林 篤史 深澤 伸吾 川口 貴之	
Investigation on Degradation Process of PdRuIr/CZ “pseudo-Rh” Catalysts used for Motorcycles	113
茂木 卓也 多々良 俊哉 高本 駿平 土居 航介	
Effect of Impurity Elements in Recycled Ingots on Seizure Properties of Die-cast Cylinders made of Hypereutectic Al-Si Alloy	121
大和田 純史 鈴木 貴晴	
Hybrid Electric Two-Wheeled Vehicle Fitted with an EVT System (Electrical Variable Transmission System)	128
古田 秀樹 吉田 潤	
乗り心地の良い「PAS」サドルを設計するための感性設計技術	150
丹羽 将勝 小関 泰子 小林 光司 藤田 英之 古澤 隆志 中林 雄介 伊藤 努 堀 啓一 芳賀 健太	
二輪車の操縦訓練方法に関する一検討	158
小島 儀隆 品川 晃徳	
感情状態の変化が感動の喚起に及ぼす影響	162
檜垣 秀一 栗本 佳祐 新田 吾一 水口 暢章 菅 唯志 末神 翔	

FEATURE

Technology Vision: Pursuing Fun and Solving Social Issues to Create Our Future

In 2024, Yamaha Motor refined its Technology Vision, originally established in 2023, to "Pursuing Fun and Solving Social Issues to Create Our Future." The Company will realize its corporate mission to be a Kando Creating Company through the pursuit of fun. In addition, it aims to provide solutions unique to Yamaha Motor and help to solve social issues while having fun rather than by making solutions to social issues at odds with it. The Company will position human research as its fundamental research and a guide for new values. It focuses on deep understanding of human beings both as the core of emotional, or Kando experience and as creators of that experience. It has also identified intelligent systems, energy management, and software services as new core technologies. By combining these with Yamaha's foundational technologies, the Company aims to create "Our Future" that benefits not only customers and Yamaha, but also the natural environments where the products are used.

This issue will introduce various initiatives we are undertaking to realize this Technology Vision.

Foreword

Pursuing Fun and Solving Social Issues to Create Our Future	5
Kenji Komatsu	

New Products

Weekends and Detours are Fun! Development of the "PG-1"	8
Kyohei Yagi Kazuhisa Ito Takanori Kishita Yuki Wakabayashi Yutaka Mine Kenta Yoshimi	
Development of the "XSR900GP"	12
Naochika Hashimoto	
Development of the "F350B" Outboard Motor	17
Shinya Kasai Masaya Oishi Keisuke Nakamura	
Fishing boat "YFR330"	21
Shimpei Kojima Takafumi Hattori Hiroki Katsumata Yoshinori Yagi Jung Jaehoon	
Koki Yamashita Tomoya Sugiyama Shiori Fuseya Takeshi Tsutsui	
Development of the "DFR Series" Equipped with the "Y-FSH" Steering Assist System	
Featuring Boat Position and Direction Holding Function	26
Taku Ikeda Yoshihiro Fukuyama Hirohide Ihara Takeshi Naito Takumi Tsuruha	
Development of the "WaveRunner FX and VX/GP"	31
Naoki Harada Masakichi Suzuki	
Development of the "WaveRunner New JetBlaster"	35
Atsushi Morie Ayumu Nozaki Ryosuke Hakamata	
"WOLVERINE RMAX4" 2025 Model ROV	40
Yuichi Ueki Fumihiro Hidaka Daisuke Tanaka	
Introduction of the "RCX3-SMU" Speed Monitoring Unit (Functional Safety Certificated)	45
Kenji Ueno Kousuke Mieno Shinji Isono Kotaro Tsuboi Hiroki Hoshina	
Masato Arasawa Atsushi Hotta Yuki Nishimura Nao Nakanishi	
Development of the "PAS CRAIG" Electrically Power Assisted Bicycle for the Domestic Market	49
Shumpei Sugiyama	
Electric Assist Hose Cart ("X-Quicker") for Firefighting	53
Isao Fujii Kazuhiro Sugiyama Yuki Mukai	

New Technologies

Extending the Range of Driving - Development of "YECVT" for the New-"NMAX"	56
Yuki Katsuyama Kazuki Otsuka Koji Mizusawa Hidehiro Matsushima Go Yoshimura Kazuya Eguchi	
Development of the Evolved Automated Manual Transmission "Y-AMT"	60
Isamu Hayashida Mitsuhiro Suzuki Kenji Fukushima Kengo Minami	
Coupling technology for "land, sea and sky" control and plant models and visualization	64
Masahiro Horikawa Hiroyasu Ota Kazuki Matsukiyo	
Creation of New Value through Social Co-Creation: "Town eMotion" Vol. 1	
Possibilities of Urban R&D Creative Fields	70
Mizuho Sakakibara	

Technical Papers

Effect of Frame Deformation on Motorcycle Dynamics (First Report)	75
Kazunobu Sakamoto Masahiro Kusakari Yuki Nakatani Hiroshi Kitagawa	
A Study on Optimal Combinations of Winding and Cooling Methods for Downsizing Power Units in Motorcycles	81
Ryota Otaki Teruyuki Tsuchiya Yu Sakai Takuya Yamauchi Tsukasa Shimizu	
Evaluation of Operating Characteristics of Adjustable Field Magnetization PM Motors with 3D Magnetic Path and Asymmetric Magnet Arrangement	95
Yutaro Hiyoshi Kotaro Doi Toshihiko Noguchi	
Activities for Reducing Initial Market Failures in the Outboard Motors Market (Power Tilt & Trim) . . .	101
Ryosuke Takabayashi Toshiyuki Yamashita Takahiro Aoki Morio Okamoto Jun Yamaguchi	
Innovation in MC Assembly: Achieving Levelized and High-Cycle Production	106
Yusuke Tomoda Atsushi Kobayashi Shingo Fukazawa Takayuki Kawaguchi	
Investigation on Degradation Process of PdRuIr/CZ "pseudo-Rh" Catalysts used for Motorcycles . . .	113
Takuya Motegi Shunya Tatara Shunpei Takamoto Kosuke Doi	
Effect of Impurity Elements in Recycled Ingots on Seizure Properties of Die-cast Cylinders made of Hypereutectic Al-Si Alloy	121
Atsushi Owada Takaharu Suzuki	
Hybrid Electric Two-Wheeled Vehicle Fitted with an EVT System (Electrical Variable Transmission System)	128
Hideki Furuta Jun Yoshida	
Kansei Design Technology to Design a Comfortable "PAS" Saddle	150
Masakatsu Niwa Taiko Koseki Koji Kobayashi Hideyuki Fujita Takashi Furusawa	
Yusuke Nakabayashi Tsutomu Ito Keiichi Hori Kenta Haga	
A Study on Motorcycle Riding Training	158
Yoshitaka Kojima Akinori Shinagawa	
Kando could be evoked by a transition in emotional state	162
Shuichi Higaki Keisuke Kurimoto Goichi Nitta Nobuaki Mizuguchi Tadashi Suga Takashi Suegami	



楽しさの追求と社会課題の解決で、みんなの未来を創る

Pursuing Fun and Solving Social Issues to Create Our Future

小松 賢二

How many years has it been since we were told we were in a “once-in-a-century period of profound transformation”? It is said that this was first said by President Akio Toyoda of Toyota Motor Corporation in 2018, so if that is true, it will be six years. Has this period of great change ended in these six years? We cannot say whether this was a period of change, but drastic changes such as of the environment and diversifying needs continue. How should we adapt to such a period of time? In addition to shortening development time to adapt to rapid changes in the environment and expanding the product lineup to meet diversifying needs, it has recently become necessary to achieve carbon neutrality and comply with various regulations that are becoming stricter year by year. Do we have too many things to do that we do not have enough time to conduct R&D to achieve differentiation?

Last year, the Company has renewed the Technology Vision and newly defined three new core technologies: 1) Intelligent Systems, 2) Software Services, and 3) Energy Management, and added 4) human research as the foundation to support all of the conventional core technologies. Positioning human research as our core of the Technology Vision, we aim to maximize human potential. The results of human research will bring new value to our products and further enhance fun and attachment for users.

I believe that fun and attachment will be more important than ever for Yamaha Motor products in the future. The technology of internal combustion engines, which are the power source, has reached maturity, and the performance of electric powertrains has become more standardized, making differentiation with powertrains difficult. There is a lot of work to be done to adapt to the period of change, but we must pursue new values such as fun and attachment as differentiating technologies more than ever. To achieve this, we must improve the efficiency of conventional core technology development, and at the same time, shift human resources to the development of new core technologies, new value creation, and human research. We engineers must also change our mindset, and we need to challenge ourselves to acquire the skills and technologies needed in the future, instead of remaining at our current levels.

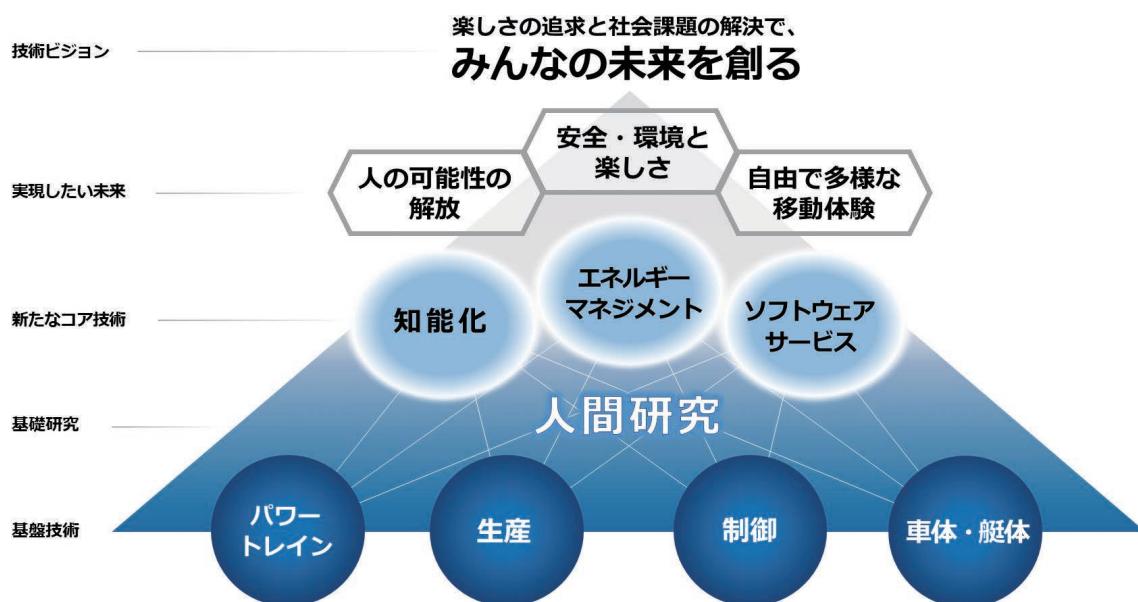
Since the founding of the Company, we have always pursued fun based on the concept of a *Kando Creating Company. Our diverse product lineup includes motorcycles and marine products, as well as robotics and electrically power assisted bicycles, all designed around fun and solving social issues. This fun, and solving societal issues, enriches people’s lives, and is a driving force for creating the future.

Our motorcycles are loved by people across the globe. Riding a motorcycle has gone beyond simply being a method of transportation; it is the experience of feeling the wind and enjoying the freedom. Yamaha’s motorcycles offer the ultimate fun to our riders, both in terms of their design and performance. Boats and personal watercraft also take the fun of leisure activities on the sea and at lakes to another level. We will continue to pursue fun with the unique style of Yamaha and will continue to take on the challenge of creating our future while improving and evolving the value we provide to our customers through the development of new core technologies, the creation of new value, and the results of human research.

*Kando is a Japanese word for the simultaneous feelings of deep satisfaction and intense excitement that we experience when we encounter something of exceptional value

「100年に一度の大変革期」と言われて何年経ったでしょうか？ 2018年のトヨタ自動車 豊田章男社長の言葉が最初だと言われていますので、それが本当なら6年になりますね。この6年間で変革期は終わったのでしょうか？変革期と言えるかどうかは分かりませんが、環境やニーズの多様化などの激しい変化は続いていると思います。そんな時代に我々はどう対応していくべきでしょうか？速い環境変化に合わせるための開発期間の短縮やニーズの多様化に対応するための商品ラインナップの拡充などはもちろん、最近はさらにカーボンニュートラルや年々厳しくなる各種の規制対応なども必要になってきました。やることがいっぱいでは差別化のための研究や技術開発に費やす時間がなくなっていないでしょうか？

昨年、技術ビジョンを刷新し、新たに3つの新コア技術 1)知能化 2)ソフトウェアサービス 3)エネルギーマネジメント を定め、従来コア技術を含めた全体を支える基盤として 4)人間研究を追加しました。技術ビジョンとして人間研究を中心に据え、人々の可能性を最大限に引き出すことを目指しています。人間研究の成果は、我々の製品に新たな価値をもたらし、ユーザーにとっての「楽しさ」や「愛着」をさらに高めていきます。



今後のヤマハ発動機の商品にとって「楽しさ」や「愛着」は今まで以上に重要になると思います。動力源である内燃機関の技術は成熟期を迎え、電動のパワートレインの性能は画一化しており、パワートレインでの差別化は難しい状況であることから、今後は今までにはない新しい価値での差別化が重要な時代になります。変革期への対応でやることがいっぱいだと思いますが、差別化技術として「楽しさ」や「愛着」などの新しい価値を今まで以上に追求しなければなりません。そのためには従来コア技術開発の効率化を進め、同時に新コア技術の開発や新価値創造、人間研究に人財リソースをシフトしなければなりません。また我々技術者の意識も変えなければならず、現状のスキルや技術に留まることなく、将来必要になるスキルや技術を獲得するためのチャレンジも必要になります。

我々は創業以来「感動創造企業」を基に、常に「楽しさ」を追求し続けてきました。バイクやマリン製品、さらにはロボティクスや電動アシスト自転車など、多岐にわたる製品群は、すべて「楽しさ」や社会課題の解決を中心に設計されています。この「楽しさ」と社会課題の解決は、人々の生活を豊かにし、未来を創造する力となっています。

我々のバイクは、世界中で愛されています。バイクに乗ることは、単なる移動手段を超え、風を感じ、自由を味わう体験です。ヤマハのバイクは、そのデザインや性能において、ライダーに最高の「楽しさ」を提供します。ボートや水上オートバイも海や湖でのレジャーを一層楽しいものにします。これからもヤマハらしく「楽しさ」を追求し続け、新コア技術の開発、新価値創造、人間研究の成果によりお客さまへの提供価値を向上、進化させながら「みんなの未来を創る」ためのチャレンジを続けていきます。

■著者



小松 賢二
Kenji Komatsu
執行役員

週末と寄り道が楽しい! 「PG-1」の開発

Weekends and Detours are Fun! Development of the “PG-1”

八木 恭平 伊藤 和久 木下 貴章 若林 優貴 峰 豊 吉見 健太



Abstract

The “PG-1”, a newly developed model, features a 114 cm³ air-cooled, 4-stroke SOHC (Single OverHead Camshaft), single-cylinder, 2-valve, fuel-injected engine. Designed around the concept of “weekends and detours are fun!”, the “PG-1” made its debut in 2024, with its launch beginning in Southeast Asian markets, starting in Thailand.

The “PG-1” is a model that combines the ease of handling of a moped with the capabilities of a scrambler, allowing it to venture onto unpaved roads. It incorporates a variety of features, such as convenience in the city, off-road capabilities for touring and leisure trips, and a high sense of style, all condensed into one model. The goal was to introduce the users to a completely new genre of model, unlike anything seen before.

1 はじめに

“週末と寄り道が楽しい!”をキーワードに114cm³の空冷4ストローク・SOHC (Single OverHead Camshaft)・単気筒2バルブ・フューエルインジェクション(以下FI)のエンジンを搭載したニューモデル「PG-1」の開発を行い、2024年にタイを先頭国に東南アジア各国への導入を開始した。

「PG-1」は、モペットの扱いやすさと、スクランブラーの未舗装路にも踏み入れられる機能を併せ持つモデルである。そこには、街中での利便性、ツーリングやレジャー先での悪路走破性、高いファッション性といった多様な要素を凝縮した。これまでにないジャンルのモデルを、ユーザーの皆さまに送り出すことを狙いにした。

2 開発の狙い

2-1. 本製品の目的

今回開発したのは、既存パッケージでも十分なポテンシャル

を持つ量産中のモペット「Finn」「Sirius」で培った技術を活用し、機能美を感じさせる普遍的なデザインとタフな機能・装備を付与し、楽しさを重視した新しいモペットの世界観を提案することである。

2-2. 技術の狙い

新しいモペットの世界観を提案するため、以下3つの狙いで開発を行った。

1. デザインインパクト

モペット本来の実用性を保ちながら高い走破性とカスタム性を兼ね揃えたオシャレな(ファッション性の高い)外観を実現。

2. 非日常での快適性

未舗装路も楽しめる足回りの装備と余裕のある最低地上高、自由度のあるライディングポジション、過不足のない動力性能と航続距離を実現。

3. コスト・法規対応

敷居の低い車両価格設定、量産中のエンジンを活用したEURO4対応、フィーチャーの厳選。



図1 フィーチャーマップ

3 開発の取り組み

前述の開発の狙いを達成するために、利便性と走破性を備え、日常と非日常を自由に行き来できる機能を持ち、さらにタフで普遍的なデザインを実現する外観にもこだわった装備を採用した。

具体的には、図1に示すフィーチャーを採用した。ここでは主要部品の開発の取り組みについて紹介する。

3-1. 前後サスペンション

一般的なモベットのフロントフォークには、上部が一本に集約されるタイプが採用されるが、「PG-1」では左右のフロントフォークがハンドルクラウンまで独立して伸びるタイプかつインナー径φ30mmを採用した(図2)。これにより、大幅な剛性向上と、高い走行安定性、一般的なモベットとは異なるインパクトあるフォルムを実現した。

リアサスペンションには、ツインショックを採用した。取り付け方法にもこだわり、上部をフレームの外側にレイアウトし、マウント部分をあえて見せることによって、メカニカルな雰囲気を実現した(図3)。

前後サスペンションは、共に従来モデルよりストローク量とトラベル量を大幅に増やし(表1)、路面の凹凸や大きな荷重変化に対応した。衝撃吸収性に優れ、未舗装路やフラットダートでの走破性、乗り心地の良さに貢献した。



図2 フロントフォーク比較

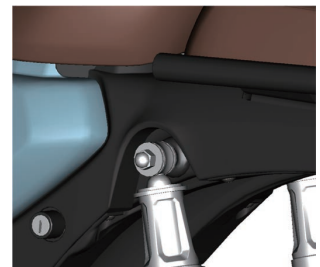


図3 リアサスペンション取付

表1 前後サスペンション性能比較

モデル名	Finn	PG-1
フロントフォーク ストローク量	100mm	130mm
リアサスペンション トラベル量	81mm	109mm

3-2. ブロックパターンワイドタイヤ

前後のタイヤには、90/100-16のワイドタイヤ(専用開発、IRC製GP-22)を装着した(図4)。一般的なモベットはリム径17インチが採用されるが、「PG-1」では小径の16インチを採用し、扁平率を上げることによって、存在感のあるワイルドな印象とした。見た目の力強さと、エアボリュームの増大による乗り心地の良さも備えている。

また、トレッドパターンはブロックとし、“オンロードでのハンドリング”と“フラットダートでの走破性”をバランス良く実現し、幅広い路面状況への対応が可能である。



図4 ブロックパターンワイドタイヤ

3-3. フレーム&リヤアーム

前述の通り、高剛性のフロントフォークを採用した。それに伴い、フレームを新規開発し、車体全体の剛性と強度を最適化した。メインパイプはモナカ構造(図5)を採用し、同エンジン搭載の従来モデルに対し、質量は1.3kg増にとどめながら、約2.5倍の剛性アップにより安定性に寄与した。またエンジンが発する振動と音を解析し、ヘッドパイプ後方の凹み設定による共振抑制により騒音を低減、スイングアームピボット部の厚肉化にて剛性向上と振動低減を実現した。

リヤアームは未舗装路走行やロングトラベルによる高負荷に備えて、幅広の断面形状に変更した。これにより、フレームと同様の効果を得られ、相乗効果で乗り心地も向上した。

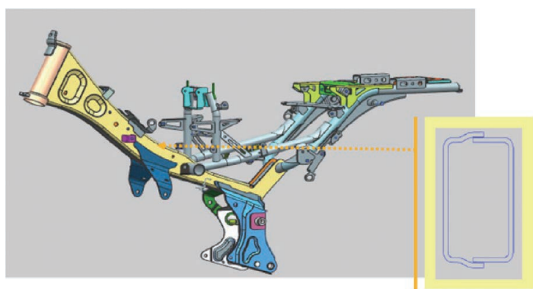


図5 フレーム(メインパイプ断面図)

3-4. 前後分割シート

シートはライダー側とパッセンジャー側の前後2分割タイプである。ライダー側の前後長を長く設定することで、走るシーンや速度状況に応じた着座位置選定の自由度を高めた。また、ロングツーリングの使い勝手を想定し、燃料給油口をライダー側シート下に設置することで、パッセンジャー側シートへの荷物積載時においても、そのまま給油が可能になる(図6)。

シート高は従来モデルから20mmアップで燃料タンク容量を約1L増加させ航続距離に余裕を持たせた。背反の足付き性は従来モデルに対し、リアサスペンションのトラベル量とタイヤの扁平率を単純上乗せで、44mmアップになるところ、関連部品を効率よくレイアウトすることで20mmアップまで抑制し、足つき性と航続距離をバランス良く両立した。



図6 給油のしやすさと積載性を考慮したシート構造

3-5. ライディングポジション

従来モデル「Finn」とのシート基準比較(図7)では、「PG-1」のハンドルは46mm前方・12mm上方、ステップは30mm後方・50mm下方への移動により、ゆとりあるライディングポジションを実現した(図7)。前述のシート前後長も長く確保されているため、自由度が高く、タウンユースやツーリングなど、状況に応じたライディングポジションの変更が容易である。

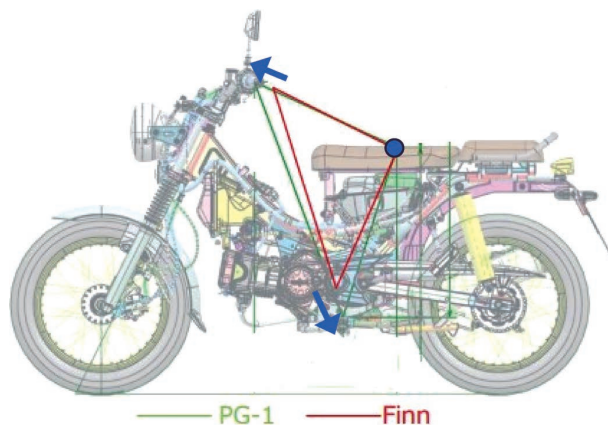


図7 ライディングポジション比較

3-6. ハンドル

未舗装路走行やポジションの自由度を上げるため、ハンドル幅を広く(+80mm)設定し、グリップ長も延長(+12mm)した。トップブリッジ、ハンドルクランプ部分、ハンドル最上部との位置関係は外観に大きく影響するため、開発当初よりデザイン部門と密接にコミュニケーションを重ねて検討した(図8)。ハンドル曲げ部の高さや幅を最適化し、スタイリッシュさと自然なライディングポジションの両立を図った。



図8 ハンドルの位置関係

3-7. 外装カバー

タンクカバーやサイドカバーの左右への張り出しを抑制するため、内蔵部品をバランス良くレイアウトした。ライダーの膝から下が当たる部分をスリムに仕立てることにより、スタンディングの姿勢を取っても、足首やふくらはぎが不自然に干渉することなく走行できる(図9)。



図9 スリムな外装カバー

3-8. 灯火器・メータ

カスタマイズしたくなるような美しく独立したパーツ構成を採用した。ヘッドランプ、テールランプは普遍的なデザインを実現するため丸型とした(図10)。

メータはシンプルなアナログタイプを採用した。サークル状のスピードメータとオーバル状の燃料計を組み合わせ、他の各種情報もバランス良く配置し、高い視認性を確保した。ギアポジションが分かるシフトインジケータも装備し、利便性にも配慮した(図11)。



図10 丸形ヘッドランプ、テールランプ



図11 シフトインジケータ付きメータ

3-9. エンジン

114cm³の空冷4ストローク、SOHC、単気筒2バルブ、FI エンジンを搭載した。特性として、トルクフルな持ち味と扱いやすさを備えながら、低燃費も実現した。既存のユニットをベースに排ガス規制へ対応と、FI セッティングを見直した。

力強い加速とトラクションを実現するため、自動遠心クラッチ付4段トランスミッションギアの2次減速比のショート化(Finn: 14-40、PG-1: 13-40)を織り込んだ。

4 おわりに

東南アジア諸国を筆頭に世界中で長年、日常の道具として愛用されているモペットをベースに、日常使用の利便性を維持したまま、今までにないジャンルの車両を作り出すことができた。タイ、ベトナムでの製品発表時には多大なインパクトを残し、その後も SNS などで盛り上がり続けている。

「PG-1」が新しいライフスタイルを提案するバイクとして、広く根付いて行くことを期待する。

■著者



八木 恭平

Kyohei Yagi

PF 車両ユニット

PF 車両開発統括部

CV 開発部



伊藤 和久

Kazuhisa Ito

PF 車両ユニット

PF 車両開発統括部

車両実験部



木下 貴章

Takanori Kishita

パワートレインユニット

プロダクト開発統括部

第1PT 実験部



若林 優貴

Yuki Wakabayashi

PF 車両ユニット

PF 車両開発統括部

CV 開発部



峰 豊

Yutaka Mine

パワートレインユニット

プロダクト開発統括部

第1PT 設計部



吉見 健太

Kenta Yoshimi

PF 車両ユニット

電子技術統括部

システム開発部

「XSR900GP」の開発

Development of the “XSR900GP”

橋本 直親



Abstract

The second generation of the “XSR900”, developed with the keyword “Racing Heritage,” features an orthodox style with round headlights and a bar handle. However, it also incorporates a delta box frame (Yamaha’s unique design concept first used in Grand Prix machines of the 1980s), a passenger seat shaped like a tail cowl, and an elongated fuel tank, evoking the spirit of past racing scenes. The “XSR900GP”, based on the “XSR900”, is designed as “The Embodiment of Yamaha Racing History,” equipped with a fairing reminiscent of 1980s Grand Prix machines and matching performance characteristics.

1 はじめに

“レーシングヘリテージ”をキーワードに掲げ開発された2代目「XSR900」は、丸形ヘッドランプやバーハンドルを装備するオーソドックスなスタイルながらも、デルタボックス（1980年代のグランプリマシンで初めて採用された当社独自の設計思想によるフレーム形状を指す）風のフレーム、テールカウルのような形状のパッセンジャシート、前後に長い燃料タンク等により往年のレースシーンを感じられるモデルとなっている。「XSR900GP」は、「XSR900」をベースに、“The Embodiment of Yamaha Racing History（ヤマハレースヒストリーの体現者）”をコンセプトとして1980年代のグランプリマシンのような形状のフェアリングの装備とそれに見合った走行性能を有するモデルとして開発した。

2 開発の内容

2-1. フェアリング

「XSR900GP」の最も特徴的な部品が、車体前方のハーフフェアリング（図1）である。コンセプトである1980年代のグランプリマシンのスタイルを体現するため、別体式のナックルパイザーを装備した。スクリーンについても当時に近い形状としているため、最新のスーパースポーツモデルと比較すると上端は低い位置となっている。そのような設定においても、CFD（Computational Fluid Dynamics）および実走評価によるナックルパイザーやスクリーンの形状調整により、十分なウィンドプロテクション性能を有し高速道路での移動時の疲労低減に寄与している。



図1 ハーフフェアリング

2-2. シートカバー

ひとり乗りであるグランプリマシンの外観フォルムに近づけるために、パッセンジャー用シートを覆うカバー(図2)を同梱部品とした(日本市場は別売り)。車両と同時に開発することで一体感のあるデザインを達成している。また、ライダーが腰を引いた際にストッパーとなるパッドを備えており、機能面でもグランプリマシンを踏襲している。

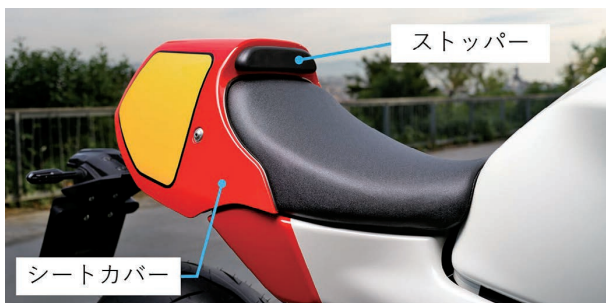


図2 シートカバー

2-3. 走行性能

高いスポーツ性を有するモデルとして、以下の2点に重点を置いて走行性能の開発を行った。

- ・自信を持ってコーナに進入できる。
 - ・コーナの立ち上がりで、余裕をもってスロットルを開けられる。
- 具体的手法は次項に示す。

2-3-1. ライディングポジション

本モデルの開発において最も難易度が高かったのがライディングポジションの決定である。モデルのコンセプトおよびスタイリングの要求からセパレートハンドルの採用は必須であった。しかし、ハンドルの変更によりライダーが前傾姿勢となることで重心が前方に移動し、すでに市場でも高い評価を得ている

「XSR900」の操縦性のバランスが大きく変化したところからの開発スタートとなったためである。加えて、ハンドルとシートの位置関係もエルゴノミクス(人間工学)面で課題となった。これらの課題に対応するためにシート座面とステップ位置を含めたライディングポジション三角形(図3)をすべて見直し最適化を図った。それぞれの位置は走行評価用の試作パーツを多数用意し、ミリ単位でのポジション調整を繰り返した。特にハンドルについてはストリート(公道走行)に軸足を置いたモデルとして過度な前傾にならずツーリングや市街地での快適性とスポーツ性を高次元でバランスさせるため、位置だけでなく垂れ角もコンマ数度単位での変更とテスト走行を何度も行い最適仕様を設定した。

「XSR900」と比較するとライディングポジションの変化量は以下のとおりである。

ハンドル:93mm 前方へ／114mm 下方へ
シート座面:12mm 前方へ／27mm 上方へ
ステップ:26mm 後方へ／26mm 上方へ

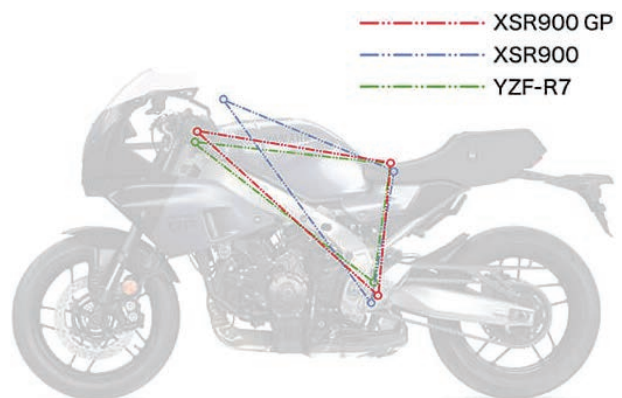


図3 ライディングポジションの比較

2-3-2. 剛性チューニング

プラットフォーム開発モデルの制約としてメインフレームについては「XSR900」と同一品を使用する必要があった。一方、前項で述べたとおりライディングポジションが大きく異なることから目標の操縦性を達成するためにはサスペンションの変更だけでは十分ではなく、車両挙動に寄与する車体剛性のチューニングが必要であった。そこでエンジン懸架ブラケットの板厚を4mm から6mm へ増加、ヘッドパイプ周辺に左右を連結するリーンフォースメント(補強部材)を追加、さらにリアアームピボット部のブッシュ外径を2.5mm 増やし締結剛性を上げることで必要な剛性バランスを実現した(図4、図5)。

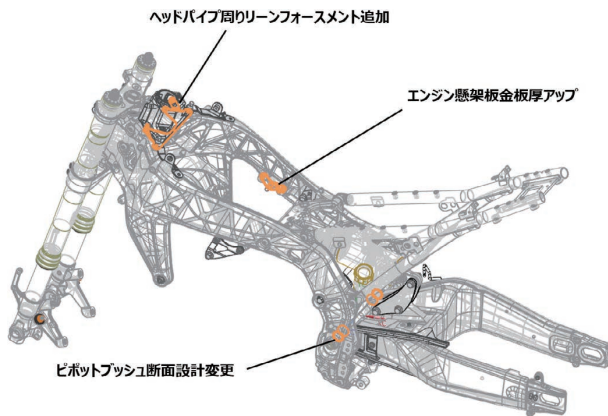
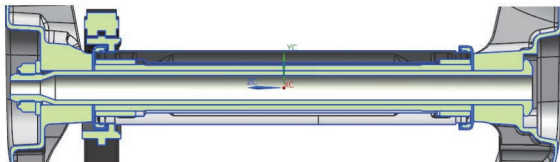


図4 剛性のチューニング箇所

XSR900GP



XSR900

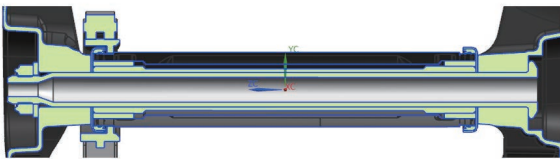


図5 ピボットブッシュの形状比較

2-3-3. サスペンション

前後のサスペンションは、専用の KYB 製のフルアジャスタブルタイプを新しく採用した。「XSR900」の既存部品に対して調整範囲を増やし、前後ともに圧側の減衰力は高速と低速の2系統で調整可能としている(表1)。

また、ステアリングシャフトには CP3シリーズで唯一アルミニウム材を採用した。これはステアリング周りの曲げ剛性およびねじり剛性に作用し、フロントの軽快感向上と車両挙動の前後バランスの改善が狙いである。

表1 前後サスペンション調整範囲の比較

モデル		XSR900GP	XSR900
フロント	プリロード	無段階 15mm	無段階 15mm
	圧縮	高速 5.5回転	11段
		低速 18段	
	伸び	26段	11段
リア	プリロード	油圧式 24段	カム式 7段
	圧縮	高速 5.5回転	—
		低速 18段	
	伸び	2.5回転	2.5回転

2-4. 質感の向上

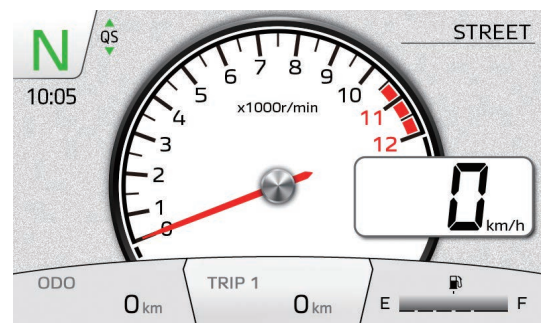
所有することで満足感を得られるように随所に質感を向上させるための工夫を織り込んだ。

2-4-1. メータ

メータは「MT-09」と同じ5インチフルカラーTFT液晶を採用している。ただし、「MT-09」と共通の3テーマに加えて、本モデル専用としてアナログ風タコメータを表示するテーマを準備した(図6)。違和感のない針の動きやスポンジのようなデザインの背景と合わせて、かつてのグランプリマシンを彷彿とさせるビジュアルとしている。



ブラック背景:主に夜間用



ホワイト背景:主に昼間用

図6 メータのアナログ風タコメータ表示

2-4-2. “あの頃ステア”とベータピン

フロントフェアリングの固定には、1980年代のレースマシン同様に燃料タンク前方から立ち上がり、フェアリング後端へつながる丸パイプ製のステアを採用した。このステアは開発メンバーからは“あの頃ステア”と呼ばれ、本モデルを特徴づける代表的な部品のひとつであり、フロントフェアリング固定に採用したベータピンと合わせてコックピット周りの質感向上と当時の雰囲気再現に寄与している(図7)。なお、ベータピン(図8)の採用は当社の公道用市販車としては初である。



図7 コックピット周り

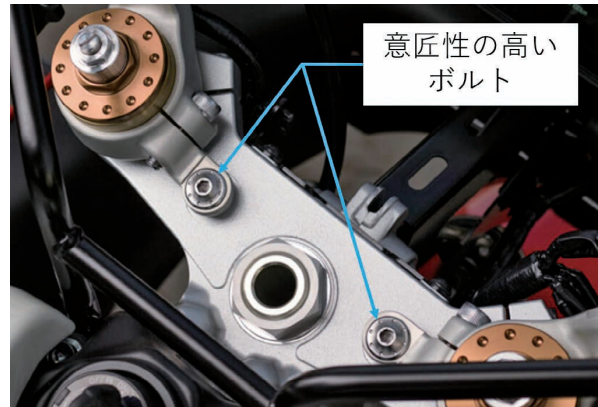


図9 意匠性の高いボルト類

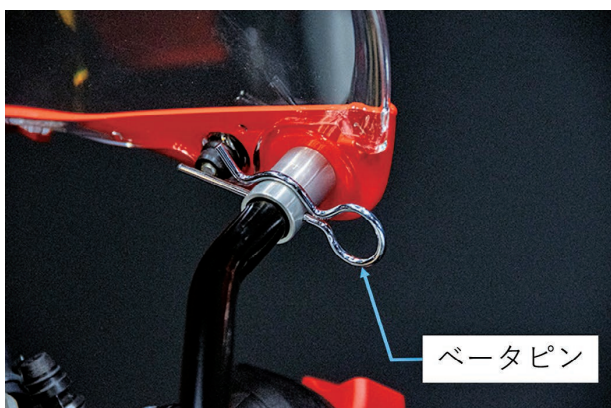
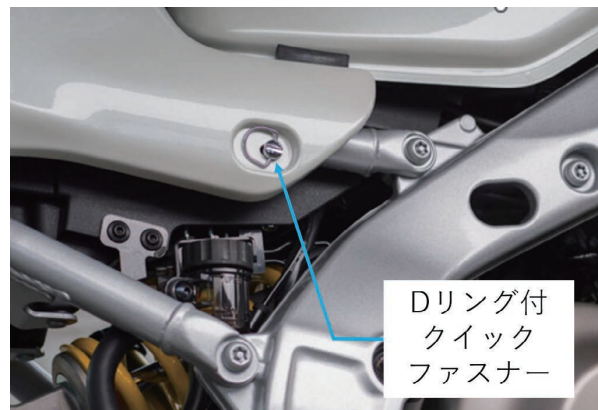


図8 ベータピン



2-4-3. 高意匠ボルト

ハンドル、クラウン周りをはじめ随所にドリル加工の軽量穴をイメージした意匠性の高い頭部形状を持つボルトを採用した。また、ナックルパイザの締結には市販モデルでは使用することの少ないアルミ製ボルト、サイドカバーの取り付けにはDリング付クイックファスナー（「XSR900」と同一）を使用し、小物部品からもグランプリマシンのようにシリアスなイメージを感じられるようにした（図9）。

2-4-4. 塗装

車体色シルキー ホワイトにはバーミリオン（鮮やかな朱色）を初採用した。ホイールでは他モデルで採用しているが、外装カバーへの塗装実績はなく、1980年代のヤマハファクトリーマシンを彷彿とさせるホワイト／レッドの車体色を実現するために本モデル用に塗料開発を行った。

また、フレームも当時のアルミ地肌のようなイメージとするためにシルバー色に塗装した（図10）。これによりデルタボックス風フレームの造形をより際立たせている。

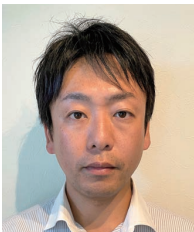


図10 シルバーに塗装されたフレーム

3 おわりに

「XSR900GP」は、主要なコンポーネントを「XSR900」や「MT-09」と共通とする派生モデルであるが、ライディングポジションの変更と細部の調整により、異なる乗車感を実現した。結果として、基本骨格以外の操縦性に関わる部品は大部分を専用設計としており経験豊富なライダーにも満足していただける仕上がりであると自信を持っている。また、最新技術の中にかつての雰囲気を感じられる外観は、発表直後から国内外問わず大きな反響を呼んでおり、個性的かつ魅力的なモデルとして、幅広い年代のお客さまに気に入っていただけると確信している。本モデルを購入されたお客さまには、走る時間と眺める時間の両方を楽しんでいただけることを期待する。

■著者



橋本 直親
Naochika Hashimoto
PF 車両ユニット
PF 車両開発統括部
SV 開発部

船外機「F350B」の開発

Development of the “F350B” Outboard Motor

笠井 慎也 大石 真也 中村 圭佑



Abstract

In recent years, boats have been getting larger, leading to the expansion of the market for large outboard motors. As a result, there is a growing demand for a lineup of outboard motors with strong product appeal in this market. However, due to the recent aggressive strategies of competitors, Yamaha Motor's (hereafter referred to as "the Company") dominance in the large outboard motor segment is gradually being lost. While competitors have expanded their lineup to include models up to 600 horsepower, accommodating a wide range of boats, the Company has discontinued the production of the "F350A" in 2019, creating a gap in its lineup at the 350-horsepower level. Due to the inability to supply 350 horsepower, the Company faces challenges where customers switch to competitors even in the similar horsepower range.

Given this background, the development of this horsepower range has become urgent. However, this horsepower range has unique difficulties: V8 engines are too heavy, and V6 engines lack power. Yamaha Motor has attempted this several times in the past but have given up each time.

Additionally, the performance requirements for outboard motors have changed recently. The market now demands not only "light and powerful" but also better maneuverability and reduced noise for a more comfortable boating experience. In this development, the goal was for an early market launch by tuning up the existing "F300F", which is highly rated for its light weight, high reliability, and maneuverability, to achieve an overwhelmingly light and highly usable 350 horsepower range.

1 はじめに

近年、ボートの大型化が進行し、大型船外機の市場が拡大している。そのため、この市場において強い商品性をもった船外機のラインナップが求められている。

しかし、昨今の競合他社の攻勢により、大型船外機におけるヤマハ発動機(以下当社)の優位性が失われつつある。他社は

600馬力までのラインナップを整え、多様なボートに対応しているのに対し、当社では2019年に「F350A」が生産終了になり、350馬力にラインナップ上の穴ができてしまっている。当社から350馬力を供給できていないことで、周辺馬力帯においても他社に乗り換えられる課題がある。

これらの背景から、この馬力帯の開発が急務となっている。しかし、この馬力帯は特有の難しさがありV8では重く、V6ではパワー

不足となり、過去何度かチャレンジしたが、断念した経緯もある。

また昨今の船外機へ求められる性能にも変化がみられ、従来の“軽くてパワフル”だけでなく、操船性や音に対する市場要求も増え、より快適なボートینگの実現が求められている。

今回の開発では、軽量、高信頼性、操船性などの面で市場から高い評価を受けている既存の「F300F」をチューンナップすることで、350馬力帯において圧倒的に軽量で高いユーザビリティを有しながら、早期市場投入を目指した。

2 開発の狙い

本モデル(図1)は、早期市場投入ニーズに応えつつ、競争力の高い船外機にすべく下記4項目に取り組んだ。

1. ベース機種「F300F」活用による短期集中開発
2. 軽量「F300F」エンジンの基本構造を流用した改良で、圧倒的軽量の実現
3. 吸気系の一新による出力向上
4. 最小限の改善で効果的な静粛性向上



図1 「F350B」

3 商品の特徴

開発の狙いでも述べたが、本モデルでは市場で好評を得ているベース機種「F300F」の良さを踏襲しつつ、さらに磨き上げた。前モデル「F350A」に対し、操船性含めた高いユーザビリティを有しながら、船外機の基本性能として非常に重要な要素である“重量”においても、約60kgの軽量化を実現し、競合他社含めた350馬力帯において圧倒的軽量、ハイパフォーマンスを実現した(表1)。

表1 各モデル主要諸元比較

モデル名	F300F	F350A	F350B
エンジン形式	V6	V8	V6
重量	288kg	354kg	293kg
排気量	4,169cm ³	5,330cm ³	4,256cm ³
ボア	96mm	94mm	96mm
ストローク	96mm		98mm
圧縮比	10.3	9.6	11.0
吸気バルブ径	38.5mm		40mm
排気バルブ径	33mm		34mm
点火プラグ径	M14		M10
発電量	70A	54A	74A
ステアリング	電動	油圧	電動
レゾネータ	無し		有り
ローワー	6KA	6AW	6KA 改

※全て北米仕様/Xトランサム

※「F350A」は2019年度、その他は2024年度の情報

3-1. 出力開発

出力開発は、本モデルの最大の課題の一つであり、開発部門一丸となり取組みを進めた。なお、開発に際しては、既存の技術に磨きをかけることで達成を目指した。アプローチは大きく二つ“吸入空気量の向上”と“駆動ロス低減”である。

3-1-1. 吸入空気量向上

出力向上のためには、多くの空気を燃焼室に入れ、素早く燃焼させることが基本である。そのため、細径の点火プラグ採用し、吸排気バルブ径の拡大を行った。これに伴い、吸気管長、サージタンク容量を最適化するために、1次元解析および3次元非定常解析(図2)を用いて短期間で精度の高い形状を作りこんだ。さらに並行して実機評価を行い、結果を解析にフィードバックすることで、最適な吸気形状の作り込みを短期間で実現した。また、シリンダヘッドにおいては、タンブルと流量を両立する斜めスロート加工を採用した吸気ポート形状により燃焼速度向上にも貢献した。シリンダヘッド、動弁系、吸気系においては自動車用エンジン開発部門の協力のもと、開発に取り組んでいったことで、新たな知見も織り込めた。

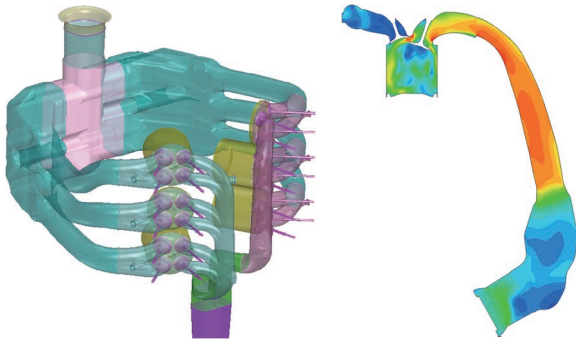


図2 3次元非定常解析モデル

吸気温度を下げる工夫としては、フライホイールマグネット上部のステーターより発せられる熱をカウル外部に排出する排熱ファンの構造を採用した(図3右)。また、シュラウド形状の作り込みにより、吸気温度を約10℃下げる効果が得られた。なお、ステーター部の温度も下がることで、発電量が上がるという副次的な効果も得られている。排熱部の構造は「F350B」を象徴する意匠となっている(図3左)。

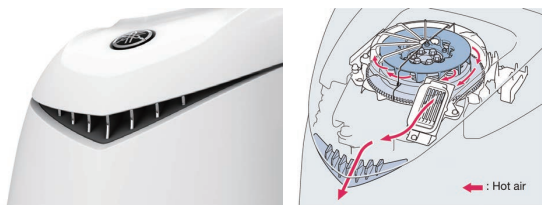


図3 排熱ファン構造
(左:排熱部外観 右:排熱構造)

また、圧縮比も向上させるとともに、クランクシャフトのピン径を2mm 縮小し、その分ストロークを2mm 上げることで排気量も上げた。ピン径縮小による強度への影響は、高強度の材料を採用することでベースエンジン「F300F」の基本構造を変えずに本改良を成立させ、短期開発にも大きく貢献できた。さらにストロークアップにより、吸気速度が上がり筒内乱れの改善、吸気バルブ径アップのポテンシャルを最大限引き出すことができ、排気量の増加比率以上の出力向上効果があった。

最終的には出力点で体積効率110%を実現できた。

3-1-2. 駆動ロス低減

駆動ロスという視点では、主に二つの取り組みを行った。1点目は、クランクケースのポンピングロス低減である。これは、クランクケース部を大きく開口(図4)することで、ポンプロスの低減を図った。

2点目はローワー ASSY (以下ローワー) の駆動ロス削減である。大型のローワー になるとギヤ駆動においても大きなロスとなる。

今回、「F350A」のローワーではなく、「F300F」で開発された小型高耐久ローワーを採用することで、駆動ロスの低減に寄与した。

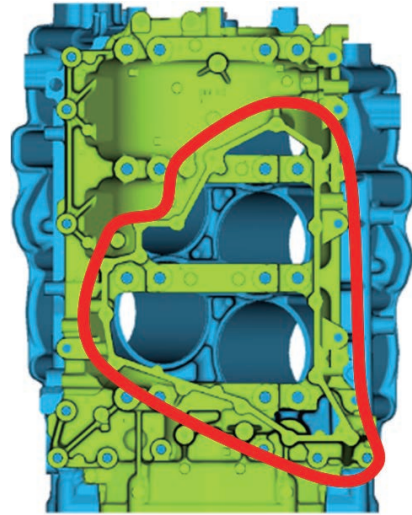


図4 クランクケース形状

その他、上記2点以外にも適合など性能担当者を筆頭にエンジンのポテンシャルを最大限引き出すべく粘り強く開発を進め、機能的な課題との背反を見ながら整合させることで、出力だけでなくエンジン全体で高次元のバランスを実現することができた。

3-2. 音圧レベル低減開発

昨今の船外機において、騒音レベルが低いことも重要な商品性の一部である。出力開発が最大の課題ではあったが、船外機から発生する音圧レベル低減の開発も並行して行った。本船外機にて発せられる音圧の主要因子を調査し、吸気音の寄与が特に大きいことが確認された。対策にはレゾネータ機能を含むサイレンサ追加とした。しかし、サイレンサの吸気抵抗起因による出力低下、消音性能を得るための容積確保のレイアウト制約、複雑な形状に対応する製造的な課題も開発一丸となり各種要件を成立させた(図5)。

さらに、排熱ファンの出口経路となるモールディングエアダクトとカウルの間に吸音材を入れることで、排熱ファンによる騒音の低減を図った。また、ボトムカウルに制振材を追加することで、ボトムカウルの振動により発生する音を抑制した。

音圧レベルについては厳しい制約の中でも商品として成立する領域まで作りこんだが、今後の開発機種においてはさらに高い品質が求められていく技術領域である。今回開発で得た静粛性向上の知見は次の開発に生かし、さらなるレベルアップを図っていきたい。

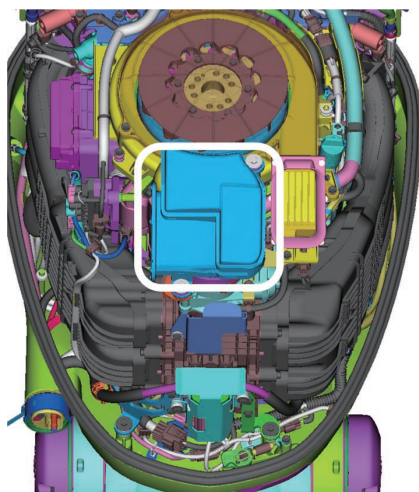


図5 レゾネータ機能付きサイレンサ(白枠内)

3-3. ロワーASSY

ロワーASSYについては、3-1-2の駆動ロス低減の箇所でも触れたが、「F350A」(6AW)ベースか、「F300F」(6KA)ベースの2択(図6)があったが、6KAベースの場合は、大きなメリットがあり、本命案とした。具体的には、“低ロス馬力”、“軽量(約7.5kg)”、“低コスト”、“新規部品の少なさ”、“プロペラ選択肢の広さ”などである。背反は、ギヤの耐久性であり、“50馬力増”の350馬力相当のトルクに対する耐久信頼性が要求される。そこで、開発初期に耐久評価を行い、見極めを行っていった。最終的には、ギヤ材料の品質バラつきを抑えるために、鑄造手法をインゴット鑄造方式から連続鑄造方式に変更して、非金属介在物の量とサイズを低減させることで、本仕様を採用することができた。結果として、本鑄造方法の改善手法は、同材料を使用する当社のギヤ全体の品質向上にもつなげることができた。

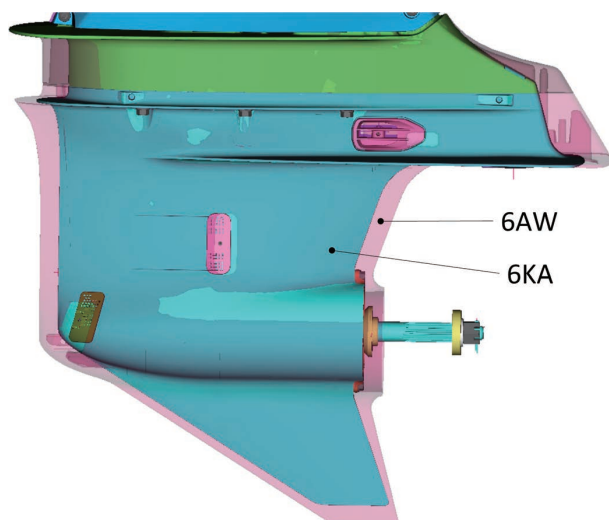


図6 ロワーASSY 比較

4 おわりに

本モデルは、350馬力帯において圧倒的な軽量、ハイパフォーマンスを実現することができた。今後5年、10年、世界中の人々に使っていただき、多くの人々のマリナライフに貢献していくことになると思う。その時、お客さまが笑顔になっていることを願うとともに、今後もさらに良い製品を開発していきたい。

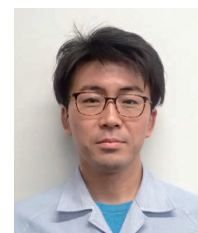
■著者



笠井 慎也
Shinya Kasai
マリン事業本部
開発統括部
PJT 設計部



大石 真也
Masaya Oishi
マリン事業本部
開発統括部
機能実験部



中村 圭佑
Keisuke Nakamura
マリン事業本部
開発統括部
機能実験部

フィッシングボート「YFR330」

Fishing boat “YFR330”

児島 慎平 服部 孝史 勝又 弘貴 八木 美教 チョン ジェフン

山下 航輝 杉山 智哉 伏屋 志緒梨 筒井 健



(本稿に掲載する写真や図は試作艇のものであり、生産仕様とは異なる場合がある)

Abstract

Fishing boats are a category that continues to show unwavering popularity in the Japanese pleasure boat market. Yamaha Motor Co., Ltd. (hereinafter Yamaha Motor) has continued to provide attractive products over many years with a rich lineup and technological development. In particular, the “YFR Series” of saltwater lure fishing models equipped with outboard motors is the core of the fishing lineup, and with the huge success of the “YFR-24¹⁾” and “YFR-27²⁾”, it has become a major brand recognized by many fishing fans.

The “YFR330 (hereinafter ‘this model’)” is a newly developed boat equipped with our new flagship outboard motor “F450A” as the largest 30-foot class boat in the “YFR Series”. Until now, there have been very few outboard motor fishing boats over 30 feet in the domestic market. It was a great challenge to develop a boat that takes greater advantage of the characteristics of outboard motors and then propose it to the market, but we have been able to introduce a new product to the market by utilizing the synergy between the fishing boat development know-how we have built up over the years and advanced technologies such as propulsion systems.

1 はじめに

日本国内のプレジャーボート市場において、フィッシングボートは不動の人気を誇るカテゴリーである。「ヤマハ発動機株式会社（以下当社）」でも、充実したラインナップと技術開発により、長年にわたって魅力ある商品を提供し続けてきた。とりわけ船外機を搭載する外洋ルアーフィッシングモデルの「YFR シリーズ」は、フィッシングラインナップの中核を担うものであり、「YFR-24¹⁾」「YFR-27²⁾」の大ヒットによって、多くのフィッシングファンから認められる一大ブランドとなった。

そして今回、当社の新しいフラッグシップ船外機「F450A」を

備え、「YFR シリーズ」最大となる30フィートクラスとして新たに開発したボートが、この「YFR330 (以下本モデル)」である。

これまでの国内市場においては、30フィートを超える船外機フィッシングボートは極めて例が少ない。船外機の特徴を生かしたボートを開発し、市場へ提案することは非常に大きな挑戦であったが、長年にわたって築いてきたフィッシングボートの開発ノウハウと、推進システムをはじめとする先進技術とのシナジーによって、新製品を市場導入するに至った。

1)「YF-24」(2011)、「YFR-24」(2015)、「YFR-24 EX」(2018)

2)「YFR」(2014)、「YFR-27 EX」(2018)、「YFR-27HMEX」(2022)

2 開発の概要

2-1. ターゲット

本モデル最大のターゲットは、「YFR-27」からのサイズアップを望むボートフィッシングファンである。日本各地の市場調査を踏まえ、「YFR シリーズ」がこれまで重視してきた立ち姿勢のルアー釣り(タイラバ・ジギング等)を、本モデルでも引き続きメインの釣法と想定している。一回の釣行人数は、4名から5名以内が大半である。ユーザーは本格的でハイレベルなフィッシングボートを志向しており、釣りに特化した“ギア”として本モデルを開発することとした。

2-2. 主要諸元

本モデルの主要諸元を表1に示す。

表1 主要諸元

全長	10.10m
全幅	2.99m
搭載エンジン	F450AVT2U
燃料タンク容量	650L
定員	10名
航行区域	限定沿海

本モデルは当社外洋フィッシングボートの中核である「YFR-27」と「DFR 33」の間を埋めるポジションを担い、30フィートクラスの手長を持つ。全長については、船外機両サイドまで張り出したトランサムデッキにより、33フィート相当のサイズを実現している。全幅についても「YFR-27」と「DFR 33」の中間付近だが、これは生産隻数や供給体制と機能性のバランスを求めた結果であり、陸送面を考慮した寸法となっている。

主機には当社最大出力(330.9kW)の船外機である「F450A」の一機掛けを選択した。ボート開発視点からの船外機のメリットについては後の章にて解説するが、本モデルでは船外機の良さがフィットする環境のお客さまに向けて、ディーゼル船内機とは異なる新たな選択肢を提供することを重視した。推進器には、ディーゼル線内機と船外機、さらに船外機の1機掛け、2機掛けなど、各々の特徴がある。今回のケースでは、大馬力船外機の一機掛けによる本モデル独自のポジションや特長が、お客さまにとって良い選択肢になると考えた。

2-3. 開発の狙い

全国の市場調査結果とこれまでの経験・知見を基にユーザーニーズの分析を進めた結果、本モデルでは、目的地までの

“快適な移動”と“釣りやすさ”を製品開発の絶対的な柱とした。具体的には以下の3点である。

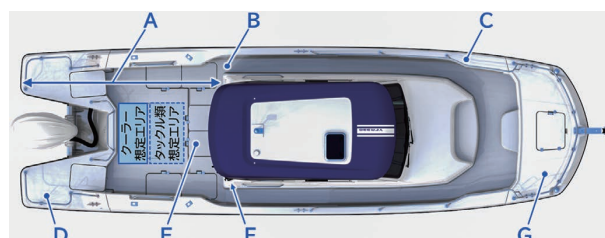
1. 外洋を速く快適に走ることができる
2. 風・波・暑さ・降雨など、外的要因による心身の負担が少ない
3. 釣り場での煩わしい作業やストレスを軽減できる

これらの特性を高めることで、様々なシチュエーションでも安心して出航でき、短い移動時間でポイントに到達し、疲労感やストレスなく釣りに没頭する時間をより多く提供できるボートが実現可能と考えた。一方で、小型艇中心に船外機が普及している日本の市場においては、30フィート以上のクラスに求められる“快適な移動”と“釣りやすさ”を船外機艇で実現することは困難、との見方も存在している。我々開発陣に課せられた使命は、この常識を覆すボートを具現化することとも言えた。

3 「YFR330」の特徴

3-1. デッキレイアウト

本モデルにおいてデッキレイアウトが担う役割は、“釣りやすさ”の実現である。そのポイントを図1に示す。



部位	達成レベル／フィーチャー
A アフト釣り座	・ 上位船内機艇比150%の前後長 ※当社フィッシングボートで最長
B サイド通路	・ 段差レスにより通行性を向上 ※「YFR/DFR シリーズ」を通じて初
C ブルワーク	・ オープンガンネル ³⁾ をバウまで拡大し、立ちやすさと 艀装性を向上 ※「YFR/DFR シリーズ」を通じて初
D トランサムデッキ	・ 既存艇比135%の広さ ・ ホールド性と乗降性を向上した新形状のアフトレール ・ ロッドホルダーを多数艀装可能なモータウェルレール (オプション)
E アフトデッキ	・ イケスハッチ2枚化による動線確保および開閉性改善 ・ クーラーやタックル類を並べやすいレイアウト
F アフトステーション	・ 航海計器や操船機器の艀装性と操作性に優れる レイアウト
G パウデッキ	・ スクエアバウ ⁴⁾ ・ 既存艇比138%の広さ

3) 舷端部材の裏が開放されており、蹴込みを有する構造

4) 船首平面形を角型とし、デッキ面積を拡大する形状

図1 デッキレイアウトの特徴

今回、主な被代替艇となる「YFR-27」の評価は非常に高く、その最大の理由が船外機両側に配置されたトランサムデッキであった。従って本モデルも、この“船外機一機掛け+大型トランサムデッキ”の形式を採用している。結果、本モデルは当社フィッシングボートで最長のアフトデッキ釣り座を有するに至った。これはアングラー同士が距離を保って立てることにつながるため、ラインが交錯するなどのトラブルを避けやすく、より釣りやすい環境を提供できる。

そのほか、各部の機能・配置・形状を細部にわたって見直し、どこに立っても使いやすく、どこを通っても安心して動きやすい、当社フィッシングボートの集大成と言えるレイアウトを実現している。

3-2. 室内レイアウト

本モデルでは、主要想定人数である4～5名の“快適な移動”にフォーカスして室内の機能向上を図った(図2)。



図2 室内レイアウト

ポイントは大きく三点ある。

1点目が、座席の快適性である。特に奥行き方向の寸法に注目し、背中を預けてリラックスした姿勢で座れるスペース確保に、5名全ての席で配慮した(図3)。



図3 座席レイアウトの改善点(右舷後席の例)

2点目は、冷房能力の強化である。「F450A」の高い充電能力を生かしてエアコンの冷房能力を強化したほか、ボート側にも冷房効果をサポートする工夫が盛り込まれている(図4)。



図4 エアコン効果を高める艇体の工夫

3点目が、視界である。操船席・助手席については前方視界が良好なのはもちろんのこと、リンク式ワイパー⁵⁾採用によって荒天時の払拭範囲を広げ、収納時の視界障害範囲を無くすることで、あらゆる状況での視界ストレス軽減に努めた(図5)。後席に関しても外の様子を見やすい窓のデザインを採用し、乗員の快適性を高めている(図3)。

5) 左右を機械的リンクにより同調させて作動するワイパー



図5 リンク式ワイパーのメリット

また、“快適な移動”と“釣りやすさ”に集中すべく、ハウバー⁶⁾は収納の役割に特化させ、最小限のスペース配分とした。とはいえ船外機艇ならではの配置として左舷シート下にミドルバース⁷⁾を設けることで、1名が横になったり長物を収納したりできる場所を補完し、使い勝手を確保している(図6)。

6) フロント窓より前方にあるバース。一般に「バース」は就寝場所の役割を持つ区画を指すが、プレジャーボートでは多機能スペースとして使われる場合も多い。

7) 船体中央の床下に設けたバース



図6 ミドルバース(左舷シート下)

3-3. 船型・航走特性

本モデルが狙う“快適な移動”と“釣りやすさ”を実現するため、船型開発を重点領域の一つに位置付け、徹底的な取り組みを行った。本モデルの船型の特徴を図7に、主要な航走特性と開発結果を図8に、風流れ特性の詳細を図9に示す。

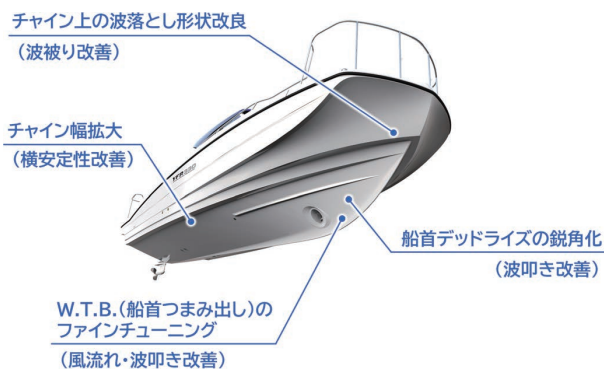


図7 船型の特徴

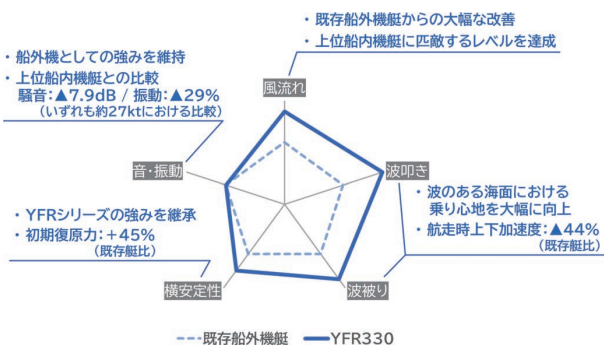


図8 主要な航走特性と開発結果⁸⁾

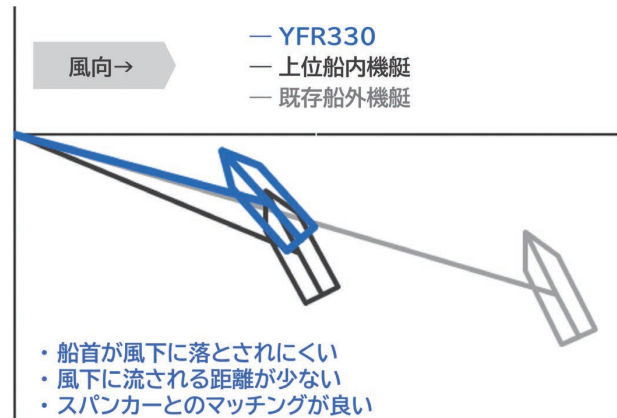


図9 風流れ特性(スパンカー装着時)⁸⁾

波のある海面をより乗り心地良く走るには、“波叩きの小ささ”と“波被りの少なさ”が重要な特性である。本モデルでは、従来から「YFR シリーズ」の強みであった横安定性の良さを維持しつつ、凌波性⁹⁾の飛躍的向上を果たしている。船外機の良さである“素直で安心感のある操船性”や、“追い波でも不安を感じにくいフィーリング”“良好な巡航時の振動・騒音特性”とも併せ、軽快かつ自然で快適な乗り心地を実現した。また、釣り場において重要な風流れ特性は、上位船内機艇に匹敵するレベルを達成した。

これらの成果は、既存船外機船型の拡大のみでは達成不可能であったと言える。30フィート級のボートでは、乗り心地と安定性など各種特性のバランスのとり方が、既存の小型ボートとは異なるためである。

我々は航走特性開発用のプロトタイプを建造し、“海を走っては直す”を繰り返すことで、この課題に対応してきた。ベース船型の完全刷新に始まり、細部形状に至るまで改善を繰り返した取り組みが、この結果につながっている。船外機のメリットは、ここでは船型の自由度として生かされた。つまり、エンジンスペース・シャフト・舵・プロペラなどの制約を受けず、目指す特性を追求した船型を存分に作り込むことができたのである。

8) ある一条件における計測結果であり、参考値である。

9) 波のある海面を安心快適に航走できる特性。波叩きの小ささと波被りの少なさから構成される。

3-4. その他の特徴

快適装備の増加や、各種電子デバイスの統合制御が進む昨今のトレンドにより、ボートに搭載されるバッテリーや電子機器は増加の一途を辿っている。

本モデルでは、船外機ならではの床下配置性を生かし、新たにバウ側にバッテリースペースを設け、電装区画も配置することで、重量重心の適正化や配線ルートの合理化、メンテナンス

の容易化を図っている。当社船外機の「HM-EX」をはじめとする今後の進化にも対応できるよう、各スペースにはさらなる余裕も残している(図10)。

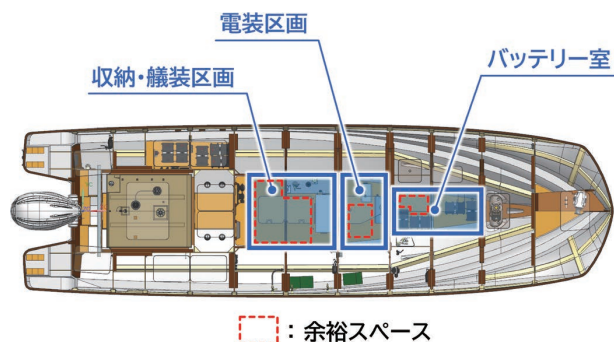


図10 フロア下区画の活用

また、当社マリン事業では“海の価値をさらに高める企業へ”というビジョンの下に、環境負荷の低減を積極的に進めている。2022年から導入が始まっているバイオマス樹脂を使用したハッチは、その一例である。本モデルではこのハッチの採用をより積極的に進めることで、環境負荷のさらなる低減に取り組んでいる(図11)。

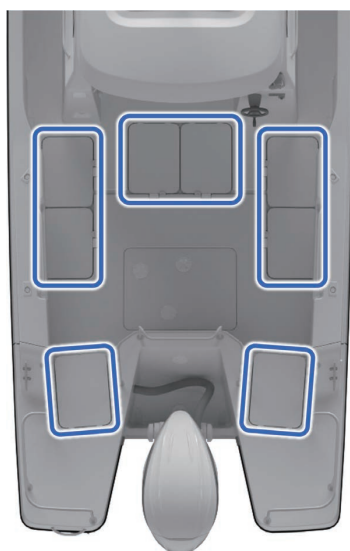


図11 バイオマス樹脂ハッチ採用箇所

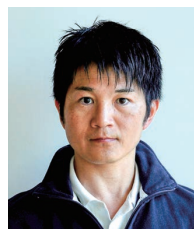
4 おわりに

推進器をはじめとする各種デバイスの進化・統合により、ボートの在り方は大きく変わりつつある。それは“先進アイテムを載せさえすれば、どのボートも同じ”という意味ではない。これからは、先進アイテムを生かし、艇体とのシナジーで価値を最大化していくボートが求められると考える。多様な推進器それぞれに良さがある中、本モデルでは、最新船外機ならではの

特徴を生かした“快適な移動”と“釣りやすさ”が、ユーザーの新たな選択肢につながると想定して開発を進めてきた。本モデルが、船外機とヤマハボートに対する理解をさらに深めていただくきっかけとなることを願う。

また、「YFR330」は成熟したフィッシングボート市場のニーズに応える商品であるため、一見するとディテールの小改善や単なるサイズアップに終始した商品と見られてしまうかもしれない。本稿によって、推進器・デバイスの進化へ対応し、この先のさらなる進歩も見据えた外洋向けフィッシングボートのフロントランナーたる姿を知っていただけると幸いである。今後も艇体と推進器のシナジーによる価値を創造し、マリンフィールドにおける感動創造の場を提供していきたい。

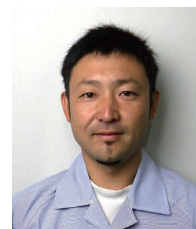
■著者



児島 慎平
Shimpei Kojima
マリン事業本部
企画統括部
事業企画部



服部 孝史
Takafumi Hattori
マリン事業本部
国内事業推進部
開発部



勝又 弘貴
Hiroki Katsumata
マリン事業本部
国内事業推進部
開発部



八木 美教
Yoshinori Yagi
マリン事業本部
国内事業推進部
開発部



チョン ジェフン
Jung Jaehoon
マリン事業本部
国内事業推進部
開発部



山下 航輝
Koki Yamashita
マリン事業本部
国内事業推進部
開発部



杉山 智哉
Tomoya Sugiyama
マリン事業本部
国内事業推進部
開発部



伏屋 志緒梨
Shiori Fuseya
マリン事業本部
国内事業推進部
開発部



筒井 健
Takeshi Tsutsui
ロボティクス事業部
技術統括部
先行開発部

船位方位保持機能を持つ操船支援システム「Y-FSH」を搭載した「DFRシリーズ」の開発

Development of the “DFR Series” Equipped with the “Y-FSH” Steering Assist System Featuring Boat Position and Direction Holding Function

池田 拓 福山 美洋 井原 博英 内藤 健司 鶴羽 巧



Abstract

Fishing culture is deeply ingrained in Japan, and Yamaha Motor Co., Ltd. (hereinafter referred to as “the Company”) has long been supported by boat users throughout the country. Among our product lineup, the “DFR Series”, equipped with a diesel inboard motor, stands as the flagship model for fishing boats. It is widely recognized by many users for its exceptional navigability and fishing functionality.

In boat fishing, it is essential to drop traps at precise locations, but the boat’s position and direction often shift due to wind and currents. To maintain the boat’s position and direction at the targeted spot, users must constantly steer and shift, a complex and cumbersome task requiring frequent adjustments based on the changing wind and currents.

To address this issue, the Company, in collaboration with Toyota Motor Corporation, developed the “Y-FSH” steering assist system, which uses rapidly advancing electric and automated technology. This system features a function that maintains the boat’s position and direction, allowing users to focus more on fishing. The Y-FSH system is installed in all three “DFR” models¹⁾.

1) “DFR-33” (2017), “DFR-36HT” (2019), “DFR-36FB” (2019)

1 はじめに

日本には釣り文化が深く根付いており、ヤマハ発動機株式会社（以下、当社）のボートは全国のボートユーザーから支持を頂いている。中でも、ディーゼル船内機を搭載する「DFRシリーズ」は卓越した航走性と釣り機能性の高さから多くのユーザーに広く認知されるフィッシングボートのフラッグシップである。

ボート釣りでは狙ったポイントに仕掛けを落とすことが求められるが、風向・潮流の影響で船位・方位は変化し続ける。狙ったポイントで船位・方位を保持するためにはユーザーによる操

舵・シフト操作が求められるが、風向・潮流によっては頻繁に調整を行わなければならない煩雑な操作であった。

近年、急速に進化する電動・自動化技術を活用し、ユーザーが今まで以上に釣りに没頭できる船位方位保持機能を持つ操船支援システム「Y-FSH（ワイ・フィッシュ）」をトヨタ自動車株式会社（以下、トヨタ）と共同開発し「DFR」全3モデル^{1)[1][2]}へ搭載した。

1) 「DFR-33」(2017)、「DFR-36HT」(2019)、「DFR-36FB」(2019)

2 開発の狙い

国内のボート釣りは釣り場を固定せず潮とともに流す“流し釣り”と、釣り場を固定した“かかり釣り”が主流である。

まず“流し釣り”では図1矢印のスパンカーを船尾に装着し、その向きを調整することで船首を目標方位で保持する。図2で示す当社独自の微速操船装置 FSR(フィッシングサポートリモコン)/SSR(スーパースローリモコン)を組み合わせることで、風速にかかわらず船を流す速度を調整することが可能であるが、スパンカー使用の際は以下の動作が必要であり、操作性の向上が求められていた。

- ・ 釣り場を移動する際のスパンカーの開閉
- ・ 船首向き調整のためのスパンカーの調整
- ・ 高架下を航走する際のスパンカーの着脱



図1 船尾に立てる帆 スパンカー



図2 微速操船装置 FSR(左)/SSR(右)

次に、“かかり釣り”では図3のように風向潮流より船位を予測して10kgを超えるアンカーを投入する。アンカー投入には以下の課題を抱えていた。

- ・ 熟練者でも狙った漁場にピンポイントにアンカリングできない
- ・ 重いアンカーの揚げ降ろしで体力を消耗する
- ・ アンカーが岩場に噛み付く、またはロープが異物に巻き付くリスクがある

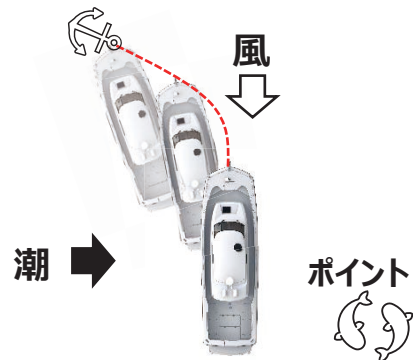


図3 ポイントを狙ったアンカー投入時の船の流れ

Y-FSH は、以下2点による“さらなる釣りへの没頭”を狙い開発した。

- ・ 前述の操作性向上および課題解消
- ・ スパンカーレス/アンカーウインチレスによるデッキ上の釣りスペース増加

3 開発の取り組み

3-1. Y-FSH システムと機能

Y-FSH システムのベースには技術交流のあるトヨタの操船支援システム「TVAS」を採用し、船内機である「DFR シリーズ」へ制御設計を実施した。各海象での風速/風向/潮流データを取得解析し、台上試験と実地評価を繰り返すことで「DFR」の船型・機関・釣りでの使い方に合わせた図4のシステムを構築した。

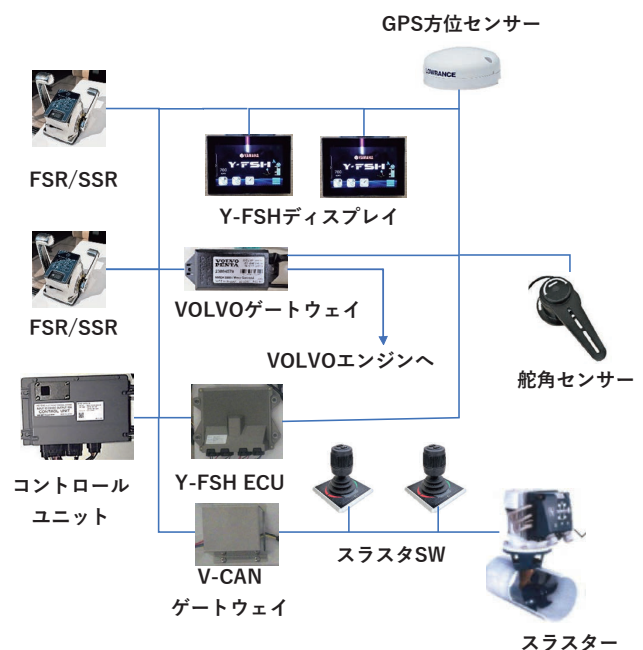


図4 Y-FSH システム図

船位方位保持機能を持つ操船支援システム「Y-FSH」を搭載した「DFR シリーズ」の開発 Development of the "DFR Series" Equipped with the "Y-FSH" Steering Assist System Featuring Boat Position and Direction Holding Function

潮流に合わせた“流し釣り”ができるようFSR/SSRとの連携も考慮した。全操船席にY-FSH操作パネルを用意しユーザーの使い勝手を向上するとともに、部品・配置を「DFR」3モデル共通化することで材料費・加工費低減に加え品質安定を図った。

Y-FSHの機能はe-COMPASS(コンパス)モードとe-ANCHOR B/S(アンカー)モードに大別される^[3]。

e-COMPASSモードは船首を指定した方位に保持する機能であり、流し釣りでのスパンカーに相当する。GPS・スラスターを用いて方位を制御するため、気象条件やモデルの制約なく方位を360°設定・調整可能である。図5にe-COMPASSモードでの操船画面を示す。操作画面は直感的に理解できるアイコンとしタッチパネルによる操作性も考慮した。

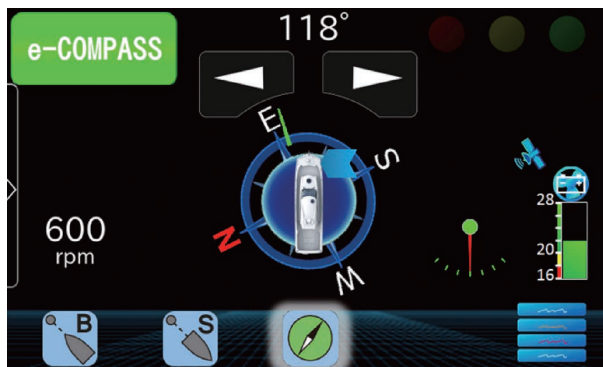


図5 e-COMPASS モード 操作画面

図6にe-COMPASSモードでの船の動きを示す。スパンカーでは方位保持ができない海象においても指示した方位保持が可能となり、FSR/SSRと組み合わせることで誰でも簡単に流し釣りを楽しむことができる。



図6 e-COMPASS 設定時 船の動き

e-ANCHOR B/Sモードは、B(船首)またはS(船尾)を一定範囲内で船位を保持する機能であり、従来の“かかり釣り”におけるアンカー投入に相当する。容易に任意の位置で船を固定できるため、釣りのみでなく花火鑑賞等にも利用可能である。e-ANCHORモードはB(船首)を立てるモードとS(船尾)を立てるモードを用意し、図7の通り、使い分けを考慮した操作画面図7に示すように、B/Sを一目で判断できるアイコンとした。

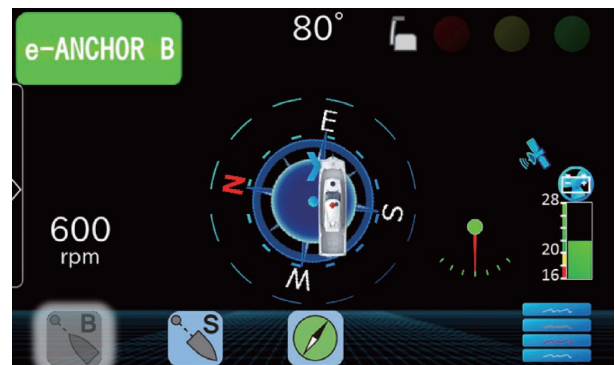


図7 e-ANCHOR B モード 操作画面

図8にe-ANCHOR Bモード設定時、風・潮流変化による船の動きを示す。アンカー投入によっても同様の効果は得られるが、e-ANCHORはボタンを押すだけでアンカー同等の機能を発揮する。

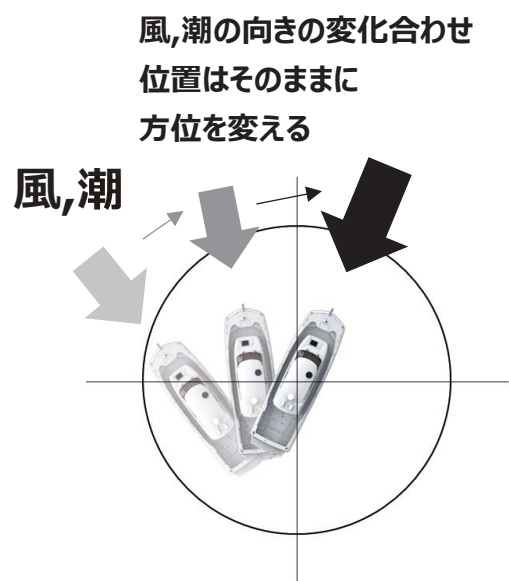


図8 e-ANCHOR B 設定時 船の動き

3-2. Y-FSHの「DFRシリーズ」実装評価

当社では台上評価に加え、評価艇を用いて100項目を超える定型評価を実施している。「DFR」から初実装となるY-FSHの

船位方位保持機能を持つ操船支援システム「Y-FSH」を搭載した「DFR シリーズ」の開発 Development of the “DFR Series” Equipped with the “Y-FSH” Steering Assist System Featuring Boat Position and Direction Holding Function

性能検証のため、前述の定型評価に加え、図9の海域において広範囲かつ長期間にわたる実地評価を実施した。その結果、各海域で Y-FSH が目指す機能を発揮できることが確認された。

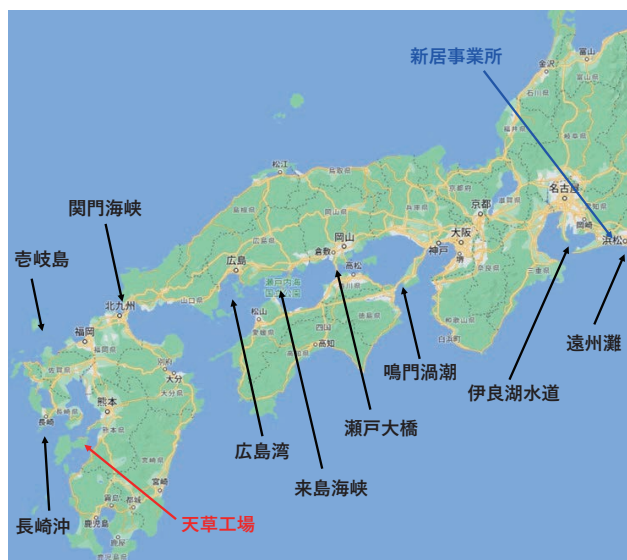


図9 「DFR36FB」 評価ポイント

また新機能の Y-FSH と、現行機能であるスパンカーやアンカーを同等条件で比較した。スパンカーの目的は風上へ船首を向けることであり、スパンカーを備えた「DFR」の航跡(図10)からはスパンカーだけでは船首方位を保持できない海象が存在することが分かる。図11の新機能の e-COMPASS モードでは図10と同日・同海象での評価において、船首を狙った方位に保持し続けていることが分かる。

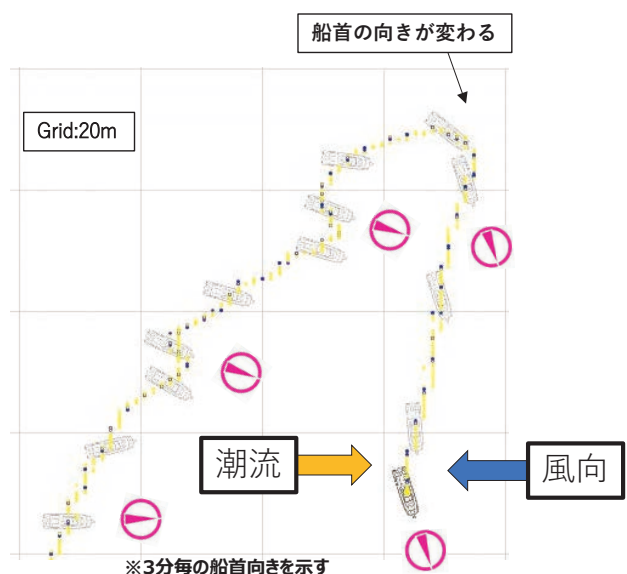


図10 スパンカーでの船首向きの変化

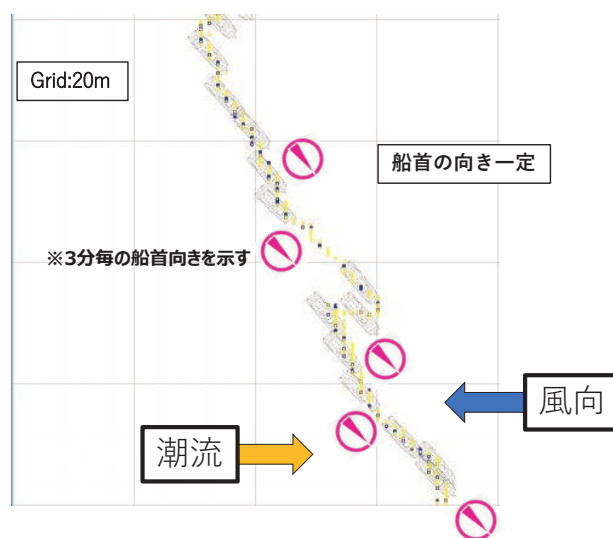


図11 e-COMPASS での船首向きの変化

3-3. 評価艇の建造と開発日程

通常、船の建造は10m クラスでは連続生産で2カ月半、評価艇では3カ月程度の期間を要する。「DFR33」「DFR36HT」「DFR36FB」は同工場／同ラインで生産するため同時生産ができず、1隻ずつ評価艇を建造すれば、製造に加え評価も長期になることが明白であった。

また、開発評価艇と現行生産艇も同工場／同ラインで生産するため、3隻の評価艇を建造すれば市場へ供給する現行生産艇の数が減少することにつながる。

そこで、開発部門で保有する「DFR33」「DFR36HT」を改造し先行評価を行うことで、必要な開発評価艇の建造数を減らし、効率の良い開発かつ計画通りの市場供給を行うことができた。

4 おわりに

今回開発した Y-FSH は当社が長期ビジョンに掲げるマリン版 CASE^[4] を国内ボート製品へ展開した第一弾の商品である。全国のボートショーでの展示会／試乗会での販売店様・お客さまの声より、Y-FSH によるスパンカーレス、アンカーウインチレスがユーザーの“さらなる釣りへの没頭”につながることを確信した。これからもボートユーザーがさらなる感動を体験できる製品やシステムの開発を続けていく。

■参考文献

- [1] 馬上 隆之：フィッシングボート DFR, DFR-FB; ヤマハ発動機技報 2014 No. 50 https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/publish/pdf/browse/50ss05.pdf
- [2] 福山 美洋：フィッシングボート「DFR-33」; ヤマハ発動機技

船位方位保持機能を持つ操船支援システム「Y-FSH」を搭載した「DFR シリーズ」の開発 Development of the “DFR Series” Equipped with the “Y-FSH” Steering Assist System Featuring Boat Position and Direction Holding Function

報 2017 No. 53 https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/product/pdf/browse/53ss09.pdf

[3] Y-FSH 機能紹介 ; <https://www.youtube.com/watch?v=k8sPt9KyrHo&t=120s> (アクセス日:2024/06/10)

[4] ヤマハ発動機企業サイト 新中期経営計画(2022-2024)
<https://global.yamaha-motor.com/jp/profile/mtp/pdf/2022/2022medium-plan.pdf>

■ 著者



池田 拓
Taku Ikeda
マリン事業本部
国内事業推進部
開発部



福山 美洋
Yoshihiro Fukuyama
マリン事業本部
開発統括部
先行開発部



井原 博英
Hirohide Ihara
マリン事業本部
国内事業推進部
開発部



内藤 健司
Takeshi Naito
マリン事業本部
国内事業推進部
開発部



鶴羽 巧
Takumi Tsuruha
マリン事業本部
国内事業推進部
開発部(執筆時)

「WaveRunner FX Series, VX/GP Series」の開発

Development of the “WaveRunner FX and VX/GP”

原田 直樹 鈴木 正吉



Abstract

In recent years, the usage of PWC (Personal Water Craft) has diversified, with an increasing number of customers focusing on convenience and enjoying music while cruising. As a result, expectations for LCD meters and speakers have risen. To meet these needs, the 2025 models will feature added functionality in the meters and high-volume, high-quality speakers in the flagship “FX Series” (hereafter referred to as “FX”) and the recreational/performance “VX/GP Series” (hereafter referred to as “VX/GP”). By collaborating with Yamaha Corporation on the speakers, we aim to provide customers with additional value through a premium music experience.

1 はじめに

近年 PWC (Personal Water Craft) においては、使われ方が多様化しており、特に利便性や音楽を楽しみながらのクルージングを重視するお客さまが増加しているため、液晶メーターやスピーカーへの期待が高まっている。こうしたニーズに応えるため2025年モデルでは、フラッグシップモデルの「FX Series」(以下「FX」)ならびにレクリエーション／パフォーマンスモデルの「VX/GP Series」(以下「VX/GP」)にメーターの機能追加と大音量・高音質のスピーカーを搭載した。スピーカーについてはヤマハ株式会社と協業することで、プレミアムな音楽体験を通してさらなる価値をお客さまに提供することを目指した。

2 開発の狙い

前述のとおり市場でのメーターやスピーカーに対する要求の高まりを受け、2025年モデルの「FX」ならびに「VX/GP」では電装装備に焦点をあてた開発を行った(図1)。

「FX」ではメーターに対するソフトウェア機能の追加により、

市場で好評を得ている7インチメーターに、画面デザインの追加とオーディオ音量自動調整を追加することでレベルアップを目指した。

「VX/GP」ではメーターに Bluetooth を搭載することで、オーディオ操作や着信通知機能など近年のトレンドとなる機能を追加した。

また「FX」ならびに「VX/GP」ではヤマハ株式会社と協業することで、大音量・高音質でワンランク上の音楽体験を提供する。



図1 モデル概要

3 メーター開発

3-1. 「FX Series」

「FX」は2022年モデルから7インチタッチパネル式の液晶メーターを採用し、視認性と操作性の高さから市場で好評を得てきた。2025年モデルではさらなる使い勝手の向上を目指し、従来モデルをベースに以下の機能を追加した。

1. 選択可能な画面デザイン(図2)
2. オーディオ音量自動調整

2025年モデルではメーター表示のデザインを Modern、Sports、Classic の3種と Dark、Light の2つのカラーの計6種を搭載し、走行シーンやお客さまの好みに合わせて選択可能とした。

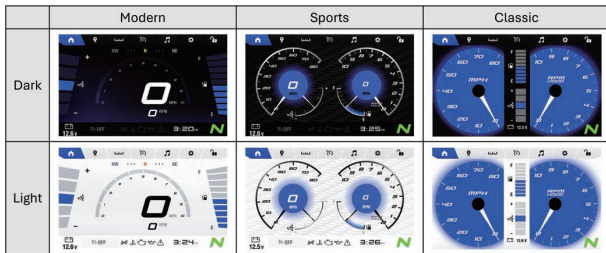


図2 「FX」ホーム画面

オーディオ音量自動調整はエンジン回転数に応じて音楽の再生音量を変化させる。これにより高速時には大きな音量に、低速時には小さな音量に調整されるため、手動による音量調整の頻度を低減できる。

3-2. 「VX/GP Series」

「VX/GP」では2021年から4.3インチ液晶メーターを採用してきたが、2025年モデルでは主に以下の機能を追加した。

1. Bluetooth によるオーディオ操作
2. スマートフォンからの着信・SMS 通知
3. 電源管理機能／アクセサリモード

これらの機能は上位モデルである「FX」に2022年から搭載したところ、利便性の高さなどが市場で好評だったため本モデルにも採用した。画面サイズや地図機能の有無で上位モデルとの差別化をしつつも、2025年モデルのセールスポイントであるオーディオ関連機能は上位モデルと同一とし、音量自動調整機能も採用した(表1)。

表1 「FX」と「VX/GP」のメーター機能比較

モデル名	FX	VX/GP
画面サイズ	7インチ	4.3インチ
タッチパネル	○	—
GPS スピードメーター	○	—
地図	○	—
通話	○	—
着信・SMS 通知	○	○
オーディオ操作	○	○
音量自動調整	○	○
電源管理機能	○	○
アクセサリモード	○	○

機能の追加にあたり、視認性・操作性のポイントである画面デザインにも注力して開発した。このモデルでは1つのメーターで、ファミリーユースが中心の「VX」とスポーツモデルの「GP」の2モデルに使用するため、「VX」にはフレンドリーで視認性の高いデザインを、「GP」にはモーターサイクルのイメージを取り入れたスポーティーなデザインを採用した(図3)。



図3 「VX」(左)と「GP」(右)のホーム画面

さらにホーム画面以外も一新し、クルーズコントロール機能にあたる「Drive Control」は従来モデルより容易に設定できるように配置や操作感を工夫した(図4)。



図4 オーディオ画面(左)と Drive Control 画面(右)

4 スピーカー開発

4-1. 開発背景

PWC では昨今スピーカーの純正搭載が進んでおり、当社も2021年モデルからスピーカー搭載モデルを導入してきた。2025年モデルでは、さらなる大音量・高音質化を狙い、ヤマハ株式会社との協業で「WaveRunner」専用のスピーカーを開発した。

市場で求められている大音量・高音質なスピーカーを実現するために、以下の2点を重点課題とした。

1. 艇体意匠と調和した大型の筐体・スピーカーユニット
 2. 「WaveRunner」に最適化した音質を実現するための Digital Signal Processor (以下 DSP) とチューニング
- 次項ではこれらを実現するために取り組んだ内容を紹介する。

4-2. デザイン

屋外で高速走行する PWC では、特性上低音域の音が聞こえにくくなるため、迫力ある低音を実現するには大型の筐体が必要となる。意匠と性能を両立するために、デザインはヤマハ株式会社デザイン研究所が担当した。

外観はスピード感を表現するために、製造上の難易度は上がるもののエッジをアピールした形状を取り入れた。また性能を最大化するために平行面がない形状とすることで内部共振の発生を抑える設計とした。

グリル中央部のツイーターカバーには“YAMAHA”のプレミアムオーディオを訴求するためにシルバーのヤマハ株式会社の音叉マークを配置した(図5、図6)。



図5 スピーカー単品イメージ



図6 「GP」用スピーカー

4-3. ハードウェア設計

スピーカーを開発するにあたり、高い信頼性の確保と大音量・高音質の実現を重点開発ポイントとした。

4-3-1. 高い信頼性の確保

転覆時の水没等を想定して、筐体全体でシールする完全防水構造を採用した。また水没による温度変化や内部圧力変化に耐えられるように、ウーファの振動板やダンパーなどの内部部品も専用設計し、使用する材料も複数の試験の上で決定した。

耐衝撃性を向上するためにはウーファの軽量化が重要であるため、マグネットには通常使用されるフェライトではなくネオジムを採用した。その結果フェライトの約半分の重量で同等以上の性能を達成した(図7)。

設計当初の仕様		軽量化仕様	
マグネット	フェライト	マグネット	ネオジム
重量	1075g	重量	550g (-525g)

図7 設計当初の仕様と軽量化仕様のウーファー比較

4-3-2. 大音量・高音質を実現する基本設計

大音量・高音質を実現するためにウーファの直径を従来の4.5インチから6.5インチに大型化した(図8)。

また電力消費を抑えるために高効率アンプ基板を開発したことで、消費電力を増やすことなく大音量化を実現した。

従来モデル	2025年モデル
ユニット径：4.5inch	ユニット径：6.5inch

図8 従来モデルとのサイズ比較

4-4. ソフトウェアとチューニング

スピーカーの音質は筐体やユニットなどのハードウェアと、それらを活かしコンセプトにあった音作りを実現するチューニングによって決定される。

ヤマハ株式会社と協業することの強みとして、以下の2点が挙げられる。

1. ヤマハ株式会社製 DSP「AVP-3」の採用
2. 認定されたチューニングエンジニア“サウンドマイスター”によるチューニング

「AVP-3」を搭載することで様々な音作りが実現でき、特に走行環境下で聞き取りにくくなる小さな音を Dynamic Range Control(以下、DRC)によって増幅することで走行中でも聞き取りやすい音作りを実現した(図9)。

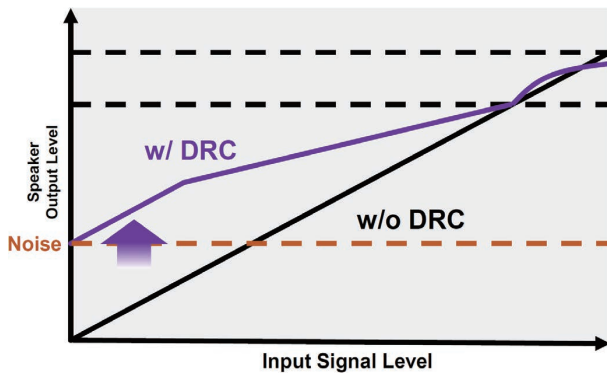
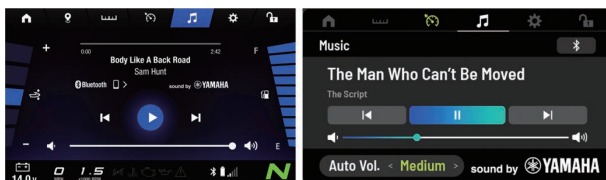


図9 DRC のイメージ

屋外を高速走行するモビリティのチューニングはヤマハ株式会社にとって初めての試みであったが、認定されたチューニングエンジニア“サウンドマイスター”が繰り返し走行することで最適な音質を作りこんだ。メーターのオーディオ操作画面にはヤマハ株式会社が手掛けたサウンドが再生される証として、“sound by YAMAHA” のロゴを表示した(図10)。



sound by  YAMAHA

図10 オーディオ操作画面の“sound by YAMAHA”

5 おわりに

近年のメーターやスピーカーといった付加装備への関心の高まりを受けて、メーターの機能追加などによりトレンドを取り入れた今回の開発は「WaveRunner」の商品性向上に寄与できたと考える。

スピーカーにおいては、過酷な条件下で使われる PWC 部品の開発経験がないヤマハ株式会社との協業であったが、両社の技術を結集することで高い信頼性とヤマハ株式会社でしか実現できない大音量・高音質スピーカーを開発することができた。

2つの“YAMAHA”がコラボレーションしたからこそ実現できたプレミアムな音楽体験をお客さまに提供できることを誇りに感じる。

■ 著者



原田 直樹
Naoki Harada
マリン事業本部
開発統括部
WV/ 海外ボート開発部



鈴木 正吉
Masakichi Suzuki
YMMC¹⁾
Tech Portfolio
Development Division

1) YMMC: Yamaha Motor Manufacturing Corporation of America

「WaveRunner New JetBlaster」の開発

Development of the “WaveRunner New JetBlaster”

森江 厚志 野寄 歩 袴田 涼介



(本稿に掲載する写真や図は試作艇のものであり、生産仕様とは異なる場合がある)

Abstract

The entry-level model of the watercraft “WaveRunner”, known as the “EX”, was added to the lineup in 2017 as the new compact platform following the “FX” and “VX series”. Subsequently, in 2019, a lightweight and high-performance variant “EXR” was introduced as a derivative model, and in 2022, it was upgraded to the “JetBlaster” to enhance maneuverability by adding a nozzle trim mechanism that allows for adjustments to the watercraft’s position while navigating. To date, the model has been well received in the market, offering user-friendly features appropriate for an entry-level model while also delivering sufficient performance and high reliability. However, due to changes in market trends, a full model change including a platform renewal for the first time in eight years was implemented to further evolve the fundamental performance and expand design possibilities. This paper introduces the newly transformed “New JetBlaster series”.

1 はじめに

水上オートバイ「WaveRunner」のエントリー向けモデル「EX」は、「FX」「VX シリーズ」に続く新規小型プラットフォームとして2017年にラインナップに追加された。その後、2019年には軽量かつ高出力版の「EXR」を派生モデルとして追加し、2022年にはノズルトリム機構追加により航走時の艇体姿勢を変更できるようにすることで、運動性を高めた「JetBlaster」にアップグレードした。これまで、エントリーモデルに相応しい使い勝手の良い部分もありながら、十分な性能と高い信頼性で市場に受け入れられてきた。しかし、市場トレンドの変化から、

さらなる基本性能の進化とデザインの可能性を広げるため、8年ぶりにプラットフォームの刷新も含めたフルモデルチェンジをした。本稿では、新しく生まれ変わった「New JetBlaster シリーズ」について紹介する。

2 開発の狙い

2-1. 企画概要

コンセプトとしては、従来モデルに対して守りと攻めの観点から大きく2種類の方向性を目指した。守りとしては、従来の強みである使い勝手や安定性をさらに高めた“Evolution of EX”を

コンセプトに掲げた LTD /DLX /ベースモデルの3タイプを設定した。攻めとしては、“Fresh style and More Fun” のコンセプトのもと、次世代の「JetBlaster」に相応しい魅力的なスタイリングと運動性を高めた PRO モデルを設定した。さらに幅広い市場要求に対応するために、エンジン出力と定員の仕様組み合わせを変更することにより、計6種類(表1)のラインナップとした。また、「EX」という名称を廃止し、すべて「JetBlaster」に統合した。

表1 モデル一覧

モデル名称	定員	エンジン
JetBlaster PRO	3	TR-1 HO (80.9kW)
JetBlaster LTD	2	
JetBlaster DLX	3	TR-1 (74.6kW)
JetBlaster	2	

2-2. デザイン

プラットフォーム初となるフルモデルチェンジでは、市場トレンドを鑑み、“Sleek and Lightweight”“Tough and High-Performance”“Scalability” をスタイリングコンセプトとした(図1)。

キャラクターラインは直線を基調とした構成で、大きくダイナミックな流れを感じさせる造形とした。ステアリング下部を大きく貫通させることで、軽量で軽快なイメージを表現した。また、デッキ間を大きく前後につなぐフレームは剛性感を表現しており、Lightweight と Tough を両立させたデザインとした。

上位の PRO モデルにおいては、従来の「JetBlaster」同様に、アルミを露出させたネイキッドスタイルのステアリングを採用し、専用のメタリック調フレームがそのスタイルを強調している。さらに、着色ボルトやグリップエンドなどの装飾品が、他バリエーション以上のプレミアム感を演出している。



図1 初期スケッチ

2-3. 開発目標

企画コンセプトを達成するために、以下の3項目を開発目標と定めた。

1. 従来の SMC (Sheet Molding Compound) デッキをベースとしたスタイリングを一新し、軽快感と剛性感を両立させる。
2. 旋回特性を向上させながら、テールスタンドなどの運動性を進化させる。
3. モデルバリエーション間の仕様差を広げることで、幅広い顧客層を獲得する。

下記にフィーチャーマップを示す(図2、3)。

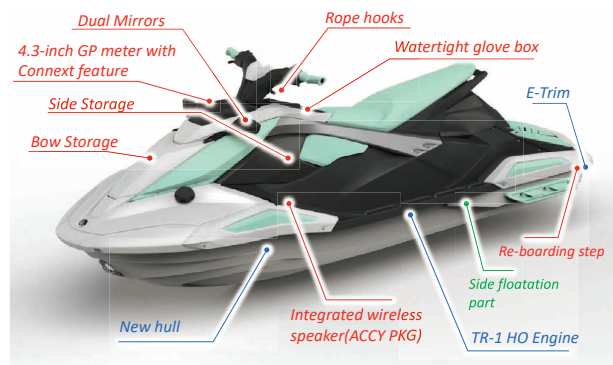


図2 フィーチャーマップ (JetBlaster LTD)



図3 フィーチャーマップ (JetBlaster PRO)

3 艇体開発の取り組み

3-1. デッキ

本モデルでは、革新的なデザインを実現させるために、形状の自由度に制限のある SMC 工法を用いた一体成型のデッキ構造から、インジェクション成型を用いたバウ(前側)、ミドル(中央)、スタン(後側)の三分割デッキ構造に変更した。(図4)。



図4 新旧デッキ比較(左:従来、右:新)

インジェクション成型による利点は、デザインだけではなく、エルゴノミクスの改善にも寄与している。フットウェルの深さを従来モデルよりも深くすることで、操船者は窮屈感を感じることなく、快適なライディングを楽しめるようにした。また、リボーディンググリップ(図5)をスタンデッキ部に一体形状で設けることで、水面から乗船が容易にできるように配慮した。

従来機種ではデッキとハル(船体部品)は接着されており、それにより防水と固定の両機能を持たせていたが、本モデルでは利便性の向上を目的に、発泡フォームによるシールと、ボルトナットによる締結構造を採用した。これにより、従来モデルではできなかったデッキの取り外しが可能になっている。ミドルデッキを取り外すことで開口部を大きく確保できるため、エンジンなどの艇体内にある部品に対する作業性が改善している。さらに、ミドルデッキ側面にはアクセスホールを設けてあり、ヒューズ交換等の作業は、デッキの取り外しなしでも行えるように考慮されている。なお、構造変更後においても水入りに対する信頼性では従来機種同等のテスト基準をクリアしている。

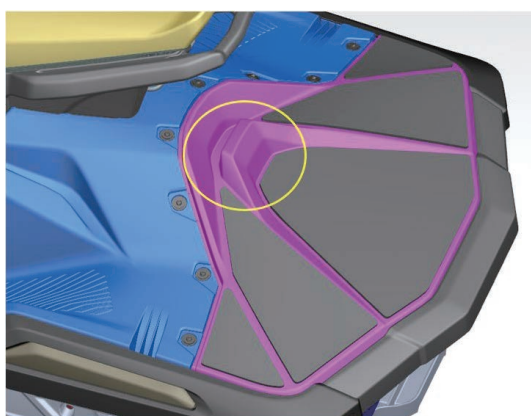


図5 リボーディンググリップ

3-2. ハル

航走時の軽快感を高めるために、従来の「EX」ハルの航走特性を残しつつ、全長を115mm 短くした(図6)。

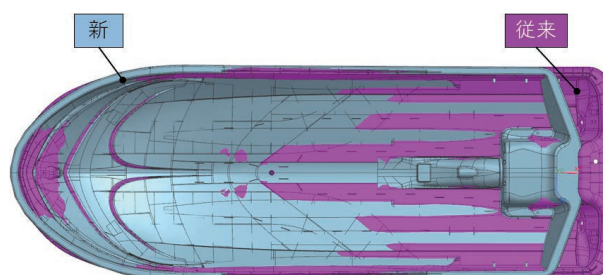


図6 新旧ハル全長比較

PRO モデルでは、電動トリムの角度を6度大きくしたことにより、横旋回だけではなく、テールスタンド(図7)などの3次元的な動きもできる軽快な艇体に仕上がっている。



図7 テールスタンド航走

3-3. ステアリング

PRO 以外のモデルでは、エントリーモデルに適したマイルドなハンドリング特性にするために、ステアリングケーブルの可動範囲を変更した。これにより、PRO モデルのアグレッシブな乗り味との差別化をした。

ステアリングシャフト部には、すでに「FX」で採用されている係留用フックを設けることで、栈橋等で保管する際の利便性を向上させた(図8)。

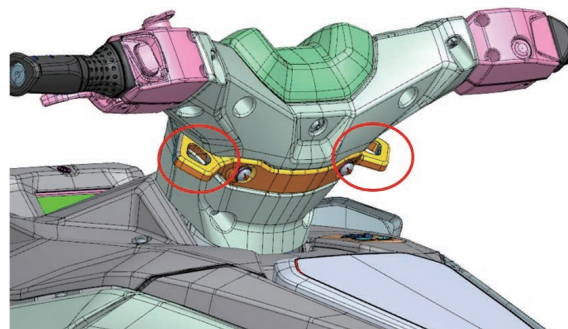


図8 係留フック

3-4. モデルバリエーション

従来の「EX」の強みでもあった航走時の安定性を保つため、3人乗りモデルにおいては、Body Stabilizer と呼ばれる部品を新規に導入した。2人乗り仕様の Sponson に比べ、全長と全幅を広げて排水量を増やすことで、動的・静的ともに安定性の向上に寄与している(図9)。

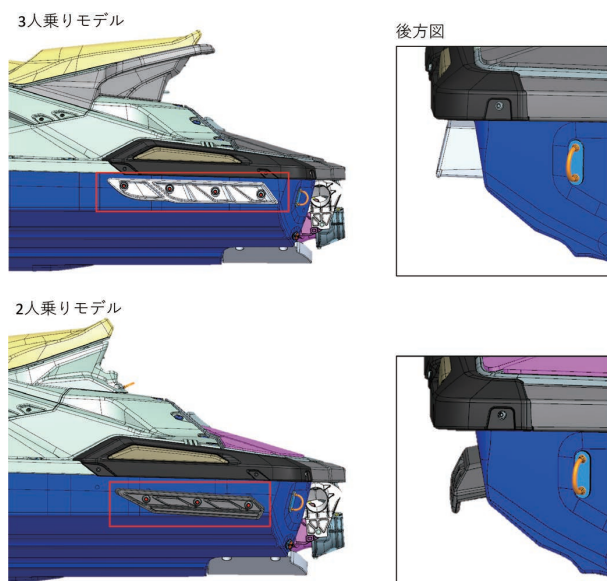


図9 Body Stabilizer (3人乗り)と Sponson (2人乗り)形状比較

LTDモデルでは、サイドストレージ(図10)を追加することで、約20Lのストレージ容量を増やした。DLX(3人乗り)でも採用されているバウストレージと併せて、総容量としては、従来の「EX」に対して約4.5L 大きくなっている。



図10 サイドストレージ

3-5. ジェットポンプ

航走性能を達成するだけでなく、軽量化とサービス性の改善を行った。軽量化に関しては、部品構造の変更と材料構成を

最適化することで、従来の「JetBlaster」と比較して3.8kg(従来比22%)の軽量化を達成した。サービス性においては、従来まではシリコンで防水していた部品合わせ面を、ゴムシールに変更することで組立性と交換性を改善した(図11)。

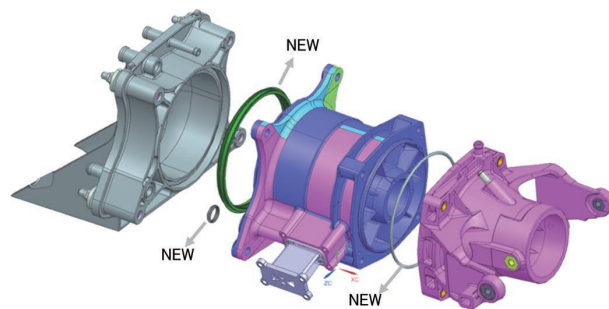


図11 ジェットポンプ構造

3-6. メーター

上位モデルである PRO と LTD では、すでに「GP」と「VX」で導入されている4.3インチカラー液晶を採用することで、エントリーモデルでありながら、高い視認性と操作性に寄与している。さらに新規 GUI(Graphical User Interface)を導入することで、よりスポーティーな印象に仕上げた(図12)。



図12 メーター画面

3-7. 制御

PRO モデルでは、エンジン保護の目的でテールスタンド制御を新たに追加した。これにより、テールスタンド航走を規定時間続けると、自動的にノズルトリム角を変更することで艇体姿勢も下がるため(図13)、操船者はエンジンの状態を気にすることなく、ライディングに集中することができる。

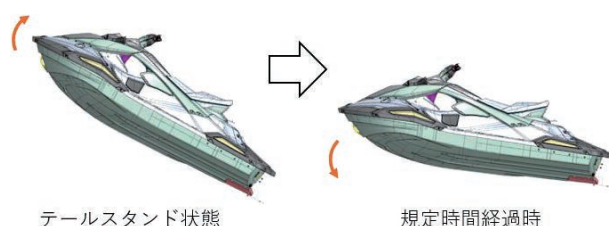


図13 テールスタンド制御

4 おわりに

「JetBlaster シリーズ」として生まれ変わった初の「EX」プラットフォーム更新において、従来の「EX」のよい部分を進化させつつ、一方で、今までとは違う新しいデザインを確立するというコンセプトに沿った製品を開発することができた。デッキの開発においては、従来通りのSMCを採用するという議論もあったが、樹脂インジェクションデッキという新しい挑戦をすることで、お客さまへの価値提供の幅を広げるだけでなく、今後の製品開発の拡張性の幅も広げることができた。今後も既存の手法にとらわれず、お客さまから選ばれるような商品開発をしていきたい。

■ 著者



森江 厚志
Atsushi Morie
YMMC¹⁾
Product Development
-Water Vehicle



野寄 歩
Ayumu Nozaki
マリン事業本部
開発統括部
WV / 海外ボート開発部



袴田 涼介
Ryosuke Hakamata
マリン事業本部
開発統括部
WV / 海外ボート開発部

1) YMMC: Yamaha Motor Manufacturing Corporation of America

2025年モデル ROV「WOLVERINE RMAX4」の開発

“WOLVERINE RMAX4” 2025 Model ROV

植木 勇一 日高 史博 田中 大輔



Abstract

The ROV (Recreational Off-Highway Vehicle) market has strong demand across a wide range of applications, including agricultural work, dairy farming, recreation activities like hunting and trail driving, as well as sports driving, particularly in North America. Its demand is expected to continue growing in the future. Yamaha Motor Co., Ltd. (hereafter referred to as “the Company”) has been developing and releasing the “VIKING”, “WOLVERINE”, and “YXZ series” since 2013 to cover these diverse applications. The Company promotes ROVs under the brand slogan “The Ultimate Outdoor Adventure Partner” and focuses on helping customers “Realize Your Adventure” through the best three Cs: Capability, Comfort, and Confidence. The “Wolverine RMAX (hereinafter “RMAX”) series” (“RMAX2” and “RMAX4 Compact”) was launched in 2020 for recreational use and received positive feedback from customers. As a minor change model for 2025, the Company has updated it to enhance functionality and comfort while ensuring durability. Additionally, the Company has introduced the “RMAX4”, which improves rear-seat comfort and off-road capability on rugged terrains and steep inclines, as a model focused on enhancing Capability and Comfort. Here, the Company will present the development details of the “RMAX4” along with the improvements incorporated into the 2025 “RMAX series” models. The series is shown in Table 1.

1

はじめに

ROV (Recreational Off-Highway Vehicle) 市場は、北米を中心に農作業や酪農作業、狩猟やトレイルドライブなどのレクリエーション、スポーツ走行など幅広い用途で高い需要があり、今後も需要の拡大が見込まれている。ヤマハ発動機株式会社（以下当社）は、この幅広い用途をカバーするため、2013年から「VIKING」「WOLVERINE」「YXZ シリーズ」を開発・発売している。当社は、ブランドスローガン “The Ultimate Outdoor Adventure Partner” を掲げ、ROV をプロデュースしている。Best 3C (Capability, Comfort, Confidence) でお客様の

“Realize Your Adventure” に取り組んでいる。

「Wolverine RMAX (以降「RMAX」) シリーズ」(「RMAX2」、 「RMAX4 Compact」) は2020年にレクリエーション用途で発売され、お客さまから好評を博した。今回、2025年のマイナーチェンジモデルとして、耐久性を確保しつつ、機能性と快適性を向上させてアップデートした。さらに後席快適性と波状路や急坂登坂の走破性を向上させた「RMAX4」を Capability/ Comfort の向上モデルとして新たにラインナップに追加した。ここに「RMAX4」の開発内容とともに、2025年「RMAX シリーズ」に織り込んだ改良点を合わせて紹介する。同シリーズを表1に示す。

表1 2025年「RMAX シリーズ」

RMAX4	RMAX2	RMAX4 Compact
ロングホイールベース 4シートモデル	2シートモデル	ショートホイールベース 4シートモデル
		

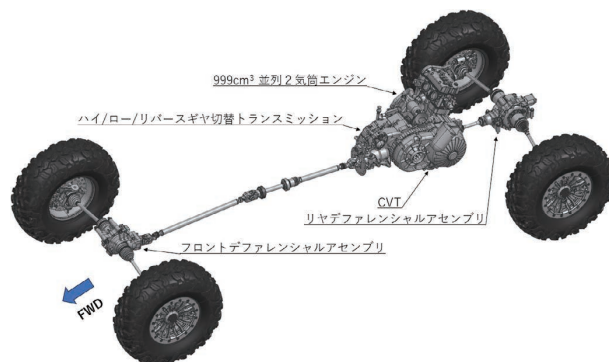


図1 パワートレインレイアウト

2 開発の狙い

主に US 東海岸に多いタイトな林間トレイルを家族で快適に楽しめる従来の「RMAX4 Compact」に対し、「RMAX4」では US 西海岸に多い、広いトレイルや急坂にて大人4名が乗車しても余裕をもって快適に走行できるモデルを目指した。“Serious pursuit of outdoor adventure with friends and RMAX at the west coast.”を本モデルのコンセプトとして設定し、従来の「RMAX シリーズ」を使用しているお客さまからの改良要望について対応を織り込んだ、下記項目を主要な狙いと定めた。

1. 友人との最高のアドベンチャー体験を提供できる
2. 冒険欲を刺激する多種多様なトレイルを不具合なく自信を持って走破できる
3. 高い所有感を持つ

3 開発の取り組み

前述の開発の狙いを達成するため、主に下記4項目に取り組んだ。

1. フロント駆動システムの差動機構の切り替え性能向上
2. リヤ駆動システム変更によるターフ機能の追加
3. 後席快適性向上と走破性向上
4. ユーザーインターフェースの改良

3-1. パワートレイン概要

従来の「RMAX シリーズ」の駆動系は、フロントにスイッチ操作で切り替えられるデフロック機構を備えたデファレンシャルアセンブリと、リヤには常時直結式のギヤアセンブリを搭載している。本モデルでは、これらのシステムに大幅改良を加え、車両としての機能性・快適性を向上させた(図1)。

3-1-1. フロントデファレンシャルアセンブリ

フロントデファレンシャルアセンブリは、2WD/4WD/ デフロックの3モードを以前より搭載している。悪路や登り急勾配の斜面では必要に応じてドライバーがデフロックモードへスイッチを切り替えることで、内部メカシステムがデフロック状態へと遷移する。これは、スプライン嵌合により左右車軸の差動を制限することで実現しているが、機構保護を目的として、切り替え時に車速の制約を設けている。この制約により、ドライバーのモード切り替え意志にシステムが即座に対応できず、切り替えに時間を要する場面があった。

この差動機構の切り替え性能における課題に対し、本モデルでは新システム開発により、切り替え条件の制約を大幅に緩和することで、ドライバーの意志に限りなく近い切り替えを実現した。具体的な手段として、スプライン仕様を大きく見直すことにより強度と嵌合性能を向上させた。これにより切り替え時の車速制約の大幅な緩和が可能となり、切り替えシステムとしての性能を高めている。

上記の車速設定にあたっては、開発において市場での切り替え状況やドライバーマインドを解析した。ここから適切な評価条件を作り込み(図2)、これに合致する設計仕様を選定した。結果として、本システムでは十分な信頼性を確保したままで、従来のモデルに対して差動機構の切り替え性能を飛躍的に向上させた。これにより、ドライバーは、よりテクニカルな路面へも自信や安心感をもってトライできるモデルとなっている。



図2 想定切り替え状況の一例

3-1-2. リヤデファレンシャルアセンブリ

従来モデルでは、リヤ駆動システムには差動機構がなく、オフロード走行には適していたが、最小回転半径や芝生（ターフ）等のデリケートな路面への対応の観点では改良の余地があり、市場からの改善要望でもあった。また、本モデルでのロングホイールベース化による最小回転半径の増大への対応も必須であるため、差動機構を有するリヤデファレンシャルアセンブリを新規開発し、リヤのみの駆動でかつ左右差動が可能なターフ機能を追加した。当社のRVモデルとして初となる本リヤデファレンシャルアセンブリは、従来モデルのリヤギヤアセンブリと同等のサイズ／車体レイアウトで実現した。特に内部ギヤ／ケース強度、ブリーザ機能の作り込みにおいてはCAE（Computer Aided Engineering）解析／単体台上評価を活用し、限定されたレイアウトの中で十分な信頼性を持つシステムを成立させた（図3）。

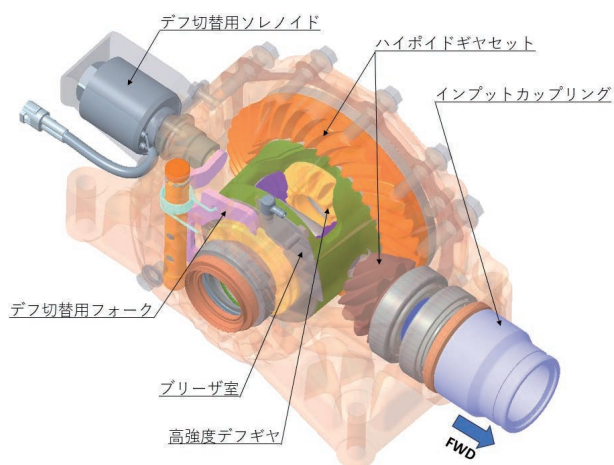


図3 内部構造透視図

3-2. 車体概要

“後席の快適性”と“走破性向上”のために、従来の「RMAX」のプラットフォームを活用しつつ、車両サイズや各コンポーネン

トの見直しを行った。その結果、“Proven off-road”を高次元で達成し、お客さまがより過酷なオフロードで快適に冒険を楽しめる車両となった。

3-2-1. 後席シートレイアウトおよび車両サイズ

「RMAX4」については、人間工学に基づいたシートレイアウトおよびフットレストレイアウトを実現することで、走行時のみならず、乗降性の向上にも寄与した（図4）。

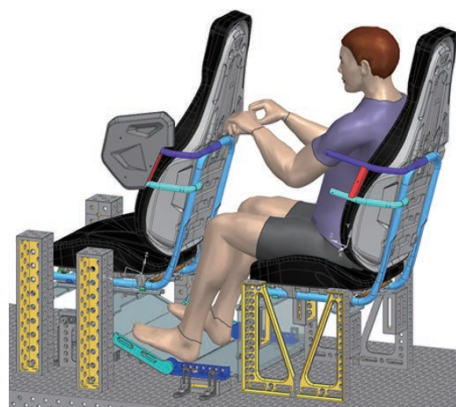


図4 3Dモデルを用いたレイアウト検討

特に、足元のスペースの拡大は、走行時の快適性に大きく寄与していると考え（図5）。フットレスト形状では、靴底での踏ん張りを効きやすくするために足先が上がる傾斜面を広く設け、さらに凹凸形状を追加することでグリップ力を強化した。ハンドホールドは、フロントパッセンジャー用を採用し、新レイアウトに応じて、ポジションの最適化を行った。これらにより、走行時の快適性ととも、大きな安心感を提供することができていると考える。

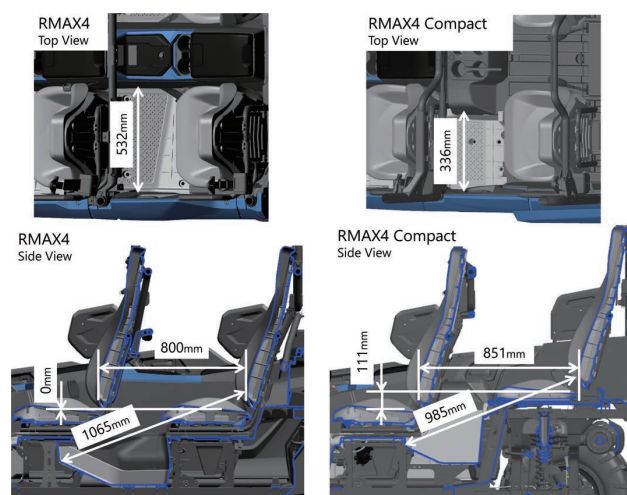


図5 シートおよびフットレストレイアウト

リヤのベッドエリアは、「RMAX2」を流用し、部品の共通化を極力図ることで、金型費用の低減に貢献した。また、その流用によって、リヤサスペンション固定位置が後席シートより後方に移動した。これにより、「RMAX4 Compact」に比べ、サスペンションのボトム時の突上げ感が軽減され、快適性を大幅に向上できている。

また、「RMAX2」に比べてホイールベースを800mm延長し、ロングホイールベースにしたことで、直進安定性の向上、ピッチングの抑制、険しいトレイルでの信頼性も得ることができた(図6)。

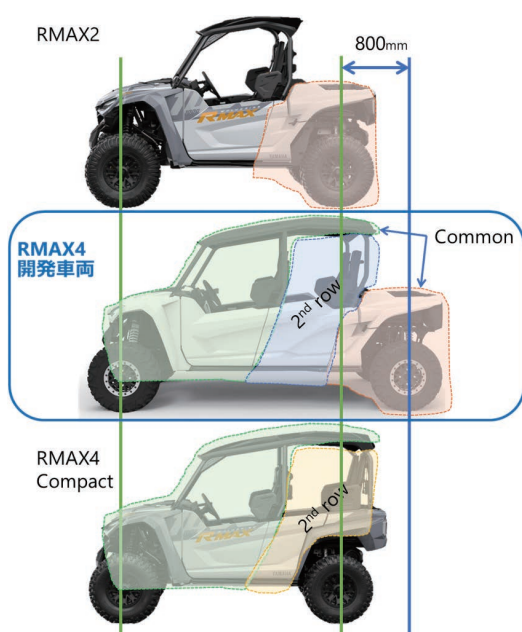


図6 車格比較

3-2-2. EPS (Electric Power Steering)

従来の「RMAX」に対して、EPS 性能を示す一つであるアシストトルクの大幅アップ(29.8Nm → 66Nm)を図った。岩場やデフロックが必要な走行シーンにおいても、軽いステアリング操作とポジティブなフィードバックを実現し、ドライバーの疲労軽減とともに、車両のコントロール性向上に大きく寄与している。

選択可能な3つのモードは、オフロード走破性を最大限に引き出すとともに、ドライバーの好みに合わせたステアリングフィーリングを選択できる柔軟性を持つ(図7)。

HIGH MODE では、ドライバーがリラックスして走行できるよう、超軽量フィーリングを作り出し、操舵の負担を軽減した。STD MODE では、軽量フィーリングとタイヤからのフィードバックのバランスを重視し、様々なシチュエーションで使いやすくした。LOW MODE では、スポーツ走行時の選定を想定し、直進走行時のタイヤからのフィードバックを感じやすいようにした。



図7 手元で切り替え可能な EPS モードスイッチ

3-2-3. BRAKE

前述の通り、快適性と走破性の向上のために行った車両サイズの見直しにより、車両重量が増加する結果となった。これに見合ったブレーキ効力を実現するべく、ブレーキシステムの見直しを行った(図8)。新規ブレーキキャリパーの採用により、キャリパー単体の剛性アップ、ブレーキパッドの適正化を実施した。新システムは、十分なブレーキ効力を確保するとともに、ファーストタッチのフィーリング向上、ブレーキノイズの低減をもたらした。これらは、快適性と走破性の向上にも大きく寄与している。

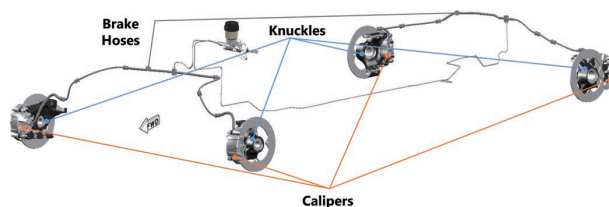


図8 ブレーキシステム概要

3-3. ユーザーインターフェース概要

品質感や所有感の向上を目指し、センターディスプレイやオーディオのアップデートとともに、スピードメーターに TFT 液晶 (Thin-Film Transistor Liquid Crystal Display) を採用した。

3-3-1. TFT スピードメーター

4.3-inch のフルカラーの TFT 液晶を新規に開発し、LE (Limited Edition) 仕様に設定した。表示スタイルをお客さまの好みや気分に合わせて “Classic” “Sports” “Adventure” の3種類から、色についても “Light” “Dark” “Blue” から選択することができる(図9)。操作ボタンの構成／配置についてもお客さまが直感的に簡単に操作できるよう再検討し、操作時のボタンのクリック感にもこだわりながら開発した。


	“Classic”	“Sports”	“Adventure”
Light			
Dark			
Blue			

図9 TFT メーター表示スタイル

4 おわりに

米国の開発拠点との協力により、「RMAX4」は後部座席の快適性と、波状路や急坂の走破性を大幅に向上させたモデルとして開発されシリーズに追加された。そして、2025年の「WOLVERINE RMAX シリーズ」は、全モデルにおいて信頼性を損なうことなく、より快適で走破性の高いシリーズモデルとなった。

その結果、これら2025年「RMAX シリーズ」は多様なトレイルを快適に走破し、家族や友人とともに自信を持って冒険を楽しむことができるようになった。

変化する市場の要求に応え、お客さまの期待を超えるモデルを提供できるよう、市場の声を常に聞きながら開発を継続していく。今後の新製品および改良モデルにご期待いただきたい。

■ 著者



植木 勇一
 Yuichi Ueki
 PF 車両ユニット
 PF 車両開発統括部
 OV 開発部



日高 史博
 Fumihiko Hidaka
 PF 車両ユニット
 PF 車両開発統括部
 OV 開発部



田中 大輔
 Daisuke Tanaka
 パワートレインユニット
 プロダクト開発統括部
 第2PT 設計部

速度監視ユニット「RCX3-SMU」(機能安全認証)の紹介

Introduction of the “RCX3-SMU” Speed Monitoring Unit (Functional Safety Certified)

上野 賢治 三重野 幸介 磯野 真滋 坪井 康太郎 保科 大樹
荒澤 聖人 堀田 敦 西村 祐樹 中西 菜緒



Abstract

Yamaha Motor Co., Ltd.'s Robotics Business Unit (hereafter referred to as “the Company”) has introduced a range of industrial robots to the market, including SCARA robots developed for the in-house production lines of motorcycles, single-axis robots, Cartesian robots, and the next-generation transport robot Linear Conveyor Module, which is based on the concept of “minimizing idle time in transport processes to zero.” These robots have consistently contributed to the automation of production equipment in various industries, including the assembly of electronic components and the transportation of automotive parts. In recent years, due to factors such as labor shortages and rising labor costs across various industries, the demand for automation has rapidly increased, leading to continuous growth in the demand for industrial robots. Along with this trend, the market’s demand for safety from robot manufacturers has intensified. In response, the Company is introducing the “RCX3-SMU” Speed Monitoring Unit, the first of Yamaha’s industrial robot products to receive functional safety certification, developed to support the design of production equipment with enhanced safety features.

1 はじめに

ヤマハ発動機(株)ロボティクス事業部(以下、当社)では、モータサイクルの社内生産ライン向けに開発したスカラロボットをはじめ、単軸ロボット、直交ロボット、そして“搬送工程の無価値時間を限りなくゼロへ”をコンセプトとした次世代搬送ロボットである「リニアコンベアモジュール」といった産業用ロボットを世に送り出している。これらのロボットは、電子部品の組み立てや車載部品の搬送など、様々な業界における生産設備の自動化に貢献し続けている。

近年、様々な業界で労働力不足や人件費の高騰などの理由から、自動化のニーズが加速し、産業用ロボットの需要は増大

の一途をたどっている。それに伴い、市場からのロボットメーカーへの“安全性”の要求がより一層高まっている。このような状況を受けて、より安全性の高い生産設備設計を支援するために開発した、当社の産業用ロボット製品として初めての機能安全認証取得製品である速度監視ユニット「RCX3-SMU」について紹介する。

2 機能安全

危険源そのものを取り除きリスクをゼロにすることを“本質安全”と呼ぶのに対し、付加的な機能によって人や環境へのリスクを除去、もしくは許容できるレベル(=安全な状態)まで低

Introduction of the "RCX3-SMU" Speed Monitoring Unit (Functional Safety Certificated)

減することを“機能安全”と呼ぶ。機能安全対応には、安全な状態を達成または保持するための“安全機能”と、Fail-Safeのための“診断機能”が必要とされる。その性能はパフォーマンスレベル(以下PL)¹⁾やセーフティインテグリティレベル(以下SIL)²⁾など、国際規格で定義されている。

「RCX3-SMU」は認証機関 TÜV SÜD による機能安全認証を取得している。「RCX3-SMU」が備える安全機能は PL d / SIL 2の安全性能を有しており、ISO 13849-1³⁾や IEC 61508⁴⁾といった国際規格の要件に則ったプロセス(図1)、技法や措置を用いて開発されている。

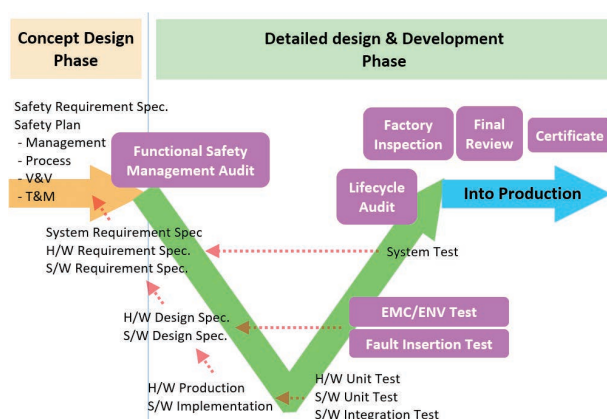


図1 開発プロセス

- 1) パフォーマンスレベル(PL): ISO 13849-1で定義される安全度を表す数値
- 2) セーフティインテグリティレベル(SIL): IEC 61508で定義される安全度を表す数値
- 3) ISO 13849-1: 制御システムの安全関連部に関する国際規格
- 4) IEC 61508: 電気・電子・プログラマブル電子システムの機能安全に関する国際規格

3 製品の概要

当社の産業用ロボット製品は、お客さまが設計、製作する生産設備の部品として使用される。生産設備には十分な安全性が要求されるが、「RCX3-SMU」はその安全性実現を支援するための製品である。

「RCX3-SMU」は、当社のロボットコントローラ「RCX340」と3軸以上のロボットと組み合わせた構成で使用する。「RCX3-SMU」と「RCX340」の間は専用通信ケーブル、ロボット位置信号ケーブル、電源ケーブルにて接続する。非常停止ボタンや安全PLC(Programmable Logic Controller)などの周辺安全機器の信号は「RCX3-SMU」に入力されるように配線する(図2)。

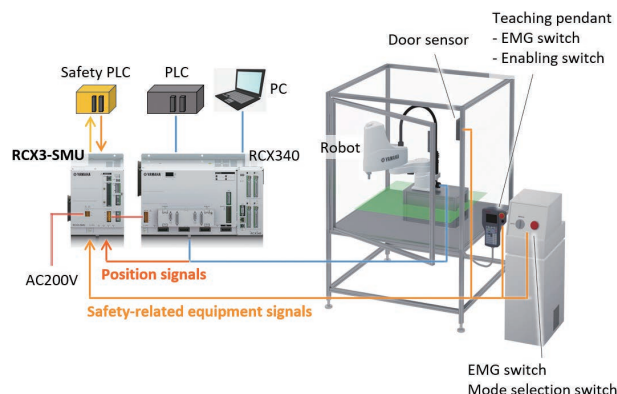


図2 「RCX3-SMU」を用いた生産設備構成例

「RCX340」がロボット動作を制御するのに対し、「RCX3-SMU」は、ロボットの動作速度と位置、また周辺安全機器の状態を、「RCX340」の制御とは独立して監視する。

以下に「RCX3-SMU」の主な機能(安全機能、診断機能)の概要について説明する(図3)。

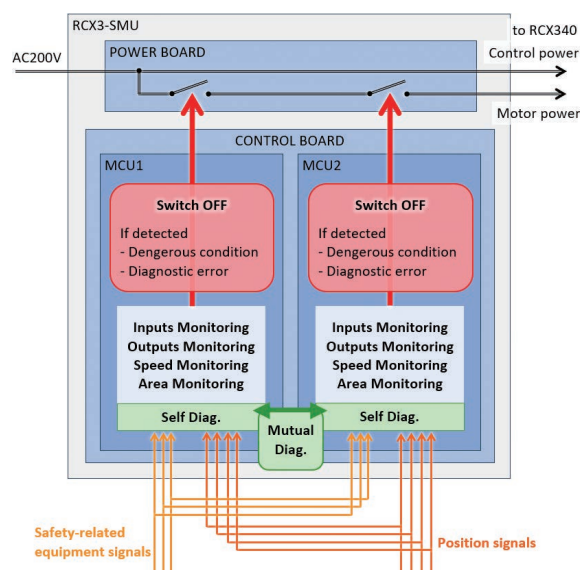


図3 安全機能と診断機能の概略図

【安全機能】

「RCX3-SMU」内のMCU(Micro Controller Unit)は、設定速度に対するロボット速度の超過、設定領域(位置)に対するロボット可動部の逸脱、および安全柵扉センサ信号のOFF(安全柵扉の開放)といった危険状態を検知すると、「RCX340」へのモータ動力電源を遮断することでロボットを停止させ、安全な状態に移行させる。

なお安全性の実現のためには、生産設備のリスクアセスメント、また「RCX3-SMU」の安全機能にて作業者のリスクが十分に低減される生産設備の設計を、お客さまにて実施していただく必要がある。

【診断機能】

「RCX3-SMU」は2つの MCU を備えており、内部で2系統に冗長化された入力信号を、各 MCU が独立してかつ相互に診断することで、Fail-Safe を実現している。電源電圧、動力遮断回路、RAM、ROM などの自己診断、MCU 間での相互診断で異常検知すると、「RCX340」へのモータ動力電源を遮断することでロボットを停止させ、安全な状態に移行させる。

以降に、安全機能と診断機能により作動する動力遮断機能、また代表的な安全機能として、速度監視機能と領域監視機能について説明する。

4 動力遮断機能

モータ動力電源を遮断しロボットを安全な状態に移行させる動力遮断機能は、作業者の安全において最も重要な安全機能であり、十分な信頼性を備えている必要がある。また、機能安全に対応していない生産設備の場合、生産設備全体を停止させる“非常停止”での動力遮断が主な安全な状態への移行手段であるのに対し、機能安全に対応した生産設備では、安全機能での動力遮断により、生産設備全体は稼働継続させつつ一部分の設備のみ安全な状態に移行させるシステムを、比較的容易に設計することが可能となる。そのため生産性向上などを目的として安全機能による動力遮断が実行される頻度が多くなることが想定される。

「RCX3-SMU」では、動力遮断回路、および電源投入時に発生する大電流から後段回路を保護するための突入防止回路のスイッチとして、一般的なメカニカルリレーではなく半導体リレーを使用しており、動力遮断回数の制限を実質的になくしている。その上で、各半導体リレーの ON 状態と OFF 状態が、スイッチングシーケンスに応じて正しく変化することを確認することで、動力遮断回路の故障診断を実現しており、動力遮断機能に要求される信頼性を満たしている(図4)。

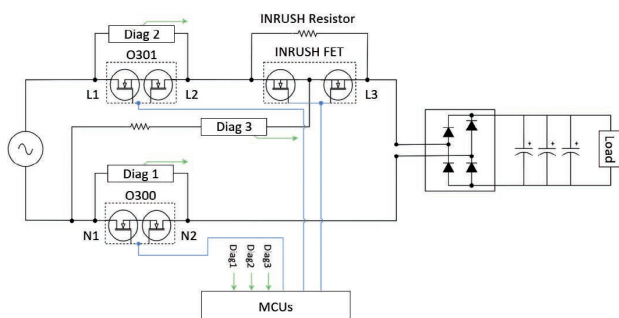


図4 動力遮断回路

5 速度監視機能、領域監視機能

速度監視機能は、ロボット動作位置の教示などの作業者が安全柵内で行う作業の際に、ロボットが高速動作して作業者に接触するリスクを低減するための安全機能である。各ロボットアームの先端と、エンドエフェクタ(長方形で定義)の頂点を速度監視点として設定が可能で、速度監視中は全ての速度監視点について設定速度(最大250mm/s)に対する速度超過を監視する(図5)。速度超過を検知すると、動力遮断機能によりロボットを停止させる。

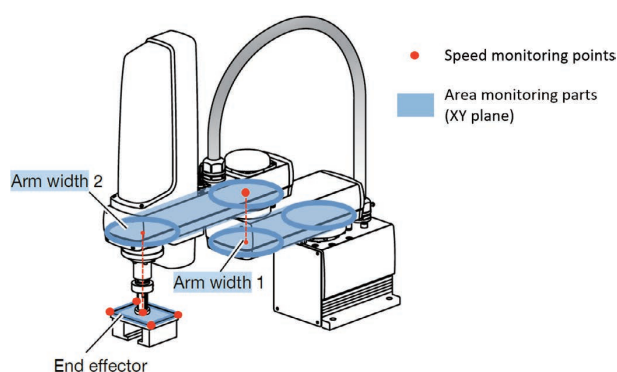


図5 速度監視点と領域監視部位

領域監視機能は、安全柵内の作業者にロボットが接近して作業者に接触する、作業者が挟まれる、といったリスクを低減するための安全機能である。各ロボットアームとエンドエフェクタを可動部として設定、またロボットの可動領域を設定でき、領域監視中は可動領域に対する可動部の逸脱を監視する(図5、図6)。領域逸脱を検知すると、動力遮断機能によりロボットを停止させる。

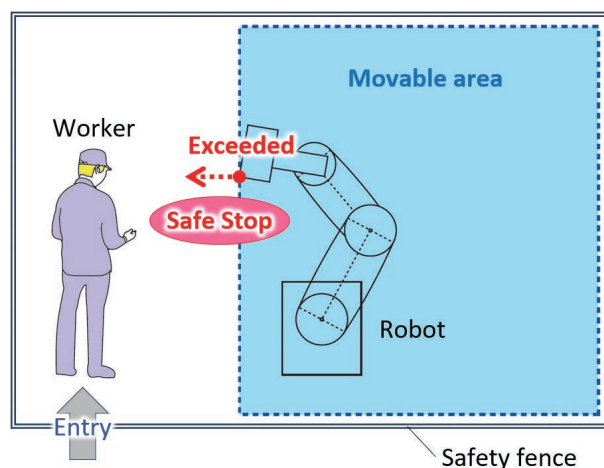


図6 領域監視

6 人とロボットの協働

「RCX340」で制御可能なロボットは、人と同じ(安全柵で仕切られていない)空間で一緒に作業できるように設計されている“協働ロボット”ではないため、基本的には稼働中の生産設備の安全柵内で、作業者とロボットが一緒に作業することはできない。しかし、「RCX3-SMU」の速度監視や領域監視などの安全機能を用いることで、お客さまにて設計していただく生産設備が、作業者のリスクが十分に低減される設計になっていれば、例えば稼働中に扉を開けて NG 品を抜き取るといった、限定的ではあるが作業者とロボットの協働作業を行うことが可能である(図7)。

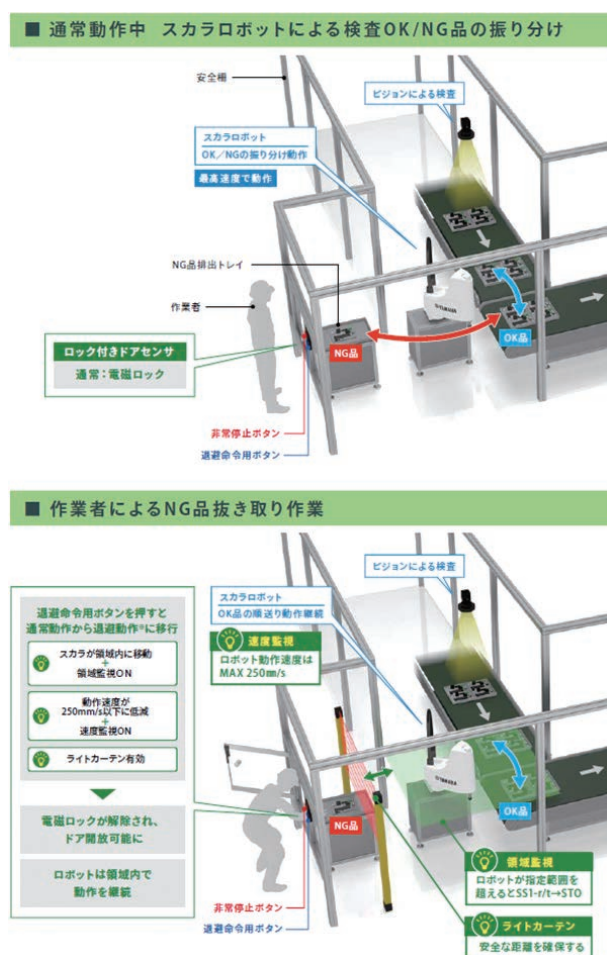


図7 人とロボットの協働作業(NG 品抜き取り)

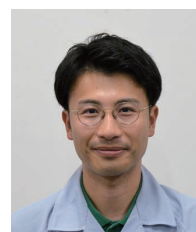
7 おわりに

当社の産業用ロボット製品としては初めての機能安全対応ということで、知見が少なく開発には大いに苦労したが、最終的に第三者認証を取得して、想定される市場要求を可能な限り満たした仕様でお客さまに製品を届けることができた。今後も産業用ロボット製品への安全性の要求はより高まっていくことが想定されるが、今回の開発の経験を糧とし、安全性はもとより、よりお客さまに喜ばれる商品性を備えた製品を開発し、ロボット産業界の発展に貢献していきたい。

■ 著者



上野 賢治
Kenji Ueno
ロボティクス事業部
技術統括部
FA 商品開発部



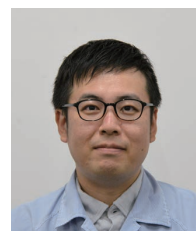
三重野 幸介
Kousuke Mieno
ロボティクス事業部
技術統括部
FA 商品開発部



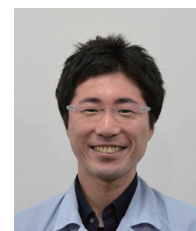
磯野 真滋
Shinji Isono
ロボティクス事業部
技術統括部
FA 商品開発部



坪井 康太郎
Kotaro Tsuboi
ロボティクス事業部
技術統括部
FA 商品開発部



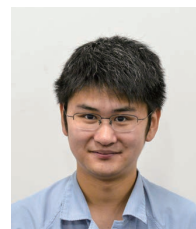
保科 大樹
Hiroki Hoshina
ロボティクス事業部
技術統括部
FA 商品開発部



荒澤 聖人
Masato Arasawa
ロボティクス事業部
技術統括部
FA 商品開発部



堀田 敦
Atsushi Hotta
ロボティクス事業部
技術統括部
FA 商品開発部



西村 祐樹
Yuki Nishimura
ロボティクス事業部
技術統括部
FA 商品開発部



中西 菜緒
Nao Nakanishi
ロボティクス事業部
技術統括部
FA 商品開発部

国内向け電動アシスト自転車「PAS CRAIG」の開発 Development of the “PAS CRAIG” Electrically Power Assisted Bicycle for the Domestic Market

杉山 峻平



Abstract

Sales of electrically power-assisted bicycles are on the rise, with domestic shipments reaching 795,000 units in 2022. This figure is double that of 2012, and the market is expected to continue expanding in the future. As the market grows, the demand for electrically power assisted bicycles is also diversifying. In 2023, marking 30 years since the release of the first “PAS” model, the Company announced the launch of the “PAS CRAIG”, designed for urban riders who prefer a more stylish look. The concept behind the “PAS CRAIG” is to offer a bike that enables riders to ride smoothly through the city with specs sufficient for urban riding and a sleek, minimalistic design. To achieve this stylish design, the Company collaborated with a new supplier specializing in the production of steel frames made from thin pipes, bringing the concept to life.

1 はじめに

電動アシスト自転車の販売台数は増加傾向にあり、2022年の国内の電動アシスト自転車の出荷台数は79.5万台に達した。10年前の2012年と比較すると2倍に増加しており、今後もさらに市場は拡大していくものと予想される。市場の拡大に伴い、電動アシスト自転車に対するニーズも多様化している。初代「PAS」発売から30年の節目の年である2023年に、街乗り向けでスタイリッシュなデザインを好む方へ向けた新製品である「PAS CRAIG」の発売を発表した。そのコンセプトは、街中の走行に十分なスペックと、シンプルで無駄のないデザインにより、颯爽と都会を駆け抜けられる車体とした。また、スタイリッシュなデザインを実現するため、鉄製の細身のパイプを使用したフレームの製作が得意な新規のサプライヤーへ製造を委託し、コンセプトを具現化した。

2 開発の狙い

新モデルの開発にあたり、電動アシスト自転車購入者のおよそ7割強が、電動アシスト自転車を初めて購入される方であるということに着目した。また、購入意向者やユーザーのヒアリングにより、スペックは軽快車¹⁾と同じ日常使用や街乗りに必要なレベルで、デザインはスポーティ過ぎずスタイリッシュという、現在の「PAS シリーズ」のラインナップではカバーできていないニーズがあることが判明した。そこで本モデルはメインターゲットを、電動アシスト自転車を初めて購入する都市部在住の30代から40代の男性とし、さらにシンプルで上質なものに惹かれ普段の生活でも身の回りのアイテムに統一感をもたせる等、自分の価値観を大切にされる方を想定した。また、電動アシスト自転車の使用シーンは、天気の良い日の通勤や休日の散策での使用を想定し、不要な機能を排したデザインを目指した。

¹⁾ 軽快車とは、主に日常の交通手段およびレジャーに用いる短中距離、低中速走行用自転車。

これらの想定のもと商品コンセプトとして、“Urban Outrunner”を掲げ、開発の主な目標は以下の7項目に設定した。

1. 鉄製の細身のパイプを使用したダイヤモンド形フレームと700Cの大径タイヤを採用した、シンプルで無駄のない軽快感とスピード感のあるデザイン
2. スマートパワーアシスト²⁾を採用し、毎日の片道5kmの通勤を楽にこなせるアシスト性能
3. 男性が乗りやすいフレームサイズ
4. 街乗りで素早く楽に走れるクロスバイクに近いポジションとギヤ設定

5. メンテナンスの頻度が少ないコンポーネントパーツの採用
6. 初めて電動アシスト自転車を購入される方が手の届きやすい価格の実現
7. アクセサリーのフェンダーとフロントキャリアおよびバスケットが装着可能な構造とすることで、急な雨や通勤バッグの積載に対応

2) スマートパワーアシストとは、乗る人のこぎ方や道路の傾斜などに応じて、自動でアシストモードを切り替える機能。

本モデルのフィーチャーマップを図1に示す。



図1 フィーチャーマップ

3 新たなサプライヤの開拓

本モデルはデザインを重視しながら価格を抑えたモデルを目指していた。これには鉄製パイプを使用したフレームが必須となるが、取引中のサプライヤでは鉄製フレームの新規開発が困難であるため、新たなサプライヤの開拓に取り掛かった。そこで、サプライヤ選定条件として、開発力・製造能力・価格競争力・品質管理体制の4つを定め、開発部門が主体で製造工場の視察・試作品評価、市販品ベンチマーク等を経て、技術力を有するサプライヤを選定した。結果として、サプライヤの選定からモデルの開発開始への移行がスムーズに進み、新たなサプライヤによるモデル開発でありながら短期間での開発を実現した。

4 製品の特長

4-1. フレーム

「PAS シリーズ」ではアルミ製フレームが主流だが、前述の通り本モデルでは鉄製パイプを採用した。鉄製パイプを採用することで、コストメリット以外にも、アルミ製フレームに対し断面形状の小径化が可能となり、すっきりとしたシルエットにも寄与した。さらに、サークル錠やリアキャリアの取付穴を排することで、無駄のないシンプルなデザインとした。しかし、デザイン性とフレーム強度確保の両立が課題であった。アルミ製フレームはパイプ径が太いため、パイプ同士の接合部に補強部材が設けられていても目立ちにくい。一方鉄製フレームではパイプ径が細いため、補強部材を設けると目立ちやすく、すっきりとしたシルエットが損なわれてしまう。そのため、応力解析と試作評価を繰り返し、接合部の形状やパイプ肉厚、溶接工程の最適化により、必要な強度を満たした(図2)。



図2 フレームの応力解析モデル

4-2. タイヤ&ホイール

街乗りで遭遇する段差を快適に走行できるように、クロスバイクにおいて主流のタイヤサイズである700Cと、幅広い38mmを新たに採用した。その採用に際しホイールの強度やリムブレーキの制動力などの評価を実施し、特にリムとブレーキに関しては数十通りの組合せから最適な制動性能となるようなものを選定した。意匠面においては、リムの内側を黒色とすることで、他のコンポーネントパーツとの統一感をもたせている。

4-3. チェーンケース

ペダルの回転軸を中心に円形状のデザインとし、コンパクトなサイズとすることで軽快で洗練された印象を表現した。また、細身のフレームに合わせ、引き締まった印象を与える黒色で塗装した(図3)。



図3 チェーンケース

4-4. サドル&ハンドル

細身でスポーティなサドルとフラットなバーハンドルを採用し、クロスバイクに近い上体がやや前傾した快適なポジションを設定した。

4-5. 変速

電動アシスト自転車を初めて購入する方にとって操作の負担

とならないように、「PAS シリーズ」で採用実績の高い内装3段変速を採用した。変速機構がハブ内部に内蔵されていることからスプロケットやディレイラーのメンテナンスが不要となり、メンテナンスの頻度の低減に貢献している。

4-6. アクセサリー開発

車体全体のデザインにマッチしたフロントキャリア、前後セットのフェンダーを専用アクセサリーとして設定することで、汎用性およびデザイン性を高めている。純正のアクセサリーとしてフロントバスケットを用意し、通勤バッグの積載にも対応している(図4)。

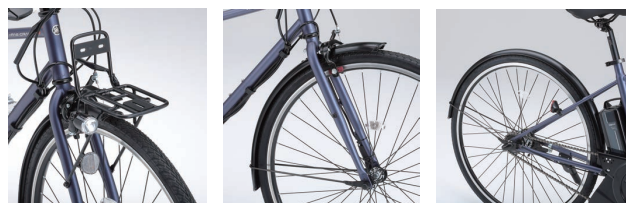


図4 専用アクセサリー

4-7. メーター

本モデルでは、「PAS シリーズ」の2023年モデルから導入されている、時計機能付きのデジタルメーター付きメインスイッチであるスマートクロックスイッチを採用した(図5)。シンプルな形状とハンドルバーに沿ったコンパクトなサイズで、細身のフレームデザインとの一体感が得られている。操作頻度の高いアシスト上下ボタン操作はブラインドタッチが可能となるように配置を工夫した。また、視認性を確保するため、操作頻度の低い電源ボタン、ライトボタン、セレクトボタンは筐体側面に配置した。新機能としてバッテリー残量が低下した際はブザー音とLED ランプで充電忘れを防止する機能を搭載した。消費カロリー、残りアシスト走行可能距離、電池残量の表示はセレクトボタンで切り替えが可能である。



図5 スマートクロックスイッチ

5 車両カラーリングデザイン

カラーリングはマットラベンダーをイメージカラーとし、定番色のマットジェットブラックに加え、明るい印象をもたせるアースカラーのマットグレイッシュベージュの3色を設定した(図6)。トップチューブに配置した製品名のロゴは3色共通でクロム調を採用し、知的で洗練されたシンプルさを表現した。(図7)。ハンドルやサドルだけでなく、ペダルやクランク、ヘッドランプやベルなどのコンポーネントパーツは黒系でまとめ、統一感をもたせた。



図6 カラーリング



図7 クロム調のロゴ

6 おわりに

本モデルは、走っている時も、止まっている時も、街に溶け込むような統一感のあるデザインと、細身のフレームや無駄のないコンポーネントパーツでスマートな雰囲気を作り出すことを狙った。街乗りで使い勝手がよく、シンプルでスタイリッシュなデザインが、身の回りのアイテムと車体の雰囲気に統一感をもたらし、ユーザーの所有欲を高めてくれるはずである。「PAS CRAIG」が、「PAS シリーズ」の新たなファン層の拡大につながることを期待している。

■著者



杉山 峻平
Shumpei Sugiyama
ランドモビリティ事業本部
SPV 事業部
第2開発部

電動アシストホースカー 「X-Quicker (クロスクイッカー)」 Electric Assist Hose Cart (“X-Quicker”) for Firefighting

藤井 勲 杉山 和弘 向井 勇貴



Abstract

Yamaha Motor Engineering Co., Ltd. (hereinafter referred to as “the Company”) has been developing and selling products for firefighting agencies since 1985 to date, starting with the electric hose cart jointly developed with the Tokyo Fire Department. This range of products includes ride-on electric hose layers, hose carts with handles, firefighting motorcycles (commonly known as “red bikes”), and lightweight dual-focus portable floodlights, among others. The electric assist hose cart (product name: “X-Quicker”) introduced in this article is mounted on the rear of a fire truck (Figure 1). After arriving at the scene, it is used to carry up to 120 kg of equipment, such as fire hoses, and allow hoses to be extended to the fire source or water supply as part of firefighting operations. This article introduces the development and features of this product.

1 はじめに

ヤマハモーターエンジニアリング株式会社（以下、当社）では、1985年に東京消防庁と共同開発した電動ホースカーから現在に至るまで、乗用式電動ホースレイヤー、手引きホースカー、消防活動二輪車（通称：赤バイ）、軽量二焦点型可搬式投光器など、消防機関向け製品の開発、販売を行なっている。今回紹介する電動アシストホースカー（商品名：「X-Quicker」）は、消防自動車の後方に搭載され（図1）、現場到着後に消防ホースなど、最大120kgの機材を積載し、火元や水利までホースを延長するための消防用資機材である。本稿では、その開発概要と製品の特徴について紹介する。



図1 搭載状態

2 商品の企画

昨今の消防業界課題として消防自動車の軽量化、隊員の高齢化、女性隊員の増進に伴う省力化の要望がある。

「X-Quicker」は、当社が得意としていた乗用方式から、隊員が牽引する操縦方式に変更することで、車体の小型軽量化を図り、電動アシスト化により機動性、操作性を向上することを企画の骨子とした。そして“迅速、確実、安心”をキーワードとして、過酷な現場で活躍できる力強さと扱いやすさの両立を目指した。

3 開発企画と達成方法

企画コンセプトに基づき3つの開発項目を示す。

1. 迅速：消火活動の最前線で一分一秒でも早く放水を開始するため、消防自動車から降車後に、ハンドル展開と電源オンの2アクションのみで走行準備を完了させる。
2. 確実：パワフルなモーターで素早く発進加速し、力強く坂

道を上る。また、大径タイヤの採用により、ホースや路面段差を乗り越え、未舗装路などのさまざまな悪路も走破する。

3. 安心：スロットル操作が不要で、直感的かつシンプルな“引くだけアシスト”で、消防隊員とホースカーの動きを連動させ、消防隊員の体力および、精神的な負荷を軽減する。主なフィーチャーを以下に示す(図2)。



図2 主なフィーチャー

3-1. アシスト駆動システムの概要

図3に示す通り、隊員が歩き出すと、B:ストロークセンサーでハンドルが軸方向にストロークする値を検出し、C:コントローラーで必要なモーター出力を演算し、E:モーターに電流値を指示しアシスト力を発生させる。ハンドルがストロークしている時だけアシスト力が発生し、歩く速度を落としたり、止まったりするとアシスト力は発生しない。コントローラーと左右のモーターはCAN(Controller Area Network)通信で指令値の受け渡しを行う。コンポーネントについては、モーターサイクルのエンジン制御ユニットのハードウェアをコントローラーとして流用し、制御仕様は「X-Quicker」専用としている。モーターはE-Bikeで採用されている240Wのモーターを二基搭載、D:バッテリーは密閉式の鉛蓄電池を直列に3個接続して36Vを供給する。

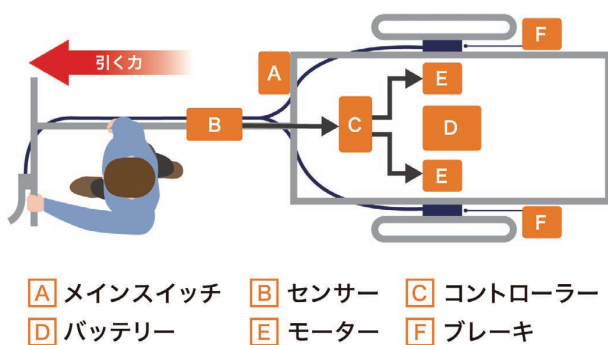


図3 システムの構成

制御仕様の主な特徴を3つ示す。

1. 発進時の力強さと、飛び出し挙動を抑えるため、アシスト力の立ち上がり時間と、モーター出力の適合値を最適化した。
2. ホースカーを牽引する際には、歩くステップによる引き力(=ハンドルにかかる荷重)の脈動が発生する。脈動が大きいとハンドルの持ち上がりが大きく、操縦性が悪化するため、モーター出力の増減方法を最適化し、操縦性を向上させている(図4)。
3. フェールセーフの機能として、片輪が脱輪、もしくは障害物でロックした場合や、センサーに不具合が起きた際にアシスト力を強制的にカットする。

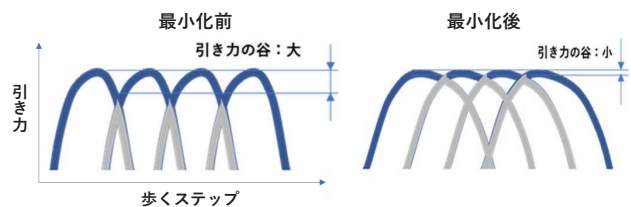


図4 引き力の谷の最小化

3-2. 車体構成

車体構成は、ステアリング部、メインフレーム部、サブフレーム部に大別される。ステアリング部にはストロークセンサーを配置し、そのスライド機構にはカムフォロアー(軸付きベアリング)の採用により、スムーズな動作と操縦時の剛性を確保している(特許出願済)(図5)。メインフレーム部は、ホース10本(200m分)を積載できる容量を確保し、構造に角形鋼管を採用することで、従来の乗用式電動ホースレイヤーの丸形鋼管フレームから、重量軽減と剛性アップを図っている。サブフレーム部は、バッテリー、モーター、ホイールなどの電源、動力系をユニット構造でまとめており、製造性とメンテナンス性の向上による今後のバリエーション展開も考慮している。

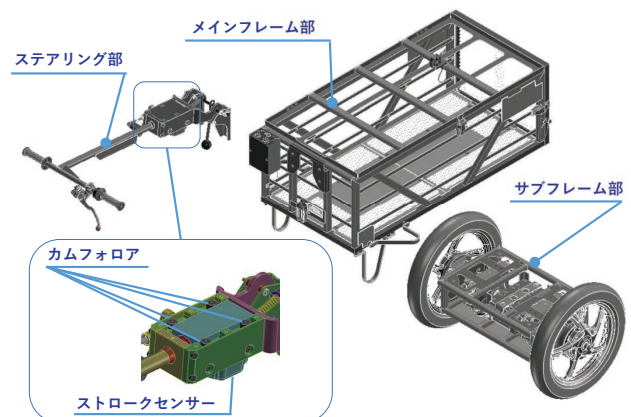


図5 車体構成とスライド構造

3-3. 走行評価・強度・信頼性

評価項目、実施方法、判断基準については、隊員の使用状況を確認し、当社のモーターサイクルの開発経験を生かした、「X-Quicker」独自の実験企画を立案している。一例として、走行機能評価では、ホースカーを牽引する速度や登坂角度に応じて、最適なアシストフィーリングとなる制御パラメーターの適合を実施し、災害現場でホースや路面段差の乗り越し性能確認に加え、山間部や河川敷での使用を想定し、悪路での走行機能確認、および走行耐久を実施した。強度確認では、障害物への衝突後も走行が継続できるよう、フレームや駆動系の強度確認、および現場に散乱するホースの乗り越しを想定した走行耐久試験を実施した。また、大型加振機を用いて、消防自動車搭載時の走行振動を模擬した加振耐久も実施し、必要とされる信頼性を漏れなく確認している。

3-4. アシスト効果

アシスト効果の検証例として、ハンドル取り付け部にロードセルを装着し、アシスト有無でハンドルに掛かる荷重を計測した結果、7°登坂路における登坂範囲の平均値で、約80%の負荷が軽減され、アシストによる力強さを感じることが確認できた(図6)。

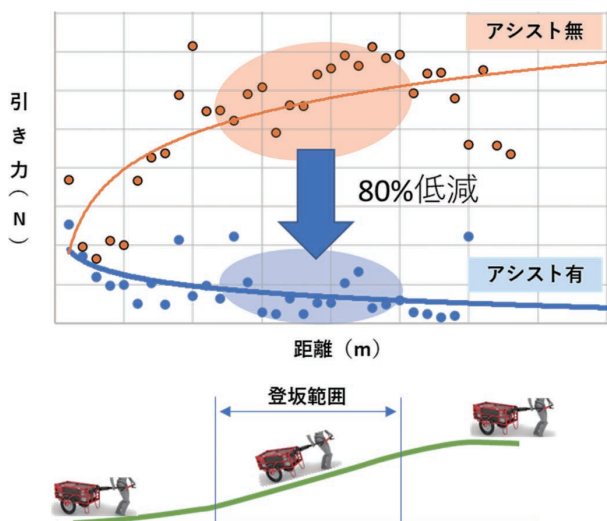


図6 アシスト効果

4 販促活動

「X-Quicker」の販促活動として、アシストによる負荷軽減効果を体感していただくことが一番であるため、各地の消防署へデモンストレーション活動を実施している。併せて、消防署員の方々に認知していただくために、展示会への出展、業界誌への

広告掲載、Web での開発者トークなどの動画コンテンツ等を実施し、製品の良さを訴求する活動を展開している。

参考資料として、仕様諸元を下記に示す(図7)。

仕様諸元

製品名		X-QUICKER
型式		E055
全長	使用時	2,140mm
	収納時	1,241mm
全幅		858mm
全高	使用時	880mm
	収納時	829mm
トレッド		708mm
最低地上高		150mm
装備重量		100kg
最大積載量		120kg
荷室ホース積載本数 ※1		10 本
登坂力 ※2		10°
原動機	型式	ブラシレス DC モーター
	定格出力	240W × 2 個
バッテリー	型式	LPX12-9.0
	種類	密閉式鉛蓄電池
	容量	12V8.6Ah(20 時間率) × 3 個
一充電走行距離(平坦舗装路) ※2,3		約 20km(約 4 時間)
一充電走行距離(10°登坂舗装路) ※2,3		約 1.5km(約 30 分)
タイヤサイズ		2.75-14_41P(チューブ入り)
タイヤ空気圧		280kPa
ブレーキ方式		ドラム式(左右)
駐車ブレーキ方式		手ブレーキロック式
使用环境温度		-5℃ ~ 40℃

※1 ホース径 65mm

※2 最大積載量 120kg積載時

※3 測定条件: 満充電された新品バッテリー、20℃の環境下で連続走行した場合の電流値に基づいた計算値

図7 仕様諸元

5 おわりに

「X-Quicker」は、老若男女を問わず、すべての消防隊員の皆様にご使用いただけるよう、力強さと扱いやすさを兼ね備え、従来は困難であった走行環境での運用を可能とし、消防活動の省力化と活動範囲の拡大を実現した。40年にわたり、重要な社会インフラのための消防製品を市場に提供し続けてきた当社の経験と信頼が結集された成果である。

■ 著者



藤井 勲
Isao Fujii
ヤマハモーターエンジニアリング(株)
事業企画推進部



杉山 和弘
Kazuhiro Sugiyama
ヤマハモーターエンジニアリング(株)
事業企画推進部



向井 勇貴
Yuki Mukai
ヤマハモーターエンジニアリング(株)
システム開発部

走りの幅を広げる 新型「NMAX」用「YECVT」の開発

Extending the Range of Driving - Development of “YECVT” for the New-“NMAX”

勝山 祐紀 大塚 一樹 水澤 幸司 松島 秀洋 吉村 剛 江口 和也



Abstract

Yamaha Motor Co., Ltd. (hereafter referred to as “the Company”) has developed the “NMAX”, a compact premium scooter, which is favored by many customers for its outstanding design, convenience, and driving performance. However, the ASEAN (Association of Southeast Asian Nations) region, the Company’s primary market, is rapidly evolving, making it essential to develop products that adapt to changes such as market maturity, the diversification of consumer preferences, and increased competition from similar products. As a result, the demand now is for unique new value, distinct to the Company, in addition to daily-use convenience.

To further enhance the acceleration performance of the new “NMAX” and deliver the added value of riding enjoyment, the Company developed a new transmission mechanism, “YECVT”, by leveraging the electronically controlled YCC-AT (Yamaha Chip Controlled Automatic Transmission) initially created for the 2007 “Majesty” model.

This paper discusses the features and the structure of YECVT.

1 はじめに

ヤマハ発動機株式会社(以下当社)の小型プレミアムスクータ「NMAX」は、優れたデザイン、利便性、走行性能などにおいて多くのお客さまから支持を受けている。しかし、主力市場である ASEAN(東南アジア諸国連合)地域は発展著しく、市場の成熟化、価値観の多様化、競合他社の追随などの変化に対応した商品開発が重要である。そのため、日常使いの利便性に加えて、当社らしい新たな価値を提供することが求められている。

今回、新型「NMAX」において加速性能をさらに進化させるとともに、走る楽しさという付加価値を提供すべく、2007年「マジェスティ」において開発された電子制御式無段変速機構である YCC-AT(Yamaha Chip Controlled Automatic Transmission)を応用した新しい変速機構「YECVT」の開発を行った。

本稿では、YECVT の特徴と構造について紹介する。

2 開発の狙い

今回当社が開発した YECVT は、小型スクータに搭載可能なシステムを目指した電子制御式無段変速機構である。日常使いの利便性を損なうことなく、走る楽しさを追求することを狙いに開発、実用化したものである。

YECVT はコンパクトな構造の変速機構により、既存モデル同等の車両レイアウトに搭載可能である。また、モータ制御によって自在に変速することが可能となり、無段階変速に加えて、シフトダウンによる力強い加速走行、エンジンブレーキの利用、走行モードによる異なる走行性能特性の切り替えを可能とした。

3 YECVT の特徴

3-1. YECVT とは

新開発の YECVT は、電子制御により CVT (Continuously Variable Transmission) の変速比をライダーの操作に応じて変更することが可能となり、機械式 CVT では体感することが難しかった MT (マニュアルトランスミッション) 車のような走行体験を得ることができる。YECVT は変速比セッティングの自由度が高く、低回転領域を使用すれば燃費性能を向上させることができ、高回転領域を使用すれば強い加速やエンジンブレーキを利かせたメリハリのある走行が可能となる。

「NMAX」に搭載するにあたり、走行状況に応じて選べる「Driving mode」切り替えと、加速／減速量を好みや走行状況に応じて調整できる「Shift down」機能を実装した。

3-2. Driving mode 切り替え

駆動系の変速用マップを切り替えることにより、異なる変速特性を任意に選択することが可能である。

「NMAX」においては、2つの Driving mode を選択でき、「T-Mode」は市街地でのスムーズな走行、「S-Mode」はワインディングロードでのレスポンスの良い走行を提供する(図1)。

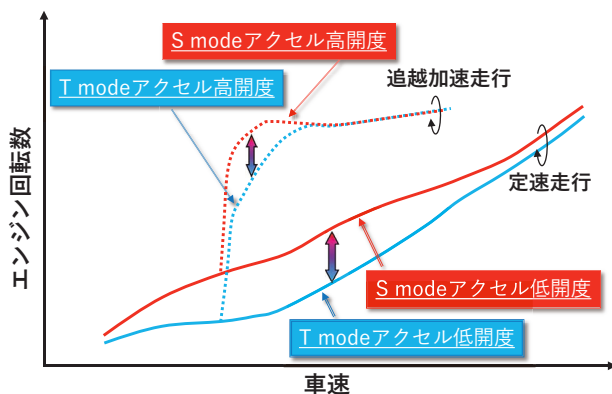


図1 Driving mode の走行特性イメージ

3-3. Shift down 機能

Shift down 機能は、ボタン操作によって任意に変速比を変更することで、MT 車のギヤシフトダウンのような走行特性を実現する。「前走車を鋭い加速で追い抜きたいとき」「長い下り坂でエンジンブレーキを利用して安全に減速したいとき」「コーナー進入の減速から脱出時に気持ちよく加速をしたいとき」などのシーンでライダーの操作の幅を広げ、操る楽しさを提供する。SHIFT ボタンの操作により加速／減速状態に応じ最大3段階までシフトダウンが可能である(図2)。

また、ライダーの加速要求に応えるために、スロットルを急開した場合は車両側が走行状況を判断し、自動で1段階シフトダウンする機能も備える。

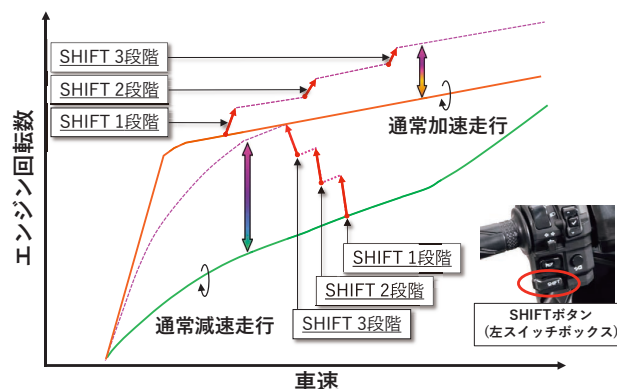


図2 Shift down の走行特性イメージ

3-4. 環境性能

冷機状態からのエンジン始動において、排出ガス浄化装置の触媒活性まで、ある程度の暖機運転時間が必要である。そこで、YECVT の変速比制御により、冷機時は通常運転時よりもエンジン回転速度を引き上げることで、排出ガス流量を増大させて触媒活性を促進する。この制御により、冷機始動後の排出ガスを低減させている。

4 構造

4-1. 全体レイアウト

スクータに搭載するエンジンは、幅／高さともに制約が大きいことに加え、今回の開発では従来の機械式 CVT エンジンと共通の車体フレームに搭載する必要があった。そこで新機構を検討するにあたり、コンパクトに収めることに重点をおき開発を行った。

図3は YECVT のシステム全体図である。制御を担うコントロールユニットと変速機構を示す。

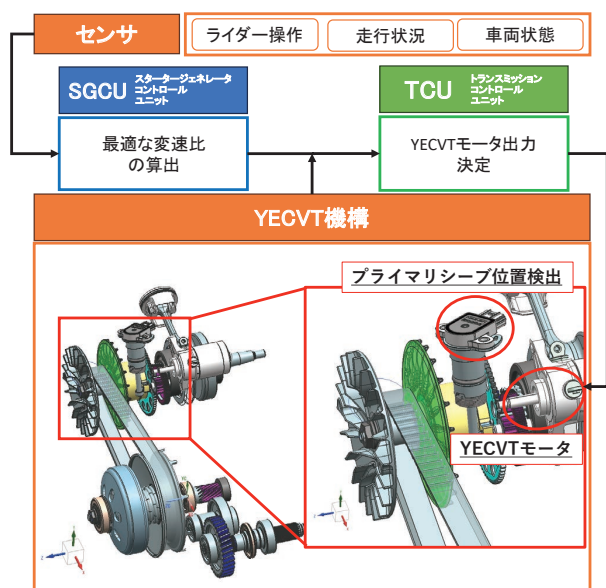


図3 YECVTシステム全体図

4-2. 制御システム

YECVTの電子制御は、“ライダー操作、走行状況、車両状態の認知”→“最適な変速比の算出”→“YECVTモータ駆動による変速”の一連の処理を専用の制御システム（コントロールユニット、センサ、モータ）により実行している（図4）。

新型「NMAX」にYECVTを搭載するにあたり、コンパクトかつ軽量の制御システムの開発を行った。特にコントロールユニットに関しては、エンジンと駆動装置のユニットを分けることで、駆動系コントロールユニットを小型化（約90×60mm、165g）した。

これにより、従来の「NMAX」同等の車両レイアウトでYECVT制御システムの搭載を可能にするとともに、エンジンコントロールユニットを共通とすることでYECVT非搭載モデルとの仕様変化を最小限にした。

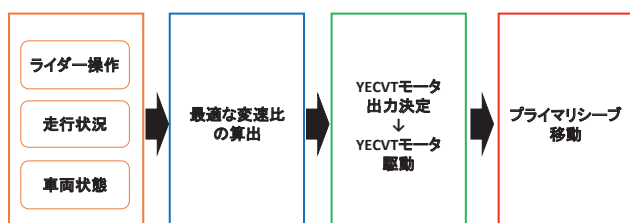


図4 制御フローのイメージ

4-3. メカニカル構造

コンパクト化に寄与した構造について、以下の3項目を紹介する。

1. プライマリスクリュ

変速時のプライマリシープの直線運動を回転運動に変換するため、プライマリスクリュという送りねじ機構の部品を採用した。ギヤ配置は当社で採用実績のある始動システムのレイアウトを踏襲しており、モータの回転トルクをギヤを介して送りねじに伝達するとともに、必要な変速速度と保持推進力が得られる構造である。クランク軸同軸上に送りねじをレイアウトすることで小型化し、摺動オイルシールを新規開発することで油中レイアウトを実現した（図5）。

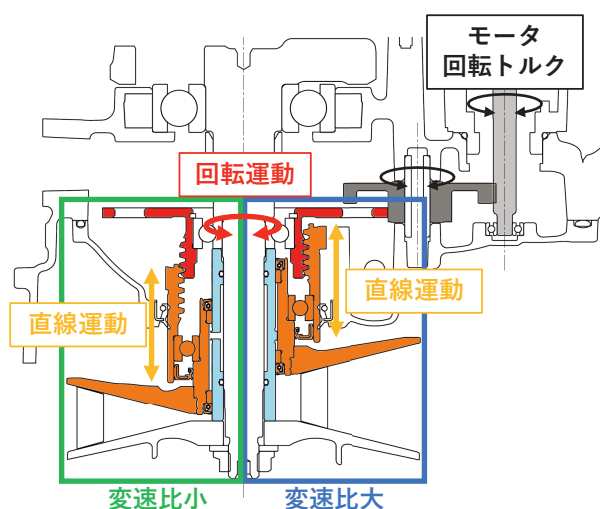


図5 プライマリスクリュ周りの動力伝達機構

2. プライマリシープ

プライマリシープがエンジン回転トルクを伝達しながら直線運動するために、スプライン嵌合による動力伝達機構を採用した。全長が長い軸側のスプラインを短くし、穴側に長いスプラインを持たせることで、変速に必要な作動量を確保しながら本機構の軸方向全長を抑制した（図6）。

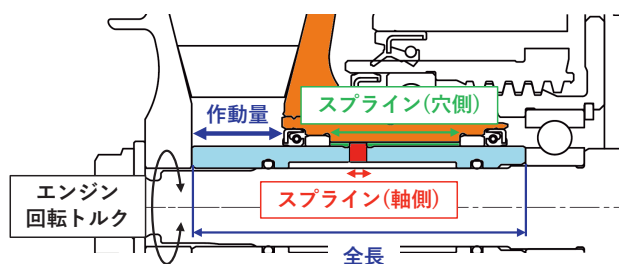


図6 プライマリシープ構造

3. プライマリシープ位置検出機構

プライマリシープの直線運動を回転運動に変換し、角度変化として位置検出する機構を採用した。角度センサとプライマリ

シーブをつなぐセンシング用のシャフトは、CVT 室の外から油室内までを貫通するレイアウトとなっており、プライマリシーブと一体で直線運動するプライマリスクリュをセンシングすることで正確な位置検出を可能とした。

長尺の軸受をステーに圧入することにより、片持ち支持構造でもシャフトの倒れを抑制し、良好なセンシング精度を実現した。シャフトとカムは圧入され、最小限の部品点数で小型な構造とした(図7)。

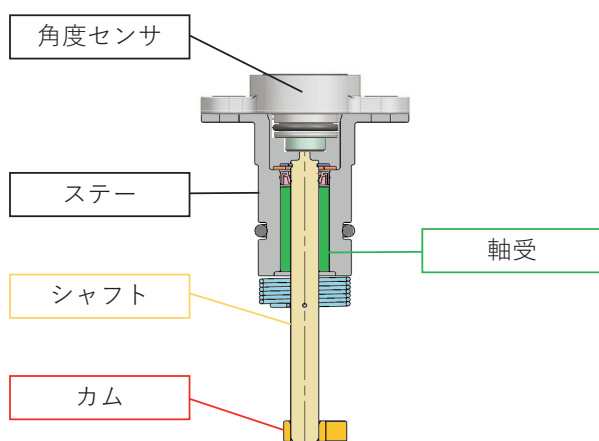


図7 プライマリシーブ位置検出機構

以上の通り、コンパクトな構造で YECVT を作ることで、従来の機械式 CVT に対し重量／コストの増加を最低限に抑え、小型スクータとしての取り回しや収納スペースを保ちつつ、走行性能の進化を実現している。

5 おわりに

新開発の「YECVT」は、150cm³クラスの小型スクータにも搭載可能なコンパクト構造で、排気量アップという手段に頼らない性能向上手法として、原動機のポテンシャルを最大限に引き出すシステムである。新型「NMAX」から初搭載し、“Driving mode” や “Shift down” 機能の実装により、快適性とスポーツ性の異なる走行特性を1台のスクータで実現した。これが私たちの考えた当社らしい新たな価値の訴求である。

2024年6月インドネシアにて YECVT を搭載した新型「NMAX」の発表イベントが開催され、参加者による SNS への投稿が瞬間に広がり、YECVT に対する高い関心をうかがうことができた。

初代「NMAX」から9年余り、今回我々が目指した“進化”が多くのお客さまに日常の走る楽しさを提供できると確信している。

■著者



勝山 祐紀
 Yuki Katsuyama
 パワートレインユニット
 プロダクト開発統括部
 第1PT 設計部



大塚 一樹
 Kazuki Otsuka
 パワートレインユニット
 プロダクト開発統括部
 第1PT 設計部



水澤 幸司
 Koji Mizusawa
 パワートレインユニット
 プロダクト開発統括部
 第1PT 実験部



松島 秀洋
 Hidehiro Matsushima
 パワートレインユニット
 プロダクト開発統括部
 第1PT 実験部



吉村 剛
 Go Yoshimura
 パワートレインユニット
 プロダクト開発統括部
 第1PT 実験部



江口 和也
 Kazuya Eguchi
 PF 車両ユニット
 電子技術統括部
 システム開発部

進化した自動化マニュアルトランスミッション「Y-AMT」の開発

Development of the Evolved Automated Manual Transmission “Y-AMT”

林田 勇武 鈴木 満宏 福嶋 健司 南 賢吾

Abstract

The “YCC-S (Yamaha Chip Controlled Shift)” was commercialized^[1] from the 2006 “FJR1300AS” model as the world’s first AMT (Automated Manual Transmission) for motorcycles. Since then, it has undergone refinement, including the addition of a stop mode that automatically shifts down to first gear when decelerating to a stop, as well as the integration of an electronic throttle control. This continuous development led to its adoption in the “YXZ1000R SS” model ROV (Recreational Off-highway Vehicle)^[2]. Currently, in the motorcycle sector, other companies have also introduced AMT vehicles, such as those with DCT (Dual Clutch Transmission), leading to an increase in the number of models available. In the automotive sector, two-pedal vehicles without a clutch pedal are becoming more common, with some examples showing better acceleration performance than three-pedal vehicles. In this context, the performance and functionality of the YCC-S has evolved, integrating enhanced sportiness and convenience, and has been renamed “Y-AMT (Yamaha Automated Manual Transmission)”. This new system has been installed in the 2024 “MT-09 Y-AMT” road sports model.

1 はじめに

「YCC-S (Yamaha Chip Controlled Shift)」は、世界初のモーターサイクル用自動化 MT (Manual Transmission) システムとして2006年型「FJR1300AS」から市販化^[1]した。その後、減速停車時に自動で1速までシフトダウンするストップモードや、電子スロットル連携制御の追加など熟成を重ね、ROV (Recreational Off-highway Vehicle) の「YXZ1000R SS」にも採用^[2]するなど継続的に開発してきた。現在では、二輪車では他社からも DCT (Dual Clutch Transmission) タイプなどの自動化 MT 車両が実用化され、機種数も増えてきており、四輪車でもクラッチペダルがない2ペダル車が増え、3ペダル車よりも2ペダル車の方が加速性能がよい例も珍しくない。このような中、今回 YCC-S の性能・機能を進化させ、高いスポーツ性と利便性を兼ね備え、名称も一新した「Y-AMT (Yamaha Automated Manual Transmission)」を開発し、ロードスポーツモデル 2024年型「MT-09 Y-AMT」に搭載したので紹介する。

2 開発の狙い

Y-AMT は、「MT-09」が持つ高いスポーツ性を維持したまま、ライダーをクラッチ操作とシフトペダル操作から解放することで、走りへの没入感を引き出すことに主眼をおきつつ、AT (自動変速) 機能付加による利便性向上も目指した。

3 システムおよび構造

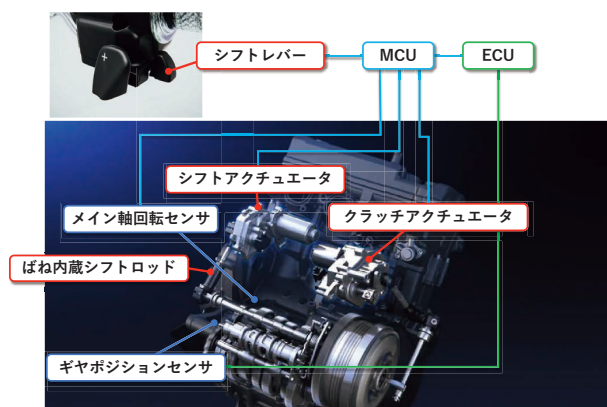


図1 システム構成図&搭載レイアウト

3-1. システム構成

基本構成は「FJR1300AS」の YCC-S と同様に、エンジン本体への大きな変更を加えることなく、クラッチ、シフトをそれぞれのアクチュエータで動かすことによって自動化するシステムである(図1)。以下に変更点を解説する。

3-2. アクチュエータ搭載レイアウト

「FJR1300AS」搭載の YCC-S では、油圧を発生させるクラッチアクチュエータ、シフトシャフトと連結したシフトアクチュエータを共にフレームに搭載していたが、「MT-09 Y-AMT」では2つのアクチュエータをエンジン背面スペースに並べてレイアウトした。これは、「MT-09」のスリムでコンパクトなディメンジヨ

ン、足つき性を含む乗車姿勢に影響を与えないためであり、また質量増加による車両運動性能への影響も最小限とした。なお、Y-AMT のシステム質量はクラッチレバー、シフトペダル廃止による軽量化の効果も含め2.8kg である。

3-3. アクチュエータ

「FJR1300」の油圧式クラッチに対し、「MT-09」はワイヤ式クラッチであるため、クラッチアクチュエータも油圧式からリンク式に変更した。クラッチアクチュエータには、素早くクラッチ容量を制御する応答性、低消費電力性能、故障時の車両挙動抑制機能が求められる。これらを解決するために、クラッチ位置を保持する機能と、クラッチスプリング荷重をばねの力で相殺するアシスト機構を備えている。「FJR1300AS」では、油圧機構部の摩擦によって位置保持機能を実現していたが、リンク式に変更すると位置保持機能を失う。そこで、フリクション機構を内蔵して同機能を実現した。またアシスト機構もメカニズムを変更し小型化した(図2)。なお、シフトアクチュエータは「YXZ1000R SS」^[2]の構造を踏襲し内部部品は共用している。

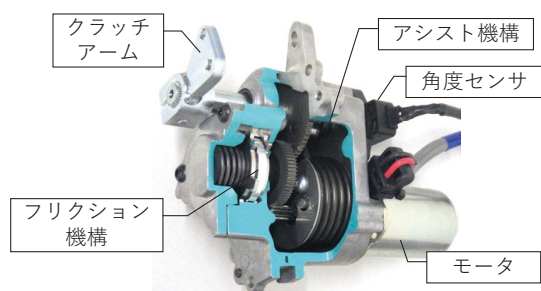


図2 クラッチアクチュエータ

3-4. ばね内蔵シフトロッド

シフトアクチュエータとシフト機構を繋ぐシフトロッドが通常のロッド(リジッド)の場合、シフト機構部品の加速に時間がかかり、シフトアップ時に駆動力が得られない時間(以下駆動抜け時間)が長くなる課題がある。そこで、ばね内蔵シフトロッドを開発した(図3)。エンジントルクを低減する前にシフトアクチュエータを動作させてシフトロッドのばねに蓄力しておき、エンジントルクを低減してドッグ(トランスミッションギヤに設けられたトルクを伝達する凸部)を抜くときにばねに蓄力したエネルギーを利用してシフト部品を加速させることで、駆動抜け時間の短縮を図った。

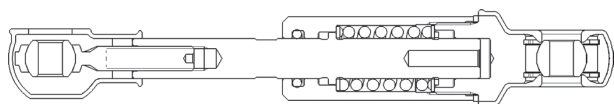


図3 ばね内蔵シフトロッド

3-5. トランスミッションギヤ

トランスミッションギヤ側でも駆動抜け時間の短縮のため、ドッグ本数を5本から6本へ増やすことで、ドッグ同士が突き当たりから噛み合いまでの最大回転角を17%縮小させた。

3-6. シフトレバー

当社独自のシーソー式シフトレバーをハンドルスイッチ一体式で新開発した(図4)。レバーは人差し指のみでのシフトアップ、シフトダウン操作も可能としている。シフトペダル操作が不要になることにより乗車姿勢の自由度や下半身のホールド性が向上する効果があり、ペダルレスならではの車体との一体感を狙い、ハンドシフトに集約した。



図4 シフトレバー

4 新機能

新機能として AT 機能を紹介する。

ライダーがシフト操作を行う“MT”モードと、市街地でのコミュニケーションやツーリングに適した AT モード“D”、D よりもスポーティな走行に適した AT モード“D+”を選択できるようにした。MT モードと AT モードは右手側のスイッチで切り替えられる。また AT モードは、モード設定や車速、エンジン回転数、アクセル開度情報などから最適なタイミングで自動変速を行う。具体的には、加速中にはライダーのアクセル操作からライダーの意図を判断しシフトアップ、キックダウンをする。一方、減速時には、車両の減速度に応じてシフトダウンすることで、加減速の駆動力が十分に出せるギヤ選択をできるよう制御を行っている。なお、AT モード中でもシフトレバーによる介入操作が可能である。

AT モードでは、制御プログラムに応じたタイミングで変速されることになるため、ライダーが自ら変速操作を行う MT モードよりも変速時の車両挙動が不快なものと捉えられやすい。そのため、快適性確保の視点で車両挙動の許容代は小さくなる。これ

に対し、上述した構造変更による駆動抜け時間短縮に加え、エンジン制御、クラッチ制御、シフト制御の協調方法を車両状況に応じて切替える新変速アルゴリズムを導入するなど、1/1,000秒単位の時間短縮を突き詰めた結果、車両挙動を大幅に抑えることができた。また、クラッチの摩耗や個体差の影響を抑えるために、走行中にクラッチの状態変化を学習し補正する制御を追加することで、上述の車両挙動安定性を長期にわたり維持可能とした。

5 性能

2022年式「FJR1300AS」と比較すると、駆動抜け時間は60%以上短縮し、「MT-09」の高いスポーツ性に十分対応できる性能を得ることができた(図5)。

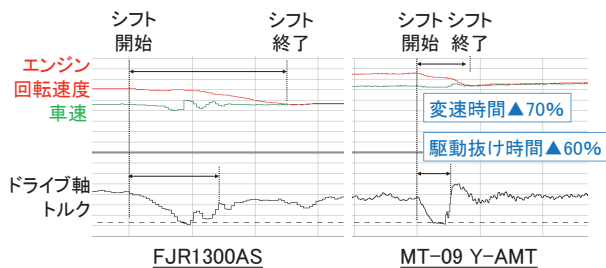


図5 「FJR1300AS」と「MT-09 Y-AMT」の駆動抜け時間比較

クイックシフタを搭載した「MT-09」(以下クイックシフタ車両)と、「MT-09 Y-AMT」(MTモード)(以下Y-AMT車両)を比較する。

はじめに、テストコースで実験ライダーが全開加速を行ったときの0-400m 加速タイム(表1)を示す。加速タイムは同等であることから、「MT-09」の加速性能を損なっていないことが分かる。実験ライダーからは、クラッチ操作が不要になることによる全開発進の容易さと安定性の高さに加え、ペダル操作が不要になることによる前傾姿勢の取りやすさにも効果があると評価された。

表1 クイックシフタ車両とY-AMT 車両の加速タイム比較

クイックシフタ	Y-AMT
10.9秒	10.9秒

次にテストコースのあるコーナを脱出加速中、1速から2速にシフトアップした時の車両挙動(図6)を示す。

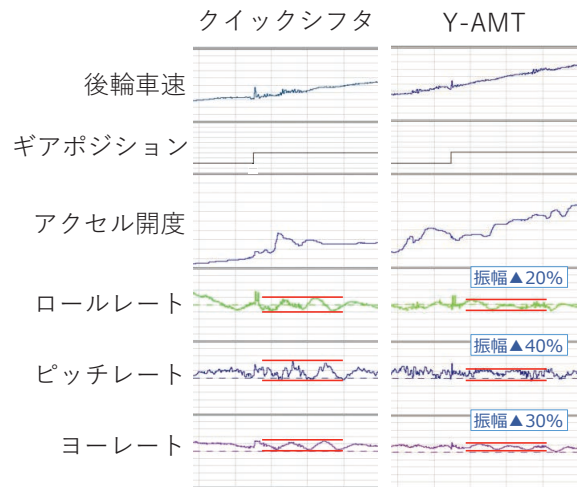


図6 テストコース走行時車両挙動

Y-AMT 車両は、変速時の車両挙動(ロール、ピッチ、ヨーの振幅)がクイックシフタ車両に比べて減少している。これはクラッチ制御による挙動緩和に加え、ペダル操作が不要になったことにより、ライダーは下半身のホールドを維持したままシフトアップできるためである。そのためアクセルをより大きく開けられ、より高い車速でコーナを脱出できている。また、実験ライダーからは、コーナリング姿勢が取りやすくなると評価された。

6 おわりに

以上のようにY-AMTは、基本構成や基本技術はYCC-Sから大きく変わらない。しかし、その名称を一新したのはその性能と機能が新たなステージに上がったと言えるほど進化したことを強く表現するためである。具体的にはペダル操作が不要になることによって下半身ホールド性向上、コーナリングやS字の切り返し時のライディングポジション自由度向上という変化があり、それによりブレーキ操作、リーニング、アクセル操作に集中でき、従来にない“走りへの没入感”が得られる人機官能[※]の価値につながっている。

また、本開発においてレイアウト、制御関連で14件の特許を出願している。これは社内外の関係者が妥協せず一丸となって新機能を具現化し製品化まで努力した結果である。

Y-AMTは「MT-09 Y-AMT」だけでなく、他機種にも広く展開していく予定である。AT機能は初心者用機能と思われる傾向もあるが、Y-AMTはスポーツ走行にも適した機能と性能を有しており、初心者からベテランまで様々なライダーにこの価値を感じていただきたい。また今後も開発を継続し、さらなる進化をさせていく。

[※]「人」と「機械」を高い次元で一体化させることにより、「人」の喜び・興奮をつくりだす技術で、当社独自の開発思想

■参考文献

- [1] 小杉 誠, 善野 徹:「モーターサイクル用自動化マニュアルトランスミッションの開発」, ヤマハ発動機技報 2006-12 No. 42
[2] 鈴木 孝典, 砂廣 一雄, 田中 大輔, 福嶋 健司:「2017年モデル ROV YXZ1000R SS」, ヤマハ発動機技報 2016-12 No. 52

■著者



林田 勇武

Isamu Hayashida

パワーレインユニット
プロダクト開発統括部
第2PT 設計部



鈴木 満宏

Mitsuhiro Suzuki

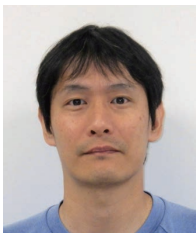
パワーレインユニット
先行企画開発統括部
先導開発部



福嶋 健司

Kenji Fukushima

PF 車両ユニット
電子技術統括部
システム開発部



南 賢吾

Kengo Minami

PF 車両ユニット
電子技術統括部
電子技術企画部

Abstract

Model-Based Development (MBD) refers to a method where models that behave in the same way as the real world are created on a computer, allowing for desk-based verification before producing actual prototypes. By using this approach, the number of physical prototypes can be reduced, leading to lower development costs and shorter development periods.

At Yamaha Motor Engineering (hereinafter referred to as “the Company”), the acquisition of MBD technology is being advanced. This includes not only control and dynamics for mobility across all domains of land, sea, and sky, handled by the Yamaha Motor Group, but also the development of models capable of calculating disturbances like wind and tidal currents under environmental conditions. However, one challenge with applying MBD to mobility is that the simulation results are expressed in numerical form, making it difficult to understand the behavior as an actual phenomenon. As a unique initiative, the Company has developed a simulation system called the “1D Virtual Viewer,” which visualizes MBD simulation results as animations of 3D-CAD data, making it easier to understand the behavior of mobility. This paper will first explain about the MBD technology and the 1D Virtual Viewer that was developed, using drones as a case study, and then introduce examples of how this technology has been applied to the marine and land domains.

1 はじめに

2 MBD 技術

MBD (Model Based Development) とは、コンピュータ上で現実と同じ振る舞いとなるモデルを作成し、実機試作前に机上検証する手法である。この手法を用いることで、実機の試作回数を削減でき、開発コストの削減と開発期間の短縮につながる。

ヤマハモーターエンジニアリング (以下、当社) ではヤマハ発動機グループで扱う陸海空全ての領域におけるモビリティの制御や運動だけでなく、環境条件に関する風や潮流といった外乱の演算が可能なモデル開発を行いながら、MBD の技術獲得を進めている。

しかし、モビリティに適用した MBD では、シミュレーション結果が数値で表現されるため、その挙動を実際の現象として理解しがたいことが課題である。

そこで、当社独自の取り組みとして、MBD によるシミュレーション結果を 3D-CAD データのアニメーションとして可視化することで、モビリティの挙動をより理解しやすくするシミュレーションシステム「1D Virtual Viewer」を開発した。

本稿では、はじめに当社の MBD 技術と開発した 1D Virtual Viewer についてドローンを題材に説明し、次にマリンおよびランド領域への本技術の展開事例について紹介する。

本章では当社で取り組んだ内容についてマルチロータ型ドローンを事例に紹介する。システム概要図を図1に示す。ここではプロペラと制御について詳細を解説する。

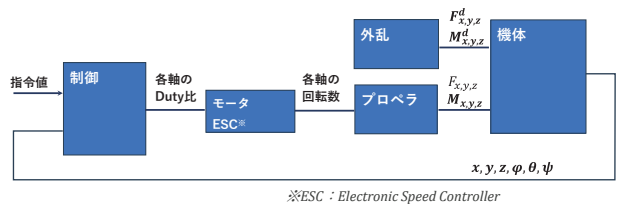


図1 ドローンシステム構成概要図

表1 図1の記号と定義

記号	定義	記号	定義
x	地上座標系 x 方向位置	$F_{x,y,z}^d$	外乱 (風) による並進方向の力
y	地上座標系 y 方向位置	$M_{x,y,z}^d$	外乱 (風) によるモーメント
z	地上座標系 z 方向位置	$F_{x,y,z}$	プロペラによる並進方向の力
φ	Roll 角	$M_{x,y,z}$	プロペラによるモーメント
θ	Pitch 角		
ψ	Yaw 角		

2-1. プロペラモデル

一般的に、プロペラの回転による推力は式(1)で算出される。

$$F = k\omega^2 \quad \dots (1)$$

表2 式(1)の記号と定義

記号	定義
k	変換係数
ω	プロペラ回転数

しかしプロペラを用いた回転翼機では大気速度、姿勢変化、外乱(風)の影響で式(1)では精度が不十分であり、プロペラが発生させる推力やモーメントの精度を高めるために、翼素理論をベースにした数式から力とモーメントを算出した^{[1][2]}。風洞にて様々な角度から風をプロペラに与えた際の3軸方向の力やモーメントを計測し、数式の一部パラメータを適合した上でモデルに織り込んだ。図2にパラメータ適合のための同定試験の様子を示す。

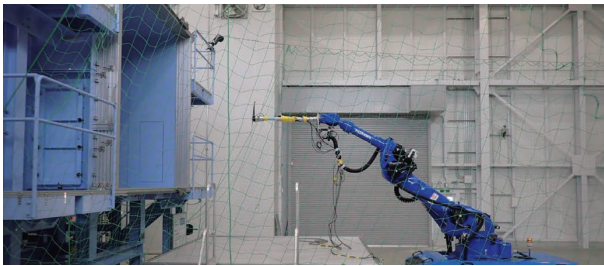


図2 プロペラモデル同定試験の様子

3軸の力は式(2)で実装する。

$$F_{x,y,z} = \rho S R^2 \Omega^2 \times C_{Tx}, C_{Ty}, C_{Tz} \quad \dots (2)$$

3軸のモーメントは式(3)で実装する。

$$M_{x,y,z} = \rho S R^3 \Omega^2 \times C_{Mx}, C_{My}, C_{Mz} \quad \dots (3)$$

表3 式(2)、(3)の記号と定義

記号	定義
ρ	空気密度
S	プロペラ回転面積
R	プロペラ半径
Ω	プロペラ回転数
C_{Tx}	x 軸推力係数(進行率、流入比等を用いて算出される)
C_{Ty}	y 軸推力係数(進行率、流入比等を用いて算出される)
C_{Tz}	z 軸推力係数(進行率、流入比等を用いて算出される)
C_{Mx}	x 軸モーメント係数(進行率、流入比等を用いて算出される)
C_{My}	y 軸モーメント係数(進行率、流入比等を用いて算出される)
C_{Mz}	x 軸モーメント係数(進行率、流入比等を用いて算出される)

比較結果の代表例を図3、4に示す。

回転数に対するz方向推力 実験とシミュレーション結果の比較

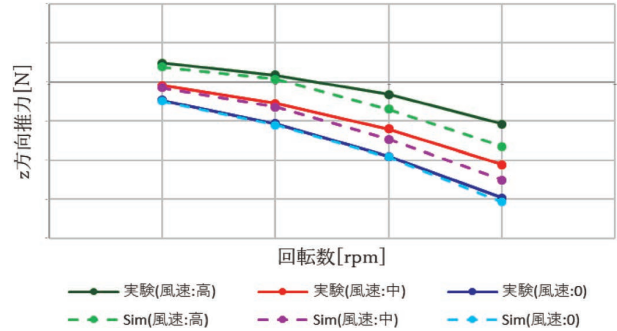


図3 回転数に対するz方向推力 比較結果

回転数に対するx方向推力 実験とシミュレーション結果の比較

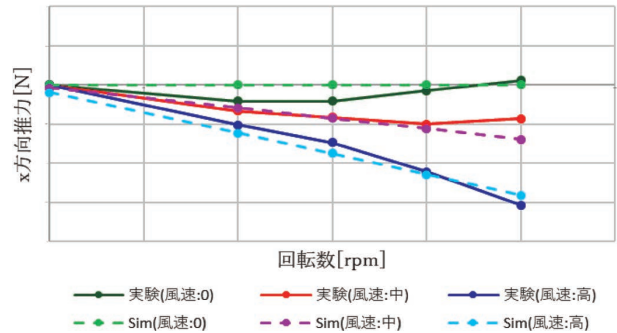


図4 回転数に対するx方向推力 比較結果

実機で計測した結果と同定結果がおおむね一致していることが確認できる。

このプロペラモデルを織り込むことで、様々な外乱(風)のある環境下での飛行試験が可能となり、実機試験のリソースを低減できると考えられる。

2-2. 機体モデル

また、外乱(風)はプロペラだけでなく機体への影響も大きい。そこで外乱(風)による機体への影響を織り込むために図5に示す風洞前のロボットアームに機体を固定し、様々な角度から風を与えた際の力とモーメントを計測する機体抵抗試験を実施した。



図5 機体抵抗試験の様子

プロペラや機体などのプラントモデルは Modelica[※]ベースの非因果モデルで作成した。因果モデルでの作成も可能であるが、機体全体を数式化する必要がないこと、可読性や今後のカスタム、拡張性を鑑みて非因果モデルを採用した(図6)。

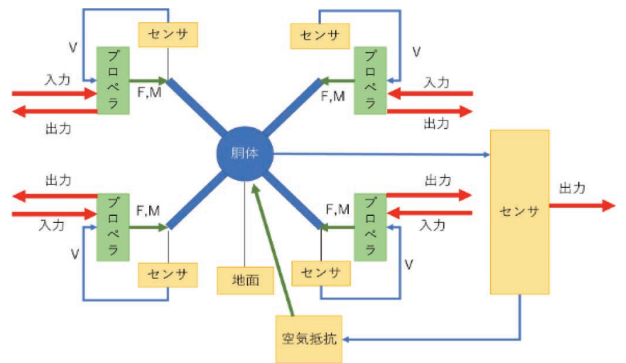


図6 プラントモデル全体概要図

※Modelica は Modelica Association の商標

2-3. 制御モデル

外乱(風)のある環境下で、ホバリングが比較的容易な位置制御を開発した。制御構成(代表例として x 軸、Pitch 軸のみ)を図7に示す。

制御は古典制御のフィードバック(以下 F.B.)制御を採用し、姿勢制御(角度 F.B.+ 角速度 F.B.)の上流に速度 F.B.を設置する構成とした。詳細は式(4)~(10)に示す。

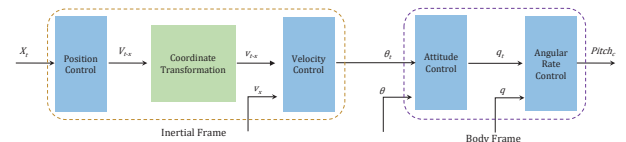


図7 位置制御構成図

$$V_{t-x} = K_{p1}(X_t - X) \quad \dots (4)$$

$$v_{t-x} = f(V_{t-x}, \varphi, \theta, \psi) \quad \dots (5)$$

※関数 f : 地上座標系速度から機体座標系速度への変換関数

$$e_{vx} = v_{t-x} - v_x \quad \dots (6)$$

$$\theta_t = K_{p2}e_{vx} + K_{I2}\frac{1}{s}e_{vx} - K_{D2}\frac{s}{\tau s + 1}v_x \quad \dots (7)$$

$$Q_t = K_{p3}(\theta_t - \theta) \quad \dots (8)$$

$$e_q = Q_t - q \quad \dots (9)$$

$$Pitch_c = K_{p4}e_q + K_{I4}\frac{1}{s}e_q - K_{D4}\frac{s}{\tau s + 1}q \quad \dots (10)$$

表4 式(4)~(10)の記号と定義

記号	定義	記号	定義
K_{p1}	位置制御の P ゲイン	X_t	x 軸目標位置
K_{p2}	速度制御の P ゲイン	X	x 軸現在位置
K_{p3}	角度制御の P ゲイン	V_{t-x}	x 軸目標速度(グローバル座標系)
K_{p4}	角速度制御の P ゲイン	v_{t-x}	x 軸目標速度(機体座標系)
K_{I2}	速度制御の I ゲイン	v_x	x 軸実速度
K_{I4}	角速度制御の I ゲイン	e_{vx}	x 軸速度の偏差
K_{D2}	速度制御の D ゲイン	θ_{tgt}	Pitch 角目標値
K_{D4}	角速度制御の D ゲイン	θ	実 Pitch 角
τ	微分フィルタ時定数	Q_t	Pitch 角速度目標値
		q	実 Pitch 角速度
		e_q	Pitch 角速度の偏差
		$Pitch_c$	Pitch 軸の制御量

2-4. 実機とシミュレータの比較

制御モデルとプラントモデル(プロペラモデルや機体モデルなど)を統合した環境を構築した。モデルの全体図を図8に示す。

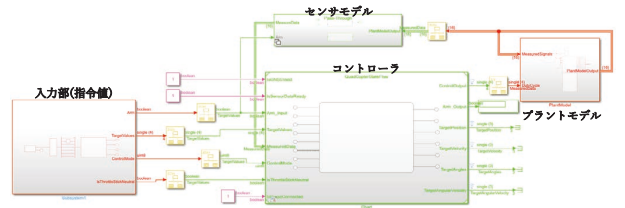


図8 ドローンのモデル全体像

この環境を用いて実機飛行試験と同条件でシミュレーションを実施した。比較結果を図9に示す。

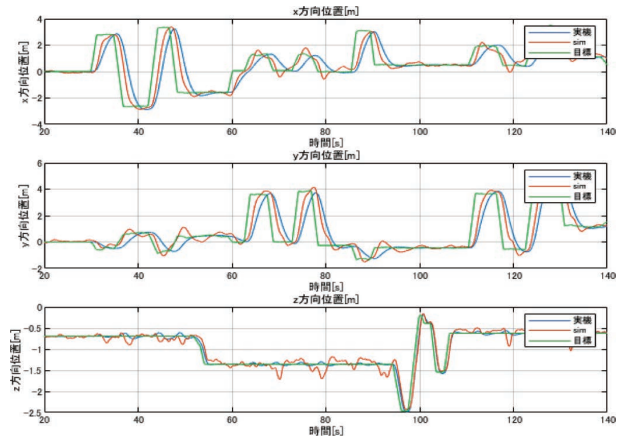


図9 実機とシミュレーションの位置制御の追従性比較

実機と同様に、シミュレータも目標位置に対し追従する傾向にあり、本シミュレータは実機と同様な振る舞いを再現できている。

シミュレーションの姿勢角のグラフを図10に示す。

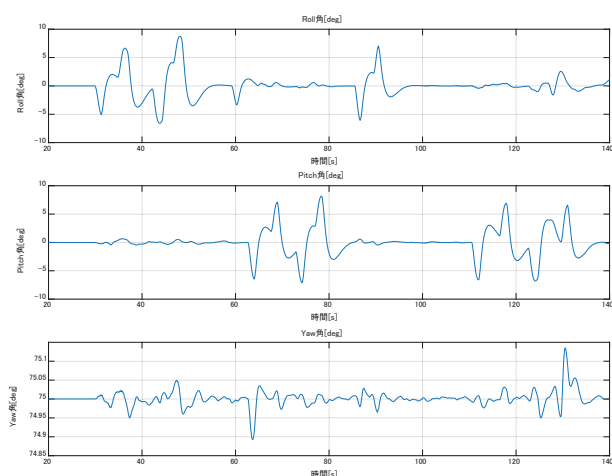


図10 位置制御で飛行させた際の姿勢角

図9、10のグラフだけでは、機体の挙動を想定することが難しい。飛行中の機体の挙動によらず目標が不変な場合は影響ないが、機体の挙動に応じて目標を補正操作する場合にはオペレータモデル(認知・判断・操作に相当するモデル)を織り込む必要があり、その開発に多くのリソースが必要となる。

これらの問題を解決するために、当社独自の取り組みとして機体挙動のシミュレーション結果をアニメーションとして視覚的に可視化するシミュレータ1D Virtual Viewerを開発した(図11)。



図11 改善前後の結果表示および操作方法イメージ図

3 1D Virtual Viewer

当社開発の1D Virtual Viewerは、制御モデルやプラントモデルなどの各要素モデルとゲームエンジンを連成させながら、シミュレーション結果をモビリティの挙動として3Dアニメーションで可視化する。これによりオペレータはモビリティの挙動を直感的に理解しながら、補正操作が可能となる。

1D Virtual Viewerのアーキテクチャを図12に示す。

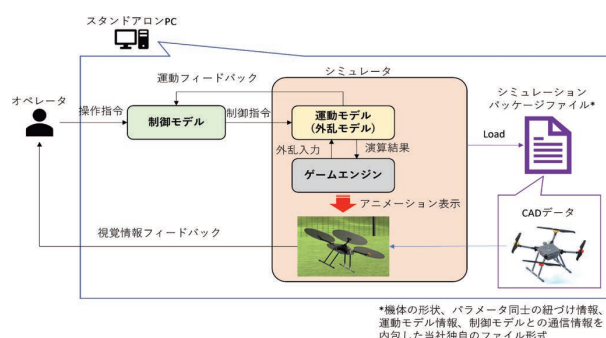


図12 1D Virtual Viewerのアーキテクチャ

次項で技術的な特徴を紹介する。

3-1. 制御、運動、外乱、ゲームエンジンのリアルタイム連携

各要素モデルは、FMU(Functional Mockup Unit)などの多様な形式で生成され、それぞれが異なる時間スケールで動作するため、これを調整する必要がある。

1D Virtual Viewerでは、それらを統合したシミュレーションを行うため、システムを構成する要素モデル全てを同じ時間スケールで動作するよう同期を取りながら実行可能とする時間同期メカニズムを織り込んだ。

これにより、異なる時間スケールで動作する各モデルの実行タイミングを調整しながら、同じペースで計算できるため、足並みが揃ったシミュレーション結果をゲームエンジン上で確認できる。

3-2. 連成シミュレーション設定

複数の要素モデルを連成する場合、その組み合わせパターンに応じて、相互でやり取りするパラメータを都度プログラミングしながら設定していく必要があり、多くの時間を要していた。

これを解決するため、1D Virtual Viewerでは制御や運動等の各要素モデルが持つパラメータ情報を読み込み、関連付けするパラメータ同士を容易に設定することが可能なユーザーインターフェース(以下UI)を導入した(図13)。

このUIを活用することによって、様々な要素モデルの連成パターンをプログラミングせずに素早く設定できるため、モデルの仕様に変更があった場合でも新たな仕様でのシミュレーションが早期に実施可能となる。

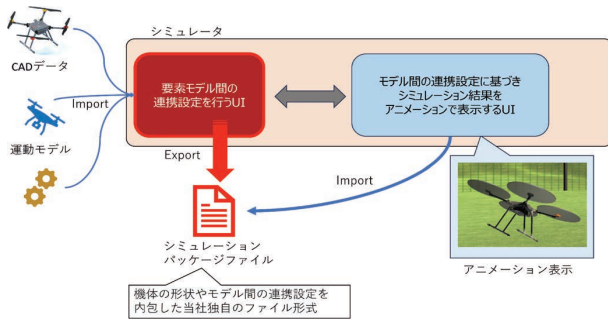


図13 連携設定 UI の活用イメージ

みでは、実艇ではなく全長約1.5mの模型船を対象とした。図15にシステム概要図を示す。ここでは、マリンシステムを構成する要素の代表例として「船外機」と「外乱」モデルについて記載する。

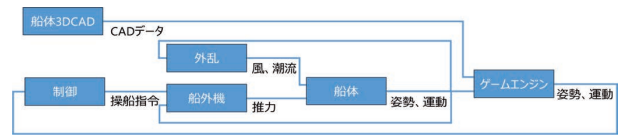


図15 マリンシステム構成概要図

船外機モデルの出力をプロペラ推力とし、式(11)で実装した。

$$T = \rho n^2 D^4 K_T \quad \dots (11)$$

表5 式(11)の記号と定義

記号	定義
ρ	密度
n	プロペラ回転数
D	プロペラ直径
K_T	推力係数

推力係数 K_T は図16のプロペラ単独性能試験により取得した。プロペラ模型を一定回転数で回転させながら一定速度の流速を与え、プロペラの推力とトルクを計測する。



図16 プロペラ単独性能試験の様子

外乱モデルは、風や潮流の向きと大きさを考慮し、船体に与える力を式(12)で実装した。

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 S C \quad \dots (12)$$

表6 式(12)の記号と定義

記号	定義
ρ	密度
V	外乱の速度
S	代表面積
C	抵抗係数

4 1D Virtual Viewer を適用したマルチロータシミュレータ環境

ドローンの MBD 環境と1D Virtual Viewer 環境を統合した環境のメイン画面を図14に示す。



図14 ドローンシミュレータのメイン画面

メイン画面には姿勢角、速度、各軸の回転数、位置等の機体情報が表示され、操縦者目線や機体後方からの視点といったカメラ視点の変更も可能である。

このシミュレータ環境ではゲームエンジン側に風向、風量の設定機能を持たせており、周辺環境の構築と合わせた設定が容易となる。

また、外乱（風）要素の織り込みにより、実機では評価が難しい突風や、風が時々刻々と変化する環境下でもシミュレーション評価が可能になる。最適な機体・モータ・プロペラの諸元、制御ロジックや定数の提案が実機試作前に可能になり、開発期間短縮に貢献できる。

5 他フィールドへの展開

5-1. マリン領域

マリン領域にも同様の効果を適用するために、船外機を1基搭載した船舶を題材にシミュレータ環境を構築した。本取り組

抵抗係数 C は図17の抵抗試験により取得した。模型船に一定速度の流速を与え、模型船に発生する抵抗を計測する。

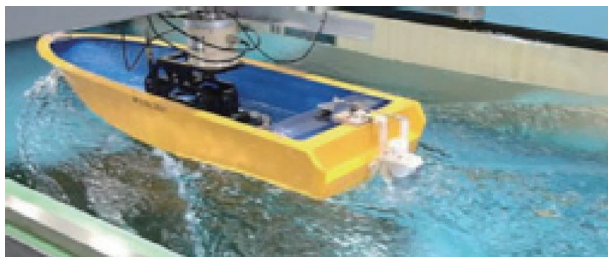


図17 抵抗試験の様子

モデルの計算精度を確認するため、模型船とモデルそれぞれで直進や定常円旋回などの基本的な運動の振る舞いを比較した。図18から、模型船と同等の振る舞いを再現できていると考えられる。

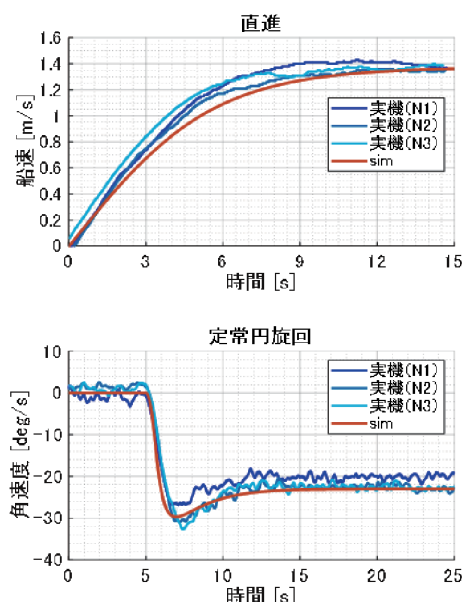


図18 実機とシミュレーションの模型船の挙動比較

1D Virtual Viewer 環境とドローンと同様に上記モデルを統合した環境のメイン画面を図19に示す。メイン画面には、船外機の推力や回転数、船体姿勢、操船情報などが表示されている。

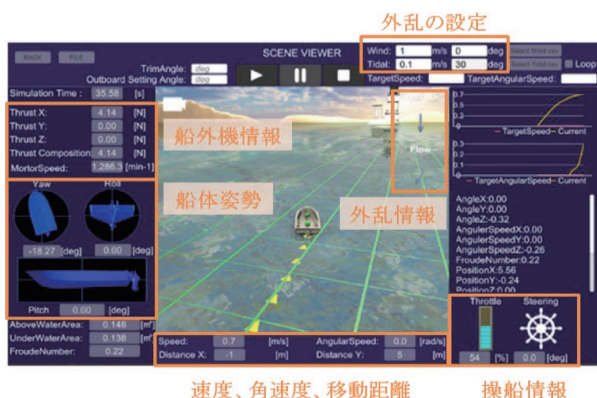


図19 マリンシミュレータのメイン画面

5-2. ランド(二輪)領域

ランド領域にも同様の効果を適用するために、パワートレーン(モータ)をプラントモデルとした1D Virtual Viewer 環境を構築した。そのメイン画面を図20に示す。



図20 ランド(二輪)シミュレータのメイン画面

本環境を用いて段差乗り越し時の走破性や、登坂時の必要駆動力の検証に活用した。

6 おわりに

当社で取り組んでいる MBD、それに可視化を連成させた技術について紹介した。これは陸海空のモビリティ全てに適用できる技術である。1D Virtual Viewer の活用により、実機では評価が難しい様々な条件のシミュレーションや、対象となるモビリティの挙動を確認しながらの補正操作が可能である。これらにより開発期間の短縮につながることが想定される。

今後はユーザビリティの向上や拡張性などに取り組み、ヤマハ発動機グループ内に広げていき、開発効率化につなげていきたい。

参考文献

- [1] 航空工学(1) 東昭 裳華房 1989
- [2] ヘリコプタ入門 加藤寛一郎、今永勇生 東京大学出版会 1985

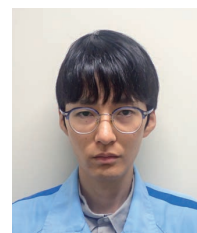
著者



堀川 雅弘
Masahiro Horikawa
ヤマハモーターエンジニアリング(株)
先行技術開発部



太田 博康
Hiroyasu Ota
ヤマハモーターエンジニアリング(株)
先行技術開発部



松清 一樹
Kazuki Matsukiyo
ヤマハモーターエンジニアリング(株)
先行技術開発部



社会共創による新価値創造「Town eMotion」Vol. 1 まちなか R&D クリエイティブフィールドの可能性 Creation of New Value through Social Co-Creation: “Town eMotion” Vol. 1 Possibilities of Urban R&D Creative Fields

榊原 瑞穂

Abstract

Yamaha Motor Co., Ltd. (hereafter referred to as “the Company”) has established “Creating Kando*” as its corporate mission, aiming to realize people’s dreams through wisdom and passion while continuously striving to deliver “the next Kando.” *Kando is a Japanese word for the simultaneous feelings of deep satisfaction and intense excitement that we experience when we encounter something of exceptional value. Since 2020, the Creative Center, responsible for design and branding, has been promoting an open innovation-based research and development initiative called “Town eMotion,” which aims to enhance the well-being of individuals and society^[1].

In this initiative, the Company collaborates with various stakeholders from the private sector, government, academia, and civil society to research and develop mobility solutions and environments that provide the Kando experiences in line with the Company’s ethos. The Company is challenging itself to materialize new products, systems, and social values within urban settings.

In the motorcycle market, one of the Company’s main products, there is a growing demand for carbon neutrality, requiring driving technological developments in electrification and hydrogen utilization, as well as institutional reforms.

In a diverse and increasingly complex society, sales from single products are on a declining trend, making not only business scale expansion but also new business creation challenging. Therefore, it is deemed necessary to utilize assets such as products, services, and human resources that the Company can provide, to create an environment that fosters open innovation through co-creation with local communities across various businesses and functions, allowing for autonomous development.

Additionally, as urban environments change, many cities have been accelerating their transition to “walkable cities,” shifting from car-centric to people-centric street spaces in recent years. These initiatives hold the potential to bring benefits toward sustainable urban development, such as promoting health through walking and reducing traffic congestion. Similar advanced initiatives are also being developed within Japan. This report introduces the background and development of the “Town eMotion” initiative, its systematic approach, and specific examples of its implementation.

1 はじめに

ヤマハ発動機株式会社(以下、当社)は企業目的として“感動創造”を掲げ、人々の夢を知恵と情熱で実現し、常に“次の感動”を期待される存在となることを目指している。デザインとブランディングを担うクリエイティブ本部では、2020年から、人と社会の Well-being 向上を目指すオープンイノベーション型の研究開発活動「Town eMotion(タウンイモーション)」を進めている^[1]。

この活動では、産官学民のさまざまなステークホルダーと共創しながら、当社らしい感動体験をもたらす“モビリティやフィールド”を研究開発し、新たなモノ・仕組みの価値や当社の

社会価値をまちなかで具現化していくことに挑戦している。

当社主力商品の一つである二輪車市場においても、カーボンニュートラルへの対応が求められており、電動化や水素利用などの技術開発や制度改革が進められている。

多様で複雑化する社会において、単一商材での売上規模は減少傾向であり、事業規模拡大だけでなく事業創出そのものが困難となっている。このため、当社が提供できる商材やサービス、人材などのアセットを利活用しながら、事業や機能横断で地域社会との共創によるオープンイノベーションを誘発させる環境を構築し、自律発展が可能なかたちで機能させる必要があると考えられる。

また一方で、都市環境の変化として、近年多くの都市が街路

空間を車中心から人中心へと変革する“ウォークアブルシティ”への移行を加速させている^[2]。これらの取り組みは、歩行による健康促進や交通渋滞の軽減など、持続可能な都市開発に向けた利点をもたらす可能性があり、日本国内でも同様の先進的な取り組みが展開されている。本報告では、「Town eMotion」活動の経緯と展開、活動の体系化、および具体事例について紹介する。

2 「Town eMotion」の活動経緯

当社では従来、新規事業開発部門を中心に、地域の移動課題解決のための時速20km未満のEV“グリーンスローモビリティ(GSM)”の実証実験と市場導入を進めてきた^[3]。

また、都市開発において人・まち・モビリティの関係性など、統合的な価値提供の必要性が高まる中、クリエイティブ本部では「Town eMotion」プロジェクトを立ち上げ、社会課題の解決に向けた新たな価値創造を目指す活動をスタートさせた。

活動初期はコロナの状況下でフィールドワークには制限があったため、社内外の有志メンバーでワークショップを行い、未来のまちとモビリティに関するアイデアを、コンセプトブックにまとめることとした(図1)。「Town eMotion」が社会やまちへの貢献を目的とし、社内外の意見を取り入れる必要があること、当社に不足する環境側(まち・地域・道路空間等)の知見を得る必要があることから、東京都世田谷区で地域コミュニティ活動を行うインフラデザイナーの御代田和弘(みよたかずひろ)氏^[4]の協力を得ることとした。

このブックのコンセプトを“まちの感動と興奮をアシストする”とし、まちや道路とモビリティの関係性に着目し、スローで安全なまちづくりと地域コミュニティの活性化に貢献する内容を示した。

その後社内新規事業開発部門と連携し、ステークホルダーとの対話を通じて共感を得ることができ、移動・輸送の提供だけでない“まちの共創パートナー”という関係者間の認識を得ることができた。



図1 「Town eMotion」コンセプトブック(A3サイズ6面折)

3 まちなか R&D 活動の展開

ステークホルダーとの対話と並行し、コンセプトブックで言及したまち・道路・モビリティに着目した仮説検証(PoC)を開始した。

人やモノの移動だけでなくモビリティ価値の仮説から、地域コミュニティの場としてのモビリティの利活用をピックアップし、世田谷区三宿エリアで“三宿あおぞら図書館”PoCを実施した(図2)。



図2 三宿あおぞら図書館 2021/10 東京都世田谷区

以前よりこの地域では御代田氏を中心となり、自治体の協力も得ながら、交通安全向上のためのデザイン活動や高齢者支援のためのベンチ設置などを行っており、当社がまちなかで新しい価値を検証するためのフィールドとして相応であった。

三宿あおぞら図書館は、当社新規事業開発部門が製作した GSM 試作車両を使用し、地域のイベントに協力する形で実現した。このイベントは、商店会、近隣大学、図書館などの地域ステークホルダーとともに企画・実行され、コロナの状況下で子どもたちが安全に読書を楽しめる屋外図書館として参加者の好評を得た。参加ステークホルダーへの事後アンケートからは、GSM の存在がイベントの目印として機能し、多様な活動に利用される可能性が示され、また、地域の場づくりとしての効果も確認できたとと言える。

三宿エリアにおいては地域ステークホルダーとの信頼関係を継続的に構築し、2022年には既存のまち・道路空間を利活用した地域活性のしくみを想定し、先述の試作車両を用い、「三宿モバイルパークレット」PoC を実行した(図3)。



図3 三宿モバイルパークレット 2022/3 東京都世田谷区

この PoC では、店舗・歩道・車道を一体的なぎわい空間として利活用する基本的な概念の実証ができたとともに、地域ニーズに合わせた車両の仕様や運用のあり方について多くの示唆を得ることができた。また三宿以外の地域の産官学民ステークホルダーに PoC を現場で体験いただき、多くの共感を得たことで、その後の共創パートナーとの関係構築につながった。

三宿エリアでの PoC と並行し、地域の課題・価値探索を進める中で、活発な社会活動の先進地域として神奈川県鎌倉市に着目し、筆者が従来参加していた東京大学 IOG (INSTITUTE OF GERONTOLOGY)^[5] の産学ネットワークに所属する秋山弘子名誉教授^[6] が主宰する鎌倉リビングラボ^[7] の協力を得て、鎌倉地域における活動を2021年から開始、鎌倉市民に対するモビリティ体験を実施した。2022年には「Town eMotion」ホー

ムページにて共創ステークホルダーへの情報発信を開始した(図4)。



図4 「Town eMotion」ホームページ

こうした経緯を経て2022年末までに首都圏地域を中心に活動を展開し、多面的な価値探索・検証・発信を行うことができた。2023年には、世田谷区、鎌倉市に加え、千代田区、台東区、茨城県つくば市、当社の本社所在地である静岡県磐田市、浜松市といった地域で活動トライアルを広げていった。

4 活動の体系化

こうした実際のまちなか、地域社会のなかで R&D を進めていく活動を当社として定義し、ステークホルダーとともに自律的に継続発展する仕組みとして確立させていくべく、活動の体系化を行った。

以下、順を追って解説する。

図5に示す“共創エコシステム”とは、地域コミュニティにおける“ビジョン”と“クリエイティブフィールド”を共有する DAO (自律分散型組織) であり、このエコシステムにおいて、ステークホルダーは、共感するありたい未来像、すなわちビジョンを形成・共有する。ここで言う“ビジョン”は、地域の関係人口が望む理想的な未来の姿を示すものである。



図5 共創エコシステム

“クリエイティブフィールド”は、各ステークホルダーが持ち寄ったアイデアや資源を掛け合わせることで、新たな価値を創造する場と機会である。ここでは、異なるバックグラウンドや強みを持つ人々が協力し合い、地域コミュニティを豊かにするイノベーションを生み出していく。

このように“共創エコシステム”は地域コミュニティの自律的な継続発展と、ステークホルダー間の協働を促進するための必須の枠組みと捉えられる。

この定義の中で「Town eMotion」の活動は、共創エコシステムの一員として、場と機会の研究開発であるクリエイティブフィールド活動と、モノ・仕組みの研究開発であるプロトタイプ活動を実践し、社会関係価値創出に寄与していると言える(図6)。

こうした体系化に基づきこれまでの活動の拡がりをもとめた(図7)。

このように、クリエイティブ本部の拠点の一つである東京汐留のメンバーを中心とした関東圏から着手し、当社本社の所在する遠州地域へ活動を広げ、関係人口を増やしながら継続している。

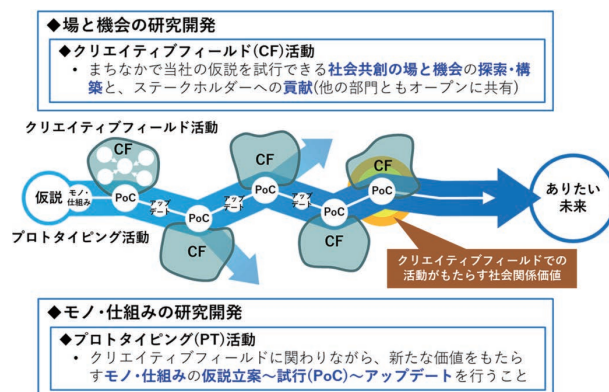


図6 「Town eMotion」活動

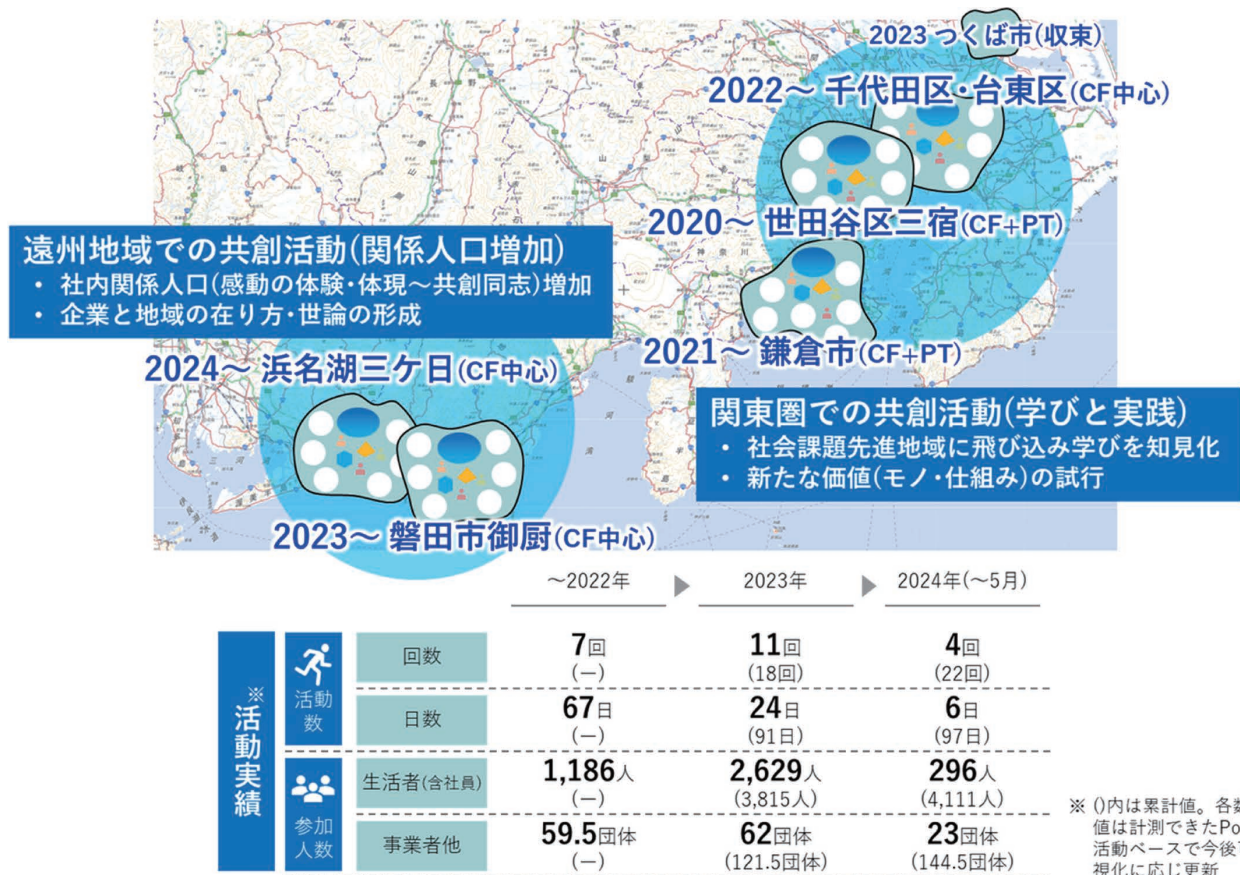


図7 共創エコシステム活動とクリエイティブフィールドの拡がり

「地理院地図 GSI Map」(国土地理院) (<https://maps.gsi.go.jp/>) をもとにヤマハ発動機株式会社作成

5 活動例 “パレットモビリティ”

最後にクリエイティブフィールドにおけるプロトタイプ活動の一つを紹介する。

2023年から、地域の多様な場づくりとして機能する車両、および地域住民などの担い手による運用システムも想定し、試作車両を用いた“パレットモビリティ”の価値検証を進めている。

地域コミュニティ活動・店舗空間の拡張・自然環境など地域資源を生かした場づくり、といった複数のシーンに対応し、走行機能を有するベースユニットと、各ニーズに合わせ可変性を持つ上物ユニットという構成を想定し、まずは各シーンにおける場を体験可能な基本機能を検証する試作車両（以下、機能検証プロト）を開発した（図8）。



図8 パレットモビリティPoC 2023/9 静岡県磐田市

機能検証プロトはベース車両に当社 GSM を用い、インテリアのフラット化、ベンチ・カウンター等の什器、可変ルーフの設置を行った。機能検証に特化し、上下ユニット分離機構や外観意匠は検証の対象外としシンプルな仮装とした。

この機能検証プロトを用い、これまで世田谷区三宿（店舗空間を拡張するモバイルパークレット）、磐田市御厨（地域イベントの憩いの場づくり）、台東区上野公園（モビリティ発着ハブの場づくり）、鎌倉市七里ガ浜（海風を感じる対話の場づくり）、といった多様な場での PoC を進め、得られた知見を都度仕様に反映させるアジャイルな開発を進めている。

パレットモビリティPoC は今後、よりユーザビリティやオペレーションを考慮した、ユーザーエクスペリエンス（UX）を検証可能なモデル開発を進め、地域や都市開発での検証・活用提案を進めていく計画である。

6 おわりに

今回は「Town eMotion」の活動背景・経緯・展開、活動の体

系化に加え、パレットモビリティの開発を中心に活動紹介を行った。

「Town eMotion」では上記に加えて、“地域の資源循環×モビリティによる共創エコシステム” “歩行～低速領域における新たな移動スタイル” といったプロジェクトでの価値検証をオープンイノベーション型で進めており、またの機会に紹介したい。

またこの活動は当社における価値探索フェーズと位置付けており、財務面だけでなく非財務指標（主に社会関係資本）として適切に可視化していく計画である。

今後の活動についてはホームページでも順次公開していく予定である。

■参考文献

- [1] ヤマハ発動機株式会社. “Town eMotion未来のまちとモビリティ”. ヤマハ発動機株式会社HP. <https://www.yamaha-motor.co.jp/townemotion/> (参照2024-05-31)
- [2] 国土交通省. “WALKABLE PORTAL”. 国土交通省HP. <https://www.mlit.go.jp/toshi/walkable/> (参照2024-05-31)
- [3] ヤマハ発動機株式会社. “グリーンスローモビリティ（電動カート公道仕様）”. ヤマハ発動機株式会社HP. <https://www.yamaha-motor.co.jp/gsm/> (参照2024-05-31)
- [4] 御代田和弘氏. “4FRAMES”. 4FRAMES HP. <https://4frames.net/> (参照2024-05-31)
- [5] 東京大学. “東京大学 高齢社会総合研究機構”. 東京大学HP. <https://www.iog.u-tokyo.ac.jp/> (参照2024-05-31)
- [6] 東京大学. “東京大学 高齢社会総合研究機構コアメンバー”. 東京大学HP. <https://www.iog.u-tokyo.ac.jp/member/akiyama-hiroko/> (参照2024-05-31)
- [7] 高齢社会共創センター. “鎌倉リビングラボ”. 高齢社会共創センターHP. <https://www.kamakurall.cc-aa.or.jp/> (参照2024-05-31)

■著者



榊原 瑞穂

Mizuho Sakakibara

クリエイティブ本部

プランニングデザイン部

フレーム変形が二輪車の運動に及ぼす影響に関する研究（第1報）

Effect of Frame Deformation on Motorcycle Dynamics (First Report)

坂本 和信 草刈 政宏 中谷 友輝 北川 洋

本報は、公益社団法人 自動車技術会 2024年自動車技術会 春季大会 学術講演会予稿集に掲載された論文を同会の許可を得て転載したものです。本論文の著作権は公益社団法人 自動車技術会に属し、無断複製・転載を禁じます。

要旨

フレームの剛性は二輪車の操縦安定性に影響することが知られており、曲げや振りの力を静的に加えた変形量から算出される剛性値に基づいてフレームの設計が行われてきた。しかし走行時のフレームには、車両の運動による過渡的な力によって複雑な変形が生じていると考えられる。そこで本研究では、走行時のフレーム変形を取得し、二輪車の力学モデルに基づいて解析を行った。その結果、旋回時に支配的な力の移り変わりによって、ヘッドパイプ部やピボット部に局部的な振り変形が生じていることがわかった。そして、この局部的な変形が車両の運動性能に影響することを明らかにした。

Abstract

The effect of frame stiffness on motorcycle dynamics was analyzed based on the forces and frame deformation that occur during running. Focusing on turning, torsional deformation mainly occurs, which is a superposition of the torsional deformation of the steering head pipe and the torsional deformation of the rear swingarm pivot. At the start of turning, when high roll acceleration is applied, the torsional deformation of the head pipe occurs first, and the torsional deformation of the pivot occurs later. The time difference between these deformations is closely related to the transition of the force component applied to the vehicle. The local deformation of the frame delays the response of the deformation relative to the force and affects the motorcycle dynamics.

1 まえがき

二輪車の操縦安定性に関わるフレームの特性を表す指標として剛性値が長らく用いられている。剛性値はフレームを部分的に拘束し、静的な力を加えた際の変形量から算出される。その拘束状態や入力方向は走行中の二輪車に作用する力を想定しているとされ、剛性値を基にしたフレームの詳細設計が行われてきた^[1]。これにより、軽量のフレーム構造が考案される一方で、操縦安定性との両立には試行錯誤が続けられている。今後さらなる構造の合理化と操縦安定性の向上を実現していくためには、フレーム剛性に対する真の要求を明らかにすることが重要である。そこで本研究では、剛性を構成する力と変形の関係に立ち返り、走行中の二輪車に作用する力と、それによって生じるフレームの変形について解析を行った。その結果、旋回時に生じているフレームの過渡的な振り変形の詳細と、運動性能に寄与する変形の特徴を明らかにできたので報告する。

2 フレーム変形の取得方法

2-1. 概要

フレーム単体の静的な弾性変形は実験計測や数値解析により取得することができる。走行時については、マルチボディダイナミクスによる時刻歴解析が行われているものの、フレームの変形は明らかになっていない^[2]。本研究で対象とする走行時のフレーム変形は、車両各部に貼付けたひずみゲージの測定データと数値解析を併用した同定手法による推定が行われている^{[3][4]}。この同定手法では、小型の計測機器により車両挙動への影響を最小限にできるが、正確な変形を求めるためには適切な解析モデルが必要である。本研究では、以下の方法で解析モデルを構築し、高い精度でフレーム変形を取得する。

2-2. ひずみ計測による変形の同定手法

本研究ではまず、フロントフォーク、メインフレーム、スイングアーム等を実車両に従って結合し、マスプロパティを正確に再現した車両アッセンブリでの有限要素モデルを構築する(図1)。そして、走行中の車両に作用している力を想定した複数

の荷重条件を設定し、慣性リリーフ解析を行う。その各荷重条件によって生じる変形を基本変形モードとし、各基本変形モードにおけるひずみの線型和が実車計測で得られる車両各部のひずみと一致するように各基本変形モードの倍率を同定する。これにより、フレームの固有振動数よりも十分に低い周波数の入力による非拘束状態の弾性変形量を取得する。

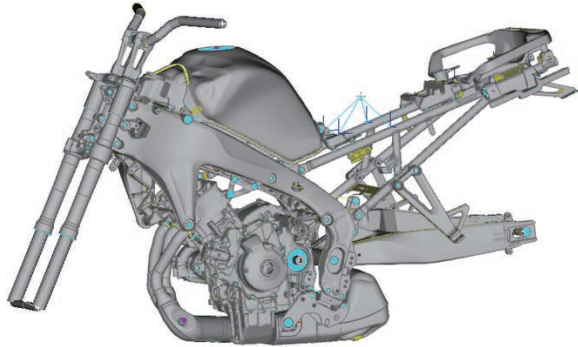


図1 FEM simulation model

2-3. 荷重条件の選定方法

走行時のフレーム変形を基本変形モードの重ね合わせとして求める上で、適切な荷重条件の設定が重要である。本研究ではまず、前後輪のタイヤ力、ジャイロモーメント、チェーン張力など車両に作用する力を想定した荷重条件にて解析し、基本変形モードを得る。そして、ヘッドパイプやピボットなどフレームの変形を特徴づける代表変位を用いて基本変形モード間の相関性を評価する。この相関性の評価にはモード相関係数 (Modal Assurance Criterion, MAC)^[5]を用いる。相関性の高い基本変形モードがある場合は荷重条件を削除または統合し、各基本変形モードの相関性が低くなるように荷重条件を再設定する。これにより各基本変形モードにおけるひずみ分布の独立性を高め、ひずみ計測点を削減しながら、少ない基本変形モードの重ね合わせで走行時のフレーム変形を得ることができる。図2に荷重条件の例を示す。

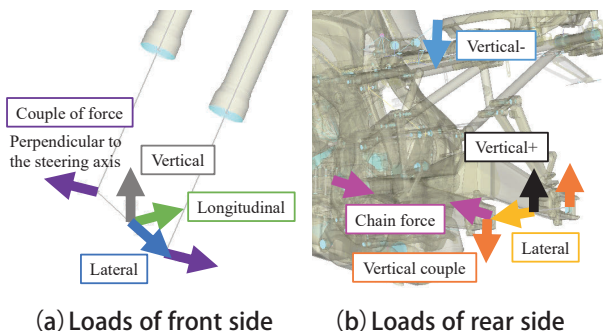


図2 Examples of load conditions

3 走行時のフレーム変形の同定と分析

3-1. フレーム変形の同定結果

本研究では、フレーム変形を特徴づける代表変位を車両重心を基準としたヘッドパイプ上下端とピボット左右端の節点における並進3方向の変位量とした。また、車両に生じるひずみ計測時の走行条件は、平坦路を80km/hの一定速度で直進した後、右旋回と左旋回を繰り返すS字コースとした。図3には実車計測したひずみと基本変形モードの線型和で算出したひずみの比較例を示す。図2に示した9つの荷重条件を用いた基本変形モードの重ね合わせにより、精度良く走行時のフレーム変形を得ることができている。

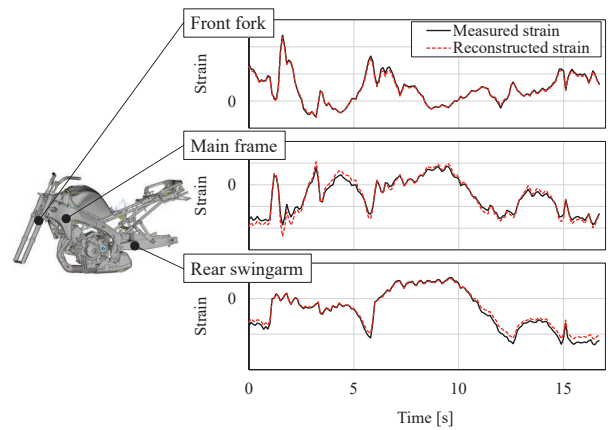


図3 Examples of measured strain and reconstructed strain

3-2. 基本変形モードの寄与率分析

走行時のフレーム変形状態を把握するため、各基本変形モードの寄与率を算出する。本研究では、ヘッドパイプ上下端の節点 ($i = 1, 2$) とピボット左右端の節点 ($i = 3, 4$) のそれぞれ並進3方向の変位量 (x_i, y_i, z_i) を成分とする変位ベクトル ϕ を用いて、走行時のフレーム変形と各基本変形モードの相関性から寄与率を算出する。ここで、

$$\phi = [x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3, x_4, y_4, z_4]^T \quad (1)$$

である。まず時刻 t におけるフレーム変形のベクトルを ϕ_t 、各荷重条件の基本変形モードのベクトルを ϕ_n ($n = 1, 2, \dots, 9$) とし、 ϕ_t と ϕ_n のモード相関係数を次のように求める。

$$MAC(t, n) = \frac{|\phi_t^T \phi_n|^2}{(\phi_t^T \phi_t)(\phi_n^T \phi_n)} \quad (2)$$

また、時刻 t におけるモード相関係数の総和は、

$$MAC_{\text{sum}}(t) = \sum_{n=1}^9 MAC(t, n) \quad (3)$$

となる。これより、時刻 t における各基本変形モードの寄与率を次のように算出する。

$$C(t_n) = \frac{MAC(t, n)}{MAC_{\text{sum}}(t)} \quad (4)$$

図4に寄与率の時刻歴推移を示す。寄与率が低い基本変形モードは省略している。直進走行部では車両垂直または前後方向の荷重による基本変形モードの寄与率が高い。そして、ロール角速度の増加に伴ってフロント横方向の荷重による基本変形モードの寄与率が高まり、さらにヨー角速度の増加とともにリヤ上下方向の偶力による基本変形モードの寄与率が高まる。右旋回から左旋回に切返す際にも同様の傾向が見られる。フロント横荷重は旋回方向に車両を倒すようにフレームのヘッドパイプを振る変形モードを生じさせ、リヤ上下偶力は旋回方向とは逆向きに車両を起すようにフレームのピボットを振る変形モードを生じさせる(図5)。旋回時にはこの2つの基本変形モードが支配的である。

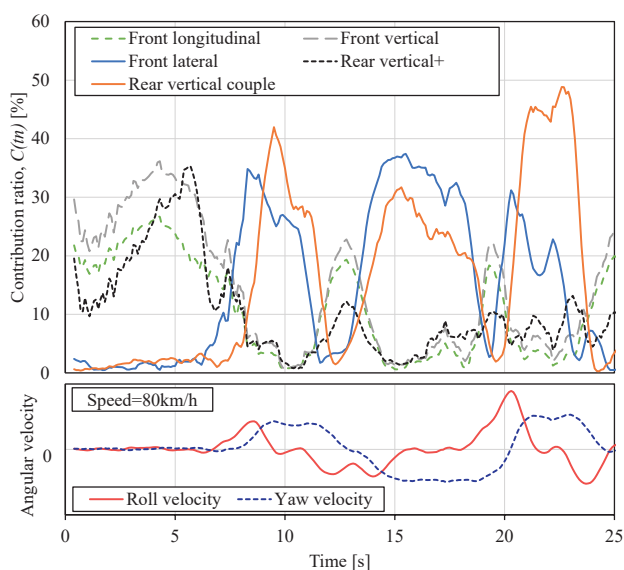
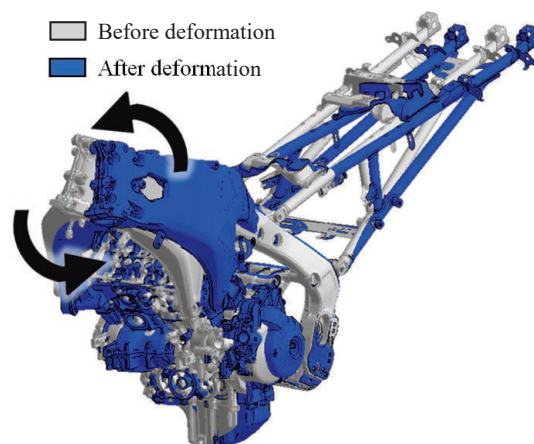


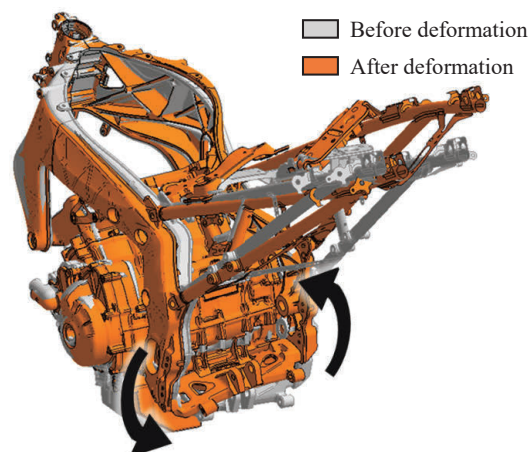
図4 Contribution ratio of each fundamental deformation modes

3-3. フレームの振り変形

旋回時に支配的なフレームの振り変形について、ピボットを基準にしたヘッドパイプの振れ角の推移と、その内訳であるフロント横荷重およびリヤ上下偶力により生じる振れ角を図6に示す。基本変形モードの寄与率分析結果と同様に、フロント横荷重による振れ角に対してリヤ上下偶力による振れ角が遅れて推移する。また、定常旋回時には、リヤ上下偶力による振れ角の寄与が高い。



(a) Deformation mode due to front lateral load



(b) Deformation mode due to rear vertical couple of force

図5 Fundamental deformation modes

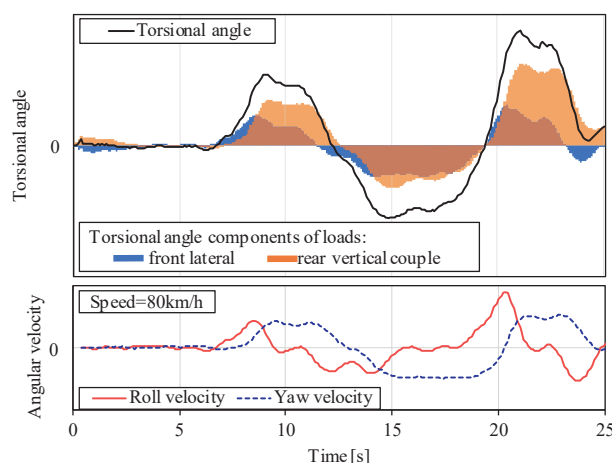


図6 Frame torsional angle and its components

4 フレームを振る力の釣り合い

フレームは車両の運動状態に応じて変形し、旋回時には主

に振り変形を生じている。そこで、その振り変形を生じさせる力について、二輪車の最も基本的な数式モデルである4自由度モデル^[6]を参考に考察する。

4-1. フレームに作用する振りモーメント

まず、図7に示すステア軸とフレームの結合部である点Cにおいて、ステア軸に直交する軸周りに車両前部(操舵系)から作用するモーメント M_{front} は下式で記述できる。

$$M_{front} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 \quad (5)$$

$$A_1 = m_f f (g \sin \varphi - v \dot{\psi} \cos \varphi)$$

$$A_2 = i_{fw} \frac{v}{R_f} (\dot{\psi} \cos \varphi \cos \varepsilon - \dot{\varphi} \sin \varepsilon)$$

$$A_3 = F_{fy} (R_f \cos \varepsilon + j) \cos \varphi$$

$$A_4 = F_{fz} (R_f \cos \varepsilon + j) \sin \varphi$$

$$A_5 = M_{fx} \cos \varepsilon$$

$$A_6 = -M_{fy} \sin \varphi \sin \varepsilon$$

$$A_7 = M_{fz} \cos \varphi \sin \varepsilon$$

ただし、操舵角、タイヤ横すべり角、フロントフォーク部の慣性モーメントの影響は小さいため無視する。また、走行速度は一定とする。図7および式(5)中の記号は以下の通りである。

G_v : 車両重心

G_f : 前輪を含むフロントフォーク部の重心

G_r : 後輪とライダーを含むメインフレーム部の重心

m_f : 前輪を含むフロントフォーク部の質量

g : 重力加速度

v : 走行速度

i_{fw} : 前輪の極慣性モーメント

F_{fy} : 前タイヤの横力

F_{fz} : 前タイヤの垂直抗力

M_{fx} : 前タイヤのオーバーステアリングモーメント

M_{fy} : 前タイヤの転がり抵抗モーメント

M_{fz} : 前タイヤのセルフアライニングトルク

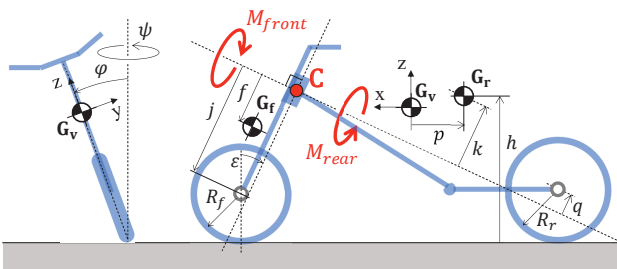


図7 Schematic diagram of 4-DoF motorcycle model

同様に、図7の点Cに車両後部(車体系)から作用するモーメント M_{rear} は下式で記述できる。

$$M_{rear} = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 + B_7 + B_8 + B_9 \quad (6)$$

$$B_1 = m_r k (g \sin \varphi - v \dot{\psi} \cos \varphi)$$

$$B_2 = -i_{rw} \frac{v}{R_r} (\dot{\psi} \cos \varphi \cos \varepsilon - \dot{\varphi} \sin \varepsilon)$$

$$B_3 = -F_{ry} (R_r \cos \varepsilon - q) \cos \varphi$$

$$B_4 = -F_{rz} (R_r \cos \varepsilon - q) \sin \varphi$$

$$B_5 = -M_{rx} \cos \varepsilon$$

$$B_6 = M_{ry} \sin \varphi \sin \varepsilon$$

$$B_7 = -M_{rz} \cos \varphi \sin \varepsilon$$

$$B_8 = \dot{\varphi} k \left(\frac{I_{rx} + m_r h^2}{h} \cos \varepsilon + \frac{C_{rxz}}{p} \sin \varepsilon \right)$$

$$B_9 = -\dot{\psi} k \cos \varphi \left(\frac{I_{rz} + m_r p^2}{p} \sin \varepsilon + \frac{C_{rxz}}{h} \cos \varepsilon \right)$$

なお、記号については以下の通りである。

m_r : 後輪とライダーを含むメインフレーム部の質量

I_{rx} : 重心 G_r の x 軸周りに慣性モーメント

I_{rz} : 重心 G_r の z 軸周りに慣性モーメント

C_{rxz} : 重心 G_r の x 軸と z 軸に関する慣性乗積

i_{rw} : 後輪の極慣性モーメント

F_{ry} : 後タイヤの横力

F_{rz} : 後タイヤの垂直抗力

M_{rx} : 後タイヤのオーバーステアリングモーメント

M_{ry} : 後タイヤの転がり抵抗モーメント

M_{rz} : 後タイヤのセルフアライニングトルク

式(6)にはロールとヨーの角加速度による慣性力項 B_8 と B_9 が含まれる。図8は4自由度モデルの運動方程式を解いて旋回時の M_{front} と M_{rear} を求めた結果である。双方のモーメントは常に釣り合いの関係にある。

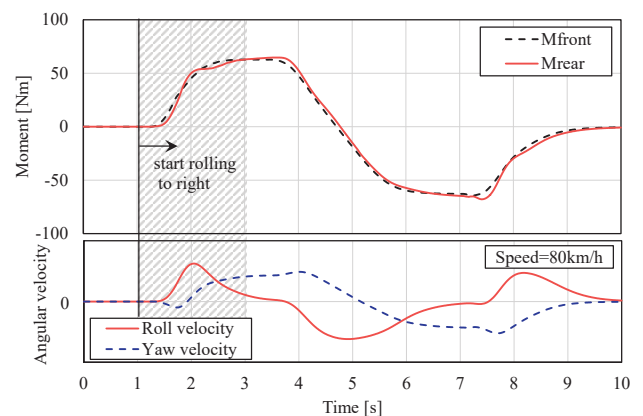


図8 Simulation results of M_{front} and M_{rear} in 4-DoF model

4-2. モーメントの成分

図8網掛部分の右ロール運動時において、式(6)の M_{rear} を構成する各項の推移を図9に示す。図中の記号は式(6)の $B_1 \sim B_9$ に対応する。ロール運動の開始直後には高いロール角加速度が発生するため、重心に作用する慣性力によるモーメント成分 B_8 の影響が大きい。そして、定常旋回になるにつれてロール角加速度は低くなり、後輪接地点に作用するタイヤ力によるモーメント成分 B_3, B_4, B_5 の影響が大きくなる。すなわち、操舵系から作用する M_{front} に釣り合う M_{rear} の支配的な力の作用点が重心から後輪接地点に移り変わる。このことから、メインフレームが弾性変形を生じる場合には、ロール運動に伴ってメインフレーム重心よりも前方で変形を生じ、その後、フレーム全体での変形を生じると考えられる。これは3章で示した基本変形モードの寄与率分析結果の傾向と一致する。

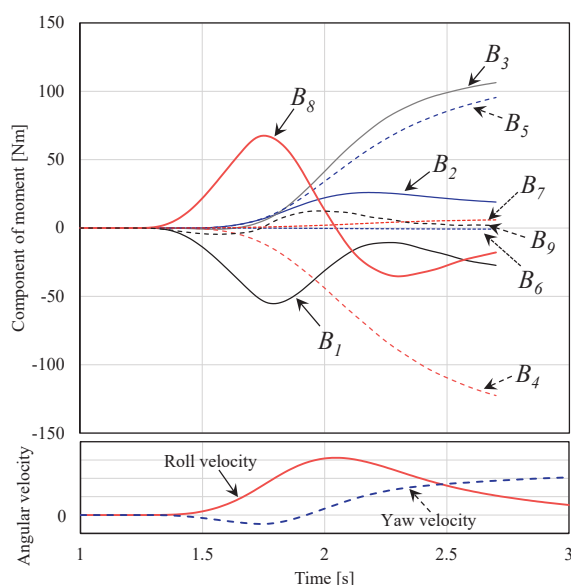


図9 Time history response of moment components at rolling

5 車両運動に影響する力と変形の関係

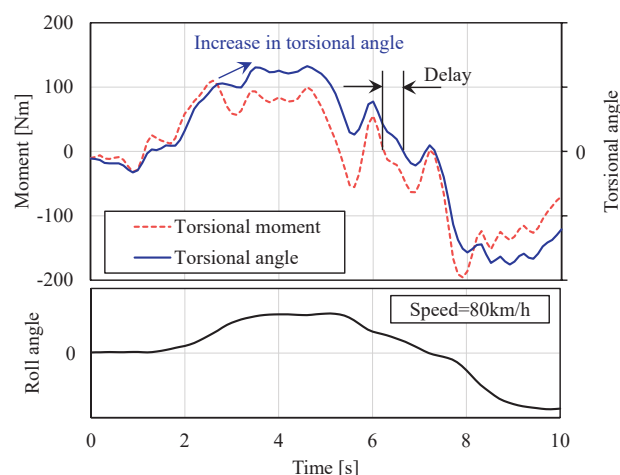
前章までの結果から、走行中のフレームは釣り合う力の作用点の間で局所的な変形を生じることがわかった。そこで、この局部変形が車両運動に及ぼす影響について、既述の解析方法を用いた実車走行実験による検証を行った。

実験に用いた車両はフレームの仕様を変更できるようにしており、基準仕様 A は図6に示したりや上下偶力によるピボット付近の変形量が多いフレームである。比較仕様 B にはその変形を抑制するように補強部品を取り付ける。走行条件は平坦路を80km/hの一定速度で直進から右旋回した後に左旋回に

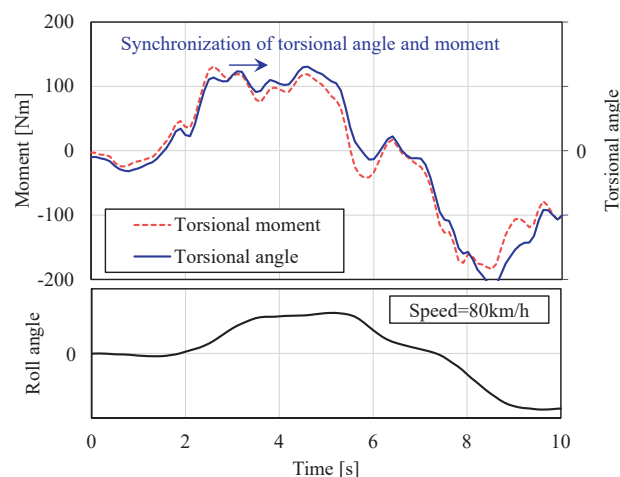
切り返す S 字コースである。

図10にステア軸に直交する軸周りに操舵系から作用する振りモーメント M_{front} と、ピボットを基準にしたヘッドパイプの振れ角を算出した結果を示す。両仕様ともロール運動に伴い振りモーメントと振れ角は増加し、ロール角の増加とともに振りモーメントは極大値に達する。その後、仕様 A の振れ角は増加し続けるのに対し、仕様 B の振れ角は振りモーメントと同じように推移する。また、右旋回から左旋回に切り返す際に、仕様 A は振りモーメントに対して振れ角が遅れて推移する。一方、仕様 B ではほぼ一致している。一連の振れ角の推移にはフレームの仕様差が表れている。

また、操縦安定性を評価可能なエキスパートライダーによる官能評価において、仕様 A に対して仕様 B はロール応答性が向上しており、フレームに作用する力に対する変形の応答性と運動性能との相関を確認した。



(a) Standard specification A



(b) Reinforced specification B

図10 Comparison between torsional moment and frame torsional angle

6 まとめ

剛性を構成する力と変形の観点から、走行時に生じるフレーム変形のメカニズムと運動性能に及ぼす影響を調査し、以下の結果を得た。

1. 旋回時のフレームには主として振り変形が生じ、その変形はフレームのヘッドパイプを振る力とピボットを振る力のそれぞれが慣性力との釣り合いで生じる変形モードの重ね合わせで表せる。
2. 旋回開始時のように高いロール角加速度が生じる場面では、ヘッドパイプを振る変形が先に生じ、ピボットを振る変形が遅れて発生する。これは車両の運動状態によって支配的な力の作用点が変わることによって起る。
3. フレームの局所的な変形が力に対する変形の応答性に影響することを示し、運動性能との相関を官能評価により確認した。

本稿では旋回時の振り変形に注目したが、変形量にはその他の成分も含まれる。今後は、運動性能に関係する変形量の紐づけを進めるとともに、そのメカニズムに基づいた最適化方法を検討する。

■参考文献

- [1] 二輪車の運動特性部門委員会監修：二輪車の実際に見られる運動, みんなのモーターサイクル工学講座, 公益社団法人自動車技術会, 2022, p. 88-89
- [2] 内藤重男, 北川洋, 大富部寿一: 車両の弾性変形を考慮した二輪車の安定性解析モデル, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No. 108-01, p. 1-4(2001)
- [3] Mitsuo Hirai, Takashi Ueno, Youhei Iwaki, Shojiro Oohama: Application of FEM Analysis Using Loads Predicted from Strain Measurement in Motorcycle Frame Development, SAE Technical Paper(2013), 2013-32-9044
- [4] Yasushi Nakamura, Kazuhiro Ichikawa, Takumi Kawasaki, Yasuhisa Okabe, Hiroshi Ishii, Akiyuki Yamasaki: Development of Technology for Measuring Dynamic Deformation of Motorcycle Bodies, SAE Technical Paper (2013), 2013-32-9165
- [5] モード解析ハンドブック編集委員会: モード特性同定, モード解析ハンドブック, コロナ社, 2000, p. 128
- [6] R. S. Sharp: The stability and control of motorcycles, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 13, No. 5, p. 316-329(1971)

■著者



坂本 和信
Kazunobu Sakamoto
PF 車両ユニット
PF 車両開発統括部
車両実験部



草刈 政宏
Masahiro Kusakari
PF 車両ユニット
PF 車両開発統括部
車両実験部



中谷 友輝
Yuki Nakatani
PF 車両ユニット
PF 車両開発統括部
車両実験部



北川 洋
Hiroshi Kitagawa
PF 車両ユニット
PF 車両開発統括部
車両実験部



A Study on Optimal Combinations of Winding and Cooling Methods for Downsizing Power Units in Motorcycles

Ryota Otaki Teruyuki Tsuchiya Yu Sakai Takuya Yamauchi Tsukasa Shimizu

当論文は、JSAE 20249007/SAE 2024-32-0007として、SETC2024 (Small Powertrains and Energy Systems Technology Conference) にて発表されたものです。

Reprinted with permission Copyright © 2024 SAE Japan and Copyright © 2024 SAE INTERNATIONAL

(Further use or distribution is not permitted without permission from SAE.)

要旨

市販されている電動バイクでは、出力の増加に伴い、冷却方式は空冷から水冷へ、巻線方式は集中巻から分布巻へと変化する傾向が見られる。この変化は8~10kW 付近で起こる。しかし、これらの冷却方式と巻線方式の組み合わせが最適であるかどうかを検証した研究は少ない。この傾向を検証するために、車両の要求出力と熱性能に応じてモータと冷却システムの合計容量と重量を比較できる検証モデルを構築した。構築したモデルを用いて、巻線方式(集中巻またはセグメントコンダクタ(SC)分布巻)と冷却方式(水冷または空冷)の組み合わせの比較検証を行った。本研究で設計したモータにおいて、車両の最大出力が35kW 以下(欧州 A2免許範囲)の場合、モータと冷却システムの合計体積は空冷集中巻モータが最も小さいことがわかった。しかし、15kW 以上では、冷却装置(ラジエータ、ホース、ポンプ、リザーバタンク、冷却水)を含む水冷式 SC モータの体積は、空冷集中巻モータの約110%であることが分かった。また、重量は約65%以下であった。本研究では、分布巻モータの一種として SC モータを検討したが、分布巻モータの特徴として、スロット数が多く、巻線とステータコアの接触面積が大きく、放熱性が高いことが挙げられる。これらの特性は巻線種類に関係なく共通である。したがって、上記の知見は、定格出力が約10kW の EV において、水冷分布巻モータの採用が増加しているという市場傾向とおおむね一致している。

Abstract

In commercially available electric motorcycles, there is a notable shift in the cooling method, moving from air cooling to water cooling, and in the winding method, moving from concentrated winding to distributed winding, as the output increases. This shift occurs around 8 to 10 kW. However, there is a paucity of empirical investigations examining these combinations to ascertain their optimality.

In order to verify this trend, a verification model has been constructed which allows for the comparison of the capacity and weight of the motor and cooling system according to the vehicle's required output and thermal performance. A comparison and verification of the combinations of winding methods (concentrated winding or segment conductor distribution winding) and cooling systems (water-cooled or air-cooled) was conducted using the model that had been constructed.

In the motor designed for this study, when the maximum output of the vehicle was 35 kW or less (European A2 license), the total volume of the motor and cooling system was found to be the smallest for the air-cooled concentrated winding motor. However, in the 15 kW and above range, it was found that the volume of the water-cooled Segment conductor (SC) winding motor, including the cooling system (radiator, hoses, pump, reservoir tank, cooling water), was approximately 110% of the air-cooled concentrated winding motor, and the weight was approximately 65% or less. In this study, we used a SC winding motor as a type of distributed winding motor for verification. The characteristics of distributed winding motors include a large number of slots that provide a large contact area with the winding and high heat dissipation. These characteristics are the same regardless of the type of winding. Therefore, these findings are generally consistent with the observed trend of an increasing adoption of water-cooled distributed-winding motors in commercially available electric vehicles (EVs) with a power rating of approximately 10 kW.

1 INTRODUCTION

In power units (PU) for motorcycles, it is important to achieve a compact and lightweight design. When downsizing the motor, temperature rise becomes a problem. Therefore, in order to design a compact and lightweight motor, it is necessary to design a proper cooling structure. In the previous study^[1], various motor cooling methods, including water cooling and air cooling, were compared. Air cooling provides a simple cooling system, but there is concern that the cooling capacity may not be sufficient for high power motors. Water cooling requires components such as a radiator in addition to the motor, and the increase in volume and weight must be considered.

Figure 1 shows the combinations of winding and cooling methods for each output for EVs currently on the market. There is a switch between water cooling and air cooling at around 8 to 10 kW, and there is also a trend for the winding to switch from concentrated winding to distributed winding.

Previous research^[2] has shown that water cooling is effective in achieving downsizing of the motor above 15 kW. However, the previous report focused only on the concentrated winding and did not mention motors with SC distributed windings, which have become popular recently.

Therefore, in this study, we have constructed an analytical model that allows for a side-by-side comparison of the motor winding and cooling systems of electric motorcycles. Using this model, we have organized the optimal combinations of winding and cooling systems for each vehicle output, and have confirmed the validity of the combinations used in commercially available EVs.

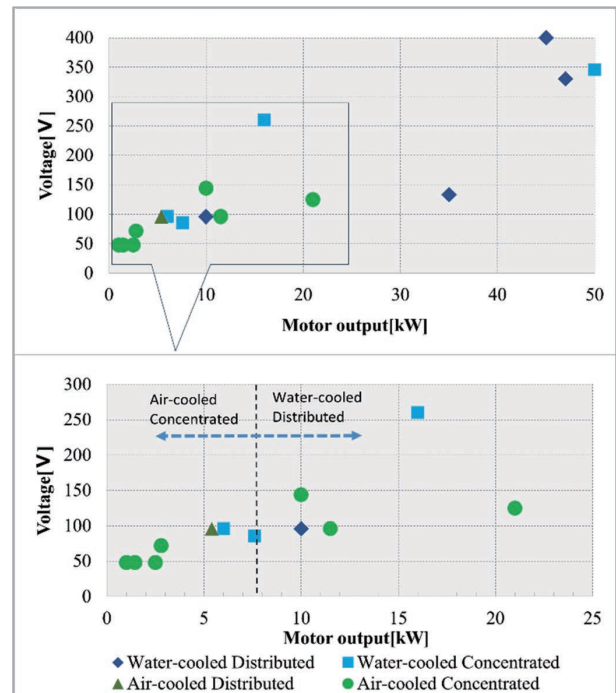


Fig. 1 Winding types and cooling methods

In order to verify the above, two types of motors were designed: one with a concentrated winding and the other with a distributed winding. A magnetic field analysis model was prepared for each motor.

By improving the winding fill factor, the thermal 1 from the coil to the stator can be reduced, which in turn reduces the temperature rise^[3]. In the motor configuration designed in this article, we have employed a concentrated winding coil utilizing rectangular wire or a distributed winding with SC, which are believed to possess a high fill factor and superior heat dissipation capabilities.

In the thermal design of motors, the losses of each component vary depending on the operating point of the output, and the way in which the temperature of each component rises is also different^[4]. Therefore, in order to correctly calculate the temperature rise of the motor, it is necessary to define the operating point of the motor for each vehicle output, calculate the losses in each part, and then perform a thermal analysis.

One method of thermal analysis for motors is to calculate

temperature rise with high accuracy by bidirectionally coupling magnetic field analysis with thermal and fluid analysis^[5]. However, in this study, it is necessary to perform multiple case calculations for motors with different power and cooling methods, and the calculation time becomes enormous. One method to reduce the calculation time is the thermal equivalent circuit network method. In this method, the thermal resistance and thermal capacity on the main thermal path are modeled to estimate the temperature rise of the motor^[6]. Although this method is less accurate than thermal fluid analysis, it is considered accurate enough for the relative comparisons required in this study. Therefore, in this study, we attempted to reduce the calculation time by constructing an equivalent thermal circuit model that includes the effects of the radiator and driving wind on motorcycles based on a CFD model^[7] that has been confirmed to have sufficient accuracy within Yamaha.

2 MODEL FOR VERIFICATION

2-1. The Configuration of the Motor

In order to facilitate the verification process, we have designed a concentrated winding motor and an SC motor, each of which is intended to be installed in a motorcycle that is equivalent to a European A1-A2 license. The concentrated winding motor is a 12-slot, 8-pole Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM). The winding is composed of a rectangular wire. The stator core is divided at the teeth and each tooth is wound with an insulating bobbin. This structure increases the space factor, which increases the adhesion between the coils and the insulating bobbin and improves the heat dissipation capacity.

The SC motor has 48 slots and 8 poles and uses rectangular wires.

The stator outer diameters of the respective motors are equivalent. Heat is transferred to the case by shrinkage fitting the stator core to the aluminum case.

For water-cooled motors, cooling channels are provided

in the aluminum case. In the case of air-cooled motors, fins are provided on the outer diameter of the aluminum case (Figure 2). The core length of the motor is adjusted to achieve the appropriate torque and output characteristics in accordance with the performance requirements of the vehicle. In this process, the cross-sectional shape of the motor remains unchanged, and the aluminum case, water cooling channels, fins and coils are extended accordingly (Figure 3).

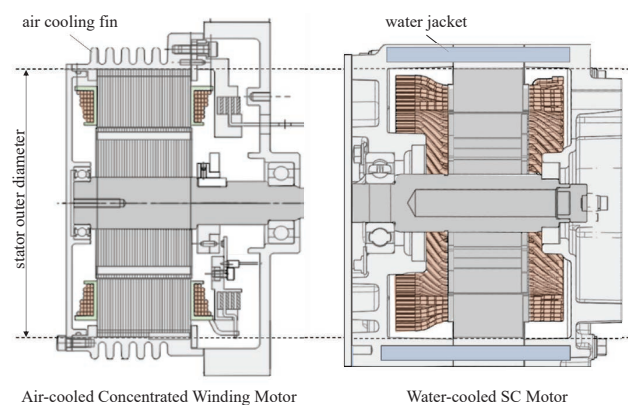


Fig. 2 Example of Drawings of Motors

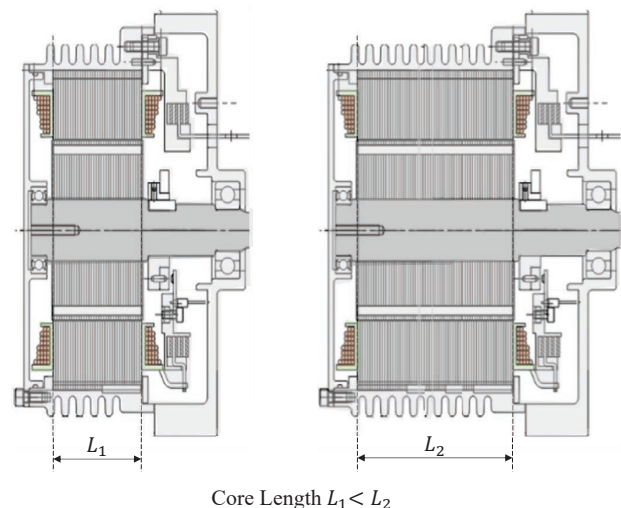


Fig. 3 Example of Motors with Different Core Lengths

In order to facilitate discussion of motor size in the following sections, it is necessary to define motor volume. The calculation of motor volume is performed as a cylindrical shape. The diameter shall be the outer diameter of the aluminum housing. In this study, water-cooled and air-cooled motors will be treated, and the outer diameters of the water-cooled jacket and air-cooled

fins will be assumed to be equal. Consequently, the difference between water-cooled and air-cooled motors has no effect on the outer diameter of the motor. The cylinder length shall be equal to the height of the coil. Since the height of the coil end differs between concentrated winding and SC, the volume differs even with the same core length. Therefore, the volume of the motor to be compared is as shown in Figure 4.

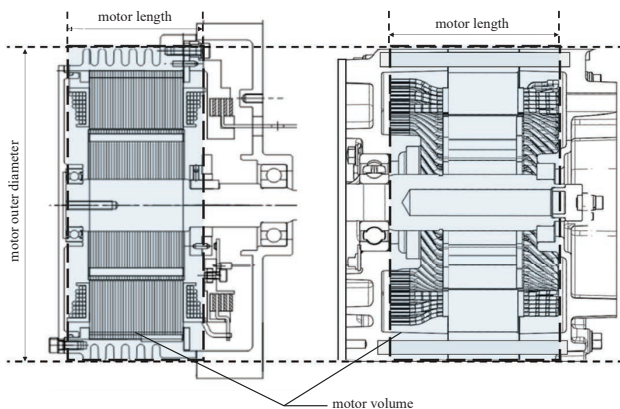


Fig. 4 Definition of motor volume

In an actual motor, there is a shaft and housings at both ends, but these are considered equal regardless of the motor type and are not considered in the volume comparison.

However, the specific heat and thermal resistance of the shaft and housing are considered in the thermal analysis described below.

2-2. Cooling Systems

An overview of the cooling system of the water-cooled electric motorcycle assumed in this study is shown in Figure 5. In the case of a water-cooled motor, the motor and inverter have cooling jackets, and the heat is exchanged with the outside air through a radiator. The motor cooling jacket is located at the periphery of the aluminum housing. The outside air is assumed to flow equally around the radiator and the motor housing at a flow rate calculated from the vehicle speed and the vehicle speed utilization ratio. The weight and volume of the reservoir tank and electric water pump are also considered components of the cooling system.

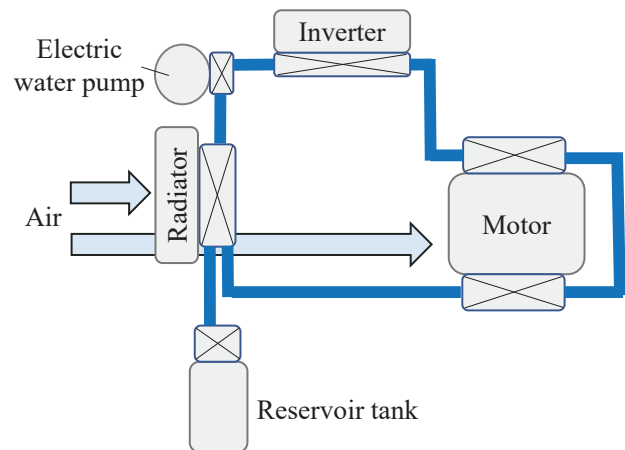


Fig. 5 Cooling System of Water-cooled Motorcycle

In the case of air cooling, cooling fins instead of water jackets must be provided for both the motor and the inverter. Water cooling systems such as radiators are not installed in the air-cooled vehicle. Cooling air equivalent to that of the water-cooled case hits the cooling fins of the motor housing and exchanges heat.

2-3. Thermal Circuit Model of a Motor

A thermal circuit model of a motor is described. The motor losses considered are copper loss in the coil, iron loss in the core, joule loss in the magnet, and friction loss in the bearing and oil seal. The losses generated in each part are dissipated to the outside air or cooling water according to the thermal circuit model shown in Figure 6.

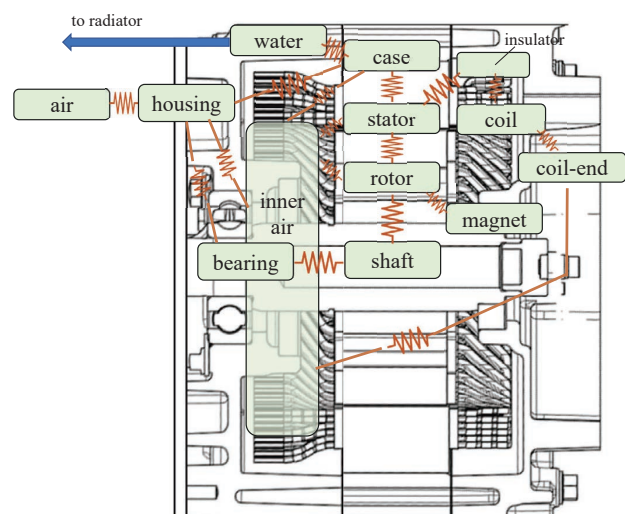


Fig. 6 Thermal Circuit Model of a Motor

3 ANALYSIS MODEL

3-1. Vehicle Model

In order to identify the optimal combination of winding and cooling system for each output, it is necessary to define the performance of the vehicle for each output. In this study, vehicles with a maximum output of 5 to 35 kW were considered, which corresponds to the European A1 to A2 license range for internal combustion engine (ICE) vehicles. Previous studies have demonstrated a correlation between rear wheel output, maximum driving force, and speed in a typical internal combustion engine (ICE) motorcycle^[2]. Consequently, the aforementioned correlation was employed once more to define the required driving force and maximum speed for each vehicle with varying power outputs. Figure 7 illustrates the correlation. For example, a vehicle with a maximum output of 8 kW requires a driving force of 1029 N and a maximum speed of 102 km/h.

In the thermal design of motors, it is crucial to consider not only the maximum output but also the continuous rated output. However, there is no universally accepted definition of continuous rated output for. Therefore, in this study, we defined the thermal performance to be met as the ability to continuously deliver the maximum power of the vehicle for 15 minutes at 60% of the maximum speed of the vehicle, which is assumed to be used frequently.

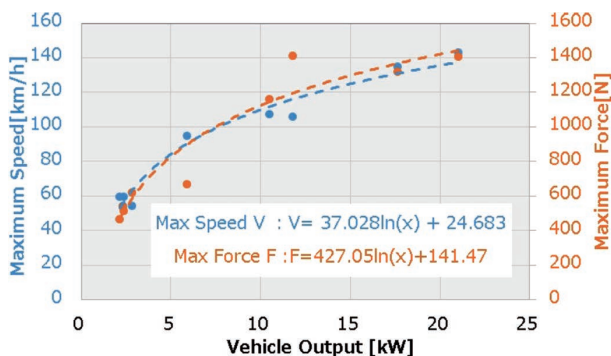


Fig. 7 Correlation between Vehicle Power and Maximum Driving Force and Speed in ICE Motorcycle

It is assumed that the size of the battery varies with vehicle output. In particular, the model assumes that the

DC voltage of a vehicle with a maximum output of 10 kW is 100 V, and that it increases or decreases linearly with vehicle output.

3-2. Cooling System Model

The cooling system depicted in Figure 5 as implemented in each vehicle output in the following manner. The radiator was designed to have a variable size. The radiator's heat dissipation capacity was modeled to be contingent upon the wind speed and radiator size. The radiator's speed utilization factor varies with the vehicle configuration; however, in this study, it was assumed to be constant at 0.2. Consequently, the wind speed utilized by the radiator is contingent upon the vehicle speed at rated output and the vehicle speed utilization ratio. The outside air temperature was fixed at 25°C. Figure 8 illustrates the relationship between radiator size, vehicle speed, and heat dissipation for the radiator model created.

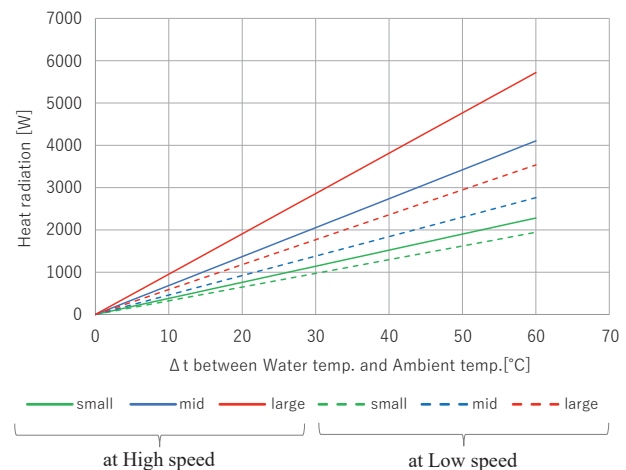


Fig. 8 Relationship between Radiator Size, Vehicle Speed, and Heat Dissipation for the Radiator Model

The following section will discuss the other components considered in the cooling system. It was assumed that the electric water pump would be a commercially available 12 W product, regardless of vehicle power, as was done in previous studies. In the vehicle under study, the flow rate was assumed to be 5 l/min, as the pump has sufficient capacity. The volume of the pump is 251 cc, and its weight is 0.4 kg. The cooling hose utilized for the vehicle is assumed to be Φ22, 400 mm in diameter. The

total volume of cooling water will vary according to the size of the motor and the radiator. For water-cooled vehicles, the volume and weight of these cooling systems must be considered in addition.

3-3. Magnetic Field Analysis Model

Each loss of the motor at the rated output set by the vehicle model was calculated using a two-dimensional magnetic field analysis model. The calculated losses included AC and DC copper losses, Joule losses of the magnets, and iron loss. Actual measured values were used for the mechanical losses of bearings and oil seals. In order to accurately analyze the losses generated in the motor, it is necessary to consider that the actual motor current includes harmonic components due to the pulse width modulation (PWM) control of the inverter. However, magnetic field analysis that reproduces PWM control requires a significant amount of time for computation. Therefore, in this study, we compared the analysis results using the ideal sine wave current with those considering PWM harmonics, and coefficients were calculated for the effect on loss. Subsequently, the aforementioned coefficients were applied to the results of the ideal sine wave analysis in order to achieve a closer approximation of the actual motor losses. For simplicity, the loss distribution of each component was not considered, and each loss was assumed to occur uniformly in each component of the thermal analysis model. In the 2D magnetic field analysis, the copper loss at the coil end cannot be calculated. Consequently, the copper loss at the coil end was calculated based on the current value and input to the coil end of the thermal circuit model.

The accuracy of the loss calculations was validated by comparing the magnetic field analysis model with the measurement results of the actual equipment. As an example, Table 1 Comparison of Motor Loss Analysis and Measurement depicts the analysis results of an SC motor under specific operational conditions and the measured efficiency of the actual motor. The discrepancy between the calculated and measured losses of the actual motor was approximately 5%, thereby confirming that this analytical model is sufficiently accurate.

Table 1 Comparison of Motor Loss Analysis and Measurement

Analyzed Losses [W]

Copper Loss	269.8		
Stator Loss	280.2		
Rotor Loss	32.6		
Magnet Loss	77.2		
Total Loss	659.9	Measured Motor Loss	631.7

3-4. Method for the Design of Motors according to Vehicle Output

In this study, it is assumed that the motor output characteristics are adjusted by varying the core length without changing the motor cross-sectional shape (i.e., magnetic circuit). Therefore, it is necessary to design an appropriate core length for each vehicle output. The procedure is described below.

- (1) As previously stated in the section on the vehicle models, the DC voltage, required driving force, and maximum vehicle speed are determined according to the vehicle's maximum output.
- (2) The maximum rotational speed of the motor is considered to be 12,000 rpm or less. This analysis considers the rotational speed range of bearings and oil seals typically employed in motors, excluding those with exceedingly high rotational speeds.
- (3) Since the motor cross-section does not change from the initial design, the minimum motor size (core length) required to meet the driving force requirements of the vehicle is determined. The N-T characteristics and efficiency of this motor are determined by magnetic field analysis.
- (4) The efficiency map of the motor is obtained through magnetic field analysis. The speed at which the motor can operate at high efficiency is identified, and this point is defined as the rated point. In other words, this speed represents 60% of the vehicle's maximum speed. This enables us to posit the vehicle's reduction ratio. In the event that the requisite maximum rear-wheel drive force

cannot be attained at the assumed reduction ratio, it is necessary to adjust the reduction ratio within the range where the motor efficiency at the rated point remains relatively unchanged. Should this prove insufficient to meet the requisite driving force for the vehicle, it will be necessary to adjust the dimensions of the motor.

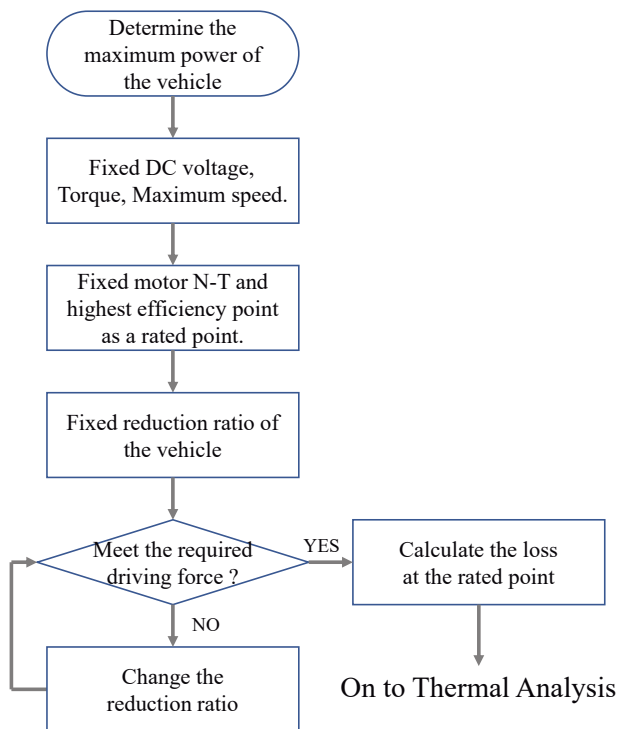


Fig. 9 Motor Design Procedure

A multitude of combinations of motor size and reduction ratio can be found that satisfy the requirements of the vehicle. Among these combinations, the configuration that satisfies the thermal performance requirements at the rated point and minimizes the total volume of the cooling system and motor is sought through thermal analysis. The methodology for identifying the optimal minimum size will be described in a subsequent section.

3-5. Thermal Analysis Model

The magnetic field analysis model enables the determination of the motor size and losses during rated operation. Consequently, the thermal resistance between the parts in the motor can be calculated based on the motor's body size. Furthermore, the heat capacity of each component and the volume of cooling water can be determined.

Thermal analysis was conducted by reproducing the thermal circuit depicted in Figure 5 and Figure 6 in JMAG, a magnetic field analysis software. To reduce the time required for calculations, the analysis was conducted by combining the FEM analysis in JMAG and the thermal circuit model. In the FEM analysis, the heat transfer in the electromagnetic part of the motor that generates the loss was evaluated. The thermal circuit model reproduced the heat dissipation to air and other fluids, as well as the thermal resistance of the contact area of the parts receiving the heat dissipation. The thermal circuit model also reproduced the shaft, motor case, cooling jacket, and vehicle radiator, excluding the electromagnetic parts.

The thermal resistance of each component was incorporated into the circuit model through the application of the equivalent thermal conductivity equation (Figure 10, e.q.(1), e.q.(2)).

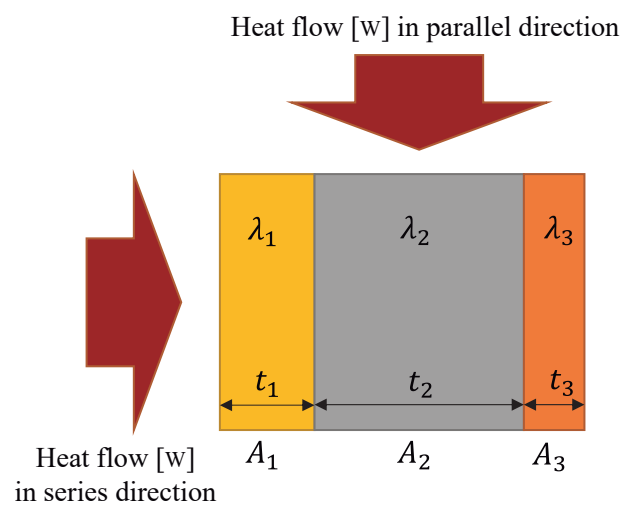


Fig. 10 Heat flow in series and parallel

$$\lambda_{eq_S} = \frac{t}{\sum \frac{t_i}{\lambda_i}} \quad (1)$$

$$\lambda_{eq_P} = \frac{\sum (A_i \cdot \lambda_i)}{A} \quad (2)$$

λ_{eq_S} : Equivalent Thermal Conductivity in Series

λ_{eq_P} : Equivalent Thermal Conductivity in Parallel

t : Total Thickness

t_i : Thickness of each Component

λ_i : Thermal Conductivity of each Component
 A : Area in the Direction of Heat Flow
 A_i : Area of each Component in the Direction of Heat Flow

The contact area between components is typically quantified by an index known as contact thermal resistance. In this model, the calculation was based on Tachibana's equation^[8], a widely utilized expression for contact thermal conductance, with adjustments made based on actual measurements.

$$K = \left(\frac{1.7 \times 10^5}{\frac{\delta_1 + \delta_0}{\lambda_1} + \frac{\delta_2 + \delta_0}{\lambda_2}} \cdot \frac{0.6P}{H} + \frac{10^6 \lambda_f}{\delta_1 + \delta_2} \right) \cdot C \quad (3)$$

K : Contact Thermal Conductance [W/(m² · K)]
 $\delta_{1,2}$: Maximum Height of each Part Surface Roughness [μm]
 δ_0 : Contact Equivalent Length [μm]
 λ_f : Fluid Thermal Conductivity [W/(m · K)]
 P : Contact Pressure [MPa]
 H : Vickers Hardness of the Softer Side[kg/mm²]
 C : Correction Factor

The validity of the thermal analysis model was verified by comparing it with the actual motor. The thermal analysis model was partially calculated using a thermal circuit, which resulted in the analyzed temperatures being volume-averaged temperatures. Conversely, since the surface temperature of each component was measured in the experiment, it cannot be directly compared with the results of this analysis. Consequently, a computational fluid dynamics (CFD) thermal analysis model^[7] was employed to assess the thermal circuit model developed in this study. This validated the efficacy of the thermal circuit model. Initially, the outcomes of the CFD full model analysis and the actual machine were compared. The evaluation conditions are the results of running at a constant output for one hour at an ambient temperature of 25 degrees C and natural air cooling. The analysis is also based on the same conditions.

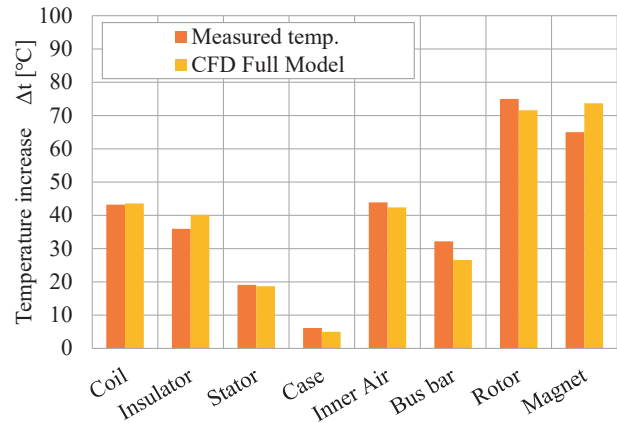


Fig. 11 Comparison of CFD Analysis Temperatures and Experimental Results

Figure 11 shows that the CFD model is sufficiently accurate, with an error within 10% of the experimental results. Therefore, the volume-averaged temperatures of each component were obtained from the CFD model. The accuracy of the thermal circuit model was confirmed by comparing the CFD results with the analysis results of the thermal circuit model used in this study. The results of the comparison are shown in Figure 12. This result demonstrates that the thermal circuit model is sufficiently accurate for relative comparisons of cooling performance between different motors. The analysis using the thermal circuit network model is a transient analysis with 10 seconds per step, and the results shown are those at the point in time when the same amount of time has elapsed as in the actual machine evaluation. The residual value of less than 10⁻⁸ has been set as the convergence criteria for each step.

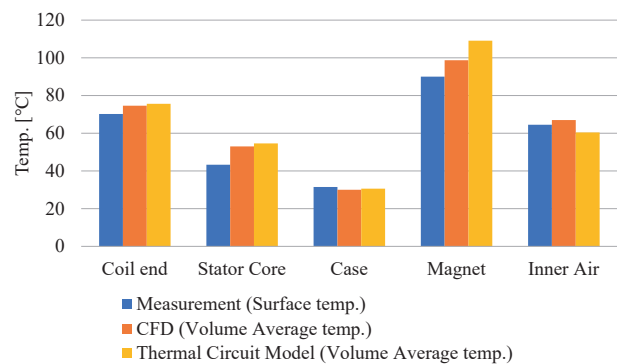


Fig. 12 Comparison of CFD Analysis Temperatures and Thermal Circuit Model

The subsequent section of this discussion will examine the comparative characteristics of motors with distinct winding configurations and varying core lengths. It is important to note that concentrated winding and SC have disparate coil shapes, which consequently affects the contact area between the coil and the core. The larger the contact area, the lower the thermal resistance. In general, SC exhibits a larger contact area between the coil and core due to the ease of increasing the number of slots, which results in superior heat dissipation (Figure 13). Conversely, concentrated winding has smaller coil ends. Consequently, if the core length is identical to that of the SC, it can be reduced in size. In the motor under consideration, the contact area between the coil and core is 2.3 times larger and the coil end size is 1.2 times larger than that of the concentrated winding motor. This value is considered in the present study.

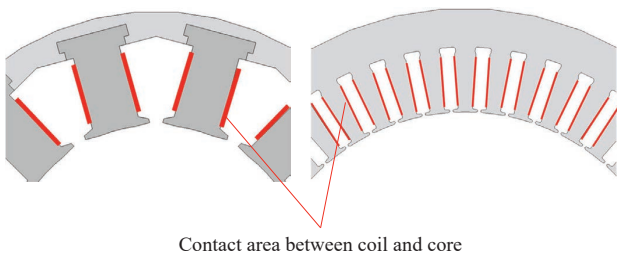


Fig. 13 Difference in contact area between concentrated winding and SC

For motors with different core lengths, the thermal resistance of each part changes as described above. A motor with a larger core length is capable of more heat dissipation and has a larger heat capacity, which changes the temperature rise during vehicle operation. Conversely, the larger motor volume increases the phase resistance of the coil, which may result in increased copper loss, and the larger core volume may increase the iron loss.

The following definitions pertain to other conditions.

For the sake of simplicity, the change in volume of the gear section due to the reduction ratio is not considered. Furthermore, the size and mass of the inverter are not considered, as the focus is on the motor. The water temperature shall be limited to 60°C. In the case of water-cooled motors, the inverter is generally water-

cooled as well. Therefore, the upper water temperature limit is set in consideration of inverter cooling. The upper temperature limit for coils and magnets varies depending on the selection of materials, but in this case, the upper temperature limit for both is 160°C. If the temperature of each of the components does not exceed the upper limit, the motor is deemed to have sufficient thermal rating capacity. However, if the temperature exceeds the upper limit, the motor should be enlarged to improve the heat dissipation capacity, or the radiator size should be increased to identify the smallest size that can achieve the rated output.

3-6. Optimization Procedure for each Motor Output

The following procedure outlines the specific methodology for comparing motor and cooling system sizes for each output. As previously stated, the design of the motor should be based on the output to be considered. The loss of the motor in rated operation is determined by magnetic field analysis. Given that the size of the motor is fixed, the thermal resistance and heat capacity of each component can be obtained. The thermal analysis model determines the heat dissipation capacity of the radiator based on the vehicle speed at rated operation and the radiator size. The considerations thus determine the conditions for the thermal circuit model.

- (1) The motor temperature should be assessed using the thermal circuit model that has been determined.
- (2) If the temperature exceeds the upper limit, the radiator size should be increased so as to improve the capacity for heat dissipation.
- (3) The thermal analysis should be repeated with the new model.
- (4) If a model is identified within the temperature limit, the volume and weight of the motor and cooling system should be calculated.
- (5) The motor core length should then be increased. It is necessary to ascertain whether a combination can be

achieved with a smaller radiator size due to the increased heat dissipation capacity of the motor.

(6) The procedure should be repeated (1) to (5) in order to extract the smallest combination of motor and cooling system that satisfies the thermal rating.

In the case of air-cooling, there is no radiator, thus the sole means of increasing the heat dissipation capacity is to increase the motor size.

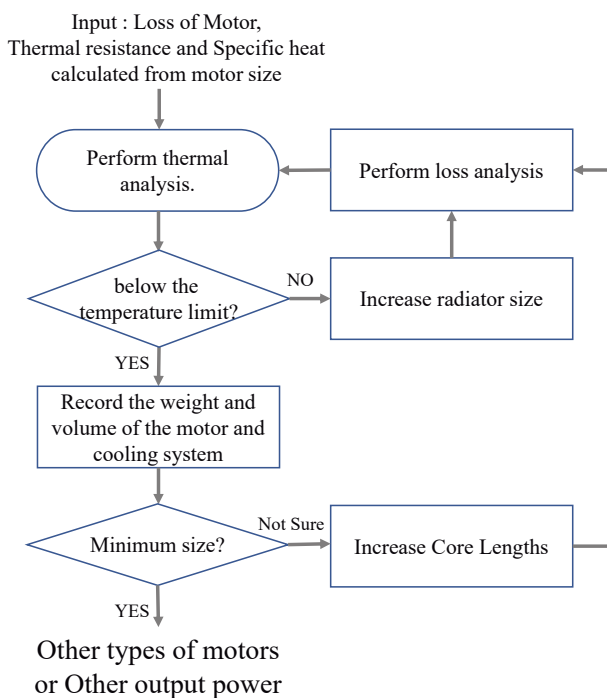


Fig. 14 Optimization Procedure

4 ANALYSIS RESULTS

4-1. Results for Vehicles with a Maximum output of 11 kW

As an example, the results of the study are presented for a vehicle with a maximum output of 11 kW when an SC water-cooled motor is applied. The vehicle model is defined in accordance with the specifications outlined in Table 2.

Table 2 Specifications of Vehicle with Maximum output of 11 kW

Max. Power [kW]	11
Max.Speed [km/h]	113.5
DC voltage [V]	110
Max. Force [N]	1165

The minimum core length required to achieve the desired vehicle performance was 35 mm. A thermal analysis was conducted on this motor in conjunction with a radiator of the smallest size. The results are presented with the core size held constant and the radiator size increased. The radiator size is expressed as a percentage of the radiator size utilized in the ICE 125cc vehicle.

Figure 15 presents the results of the analysis. When the core length is 35 mm, there is a margin for coil and magnet temperatures for all radiator sizes. The water temperature falls below 60°C when the radiator size is 63%. Therefore, when the motor core length is 35 mm, 63% radiator size is required.

The subsequent step is to ascertain whether the overall volume and weight can be reduced by increasing the core length and decreasing the radiator size. This same study is conducted for a motor with a core length of 40 mm as for 35 mm. The results indicate that at 40 mm, a radiator size of 42% is sufficient because the heat dissipation capacity of the motor has been improved.

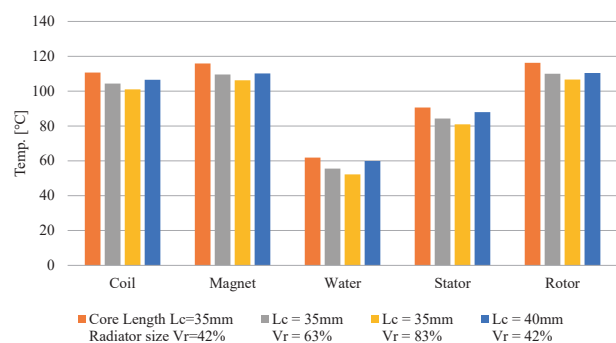


Fig. 15 Results of Thermal Analysis on a 11 kW Vehicle

In the context of a typical motorcycle, it is not appropriate to consider radiators smaller than 42%. Consequently, the smallest possible combinations are either a 35 mm

core length with 63% radiator or a 40 mm core length with 42% radiator. The results of this comparison are presented in Figure 16.

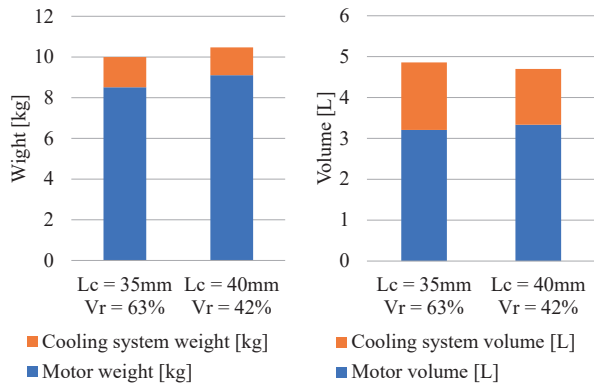


Fig. 16 Comparison of Motors with different Core Lengths

The results indicate that the lightest weight is observed at a core length of 35 mm, while the smallest volume is observed at a core length of 40 mm. Similar studies were conducted with different winding types, cooling methods, and power outputs.

4-2. Summary of Study Results for each Output

The total weight and volume of the four combinations were compared: concentrated winding, SC, air-cooled, and water-cooled. The volume and weight of the water-cooled SC were used as a reference for relative comparisons of the other combinations. The volume comparison results are shown in Figure 17.

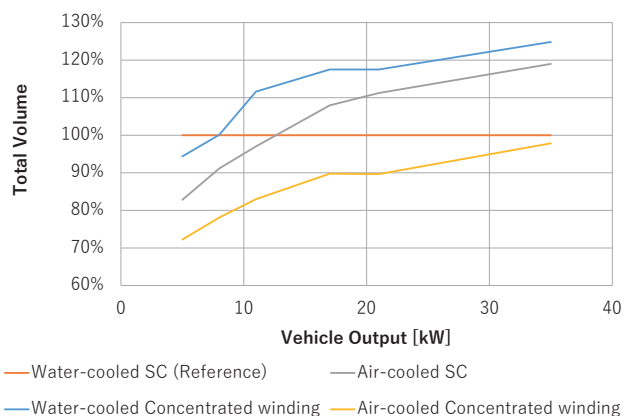


Fig. 17 Volume Comparison Results

It was found that air-cooled concentrated winding motors have the smallest volume in the range of 35 kW or less.

For motors of 15 kW or more, the volume of water-cooled SCs is 110% or less of that of air-cooled concentrated windings, so they can be considered roughly equivalent.

When comparing water-cooled SC motors with water-cooled concentrated motors, it can be seen that the SC is superior in terms of miniaturization in almost all areas except 5kW. In this study, motor cooling is achieved by a cooling jacket on the outer case of the motor. On the other hand, concentrated winding motors have higher thermal resistance than SC due to the difference in contact area between the coil and the core. Therefore, SC can cool the motor more efficiently. Although concentrated winding reduces copper and stator losses compared to SC, it cannot achieve the miniaturization effect of water-cooled SC motors.

The number of slots in an SC motor can be increased more easily. This reduces the eddy current loss generated in the magnets inside the rotor compared to a concentrated winding motor. Since the rotor has no cooling jacket, the temperature rises more easily as the loss increases. Figure 18 shows the temperature results for a 5 kW SC water-cooled motor and a concentrated winding water-cooled motor. The core length of both motors is 30 mm and the size of the cooler is the same. The water temperature is almost the same (55-60°C), but the temperature of each part is higher in the concentrated winding motor. This indicates that the heat resistance of the concentrated winding motor is higher. *The thermal resistance between the housing and the cooling water is very small for both the concentrated winding motor and the SC motor, so the temperature of the housing is mainly affected by the cooling water temperature. In this result, the water temperature was slightly lower in the concentrated winding motor, so only the case temperature was reversed.

Air-cooled SC motors also failed to demonstrate superiority over other methods. This is probably because while SCs have excellent heat dissipation characteristics due to their low thermal resistance from the coil to the housing, air cooling can only achieve limited heat

exchange from the housing to the air, so it cannot demonstrate its heat dissipation performance.

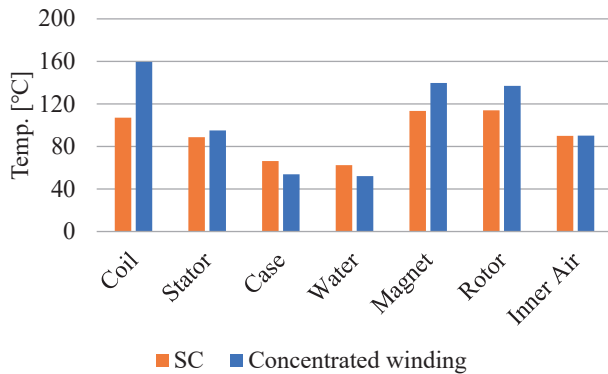


Fig. 18 Temperature Comparison between Concentrated Winding and SC

The next step is to compare the weights. The results are shown in Figure 19.

In terms of weight, the 5 kW rated unit is slightly superior to the water-cooled concentrated winding motor. However, in all other cases, the water-cooled SC motor is the best. For 10 kW and below, air cooling is superior in volume, but water cooling is superior in weight. This is due to the weight density of the motor. The construction of motors comprises electromagnetic steel and copper, which have a high weight density. In contrast, water-cooled systems such as radiators and pumps have a low weight density. In air-cooled motors, core length is increased to enhance heat dissipation, which has a significant impact on weight. In water-cooled motors, the size of the radiator can be expanded to improve cooling capacity, thereby reducing weight.

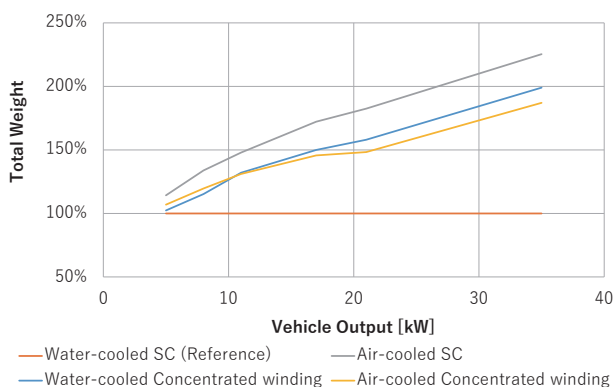


Fig. 19 Weights Comparison Results

Finally, the relationship between heat dissipation capacity and volume or weight is shown in Figure 20 and Figure 21. Figure 20 shows the results of a study on a water-cooled SC motor with an output of 35 kW. It compares the effects of increasing the core length and radiator size to enhance heat dissipation capacity. In both cases, the temperature decreases with an increase in volume. The reduction in temperature per volume was validated using coil temperature as an indicator.

As a result, when comparing the effects of increasing the length of the motor core and increasing the size of the radiator, it was found that the effect of reducing the coil temperature per unit volume was better when the core length was increased. Figure 21 shows the effect of temperature reduction in relation to the change in weight. In terms of weight, the effect of increasing the size of the radiator is equivalent to increasing the size of the motor. When cooling the coil temperature, it can be seen that increasing the contact area with the housing, which is the main heat sink for the coil, is more effective in reducing the temperature than increasing the size of the radiator. This trend is the same for the rotor (Figure 22, 23).

On the other hand, Figures 24 and 25 show the relationship with water temperature. Figure 25 shows that if you want to reduce the water temperature, it is much easier to increase the radiator size than to increase the core length.

Therefore, to reduce the temperature inside the motor, it is more effective to increase the size of the motor itself, increase the heat exchange area, and reduce the thermal resistance, but you must be careful not to increase the weight. Increasing the size of the radiator is useful for reducing the water temperature.

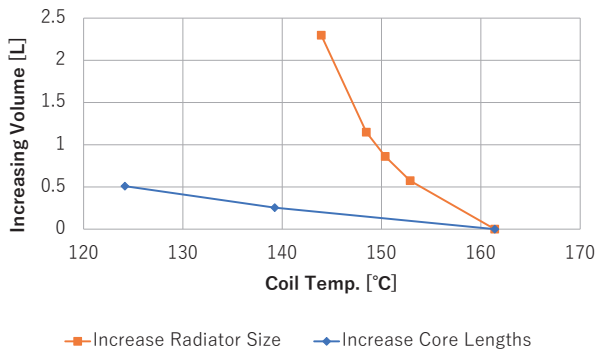


Fig. 20 Relationship between Coil Temperature and Volume

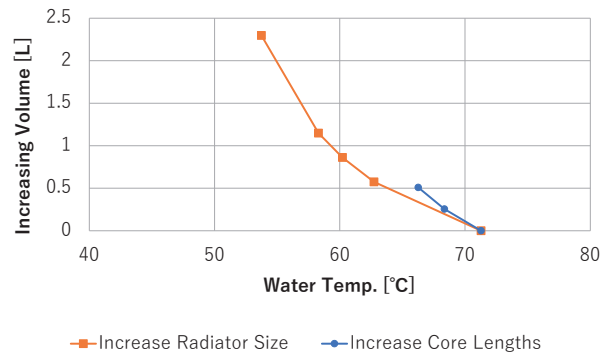


Fig. 24 Relationship between Water Temperature and Volume

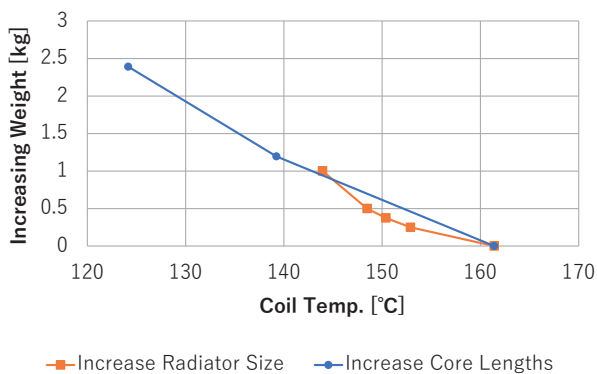


Fig. 21 Relationship between Coil Temperature and Weight

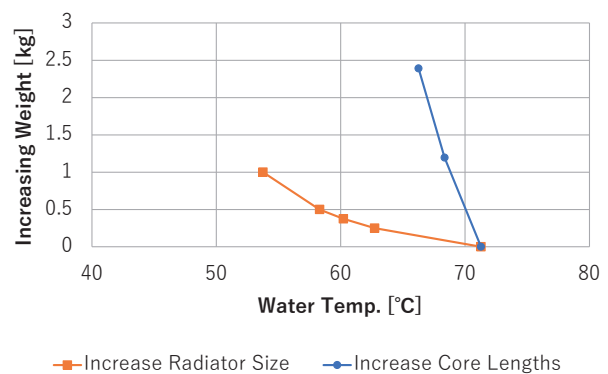


Fig. 25 Relationship between Water Temperature and Weight

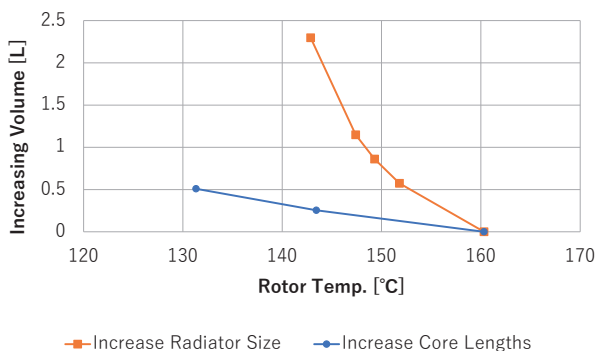


Fig. 22 Relationship between Rotor Temperature and Volume

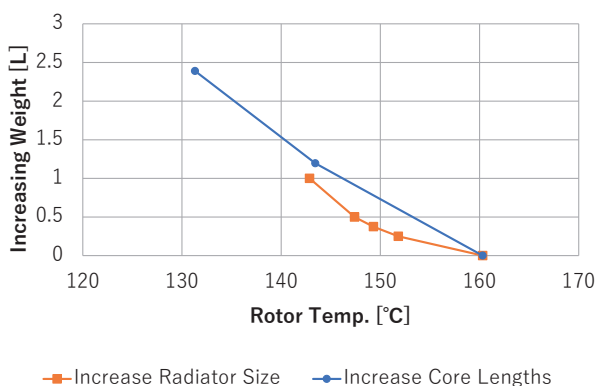


Fig. 23 Relationship between Rotor Temperature and Weight

5 SUMMARY/CONCLUSIONS

In order to compare the combination of winding methods and cooling systems in the output range of European A2 licenses and below, we constructed an analysis model using magnetic field analysis and thermal circuit networks.

Using this model, we examined the smallest power unit configuration, including the cooling system, for each vehicle output.

For the motor we designed this time, we found that the air-cooled concentrated winding motor had the smallest volume when the vehicle output was 35 kW or less. On the other hand, the water-cooled SC motor was the lightest in all power ranges. In the 15 kW and above range, it was found that the water-cooled SC motor was about the same size as the air-cooled concentrated winding motor, even when the water-cooling system was included.

Therefore, it was suggested that the air-cooled concentrated winding motor was superior in the range of 15 kW and below, and the water-cooled SC motor was superior in the range of 15kW and above.

These results are broadly consistent with the trends seen in commercially available EVs.

In the context of actual vehicle development, it is believed that the optimal combination may vary depending on the vehicle's specific performance requirements, motor design, and cost considerations. However, the use of this model has facilitated a more straightforward comparison of design proposals.

In the field of motorcycle design, it is important to select the most suitable motor and cooling system for the intended use. The findings of this research will prove an effective tool for making such decisions and may be applied in future vehicle development.

REFERENCES

- [1] Yaohui Gai, Mohammad Kimiabeigi, Yew Chuan Chong, James D. Widmer et al., "Cooling of Automotive Traction Motors: Schemes, Examples, and Computation Methods" IEEE Transactions on Industrial Electronics (Volume: 66, Issue: 3, March 2019), doi:10.1109/TIE.2018.2835397
- [2] Tsukasa Shimizu, Jin Itou, Hideki Shirazawa, Yasuyuki Muramatsu, "Study on appropriate cooling systems according to output of motor for small EV's" SAE Technical Paper 2017-32-0079, 2017, doi: 10.4271/2017-32-0079
- [3] Norihisa Iwasaki, Hideki Kitamura, Masashi Kitamura, Junnosuke Nakatsugawa et al., "The Effect of Structure and Material Properties of Permanent Magnet Synchronous Motors on Temperature rise" IEEJ Rotating Machinery Research Committee (In Japanese) Vol. RM-10 No. 134-152 Page. 61-66 (2010.10.20)
- [4] Sasaki Kensuke, Akatsu Kan, "Effect of Cooling Methods on Continuous Output Capability of a Permanent Magnet Synchronous Motor" IEEE Conference Proceedings Vol. 2023 No. IEMDC Page. 1-5 (2023), doi: 10.1109/IEMDC 55163.2023.10238898
- [5] Tikadar Amitav, Kumar Nitish, Joshi Yogendra, Kumar Satish, "Coupled Electro-Thermal Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle" IEEE Conference Proceedings Vol. 2020 No. ITherm Page. 249-256 (2020), doi: 10.1109/ITherm 45881.2020.9190562
- [6] Norihisa Iwasaki, Hideki Kitamura, Masashi Kitamura, Junnosuke Nakatsugawa et al., "Miniaturization Design and Performance Evaluation of Prototype Permanent Magnet Synchronous Motor Optimally Designed with Thermo-Magnetic Field Coupling Analysis" IEEJ Rotating Machinery Research Committee (In Japanese) Vol. RM-10 No. 56-69 Page. 57-62 (2010.05.28)
- [7] Takuya Yamauchi, Satomi Ishikawa, Mika Inoue, Hideki Oki, "Modeling methods that contribute to improvements in accuracy of CFD analysis on electric motor" Yamaha Motor Technical Review No. 57, Dec. 2022.
- [8] Fujio Tachibana, "A Study on the Thermal Resistance of Contact Surfaces" Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 55, No. 397, pp. 102-107, 1952, doi: 10.1299/jsmemag.55.397_102

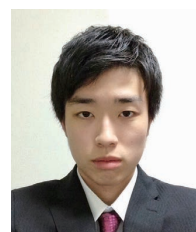
■ 著者



大滝 亮太

Ryota Otaki

パワートレインユニット
プロダクト開発統括部
電動 PT 開発部



土屋 照之

Teruyuki Tsuchiya

技術・研究本部
技術開発統括部
先進プロダクト開発部



酒井 悠

Yu Sakai

パワートレインユニット
プロダクト開発統括部
電動 PT 開発部



山内 拓也

Takuya Yamauchi

技術・研究本部
技術開発統括部
制御システム開発部



清水 司

Tsukasa Shimizu

パワートレインユニット
プロダクト開発統括部
電動 PT 開発部

三次元磁路と非対称磁石配置をもつ 可変界磁 PM モータの運転特性評価

Evaluation of Operating Characteristics of Adjustable Field Magnetization
PM Motors with 3D Magnetic Path and Asymmetric Magnet Arrangement

日吉 祐太郎 土井 康太朗 野口 季彦

本稿は、一般社団法人電気学会 2023年産業応用部門モータドライブ／回転機合同研究会において優秀論文発表賞を受賞したもので、同会の許可を得て転載したものです。

本論文の著作権は一般社団法人 電気学会に属し、無断複製・転載を禁じます。

要旨

本論文では、低回転動作における高トルクと、高回転動作における高効率な特性の両立が可能となる、3次元磁路構造と非対称な磁石配置のロータを有する可変界磁モータについて述べる。3次元 FEA (Finite Element Analysis) によって、高トルク密度の特性を維持しつつ可変界磁制御が可能であることを確認した。さらに、試作機に対し負荷試験を実施することで、高回転の動作において高効率な特性が得られることを検証した。

Abstract

This paper describes a three-dimensional structure of an adjustable field magnetization permanent magnet (PM) motor and a high-power density rotor structure with asymmetric permanent magnet arrangement for both high torque and high efficiency operation in the high speed and low torque range. 3D-FEA demonstrated that adjustable field magnetization operation is possible without sacrificing high torque density. Furthermore, load tests have confirmed that high efficiency characteristics can be achieved at high-speed operation.

1 はじめに

自動車主機用の電動モータに対する要求水準は日々上昇しており、特にエネルギー効率の高さと、出力密度への要求の高さは顕著である。経済産業省の2030年開発目標としては、「モーターシステムとして、85%以上の平均効率」「モータ単体出力密度:8.0kW/kg」を掲げている^[1]。モータ体積当たりの出力を向上するため、車載主機用モータを高回転化する試みがなされている^{[2][3]}。高トルク・高出力かつ高効率の特性を持ち、車載主機用のモータとして多く用いられる埋め込み磁石型同期モータ(IPMSM)においては、高回転領域での動作時に弱め界磁制御^[4]が一般に用いられるが、弱め界磁制御では、弱め界磁に必要な電流の分だけ損失が増大し、モータ効率が悪化するという課題がある。この課題の解決のため、回転数に応じて界磁強さが制御可能な、可変界磁モータが盛んに研究されている^{[5][6][7][8]}。筆者らはこれまでに、追加の界磁巻線を利用した3次元の磁路をもつ可変界磁モータを提案してきた^{[9][10]}。特に、非対称な磁石配置となる回転子を有することで、マグネットトルク・リラクタンストルクをとともに利用でき、高トルク密度・高

出力かつ可変界磁による高回転高効率のモータを提案した^[11]。本稿では、上記の3次元の磁路と非対称な磁石配置を有する可変界磁モータについて実機を製作し、実施した実負荷試験の結果を報告する。

2 モータ構造

2-1. モータ構造

図1に製作したモータの構造を示す。また表1へモータ諸元を示す。本モータはステータコア・ロータコアを軸方向へ2分割した構造となっている。ステータコア1、2に挟まれた空間へ界磁巻線を配置し、これに電流(以下、零相電流)を印加して生じた零相磁束によって強め界磁の効果を得る。図2へ示すように、零相磁束はロータコア1、ステータコア1、モータフレーム、ステータコア2、ロータコア2、ロータシャフトを順に通る3次元の磁路を流れる。

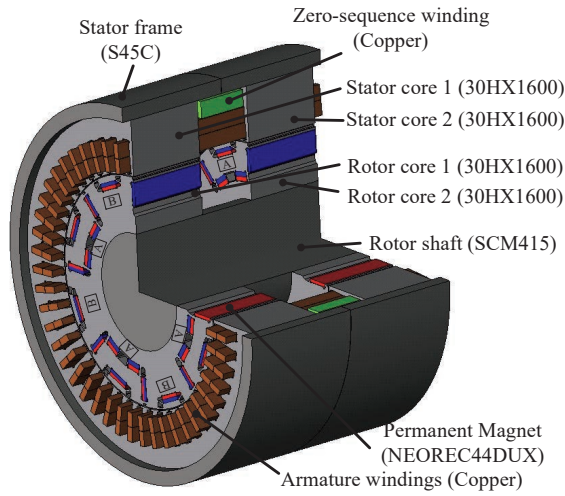


図1 Proposed motor model

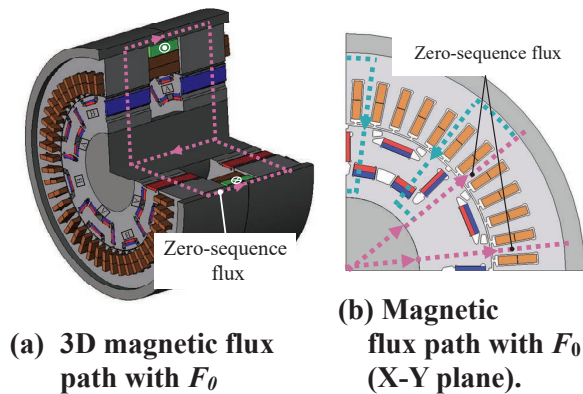


図2 Principle of adjustable field

表1 Specifications of proposed motor

Number of poles and slots	8 poles and 48 slots
Armature winding and resistance	8T-2P, star connection, 0.0209Ω
Zero-sequence winding and resistance	500T-2P, 8.83Ω
Stator frame outer diameter	φ152mm
Stator outer diameter	φ140mm
Rotor outer diameter	φ93mm
Rotor shaft diameter	φ46mm
Axial length	89mm
Maximum armature current and density	240A _{peak} , 24.2A/mm ²
Maximum DC link voltage	300V
Maximum zero-sequence current and density	4A _{dc} , 20.4A/mm ²
Maximum speeds	15000r/min
Cooling system	Water cooling

2-2. 可変界磁原理

ロータコアは磁極間で非対称な形状であり、周方向に磁石量の多い極、少ない極が交互に配置されている。また軸方向に分割されたロータコア1、ロータコア2は、一磁極分位相がずれている。図3の解析結果へ示す通り、零相電流の印加なき場合は磁極の非対称性から、エアギャップでの磁束密度分布は非対称となる。また、全て磁石量の多い極とした場合と比べ磁束密度分布の振幅が小さい。零相磁束を印加することで生じた零相磁束は、磁石が少なく磁気抵抗の小さい極へ集中するため、磁石量の少ない極の磁束を選択的に増加させることができる。増加した磁束によって磁束密度分布の対称性が得られると同時に、界磁全体としての磁束量が増加し、界磁を強めることができる。すなわち、零相電流の制御によって界磁を変化させ、可変界磁を実現する。

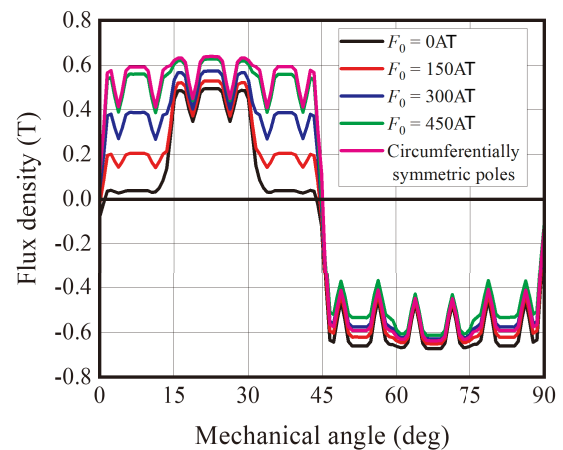


図3 Air gap magnetic flux density vs. F_0 under no-load condition

3 実機試験

3-1. 無負荷誘起電圧計測

提案モータについて、外力によりロータを回転させた際の三相線の電圧を計測する試験を行った。本試験では可変界磁効果を確認するため、零相巻線に安定化電源を接続し、任意の零相電流 I_0 を印加できるようにした。試験の様子を図4に示す。回転数は1,000rpmで固定とし、零相起磁力 F_0 は0、150、300、450、600AT を与えた。

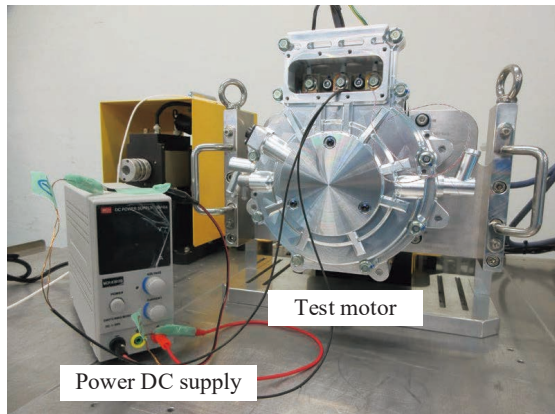


図4 Experimental setup

試験の結果を図5へ示す。零相起磁力の増加に伴い、線間誘起電圧の振幅が増加していることが分かる。無負荷誘起電圧 V は式(1)から与えられるため、電気角周波数 ω 一定の場合、零相起磁力によって鎖交磁束 ψ が変化している。すなわち、零相起磁力によって界磁の制御が行えていると言える。

$$V = \omega \psi$$

(1)

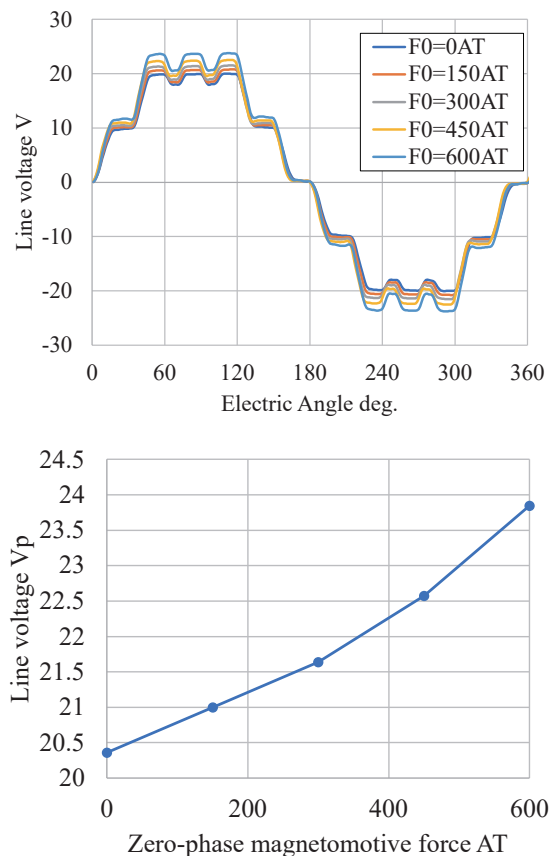


図5 Induced voltage vs. F0

3-2. 電流及び位相角感度確認のための負荷試験

提案モータについて、回転数、3相電流値、3相電流位相角、零相電流値を指定したうえで、軸トルクを計測する試験を行った。試験のパラメータを表2に示す。三相電流の印加には汎用インバータ pMOTION (Myway 社製) を利用し、零相電流の印加には安定化電源を使用した。

表2 Parameters in the test for measuring induced voltage

3-phase current A_{peak}	From 60 to 240, in increments of 20.
3-phase current phase angle deg.	From 0 to 90, in increments of 10.
Zero-phase current A_{dc}	0, 1, 2, 3, 4
Rotational speed rpm	1000

図6(a) (b) に三相電流 I_m 、・零相電流 I_0 条件ごとに、トルク最大となる三相電流位相角 β (以後最適進角 β) と、最適進角にて計測されたトルクを示す。提案モータの最大電流条件において、電流位相角 50deg. にて最大トルク 53.7Nm が確認できた。図6(c) に、各 I_m 、 I_0 条件下での $\beta = 0$ における電機子鎖交磁束 ψ を示す。 I_m の低い領域では I_0 の値に応じて ψ が大きく増減しているが、 I_m が増加すると ψ の変化は小さくなる。 I_m 由来の磁束によって、零相磁束の磁路が飽和してしまっているため、 I_m の大きな条件では I_0 由来の磁束が通らず ψ を増加させられなくなっていると考えられる。

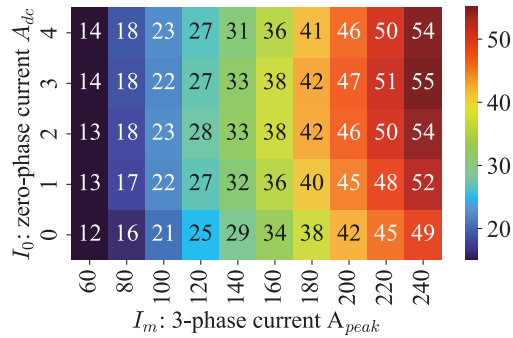
また飽和によって ψ 自体が低下しているため、 I_m の高い条件では式(2)に示す磁石トルク T_m が発揮しにくくなっている。図6(d) に、d 軸・q 軸インダクタンスを示す。 I_m の増加による磁気飽和の影響によって、モータインダクタンスが低下している。ただし L_d 、 L_q がともに減少するため、インダクタンス差 $L_d - L_q$ は極端に減少せず、式(3)に示すリラクタンストルク T_r を維持できている。

$$T_m = P_n \psi I_q \quad (2)$$

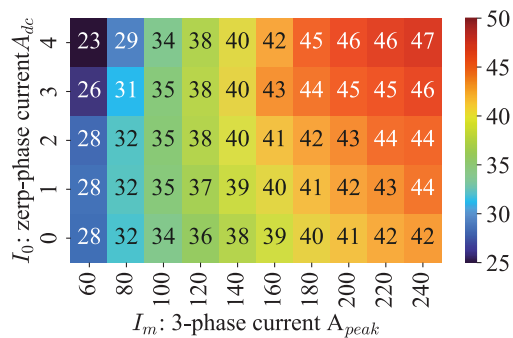
$$T_r = P_n (L_d - L_q) I_d I_q \quad (3)$$

図6(b) に示す最適電流進角の分布からも、高 I_m 条件においてリラクタンストルクが支配的になっていることが確認できる。

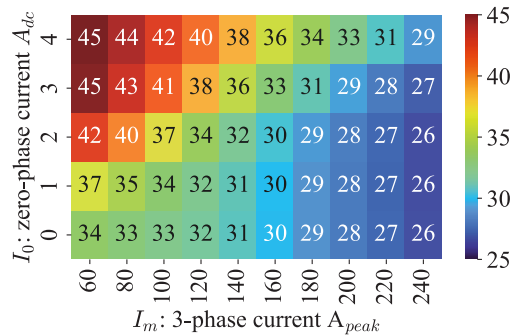
Evaluation of Operating Characteristics of Adjustable Field Magnetization PM Motors with 3D Magnetic Path and Asymmetric Magnet Arrangement



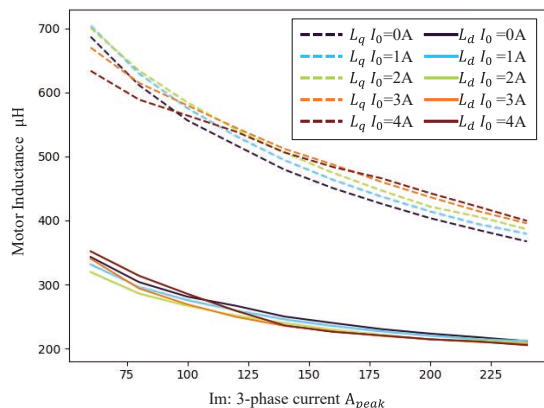
(a) Torque [Nm]



(b) β : Optimum current phase angle [deg.]



(c) ψ : Chained flux [mWb]



(d) Motor inductance vs. 3-phase current.

図6 Results of load tests

3-3. 各動作点における効率計測試験

提案モータについて、任意の回転数、三相電流値を設定したうえで、最もトルクが大きくなる零相電流値 I_0 、三相電流進角 β を探索し、最適な条件におけるモータ効率を計測する試験を行った。本試験の計測結果のうち、最も高い出力は36.7kW であり、回転数9,000rpm にて軸トルク39.0Nm が確認できた。軽自動車の主機としては最高出力30kW 程度が必要であるので^[12]、提案モータの出力は十分であると言える。図7に製作したモータの効率分布を示す。黒い四角は実測したポイントである。提案モータの電源条件において、最高効率は94.7% であり、最高効率点は13,000rpm・13.8Nm であった。 I_0 の低下により界磁を弱められるため、高回転域の効率が良く、最高効率点が13,000rpm と高回転である。

図8(a)–(d)に各種損失の分布を示す。図8(d)に示す「その他損失」には、鉄損、AC 銅損、機械損が含まれる。図8(b)に示すように、DC 銅損は高トルク域にて大きく、また図8(d)に示すように、その他損失は電流値およびモータ回転数に対して感度があり、高出力域で大きい。合計損失としては、両損失が重畳する N-T 線図の肩位置近傍において最も大きくなっている。最高回転数付近の領域では、零相電流の低減による界磁の弱まりと、零相電流自体の損失低減により、合計損失の値としては小さくなっている。図8(c)に示すように、9,000rpm 以下の条件においては I_0 はほぼ最大値となっているため、零相コイル銅損も同様にほぼ最大値で一定である。9,000rpm 以上の領域においては I_0 を低減させ、 ψ を低減させることで式(4)に示す誘起電圧を低減させている。図8(c)から、高回転域では I_0 の減少に伴い零相コイル銅損が低下していることが分かる。

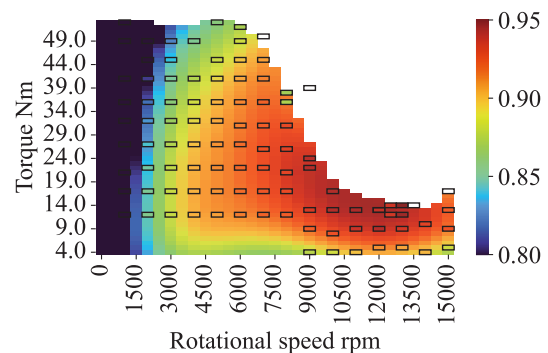


図7 Distribution of motor efficiency in the N-T diagram

Evaluation of Operating Characteristics of Adjustable Field Magnetization PM Motors with 3D Magnetic Path and Asymmetric Magnet Arrangement

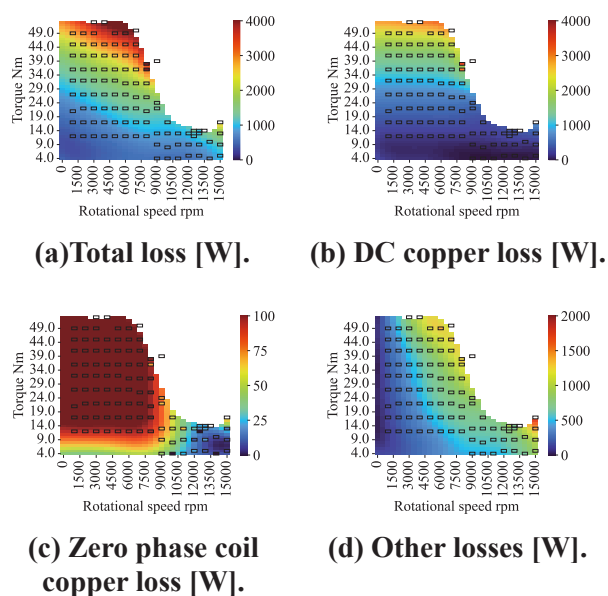


図8 Distribution of each loss

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega \psi \end{pmatrix} \quad (4)$$

実使用を想定した評価のため、図7に示す効率の分布に基づき、WLTC モード走行を仮定した際の平均効率を考える。

モード走行の前提として、車両のパラメータを車重746.4kg、タイヤ径0.6m、減速比1.0 : 12.0とした。

図9に WLTC class 3b に定められた走行パターンを示す。図10にモード走行をした場合の動作点と、各動作点におけるモータ損失を示す。低トルクおよび高回転領域では損失が少なく、高効率での走行ができていると言える。図11にモード走行中のモータ効率を示す。加減速のタイミングにてモータ効率が悪化しているが、中・高速運転中はモータ効率80%以上をとる期間が多く、モード走行を通した平均効率は84.4%であった。提案モータは、電力消費の激しい高速度域の運転において高効率の特性を持つため、モード走行基準では優位性があると考えられる。

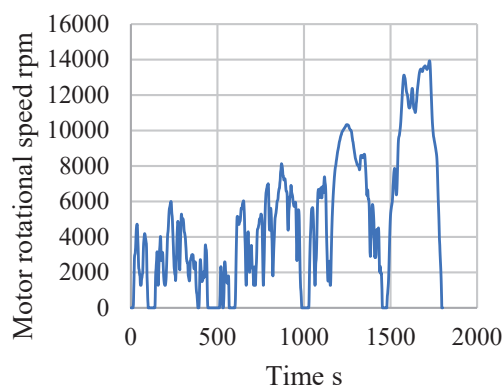


図9 Motor rotation speed [rpm] in WLTC Class 3B mode

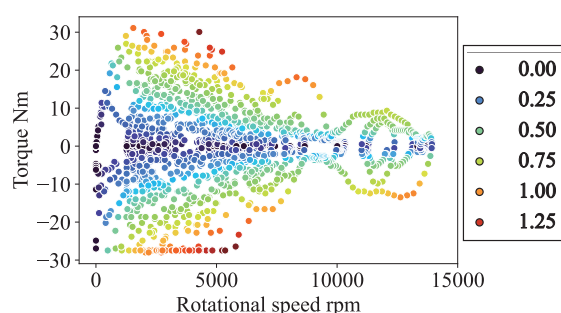


図10 Total motor loss [kW] for WLTC Class 3B driving

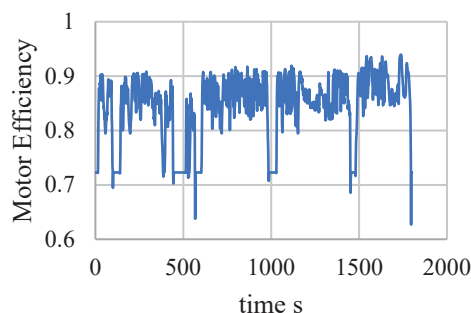


図11 Motor efficiency transition in mode driving

4 まとめ

本稿では、3次元の磁路と非対称な磁石配置を有する可変界磁モータについて実機を製作し、実負荷試験を実施した。今回の計測では最大53.3Nm、36.7kW の出力特性が確認できた。モータ単体での最高効率は94.7%であり、WLTC class3b モードにおける平均効率は84.4%であった。自動車主機として利用可能な出力と、可変界磁モータの特徴である高回転運転の高効率な特性が確認できた。最高効率点が高回転に位置する特性から、モード走行における平均効率は良好な結果となった。

一方で零相磁束を通すためのケース・シャフトを軽量化することが困難であること、また零相巻線といった部品が追加されることから、モータ単体重量は20.3kg、モータ単体出力密度は1.8kW/kg となった。出力密度向上のためには、より高回転・高電圧で動作可能なモータとすること、零相磁束を通しながらも体積の小さい回転子を最適設計することなどの対策が考えられる。

参考文献

[1] 経済産業省製造産業局, “「次世代蓄電池・次世代モーターの開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装の方向性”, 2021. [オンライン]. Available: <https://www.meti.>

go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/industrial_restructuring/pdf/005_03_00.pdf

[2] I. Husain, B. Ozpineci, M. S. Islam, E. Gurpinar, G.-J. Su, W. Yu, S. Chowdhury, L. Xue, D. Rahman, R. Sahu, "Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles," Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021.

[3] K. Mohamed, A. A. Abdussalam, A. Abdulagader, "Technology Challenges and Trends of Electric Motor and Drive in Electric Vehicle," IJEES, February 8, 2023.

[4] T. M. Jahns, "Flux-Weakening Regime Operation of an Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive," IEEE Transactions on Industry Applications, July 1987.

[5] H. Hijikata, Y. Sakai, K. Akatsu, Y. Miyama, H. Arita, A. Daikoku, "Multi-phase inverter-fed MATRIX motor for high efficiency driving," IEEE Transactions on Industry Applications, 2018.

[6] K. Sakai, K. Yuki, Y. Hashiba, N. Takahashi, K. Yasui, "Principal and Basic Characteristics of Variable-Magnetic-Force Memory Motors," 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011.

[7] T. Mizuno, K. Nagayama, T. Ashikaga, T. Kobayashi, "Basic Principles and Characteristics of Hybrid Excitation Type Synchronous Machine," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 115, no. 11, pp. 1402-1411, 1995.

[8] R. Tsunata, M. Takemoto, S. Ogasawara, K. Orikawa, "Variable Flux Memory Motor Employing Double-Layer Delta-Type PM Arrangement and Large Flux Barrier for Traction Applications," IEEE Transactions on Industry Applications, July-Aug. 2021.

[9] 土井康太郎, 野口季彦, "三次元磁路と非対称磁石配置をもつ可変界磁PMモータの検討", 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 2022.

[10] K. Iwama, T. Noguchi, "High-Efficiency Drive Method of Adjustable Field IPMSM Utilizing Magnetic Saturation," MDPI, Energies, Dec. 2021.

[11] 土井康太郎, 山田幹太, 日吉祐太郎, 野口季彦, "三次元磁路と非対称磁石配置をもつ可変界磁PMモータの運転特性", 電気学会, 2023.

[12] MITSUBISHI MOTORS CORPORATION, "MINICAB MiEV", [オンライン]. Available: <https://www.mitsubishi-motors.co.jp/lineup/minicab-miev/performance/>. [アクセス日: 7 9 2023].

■ 著者



日吉 祐太郎
Yutaro Hiyoshi
技術・研究本部
AM 開発統括部
第2技術部



土井 康太郎
Kotaro Doi
静岡大学
創造科学技術大学院



野口 季彦
Toshihiko Noguchi
静岡大学

船外機の市場不具合低減活動 (パワーチルト&トリム)

Activities for Reducing Initial Market Failures in the Outboard Motors Market
(Power Tilt & Trim)

高林 亮介 山下 敏之 青木 崇浩 岡本 守央 山口 淳

要旨

ヤマハ発動機株式会社(以下当社)の大型船外機の製造拠点である袋井南工場(静岡県袋井市)では、今まで以上にお客さまに安心と信頼をお届けするために、市場初期不具合の低減を目標に掲げ、不良検出力の強化活動を行っている。市場不具合を部品別に分類した結果、大部分がパワーチルト&トリム(以下 PTT)に関連しており、中でも、“作動時間の遅延”、“作動時の異音”の案件が多く発生していることが判明した。そこで、現行完成検査の工程変更や新たな設備投資をすることなく、自動判定機能を織り込んだ PTT の作動時間検査装置と異音検査装置を導入したので報告する。

Abstract

At Yamaha Motor Co., Ltd.'s (hereinafter referred to as “the Company”) Fukuroi Minami Plant, the manufacturing hub for large outboard motors, the Company has set a goal of reducing initial market failures. To achieve this, the Company is implementing activities aimed at enhancing fault detection capabilities, ensuring greater peace of mind and reliability than ever before. An analysis of market failures by component revealed that the majority were related to the power tilt and trim (hereinafter “PTT”), with delayed operation times and abnormal noise during operation being the most common issues. In response, the Company has introduced a PTT operation time inspection device and an abnormal noise inspection device, both featuring an automatic determination function. These innovations were implemented without altering the current final inspection process or investing in new equipment. This report will detail the specifics of this initiative.

1 はじめに

当社の船外機は、ここ数年で大型モデルを中心に US(米国)市場での販売が増加し、それに伴い売り上げも伸びてきている。しかし、他社の新商品の投入によって競争は激化しており、このような環境下で事業成長を続けるためには、新商品を開発するだけでなく、品質と信頼性の高い製品をお客さまへ提供することが必要不可欠である。

また、マリンスポーツ本部では、“私たちは、お客さまのマリンライフをさらに安心・快適な経験に変えるため、お客さまの視点により、高品質で信頼性の高い製品とサービスを提供します。”という品質基本方針を掲げている。製造部門は、お客さまから寄せられた市場不具合情報に対し真摯に向き合い、市場問題の発生・流出防止のための取り組みを継続することで、より一層の安心・信頼できる商品をお客さまに提供することを目指している。

2 市場不具合発生状況

特に短時間の使用で不具合が発生した場合は、ブランドイメージを著しく低下させることが容易に考えられる。そこで、運転時間10時間以内で発生した市場初期不具合を調査した結果、最も不具合が多い部品は PTT であった。また、PTT の不具合を事象別で見ると、“作動時間の遅延”と“作動時の異音”の2つの事象で約6割を占めていることが判明した。

補足として、PTT とはパワーチルト&トリムの略称であり、油圧を用いて船外機の角度を自由調整できる機能を有する部品である。船は速度が上がると船首が浮き上がり、船外機が取り付けられている船尾は沈んだ姿勢になる。安定かつ速く航走するにはプロペラの角度を推進方向に最適に保つ必要がある。この船外機の角度を微調整する機構を“トリム”という。

また、船を港に停泊させる際、海水の汚れや腐食から船外機を保護するために、海面から船外機を引き上げる機構を“チルト”という(図1)。

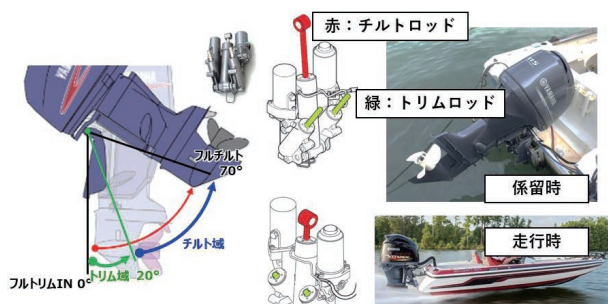


図1 PTT（パワーチルト&トリム）の機能と構造

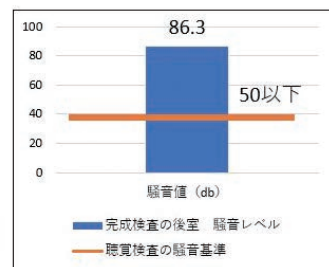
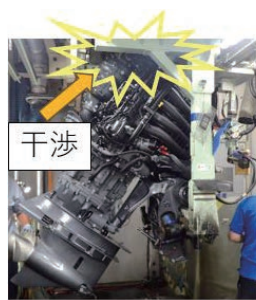


図3 船外機設備干渉および完検洗浄工程の騒音環境レベル

3 工場出荷前に異常検知するための課題

先述の通り、PTTの初期不具合について、完成検査に焦点をあて調査した結果、PTTはメーカー保証※のASSY納入品であり、当社の完成検査では作動可否の確認のみで、作動時間と作動音は確認していないことがわかった。

そこで作動時間と作動音の検査導入を目的に、現状の完成検査工程を調査した結果、以下2点の問題があることがわかった。1つ目は、検査員が現時点で配置されている工程ではPTTの作動ができない問題がある。具体的には、新規検査項目は、洗浄後にPTTを上昇・下降させる作業工程で行うのが適しているが、現状で洗浄作業工程を担っているのは非検査員のため、検査権限がないことが課題となる(図2)。

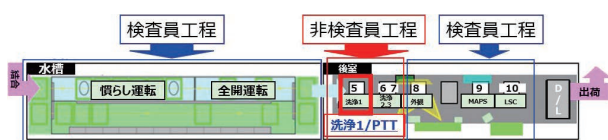


図2 完成検査の洗浄工程位置

2つ目は、「異音検査」のための設備と騒音環境下での検査方法に課題がある。具体的には、市場で使われるPTT全作動域の検査がポイントになるが、現行設備ではPTTを上昇させる途中で、設備と船外機の干渉により、フルチルト角度まで作動できない。また、周辺で洗浄・エアブローを行っている騒音環境下で異音検査を行うことが困難な状況であった。しかし、これらの課題解決のために、設備に多大なコストをかけられないという理由から、現行の工程制約の下でPTT作動時間と異音の検査の導入を検討した(図3)。

※メーカーとはYHSJ(ヤマハモーターハイドロリック株式会社)であり、PTTの開発～製造を行っている。

4 目標

PTTの“作動時間の遅延”と“作動時の異音”の市場初期不具合ゼロを目標として、これを達成するための検査工程の導入において以下2点に取り組んだ。

- ・音と作動時間を機械で自動可否判定する手段の確立(検査員を必要としない)
- ・現状の工程制約で成立する検査手段の確立(チルト角度の制約・環境音の制約)

5 対策

5-1. 検査コンセプト

検討に際し、まずPTT出荷検査強化のコンセプトを3つ掲げた(図4)。

1. YHSJで行っているPTT単品検査と袋井南工場で行う船外機完成検査の内容を整合させて、作動時間を測定することで、データの紐づけ分析を可能にさせる。
2. AIを用いて正常・異常な音を機械的に判別させることで、異音判定のバラツキを抑制する。
3. 巨額な設備投資をすることなく、現状の完成検査の制約条件下で検査を成立させる。

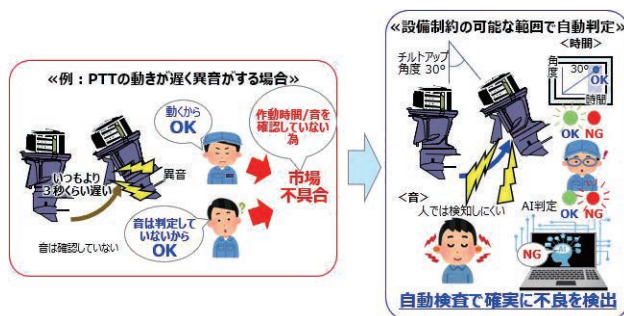


図4 検査コンセプト

5-2. 作動時間検査方法の検討と導入

まず作動時間について、YHSJと同じ検査を完成機で再現させるための検査方法を検討した。YHSJでは、PTT単品に完成機同等の荷重を加えた上で、角度10°ごとのPTT作動時間と最大電流値を測定し検査している(図5)。

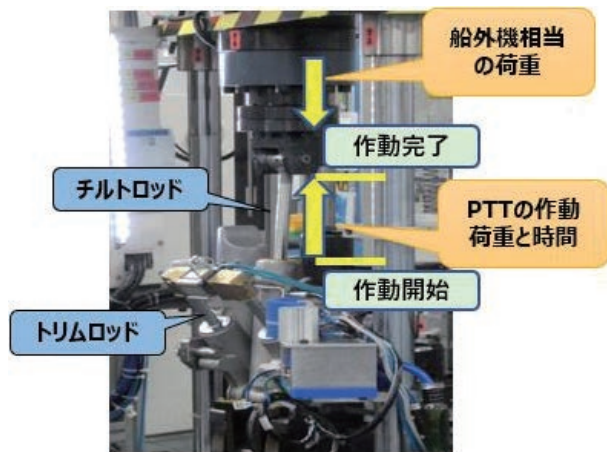


図5 単品状態の PTT 検査

一方で当社の完成検査では設備構造上、フルチルト角度まで作動させると船外機が設備に干渉してしまうため、最大角度の作動検査と同等の精度がある検査方法として、“速度検査”“電流値検査”“作動時間検査”の3案の検討を行った。そのうち、“速度検査”“電流値検査”には明確な規格値がなかったため、PTT単品での図面規格値が存在する“作動時間検査”で検討を行うことに決めた。次に、PTTの動作可能な範囲から検査角度を検討した。PTT動作可能範囲とは、設備に接触する直前までの角度であり、その作動域は約35°であった。なお、図面のPTT作動時間の規格から作動域35°の想定作動時間を算出することで、フルチルト同等の判断が可能と考えた(図6)。

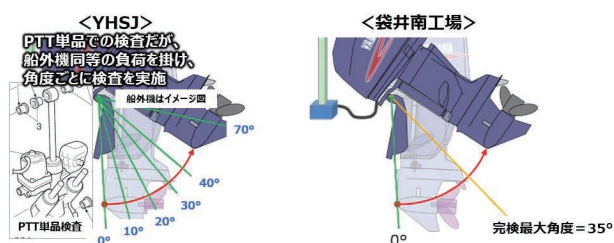


図6 YHSJと袋井南工場の PTT 作動角度の違い

PTTは、船外機に付いているPTTスイッチを作業者が押すことで上下に作動する。そこで、PTTが作動したときの電流を活用し、その入力電流をトリガーとして作動時間の計測を行う仕組みを取り入れた。なお、上昇動作、下降動作の2パターンの作動時間計測を行う必要があるため、それぞれの作動時間計

測方法を検討した。上昇動作では、入力電流をトリガーとして計測を開始し、終了点にはリミットスイッチを設置して、船外機の一部がリミットスイッチに接触することで強制的に動作を停止させる仕組みとした。下降動作では、入力電流をトリガーとして計測を開始し、PTTが最下降位置に達し作業者がスイッチを離した時点（電流遮断点）を終了点として計測する仕組みとした(図7)。

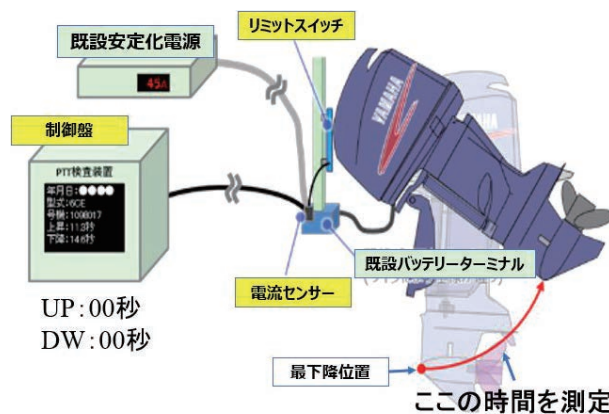


図7 計測装置

次に、作動時間検査の規格値を検討した。いくつかの不具合品を調査した結果、作動時間が早いものでも単品図面規格値の1.8倍を要していることが判明した。なお、完成検査では設備制約上、最大角度まで作動できないため、作動角度ごとの作動時間を机上で算出し、規格値を仮設定した(図8)。



図8 作動時間の製造規格値(単位:秒)

算出した規格値でテストを行った結果、机上計算の規格値に対して、実際の作動時間は短いものがほとんどであった。そのため、図面規格値ではなく、不具合につながりそうな異常品を検出するための製造独自の規格値を設定する必要があると考えた。そこで、量産品の作動時間を約1カ月間サンプリングし、その±4σを袋井南工場の検査規格値に設定した。この検査規格は、PTT単品図面の規格値よりも厳しいものであり、市場で不具合が発生する可能性のある商品を工場で検出することは可能である。そし

て、異常を検出した場合は、真因追究を行い発生対策を織り込むことで、さらに信頼性の高い商品提供が可能になる(図9)。

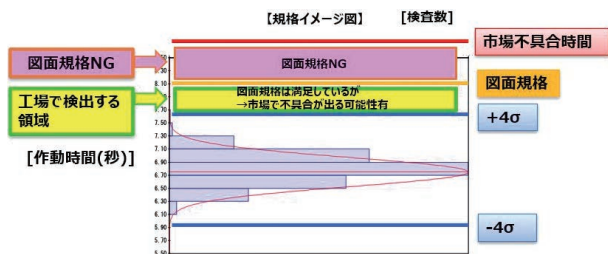


図9 規格値分析

5-3. 異音検査の検討と導入

次に、異音検査方案の検討に際し、まずは異音発生源の調査を行った。その結果、異音の9割以上がモーター起因の音であることが判明した(図10)。

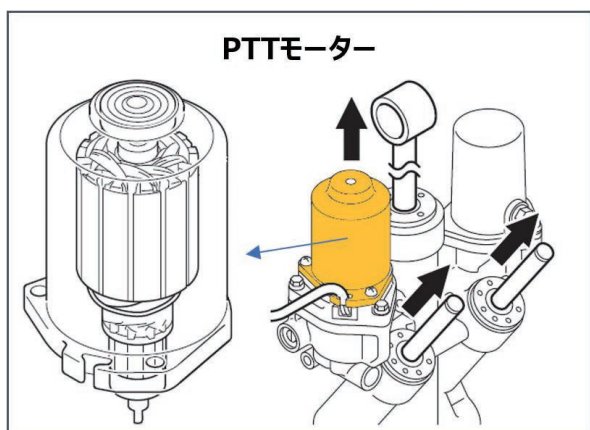


図10 PTT モーター

モーターは、PTT 内部のギヤポンプにより油圧で駆動する部品であり、常に一定の速度で回る。したがって、フルチルトまで作動させなくてもモーターからの異音検査は可能と考えた。異音検査の仕組みは、収録した音の大きさだけで判断するのではなく、異音の特徴を捉えるために周波数ごとの音の強弱を表現できる STFT (短時間フーリエ変換) 画像に変換し、画像から周波数・時間・音圧の特徴を AIへ学習させ、正常な音と異常な音を機械で自動判別させるようにした(図11)。

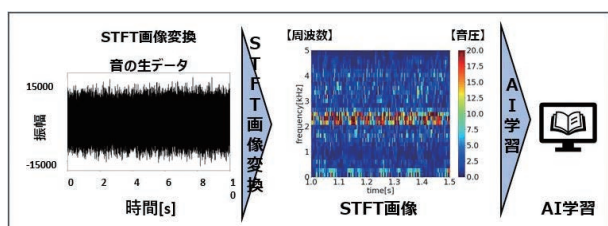


図11 STFT 画像変換、AI 学習

また、検査工程では水槽運転検査にて船外機の外観について水をエアブローで飛ばす際に、約80～100dBの騒音が発生する。このような騒音環境下でも PTT の作動音を検知することができるかテストを行った結果、現状の完成検査の騒音環境下でも PTT 作動音の検出が可能であると確認できた(図12)。

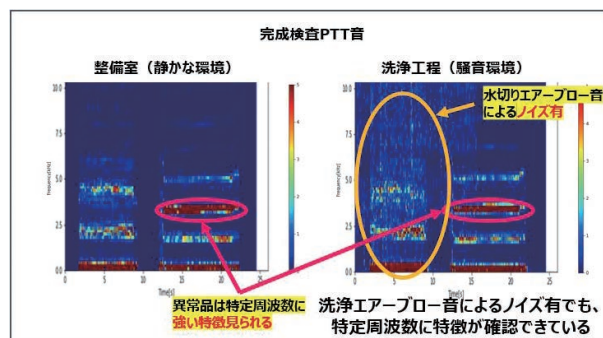


図12 騒音環境下での特徴確認

異音検査の規格値は、YHSJ や品質保証部門と協議の上、市場で発生する異音の大半を占める3つの不良モード1) BRG (ベアリング) 変形による摺動異常、2) モーターマグネット割れによる干渉不良、3) コネクター変形不良について、異常品サンプルを作成し、異常音を AI 学習させることで異常を判別できるようにした。工夫点としては、集めた音の周波数と強度のレンジを調整することで AI に学習させやすい STFT 画像を作成した。まず、着目する周波数帯は2,000Hz～6,000Hz、音圧レベルのカラーマップ設定は-50dB～40dBとした(図13)。

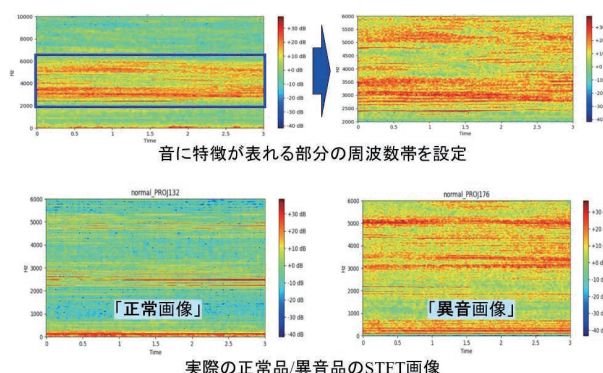


図13 判定周波数、強度の設定

AI は CNN (Convolutional Neural Network) と AE (Auto Encoder) の2種類を使用した。CNN は画像判別が得意な AI であり、AE は異常検知が得意な AI である。学習データには正常品500データ、不良品15データを活用した。テストの結果、正常品、不良品ともに、正確に合否判定できることを確認した(図14)。

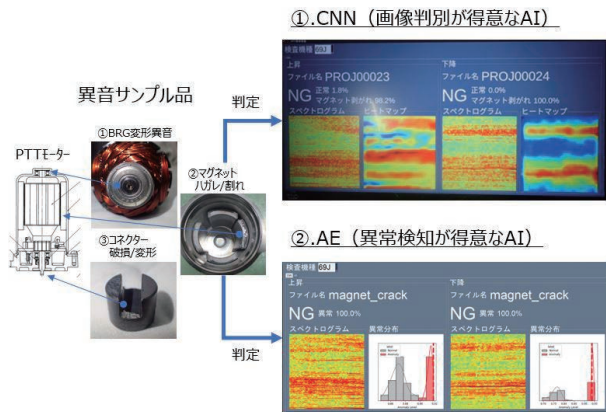
Activities for Reducing Initial Market Failures in the Outboard Motors Market
(Power Tilt & Trim)

図14 AI判定

5-4. 作動時間検査および異音検査の導入効果

今回開発した検査装置は、現状の設備でも船外機と接触することがなく、検査員資格を必要としない。そのため、現状の工程を変更することなく、PTTの作動検査・異音検査を実現させることができた。表1に導入効果を示す。

表1 導入効果

検査内容	運用開始時期	不具合件数
作動時間検査	2022年2月から	0件
異音検査	2024年1月から	0件

6 おわりに

今回の“作動時間の遅延”と“作動時の異音”というPTT市場不具合低減の取り組みは、これまで未実施だったPTTの作動時間・異音の検査に自動判定機能を織り込んだ検査装置を導入することで、工程変更と新たな設備投資をすることなく、商品の品質保証に貢献できたと考える。本施策の導入後に、市場での初期不具合0件という実績より、有効性の高さが示された。今後は発生防止の観点から源流改善を行うことも必要である。検査を追加したことでPTTの不具合検出が可能となり、さらには新検査方法で異常と判断された部品の調査のため、前工程と連携を開始し情報を共有する体制も構築できている。源流改善を行うためには、不具合の原因を特定し、対策しなければならないが、いまだ全ての原因がつかめていないため、今後はビッグデータを活用し、原因分析につなげることを検討している。まず、“製造条件や検査情報”と“市場の故障情報”を紐づけるように、PTT単品に付与されたPTTシリアル番号と船外機の完成号機のデータ管理を整備中である。次に、連結されたビッグデータを解析ソフトで分析し、製造要因の洗い出し、原

因の追究へとつなげ未然防止を図っていく。上記の活動を今後も継続し、発生防止と流出防止の両方の施策を強化して、市場不具合ゼロを目指していく(図15)。

●製造と市場のデータの繋がり

例) PTT Assyの短時間不具合低減



●市場×工場データ連結による分析手段確立(実績作り)

従来：単一/少数仮説の分析
(統計手法)

ビッグデータ×データ分析基盤活用



図15 データ連携

■著者



高林 亮介
Ryosuke Takabayashi
マリン事業本部
製造統括部
マリンエンジン製造部



山下 敏之
Toshiyuki Yamashita
マリン事業本部
製造統括部
マリンエンジン製造部



青木 崇浩
Takahiro Aoki
生産技術本部
生産技術部/
静岡大学情報学部客員教授



岡本 守央
Morio Okamoto
生産技術本部
生産技術部



山口 淳
Jun Yamaguchi
生産技術本部
生産技術部

要旨

ヤマハ発動機株式会社(以下当社)の MC(モーターサイクル)組立工場(静岡県磐田市)では35モデルを4つの組立ラインのコンベヤー方式で生産をしてきた。近年の生産台数減少と市場要求の多様化に対して、市場追従するため4つの組立ラインを AGV(Automatic Guided Vehicle)を用いた多品種変量生産に対応する2本の組立ラインへ集約した。また、月に1回しか生産がなかったモデルもほぼ毎日生産し、製品を市場に安定供給することが求められている。そのため、従来のロットサイズ40台の生産方式から、1台多品種変量生産方式の実現に向けて、汎用化と段取り改革を柱に技術開発を行った。

汎用化を目指し、従来の工程合致の考え方を変え、工数合致という視点で工程設計を実施した。工数合致をしていくことで、ラインバランスを最適化し、どのモデルを生産する時でも組立ライン内は同じ工数で作業ができ安定した生産を実現した。

モデルごとの工数差についてはシステムによる制御をし、AGV バイパス方式を用いることで解決した。

段取り改革において、従来ロットサイズでは40台ごとにあった段取り作業が、1台多品種変量生産では1台ごとに発生する。その課題を解決するために、自動化・共通化・最短化という視点で改善に取り組んだ。

本報では汎用化と段取り改革の取り組み内容を紹介する。

Abstract

At Yamaha Motor Co., Ltd.'s (hereinafter referred to as "the Company") motorcycle (MC) assembly plant in Iwata City, Shizuoka Prefecture, 35 models have traditionally been produced using a conveyor system with four assembly lines. In response to declining production volumes and increasingly diversified market demands in recent years, the four assembly lines were consolidated into two. These lines now utilize automated guided vehicles (AGVs) to enable high-mix, variable-volume production that adapts to market trends. Moreover, models that were previously produced only once a month must now be produced almost daily to ensure a stable supply of products to the market. To address this challenge, the Company developed technologies focusing on generalization and setup reforms, enabling the shift to a high-mix, variable-volume production system. This allows for the production of just one unit at a time, rather than the conventional 40-unit lot size.

In pursuit of generalization, the traditional process of matching specific tasks to models was rethought, and a new approach was adopted—designing the production process based on matching man-hours instead. By matching man-hours, the line balance was optimized, and stable production was achieved with the same number of man-hours in the assembly line regardless of which model was being produced.

By optimizing man-hour balance, stable production was achieved across all models, regardless of which was being assembled, while maintaining the same man-hours per assembly line. Any differences in man-hours per model were controlled through the AGV bypass system.

In terms of setup reform, tasks that were previously performed for every 40 units in lot-size production are now executed for each individual unit in this high-mix system. To streamline this process, improvements were made in automation, standardization, and reducing setup times.

This report will introduce the initiatives undertaken for generalization and setup reform.

1 はじめに

リーマンショック以降、モーターサイクル(以下 MC)生産台数の減少とともに市場からの要求が多様化してきた。MC 組立工場では35モデルを4つの組立ラインのコンベヤー方式で生

産をしてきた。MC の生産はスポーティ／ツーリングモデルやオフロード／コンペティションモデル等のカテゴリー別組立ライン(図1)にすることで効率を高めていたが、その反面、モデルごとの生産量は季節ごとに大きく増減するため工程や人員をそれに合わせていた。さらに完成車の出荷場も4ヵ所あり、同じ

仕向け地のコンテナが一杯になるまで待っているため出荷までのリードタイムが長かった。

また、見込み生産では市場の要求台数と生産台数との間にズレが生じてしまい、市場の需要に対応できないという課題もあった。

この課題を解決するべく市場追従性と損益分岐点経営の両立を目標に掲げ、1台のオーダーでもタイムリーに生産して世界中のお客さまに喜んでもらえることを考え、生産台数の変動に対応した生産方式を成立させた。



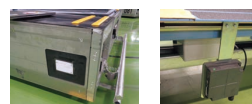
図1 組立ライン別モデル一覧

工程は作業しやすくすることができるが、工程編成によって場所を自由に移動できない。

車両搬送 AGV 側にリフター機能を搭載することや(図2)、大物部品のハンドリング設備は大物部品を前工程で組み合わせて供給することで、組立ライン内の固定設備数を減らすことに成功した(図3)。また、AGV にターンテーブルを組み込むことで、車両の向きを360度変えることができるようにし、これまでは車両に対して常に同じ方向からでしか作業できなかったが、モデルや工程ごとに車両の向きを変えて最適な作業をすることができるようになった。



- 寸法：長さ2400×幅1300×高さ400 (mm)
- 重量：700kg
- 稼働台数：135台
- 特徴：
 - ・駆動方式：電動モータ式
 - ・自動走行：磁気テープトレース
 - ・常時無線通信：
 - AGV動作随時監視、トラブル時迅速な対応
 - ・自動リフター昇降：作業性を向上
 - ・RFIDタグ：設備自動切替のトリガー
 - ・無線給電：充電作業レス
 - ・安全機能：障害物センサー停止（レーザー）
 - バンパー停止（リミットスイッチ）



RFIDタグ：無線によるIDタグ



無線給電：非接触急速充電

図2 車両搬送 AGV

2 平準化

2-1. 工程設計

従来の組立ラインは、カテゴリごとに工数・構造差の少ないモデルを集めて最適化した専用組立ラインで生産していた。しかし、汎用組立ラインとするためには、工数・車体構造差のあるモデルを同じ組立ラインで生産する必要がある。そのため、構造に合わせて工程を編成する“工程合致¹⁾”の考え方から脱却し、どのモデルを生産する時でも常に同じ仕事量かつ一定のラインピッチで生産することができる“工数合致²⁾”の考え方で工程設計をすることにした。

- 1) 工程合致とは、同じ作業者が常に同じ構造の似た作業となるように工程を合わせる考え方をいう。
- 2) 工数合致とは、同じ作業者が常に同じ仕事量の作業となるように工数を合わせる考え方をいう。

工数合致させるための課題は2つある。設備制約とモデルごとの工数差があげられ、これらの課題を解決することが必要である。

1つ目の設備制約の取り組みとして固定設備を排除した。従来の組立ラインで設置されていた作業者の高さを調節する固定リフターや大物部品のハンドリング設備は、設置されている

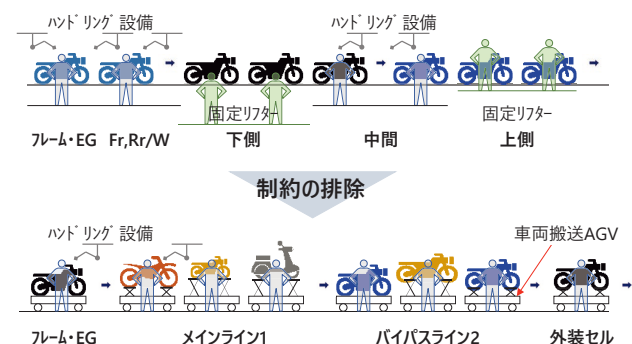


図3 設備制約を排除した汎用組立ライン

2つ目の工数差に対応する仕組みとして、AGV バイパス方式を採用した。AGV バイパス方式とは、メインとなる組立ラインの工数を一定にし、工数がオーバーする作業を別に分けたメインライン2や組立セルで吸収させる方法である。今回の汎用組立ラインでは、AGV バイパスラインと組立セルを組み合わせ、工数の大小に応じてルートを変えて流すことで、どんな組立工数のモデルも同じ組立ラインでロス無く生産できるようになった。

2-2. AGV バイパスラインのためのシステム

2-1で述べた AGV バイパス方式を成立させるために必要不可欠な手法は、システムを用いて車両搬送 AGV のルートを工数やモデルに合わせて自由に選択する制御である。

車両によって組立工数は大きく異なる。そのため、車両搬送 AGV が積載している車両別にルートを変更して疑似的にライン長を伸び縮みさせることで、工数差を吸収している。図4のように、メインライン1はすべての車両が流れるが、メインライン1を出た後に工数“小”のモデルはそのまま完成検査へ直行する。工数“中”のモデルは外装セルへ向かい、工数“大”のモデルはメインライン2および外装セルを経由して完成検査へと向かう。

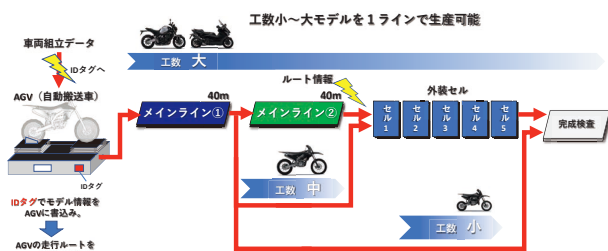


図4 組立工数差に対応する仕組み

上記の方式を可能にしたのは YMSL（ヤマハモーターソリューション（株））が開発したシステム「FA-MES（Factory Automation-Manufacturing Execution System）」である。

車両搬送 AGV は Moxa 製の無線 LAN 機器を搭載しており、AP 局（Access Point）と Wi-Fi 通信することで OPC サーバー（Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control）と接続することが可能である。それゆえ、システムは OPC サーバーを介して車両搬送 AGV にアクセスしてデータの書き込みや取得をすることができる（図5）。

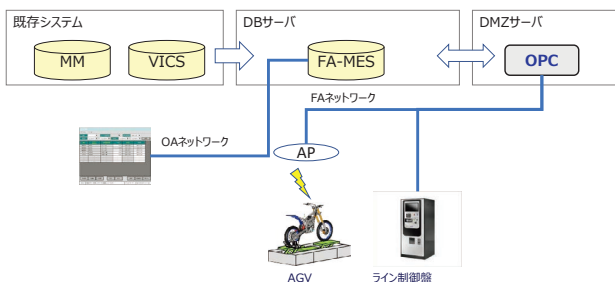


図5 設備の通信接続状態

基本的に書き込む情報は“ルート情報”、“昇降高さ情報”そして“CT（サイクルタイム）情報”の3つである。ルート情報とは、車両搬送 AGV がどのルートを走行するのか指示するための情

報である。車両搬送 AGV の走行ルートには、システムとの連携ポイントが合計21カ所存在する。車両搬送 AGV は連携ポイントごとに次の連携ポイントまでの指示を受け取ることで、ルートを自由に選択しながら走行することを可能にした。昇降高さ情報とは、工程ごとに作業高さを変更するためのリフター 高さ情報である。マーカー番号に昇降高さ情報を紐付けて、車両搬送 AGV がマーカーを読み込んだタイミングで昇降高さ設定通りにリフターが昇降する。CT 情報とは、工数差を吸収する目的である組立セルにおける機種ごとの車両搬送 AGV 停止時間である。CT 情報もマーカー番号と紐付けて、マーカーを読み込んだタイミングで車両搬送 AGV は一時停止し、一定時間経過後に再発進する。

情報を書き込むフローについて説明する。AGV がメインラインの前工程にある連携ポイントで停止している時、システムが次に投入する車両を照合し、RFID(Radio Frequency Identification) タグの AGV 番号を読み込んで積載する車両情報と車両搬送 AGV を紐付ける。その後、システムが車両搬送 AGV に積載されている車両を確認し、その車両に適したルート情報を車両搬送 AGV に指示する（図6）。

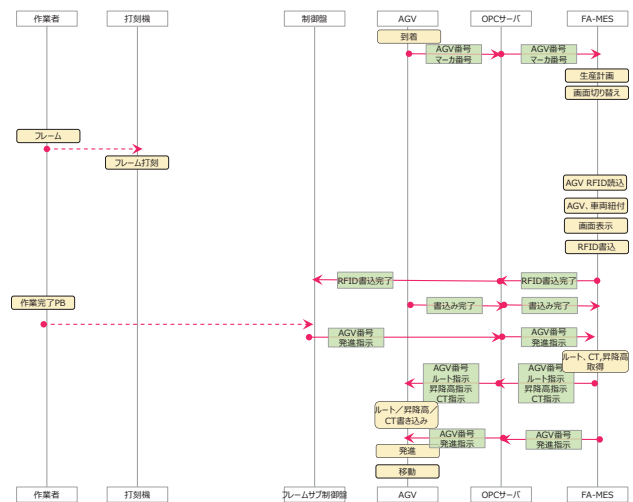


図6 車両搬送 AGV への情報書き込みフローチャート（一例）

外装セルは1ラインにつき5つあるため、セルへの進入前に改めてシステムから行先指示を貰う必要がある。セルへの進入前のシステム連携ポイントで車両搬送 AGV は一時停止し、停止している間にセルの空き情報をシステムが判断する。空いているセルがある場合、そのセルまでのルート情報をシステムが車両搬送 AGV へ指示する。同時にシステムは車両搬送 AGV へ走行指示も送信することで、AGV は走行を再開して目的のセルへ進入する。

3 ハイサイクル生産対応

3-1. 段取り改革

段取りとは、モデルに対して使用する設備や治工具の設定変更や交換を行う作業である。従来のロットサイズ40台の生産では、40台に1回の段取り作業が発生する。1回の段取り作業には1台分の間隔を空けて、段取り作業を行っていた。ハイサイクル生産とは、4台に1回または1台に1回のペースで機種が切り替わる。そのため段取り作業が発生し、大きなロスとなり段取り改革を行った(図7)。

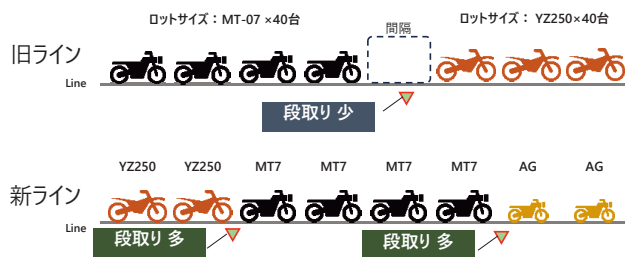


図7 段取り概要図

段取り改革では ECRS (Eliminate/Combine/Rearrange/Simplify) の原則を基に3つの考え方で改善を行った。

1. 自動化(設備／ツール)
2. 共通化
3. 最短化(ワンタッチ化)

3-1-1. 自動化

従来まではデジスイッチによる手動での設備機種切り替えやツールの入れ替えを行っていたが、多大な時間を要するため機種間に1台分の空台を入れていた。この課題を解決するため

に開発したのが RFID タグを使用した設備の自動切替ができる仕組みである。

AGV に車両を搭載する際に、車両情報と各設備の設定情報を書き込む。各設備が RFID タグを読み込み、対象の設備情報を取得することで、設備の自動切替を実現した。

また、この RFID タグの情報をもとに、車両のボルトを締付する締付ツールのトルク値を自動で変更し、モデルに合った締付トルクの切り替えが可能になった。

これにより締付ツールの段取り作業も自動化することができた。

3-1-2. 共通化

従来はモデル専用で治具を持っていたため、段取り作業が必ず発生していた。モデル単体ではなく、生産されているすべてのモデルの特長と必要な機能を整理することで、同じ機能でもモデルごとに形状が異なるため専用で持っていた治具を1つにすることができた。

3-1-3. 最短化

治具の中では共通化が不可能なものには、段取り作業の目標時間を0.1分(6秒)以内と設定し、その時間内に段取り作業が可能な形状を追求した。

合わせて、部分共通化と軽量化を意識した改革を行った。

大きな治具では従来は治具全体を交換して時間がかかっていたが、大部分を共通化させることにより、段取り替えをする箇所を限定し、一部だけをワンタッチでの段取り替えができる設計をした(図8)。

また治具そのものの軽量化を図ることで、短時間で段取り替えをすることができるようになった。

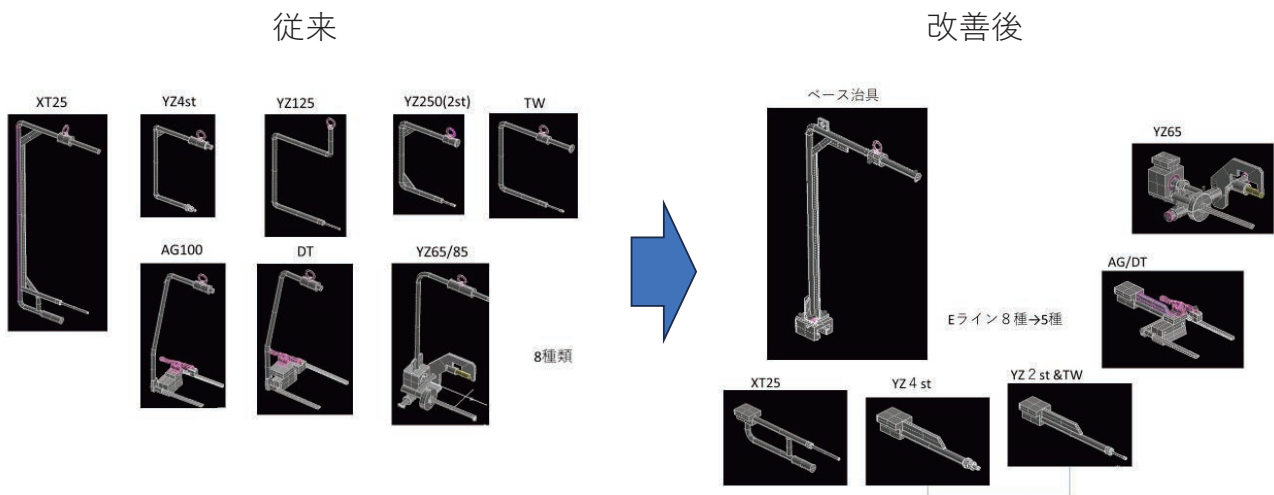


図8 治具段取り改善

3-1-4. 段取り改革の効果

今回の段取り改革により、従来必要であった機種切り替え段取り用の空台を排除できた。それは、モデルごとの設備の自動切換え＋同機能の治具の共通化＋治具の最短化（軽量化と部分的に交換可能な治具導入とワンタッチ化）の実現によるものである。

3-2. 部品供給

ハイサイクル対応にあたり、部品の供給方法も変更した。

これまでのロットサイズ40台の生産では、コンベヤー周辺に機種ごとの部品台車を配置し、機種が変わるごとに1ロット分の部品が載った台車を交換して対応していた。しかし、ハイサイクル生産では4台ごとに機種が変わるため、機種別で台車を並べて対応するには、スペース不足や台車交換のための段取りロスが多くなり、その改善が必要であった。

この課題への解決策として、組立ライン内で1台の車両を組立するのに必要な部品をあらかじめ台車に搭載し、組立ラインを流れる車両に同期して流す方法がある。

そのためには、部品台車の供給と空台車の返却を人で行うと、組立ラインのピッチに合わせて供給返却を行う必要から、多くの人員が必要になるか、人員抑制のために運搬距離に制約が必要になる。また、ライン形態が AGV バイパス方式となり、行き先が複雑化したため、車両搬送 AGV に載っている車両に紐付いた部品を、正確にメインラインやセルに供給する必要がある。

これらの必要性から、組立ラインや組立セルで使用する1車両分の部品を台車に載せ、システムと連携しながら台車を自動で運搬する仕組みを新たに構築した(図9)。以下ではその内容について説明する。

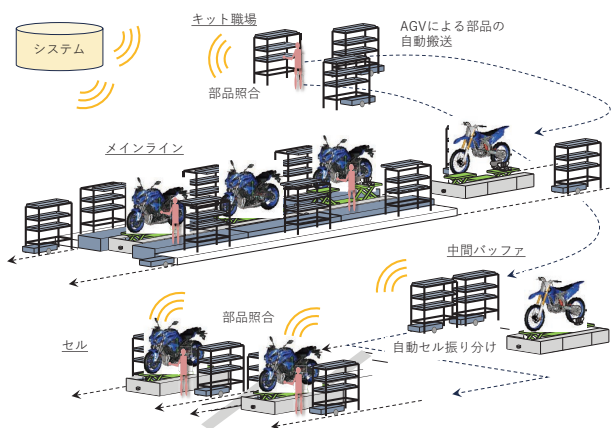


図9 部品自動搬送

3-2-1. 部品搭載

メーカーから供給された部品はまず、生産計画に基づいて、工場内外で一車両分の部品になるように、トレーやケースへ仕分けされる。仕分けされた部品を載せたトレーやケースは、組立順序に従って台車に搭載され、工場内にある組立ラインや組立セルへ部品を供給する部品管理職場へまとめて搬送される。

部品管理職場では、台車に搭載されたトレーやケースを組立ライン・組立セルへ供給するために、マーシャリング台車（図10）へ順番に搭載する。ここで、オペレーターはトレーやケースに貼られた QR コードを機器で読み取り、供給先の車両搬送 AGV に載っている機種の部品との照合をシステムで実施する。このときマーシャリング台車と搭載されている部品の情報を紐付ける。



図10 マーシャリング台車

3-2-2. 部品搬送 AGV

部品が搭載されたマーシャリング台車は、オペレーターによって専用の搬送口にセットされ、部品搬送 AGV によって組立ライン・組立セルへ自動搬送される。組立ラインと組立セルでは部品搬送 AGV の制御が異なるため、分けて説明する。

組立ラインへの運搬：組立ラインでは、運搬されたマーシャリング台車をリフターで持ち上げ、地面より高い位置で台車を流すことで、下側を部品搬送 AGV がすり抜けられる構造になっている。

マーシャリング台車の引き渡し・引き取りはすべて、組立ラインの制御と部品搬送 AGV 間で光センサを用いた通信により、自動的に行われる。これにより、必要なマーシャリング台車の数に対して少ない台数の部品搬送 AGV での自動運搬が可能となっている。

組立セルへの運搬:組立セルは組立ラインと異なり、複数セルを1職場で対応するため、システムによる車両搬送 AGV の各セルへの振り分けと部品搬送 AGV の組立セルへの振り分けを合わせる必要がある。そのため、部品供給職場から送り出された部品搬送 AGV は一度、中間バッファとして溜めておき、組立ラインから出てくる車両搬送 AGV に合わせて、組立セルへの行先指示をシステムから部品搬送 AGV へ光センサを用いて書き込みを行い、車両搬送 AGV と同じ組立セルに向かうように制御する。

組立セルでは部品の確認のため、台車に紐付けられた部品の機種情報を読み取り、車両搬送 AGV に載っている車両の機種情報を比較し、システムによる照合確認を行う。

4 効果

4-1. 4ライン→2ライン

汎用組立ラインにすることによって、車体組立ラインはこれまででカテゴリ別に分けられていた4本のラインから、どんなモデルでもロスを最小限に抑えて流せる2本の汎用組立ラインに集約することができた。

この2本の組立ラインをほぼ同じ形にすることで、季節によって変わる生産量の増減を2本のラインで補い合い、生産負荷の調整が容易になった(図11)。これまでは負荷変動のためにモデルを違う組立ラインで生産する場合、工程・人・設備などの準備に長い時間が必要だったが、この期間を短縮でき、市場の要求台数に対し、柔軟な対応ができる生産体制を構築することができた。

汎用性と市場対応力

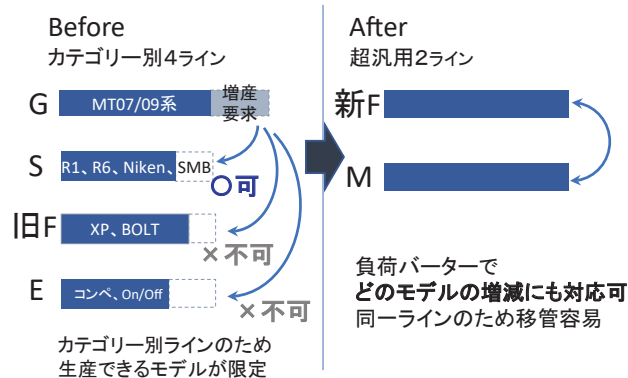


図11 専用ライン→汎用ライン

4-2. 小ロット化

ハイサイクル対応への取り組みにより、生産ロットサイズは40から4へと小ロット化をロス無く実現することができた。大き

な効果としては、段取りロスの削減があげられる。

生産ロットサイズを40台から4台とするにはロット間の段取りロスが課題だった。従来はロット間に段取り時間のための間隔1台分を空けるロスを設定しながら生産していたため、そのまま生産ロットサイズを小さくして段取り回数を増やしてしまうと、それだけロスが増えてしまう。段取り改革により段取りを最少化することで、この間隔を空けるロスを発生させることなく生産することが可能となった。

現在、車体組立ラインは生産ロットサイズを4台まで小さくすることができており、仕組みとしては1台にも対応可能となった。図12に生産ロットサイズの変更前後を示す。

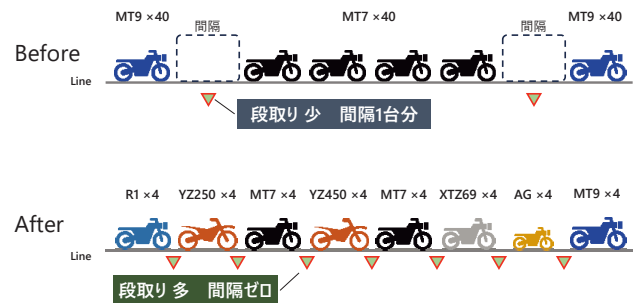


図12 生産ロットサイズ40台→4台

4-3. 毎日生産率

毎日生産率とは、各ラインで生産するモデルラインナップに対し、日々の生産するモデルの種類の割合のことである。

ロットサイズを40から4にすることにより、毎日生産率は従来生産の41%から90%まで向上することができた。これにより、例えば図13のモデルBのように、月に1回しか生産がなかったモデルもほぼ毎日生産することができ、製品を市場に安定供給することが可能となった。

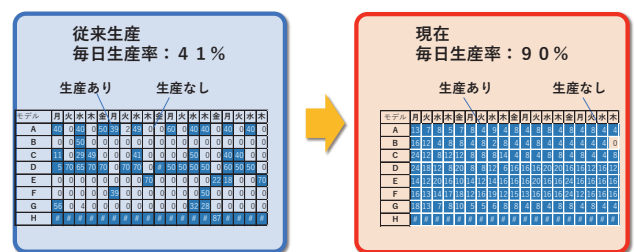


図13 毎日生産率

また、毎日生産することによって生産職場の組立作業が安定し、日々の生産能率の安定につながった。従来のロットサイズ40の生産では、月に一度しか生産しないモデルは組立作業者が作業を思い出すのに時間がかかり、最初の数台は作業スピードが上がらない上に、作業を間違えて品質不良が発生すること

も多く、その修正に要する時間も無視できなかった。そのため、生産頻度の少ないモデルは能率と品質を下げる要因となっていたが、ほぼすべてのモデルが毎日生産され、なおかつ1時間ごとにほぼ同じパターンでモデルが生産されることにより、作業者も作業を忘れることなく、安定したパフォーマンスで高品質な作業をすることができている。

新人作業者の育成についても、従来はすべてのモデルの教育・訓練を終えるまでに生産頻度が少なく完了までに時間を要していたが、毎日コンスタントに生産されるため作業者の習熟も上がりやすく、育成期間の短縮にもつながった。

5 まとめ

本報では、汎用化と段取り改革での取り組み内容を紹介した。

市場追従性において、従来のロットサイズ40台の生産方式から、1台のオーダーに対応できるようになり、必要な量を生産することができるようになった。これにより、市場のニーズにタイムリーに応えられるようになった。

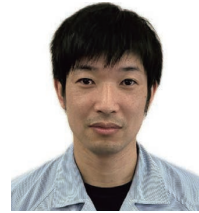
損益分岐点経営においては、まだ改善の必要がある。理想の姿を描き、理論値の視点でロスを見える化し、改善を進めて、経営への貢献に努めていく。

また組立ラインの汎用化によって、組立作業者はこれまで以上に多くのモデルの作業を高いパフォーマンスで正確に行うことが必要になる。そのため、今後のテーマとしてはヒューマンエロノミクスの研究を通して、人に優しく働きやすい環境作りにも貢献していく。

■ 著者



友田 祐介
Yusuke Tomoda
生産本部
製造技術統括部
組立技術部



小林 篤史
Atsushi Kobayashi
生産本部
製造技術統括部
組立技術部



深澤 伸吾
Shingo Fukazawa
生産本部
製造技術統括部
組立技術部



川口 貴之
Takayuki Kawaguchi
生産本部
製造技術統括部
組立技術部

Investigation on Degradation Process of PdRuIr/CZ “pseudo-Rh” Catalysts used for Motorcycles

Takuya Motegi Shunya Tataru Shunpei Takamoto Kosuke Doi

当論文は、JSAE 20249016/SAE 2024-32-0016として、SETC2024 (Small Powertrains and Energy Systems Technology Conference)にて発表されたものです。

Reprinted with permission Copyright © 2024 SAE Japan and Copyright © 2024 SAE INTERNATIONAL
(Further use or distribution is not permitted without permission from SAE.)

要旨

自動車向けの排ガス浄化触媒では、活性物質として白金(Pt)・パラジウム(Pd)・ロジウム(Rh)が使われている。このうち、Rhは効率的にNO_xの還元反応を促進させることができ、必須な元素である。一方、近年ではRhの価格が高騰しており、触媒のコスト増加が問題となっている。希少資源の供給リスクの観点からも、触媒中のRhを代替する、または使用量を削減する技術の開発が急がれる。我々は、(国研)科学技術振興機構のACCELプログラムで開発された“擬ロジウム合金”に注目し、これを用いた触媒の二輪車への適用を検討するとともに、劣化過程の調査を行った。

ナノサイズのPdRuIr合金をセリアジルコニア固溶体へ担持した触媒(PdRuIr/CZ触媒)を作製し、二輪車へ搭載して排ガス計測を行った。担持量4.0g/LのPdRuIr/CZ触媒は0.3g/LのRh/CZ触媒に匹敵する初期特性を有するが、850℃、5hrの熱処理を施すとHC、NO_xの排出量が増加し、Rh/CZ触媒には劣る結果となった。触媒粉末のX線回折、透過電子顕微鏡観察により、熱処理後には合金粒子の粗大化や相分離が起きていることが確認できた。さらに、評価部品の作製過程でイリジウム(Ir)が酸化していることも確認できた。触媒の作製過程や排ガスに曝される中で、Irが酸化と還元を繰り返しながら相分離が進行していくと推測する。

今回、我々はPdRuIr/CZ触媒の劣化過程を明確にし、Irの酸化が合金の相分離を引き起こす要因であると結論付けた。今後は触媒の耐久性向上、材料費低減を目指し、Irを使わない合金系を探索していく。

Abstract

Platinum (Pt), palladium (Pd), and rhodium (Rh) are used as active substances in exhaust gas purification catalysts for automobiles. Among these, Rh is an essential element because it efficiently promotes a NO_x reduction reaction. On the other hand, the price of Rh has been rising in recent years. From the perspective of the supply risk of rare resources, there is an urgent need to develop technologies to replace or reduce the amount of Rh used in catalysts. We focused on the pseudo-rhodium alloy developed by the ACCEL program of the Japan Science and Technology Agency (JST), and then investigated the application of the pseudo-rhodium alloy on the catalysts of our motorcycles and also the degradation process.

A nanosized PdRuIr alloy supported on a ceria-zirconia solid solution (PdRuIr/CZ) was prepared and assembled into a motorcycle for emissions measurement. The PdRuIr/CZ catalyst with an alloy loading of 4.0 g/L had initial properties comparable to the Rh supported on a CZ (Rh/CZ) catalyst with a Rh loading of 0.3 g/L, but after degradation treatment, emissions increased and were inferior to the Rh/CZ. X-ray diffraction and transmission electron microscopy of the catalyst powder showed that the alloy particles increased in size and underwent phase separation after degradation treatment. Furthermore, it was confirmed that iridium (Ir) was oxidized during the specimen preparation process. It is speculated that phase separation proceeds as iridium undergoes repeated oxidation and reduction during the catalyst production process and exposure to exhaust gases.

We have clarified the degradation process of PdRuIr/CZ catalysts and concluded that iridium oxidation is one of the major factors causing phase separation of the alloy.

1 INTRODUCTION

The need to address the issue of air pollution to help protect the environment and prevent health hazards has resulted in the introduction of increasingly stringent emissions regulations covering motorcycles. To purify the substances covered in these regulations (carbon monoxide (CO), hydrocarbons (HC), and nitrogen oxides (NOx)), vehicle exhaust systems are equipped with an emissions purification catalyst that uses platinum (Pt), palladium (Pd), and rhodium (Rh) as active substances. Among these, Rh is indispensable since it is the only active substance capable of efficiently promoting NOx reduction reactions. However, faced with rising Rh prices and the supply risks involved in procuring rare resources, there is an urgent need to develop technologies to replace or minimize the amount of Rh used in catalysts. Therefore, this research focused on the pseudo-rhodium alloy^[1] developed by the ACCEL program of the Japan Science and Technology Agency (JST). This pseudo-rhodium alloy is a nanosized Pd-Ru alloy produced through fusion between Pd and Ru at the atomic level. It features an electron state similar to Rh and reportedly achieves superior NOx purification performance to Rh^[2]. It has also been reported that adding iridium (Ir) to create a PdRuIr alloy enhances catalytic activity and restricts phase separation under high temperatures^[3].

This paper describes the preparation of a PdRuIr/CZ catalyst consisting of a PdRuIr alloy supported on ceria-zirconia (CZ), an evaluation of its emissions purification performance, and an investigation of its degradation process.

2 MATERIALS & METHODS

2-1. Material Preparation

2-1-1. Alloy Composition Samples

Table 1 describes the samples that were produced to study the optimum alloy composition. These samples were prepared with the cooperation of Kyoto University using a synthesis technique that simultaneously generates the alloy in the liquid phase and sets it on the surface of the CZ support.

Table 1 Alloy composition

	Alloy concentration in powder [wt%]	composition [at%]		
		Pd	Ru	Ir
Sample-1	0.71	10.1	51.2	38.7
Sample-2	0.71	23.3	44.1	32.6
Sample-3	0.79	34.6	36.5	28.9
Sample-4	0.78	43.5	30.7	25.8
Sample-5	0.89	61.7	21.1	17.2

2-1-2. Test Specimens (Emissions Measurement)

The PdRuIr/CZ used for the emissions evaluation was synthesized by Furuya Metal Co., Ltd. using this technique that simultaneously generates the alloy in the liquid phase and sets it on the surface of the CZ support. Table 2 describes the details of the composition. Due to the difficulty of using X-ray diffraction and transmission electron microscopy (TEM) to measure low loading concentrations, the powder was prepared with a high loading concentration of active material. The Rh/CZ powder that was prepared for comparison was synthesized by impregnation using a Rh(NO₃)₃ solution.

Each powder was dispersed in ion-exchanged water, blended with binder, alumina, CZ, and so on to fabricate the catalyst slurry. The slurry dipping method was adopted to coat the slurry onto the metal honeycomb. The coating amount was then adjusted by air blowing. The test specimens were then produced by forming coating layers in a 1-hour baking process at 450°C in air. For comparison, specimens subjected to degradation treatment were also prepared. Table 3 lists the degradation treatment conditions. The heating furnace temperature was set to achieve a catalyst temperature of approximately 850°C.

A preliminary study was conducted using model gases to estimate the amount of alloy and Rh that would result in similar NOx emissions before degradation treatment. The PdRuIr/CZ catalyst was adjusted to a PdRuIr alloy content of 4.0 g/L. In contrast, the Rh/CZ catalyst was adjusted to an Ru content of 0.3 g/L.

Table 2 Alloy loading concentration and composition of prototype powders

Alloy concentration in powder [wt%]	Alloy composition [at%]		
	Pd	Ru	Ir
12.58	21.6	38.2	40.2

Table 3 Degradation treatment conditions

temperature		furnace: 805°C specimen: approx. 850°C
time		5 hours
gas composition	rich	O ₂ : 0.5vol%, CO: 4.0vol%, H ₂ O: 10vol%, N ₂ : balance
	lean	O ₂ : 5.0vol%, H ₂ O: 10vol%, N ₂ : balance
fluctuation pattern		rich gas: 30 sec, lean gas: 10 sec

2-2. Evaluation of Catalytic Activity Using Model Gas

To study the alloy composition, the purification characteristics of the catalysts were evaluated with a model gas using a SIGU-1000 tester manufactured by Horiba, Ltd. The catalyst powder was compacted in a pressing machine and crushed into pellets. These pellets were then sieved into a size between 0.5 and 1 mm and the sample amounts were adjusted to create a PdRuIr alloy weight of 2.8 mg. Table 4 lists the pre-treatment conditions and Table 5 lists the test conditions.

Table 4 Pre-treatment conditions

temperature (furnace)		750°C
time		2 hours
gas composition	rich	O ₂ : 0.5vol%, CO: 4.0vol%, H ₂ O: 10vol%, N ₂ : balance
	lean	O ₂ : 5.0vol%, H ₂ O: 10vol%, N ₂ : balance
fluctuation pattern		rich gas: 30 sec, lean gas: 10 sec

Table 5 Test conditions

temperature (furnace)	start	170°C
	end	600°C
	rate	20°C/min
gas composition	CO ₂ : 12.12vol%, O ₂ : 0.92vol%, C ₃ H ₈ : 0.336vol%, C ₃ H ₆ : 0.084vol%, CO: 0.92vol%, NO: 0.12vol%, H ₂ O: 10vol%, N ₂ : balance	

2-3. Emissions Measurement

The emissions of a motorcycle equipped with a 155 cc liquid-cooled engine that complies with the Euro 4

emissions regulations were measured on a chassis dynamometer (37 kW) manufactured by Ono Sokki Co., Ltd.

- Test cycle: Worldwide Harmonized Motorcycle Emissions Certification Procedure (WMTC) Class 2 Subclass 2-1
- Emissions measurement: MEXA-ONE emissions measurement system manufactured by Horiba, Ltd.

2-4. Alloy Composition Analysis

The Pd, Ru, and Ir content of the catalyst powder was measured by high-frequency inductively coupled plasma emission spectrometry. The catalyst powder was dissolved and liquified by the alkali fusion method. A Plasma Quant PQ9000 spectrometer manufactured by Analytik Jena GmbH & Co. was used to measure the content by the calibration curve method.

2-5. Specific Surface Area Measurement

The Brunauer-Emmett-Teller (BET) specific surface area was measured using N₂ adsorption to compare the specific surface area of the catalysts before and after the test. This was accomplished by 1-point BET analysis using a Flow Sorb II 2300 apparatus manufactured by Micromeritics Instrument Corp.

2-6. Measurement of Quantity of Adsorbed CO

The quantity of adsorbed CO was measured as an indicator of the metal surface area of the catalysts. This was carried out by the CO pulse method using the R-6015H fully automatic catalytic gas absorption measuring apparatus manufactured by HEMMI Slide Rule Co., Ltd. Pretreatment consisted of heat treatment for 15 minutes at 400°C under an O₂ environment, followed by a helium (He) purge and reduction treatment for 15 minutes at 400°C under a hydrogen gas (H₂) environment.

2-7. TEM Observation

A transmission electron microscope (TEM) manufactured by JEOL Ltd. was used to observe and identify the state of the alloy particles supported on the catalysts. The

JEM-F200 multi-purpose electron microscope and JEM-ARM300F2 atomic resolution analytical microscope were used to observe the synthesized catalyst powder. After the degradation treatment, the catalyst powder was observed at an accelerating voltage of 200 kV using a JEM-2100F electron microscope. Elemental analysis was performed using a JED-2300 energy dispersive X-ray spectrometer (EDX).

2-8. X-Ray Diffraction (XRD) Measurement

The crystalline structure and composition of the alloy particles were verified by XRD measurement using an X'Pert PRO MPD X-ray diffractometer manufactured by Spectris. Copper (Cu) tubes were used as the X-ray source and CuK α rays were used as a probe X-rays.

3 RESULTS

3-1. Alloy Composition Study

Five samples were fabricated to evaluate the different purification characteristics of the alloy compositions. Figures 1 to 3 show the evaluation results. Sample 2 demonstrated the highest low-temperature activity for the purification performance of CO, HC, and NO. Sample 2 was fabricated with a Pd:Ru:Ir alloy composition of 2:4:4. In response, an alloy-loaded powder with the same composition was produced for emissions measurement using an actual motorcycle.

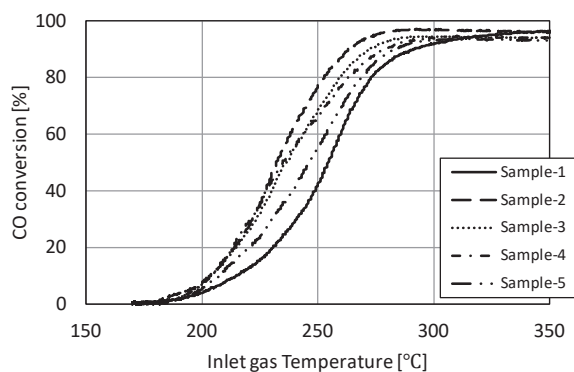


Fig. 1 CO purification characteristics using model gas

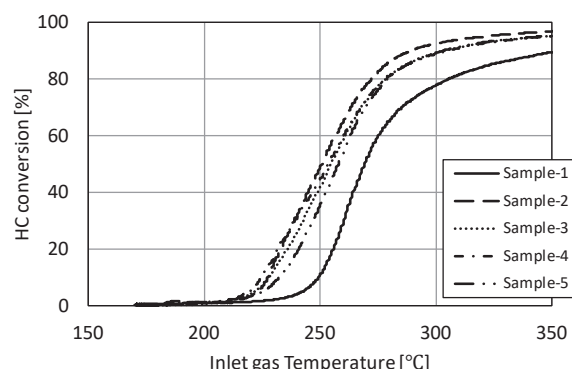


Fig. 2 HC purification characteristics using model gas

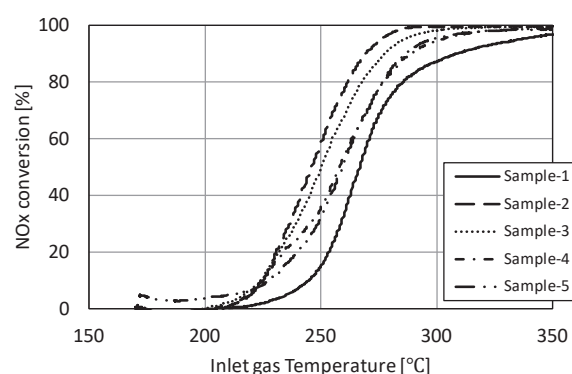


Fig. 3 NOx purification characteristics using model gas

3-2. Emissions Measurement

Figure 4 shows the emissions measurement results using motorcycles equipped with PdRuIr/CZ catalysts. Before the degradation treatment, the total hydrocarbon (THC) emissions were higher than the Rh/CZ catalyst. However, the CO and NOx emissions were the same, confirming the excellent NOx purification characteristics of a catalyst with this alloy composition. However, emissions increased after the degradation treatment and were substantially worse than the Rh/CZ catalyst, highlighting the fact that durability will be an issue for practical adoption.

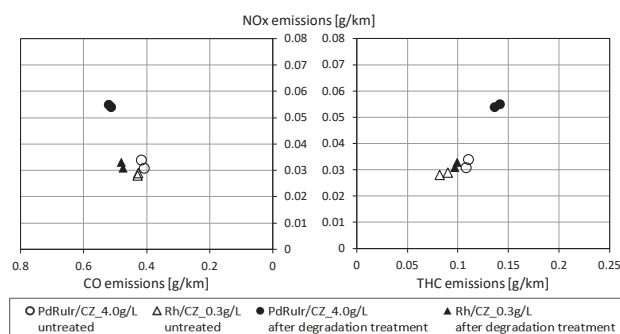


Fig. 4 Emissions measurement results after test cycle

3-3. Investigation of Degradation State

The degradation state was investigated to help improve the durability of the PdRuIr/CZ catalyst. It is known that both Ru and Ir oxidize under high-temperature oxidizing conditions and evaporate into a gaseous phase. Since the active material of this catalyst consists of nanoparticles, this oxidation and evaporation process might occur at lower temperatures. Therefore, once emissions measurement was completed, catalyst powder was extracted from the test specimens after the degradation treatment, and the Pd, Ru, and Ir content was analyzed (Fig. 5). The extracted powder was compared with fresh powder obtained by drying the catalyst slurry. No changes in the element content were identified after the degradation treatment, indicating that evaporation of Ru or Ir had not occurred.

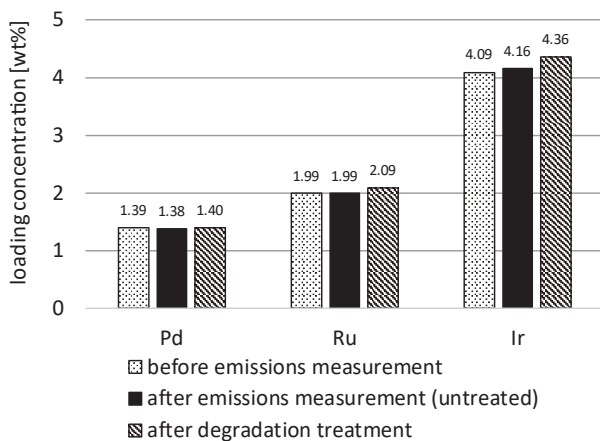


Fig. 5 Results of element content analysis

Figure 6 shows the CZ specific surface area measurement results. These results indicate that the specific surface area fell due to the heat load applied by the emissions measurement and degradation treatment, and that the CZ particles increased in size. However, the specific surface area of CZ that is not loaded with alloy falls only slightly after heat treatment for 5 hours at 850°C in air. Therefore, this drop in specific surface area seems to be a particular phenomenon caused by the loading of the alloy onto the CZ.

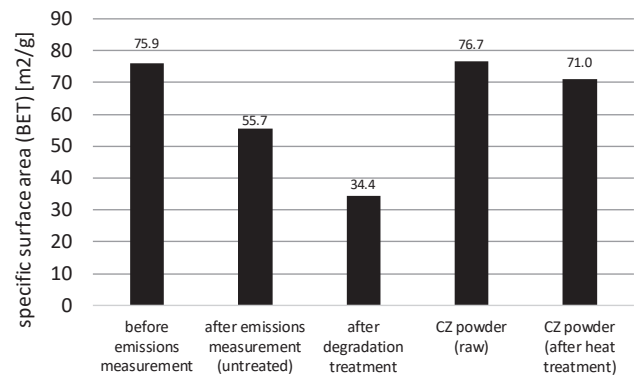


Fig. 6 Specific surface area trend

It was estimated that the increase in the size of the support particles caused the PdRuIr alloy particles on the surface of the CZ to coalesce or sink into the support, resulting in a lower alloy surface area. Subsequently, the quantity of adsorbed CO was measured as an indicator of the alloy surface area (Fig. 7). The quantity of adsorbed CO fell in the same way as the specific surface area of the support, also indicating that the alloy surface area decreased in size. Next, the alloy particles were observed using TEM. Figure 8 shows observation images of the catalyst powder after PdRuIr alloy loading and Fig. 9 shows element map images. These images show that, immediately after alloy loading, a PdRuIr alloy with a particle size of several nm was produced. Visual field 1 in Fig. 8 shows a location at which the alloy particles have aggregated, whereas visual field 2 shows that this location also contains areas in which the alloy loading state is comparatively dispersed. Figure 10 shows the catalyst powder after degradation treatment. In these images, particles sized between 10 and 100 nm can be observed. In addition, superimposed elemental analysis images show that the composition inside the particles is not uniform and that phase separation has probably occurred inside the particles.

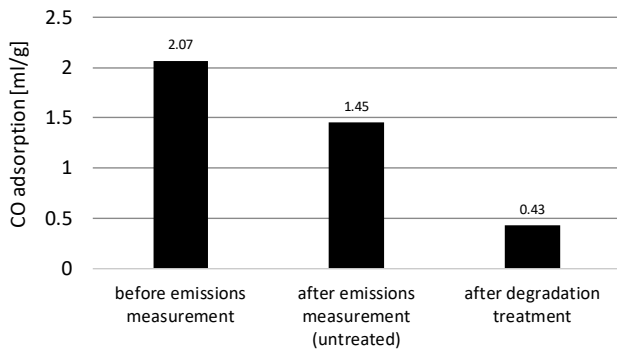
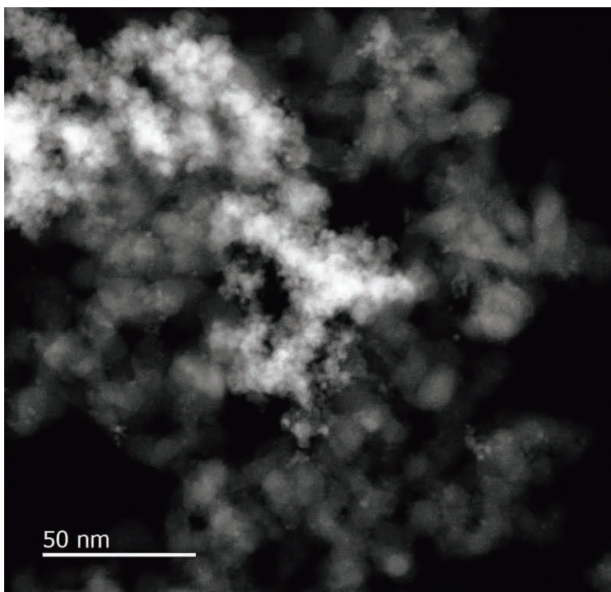
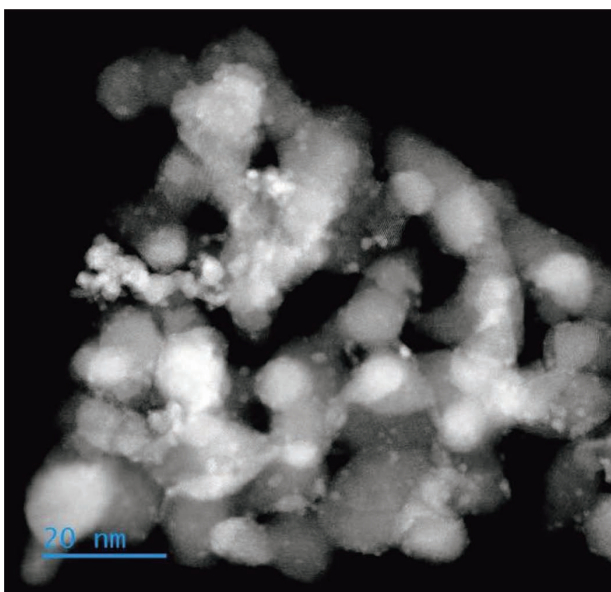


Fig. 7 CO adsorption trend



Visual field 1 (JEM-F200)



Visual field 2 (JEM-ARM300F20)

Fig. 8 Appearance of catalyst powder after PdRuIr alloy loading

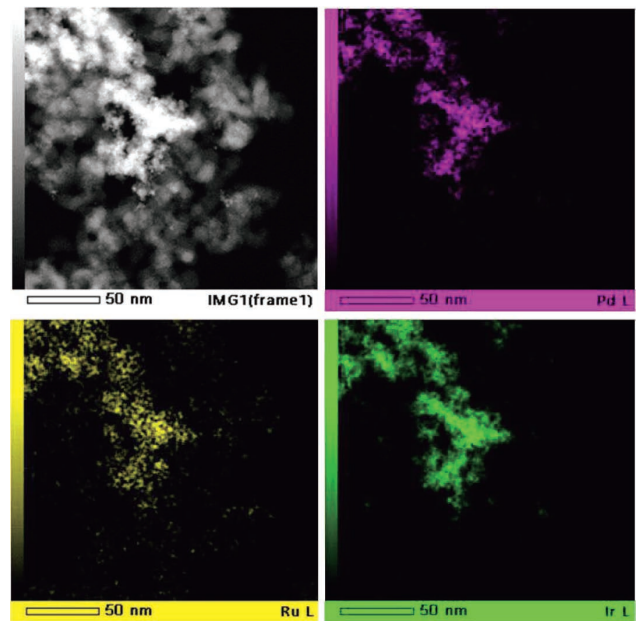


Fig. 9 Element map of catalyst powder after synthesis (visual field 1 in Fig. 8)

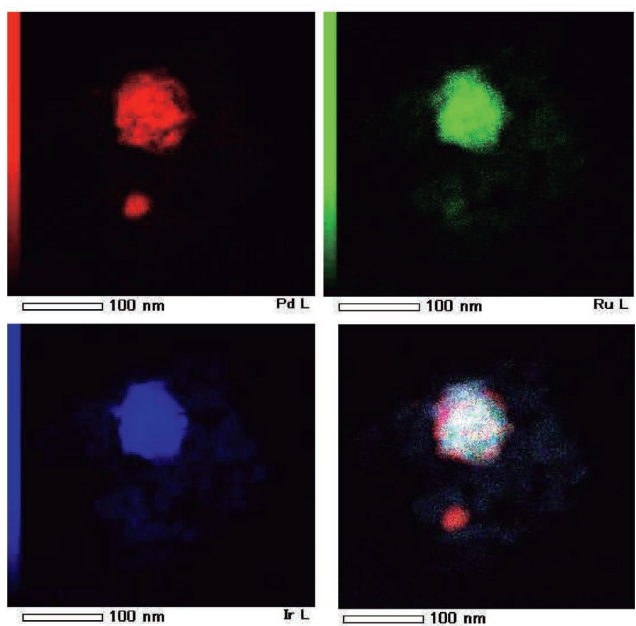
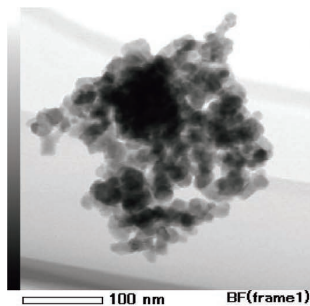


Fig. 10 Element map of alloy particles after degradation treatment

The phase separation process of the alloy particles was investigated by XRD. Figure 11 shows the XRD pattern. Data item 3 shows the diffraction pattern immediately after PdRuIr alloy loading. In addition to the CZ-derived peak, a broad peak around 40.7° is also present. In results measured by Kusada et al.^[3] using synchrotron radiation ($\lambda = 0.578980 \text{ \AA}$), the (111) phase of PdRuIr was observed close to $2\theta = 15^\circ$. When the results measured by Kusada et al. were converted to the wavelength of the CuK α rays ($\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$) used in this research, the peak around 40.7° corresponds with the (111) phase of PdRuIr. The synthesis of nanosized PdRuIr alloy can also be recognized from the X-ray diffraction pattern. Data item 4 is the catalyst powder after a 1-hour baking process at 450°C in air during the process to fabricate the specimens for emissions evaluation. The diffraction peak derived from PdRuIr disappears and a peak derived from IrO₂ appears. This result suggests that the Ir in the alloy was oxidized by the baking process, causing the PdRuIr alloy state to break down. In contrast, after emissions measurement (data item 5) and degradation treatment (data item 6), the diffraction peak around 40.7° appears again. At the same time, peaks derived from IrRu and IrPd also appeared, creating a mixed condition of PdRuIr, IrRu, and IrPd. This is considered to be the state inside the particles shown in Fig. 10.

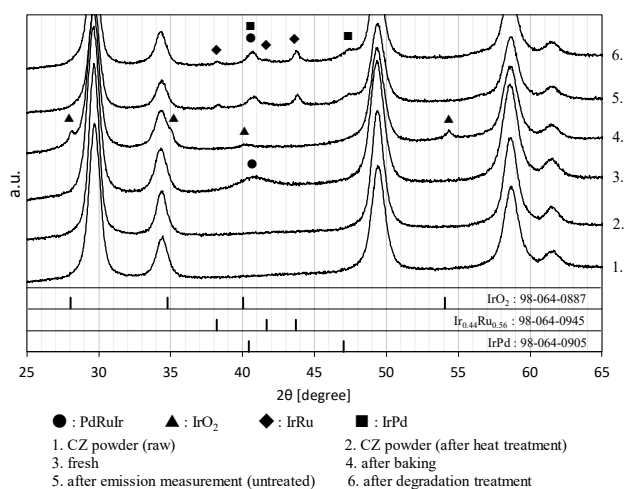


Fig. 11 X-ray diffraction pattern of catalyst powder (reference data: only peaks with an intensity ratio of 20% or higher are shown)

4 DISCUSSION

Based on the analysis results described above, the emissions purification characteristics of the PdRuIr/CZ catalyst fell due to enlargement of the CZ and alloy particles and phase separation of the alloy. The aim is to address these issues and realize practical adoption of a pseudo-rhodium alloy catalyst.

Loading the PdRuIr alloy onto the CZ support seems to facilitate a decrease in the CZ specific surface area. One possible cause of this issue is the formation of a Ru and Ir solid solution. Since oxides of Ru and Ir have a lower melting temperature than CZ, these oxides might act as sintering aids. Another possible cause is hydrothermal degradation or the like in the alloy synthesis process. Continued efforts are required to identify the causes and study countermeasures.

One of the main causes of alloy particle phase separation is thought to be changes in the crystalline structure due to the oxidation and reduction of Ir. The results of this investigation found that IrO₂ was being generated easily at a relatively low temperature of 450°C . The catalyst is exposed to higher temperature oxidizing and reduction conditions under the actual exhaust gas environment generated during riding and the degradation treatment conditions of this test. The crystalline structure of Ir undergoes major changes when it transforms to and from its oxide and metal states. These changes probably facilitate its transition to more stable IrRu and IrPd phases. It may be possible to suppress this phase separation by adopting an element that is less susceptible to oxidation than Ir, such as Pt. As Ir becomes more expensive, the switch to a lower cost element would also be a rational measure in those terms. Studies will be continued.

5 CONCLUSIONS

This paper studied the optimum composition for a PdRuIr alloy and evaluated the performance of a PdRuIr/CZ catalyst on an actual motorcycle. Although the test

confirmed that this catalyst has an excellent NO_x conversion capacity, it also identified an issue related to durability. The results verified that catalyst degradation was caused by enlargement of the CZ and alloy particles and phase separation of the alloy. One of the main cause of this phase separation is thought to be Ir oxidation.

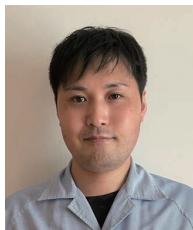
ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to express their sincere gratitude to everyone involved in this research, notably Professors Hiroshi Kitagawa and Kohei Kusada of Kyoto University, as well as Kyoto University, Furuya Metal Co., Ltd., and Sakura Kogyo Co., Ltd. for their invaluable cooperation in the manufacture and material analysis of the alloy support powder, and in carrying out the emissions measurement.

REFERENCES

- [1] Kusada, K., Kobayashi, H., Ikeda, R., Kubota, Y. et al. “Solid Solution Alloy Nanoparticles of Immiscible Pd and Ru Elements Neighboring on Rh: Changeover of the Thermodynamic Behavior for Hydrogen Storage and Enhanced CO-Oxidizing Ability”, J. Am. Chem. Soc., 136, 1864, (2014). doi: 10.1021/ja409464g.
- [2] Sato, K., Tomonaga, H., Yamamoto, T., Matsumura, S. et al. “A Synthetic Pseudo-Rh: NO_x Reduction Activity and Electronic Structure of Pd-Ru Solid-solution Alloy Nanoparticles”, Sci. Rep., 6, 28265, (2016). doi: 10.1038/srep28265.
- [3] Kusada, K., Wu, D., Nanba, Y., Koyama, M. et al. “Highly Stable and Active Solid-Solution-Alloy Three-Way Catalyst by Utilizing Configurational-Entropy Effect”, Advanced Materials, 33, 2005206, (2021). doi: 10.1002/adma.202005206.

■ 著者



茂木 卓也
Takuya Motegi
生産技術本部
材料技術部



多々良 俊哉
Shunya Tatara
生産技術本部
材料技術部



高本 駿平
Shunpei Takamoto
生産技術本部
材料技術部



土居 航介
Kosuke Doi
生産技術本部
材料技術部



Effect of Impurity Elements in Recycled Ingots on Seizure Properties of Die-cast Cylinders made of Hypereutectic Al-Si Alloy

Atsushi Owada Takaharu Suzuki

当論文は、JSAE 20239506/SAE 2023-01-1806として、SETC2023 (Small Powertrains and Energy Systems Technology Conference) にて発表され、High Quality Presentation Award を受賞したものです。

Reprinted with permission Copyright © 2023 SAE Japan and Copyright © 2023 SAE INTERNATIONAL
(Further use or distribution is not permitted without permission from SAE.)

要旨

近年、世界中でカーボンニュートラルに向けた取り組みが加速している。アルミニウム原材料においては、新地金から再生地金に置き換えることで原材料製造時に消費される電力の大幅削減が可能であり、再生地金の使用拡大がカーボンニュートラルに貢献できる手段の1つである。

本稿では、DiASil シリンダに再生地金を適用することを目的とし、再生地金に含まれる不純物元素が部品機能にどのような影響を及ぼすかを調査した。新地金と再生地金でシリンダを製造し、その焼付き特性を比較した結果、再生地金で製造したシリンダの方が劣る傾向が見られた。金属組織観察、台上試験、熱力学計算ソフトウェア等を用いて原因究明し、不純物元素の1つであるNiを含む化合物が焼付き特性に影響を及ぼす可能性を見いだした。

Abstract

In recent years, efforts to reduce CO₂ emissions (carbon neutrality) have accelerated worldwide. In the aluminum manufacturing industry, CO₂ emissions can be reduced by switching the raw materials of choice; from virgin ingots to recycled ingots. However, the possible characteristic change accompanying the usage of impurity-ridden recycled ingots severely limits its applications, which also limits its potential contribution to carbon neutrality. Determining how impurity elements present in recycled ingots can affect the function of manufactured components is a necessary first step towards expanding the usage of recycled ingots.

In this study, we aimed to apply recycled ingots to the monolithic cylinder made of hypereutectic Al-Si alloy and investigated how impurity elements in recycled ingots affect properties (especially seizure characteristic).

Die-cast cylinders using virgin and recycled ingots were manufactured and their properties were investigated. The elements that increased in the recycled ingots were Zn, Mn, and Ni. The effects of these elements on the seizure resistance were confirmed by reciprocating sliding test. In addition, we confirmed the differences in the compounds formed from metallographic observations and discussed the relationship between these compounds and seizure resistance using thermodynamic calculation software (Thermo-calc), among other methods.

1

INTRODUCTION

Aluminum is widely used in transportation equipment and other applications and contributes to improved energy efficiency and reduced CO₂ emissions at the usage stage. However, the excessive amount of energy required to manufacture virgin aluminum ingots from natural resources means a high amount of carbon footprint

during the manufacturing stage. The CO₂ emissions of recycled aluminum ingots produced from scrap are about 3% of those of virgin aluminum ingots, so expanding the use of recycled ingots can contribute to carbon neutrality^[1].

DiASil Cylinder (die-casting monolithic cylinder) is made of hypereutectic Al-Si alloy. Primary Si particles with high

hardness on the cylinder bore surface can improve resistance against seizure and wear even without cast iron sleeve, and the sleeveless design can realize excellent heat dissipation and high strength-to-weight ratio^{[2][3]}. These characteristics make it an attractive choice to use in automobile parts, like cylinder blocks for example. To realize these special characteristics, virgin ingots with few impurities are used instead of recycled ingots. However, the actual effects of impurities are currently not well understood, so clarification of these effects will lead to the expansion of use of recycled ingots.

This study aims to evaluate the difference in material property of DiASil Cylinder manufactured using virgin ingots and recycled ingots (hereafter VC and RC, respectively). We particularly focused on seizure resistance property since it is one of the most important specifications of cylinder blocks. The chemical composition of each cylinder blocks is shown in Table 1. These cylinder blocks were T5 heat treated after die-casting.

Table 1 Chemical composition of cylinder

Sample	Chemical Composition (mass%)							
	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Mn	Ni	Sn
VC	17	4.2	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
RC	17	4.3	0.4	0.8	1.0	0.5	0.5	0.1

2 EXPERIMENTAL

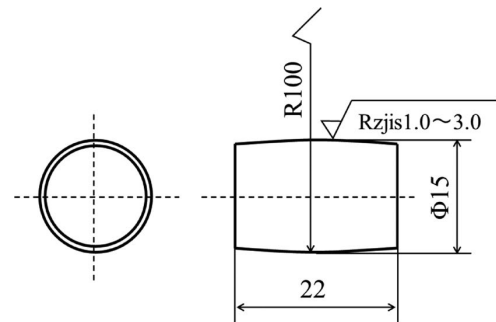
2-1. Metallography

A cross section near the cylinder bore surface was prepared and metallography was observed. To confirm the differences in intermetallic compounds in detail, analysis was also performed using FE-EPMA.

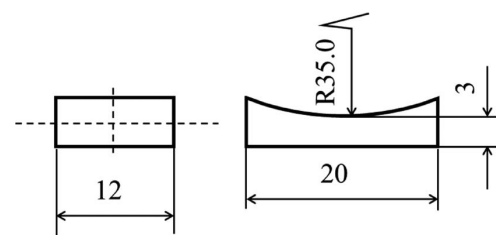
2-2. Seizure properties of VC and RC

Seizure properties were evaluated by using SRV tester from Optimol Instruments Prüftechnik GmbH. Figure 1 shows the shape of test specimens. Barrel-shaped test specimens were prepared from a continuous cast bar used for a forged piston production. This is made of Al-12mass%Si-4Cu alloy and given T7 heat treatment. On

the surface, Fe-Sn plating was treated. Cylinder test specimens were cut out of the actual cylinder as shown in Figure 2 to remain the curved shape and cross-hatched pattern.



(a) Barrel-shaped test specimen



(b) Cylinder test specimen

Fig. 1 Geometry of test specimen for SRV test

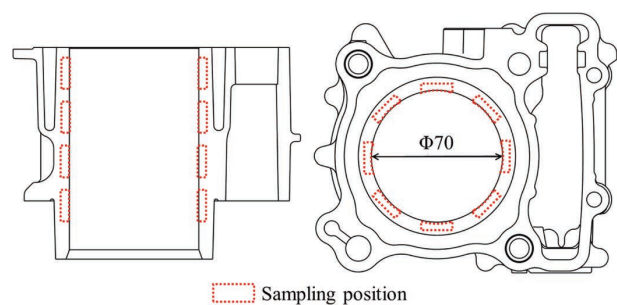


Fig. 2 Sampling position of cylinder test specimen

A schematic illustration of SRV tester and an image of each test specimen contact are shown in Figure 3 and 4. The barrel-shaped test specimen and the cylinder test specimen were installed on the upper and lower specimen holders respectively. The lower specimen holder was filled with oil enough to entirely immerse the contact area between each test specimen. The setting temperature was adjusted so that the oil temperature could be held at 150 degrees Celsius. After initially running for 60 seconds with a vertical load of 50N as a

running-in period, the load was increased to 600N to cause seizure. During the test, the vertical load, horizontal stroke, and friction coefficient were monitored by the equipped sensors. An example of the behavior of stroke and friction coefficient when seizure occurs is shown in Figure 5. Distinct peaks were observed shortly after the 60 second mark, and also around the 150 second mark. The irregular peak at 60 seconds was thought to be caused by the load being raised to 600N. The irregular peaks observed at 150 seconds was thought to be the result of mild adhesion which would eventually develop into seizure. The seizure occurrence point was considered to be the point wherein the sudden drop in stroke value to almost zero and the abrupt increase in friction coefficient was observed simultaneously. In this example, the seizure time is 163s. Detailed test conditions are summarized in Table 2. Each test was conducted 3 times. (Quality of the cylinder test specimens was assumed to be no different depending on the sampling position, and three were used at random from the test specimens in Figure 2.)

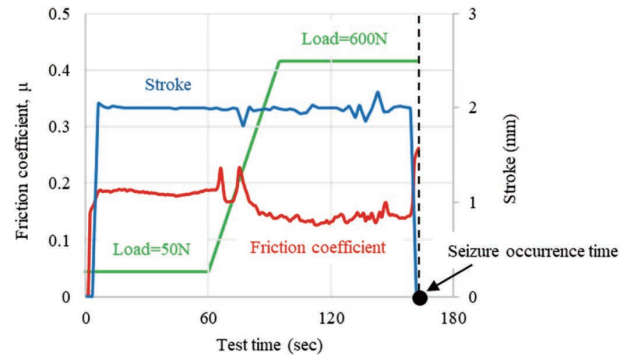


Fig. 5 An example of SRV test result

Table 2 Detailed condition of reciprocating slide test

Frequency	10Hz
Stroke	2mm
Oil	SAE 10W-40
Lubrication condition	Immersion
Oil temperature	150±5 degree Celsius
Running-in	50N, 60s
Vertical load	600N
Test duration	Until seizure (Max 1800s)

3 RESULTS AND DISCUSSION

3-1. Metallography

Figure 6 shows cross section optical microscopy images of the metallography of the VC and RC. There is no marked difference in primary Si.

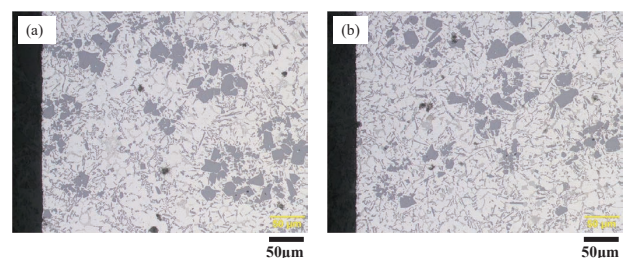


Fig. 6 Metallography of (a) VC (b) RC cross sections

Figure 7 shows the results of intermetallic compounds analysis by FE-EPMA. Two differences were observed: first is Cu-based compounds, and second is the shape of Fe-based compounds. As for the Cu compounds, it is assumed that not only Al-Cu compounds (considered CuAl_2) but also Al-Cu-Ni compounds were precipitated due to the increase of Ni in the RC. As for the shape of

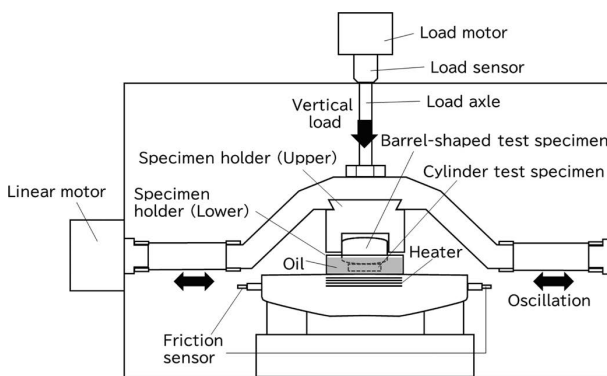


Fig. 3 Schematic illustration of SRV test

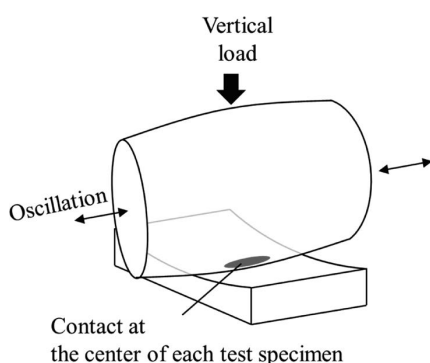


Fig. 4 Contact area between test specimens

the Fe-based compounds, needle-like morphology was observed in the VC, while a more massive shape was observed in the RC. A study conducted by Komiyama et al. reported that the needle-like compounds are thought to have changed to massive compounds due to the increase of Mn^[4], and the results of this study are similar to his findings. Although segregation of Zn contained in RC was observed, it was detected in both compound and matrix phases (no blue area), so it is safe to consider that Zn is mainly solid soluble.

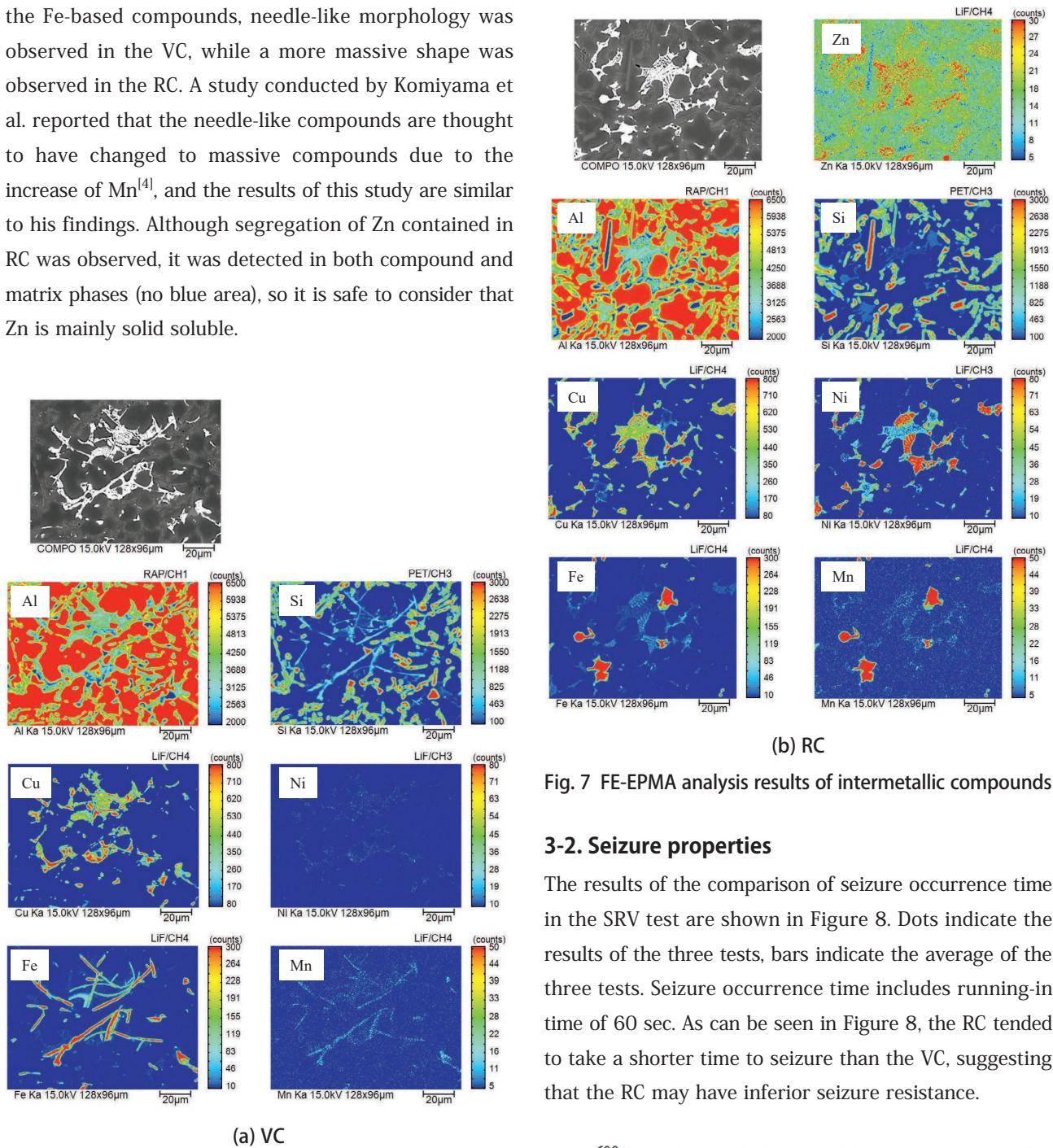


Fig. 7 FE-EPMA analysis results of intermetallic compounds

3-2. Seizure properties

The results of the comparison of seizure occurrence time in the SRV test are shown in Figure 8. Dots indicate the results of the three tests, bars indicate the average of the three tests. Seizure occurrence time includes running-in time of 60 sec. As can be seen in Figure 8, the RC tended to take a shorter time to seizure than the VC, suggesting that the RC may have inferior seizure resistance.

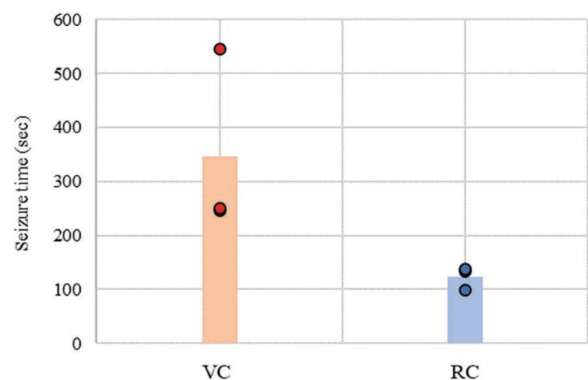


Fig. 8 Seizure occurrence time in SRV test

3-3. Investigation of the difference in seizure resistance

To investigate the cause of the difference in seizure resistance between the VC and RC, the SRV test was stopped before seizure occurred, and the surface conditions were compared. The test load was set at 400N, slightly lower than the value in Table 2, and the test was stopped 10 seconds after reaching 400N. The timing of the test stops and the behavior of the friction coefficient for each material at that time are shown in Figure 9.

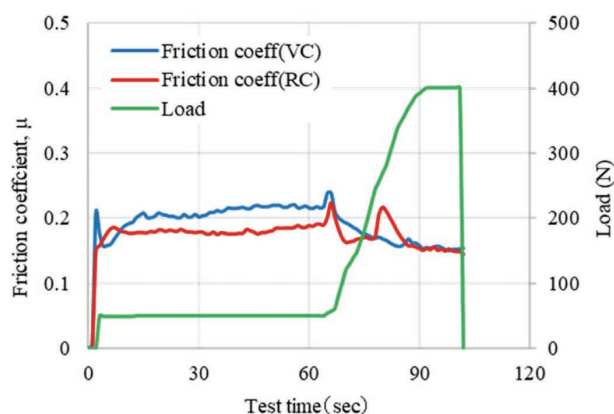


Fig. 9 Test stop timing and friction coefficient

SEM images and EDS mapping images of the surface observations of barrel-shaped specimens after the test are shown in Figure 10. Only in the RC, aluminum-based adhesions that possibly originated from the cylinder specimen was observed in the center of the sliding area. Since it can be considered that the presence of this substance affected the difference in seizure resistance, a more detailed analysis was conducted. Firstly, quantitative analysis of adhesion was performed using FE-EPMA. The results are shown in Table 3. The adhesion contains not only Al and Si from the cylinder specimen, but also a large amount of Fe and Sn (about 10 and 6 mass% respectively). In order to separate whether the large amounts of Fe and Sn detected were from in the adhesion itself or whether they originated from the plating of the barrel-shape specimen below the adhesion, depth profiling was performed using AES. Fig. 11 shows the result (elements below 5% are omitted from the graph). Focusing on the area that seems to indicate the

composition of adhesion (below in Fig. 11), the amount of Fe is quite large compared to the amount contained in the cylinder, and it is inferred that the adhesion is an alloy formed by the mixture of Al and Fe derived from the wear debris of the cylinder and barrel-shaped specimen. This suggests that the temperature of the sliding surfaces reached or was close to the melting point of the aluminum alloy.

Secondly, the results of that analysis were compared with the original composition to consider which components were affected. The results of the adhesion analysis include the components of oil residues and barrel-shaped specimens, so they cannot be simply compared as is. Therefore, the relative ratio of the amount of each elements against the amount of Al (how much is the ratio when the Al content is set to 1) were calculated before doing the comparison. Table 4 shows the results. Components that were thought to be derived from oil residues or barrel-shaped specimen were excluded from the comparison. It is indicated that the adhesion has a particularly high ratio of Cu and Ni compared to the original composition.

From the above results, the following may be considered.

- Adhesion, which are thought to affect seizure resistance, develops from melting due to heat generated by friction.
- Al-Cu-Ni compound contained only in the RC promote the formation of adhesion.

In other words, the results suggest that adhesion is generated when the material reaches near the melting point of the aluminum alloy, and the presence of Al-Cu-Ni compound may have affected the thermodynamic properties of the material.

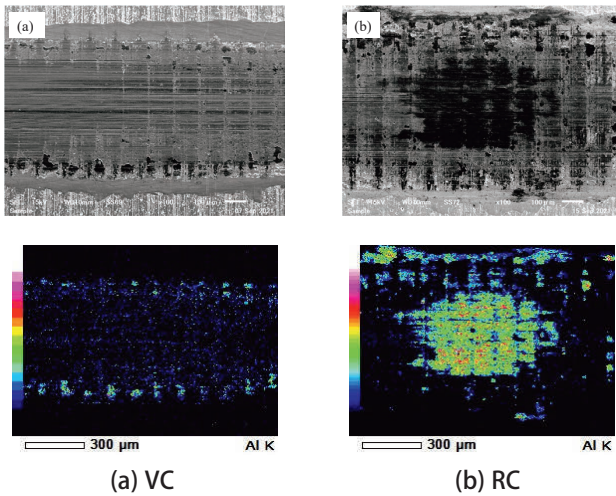


Fig. 10 Surface observation

Table 3 Chemical composition of adhesion

Al	Cu	Si	Mg	Fe	Zn	Mn
51.36	4.70	11.58	0.37	10.95	0.93	0.36
Ni	Sn	C	O	P	S	Ca
0.74	6.10	6.82	4.62	0.50	0.62	0.36

(mass%)

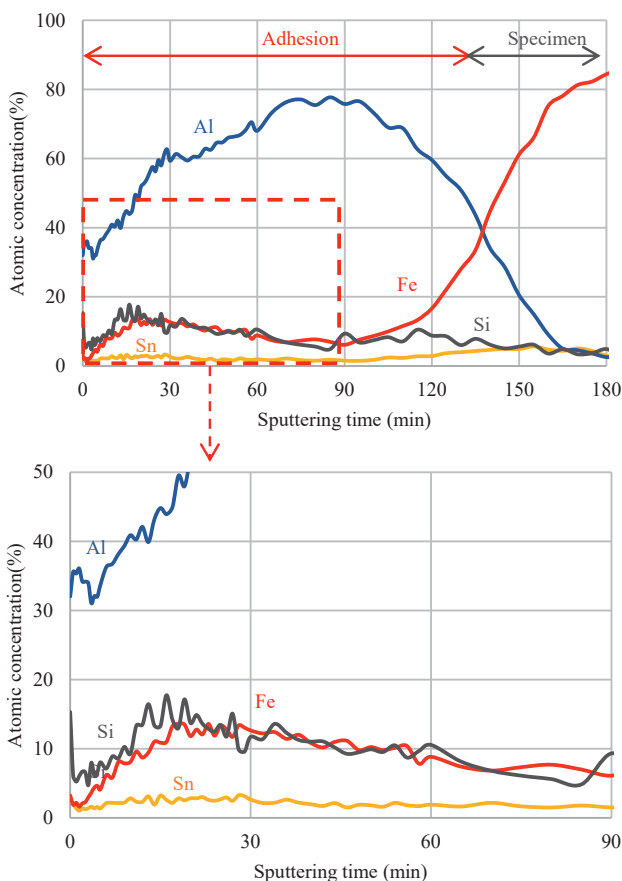


Fig. 11 Depth profile

Table 4 Comparison of adhesion and original composition

	The ratio when the Al content is set as 1 (a.u.)					
	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ni
Adhesion	0.225	0.092	0.007	0.018	0.007	0.014
Original	0.223	0.057	0.004	0.013	0.007	0.007

3-4. Discussion using thermodynamic calculation

Finally, thermodynamic calculation software (Thermo-calc) with the TCAL8 Al-alloy database was used to discuss the previous results. The compositions used in the calculations are shown in Table 1. The calculated equilibrium phase at T5 temperature for each material are shown in Table 5. The VC and RC show differences in $\text{Al}_{15}\text{Si}_2(\text{FeMn})_4$ ($=\text{Al}_{15}\text{Si}_2\text{M}_4$) and $\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Ni}$ ($=\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Ni}$), which is consistent with the differences seen in the actual observations (Figure 7). Special attention was paid to $\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Ni}$, and the changes near the melting point of the aluminum alloy were calculated. The changes in the liquid and $\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Ni}$ phases at 500-600°C are shown in Figure 12(a), (b). The $\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Ni}$ phase of the RC disappeared around 530-540°C, and the percentage of liquid phase tended to increase rapidly at the same temperature indicated by orange arrow in Fig. 12(a). Such a rapid increase in the liquid phase is not seen in the VC. The rapid increase in the liquid phase may promote the growth of larger wear debris which leads to the considerable deterioration of seizure resistance. Taken together with the previous experimental results, it is inferred that this rapid increase in the liquid phase associated with the melting of $\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Ni}$ affected the ease of adhesion generation, which may have led to the difference in the seizure resistance.

Table 5 Equilibrium phases at T5

Phase	VC	RC
FCC_A1	71.42%	69.21%
DIAMOND_A4	16.37%	16.25%
AL2CU_C16	7.83%	6.61%
AL9FE2SI2	2.98%	2.97%
Q_ALCUMGSI	1.24%	1.14%
AL15SI2M4	0.08%	1.67%
AL7CU4NI	—	1.95%

(mass%)

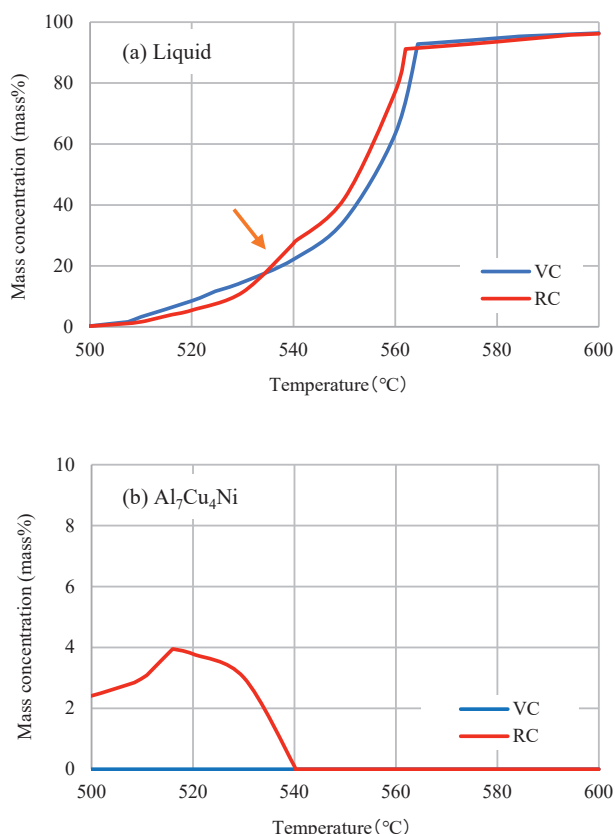


Fig. 12 The changes in (a) liquid and (b) Al_7Cu_4Ni phase

4 CONCLUSION

In this study, the effects of impurity elements in recycled ingots on seizure properties of hypereutectic Al-Si alloy were investigated. The conclusions are as follows.

1. Use of recycled ingots with high Mn and Ni content allows $Al_{15}Si_2(FeMn)_4$ and Al_7Cu_4Ni compounds to precipitate.
2. The RC may have inferior seizure resistance. Before seizure occurred, aluminum-based adhesion was observed only in the RC and this substance affected the difference in seizure resistance.
3. The adhesion is an alloy formed by the mixture of Al and Fe derived from the wear debris of the cylinder and barrel-shaped specimen and has a particularly high ratio of Cu and Ni compared to the original composition. Results of Thermo-calc calculations of the RC showed a rapid increase of percentage of liquid phase around 530-540°C due to melting of Al_7Cu_4Ni phase. Consequently, this led to the development of

adhesion, which may have affected the seizure resistance.

To apply recycled ingots to DiASil Cylinder, it is considered necessary to limit the amount of Ni to prevent the formation of Al_7Cu_4Ni .

REFERENCES

- [1] Japan Aluminum Association, "Aluminum Vision 2050," September 2020. <https://www.aluminum.or.jp/vision2050/>
- [2] H. Kurita, H. Yamagata, H. Arai and T. Nakamura, "Hypereutectic Al-20%Si alloy engine block using high pressure die-casting," SAE Technical Paper 2004-01-1028, (2004).
- [3] T. Uhara and H. Kurita, "The Effect of Surface Morphology of Cylinder Bore Surface on Anti-Scuffing Property made by High Pressure Die-Casting Process using Hyper-Eutectic Al-Si Alloy," SAE Int. J. Mater. Manf. 7(1), (2014). doi:10.4271/2013-32-9046
- [4] Y. Komiyama, K. Uchida and M. Gunshi, "Effects of Fe, Mn, Zn and Ti on mechanical properties and microstructures of Al-Si-Cu-Mg casting alloy," The Japan Institute of Light Metals, 26(1976)7, 311-319

■著者



大和田 純史
Atsushi Owada
品質保証本部
ランドモビリティ品質保証統括部
製品品質保証部



鈴木 貴晴
Takaharu Suzuki
生産技術本部
材料技術部



Hybrid Electric Two-Wheeled Vehicle Fitted with an EVT System (Electrical Variable Transmission System)

Hideki Furuta Jun Yoshida

当論文は、JSAE 20239553/SAE 2023-01-1853として、SETC2023 (Small Powertrains and Energy Systems Technology Conference) にて発表されたものです。

Reprinted with permission Copyright © 2023 SAE Japan and Copyright © 2023 SAE INTERNATIONAL
(Further use or distribution is not permitted without permission from SAE.)

要旨

近年、地球温暖化や化石燃料の枯渇、大気汚染の回避が重要視されており、二酸化炭素排出量を削減できる環境にやさしい二輪車が求められている。一方、二輪車においては、ドライブトレインの小型化・軽量化・長距離走行など、これまで通りお客さまの期待に応える必要がある。このような背景の中で、ハイブリッド電動自動車(HEV)のシステムは、環境にやさしいパワートレインを実現するための最も現実的な手段であり普及しているシステムである。

本研究では、これらの要求に応え、燃費向上と駆動系のコンパクト化を実現する全く新しい電子式トランスミッションである EVT (Electrical Variable Transmission) システムを搭載したハイブリッド電動二輪車を紹介する。EVT システムは、ステータ内に取り付けられたダブルローターのセットで構成されている。EVT システムを搭載したハイブリッド電動二輪車は、純電動自動車としての電動駆動機能と回生制動機能、エンジン発電機としての内燃機開始動機能と発電機能、それらを統合制御によって組み合わせた発電と駆動を含むハイブリッド電動機能を備えている。また、EVT システムは、ブーストアクセルレーション機能やダブルローターの直結機能を実現できるため、従来のバイクに対して幅広いメリットと独自の新しい価値を提供することが可能である。

筆者らは、この独自の電動トランスミッション EVT を搭載したハイブリッド電動二輪車のプロトタイプを開発した。

本稿では二輪車に対して検討を行い、ハイブリッドトポロジー、EVT の多彩な機能、EVT の動作原理、EVT と二輪車のレイアウト構成、試作 EVT マシン紹介、EVT パワートレインハイブリッド制御戦略、ハイブリッドパワートレイン開発環境、ハイブリッド電動二輪車の性能測定結果、ハイブリッド電動二輪車の可能性について考察する。

Abstract

In recent years, global warming, depletion of fossil fuels, and reducing pollution have become increasingly prominent issues, resulting in demand for environmentally-friendly two-wheeled vehicles capable of reducing CO2 emissions. However, it remains necessary to meet customers' expectations by providing smaller drivetrains, lighter vehicles, and support for long-distance riding, among other characteristics. In the face of this situation, hybrid electric vehicle (HEV) systems are considered to be the most realistic method for creating environmentally-friendly powertrains and are widely used.

This research introduces a hybrid electric two-wheeled vehicle fitted with an electrical variable transmission (EVT) system, a completely new type of electrical transmission that meets the aforementioned needs, achieving enhanced fuel efficiency with a compact drivetrain. The EVT system comprises double rotors installed inside the stator. The hybrid electric two-wheeled vehicle equipped with the EVT system has the electric drive and regenerative braking functions of a fully electric vehicle, internal combustion start and power generation functions as an engine generator, and hybrid power generation functions, including combined power generation and drive through integrated control. The EVT system also provides boost acceleration functions and direct double rotor connection functions, offering wide-ranging advantages compared to conventional motorcycles and enabling the provision of new types of distinctive value.

The authors developed a prototype hybrid electric two-wheeled vehicle fitted with this unique EVT electrical transmission. This article considers its qualities compared to other two-wheeled vehicles and describes the hybrid topology, the various functions of the EVT, the working principle of the EVT, the EVT configuration and the two-wheeled vehicle configuration, the prototype EVT machine, the EVT powertrain hybrid control strategy, the hybrid powertrain development environment, the results of hybrid electric two-wheeled vehicle performance measurements and the possibilities presented by hybrid electric two-wheeled vehicles.

1 INTRODUCTION

In recent years, global warming and the depletion of fossil fuels have seen growing interest in sustainable, pollution-free vehicles. Based on agreements such as those at the UN Climate Change Conference (COP), regulations to reduce CO₂ emissions are gathering pace and research and development into environmental and fuel-efficient technologies that can satisfy future automobile and two-wheeled vehicle fuel efficiency regulations is taking place around the world. In terms of four-wheeled automobiles, electric and hybrid electric vehicles are known to be effective ways to accomplish these tasks. Similarly, improving energy conversion efficiency is also considered important in the case of smaller-scale mobility, as typified by two-wheeled vehicles.

The authors carried out research and development on a hybrid electric two-wheeled vehicle capable of addressing three existing customer needs, ensuring sufficient riding distance, alleviating the inconvenience of insufficient charging infrastructure and reducing the high cost of batteries. The authors aimed for high fuel efficiency targets in order to achieve significant improvements in fuel efficiency relative to conventional two-wheeled vehicles, compared to those achieved with two-wheeled vehicles equipped only with conventional ICEs.

Systems equipped only with conventional ICEs require a trade-off in terms of reduced acceleration and maneuverability in order to achieve high fuel efficiency targets. The authors carried out research and development on a new powertrain capable of resolving this trade-off.

In general, fully electric two-wheeled vehicles are often fitted with expensive batteries, thereby increasing the cost of the vehicle. Hybrid electric vehicles, on the other hand, offer a means of propulsion that can lower end user costs compared to fully electric vehicles because they minimize use of expensive batteries. However, this tends to increase costs compared to vehicles equipped

only with conventional ICE. Hybrid powertrain units used in standard four-wheeled vehicles up to this point have tended to be expensive and lead to increases in size and weight. Against this background, the fitting of relatively low-cost hybrid electric powertrains to two-wheeled vehicles was challenging. The authors have developed a completely new hybrid system that can be fitted on vehicles from small scooters to two-wheeled vehicles and surpasses the structure, configuration, functions, and performance of conventional hybrid systems, together with a new hybrid electric two-wheeled vehicle fitted with this system. The hybrid electric two-wheeled vehicle in this research can achieve both low fuel consumption and provide new sensations, such as quietness and acceleration unique to electric vehicles, compared to conventional vehicles fitted with ICEs.

The authors selected a 125 cc scooter as the subject for research and development.

One reason for this selection was that, when taken as a whole, the large scale of global production makes it a vehicle category connected to a large quantity of carbon dioxide emissions. This is illustrated by the fact that 5 kW to 15 kW (100 to 200 cc) scooters account for a large proportion of the total number of two-wheeled vehicles produced worldwide. As a result, significantly reducing carbon dioxide emissions in this vehicle category has the potential to have a major impact on future global warming.

Another reason behind the vehicle selection was that installing hybrid system parts in the limited space available on a small scooter provided an opportunity to gain an understanding of the potential of EVT systems in terms of being compact and lightweight. The construction of hybrid systems requires additional components, such as drive motors, generators, inverters, and lithium-ion batteries. The authors believed that installing a hybrid system on a small scooter with a limited mounting space with the aim of creating an innovative powertrain had the potential to enable mitigation of global warming in a wide range of two-wheeled vehicle categories.

Innovative compact, lightweight hybrid systems also have the potential for future application in marine, agricultural, and general-purpose equipment in addition to two-wheeled vehicles, supporting further efforts to reduce global warming.

The base scooter and ICE specifications of the 125 cc scooter that is the subject of this research are shown in Figure 1.

For the ICE, a unit-swing type powertrain equipped with a mass-produced 125 cc forced air-cooled single-cylinder ICE was used.

Length (mm)	Width (mm)	height (mm)	WheelBase (mm)	Vehicle weight (kg)	Engine type	cylinder array	Cooling method
1820	685	1145	1280	99	4stroke	Single	air cooling
Displacement (cc)	Bore (mm)	Stroke (mm)	Compression ratio	Max Power (kW)	Max Torque (Nm)	Max Speed (rpm)	Fuel tank (L)
124	52.4	57.9	11	5.7 (6500rpm)	9.4 (5000rpm)	7500rpm	4.4

Fig. 1 Base Scooter and ICE Specifications Used for Research

2 TWO-WHEELED VEHICLE AND HYBRID TOPOLOGIES

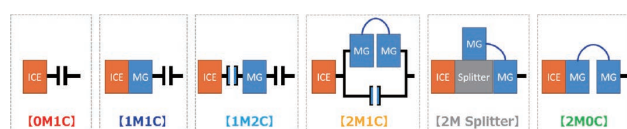


Fig. 2 Hybrid System Topologies
(0M1C: BASE, ICE: Engine, MG: Motor Generator, M: Traction Motor, C: Clutch, Splitter: Power Splitter)

As shown in Figure 2, there are generally three topologies of hybrid system. These topologies are: series topologies (2M0C: series hybrids), parallel topologies (1M1C, 1M2C: parallel hybrids), and series/parallel topologies (2M1C: series/parallel switchable hybrids, 2M Splitter: power split type with mechanical planetary gear set). Through previous research and development, it is known that series/parallel topologies generally achieve the lowest fuel consumption rate over a wide range of speeds. In addition, series topology hybrids enable independent drivetrain and ICE operation because they

are not subject to motion condition restrictions related to mechanical shaft fastening structures. As a result, the ICE can operate at the most efficient operating points, thereby increasing drivetrain efficiency.

The authors carried out research and development on a hybrid powertrain with the objective of creating a two-wheeled vehicle that consumes as little fuel as possible. A desk study was conducted by applying the three aforementioned topologies to five notable types of hybrid system that have been put into practical use in the automobile market. Specifically, fuel consumption rates were examined in World Motorcycle Test Cycle (WMTC) mode, which is used as an international standard for motorcycles and includes elements such as starting, accelerating and stopping, and desk studies covering cost, vehicle weight with the system equipped and fuel consumption during high-speed riding were carried out.

Cost, in particular, is a crucial element in enabling more users to enjoy the same performance and excitement found with previous two-wheeled vehicles. The price of lithium batteries continues to rise, meaning that fitting a battery significantly increases costs. Two-wheeled vehicles equipped with hybrid systems minimize costs compared to fully battery-powered two-wheeled vehicles, however, they have the side effect of emitting greenhouse gases. At the same time, hybrid electric two-wheeled vehicles can have significantly smaller battery packs than fully battery-powered two-wheeled vehicles. In other words, hybrid electric two-wheeled vehicles can be expected to offer the market a lower-cost option compared to fully battery-powered two-wheeled vehicles. Furthermore, two-wheeled vehicles equipped with hybrid systems are significantly more efficient than conventional two-wheeled vehicles because they can operate in both a fully electric mode and a regenerative mode using the drive motor.

In addition, vehicle weight with the system equipped is a crucial design element that affects operability by a human driver because two-wheeled vehicles maneuver by tilting left and right. Operational input by shifting body

weight is generally a characteristic of two-wheeled vehicles. Unnecessarily increasing the weight of a two-wheeled vehicle must therefore be avoided wherever possible because of the impact it has on convenience, the joy of riding, and human-machine sensibility (technology that creates joy and excitement for people by integrating people and machines on a high level). The left-right and front-rear balance is also important in two-wheeled vehicles because it is closely related to steering stability. For this reason, hybrid systems that are as small and light as possible are desirable.

Fuel efficiency during high-speed riding is an important element for two-wheeled vehicles because it is required when they are used as a means of transportation between cities and for long-distance touring. In addition, because two-wheeled vehicles are used to travel long distances, there is also strong demand for long cruising ranges. Unlike fully electric two-wheeled vehicles, two-wheeled vehicles with hybrid systems charge the battery while driving, providing the significant advantage of making it possible to minimize time lost due to charging when compared to fully electric vehicles.

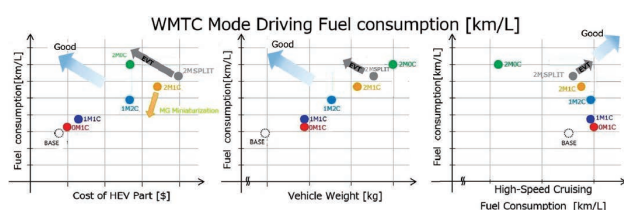


Fig. 3 Results of Study on Hybrid Topologies in Hybrid Electric Two-wheeled Vehicles

The authors carried out evaluation on the base-specification scooter through numerical calculation and carried out a desk study on the feasibility of hybrid systems.

As a result, the characteristics of each hybrid topology were clarified as shown in Figure 3. The findings shown in Figure 3 are as follows. The 1M1C (cell dynamo-type mild hybrid electric two-wheeled vehicle) currently on the market is a direct evolution from a two-wheeled vehicle equipped with ICE only and, while it offers excellent cost

effectiveness, there is a limit to improvements in fuel efficiency. The 2MOC (series hybrid) can be considered an extremely effective hybrid system for two-wheeled vehicles, especially because it excels in terms of mode fuel efficiency. This is because the cost is lower than that of 1M2C/2M1C/2M power splits and fuel consumption during mode riding is low. In addition, 2MOC has a simpler structure than 1M2C/2M1C/2M power splits, and the generator and drive motor systems are completely independent. For this reason, there is a strong possibility that it will be possible to use rear wheel drive systems with battery-powered electric two-wheeled vehicles in the future. However, proceeding with the study while optimizing component specifications using numerical calculation modeling showed that it was challenging to improve fuel efficiency during high-speed driving with this system. Two-wheeled vehicle ICEs are generally of a high-speed specification, and the rotation speed of the generator motor and drive motor reaches 6,000 to 10,000 rpm, or more, during high-speed riding. This is because, in this high rotational speed region, a field-weakening current (I_d) must be applied to the generator motor and drive motor. Due to this field-weakening current, it was found that copper loss and iron loss at high rotational speed reduce powertrain efficiency. While 2MOC has disadvantages, if it is applied to two-wheeled vehicles with sufficient understanding of this loss generation in high-speed regions, it can be considered a hybrid system with benefits that merit consideration of future development.

When similar studies were conducted on the other topologies, 1M2C was found to have the same cost as 2MOC, but without excellent mode fuel economy. However, the high-speed fuel consumption is excellent. 2M1C is upward compatible with 1M2C, but has higher costs than 1M2C. Of these, 2M Splitter (power split) was found to be upward compatible with 2M1C and achieve higher performance. However, 2M power splits use planetary gears, making them more expensive and heavier than 2M1C for two-wheeled vehicles.

As described above, the authors carried out a desk

feasibility study, and concluded that the two specifications shown below are appropriate for hybrid electric two-wheeled vehicles.

- 2MOC is compatible with fully-electric vehicles, making it effective and giving it high future potential.
- 2M power splits and 2M1C have overall upward compatibility and high drivetrain efficiency, making them suitable for two-wheeled vehicles.

In this research and development, powertrain efficiency was given highest priority, and the 2M Splitter (power split), was selected. In addition, an EVT system that does not use a mechanical planetary gearset was selected for the 2M Splitter (power split). It was determined that EVT systems have room for growth in terms of improved fuel efficiency, cost reduction, and weight reduction in relation to hybrid electric two-wheeled vehicles.

Eliminating mechanical planetary gearsets enables EVTs to reduce costs and weight compared to 2M Splitters (power distribution) with mechanical planetary gearsets. Mechanical friction is also reduced because EVT power uses magnetic coupling for transmission. In addition, as is explained in the section on EVT operating principles, iron loss during operation is also reduced, resulting in unparalleled high transmission efficiency in the powertrain. In the feasibility confirmation performed by the authors, it was determined that EVTs are an extremely effective hybrid powertrain system for hybrid electric two-wheeled vehicles, and the authors proceeded to production.

The authors determined that 2MOC was also effective, and carried out production following evaluation. 2MOC is a series hybrid system. It was selected because it is compatible with fully electric two-wheeled vehicles and drive motors, and can be expected to have possible applications in a wide range of categories and industrial fields.

This paper principally contains explanations of the unique EVT system and comparisons of vehicle

performance against series hybrids. Fuel efficiency was a particularly important point of comparison.

3 EVT FUNCTIONS ON TWO-WHEELED VEHICLES

The electrical variable transmission (EVT) configuration used as the powertrain system in the hybrid electric two-wheeled vehicle in the course of this research and development is shown in Figure 4.

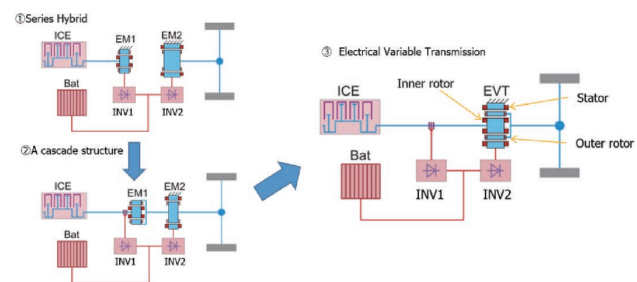


Fig. 4 Electrical Variable Transmission (EVT) Configuration and Explanation

Between 2004 and 2010, M.J. Hoeijmakers (Delft University of Technology) and Salem Mourad (TNO, Business Unit Automotive) conducted basic research on the working principle and structure of EVTs, and methods for implementation in vehicles. The basic principles of EVT are not described in detail in this paper. The principles of EVT technology are described in cited references ([1], [2] and [3]). In terms of technology to improve EVT efficiency, M.J. Hoeijmakers is known to have a patent (WO2012/018253 A1 Title: Rotating Electromechanical Converter (09.02.2012)) whereby a DC winding wire is mounted on the outer rotor in order to improve the efficiency and flexibility of the power split machine. (See Fig. 6 for information regarding the DC winding.)

Figure 4 is commonly used in understanding the operating principles of EVT. Figure 4-① shows a series hybrid. Figure 4-② shows a cascade structure. Figure 4-② has a structure whereby the outer part (EM1) and the inner part (EM2) from Figure 4-① are cascaded. Figure 4-③ shows an EVT. Figure 4-③ has a structure that integrates the outer part (EM1) and inner part (EM2) of

Figure 4-②. Understanding Figure 4-①, ② and ③ in sequence leads to an understanding of the rationality and simplicity of the EVT structure. In this research, the authors shall proceed to provide an explanation based on the aforementioned research results. The EVT includes a set of double rotors mounted inside the stator, as shown in Figure 4-③ and Figure 6. In addition to functioning as a normal electric traction motor, it also functions as a power splitter and can transmit mechanical power while changing speed as a continuously variable transmission from when the vehicle is stopped. The EVT is a power-split hybrid powertrain that does not have a mechanical gear train. Hybrid functions that can be achieved with EVTs are shown in Figure 5.

Figure 5-① shows how power splitting of engine torque can be performed as a continuously variable transmission. Figure 5-② shows how engine power can be transmitted as a clutch using magnetic couplings. Figure 5-③ shows that boost is possible during acceleration. This also means thermal efficiency can be improved by using a low-output ICE to increase the load factor, and the lack of output from a small ICE can be compensated for. Figure 5-④ shows functions as an engine generator. Driving energy can also be recovered, improving powertrain efficiency compared to current ICEs. The strength of deceleration can also be set to fit the user's preference by controlling the regenerative power, enabling the provision of new value. Figure 5-⑤ shows that fully-electric driving without emitting exhaust gas can be achieved. In other words, the brake specific fuel consumption (BSFC) of the engine is high and the engine can be stopped completely in low efficiency regions. Figure 5-⑥ shows that reverse motion is possible. This offers new value compared to conventional two-wheeled vehicles. Figure 5-⑦ shows that the engine can be reliably started. Figure 5-⑧ shows the richness of the EVTs functions, and shows that, even if the battery SOC drops, reversing is possible by using the ICE power.

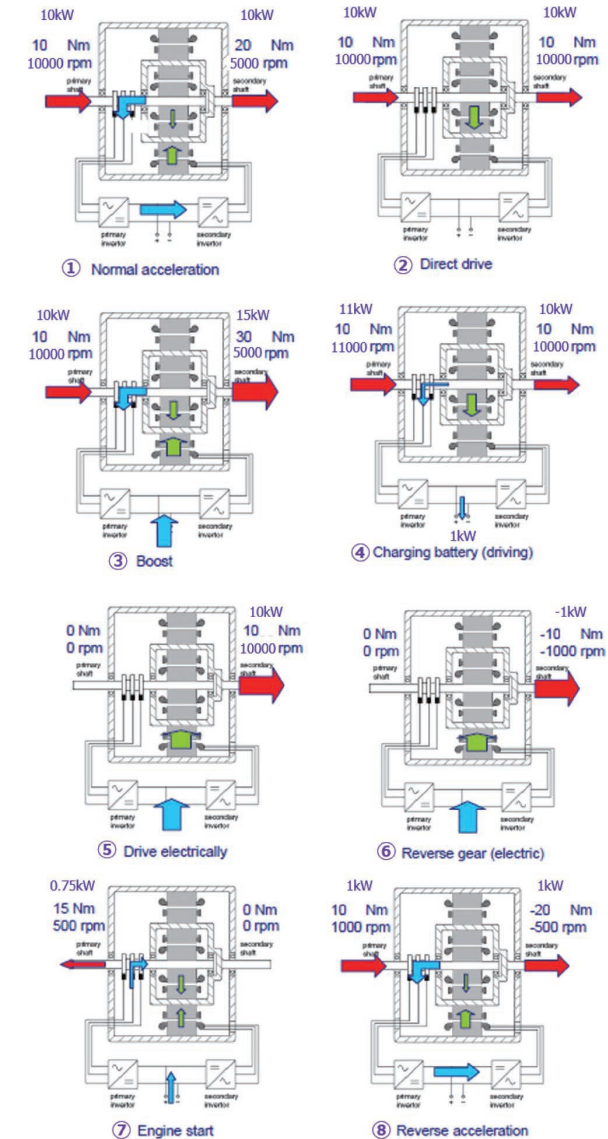


Fig. 5 EVT Hybrid Functions

4 WORKING PRINCIPLE OF PROTOTYPE EVT

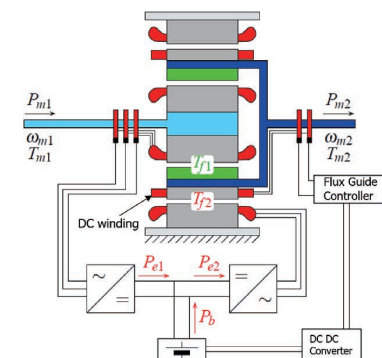


Fig. 6 Detailed Structural Diagram of Prototype EVT
(A configuration with a DC winding on the outer rotor section has been adopted in order to improve efficiency compared to the EVT shown in Figure 4-③.)

The EVT structure is shown in Figure 6. Inside the air gap inside the EVT machine, there is an inner rotor with three-phase windings, which can create a rotating magnetic field. This can be generated through the mutual relationship through the electrical (AC current) and the mechanical. Next, the mechanical rotational speed of the inner rotor is added as the electrical angular velocity of the AC current. The permanent magnet tries to follow this rotating magnetic field, and the outer rotor begins to rotate. The angle between the magnetic axis of the rotating magnetic field of the inner rotor and the magnetic axis of the permanent magnet should be kept constant, and the torque between the inner rotor and the outer rotor should be the sine of that angle (normal permanent magnet electric motor operation). The torque of this air gap acts on the outer rotor (output shaft) and the inner rotor (input shaft) in the opposite direction. The same can also be said of the outer air gap. In that case, a rotating magnetic field is generated by the stator. The rotational speed can only be controlled by controlling the stator current frequency.

The following section contains a description of the EVT magnetic circuit design. The magnetic field lines of the EVT can be seen in Figure 7. Here, there is no electrical current in the EVT. The magnetic flux lines are generated by a permanent magnet (56a in Figure 7). The inner rotor has high magnetic flux density, and a large number of magnetic field lines can be seen in a small area. In the stator, the low number of magnetic flux lines indicates low magnetic flux density. The latter is because most of the magnetic flux generated by the permanent magnet flows from one pole of the magnet to the other pole of the other magnet through the iron of the outer rotor (in area 62 of Figure 7, the magnetic flux density appears low based on the plot, but is actually extremely high).

In EVTs, DC winding wires are wound on the outside of the outer rotor to improve their efficiency. (The DC winding on the outer rotor section is shown at 60a in Figure 7.) When this DC winding (field coil 60a in Figure 7) is used and an appropriate current is applied through flux guide control (see Figure 8), the magnetic flux flowing through area 62 in Figure 8 instead goes through the stator.

This makes it possible to control the magnetic circuit route in the EVT magnetic circuit and the extent of the magnetic flux of the permanent magnet. This can be used to try and improve efficiency. The following section explains why EVT is suitable for use in hybrid electric two-wheeled vehicles, with reference to the aforementioned EVT magnetic circuit design concept.

Internal combustion engines (ICEs) are attached to the inner rotor and the wheels are attached to the outer rotor. The flux guide control through the DC winding (field coil 60a in Figure 7) described above plays a functional role in that it helps to minimize loss. A significant amount of the loss in electric motors comes from copper loss (related to the required current/amount of torque) and iron loss (related to speed).

The speed of a vehicle while driving at the vehicle's typical cruising speed or on the highway can be considered to be constant. The ICE normally supplies mechanical shaft power to the vehicle and provides rotation (during long-distance driving, etc.) Through design with an appropriate gear ratio between the vehicle powertrain and the EVT, the ICE rotational speed (the inner rotor rotational speed) can be matched to the rotational speed of the outer rotor, which is rotated through the gear train from the wheel speed. (The inner rotor and outer rotor can maintain the same speed relative to the typical cruising speed of the vehicle.)

Because the rotational speeds of the inner and outer rotors are the same, the frequency of the magnetic field in the inner rotor must be zero in order to maintain a constant angle between the magnetic axis of the permanent magnet and the magnetic field generated by the three-phase winding.

$$P_{copper} = I^2 R = f(T, B)$$

$$P_{iron} = f(\omega, B)$$

This means that the iron loss in the inner rotor is low. (The rotation speed ω in the formula is low.) Torque for driving the vehicle is transmitted from the inner rotor to the outer rotor. Due to the high magnetic field density in

the inner air gap (high magnetic flux density B in the formula), it is easy to generate torque to drive the wheels between the outer and inner rotors. This can be done at relatively low currents (three-phase winding of the inner rotor), resulting in low copper loss in the inner rotor. The field frequency of the stator is high, but the field strength is extremely low, meaning that the iron loss of the stator is also low. No drive torque is supplied to the outer rotor from the stator. For this reason, there is no copper loss in the stator. In this mode, loss is extremely low when the vehicle is traveling at a constant speed.

When the vehicle needs to be accelerated (when the vehicle speed is high or low), a (relatively small) current can be applied through the DC winding wire of the outer rotor to create a high-density magnetic field in the outer air gap. In such cases, high torque from the stator can act on the outer rotor. The speed also causes the electric field intensity of the stator to increase, temporarily increasing the iron loss. Because significant transient acceleration usually occurs while the vehicle is in motion, these short-time energy losses are not noticeable over the entire time that the vehicle is driven. The principle described above is the underlying reason why this concept is a highly-efficient CVT.

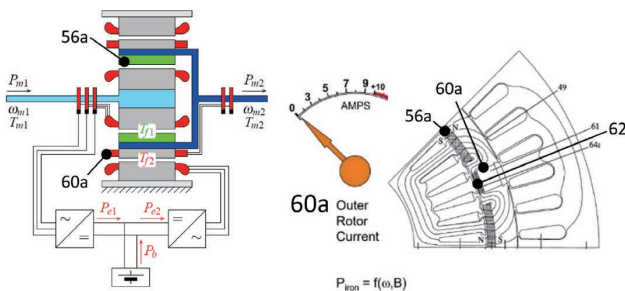


Fig. 7 Cross section of EVT and Magnetic Field Lines
(DC Winding Current of 0 A)

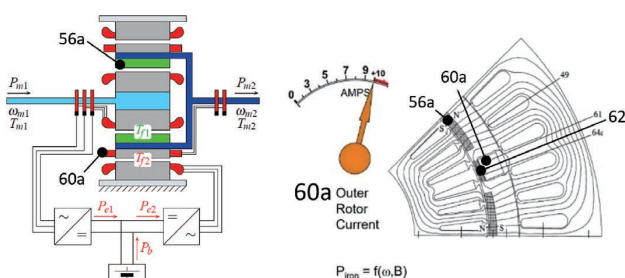


Fig. 8 Cross section of EVT and Magnetic Field Lines
(DC Winding Current of 10 A)

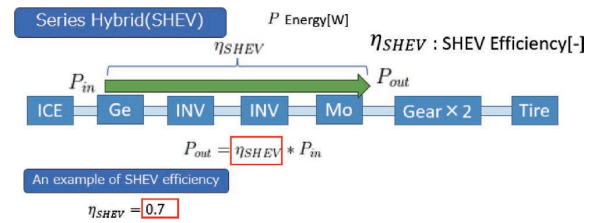


Fig. 9 Path of Power Input from Crankshaft to Series Hybrid (SHEV) System

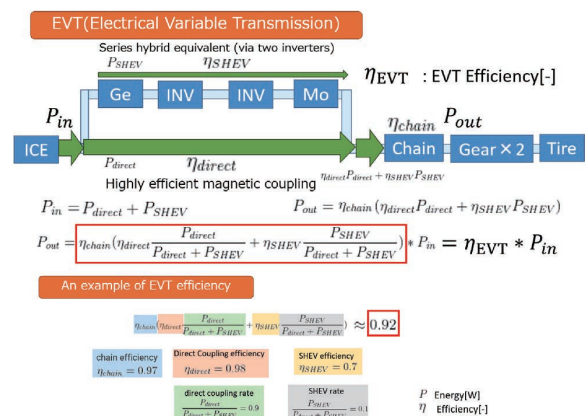


Fig. 10 Path of Power Input from Crankshaft to EVT System

The power path in the series hybrid (SHEV) is shown in Figure 9. The SHEV drives tires via an ICE, a generator, a generator inverter, a drive motor inverter, a drive motor, and gears. If the efficiency in this process is η_{SHEV} , then P_{out} (output energy) is equal to η_{SHEV} multiplied by P_{in} (input energy).

The power path of the EVT is shown in Figure 10. The power input to the EVT from the EVT crankshaft is transmitted to the output shaft through two paths. One is the direct path that rotates the outer rotor through the magnetic flux generated from the inner rotor. The other is the electrical path, which is transmitted to the stator through the inverter and rotates the outer rotor with the electromagnetic force generated from the stator winding. The latter is less efficient due to the intermediary power conversion. In theory, the closer the input rotational speed and the output rotational speed are, the more dominant the direct power flow through the first path becomes, increasing efficiency. Accordingly, the setting of the point where the input and output rotation speeds synchronize is an extremely important consideration.

In the EVT, the input energy, P_{in} , from the ICE is split into a direct path, P_{direct} , and a path via the SHEV, P_{SHEV} . If the respective efficiencies are η_{direct} and η_{SHEV} , then the energy after merging is obtained by adding η_{direct} multiplied by P_{direct} to η_{SHEV} multiplied by P_{SHEV} .

In this report, the authors adopted the mechanical structure shown in Figure 16, so when the result is multiplied by the chain efficiency, the output energy, P_{out} , is obtained as shown in the formula in Figure 10.

Arranging these two formulas results in the formula at the bottom of Figure 10, where the red frame indicates the respective efficiencies.

For example, as shown in Figure 29, when the vehicle is running at a speed of 70 km/h, the efficiency of the SHEV is about 0.7.

With regards to EVT efficiency, if a chain efficiency of 0.97, direct coupling efficiency of 0.98, direct coupling rate of 0.9, SHEV efficiency of 0.7 and SHEV rate of 0.1 are used as general values, the EVT efficiency will be about 0.92.

This is why the EVT is so efficient.

In the vehicle that is the subject of this research, the extremely high transmission efficiency in a wide range of driving regions that characterizes the EVT system was achieved through comprehensive consideration of the electrical and mechanical design, and optimizing the design in consideration of the vehicle drive system as a whole.

5 INTRODUCTION OF EVT MACHINE FOR TWO-WHEELED VEHICLES

An external view of the EVT machine is shown in Figure 11.

In order to achieve the side-mounted EVT layout for the two-wheeled vehicle EVT powertrain shown in Chapter 6, the EVT machine was given an extremely thin, disc-like design. In addition, because the EVT comprises a two-

rotor structure, a cantilever bearing structure was adopted for the outer rotor. In order to supply power to the DC winding section of the outer rotor and the three-phase winding section of the inner rotor, a new technology whereby a slip ring is placed inside the inner rotor was developed. For the bearing structure, a new single-sided bearing structure that ensures durability against engine vibration was designed.



Fig. 11 EVT Machine (An angle sensor is visible in the center of the cylinder side, but this may be eliminated to achieve a sensorless design.)

Components associated with the EVT system, such as the inverter and battery system, were specially designed. Air cooling was used to cool the EVT machine, and a dynamic thermal model was created in advance to establish specifications appropriate for the vehicle in terms of aspects such as thermal design. Specifically, a heat management system that can fully withstand the challenging thermal conditions of uphill driving with two riders was achieved. Electromagnetic field analysis using the finite element method was also carried out in order to realize the performance of the EVT machine.

This section presents the results of single unit performance tests using the EVT.

Based on the references used for this paper, in an EVT system, varying the DC winding (field coil) current depending on the vehicle's driving state can be used to achieve points of high-efficiency operation. The variable characteristics of each rotor constant depending on the winding (field coil) current are shown below.

The counter electromotive force characteristics of the inner rotor in the prototype are shown in Figure 12.

The horizontal axis indicates the DC winding (field coil) current, and the vertical axis indicates the counter electromotive force of the inner rotor.

This shows that the counter electromotive force is being varied and controlled by the field coil current from the DC winding (field coil).

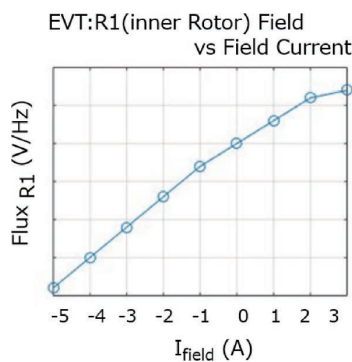


Fig. 12 Counter Electromotive Force Characteristics of Inner Rotor

The counter electromotive force characteristics of the stator are shown in Figure 13.

The horizontal axis indicates the DC winding (field coil) current, and the vertical axis indicates the counter electromotive force of the stator.

The counter electromotive force is being controlled by the field coil current from the DC winding (field coil).

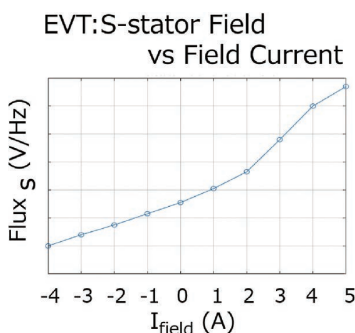


Fig. 13 Counter Electromotive Force Characteristics of Stator

The TPA (torque constant: torque per ampere) of the outer air gap is shown in Figure 14.

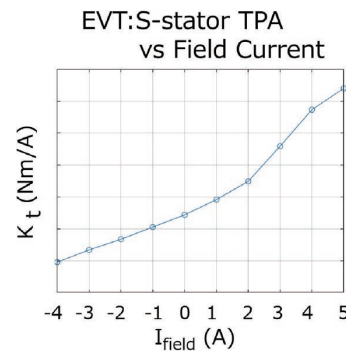


Fig. 14 Torque Constant Characteristics of Stator

For the main electrical components, based on the results of an on-desk configuration study, the authors designed and defined specifications that would maximize energy conversion efficiency in advance, then determined the motor drive method and switching elements that would maximize efficiency and carried out prototyping. In the EVT system, because driving force is transmitted from the inner rotor to the outer rotor through a magnetic path, the load on the inverter is reduced to approximately 2/3 that of series hybrids (2M0C). This is another respect in which the EVT can be considered a more efficient system than series hybrids. As a result, because the heat generation of the inverter is also reduced, the inverter can be made more compact.

6

CONFIGURATION OF EVT POWERTRAIN FOR TWO-WHEELED VEHICLES

The authors created several feasibility study examples of ICE, EVT, reducer, and power transmission layout (chain, etc.) configurations that can be mounted on a two-wheeled vehicle.

Simple diagrams of EVTs that can be fitted to a two-wheeled vehicle are shown in Figure 15. A, B and C are layouts in which the ICE and EVT are connected directly. This side-mounted EVT layout has the advantage of locating the EVT on the crankshaft, enabling the reduction between the ICE and the EVT to be omitted. Not only does this reduce costs, it also eliminates the mechanical loss associated with this reduction.

In types A and B, the drive chain is positioned on the left side of the vehicle. The difference between A and B is the final reducer.

Layout C features a reduction (chain line) on the outer periphery of the section connecting to the ICE and EVT. This has the advantage of achieving the most compact width among A, B and C, typical layouts with high transmission efficiency.

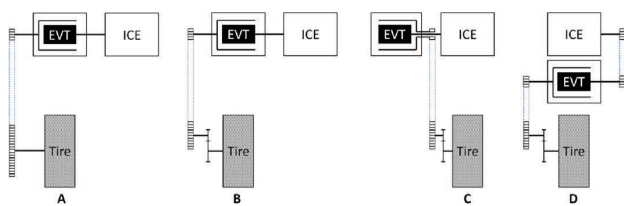


Fig. 15 Two-wheeled Vehicle-mountable EVT Layouts

In addition, the specifications of C can be adapted to conventional scooters with minimal design changes to the structure of the engine section and the reducer around the rear tire. In summary, C provides a layout that is both highly efficient and compact while also enabling easy mounting of an EVT onto an existing scooter with a proven track record in the market.

D shows a back-mount type layout in which the EVT is placed behind the ICE. This has the advantages of being narrower than A, B, and C, and making it easy to maintain the left-right balance. However, D also has disadvantages compared to the other layouts. The addition of a reducer and power transmission elements between the ICE and EVT mean that total transmission efficiency is slightly reduced and the number of peripheral parts increases. Nevertheless, the fact that D has the narrowest layout provides significant ergonomic benefits when it is used in two-wheeled vehicles, and it can therefore be considered suitable for use in two-wheeled vehicle design despite its disadvantages.

Based on the results of the above feasibility assessment, the authors decided to adopt layout C for the 125 cc scooter when installing the EVT system.

7 EVT POWERTRAIN FOR TWO-WHEELED VEHICLES

In this hybrid electric two-wheeled vehicle, a configuration whereby the inner rotor of the EVT machine is connected on the same axis as the engine was adopted. In addition, the outer rotor was connected by a chain through the gear train and is configured to transmit power to the rear wheel. Instead of a large battery, this system featured energy replenishment through the charging functions of a high-efficiency generator using a high-response gasoline internal combustion engine for two-wheeled vehicles. The EVT powertrain unit was designed with ease of assembly in mind, and the EVT machine and drive unit could be easily bolted together without changing the design of the mass-produced air-cooled 125 cc scooter engine or mass-produced frame.

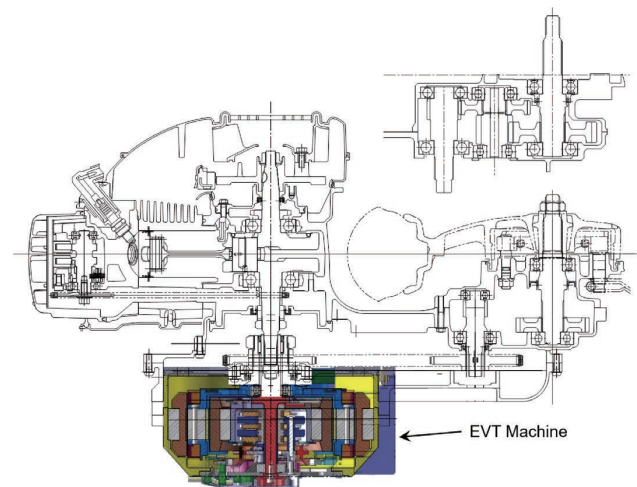


Fig. 16 Cross Section of Two-wheeled Vehicle EVT Powertrain Unit

A cross section of the powertrain is shown in Figure 16. In hybrid systems other than EVT systems, the generator and drive motor comprise separate motor components. With the EVT machine, however, integrating components through the two-rotor structure made it possible to concentrate the weight balance of the two-wheeled vehicle around the engine. The result was a vehicle with a weight balance that did not differ significantly from that of a conventional vehicle.

After considering the aforementioned hybrid function in the EVT system, the rate of regenerative braking, the rate of regenerative charging, the battery discharge rate, the depth of discharge, the number of engine starts, and tolerances, the authors' design calculations found the minimum lithium-ion battery capacity to be approximately 0.1 kWh. This is a low capacity compared to non-EVT hybrid systems. This being the case, one helmet can be stored under the seat, and mounting space comparable to that of a conventional scooter can be secured. A numerical feasibility study by the authors found that, in principle, EVT systems can operate without any lithium-ion battery capacity. (Condenser only.) This is because the EVT can generate its own power and operate the clutch using only energy from its own power generation. In such cases, it has been found to operate as a highly-efficient transmission that does not use expensive, heavy and bulky lithium-ion batteries. In this way, unlike other hybrid systems, the EVT can minimize the space required for batteries. In the course of this research and development, the lithium-ion battery capacity was set at 0.5 kWh for the purposes of investigating appeal and new experiences as a two-wheeled vehicle and in consideration of battery availability.

Figure 17 shows the prototype battery system used in the prototype vehicle. In this system, the energy input/output power and its rate and frequency in the hybrid was calculated in advance, and batteries of different capacities and types were designed and prototyped. In the prototype, lithium titanate was used for the negative electrodes to ensure long life, high input/output, and stability.

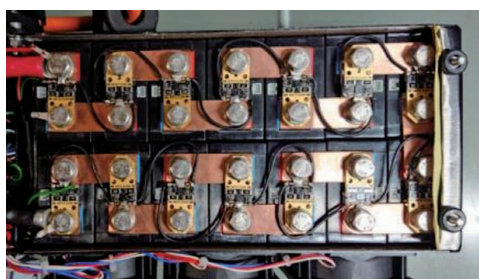


Fig. 17 Example of Prototype Battery
(Voltage: 48 V, Capacity: 0.5 kWh)

The reduction ratio specifications the EVT-equipped two-wheeled vehicle were designed to improve fuel efficiency in consideration of the characteristics of the EVT machine. Specifically, in consideration of market surveys of scooter usage, the two-wheeled vehicle's reduction ratio specifications were designed such that the inner and outer rotors of the EVT have synchronous rotation speeds in the low-speed driving range frequently used in urban areas (20-40 km/h) and in the high-speed driving range used in suburban areas (70-90 km/h). The best fuel efficiency can be achieved by increasing the frequency direct magnetic coupling between the engine and the rear wheel. Consideration was given not only to improving fuel efficiency when driving in WMTC mode, but also to improving practical fuel efficiency for users.

8

EVT POWERTRAIN CONTROL STRATEGY

In the two-wheeled hybrid electric vehicle fitted with an EVT system, in order to enable application to a wide range of hybrid systems, power generation control technology, driving control, and energy management control were constructed into extremely simple and versatile mechanisms. A data flow diagram (DFD) of the hybrid system is shown in Figure 18.

The structural layout and basic operating mechanisms of the EVT vehicle system are shown in the component diagram in Figure 19.

A vehicle control unit (VCU) has the role of controlling the vehicle (driving control, energy control, arbitration control and fail safe control). A motor control unit (MCU) has the role of controlling drive torque. A generator control unit (GCU) has the role of controlling the amount of power generation. A battery management system (BMS) monitors the state of the battery.

In the operation of this system, the VCU receives the rider's accelerator position and power information from the MCU, GCU, and BMS.

First, the power generation control technology features a high-efficiency power generation control strategy that significantly improves fuel efficiency through significant changes to the engine operating point range compared to that of conventional two-wheeled vehicles during power generation. The core means to achieve a highly-efficient hybrid system is to perform power generation control as efficiently as possible relative to the electric power required for driving.

Through accurate control of the rotation speed of the directly-connected inner rotor relative to the engine torque controlled by the electronic throttle valve, it is possible to follow the optimal fuel consumption line and achieve highly-efficient power generation control.

The input/output performance of lithium-ion batteries, engine generators, and drive motor components changes depending on temperature, including when operating in high-temperature and low-temperature environments. This is an important factor with regards to the requirements for a hybrid system containing lithium-ion batteries.

This time, the authors constructed a robust system that can obtain optimum output across a wide temperature range by performing arbitration control (Figure 18) based on state of function (SOF) information regarding the temperature of each component.

In addition, by implementing control that maintains drive output by obtaining output from the engine, the authors have built a system that guarantees performance even when the output that can be taken from the battery is reduced at high or low temperatures.

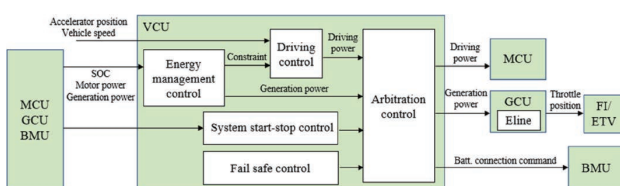


Fig. 18 Data Flow Diagram (DFD) of Hybrid System

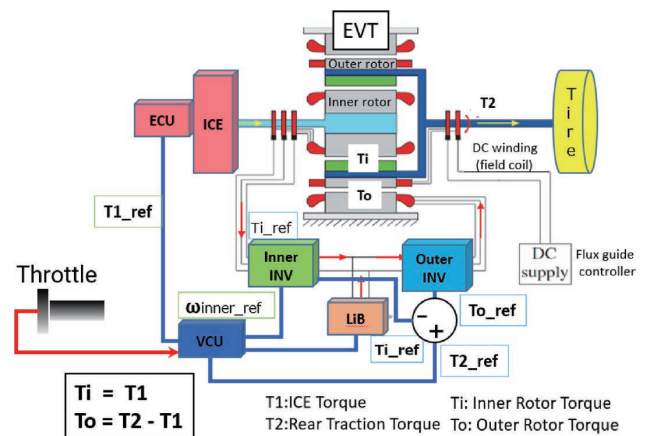


Fig. 19 EVT Vehicle System Component Layout

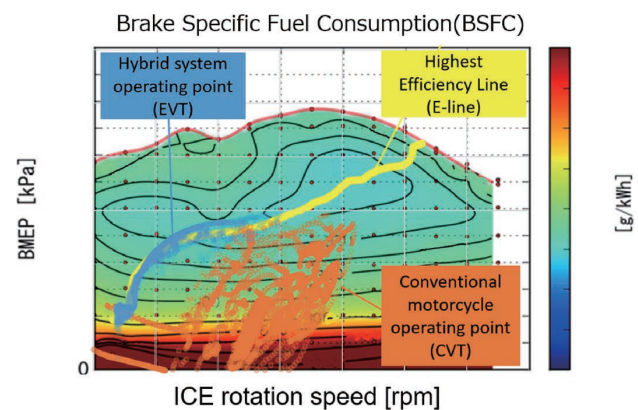


Fig. 20 Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) MAP and Highest Efficiency Line Tracking Control

Figure 20 shows the relationship between the fuel consumption rate and engine output. The yellow line indicates the operating points at which fuel consumption is minimized relative to the required engine output. Comparing the history of operating points during WMTC mode driving between existing two-wheeled vehicles (red) and the EVT system (blue), it can be seen that the EVT system follows the highest efficiency line and generates electricity with high efficiency. In conventional two-wheeled vehicles and some hybrid systems, there were cases where it was not possible to perform control to track the highest efficiency line because factors such as mechanical constraints relative to the vehicle speed and required driving force restricted the engine rotation speed. The line of operation is particularly inefficient for ICEs at low rotation speeds.

In the EVT system, the two-rotor structure means there

are no similar mechanical constraints, making it possible to follow the highest efficiency line.

In terms of the engine sound design, which is a desirable characteristic particular to users of two-wheeled vehicles, control that increases the engine speed as obediently as possible to the power requested by the rider was implemented with the aim of achieving a natural audible sensation and pulsing sensation without discomfort across low- to high-speed regions. The image of a sports motorcycle was a particularly prominent influence.

When the vehicle is running at low speeds, power generation by the engine is stopped, which improved driving efficiency at low speeds by enabling EV-only driving with power supplied from the battery.

In terms of driving control, the rear tire was controlled to provide a natural-feeling riding that responds to the rider's intentions.

With conventional scooters, there is a long response time between the rider opening the throttle and the vehicle gaining acceleration. Users who prefer sporty driving tend to feel that this response in conventional vehicles is poor.

The EV system is a strong hybrid. It is fitted with a large motor that achieves the sharp acceleration unique to electric vehicles in a wide range of speed regions. Due to the two-rotor structure of the EVT, the motor on the outer rotor side has a large outer diameter and can increase the output. In other words, the EVT can achieve more powerful drive torque than non-EVT hybrids.

The regeneration function was used to provide the rider with a new experience. The one-throttle operation function enables the rider to adjust their speed by operating the throttle only, without using the brake lever. This provides enjoyable riding and a new feeling not found with conventional scooters.

Finally, in terms of energy management control,

appropriate integrated control of energy flow arbitration is applied to optimize energy distribution in response to the power requested by the rider, in consideration of the operating state of the engine, EVT machine, and battery.

Three basic energy management control modes were set for operating the EVT system, and a strategy of performing energy management control according to the operating state of the powertrain was adopted. A basic example of the area logic for EV driving modes and HEV driving modes is shown in Figure 21. P^* in the diagram indicates the required value for generator generated power. No. I indicates the EV driving mode, and No. II indicates the HEV driving mode. The required power generation depending on the remaining battery was defined.

This formula has been included in the diagram for reference purposes.

No. III is configured to stop charging when the lithium-ion battery becomes fully charged in situations such as long downhill sections and discharge regenerative power using the engine as a load.

This made it possible to achieve highly-efficient, optimized energy management and arbitration, even when freely generating driving force in real time according to the driving conditions of the two-wheeled vehicle. The modes are described below.

【I. EV driving mode】

Requirement: Drive is provided using battery power only.

①The two-wheeled vehicle is fully electric.

②During deceleration, regenerative deceleration energy is recovered with the lithium-ion battery.

Reason: Fuel efficiency is improved by refraining from running the generator and engine when there is leeway in the SOC.

【II. HEV driving mode】

Requirement: When the SOC is low, the power generated exceeds the traction motor's required

output [W], and when the SOC is high, the power generated is less than the motor's required output [W].

- ①The engine power is driven via a magnetic coupling. Drive is provided using electricity generated by the engine.
- ②Drive is provided by the power generated by the engine, and the surplus is charged to the lithium battery.
- ③Used as a boost mode, using both power generated by the engine and power from the lithium battery to accelerate.

Reason: To stabilize the SOC and reduce battery deterioration and to enable control with a low-capacity battery.

【III. SHEV (energy consumption) mode】

Requirement: Charges the battery with regenerative power. If the battery cannot be charged, power is consumed by running the engine as a load. (Activated with battery overcharge prevention.)

Reason: To prevent battery deterioration and overcharging while avoiding reducing vehicle braking force as much as possible

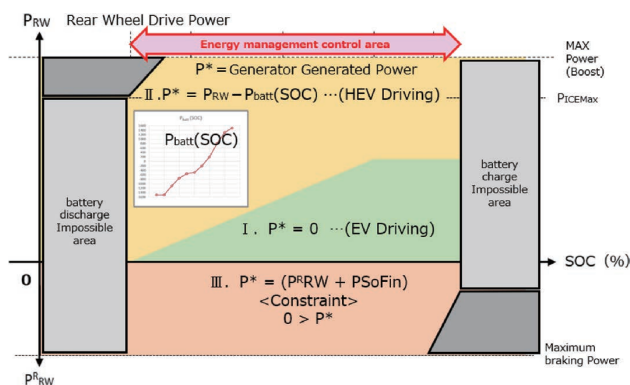


Fig. 21 Basic Example of Hybrid Driving
(Energy Management Block)

9

EVT POWERTRAIN DEVELOPMENT ENVIRONMENT

This section describes the environment and processes in which EVT system development took place.

In the course of this research and development, the

powertrain (the engine, battery, and electric drive unit) is more complex than a conventional engine system. For this reason, in moving forward with the project, research and development was carried out in a time-efficient manner, using digital technology to determine performance trends during the initial stages without manufacturing physical equipment.

In the case of four-wheeled vehicles, SILS, HILS, and Virtual Reality Bench (VRS bench) are known methods used for verification. With two-wheeled vehicles, however, the power train itself is extremely small, and motion systems must have low inertia and high responsiveness. In the past, it had been difficult to apply VRS bench, which is a simulator based on four-wheel vehicles, to the development of hybrid electric two-wheeled vehicles.

As a result, the authors carried out independent development of a dedicated VRS bench system exclusively for hybrid electric two-wheeled vehicles in parallel with their research and development on the EVT powertrain system. This VRS bench, comprises the actual components of the powertrain for the hybrid electric two-wheeled vehicle subject to evaluation and a low-inertia motor with a uniquely designed low-inertia, high-response dynamo function.

Specifically, the authors designed a 10kW high-performance IPM motor system that matches the prototype hybrid system as a bench measurement system.

By coordinating the VRS control and the prototype hybrid control within the same control unit, control safety relative to normal four-wheel or two-wheel VRS benches was ensured.

In addition, unifying the system enabled the realization of an accurate, low-delay energy measurement environment.

The authors constructed a new bench measurement system that can realize appropriate failure processing even in limit tests of prototype hybrid systems.

This vehicle simulator can reproduce specific vehicle driving conditions that based on assumed vehicle behavior by applying a model that virtually reproduces the dynamics of the vehicle.

Through this, it was possible to achieve modeling and system identification regarding the dynamic characteristics the powertrain fitted with a SHEV and an EVT system and implement a theoretical approach to control and compatibility design through front loading.

This made it possible to perform verification relating to evaluation and compatibility processes, which were previously performed on finished vehicles, from the initial stages, including steady and transient states. This succeeded in significantly shortening the evaluation test period and improving efficiency in the development of the hybrid electric two-wheeled vehicle.

Images of the exterior of the dedicated VRS bench system for hybrid electric two-wheeled vehicles is shown in Figure 22 for reference.

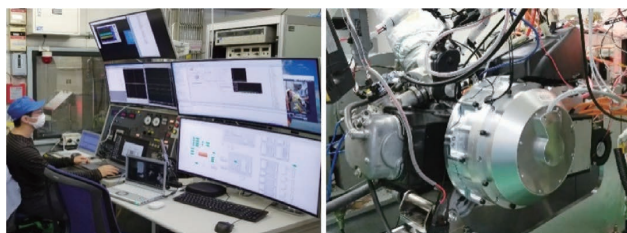


Fig. 22 EVT VRS Bench System

This VRS bench was used to identify the mechanism by which mechanism net mean effective pressure (NMEP) is consumed during driving.

This is essential in order to investigate ways to improve the mode fuel efficiency as presented in this report.

For reference, Figure 23 shows NMEP distribution destinations in series hybrids (SHEV) studied using simulation.

In the WMTC mode driving speed range, friction mean

effective pressure (FMEP) and running load resistance are the dominant NMEP distribution destinations, and electronic transmission loss is about 20-25%.

Although no detailed explanation is given in this report, similar studies and verifications were also conducted for existing CVT transmissions and EVT transmissions. In the electronic transmissions, in addition to improved mechanical transmission efficiency, the control strategy for the hybrid system was created after comprehensive organization of fuel efficiency improvement, including control using regeneration.

In addition, the accuracy of the results shown in the comparison of Target and Measurement in Chapter 10 was ensured by feeding the data obtained on the VRS bench back to the desktop simulation and performing analysis that included the chassis test results.

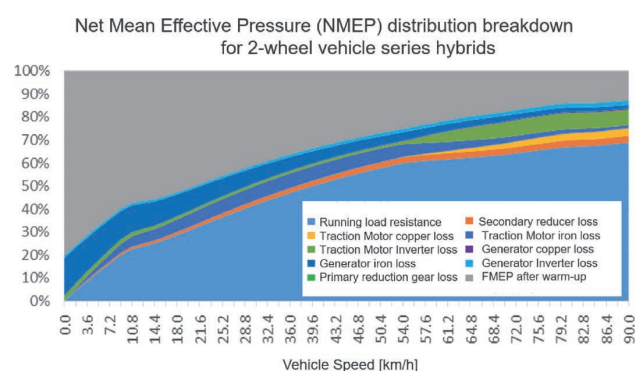


Fig. 23 Net Mean Effective Pressure (NMEP) Distribution Destinations in Series Hybrids (SHEV)

10 HYBRID ELECTRIC TWO-WHEELED VEHICLE PERFORMANCE AND FUEL CONSUMPTION MEASUREMENT RESULTS

This section describes the results of fuel consumption and performance measurement on the prototype hybrid electric scooter created in the course of this research and development.

Figure 24 shows a comparison of vehicle weight, fuel consumption measurement results, and acceleration time

for the series hybrid-equipped vehicle constructed for this research and development and the EVT-equipped vehicle.

The prototype vehicle is fitted with the components required to construct a hybrid system without changing the main engine components or vehicle frame of the existing scooter. In this case, changing the 125 cc scooter to a hybrid system increases vehicle weight by a maximum of approximately 30 kg.

In this study, measurement of fuel consumption in WMTC mode was the first priority when carrying out research and development. For this reason, the acceleration performance target was the same as the BASE vehicle. This is the reason why the 0 to 20 m acceleration times shown in Figure 24 are more or less in equilibrium across all three vehicle types. However, relative to ICE vehicles, the two types of hybrid electric two-wheeled vehicle can generate torque from low vehicle speeds through electrical responses and do not require time to engage the clutch. It is therefore conceivable that acceleration time can be easily improved by rewriting driving control compared to CVT vehicles with engines.

As a result, it can be seen that EVT vehicles offer improvements in acceleration time compared to other vehicles.

The authors intend to continue investigating acceleration performance and to report on this in a subsequent paper.

	Vehicle weight (kg)	Transmission type	Motor Type	Measurement	
				Fuel consumption [km/L]	Acceleration time (0-20m) [sec]
EVT (2M splitter)	125	Electric	Dual Rotor (8P48S) (distributed winding)	WMTC mode full regeneration 84.9 (Target 85.2)	2.63
Series Hybrid (2MUC)	128		IPM (8P12S) 2 pieces used (concentrated winding)	WMTC mode full regeneration 81.1 Regeneration equivalent to ICE Brake 74.3	(2.77)
BASE	99	Mechanical	N/A	62.2	2.77

Fig. 24 Comparison of Vehicle Weight, Fuel Consumption Measurement Results and Acceleration Time



Fig. 25 Exterior View of Vehicle Fitted with EVT System



Fig. 26 Exterior View of Vehicle Fitted with Series Hybrid

In this research and development, WMTC mode running tests were conducted to confirm the fuel consumption rate of the two types of hybrid vehicle (Figure 25 and Figure 26) for which effectiveness had been confirmed.

Figure 27 shows the WMTC mode driving pattern for this test.

The upper section of Figure 27 shows the WMTC mode vehicle speed.

The lower section of Figure 27 is an enlarged view of the 0 to 600 second portion during WMTC mode driving, showing the operation results of the hybrid control strategy.

The upper half of the lower diagram in Figure 27 shows the vehicle drive control. In terms of vehicle drive control, the EVT components adopt a control strategy that regenerates power in accordance with the rider's target driving speed. In addition, in this research and development, drive control was set up to recover as much regenerative energy as possible.

The lower half of the diagram in Figure 27 shows the energy management control strategy by indicating pure electric driving and hybrid driving.

A control strategy that uses electric driving in the low-speed range where the load is light, and transitions to hybrid driving in the high-load range was adopted.

From the above results, it can be seen that hybrid operation strategy was properly realized through automatic control. Specifications equivalent to existing mass-produced models were applied for the engine control used in this research.

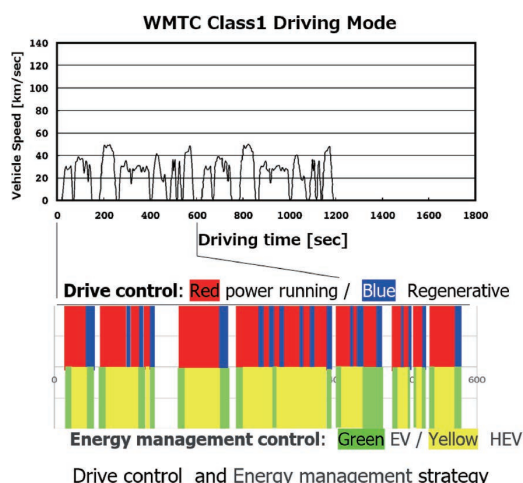


Fig. 27 Top Diagram: WMTC (Worldwide-harmonized Motorcycle Test Cycle Mode) part1 Reduced Bottom Diagram: Hybrid Driving Strategy (Drive Control and Energy Management)

Next, Figure 28 shows the WMTC mode driving fuel efficiency results.

Weak series hybrid system regeneration is a configuration that performs regeneration equivalent to the engine brake of the base CVT vehicle, and strong regeneration is a configuration that recovers as much regenerative energy as possible throughout the WMTC mode.

The EVT uses a configuration that recovers as much regenerative energy as much as possible throughout the WMTC mode.

In research and development relating to the EVT, the target fuel efficiency was 85.2 km/L in WMTC mode, a 37% improvement in fuel efficiency compared to the base vehicle. As shown in Figure 28, it was confirmed that the actual prototype vehicle achieved mode fuel consumption of 84.9 km/L. This means that, not only did the EVT powertrain system of the prototype vehicle improve fuel efficiency by approximately 37% compared to the base vehicle, this highly-efficient system was shown to surpass the series hybrid system that was researched and developed at the same time.

The transmission efficiency relative to speed for the two hybrid systems is shown in Figure 29.

The transmission efficiency was calculated using the η_{SHEV} parameter shown in Figure 9 and the η_{EVT} parameter shown in Figure 10.

Based on the measurement results, it was found that the EVT system had higher efficiency than the series hybrid across all regions.

The EVT's inner and outer rotors are designed to have synchronous rotation speeds in the low-speed driving range (20-40km/h), which is frequently used in urban areas, and in the high-speed driving range (70-90km/h), which is frequently used in suburban areas. As a result, it was confirmed that the EVT efficiency is high.

Furthermore, in the low-speed driving range, where the relative contribution of mechanical loss is large, the maximum efficiency was at 40 km/h, and the EVT was found to have higher efficiency than the SHEV. (Figure. 29)

As mentioned in Chapter 9, series hybrid system losses are 20-25% relative to NMEP.

Since the EVT transmission efficiency is about 15% higher than that of the series hybrid system, the EVT system improves fuel consumption by about 5% compared to that of the series hybrid system.

Hybrid Electric Two-Wheeled Vehicle Fitted with an EVT System (Electrical Variable Transmission System)

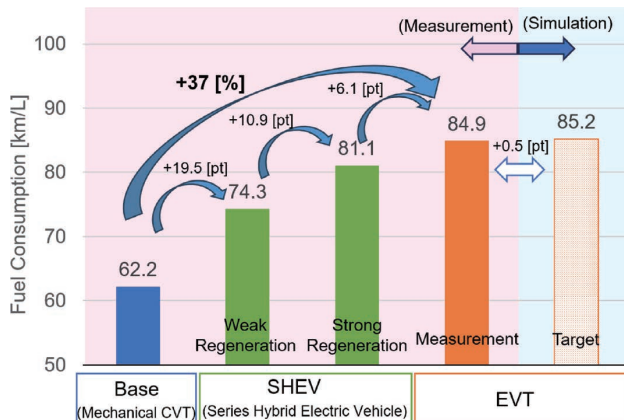


Fig. 28 Fuel Consumption Comparison
(Base Vehicle, Series Hybrid (SHEV) and EVT)

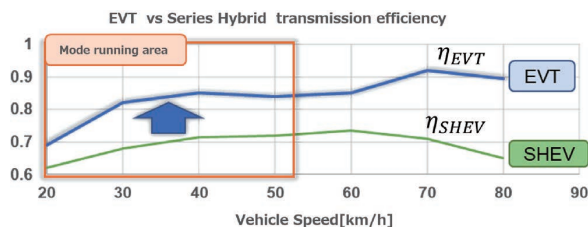


Fig. 29 Transmission System Efficiency Comparison
(Series Hybrid (SHEV) and Electrical Variable Transmission (EVT)) (Measured with VRS Bench System)

At this stage, further improvements to efficiency merit consideration.

In this test, a control method whereby the EVT's inner rotor tracks the ICE's highest efficiency line was used for the power generation function. Based on this, it may be possible to further improve fuel efficiency by optimizing the power generation function on both the ICE's highest efficiency line and the EVT's efficiency map.

In addition, the efficiency of the EVT powertrain system can be further improved by bringing the two rotors closer to synchronous rotation when in WMT mode (see Figure 20 and Figure 30). As shown in Figure 30, preliminary test results indicate that optimizing the EVT powertrain system setup in this way can improve system efficiency at 30 to 60 km/h by approximately 5 to 10%. Based on these results, WMT mode driving fuel consumption of 91.2 km/L (a 47% improvement in fuel consumption compared to the base vehicle (see Figure 31)) would be expected, meaning and further improvements in fuel consumption can be achieved.

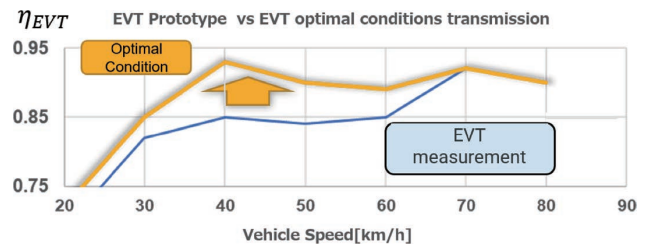


Fig. 30 Transmission Efficiency Improvement when ICE and EVT Efficiency Characteristics are Considered
(Measured with VRS Bench System)

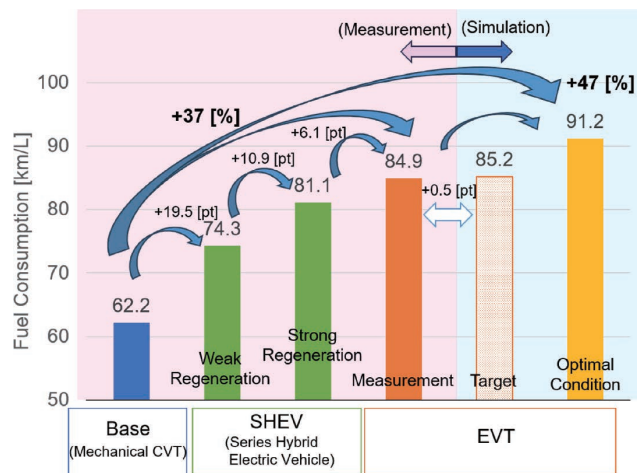


Fig. 31 Fuel Consumption Comparison
(Base Vehicle, Series Hybrid (SHEV) and EVT)

In the course of this research and development, mass-produced engines were used, no improvements were made to mechanical components, and fuel consumption studies were carried out using conventional mass-produced air-cooled single-cylinder ICEs. However, improvement in the efficiency of the engine itself is also a highly significant factor, and it goes without saying that applying fuel efficiency improvements to the engine used in this research can lead to even greater improvements in fuel efficiency.

Although not described in this report, changing from an air-cooled engine to a water-cooled engine is widely known to improve fuel efficiency. If the ICE were to be water-cooled, it may be possible to achieve fuel consumption of 100 km/L or more. In summary, the use of hybrid electric two-wheeled vehicles can make it possible to satisfy the conflicting requirements of environmental performance in terms of fuel efficiency.

and elements that make two-wheeled vehicles enjoyable to ride, such as acceleration performance. Hybrid electric two-wheeled vehicles make it possible to achieve improved environmental performance, new sensations and enjoyable riding particular to electric vehicles, and long-distance cruising with large energy storage particular to ICEs. Reporting on exhaust gas is not carried out in this report. Hybrid systems have the advantage of enabling ideal driving conditions to be maintained by using a large motor in the engine to change the operating point. At the same time, adaptation including engine control elements such as engine and catalyst warming control, change of mind and evaporative control is needed, meaning that thorough examination is required.

The authors intend to report on this in a subsequent paper.

11 POSSIBILITIES FOR HYBRID ELECTRIC TWO-WHEELED VEHICLES

This two-rotor technology is compact because the generator and drive motors are integrated, making it effective for use in two-wheeled vehicles with strict component mounting requirements.

However, with regards to increased mass due to hybridization, it will be necessary to carry out sufficient preliminary verification of the front-rear and left-right balance, which are design conditions particular to two-wheeled vehicles, and the impact of additional mass on vehicle behavior.

This section describes an example of study based on the aforementioned approach. Specifically, it is possible to expand application of the EVT machine from the small scooter category to the motorcycle category while maintaining the same outer diameter. This is achieved by changing the overall length of the EVT machine. According to on desk calculations by the authors, the EVT machine mechanical shaft output can be improved from 10 kW to 30 kW equivalent by changing the EVT machine voltage from 48 V to 96 V.

At present, while the availability of space to store the lithium-ion battery, which is an important component separate from the EVT machine, remains to be confirmed before a maximum output of 30 kW can be achieved, the authors consider this to be a possibility. In this regard, a lithium-ion battery that can be laid out three-dimensionally to fit the narrow mounting space on two-wheeled vehicles is desirable. The mounting position must also be selected after considering future improvements in lithium-ion battery performance.

In another study of specifications conducted by the authors, in which the EVT system functions were limited, preliminary studies showed that an EVT's magnetic coupling torque is sufficient for operation without using lithium-ion batteries, which are expensive, bulky, and heavy. In such cases, the fact that no lithium-ion battery is required would make the EVT system smaller and lighter. In this system that limits the functions of the EVT according to the purpose, while limitations include the difficulty of achieving electric driving and boost modes, it is known that ICE driving efficiency can be improved, and that fuel consumption and acceleration performance can be improved compared to conventional vehicles by combining idling stop and regeneration functions.

Below are examples of a hybrid electric two-wheeled vehicles fitted with powertrains featuring the EVT system with an output equivalent to 30 kW envisaged by the authors earlier in this paper (see Figure 32 and Figure 33).

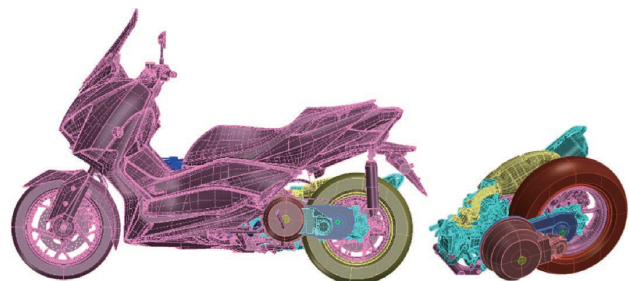


Fig. 32 Example of Side-mounted EVT (30 kW)
on Large Scooter

According to the authors' configuration study, it is possible to generate a maximum output of 30 kW, which exceeds that of the conventional two-wheeled vehicle

category, while reducing greenhouse gases by combining a high-output EVT system with an ICE of 15 to 20 kW.

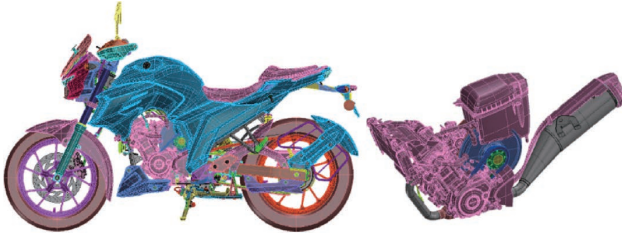


Fig. 33 Example of Rear-mounted EVT (30 kW) on Motorcycle (Example of back mounting: EVT mounted behind ICE)

As described above, based on the authors' study, EVT machines can be easily scaled to changes in the mechanical shaft output of the two-wheeled vehicle and can be expected to improve output by increasing voltages. In other words, application in a wide range of two-wheeled vehicle categories may be possible. Prototype EVTs up to 180 kW already exist for four-wheeled vehicles, and the authors believe that there are wide-ranging potential future applications.

12 CONCLUSION

The basic principle of the EVT system is based on a power transmission (F. Porsche) invented in 1909. (See Figure 34.)

In research and development on new hybrid systems, in contrast to previous two-wheeled vehicle development mainly focused on the mechanical domain, the authors took on the challenge of innovating to create value by reaffirming electrical machinery technology built 110 years ago and combining it with modern advancements. By taking on this challenge, the authors were able to put forward a hybrid electric two-wheeled vehicle that can play a part in environmental protection measures and provide value for new users.

By adopting the EVT system for two-wheeled vehicles, the authors were able to improve power performance, environmental performance, and drivability, which were considered to be mutually exclusive in conventional two-

wheeled vehicles, in accordance with their respective requirements. This has shown that hybrid electric two-wheeled vehicles equipped with EVTs are highly effective.

In the two-wheeled vehicle category, the use of highly-efficient strong hybrids, as typified by hybrid electric two-wheeled vehicles with EVTs, will make it easier to comply with future laws and regulations, as has been shown in the realm of four-wheeled vehicles.

With two types of hybrid system with different mechanical structures as the subject, the authors posited and constructed a platform hybrid system control that can flexibly respond to different hybrid topologies. This makes it possible to flexibly meet diverse performance, appearance, and design requirements for two-wheeled vehicles.

Moving forward, there is an urgent need to protect the environment and build a sustainable society for future generations. Use of fossil fuels must be reduced. In recent years, there has also been a shift towards synthetic fuels, with the aim of realizing a more sustainable society. It is hoped that hybrid electric motorcycles that adopt the EVT system used in the course of this research and development will be able to provide customers with the same enjoyable riding they have experienced up to now while also significantly improving fuel efficiency.

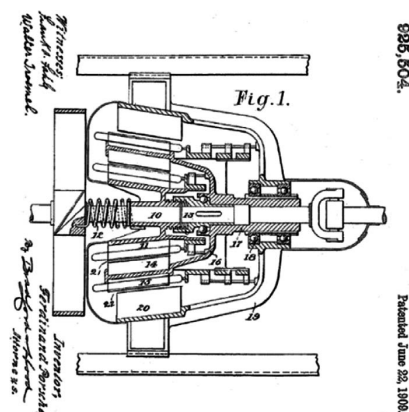


Fig. 34 Two-rotor Transmission Invented in 1909 (F. Porsche)

REFERENCES

- [1] Kruse, R., Mourad, S., Foster, D., and Hoeijmakers, M.J., "Concept and Functionalities of the Electric Variable Transmission," in 15th Aachener Kolloquium – Automobile and Engine Technology, October 9-11, 2006, 1387-1398, <https://martinhoeijmakers.nl/pubs/>.
- [2] Hoeijmakers, M.J. and Ferreira, J.A., "The Electrical Variable Transmission," in Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference 39th IAS Annual Meeting, Seattle, WA, October 3-7, 2004, 04IAS70P7.
- [3] Hoeijmakers, M.J. and Rondel, M., "The Electrical Variable Transmission in a City Bus," in Proceedings 2004 35th IEEE Power Electronics Specialist Conference, Aachen, Germany, June 20-25, 2004, 2773-2778
- [4] Verbelen, F., Lhomme, W., Vinot, E., Stuyts, J. et al., "Comparison of an Optimized Electrical Variable Transmission with the Toyota Hybrid System," Applied Energy 278: 115616.
- [5] Druant, J., De Belie, F., Sergeant, P., and Melkebeek, J., "Power Flow in an Induction Machine Based Electrical Variable Transmission," in 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM).
- [6] Druant, J., Vansompel, H., De Belie, F., Melkebeek, J. et al., "Torque Analysis on a Double Rotor Electrical Variable Transmission with Hybrid Excitation," Applied Energy 278 (2020): 115616.

■ 著者



古田 秀樹
Hideki Furuta
技術・研究本部
技術開発統括部
制御システム開発部



吉田 潤
Jun Yoshida
技術・研究本部
技術開発統括部
制御システム開発部

乗り心地の良い「PAS」サドルを設計するための感性設計技術

Kansei Design Technology to Design a Comfortable “PAS” Saddle

丹羽 将勝 小関 泰子 小林 光司 藤田 英之 古澤 隆志
中林 雄介 伊藤 努 堀 啓一 芳賀 健太

要旨

近年の消費者ニーズの多様化に伴い、製品に対して“心地よさ”などの感性価値が重視されるようになり、消費者の嗜好に合わせた感性価値の設計技術の構築が求められている。この課題に対応するため、本研究では、電動アシスト自転車のサドルを対象とし、嗜好の有無、および違いが生まれた要因をユーザー属性から抽出した。その結果、乗り心地には嗜好の違いがあり、その違いはユーザーの体格、運動習慣、走行環境などが影響している可能性が示唆された。また、感性価値を予測するために必要な因子を臀部の体圧分布から考察した。その結果、感性価値を予測するためには、性差、体格、乗車位置、許容圧力といった因子を考慮する必要があることがわかった。今後は、抽出したユーザー属性に対して検証を行い、嗜好に合わせた感性価値の設計方法を構築していく。

Abstract

In recent years, the diversification of consumer needs has led to an increased emphasis on affective values, such as “comfort,” in products. This has created a demand for the development of design techniques that cater to consumer preferences regarding affective values. To address this issue, this study focuses on the saddle of electrically power assisted bicycles and derives factors from user attributes that contribute to the presence or absence of preferences, as well as the differences observed. The analysis reveals that there are differences in riding comfort preferences, which may be influenced by factors such as the user’s physique, exercise habits, and riding environment. Additionally, factors necessary for predicting affective values were examined based on pressure distribution in the seating area. The findings indicate that, to predict affective values, it is essential to consider factors such as gender differences, physique, riding position, and tolerable pressure. Moving forwards, the study aims to validate the derived user attributes and develop design methods for affective values that align with preferences.

1 はじめに

近年、ライフスタイルや価値観の多様化に伴い、消費者のニーズや嗜好もまた多様化している。特に工業製品においては、単に機能的な性能を追求するだけでなく、“楽しさ”や“心地よさ”のような感性的な価値(以降、“感性価値”と記載)を提供する製品が求められている。これらの背景から、製品開発においては、消費者の嗜好に合わせて、狙った感性価値を設計する技術が必要とされている。従来の製品開発では、感性価値を設計する場合、訓練された評価者(以降“専門家”と記載)による官能評価が実施されてきた。しかし、限られた専門家だけで嗜好の違いに対応することは難しく、特に性別や体格が影響している場合は、感性価値の違いを評価することは困難である。

本研究では、消費者の嗜好に合わせた感性価値を提供するため、感性価値と製品の物理設計値を結びつける予測式を構築して、狙った感性価値を設計する技術の構築を目指してい

る。今回は研究対象として電動アシスト自転車「PAS」のサドルを選択した。理由としては、当社の主力商品であると同時に乗り心地に関する研究事例が少なく感性価値を向上させる手法が確立されていないことがあげられる。

また、サドルは人体の荷重の6割を支える重要な部品であることから^[1]、感性価値に与える影響が大きいと考えた。

本稿では、以下の2項目について検証を行う。

検証1:嗜好の違いの要因分析

ターゲットユーザー(今回は女性ユーザー、以降“ユーザー”と記載)を対象に、サドルの官能評価を実施し、乗り心地に嗜好の違いがあるか確認する。違いがある場合は、その要因をユーザーの属性情報(体格や運動習慣など)から考察する。

検証2:感性価値に影響を与える要因分析

検証1と同様な試験を専門家に対して実施し、その評価結果を基に、感性価値と設計値の関係性を示す予測式を構築する。その予測評点とユーザー官能評点(以下評点)の差、および

ユーザー間の評点ばらつきの原因を属性情報から考察することで、感性価値に影響を与える要因を明らかにする。

2 実験方法

棟近ら^[2]の研究では、感性的なニーズを把握する調査で使われるSD法について、評価用語選定の指針を示している。また、評価用語を認知・知覚モデルに基づき分類し、階層構造(感性評価構造)を仮定して、分析を行っている。本稿でも、その選定指針と階層構造を参考に、以下のようなステップで検討を行った。

- (1) “乗り心地のよさ”を構成する感性価値の抽出
- (2) ユーザーと社内専門家に対する官能評価
- (3) 検証1 嗜好の違いの要因分析
- (4) 検証2 感性価値に影響を与える要因分析

各ステップの詳細を以下に示す。

(1) ユーザーと開発部門へのヒアリングを行い、サドルに重要な感性価値を官能評価用語として抽出し、4つの階層に分けた。4つの階層は文献^[2]に従い、人の嗜好や感情に近い“総合感性”“心理的反応”の上位2階層と、物理特性を知覚する言葉に置き換えた“複合感覚”“単感覚”になる。

(2) 官能評価用語を用いて、ユーザーと社内専門家による乗車評価を行い、それらの結果に対して2つの検証を行った。

(3) 検証1では、ユーザーの評価結果からサドルに対して嗜好の違いの有無を確認し、嗜好ごとに乗り心地に紐づく感性価値が異なるかを比較した。また、嗜好が分かれた要因を考察した。

(4) 検証2では、社内専門家の評価結果から、サドルの物理量を説明変数とする“単感覚”“複合感覚”の予測式を構築した。得られた予測評点とユーザー評点およびユーザー間の評点を比較し、差異がある官能評価用語については属性情報から考察を行った。

2-1. 官能評価用語の選定

シティ車のメインターゲットである女性ユーザーと電動アシスト自転車の設計・開発部門からヒアリングを行い、サドルの乗り心地に関連する官能評価用語を抽出した。抽出した用語を認知・知覚モデルに基づき4階層に分類し、社内評価で重要視する用語および回答容易性から19個に厳選した(表1)。本研究では心地の良いサドルを作ることとしたため、総合感性を“心地の良さ”とし、嗜好の違いを確認するため“好き・嫌い”の評価項目を加えた。

表1 官能評価用語

総合感性	心地よい	複合感覚	滑り
	好き		圧迫感
心理的反応	こぎやすさ		ペダリングした時の当たり
	疲れ		サドルの揺れ
	安心感	単感覚	座面の広さ
	好みの柔らかさ		座面の凹か凸か
	フィット感		傾き
	どしりと座れる(安定感)		衝撃吸収性
	好みの位置に座れるか		クッションの厚み
			柔らかさ

2-2. 物理量選定と計測

検証2において、感性価値の物理量による予測式を構築するため、設計値に関係するサドル物理量の計測を行った。設計部門からのヒアリングによりサドルの設計可能変数を定義し、物理量の選定を行った。選定した物理量の計測のために類似する試験規格^{[4][5]}を参考にして評価ジグの作成と試験条件を決定した(表2、図1)。形状寸法は自転車への標準取り付け状態(サドル上面が地面と平行な状態)を基準とし各寸法を算出した(図2)。

表2 計測物理量詳細

物理量	単位	詳細
ASSYばね定数(K_{200})	N/mm	サドル製品を押したときのばね定数 10Nと200N印加時の2点の変位からばね定数を算出
ASSYばね定数(K_{300})	N/mm	サドル製品を押したときのばね定数 300N印加時のばね定数を算出
クッションばね定数(K_c)	N/mm	クッション単独のばね定数(計算) K_{200} を K_f と K_c の直列ばねとみなして算出 $\frac{1}{K_{200}} = \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_f}$
フレームばね定数(K_f)	N/mm	フレーム単独のばね定数(実測)
表皮摩擦係数	—	サドル表皮の静止摩擦係数
サドル寸法	—	設計可能変数から形状寸法を選定(図2)

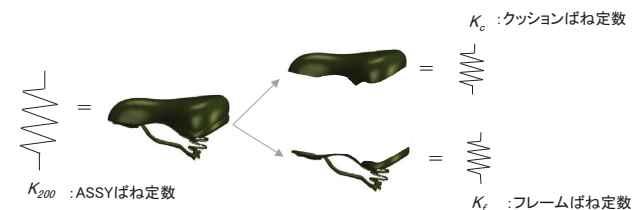


図1 サドルばね定数説明

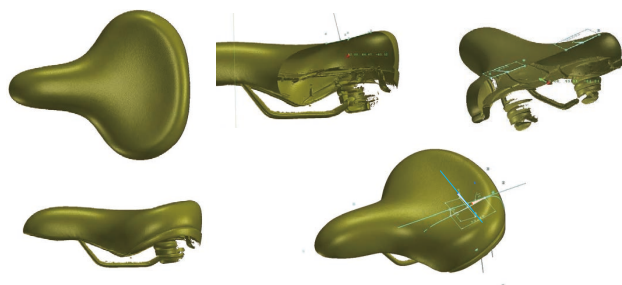


図2 サドル寸法計イメージ図

2-3. 官能評価

ユーザーおよび社内専門家を対象とした官能評価の概要を示す。

2-3-1. 実験環境

被験者は普段から電動アシスト自転車を使用する成人女性30名(Mean \pm SD = 48.2 \pm 7.7歳)および、社内専門家1名(男性・40代)であった。実験プロトコルを図3に示す。実験参加者は電動アシスト自転車に乗車し、直線、カーブ、段差乗り越えの条件で走行し、その後、サドルに対する官能評価を行った。官能評価用語は2-1の19項目とし、官能評価方法は5段階評価のSD法とした。5種のサドルに対して同様の評価を行い、合計5回の走行を行った。試料の評価順番は5パターンを用意し、被験者ごと評価順番が偏らない様に配慮した。最後に5つのサドルの好き嫌いについて順位をつけてもらった。

また、嗜好性に影響があると想定された普段の運動習慣や走行環境や時間などについてもアンケートを行った。

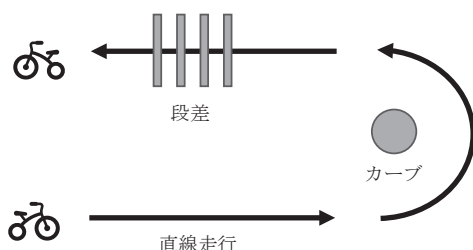
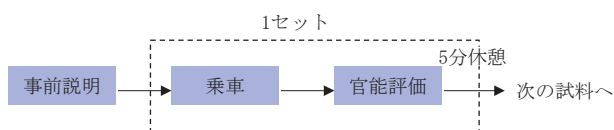


図3 実験環境
 (上:実験フロー/下:走行条件)

2-3-2. 実験試料

実験試料として、5つの特性の異なる市販サドル(図4)を用意した。物理量計測の結果を表3に示す。試料Pの物理量を1とした時の他の試料の物理量を表している。

社内専門家評価では官能評価用語と設計値の予測式を構築するため、実験試料は7つとした。

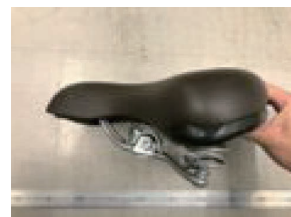


図4 実験試料例

表3 実験試料の物理量

試料	P	Q	R	S	T
ASSYばね定数(K_{200})	1	0.67	0.89	0.55	0.92
フレームばね定数(K_f)	1	0.21	0.32	0.31	0.68
クッションばね定数(K_c)	1	0.97	1.20	0.63	0.97
着座部前後傾斜	1	0.28	0.55	0.19	0.74
摩擦係数	1	1.86	1.78	1.80	1.85
着座部面積	1	1.16	1.03	1.27	1.18

2-3-3. 臀部の体圧分布計測

官能評価試験とは別に、すべてのユーザーに対して同じ試料に対して着座した際の体圧分布を計測した。使用したセンサはnovel社製plianceである。計測時に走行は行わず、車体を固定した状態で乗車を行い、ペダリング動作と静止状態で計測を行った。

2-4. 検証1. 嗜好の違いの確認

田中ら^[3]の研究では、飲料缶の“開けやすさ”について、感性評価構造の構築を行っている。その際、“開けやすさ”に対する嗜好の個人差を層別している。本稿でも同様の手法で乗り心地の好みについて、層別を行った。

官能評価用語の“好き”の官能評点(以下評点)でクラスター分析を行った。“好き”の評点に対して、二重中心化を行い、主成分分析を行った。得られた主成分得点にクラスター分析(Ward法)を適応し、被験者を嗜好別に分類した。次に各クラスターに対して、4階層に分けた官能評価用語の評点を用いて、各階層間で重回帰分析を実施した。具体的には“総合感性”を目的変数、“心理的反応”を説明変数として回帰式を構築した。

次に説明変数として残った“心理的反応”に属する官能評価用語を目的変数、“単感覚”と“複合感覚”を説明変数として回帰式を構築した。回帰式構築時にはP値が5%を下回る説明変数のみ採用した。抽出された目的変数および説明変数を“乗り心地の良さ”を構成する感性評価構造とした。

2-5. 検証2. 感性価値に影響を与える要因分析

要因分析に先立って、感性価値の物理予測式の構築を行った。この時、社内専門家は物理量の変化を正確に官能評価の変化としてとらえられることから、彼らの評価結果を用いて、“単感覚”と“複合感覚”に分類される官能評価用語の評点の物理予測式を構築した。

手法としては官能評点を目的変数、物理量を説明変数として重回帰分析による予測式の作成を行った。この時、多重共線性を排除すべく、VIF 値が10以下になるように説明変数を選定した。また重回帰分析では予測精度が悪かった、もしくは重回帰分析で得られた説明変数では整合性ある説明ができない官能評価語については、評価コメント・体圧分布などから現象の仮説を立てて予測式を作成した。

3 結果と考察

3-1. 検証1 結果. 嗜好の違いの確認

図5にクラスター分析で得られたデンドログラムを示す。本研究では図5中の横線(a)の位置クラスターを3つに分けた(クラスター1: N = 10 クラスター2: N = 14, クラスター3: N = 6)。各クラスターの“好き”の評点の平均値を比較するとQとSに対する評価がクラスター間で異なることが分かった(図6)。Qに対して、クラスター1と2は評点4.2と評点4の高評価だが、クラスター3は1.7の低評価傾向である。Sに対してはクラスター2と3は4.6と4.3の高評価傾向だが、クラスター1は2.2と低評価傾向となった。

次に各クラスターの感性評価構造を構築した結果を図7に示す。重回帰分析におけるすべての決定係数 R^2 は0.57以上であった。3つのクラスターの感性評価構造を見てわかるようにクラスターごとに“心地よさ”と紐づく評価語が異なることが分かった。特にクラスター1は他のクラスターに比べ、“柔らかさ”や“広さ”が“心地よさ”に影響しない傾向がみられた。

これらの結果からサドルには嗜好の違いがあり、クラスターごとに重要視するサドルの感性価値が異なることが分かった。

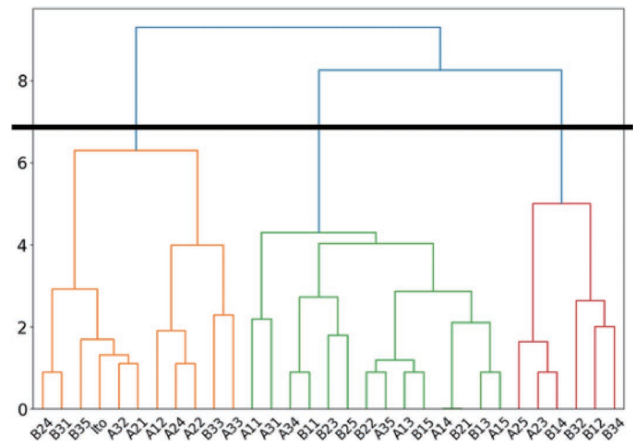


図5 デンドログラム
(横軸:被験者の ID)

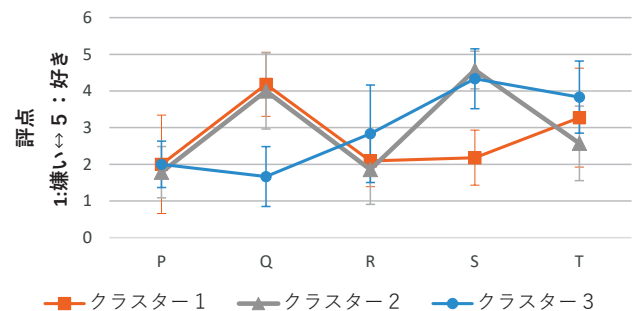


図6 各クラスターの“好き”の評点

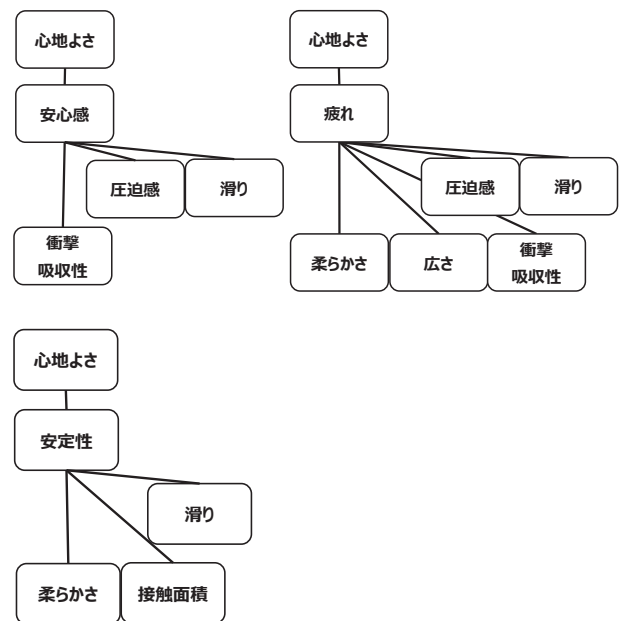


図7 各クラスターの感性評価構造
(左上:クラスター1、右上:クラスター2、左下:クラスター3)

3-2. 検証1 考察. 嗜好の違いの背景要因

クラスターが分かれた要因を考察するため、ユーザーの属性情報を比較した。その結果、クラスター間で BMI (図8-1)、運動習慣 (図8-2)、走行環境 (図8-3) に違いがある可能性が示唆された。また、ペダリング時の重心位置に差があり、クラスター1は他のクラスターよりも重心が前寄りの傾向が見られた (図9)。これらの結果より、各クラスターの特徴について下記に示す仮説を構築した。クラスター1は普段から坂道走行が多いため、着座位置が前方、運動習慣があり比較的足をよく動かすためサドルは動作性を重視する。そのため、ペダリングの邪魔になりやすい座面の広い S は低評価になった可能性がある。クラスター2は多数派であり、クラスター1に比べて、平坦路をゆったりと走行するため、着座面積が広く・柔らかな Q や S を好んだ可能性がある。クラスター3は痩せ型であり、体重が軽いことから、フレームのバネが柔らかい Q よりもクッションの柔らかい S を好んだ可能性がある。

以上の結果仮説から、嗜好が3つのクラスターに分かれた要因として、BMI、走行環境、運動習慣、乗車位置の影響が示唆された。

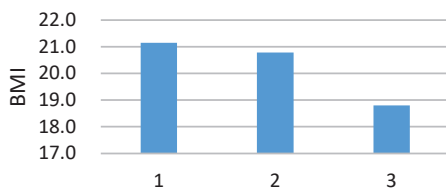


図8-1 平均 BMI
(横軸: クラスター)

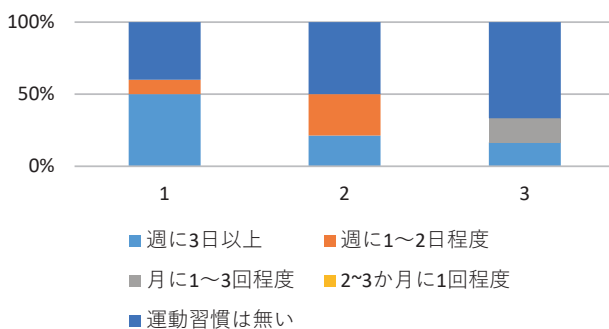


図8-2 運動習慣

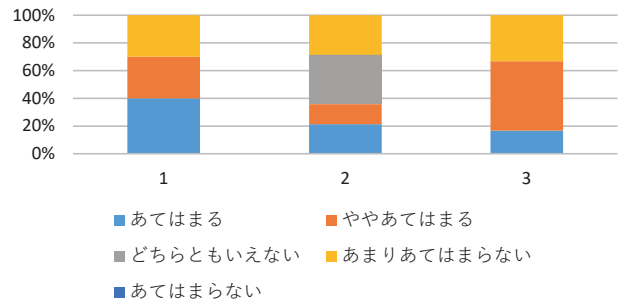


図8-3 走行環境 (普段の走行環境が坂道か)

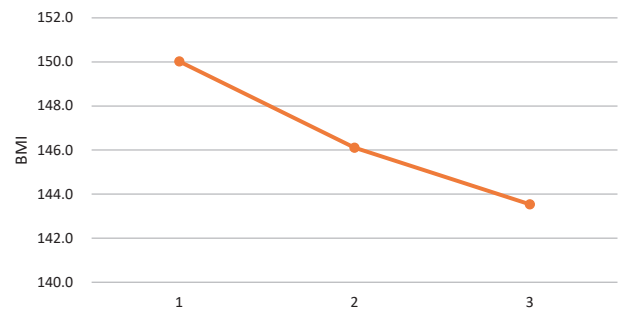


図9 ペダリング時の平均重心位置
(サドル後方からの距離)

3-3. 検証2 結果. 感性価値の物理予測式構築

検証2では3-1で構築したクラスター1と2の感性評価構造に現れる“単感覚”“複合感覚”についてのみ予測式の構築を行った。具体的には“柔らかさ”“衝撃吸収性”“広さ”“滑り”“圧迫感”の5つである。

官能評価によって得られた評点と物理量の関係式を重回帰分析によって求めた。その結果“柔らかさ”では以下の回帰式(1)が得られ、その時の予測式と実測式の関係を図10に示す。

$$\text{柔らかさ} = \alpha \times \text{ASSYばね定数 } K_{200} + \beta \times \text{着座部面積} + \gamma \quad \dots (1)$$

$$R^2 = 0.98$$

(α, β, γ = 定数)

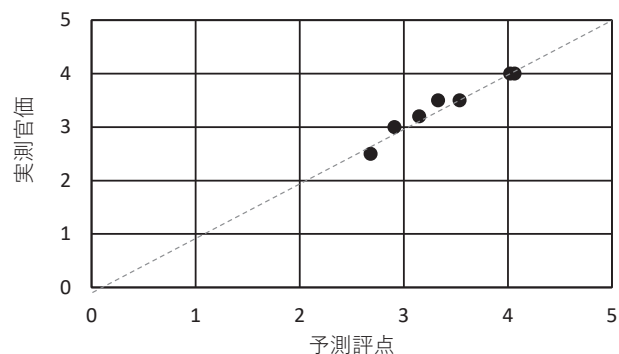


図10 重回帰分析による予測と実測評点の比較 (柔らかさ)

また、“衝撃吸収性”については以下の回帰式(2)が得られた。

$$\begin{aligned} \text{衝撃吸収性} &= \delta \times \text{ASSYばね定数 } K_{300} + \varepsilon \times \text{着座部面積} + \zeta \\ &\dots(2) \\ R^2 &= 0.96 \\ (\delta, \varepsilon, \zeta &= \text{定数}) \end{aligned}$$

この時、ASSYばね定数 K_{300} は300N 負荷時の ASSYばね定数である(表2参照)。ここで、300N は段差を乗り越えた際にサドルにかかる荷重を計測した値である。

先行研究によれば、人は柔らかさを判断する際にヤング率と全体剛性の両方で判断していることが知られている^[6]。このことから、クッションばね K_c (≡ヤング率)とフレームばね K_f (≡全体剛性)の要素を包括している ASSYばね定数 K_{200} がサドルの柔らかさを表現するのに適していたと考えられる。

一方、“広さ”“滑り”“圧迫感”については重回帰分析の決定係数 R^2 が低かったため、乗車コメントや体圧分布より現象の仮説を立て、それに基づいて予測式を作成した。例えば、圧迫感については、専門家評価では恥骨部から前方にかけて圧迫感が強くあるとコメントがあり、該当部位の面圧と評点の相関が高かった。そのため、着座時に前方へ滑ることによって恥骨部への圧力が高くなるという仮説から図11に示す物理モデルを構築し予測式(3)を作成した。具体的には着座時のサドルの傾斜角度(θ)をサドル着座部傾斜(θ_1)と着座時のフレームの傾き(θ_2)の差分から算出し、そのときに発生する前方へ滑らせようとする力(前滑り力)と、着座時に臀部に発生する表皮との摩擦力に起因する滑らせない力(抵抗力)の差分によって圧迫感が発生するというモデルを作り、係数フィッティングにより予測式を作成した、その時の予測式と実測式の関係を図12に示す。“滑り”と“広さ”についても同様にコメントや体圧分布より仮説を立て、それに基づいて予測式の作成を行った。

$$\begin{aligned} \text{圧迫感} &= \\ &\text{着座時臀部荷重[N]} \times \text{着座時角度}(\sin\theta) \times \text{係数} - \text{抵抗力[N]} \\ &\dots(3) \end{aligned}$$

$$\ast \theta = \theta_1 - \theta_2$$

θ_1 = サドル取り付け時の着座部のサドルの傾斜角

θ_2 = 人着座時のボトムの傾斜

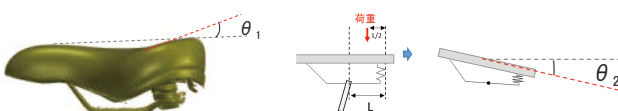


図11 傾斜角度($\theta_1, 2$)定義イメージ図

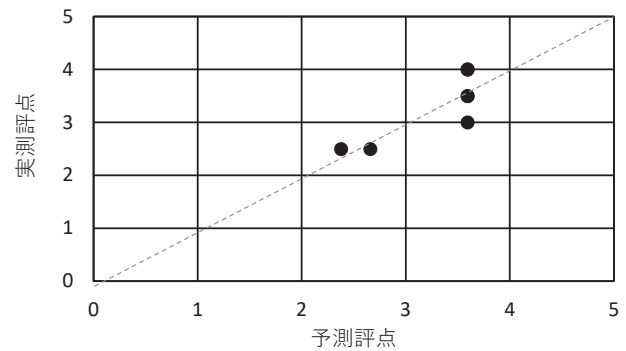


図12 予測評点と実測評点の比較(圧迫感)

3-4. 検証2 考察. 感性価値に影響を与える要因分析

3-4-1. 社内専門家とユーザーの比較による要因分析

3-3で作成した予測評点と2-2の官能評価でのユーザー評点(N=30の平均)の相関係数を算出したところ、“柔らかさ”、“衝撃吸収性”、“広さ”“滑り”については、それぞれ、0.92、0.98、0.88、0.72と比較的良好な値が得られたが、“圧迫感”については0.34と低い値となった(図13)。

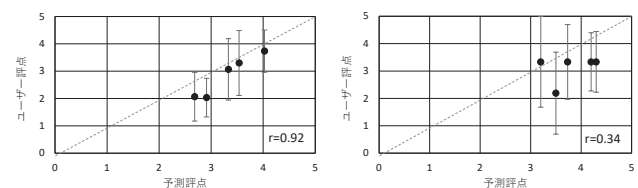


図13 ユーザー評点と予測評点の比較
 (左:柔らかさ、右:圧迫感)

この原因を究明するために、各被験者が着座した際の体圧分布に注目した。以下に、社内専門家(男性)と体格に近い女性ユーザー(被験者A)が同じサドル(サドルP)に着座したときの体圧分布を示す(図14)。この図では、計測した体圧分布のうち、サドル上に発生した圧力のみ抽出し実際のサドルの外形状に投影している。圧力単位は[kPa]であり、赤くなるほど圧力が高いことを示している。

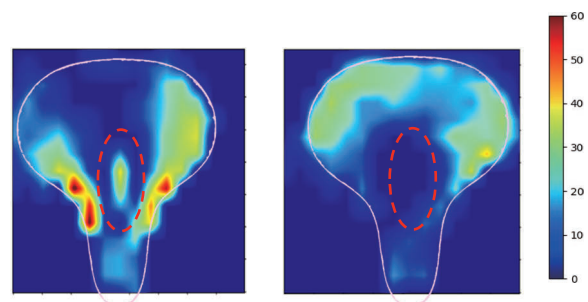


図14 着座時の臀部体圧分布比較(サドルP)
 左:社内専門家 右:被験者A

結果として、専門家は恥骨部(図中破線)から前方にかけて局所的な圧力が出ているのに対し、被験者 A では同様の部位で局所的な圧力は確認されなかった。評価コメントでも、専門家は恥骨から前方への当たりに言及していたが、被験者 A では該当部位での当たりのコメントは確認されなかった。これは男女の性差による身体的特徴に起因するものと考えられる。

したがって、サドル設計においては性差が影響する官能評価用語を明確にし、その官能評価用語については性別による予測式の変更が必要である。

3-4-2. ユーザー間の比較による要因分析

次に、ユーザー間のばらつきについて考察を行った。本報では3-4-1でユーザーと専門家評点に顕著な差がみられた“圧迫感”の解析結果を示す。解析の結果、“圧迫感”の評価に影響を与える主要因として、“体格”、“着座位置”、“許容圧力”の3つがあることが分かった。以下に詳細を述べる。

最初に“着座位置”の影響について述べる。以下にクラスター2に属しており体格が近い二人が同じサドル(サドル T)に着座した際の体圧分布を示す(図15)。具体的には、身長157cm、体重56kg(被験者 B)と、身長153cm、体重55kg(被験者 C)である。

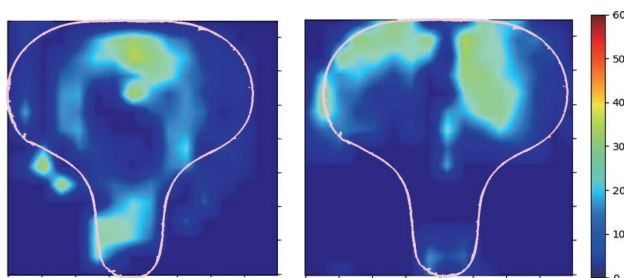


図15 着座時の臀部体圧分布(サドル T)
 (左:被験者 B、右:被験者 C)

図15より被験者 B は比較的前方に着座し、後端部にはほとんど圧力がかかっていない。一方、被験者 C は比較的后方に着座し、後端部に圧力がかかっていることがわかる。この時、被験者 B はもも裏への圧迫感を、被験者 C は後端部への圧迫感について言及している。つまり類似した体格であっても着座位置が異なり、それによって圧迫感を覚える場所が異なることが分かる。

次に“体格”の影響について述べる。着座位置が近く、体格(主に体重)が異なる2名の被験者が同じサドル(サドル P)に着座した際の体圧分布を示す(図16)。具体的には、身長156cm、体重69kg、BMI28(被験者 D)と、身長171cm、体重57kg、BMI20(被験者 E)である。

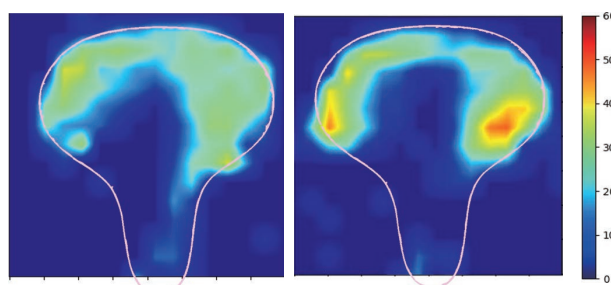


図16 着座時の臀部体圧分布(サドル P)
 (左:被験者 D、右:被験者 E)

図16より被験者 D は臀部全体に圧力がかかっているが、被験者 E は座骨部に局所的な圧力が発生していることが分かる。この時、被験者 D は圧迫感についての言及はなく、被験者 E は座骨部の圧迫感について言及していた。つまり、体格の差によっても圧迫感を覚える場所が異なることが分かる。

最後に“許容圧力”について述べる。横軸に圧迫感の評点(座骨部に対する圧迫感。評点が低いと圧迫感がある)を、縦軸に該当部位の最大圧力をプロットした結果を示す(図17)。

●が圧迫感を感じた人、○が感じていない人を示している。

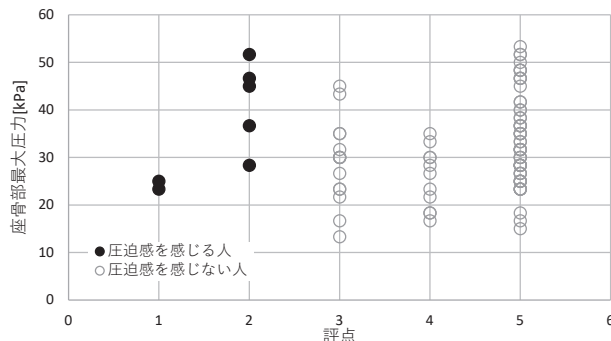


図17 座骨最大圧力と圧迫感の評点の関係性

図から、“圧力が高くて評点が低い＝座骨の最大圧力が高くそれを不快に感じている人”、“圧力が高くて評点が高い＝座骨の最大圧力が高いが圧迫感を感じない人”がいることがわかる。このように最大圧力と圧迫感に明確な相関性がみられない理由としては、圧迫感に対して最大圧力以外の因子も影響していることや人による圧力の感じ方に違いがあったことが考えられる。これらについては先行研究^[7]でも同様なことが示唆されている。

以上より、感性価値の予測式精度向上のためには、着座位置に影響を及ぼす身体情報(腕、足の長さなど)、および体圧分布に影響を及ぼす体格情報を明らかにして、人の属性情報から着座時の体圧分布を予測する技術と、人が不快に感じる圧力閾値(＝許容圧力)を予測する技術が必要になる。

前者はFEMなどのシミュレーション技術を用いることで、後者は人に対する圧迫感・圧力の計測数を増やし、累積確率密度などの統計的手法などを用いることで、対策が可能であると考えられる。

4 結論と課題

本稿では電動アシスト自転車(シティ車)のサドルを対象とし、設計値から嗜好に合わせた感性価値を予測するために、嗜好の違いの要因分析と、感性価値に影響を与える要因分析を試みた。

2つの検証から以下の結果を得た。

(1) 検証1 嗜好の違いの要因

サドルに対して乗り心地の嗜好性があり、嗜好ごとに重要視する感性価値が異なることが分かった。嗜好で分けたクラスター間にはBMI、走行環境、運動習慣の違いがあることが示唆された。

(2) 検証2 感性価値に影響を与える要因

専門家評点とサドル物理量を用いて感性価値の物理予測式を構築した。予測評点とユーザーの評点の差が大きかった“圧迫感”においては、“性差”、“乗車位置”、“体格”、“許容圧力”の4つの要因が評価結果に影響を与えることが示唆された。

これらの知見を生かして開発されたサドルが現在市販されており、微力ではあるが製品開発に貢献することができた。

今後は、狙ったユーザーに対し感性価値を高める技術の構築を目指す。そのために、嗜好の違いと感性価値の違いを生む要因の検証を行い、予測式に組み込むユーザー属性を検討する。これにより、嗜好を考慮した感性価値を予測できる技術の獲得を目指していく。

■謝辞

本研究にあたり、貴重なご指導をいただいた静岡大学大学院情報学領域の梶原千里准教授に改めて深謝の意を表します。

■参考文献

- [1] 高橋, 中村, 林「サドルの体圧分布に関する調査研究第2報」自転車技術情報, 1984, No. 24, pp. 1-19
- [2] 棟近, 三輪「感性品質の調査に用いる評価用語選定の指針」品質, Vol. 30, No. 4, pp. 96-108
- [3] 田中, 棟近「飲料缶に関する感性品質の評価方法」日本品質管理学会第64回研究発表要旨集, 2000, pp. 69-72
- [4] JASOB407-87 自動車用シートのクッション性試験方法

[5] JISD9313-7 自転車—第7部:座席装置の試験方法

[6] 岡本「触力学による柔らかさ・硬さ知覚」システム制御情報学会誌, 2020, Vol. 64, No. 4, pp. 121-125

[7] 眞谷, 加藤, 中村「圧力感度分布に基づく座り心地改善手法」自技会春季大会学術講演予稿集, 2023, No. 126

■著者



丹羽 将勝
Masakatsu Niwa
技術・研究本部
技術開発統括部
先進プロダクト開発部



小関 泰子
Taiko Koseki
技術・研究本部
技術開発統括部
先進プロダクト開発部



小林 光司
Koji Kobayashi
技術・研究本部
技術開発統括部
先進プロダクト開発部



藤田 英之
Hideyuki Fujita
技術・研究本部
技術開発統括部
先進プロダクト開発部



古澤 隆志
Takashi Furusawa
ランドモビリティ事業本部
SPV 事業部
第2開発部



中林 雄介
Yusuke Nakabayashi
ランドモビリティ事業本部
SPV 事業部
第2開発部



伊藤 努
Tsutomu Ito
ランドモビリティ事業本部
SPV 事業部
第2開発部



堀 啓一
Keiichi Hori
ランドモビリティ事業本部
SPV 事業部
第2開発部



芳賀 健太
Kenta Haga
ランドモビリティ事業本部
SPV 事業部
第2開発部

本稿は、一般財団法人 日本機械学会 第32回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2023) において「ポスターセッション優秀発表賞」を受賞した内容に基づくものであり、同会の許可を得て転載したものです。本論文の著作権は一般財団法人 日本機械学会に属し、無断複製・転載を禁じます。

要旨

二輪車の車両運動を解析する場合、必要な情報を直接計測し解析する手法が一般的であるが、センサの搭載に工数を要する場合が多い。そこで、計測に工数をかけなくとも、必要最小限の情報から「走る・止まる・曲がる」の運動解析を間接的に可能とする手法を構築した。搭載が容易な小型 GPS データロガーを用い、物体運動の基本である位置・速度を計測し、前後・横加速度を推定した。一例として、二輪車の操縦訓練に本手法を活用した。難易度を下げた単純な操作となる走行方法を導入した。指導員が行う技量判定の要素を明らかにする指標を設け、段階的に訓練を実施した。計測データを活用することで、被験者と指導員のコミュニケーションが充実し、訓練をより効果的にした取り組みの一事例について、紹介する。

Abstract

When analyzing the vehicle motion of a two-wheeled vehicle, there are general methods of directly measuring and analyzing necessary information available. But, it often requires man-hours to mount sensors on the vehicle. Therefore, we have created a method that indirectly enables the motion analysis of “driving, stopping, and turning” from the minimum necessary information without the need for spending man-hours on the measurement itself. Using a small GPS data logger that can be easily mounted on a vehicle, the position and velocity, which are the basics of object motion, can be measured, and the longitudinal and lateral acceleration can be estimated. As an example, this method was applied to motorcycle riding training. A riding method that reduces the level of difficulty and makes more simpler to operate was introduced. Indicators were set to clarify the elements that instructors use to judge skill, and training was carried out in stages. This article introduces one example of an initiative in which the use of measurement data improved communication between the rider and the instructor, making training more effective.

1 はじめに

二輪車の車両運動を解析する場合、必要な情報を直接計測し解析する手法が一般的であるが、センサの搭載に工数を要する場合が多い^[1]。そこで、計測に工数をかけなくとも、必要最小限の情報から「走る・止まる・曲がる」の運動解析を間接的に可能とする手法を構築した^[2]。

搭載が容易な小型 GPS データロガーを用い、物体運動の基本である位置・速度を計測し、前後・横加速度を推定した。一例として、二輪車の操縦訓練に本手法を活用した。

難易度を下げた単純な操作となる走行方法を導入した。指導員が行う技量判定の要素を明らかにする指標を設け、段階的に訓練を実施した。

2 車両運動の簡易計測システム

小型 GPS データロガーを用い、物体運動の基本である位置・速度を計測し、前後・横加速度を推定する。二輪車やライダーの複雑な運動をひとまとめにして、図1のように俯瞰的に見た一つの点の2次元的な動きとして考える。図2に示す小型 GPS データロガーは、位置・速度が計測可能で、搭載も容易であるが、加速度センサは内蔵されていない。そこで、サンプリング時間 Δt [s]、位置 x, y [m]、速度 v [m/s]、位置の変化により算出される方位角 θ [rad] から、以下の式を用いて、前後加速度 a_{LON} [m/s²]と横加速度 a_{LAT} [m/s²]を算出した。

$$\Delta\theta = \tan^{-1} (\Delta y \div \Delta x) \quad (1)$$

$$a_{\text{LON}} = \Delta v \div \Delta t \quad (2)$$

$$a_{\text{LAT}} = \Delta\theta \div \Delta t \times v \quad (3)$$

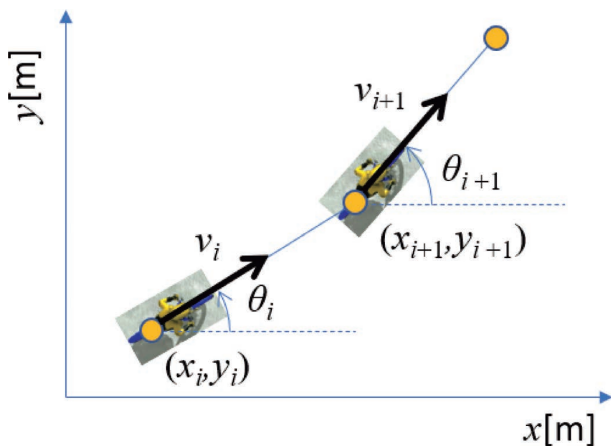


図1 GPS ロガーによる位置と速度の計測



図2 小型 GPS ロガー

3 二輪車の運転特性

GPS ロガーにて位置・速度を計測、前後・横加速度を推定する手法を構築した。一例として、二輪車の操縦訓練に本手法を活用し、有効性について検証する。運転特性の抽出を容易にするため、ライン取りの影響が大きい複合的なコース形状や、難易度の高い極端な小旋回は避け、走行が容易と考える巡回半径6m、直線距離30mの左回りオーバルコースを走路として工学的に設定した。車両は排気量600cm³の大型車を使用し、使用するギアは2速とした。次に、コース走行時の教示方法について検討する。1セット目は一定速度での走行とし、「曲がる」の運転特性を抽出する。2セット目は、直線路で加減速操作を行う。運転特性の差が出にくいコース設定と想定していたが、指導員と被験者の差が顕著に表れた(図3～5)。その結果、ライダー被験者の「走る・止まる・曲がる」の運転特性を、定性的に抽出できた。

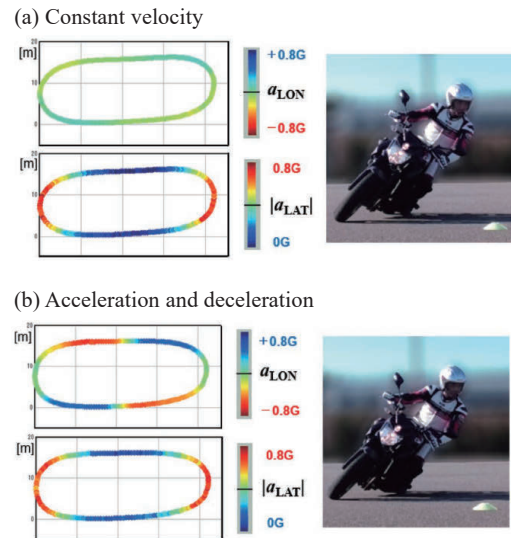


図3 指導員の運転特性

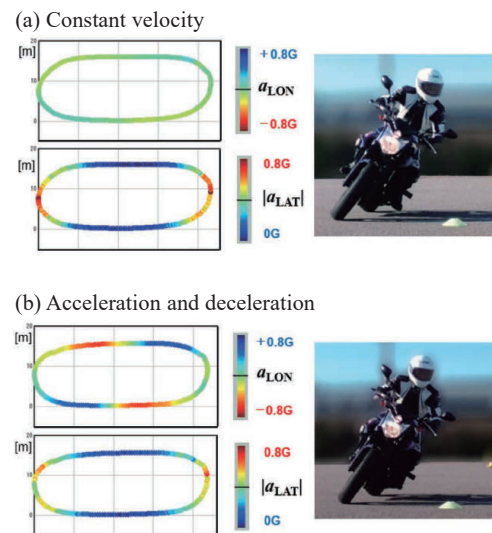


図4 被験者の運転特性(訓練前)

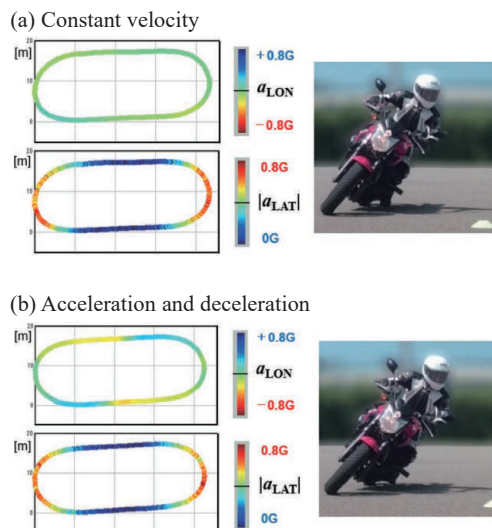


図5 被験者の運転特性(訓練後)

4 二輪車の運転熟練度

二輪車の実験開発業務において、確実な開発品質を導出する為には、適切な運転操作での仕様間比較試験が必須となる。従って、操作の絶対値よりも、偏差が小さいことが非常に重要な要素となる。本論文では、再現性に着目した運転技術を「運転熟練度」と称し、「熟練度＝最大値＋偏差小」と定義、指標化を試みた。特に、訓練前後での成長度をよりわかりやすく表したい。様々なライダーの乗車姿勢の画像から、車両を傾ける技術に熟練度の差の一部が現れていた。今回は、R=6m 固定のため、計測データの一つである「車速」に注目した。旋回中の最低車速を抽出(N=5)し、棒グラフで表した(図6～8)。最大値と偏差(＝最大値－最小値)、加減速有無の影響が読み取れる。これにより、「熟練度＝最大値＋偏差小」の一部を指標化できる可能性を示すことができた。

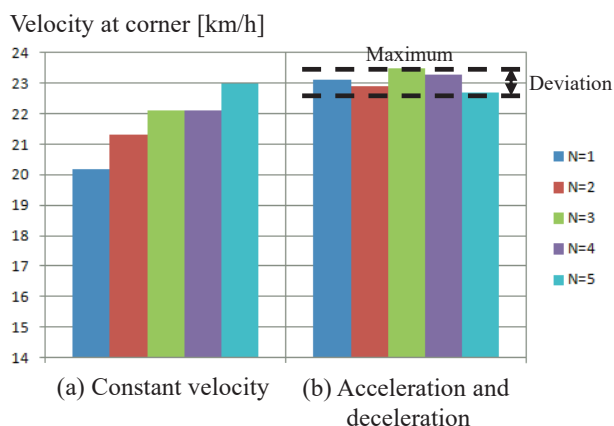


図6 指導員の運転熟練度

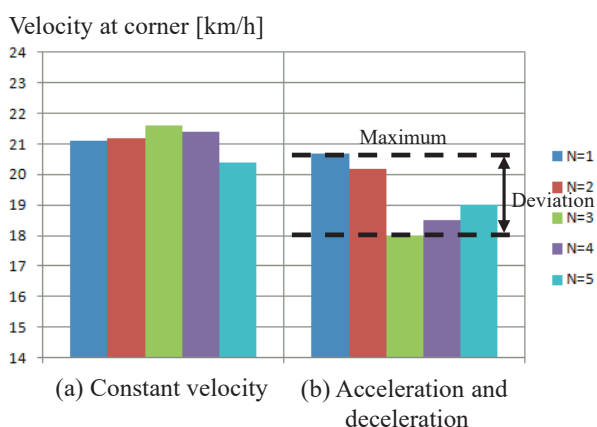


図7 被験者の運転熟練度(訓練前)

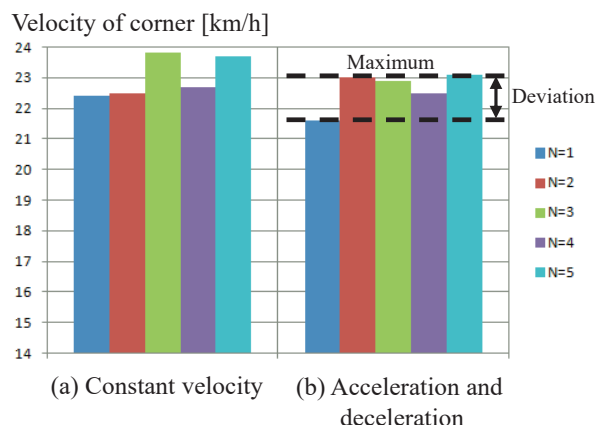


図8 被験者の運転熟練度(訓練後)

5 訓練方法の事例紹介

計測データから抽出した「走る・止まる・曲がる」の「運転特性」と、「旋回中の最低車速の最大値と偏差」に着目し、再現性の高い操縦技術を指標化した「運転熟練度」を用いた、訓練方法の一事例を紹介する。

5-1. 「運転特性」と「運転熟練度」

図4より、この被験者の「運転特性」は、一定速走行の旋回速度が低く、旋回中の乗車姿勢はリーンウイズであった。加減速操作を加えた走行では、一定速度での走行よりも旋回速度が低く、旋回中の乗車姿勢はリーニアウトになっていることがわかった。図7より、この被験者の「運転熟練度」は、一定速走行での旋回速度が低めであるものの、速度の偏差は少ない。加減速操作を加えた走行では、一定速度での走行よりも旋回速度が低くなり、速度の偏差が大きいことがわかった。

5-2. 訓練目標の設定

次に、被験者が自ら、抽出した現状の「運転特性」と「運転熟練度」を考察して現状を把握した。そして、自身が目指す成長の方向や訓練の目標を検討して、「旋回速度を高めたい」ことを目標として自己申告した。被験者と指導員が面談しコミュニケーションを深め、現状と目指す方向を共有した。旋回速度を高めるためには、車両を傾斜させなければならないことを相互に理解した。目標とする旋回速度に見合った車両傾斜角と乗車姿勢の両方が改善した「運転特性」と「運転熟練度」の習得を訓練目標として設定した。

5-3. 訓練方法の検討と実施

指導員は、被験者の自己申告と現状から訓練方法を検討した。この被験者は、車両を傾斜させることに課題を感じており、基礎訓練が必要であった。旋回半径6mの定常円旋回コースを設定し、速度と傾斜の関係を習得する訓練を行った。走行方法を教示し、走行ライン・車両傾斜角・乗車姿勢を観察して、常にコミュニケーションを取り、反復訓練で理解を深めて段階的に習得した。訓練後の傾斜角の増加に伴い乗車姿勢がリーニアウトになっていた。適切な乗車姿勢を習得するために、指導員と二名乗車で訓練を行った。被験者は後部座席で深い車両傾斜角を体験しながら、運転する指導員の乗車姿勢を見本にしてリーンウイズを学んだ。その後、被験者が自ら走行して反復訓練しリーンウイズを習得した。

5-4. 訓練成果

この被験者の訓練成果を、訓練後に実施したオーバルコース走行での「運転特性」と「運転熟練度」を用いて示す。図5より、「運転特性」は、一定速走行の旋回速度が高く、旋回中の乗車姿勢は美しいリーンウイズであった。加減速操作を加えた走行では、旋回速度が高く一定速度での走行と同等であった。旋回中の乗車姿勢は一定速度での走行と同様の美しいリーンウイズであることがわかった。訓練前に対し、明らかに「運転特性」が改善していた。図8より、「運転熟練度」は、一定速走行の旋回速度の最大値が向上していた。全体的な偏差はあるものの、訓練前に対し最大値が高い方向の偏差であり、N=5中N=3で偏差が極めて少なかった。加減速操作を加えた走行でも、一定速度での走行と同等に旋回速度の最大値が向上していた。全体的な偏差も少なく、N=5中N=4で偏差が少なかった。訓練前に対し、明らかに「運転熟練度」が向上していた。

5-5. 訓練の総括

二輪車の運転「走る・止まる・曲がる」を可視化する「運転特性」と、再現性の高い操縦技術を「運転熟練度」として指標化し、現状を明らかにすることができた。二輪車の操縦訓練に運用することで、被験者と指導員が現状と目標を具体的に共有することができた。被験者と指導員のコミュニケーションが充実し、段階的な訓練を実現した。その結果、効果的に被験者の操縦技術を向上することができた。

6 まとめ

計測に工数をかけなくとも、必要最小限の情報から「走る・止まる・曲がる」の運動解析を間接的に可能とする手法を構築した。車載が容易な小型 GPS データロガーを用い、物体運動の基本である位置・速度を計測し、前後・横加速度を推定した。一例として、二輪車の操縦訓練に本手法を活用した。難易度を下げた単純な操作となる走行方法を導入した。指導員が行う技量判定の要素を明らかにする指標を設け、段階的に訓練を実施した。計測データを活用することで、被験者と指導員のコミュニケーションが充実し、訓練がより効果的となる可能性を示すことができた。

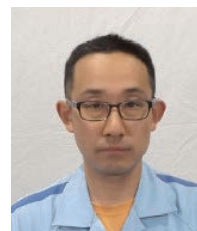
■参考文献

- [1] 藤井茂, 塩澤総一, 品川晃徳, 岸知昭, “二輪車の操縦特性調査”, ヤマハ発動機技報, No. 45(2009), pp. 2-13.
- [2] 品川晃徳, 小林寛, 小島儀隆, “二輪車・車両運動の簡易的な計測・解析技術の開発と活用”, ヤマハ発動機技報, No. 56(2021), pp. 131-136.

■著者



小島 儀隆
Yoshitaka Kojima
技術・研究本部
技術開発統括部
制御システム開発部



品川 晃徳
Akinori Shinagawa
技術・研究本部
技術開発統括部
制御システム開発部

感情状態の変化が感動の喚起に及ぼす影響

Kando could be evoked by a transition in emotional state

檜垣 秀一 栗本 佳祐 新田 吾一 水口 暢章 菅 唯志 末神 翔

要旨

本研究は感動喚起のために感情状態の変化が重要であるかを明らかにするため、感情を惹起させる2つの異なる画像を継時呈示して生み出した感情状態の差が感動の喚起に及ぼす影響を検討した。実験の結果、覚醒度が高まると感動が喚起されたことから、感情状態の変化が感動の喚起に必要であることが示唆された。

Abstract

This study examined the effect of transition in emotion on 'Kando.' Two different pictures were used to evoke emotion (s), and the participants rated the second picture using the Kando Reaction Scale. The results showed that the transition between emotions, rather than a single emotion, could evoke Kando.

1 はじめに

ヤマハ発動機(以降、当社とする)は企業目的に“感動創造企業”を掲げている。感動は多くの人が体験したことのある現象にもかかわらず、感動が喚起されるメカニズムやその効果については科学的に不明な点が多く、その学術的定義も不明瞭なのが現状である。当社は立命館大学と“感動(KANDO)を科学する”と題した共同研究を2022年から2024年にかけて実施した。その一環として Yasuda et al.^[1] は感動の性質を明らかにするための調査研究を実施し、感動は関連する現象(例えば英語で“心を動かされる”を意味する“being moved”や、サンスクリット語で“愛によって心を動かされる”を意味する“kama muta”など)を包摂する概念であるとした。さらに、感動体験を調査するための感動尺度を開発した^[2]。感動に関する先行研究としては他に、Tokaji^[3] が感動の構造モデルを提案している。感動の構造モデルによると、感動は事象や結果に対する期待感と、終結した事象に対する評価が行われることで喚起される。Tokaji の実験では、悲しみを伴う経験でも、その経験に対する最終的な評価が良いものであった場合、感動が喚起されることが示された。ただし、彼らの実験では事象に対する悲しみの有無のみが条件となっており、事象や結果に対する期待感と、終結した事象に対する評価との間でどのような感情の変化が生じたかについては言及されていない。また Tokaji は、感動は、低次の情動ではなく、より高次の認知的プロセスによって喚起されると述べているが、その実験的検証は行われていない。そこで本研究では、感動の喚起において感情状態の変化がおよぼす影響を実験的に検討することを目的とする。

2 実験方法

感動の喚起における感情状態の変化の影響を検討するため、異なる2つの画像を継時呈示する実験を実施した。具体的には、特定の感情を惹起させる画像(以降、標的画像とする)に対して感動尺度による評価を行う際、直前に標的画像と同じ感情、または、標的画像と異なる感情を惹起させる画像(以降、先行画像とする)を呈示し、先行画像と標的画像が惹起させる感情の違いが標的画像に対する感動尺度評価値に及ぼす影響を検討した。

2-1. 画像選定のための予備実験

本研究で使用した先行画像および標的画像はいずれも、OASISと呼ばれる画像データベースから選定した^[4]。OASISは感情価および覚醒度が7段階のリッカート尺度(回答者が設問に対してどの程度同意するかを評価するための尺度)によって評価された“動物”“物体”“人物”“風景”の4カテゴリで構成される900枚の画像からなるデータベースである。ただし、OASISが作成された米国と、本研究が実施された日本との宗教的・文化的背景の違いによる影響を考慮し、本研究では“風景”カテゴリに属する画像のみを用いた。本実験で使用する画像の選定においては、まず、1から7までの値を取る感情価と覚醒度の二軸が各軸の中間点で交差する二次元座標を作成した(図1。以降、画像評価座標とする)。なお、感情価と覚醒度とは Russell^[5] が提唱した感情状態を表現するための次元で、それぞれ快-不快、および、覚醒-沈静で構成される。その上で、先行研究^[4] で得られた感情価と覚醒度に基づいて各風景画像を画像評価座標に配置し、各象限から11枚ずつ画像を選定した。

操作チェックとして、選定した画像の感情価および覚醒度を

または覚醒度評価の中に、先行画像に対する感情価または覚醒度評価を課すダミー課題を織り交ぜた。ダミー課題には、予備実験による画像選定で採用されなかった画像が用いられ、各画像セットについて6試行用意された。ダミー試行は本実験の途中にランダムなタイミングで挿入された。

各参加者には8通りの画像セットのいずれかが割り当てられた。各試行ではまず先行画像が4,000ms 呈示され、先行画像の消失と同時に標的画像が呈示された。標的画像の呈示開始から4,000ms 後、標的画像の感情価または覚醒度の評価のための7段階リッカート尺度が画面に呈示された。標的画像の感情価または覚醒度に対する評価の取得後、標的画像と7段階リッカート尺度の消失とともに、標的画像が次の先行画像に及ぼす影響を減らすためにランダムドットパターンが1,000ms 呈示された。その後、次試行が開始された。ダミー課題6試行を含めた計22試行の実施をもって感情価・覚醒度評価実験を終了し、各参加者は任意に休憩をとることができた。各参加者は任意のタイミングで次の感動尺度評価実験に移行した。

2-2-2. 感動尺度評価実験

標的画像に対して感動尺度による評価を行う課題を、感情価・覚醒度評価実験に参加した118名が同日に行った。なお、感動尺度評価実験は感情価・覚醒度評価実験の後に実施した。

課題ではまず教示として、標的画像を見たときに感じた印象について、感動尺度の43項目の各質問に対してどの程度当てはまるかを、7段階で回答するよう文章で説明した。先行研究では、ネガティブな過程を経ることはあっても、最終的には対象となる事象に価値を見いだしてポジティブな経験となった場合に感動が喚起されることが示唆されているため^[6]、半数の参加者では第一象限(感情価が“快”、覚醒度が“覚醒”)に属する画像、残りの半数の参加者では第四象限(感情価が“快”、覚醒度が“鎮静”)に属する画像が、それぞれ標的画像として呈示された。参加者は、第一象限または第四象限のいずれかに属する標的画像が含まれる4組のペアに対し、感動尺度の各項目について評価した。なお、各参加者が評価した4ペアの標的画像は異なる画像であり、各標的画像にペアとして組み合わせられた先行画像は第一象限から第四象限の画像が1枚ずつ用いられた。

各試行ではまず先行画像が4,000ms 呈示され、先行画像の消失と同時に標的画像が呈示された。その後、標的画像について、感動尺度の43項目を1項目ずつ順に7段階リッカート尺度で評価した。標的画像は感動尺度の全43項目について評価が終了するまで呈示された。感動尺度の評価の終了をもって、標的画像と7段階リッカート尺度が消失すると同時に、標的画像が次の先行画像に及ぼす影響を減らすためにランダムドットパ

タンが1,000ms 呈示された。ランダムドットパタンの消失後、改めて教示を呈示して次試行に移行し、計4試行実施した。

2-2-3. 単一画像評価実験

本実験で使用された画像について、予備実験の結果から想定された感情価および覚醒度が本実験の参加者でも得られたかどうかを確認するため、感情価・覚醒度評価実験、および、感動尺度評価実験の実施から1カ月以上経過後、予備実験と同様に各画像に対する感情価または覚醒度を評価するオンライン質問紙を実施した。本実験に参加した118名のうち96名(男性82名、女性14名。平均年齢36.9歳、標準偏差10.3)から回答が得られた。オンライン質問紙では、参加者は予備実験で用いられたものと同じ44枚の画像に対し、予備実験で実施した評価と同じ感情価または覚醒度のどちらか一つのみを、予備実験と同様の7段階リッカート尺度にて評価した。

3 結果と考察

3-1. 感情価・覚醒度評価実験

各象限の標的画像において、先行画像の象限ごとに感情価または覚醒度の全参加者平均を算出した。その上で、先行画像の影響を検討するため、単一画像評価実験における象限ごとの標的画像に対する感情価および覚醒度の参加者平均を算出し、感情価・覚醒度評価実験の結果と比較した(図3)。全体の傾向として、単一画像評価実験で感情価が高かった(感情価が4を超えていた)標的画像は、感情価・覚醒度評価実験での感情価は単一画像評価実験で得られた感情価よりも低かった。また、単一画像評価実験で感情価が低かった(感情価が4未満だった)標的画像は、感情価・覚醒度評価実験での感情価は単一画像評価実験で得られた感情価よりも高かった。さらに、覚醒度においても感情価と同様の傾向がみられた。

単一画像評価実験では感情価・覚醒度評価実験と同一の画像が用いられたため、単一画像評価実験の実施日から1カ月以上の期間が経過していたとはいえ、画像に対する慣れの影響で、初見である感情価・覚醒度評価実験よりも感情価および覚醒度が低く評価されると予測される。しかし本実験の結果では、初見のため最も感情価および覚醒度の評価が顕著となるはずの感情価・覚醒度評価実験で、二度目の評価である単一画像評価実験時よりも感情価および覚醒度が中立値(感情価、覚醒度いずれも4)に近かった。このことは、先行画像の感情価および覚醒度が、標的画像に対する感情価および覚醒度に影響した、すなわち、先行画像によって標的画像が惹起する感情状態が異なったことを示すと考えられる。

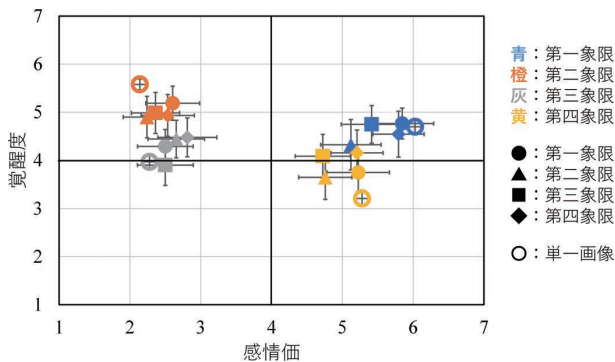


図3 感情価・覚醒度評価結果

プロットは平均値を示しており、色が標的画像の想定象限、形が先行画像の想定象限を示す。また、エラーバーは95%信頼区間を示す。

3-2. 感動尺度評価実験

標的画像と先行画像のペアごとに、感動尺度における感動因子の得点の全参加者平均を算出した。標的画像が同一、かつ、先行画像が異なる象限に属する4ペアに対してクラスカル・ウォリス検定¹⁾を実施した結果、第一象限に属する標的画像8枚のうち6枚において、先行画像の違いによって感動因子得点に有意な差が認められた($p < .030$)。さらに統計的な有意差が得られたペアに対し、下位検定としてマンホイットニーの U 検定(多重比較のため p 値をボンフェローニ法により補正)を実施したところ、24ペアのうち7ペアにおいて先行画像の違いによって感動因子得点に有意な差が認められた(表1)。

1) 各ペアの評価者は6名程度であり正規性を担保できないので、ノンパラメトリック検定であるクラスカル・ウォリス検定を実施した。

3-2-1. 感動生起に特徴的な感情状態変化の検証

先行画像の違いによって標的画像に対する感動因子得点に統計的な有意差が認められた各ペアに対し、感動生起に特徴的な感情状態変化を検討するため、先行画像と標的画像のそれぞれに対する感情価および覚醒度評価の差分(以降、それぞれ感情価変化量、および、覚醒度変化量とする)を算出し、感動因子得点が高いペア(以降、感動ペアとする)と感動因子得点が小さいペア(以降、非感動ペアとする)との間でマンホイットニーの U 検定を行った(図4)。

まず、感情価変化量においては、感動ペア(平均値 0.972、標準偏差 2.10)と非感動ペア(平均値 0.938、標準偏差 1.97)との間に統計的な有意差は認められなかった($p = .871$)。感動ペアと非感動ペアそれぞれについてウィルコクソンの符号順位検定を実施したところ、いずれのペアにおいても標的画像に対する感情価は先行画像に対する感情価よりも統計的に有意に高かった(感動ペア $p = .009$ 、非感動ペア $p = .016$)。これらの結果から、先行画像に続いて標的画像を呈示することで感情価

表1 感動因子の差異に関する検定結果

標的画像	先行画像と所属象限	標的画像に対する感動因子得点	p 値
画像1 	画像26(第四象限) 	3.50	.002
	画像18(第三象限) 	1.75	
画像2 	画像9(第二象限) 	4.33	.001
	画像25(第四象限) 	2.57	
画像3 	画像20(第三象限) 	3.70	.003
	画像12(第二象限) 	2.13	
画像4 	画像27(第四象限) 	3.93	.007
	画像3(第一象限) 	2.23	
画像4 	画像19(第三象限) 	3.43	.010
	画像3(第一象限) 	2.23	
画像5 	画像30(第四象限) 	3.53	.042
	画像6(第一象限) 	2.37	
画像7 	画像8(第一象限) 	3.70	.021
	画像32(第四象限) 	2.17	

数字は図2に示した画像番号。先行画像列上側が有意に感動因子得点が高かった画像ペア。

が快方向に変化しても、標的画像に対する感動因子得点には影響しないことが示唆された。

一方、覚醒度変化量においては感動ペア(平均値 0.900、標準偏差 2.11)の方が非感動ペア(平均値 -0.075、標準偏差 2.34)よりも変化量が大きい傾向が認められた($p=.050$)。感動ペアと非感動ペアそれぞれについてウィルコクソンの符号順位検定を実施したところ、感動ペアにおいては標的画像に対する覚醒度は先行画像に対する覚醒度よりも有意に高かった($p=.028$)。しかし、非感動ペアでは標的画像と先行画像それぞれに対する覚醒度に統計的な有意差は認められなかった($p=.823$)。これらの結果から、先行画像に続いて標的画像を呈示することで覚醒度が覚醒方向に変化すると、標的画像に対する感動因子得点は高くなることが示唆された。先行研究^[3]では感動事象における結果とプロセスのギャップが感動喚起に重要であることが示唆されていたが、本研究の結果は覚醒度が覚醒方向に変化することがギャップとして機能して感動を喚起する可能性を示している。

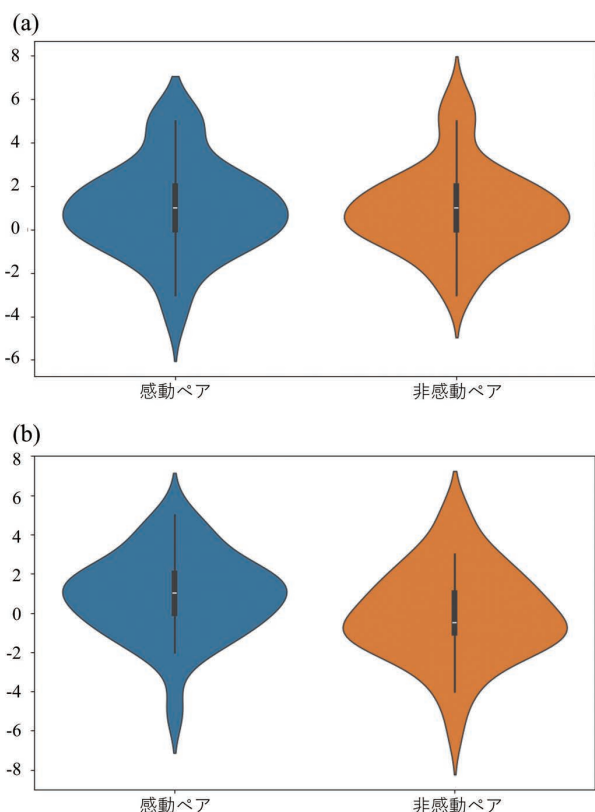


図4 感動ペアと非感動ペア間における感情状態変化
(a)は感情価、(b)は覚醒度。

3-2-2. 感動生起と感情状態変化の因果関係の検証

感動が喚起されたことで感情価や覚醒度が変化したのか、それとも、感情価や覚醒度が変化したことで感動が喚起された

のかを検討するため、先行画像の違いによって標的画像に対する感動因子得点に統計的な有意差が認められた各ペアの標的画像に対し、感情価・覚醒度評価実験と単一画像評価実験における感情価および覚醒度の差分(以降、それぞれ感情価評価変化量、および、覚醒度評価変化量とする)について、感動ペアと非感動ペアでマンホイットニーのU検定を実施した(図5)。その結果、感情価評価変化量においては感動ペア(平均値 -0.639、標準偏差 1.96)と非感動ペア(平均値 -0.125、標準偏差 1.43)との間に統計的な有意差は認められなかった($p=.353$)。同様に、覚醒度評価変化量においても感動ペア(平均値 -0.250、標準偏差 1.62)と非感動ペア(平均値 -0.475、標準偏差 2.15)との間に統計的な有意差は認められなかった($p=.422$)。これらの結果は、標的画像が感動を喚起させたかどうかは、感情価や覚醒度に影響しないことを示唆する。よって、本研究で得られた先行画像の違いによる標的画像に対する感動因子評価の差は、先行画像と標的画像を継時呈示することで覚醒度が変化したために感動が喚起された可能性を示し、標的画像によって感動が喚起されたことで標的画像に対する覚醒度が変化したのではないことが推察できる。

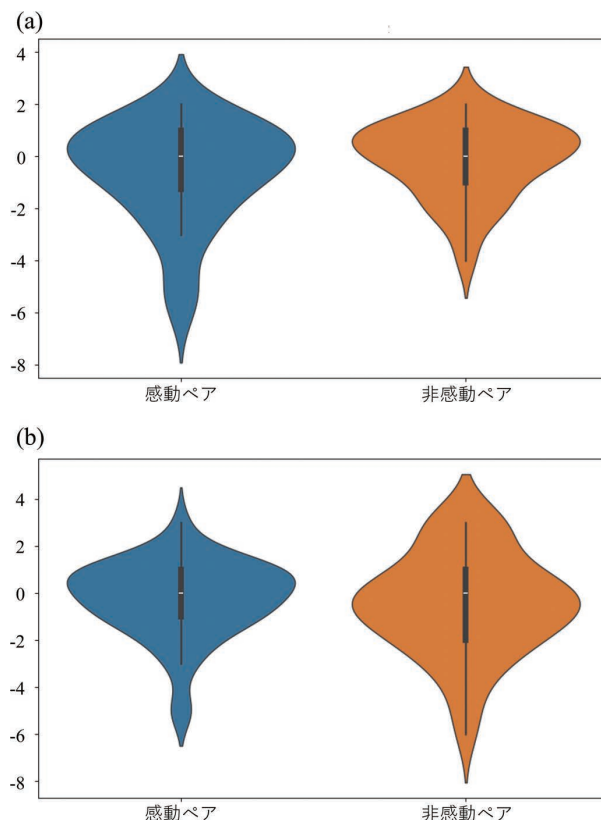


図5 感動ペアと非感動ペア間における感情価・覚醒度
評価実験と単一呈示画像評価実験の差
(a)は感情価、(b)は覚醒度。

4 総合考察

本研究では感動の喚起において感情状態の変化が及ぼす影響について明らかにするため、それぞれが感情を惹起する異なる2つの画像を継時呈示することで生じさせた感情状態の差が、感動の喚起に及ぼす影響を実験的に検討した。実験の結果、まず、感情を惹起する他の画像を呈示した後に対象となる画像を呈示した場合、対象となる画像を単体で呈示した時とは、対象となる画像に対する感情価および覚醒度が異なる可能性が示された。このことから、本研究では異なる画像を継時呈示することで感情状態に変化を生じさせた可能性が高いといえる。

次に、感情を惹起する他の画像を呈示した後に対象となる画像を呈示した場合、対象となる画像が喚起する感動の強度が変化することが示唆された。一方、対象となる画像が感動を喚起させたかどうかは、感情状態に影響を及ぼさなかった。これらの結果から、感動は感情状態の変化によって喚起されると推察できる。

さらに、感情価が快方向に変化した場合でも、感動が喚起される場合と、喚起されない場合があることが示された。このことから、感情価の増大は感動喚起の十分条件ではないと考えられる。一方、覚醒度が覚醒方向に変化した場合は感動が喚起されることが示唆された。本研究の結果だけでは、感情価と覚醒度が共に高くなることで感動が喚起されるのか、それとも、感情価によらず覚醒度が高くなることで感動が喚起されるのかを論じることはできない。感情価と覚醒度それぞれが感動の喚起にどう関与するのか、今後のさらなる検討が望まれる。

先行研究^[6]ではネガティブな過程を経ることはあっても、最終的には対象となる事象に価値を見いだしてポジティブな経験となった場合に感動が喚起されることが示されており、このことは感情価が快方向に変化することで感動が喚起される可能性を示している。一方で本研究では、感情価のみの変化は感動の喚起に影響しなかった。この点については、先行研究では、感情価と覚醒度を明確に区別していなかったことに加え、感情を惹起させる方法の違いも影響していた可能性がある。すなわち、先行研究では感情を惹起させるため参加者に小説を用いてストーリーを想起させたが、本研究では感情の惹起に風景の静止画像が使用されたため、惹起された感情が先行研究に比べて弱かった可能性がある。これらの点についてはさらなる検討が必要であるが、少なくとも本研究から示された覚醒度が覚醒方向に変化することで感動が喚起されるという結果は、感情状態の変化が感動の喚起に影響するという先行研究の結果と矛盾せず、感動の喚起において感情価だけでなく覚醒度の変化も重要である可能性も示しており、感動のメカニズム解明の一助となる成果である。

また、本研究の結果は感情価、および、覚醒度の変化が感動の喚起とは独立する可能性も示しており、このことから感情価や覚醒度の評価と感動の喚起が異なるプロセスであると考えられる。これは、感動は、喜びや悲しみといった低次の情動とは異なると主張した先行研究^[3]とも一致しており、感情価や覚醒度といった感情状態の変化に対して、感動というラベル付けを行う認知的プロセスによって感動が喚起されるという説を支持する。このことから、画像呈示や体験の想起など何らかの手段によって単純に感情を惹起させるよりも、感情状態を変化させる過程を考慮し、その感情状態の変化に対して感動というラベル付けを行う認知的プロセスを設定することで、より効果的に感動を喚起させることができると考えられる。

5 今後の展開

本研究から、感動の喚起には、感情の惹起だけでなく、感情の時系列変化を認知するプロセスが必要であることが示唆された。このことから、感情の時系列変化にストーリーや文脈を付加して感情の時系列変化を認知しやすくすれば、より感動が喚起されやすくなると推測できる。例えば本研究のように先行画像に続いて標的画像を呈示するような実験では、2つの画像に文脈やストーリーを付加することで、標的画像に対する感動尺度評価を高くすることが可能かもしれない。文脈やストーリーを付加することが感動の喚起に有効であれば、ヤマハ発動機のさまざまな商材やサービスでさらなる感動を提供するための手掛かりになるため、今後さらなる研究が望まれる。

本研究で使用した感動尺度は8つの因子（あたたかさ、ポジティブ感情、畏怖、感動、驚き、克服、困難さ、爽快感、超越した力、鳥肌、涙）によって構成されているが、本研究では上記の8因子のうち感動因子に着目した。そのため本研究で得られた結果は感動因子に限定される可能性がある。そこで、今後は他の因子についても感情変化との関係について検討することで、感情変化と感動の喚起の関係性について汎用性の高い知見が得られると考えられる。また、感情価や覚醒度について生理指標を同時に計測することで、感動を喚起させるメカニズムに関する理論の精緻化はもちろん、人工的に感動を喚起するデバイス等の開発にもつながることが期待される。

■謝辞

本研究に対して多大なる助言をくださった立命館大学 正田 悠 助教（現：京都市立芸術大学 専任講師）、伊坂 忠夫 教授に厚く御礼申し上げます。また、実験協力者の方々にも重ねて御礼申し上げます。

■参考文献

- [1] Shoko Yasuda, et al. A review of psychological research on kando as an inclusive concept of moving experiences. *Frontiers in Psychology*, 2022.
- [2] Haruka Shoda, et al. Uncovering the essence of moving experiences in Japanese culture: Development and validation of a Kando Reaction Scale, *PLOS ONE*, in press.
- [3] Akihioko Tokaji, Research for determinant factors and features of emotional responses of “kandoh” (the state of being emotionally moved). *Japanese Psychological Research*, 2003.
- [4] Benedek Kurdi, et al. Introducing the open affective standardized image set (OASIS). *Behavior Research Methods*, 2017.
- [5] James A. Russell. A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1980.
- [6] 加藤樹里, ほか. 友情をテーマとする小説における別れ描写は感動を強めるか?—社会的価値の見出しによる媒介効果の検討—. *Japanese Journal of Research on Emotions*, 2017.

■著者



檜垣 秀一
Shuichi Higaki
技術・研究本部
技術開発統括部
プロジェクト推進部



栗本 佳祐
Keisuke Kurimoto
技術・研究本部
技術開発統括部
制御システム開発部



新田 吾一
Goichi Nitta
パワートレインユニット
PT 先行企画開発統括部
先導開発部



水口 暢章
Nobuaki Mizuguchi
立命館大学
総合科学技術研究機構



菅 唯志
Tadashi Suga
立命館大学
総合科学技術研究機構



末神 翔
Takashi Suegami
技術・研究本部
技術戦略部

ヤマハ発動機 技報企画委員会

委 員	荒 木 治	ヤマハモーターエンジニアリング(株) コーポレートデザイン部
	伊 藤 正 二	技術・研究本部 共創・新ビジネス開発部
	大 石 善 功	PF 車両ユニット PF 車両開発統括部 PF 戦略部
	岡 田 芳 郎	ヤマハモーターパワープロダクツ(株) 開発統括部 設計部
	奥 山 高 志	マリン事業本部 開発統括部 技術管理部
	菅 崎 拓 真	クリエイティブ本部 プランニングデザイン部
	神 田 大	ソリューション事業本部 UMS 事業推進部 開発部
	木 村 隆	ヤマハモーターハイドロリックシステム(株) 開発統括部 技術戦略部
	楠 木 寿 幸	ソリューション事業本部 ロボティクス事業部 技術統括部
	沢 淵 敦 志	パワートレインユニットプロダクト開発統括部 第2PT 設計部
	土 居 航 介	生産技術本部 材料技術部
	野澤 伸治郎	ランドモビリティ事業本部 SPV 事業部 第1開発部
	原 以 起	マリン事業本部 開発統括部 先行開発部
	村 松 恭 行	技術・研究本部 共創・新ビジネス開発部

編集事務局	池 田 厚 司	人事総務本部 法務・知財部
	田 中 裕	人事総務本部 法務・知財部
	三 宅 英 典	クリエイティブ本部 ブランドマーケティング部
	菅 崎 拓 真	クリエイティブ本部 プランニングデザイン部
	加 藤 隆 輔	技術・研究本部 技術戦略部
	片 川 純	技術・研究本部 技術戦略部
	久 米 裕 子	技術・研究本部 技術戦略部

ヤマハ発動機 技報 第59号

YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW 2024 No.59

印 刷 2024年12月 1 日

発 行 2024年12月 2 日

発 行 所 ヤマハ発動機 株式会社
〒438-8501 静岡県磐田市新貝2500発 行 人 丸山 平二
デ ザ イン レタープレス株式会社印 刷 所 レタープレス株式会社
〒739-1752 広島県広島市安佐北区上深川町809-5お問い合わせ 技報編集事務局 TEL 0538-37-1864
(技術・研究本部 技術戦略部)ホームページ https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/

※無断転載を禁じます。
※落丁本・乱丁本は、小社技報編集事務局
宛てにお送りください。お取替えいたします。



ヤマハ発動機株式会社
〒438-8501 静岡県磐田市新貝2500