



# YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW



No.56 2021  
ヤマハ発動機 技報

**巻頭言**

ART for Human Possibilities	5
丸山 平二	

**特集 ART for Human Possibilities**

Global モデル ALL NEW 「NMAX」の開発	8
竹花 大貴 石川 陽平 水澤 幸司 柴田 雅徳 鈴木 竜太 大橋 直人 山田 宗幸 有松 和也	
The Smartest Commuting Way 「TRICITY300」の開発	13
浅野 大輔	
新操船システム「Helm Master EX」の開発	18
伊藤 誠 内藤 克俊 田形 彰大	
Dual Suspension eMTB の開発	22
渡邊 岳 江口 宗光 中林 雄介 関屋 広彰	
産業用ロボットサポートソフト「RCX-Studio 2020」の紹介	25
夏秋 力也	
果樹園向け多用途自動走行車と省力樹形、車両管理 IoT システム	30
石山 健二 本田 士郎 今井 浩久	

**製品紹介**

Fun master of Super Sport 「YZF-R7」の開発	38
今村 充利 脇本 洋治郎 蓮見 洋祐 柳原 慶志 南雲 正智 木下 保宏	
Ténéré 700の開発	43
白石 卓士郎 Stefano Galimberti Stefano Sarti Paolo Barlaam Leon Oosterhof	
The Rodeo Master 「MT-09/SP」	48
Multirole fighter of the Motorcycle 「TRACER 9 GT」	
北村 悠	
船外機「F/FL300F」の開発	55
琴野 瑛仁 対馬 翔大	
プレジャーボート「AX220」	60
望月 保志	
2021年モデル ROV WOLVERINE RMAX2/RMAX4	65
杉浦 利一 野口 浩穎 江島 誠 中村 信一郎 日高 史博	
2021モデル Drive2 PowerTech AC ゴルフカーの製品紹介	71
佐藤 佑也 宮田 彰一郎	

**技術紹介**

バイファンクションヘッドライトモジュールの開発	75
山田 卓央 干場 純 井上 武宏	
最適工法で業界最軽量級を実現する、YAMAHA SPINFORGED WHEEL	79
末永 健太郎 大島 かほり 香島 仁 塚本 耕平 鈴木 康修 松原 圭佑	
技術理論値で挑む新世代アルミ DC フレーム開発	84
乾 雄太 大嶋 崇之 前田 智仁	
Rh 代替合金材料の二輪車用排出ガス触媒適用評価	88
赤穂 夏来 多々良 俊哉	
レース用ヨット「国際470級ディンギー」の開発	93
原 以起 藤井 茂 服部 孝史	

ヤマハ発動機の森林計測／解析技術の紹介	99
矢嶋 準 ザンペイイ 原田 丈也	
ダイナミックマップ2.0を活用した自動運転車両に対するインフラ情報配信システム	104
今 健人 渡辺 仁	
EVミニカートレースを通じた電動制御技術／シミュレーション技術の向上	109
鷹野 雅一 藤原 朝記 友岡 祐弥 白澤 樹 鈴木 聖也	

## 技術論文

PWC中量生産工法開発と製造拠点再編	115
中辻 聰 横大路 裕信	
ボディシリンダのテクスチャリングによる低フリクション化技術	122
村瀬 雄太 伊東 明美	
二輪車・車両運動の簡易的な計測・解析技術の開発と活用	131
品川 晃徳 小林 寛 小島 儀隆	
圧粉コアを用いた小型モビリティ用モーターの開発	137
小林 孝幸 杉村 拓実 水谷 浩幸 栗田 洋敬	
The Tire Characteristic Effect on Motorcycle Maneuverability Using a Riding Simulator	144
三木 将行 木村 哲也	
Analysis of Cycle-to-Cycle Variation in a Port Injection Gasoline Engine by Simultaneous Measurement of Time Resolved PIV and PLIF	150
孕石 三太 渡辺 敬弘 飯田 実 保木本 聖 窪山 達也 森吉 泰生	

**Foreword**

ART for Human Possibilities	5
Heiji Maruyama	

**FEATURE ART for Human Possibilities**

Global model ALL NEW NMAX Development	8
Daiki Takehana Youhei Ishikawa Koji Mizusawa Masanori Shibata Ryuta Suzuki Naoto Ohashi Muneyuki Yamada Kazuya Arimatsu	
Development of the Smartest Commuting Way "TRICITY300"	13
Daisuke Asano	
Development of the new vessel maneuvering system "Helm Master EX"	18
Makoto Ito Katsutoshi Naito Akihiro Tagata	
Development of the Dual Suspension eMTB	22
Takeshi Watanabe Munemitsu Eguchi Yusuke Nakabayashi Hiroaki Sekiya	
"RCX-Studio 2020" industrial robot support software introduction	25
Rikiya Natsuaki	
Multi-purpose Autonomous Orchard Vehicles, Tree-shaping for Labor Saving, and Vehicle Management IoT System	30
Kenji Ishiyama Shirou Honda Hirohisa Imai	

**New Products**

Fun master of Super Sport "YZF-R7" development	38
Mitsutoshi Imamura Youjiro Wakimoto Yousuke Hasumi Keishi Yanagihara Masatomo Nagumo Yasuhiro Kinoshita	
Ténéré 700 Development	43
Takushiro Shiraishi Stefano Galimberti Stefano Sarti Paolo Barlaam Leon Oosterhof	
The Rodeo Master 「MT-09/SP」	48
Multirole fighter of the Motorcycle 「TRACER 9 GT」	
Yu Kitamura	
Development of the "F/FL300F" outboard motor	55
Akihito Kotono Shota Tsushima	
Pleasure boat "AX220"	60
Yasushi Mochizuki	
WOLVERINE RMAX2/RMAX4 2021 Model ROV	65
Toshikazu Sugiura Hiro Noguchi Makoto Eshima Shinichiro Nakamura Fumihiro Hidaka	
Product Introduction - 2021 Model Drive2 PowerTech AC Golf Car	71
Yuya Sato Shoichiro Miyata	

**New Technologies**

Bi-functional Headlight Module Development	75
Takahiro Yamada Jun Hoshiba Takehiro Inoue	
YAMAHA SPINFORGED WHEEL achieves the industry's lightest class with its optimum construction method	79
Kentaro Suenaga Kahori Oshima Hitoshi Kashima Kohei Tsukamoto Yasunobu Suzuki Keisuke Matsubara	
Development of challenging new generation aluminum DC framing using technological theory values	84
Yuta Inui Takayuki Oshima Tomohito Maeda	
Evaluation of the applicability for an exhaust gas catalyst for motorcycles made of Rh alternative alloy materials	88
Natsuki Ako Shunya Tatara	
Development of racing yacht "International 470 Class Dinghy"	93
Ioki Hara Shigeru Fujii Takafumi Hattori	

Introduction of Yamaha Motor's forest measurement & analysis technology	99
Jun Yajima Peii Tzaan Takeya Harada	
Digital transport infrastructure systems for automated driving systems using Dynamic Map 2.0	104
Kento Kon Hitoshi Watanabe	
Electric control & simulation technology improvement through EV mini cart racing	109
Masakazu Takano Asaki Fujiwara Yuya Tomooka Tatsuru Shirasawa Masaya Suzuki	

---

### Technical Papers

PWC medium-volume production method development and reorganization of manufacturing bases	115
Akira Nakatsuji Hironobu Yokooohji	
Low friction technology using textured body cylinders	122
Yuta Murase Akemi Ito	
Development of a Simplified Method for Measuring and Analyzing Motorcycle Dynamics	131
Akinori Shinagawa Hiroshi Kobayashi Yoshitaka Kojima	
Development of a Motor for Small Mobility with using Soft Magnetic Compound Cores	137
Takayuki Kobayashi Takumi Sugimura Hiroyuki Mizutani Hirotaka Kurita	
The Tire Characteristic Effect on Motorcycle Maneuverability Using a Riding Simulator	144
Masayuki Miki Tetsuya Kimura	
Analysis of Cycle-to-Cycle Variation in a Port Injection Gasoline Engine by Simultaneous Measurement of Time Resolved PIV and PLIF	150
Santa Haramiishi Takahiro Watanabe Minoru Iida Satoshi Hokimoto Tatsuya Kuboyama Yasuo Moriyoshi	

By responding to diversifying values, expanding, and supporting our human potential, Yamaha Motor has a long-term vision for its *ART for Human Possibilities* to help provide people around the world with more fulfilling lives and excitement.

On the other hand, the world is currently facing a major turning point, with various events such as CASE, carbon neutrality, pandemics, and an increase in natural disasters abounding, and it has been called a once-in-a-century period of change. I think that all our co-workers are exposed to this type of news every day and directly feel it. Under such circumstances, how should we think and work to realize our goals in *ART for Human Possibilities*?

When I talk with people on a daily basis, many are not sure about the direction of the company's technological developments, whether the company is sufficiently responding to the trends of the world, and whether the company's core technologies will no longer be applicable. Many of our co-workers are worried about the type of future we are headed for. I think it is very important to keep an eye on world trends and to have such anxieties = sense of crisis in order not to become what's known as the frog being slowly boiled. However, what is more important for us engineers is to analyze this anxiety properly, put it into technical issues, and take action to solve it. And in this way, we can expect that the answer will not only solve the problem but also move the situation in a better direction. In other words, it's about making the negative even more positive, not zero. I think that is one of the required forms of our *ART* initiative. For example, in terms of carbon neutrality, as was mentioned it in the new goals of the environmental plan 2050<sup>※1</sup>, we will continue to pursue the possibilities of various technologies, not limited to BEVs<sup>※2</sup>, in order to achieve the targets in our overall corporate activities. As well as reductions in product usage, we will also explore negative carbon technology that adsorbs CO<sub>2</sub>. In that challenge, there is a need for fun mobility that is close to people and how to create businesses that help to further enrich the world. In addition, many new technological developments are required to realize *ART for Human Possibilities*. While these new technologies may replace some core technologies of the past, they also expand our technology areas as add-ons.

There is an argument that all internal combustion engine vehicles will be replaced by BEVs and FCVs<sup>※3</sup> around 2030, but the energy mix is different between developed and emerging countries, and global resource allocation is possible. Considering this, regional differences and the sense of urgency should differ greatly. In the future, as a global company, we believe that it will be extremely important to be able to provide optimal solutions to customers in each region.

On the other hand, as our resources are limited, I think open innovation will become even more important. This is a collaboration with other companies, universities, governments, etc. with technologies in different fields. Unfortunately, we are still behind in this area and I feel that we all have a lot to do. From a different point of view however, there are still many possibilities and a lot more room for growth. Let's solve the problems of the world in a way that is uniquely Yamaha, and further develop robotics and mobility technologies to provide new value as we work towards realizing better lives for everyone. To that end, it is important to continue to challenge new technological fields with an open mind.

※1 Environmental Plan 2050: Yamaha Motor Co., Ltd. Corporate Site(Yamaha Motor Group Environmental Plan 2050/Overview-Corporate Site)[https://global.yamaha-motor.com/about/csr/the\\_environment/plan-2050/](https://global.yamaha-motor.com/about/csr/the_environment/plan-2050/)

※2 BEV: Battery Electric Vehicle - The motor is driven from electrical power from the battery

※3 FCV: Fuel Cell Vehicle - Generates electricity from a fuel cell to drive a motor



出典:ヤマハ発動機 統合報告書2021(2020年12月期)

当社は、多様化する価値観に応え、人間の可能性を伸ばしサポートすることで、世界の人々に豊かな生活と感動を提供する長期ビジョン ART for Human Possibilities を掲げています。

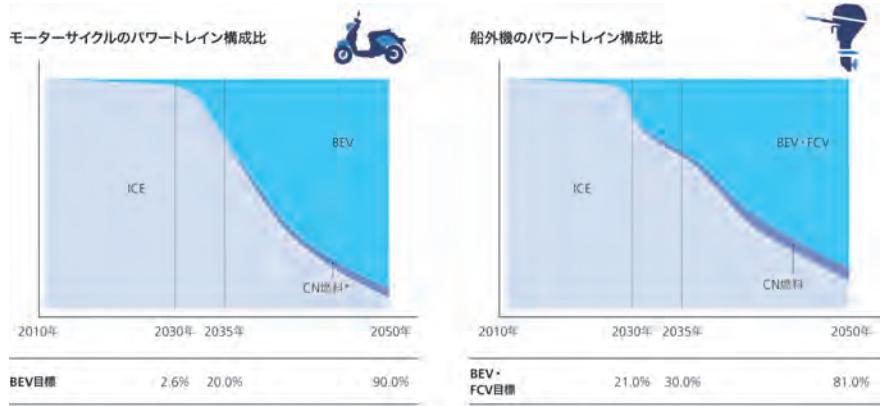
一方で、現在、CASE、カーボンニュートラル、パンデミック、自然災害の増加など様々な出来事があふれ、世の中は大きな転換期を迎えており、100年に一度の変革期とも呼ばれています。皆さんも毎日これらの情報に触れて実感されていることと思います。そのような状況下で私たちは ART for Human Possibilities を実現するために、どのように考え、取り組んでいけばよいのでしょうか。

日頃、皆さんと対話させていただくと、会社の技術開発の方向性が良くわからない、世の流れに対する対応は充分なのか、自分たちのコア技術が通用しなくなるのでは?などの不安の声を多く耳にします。常に世の流れを注視し、このような不安=危機感を持つことは、いわゆる茹でガエルにならないためには、非常に大事なことだと思います。しかしながら私たちエンジニアにとって、より大事なことは、この不安感をきちんと分析して技術課題に落とし込み、行動を起こして解決を図ることです。そしてその際には単なる課題解決だけではなく、状況をより良い方向へ向かわせるような答えが期待されます。つまり、マイナスをゼロではなく、更にプラスにすることです。それが、ART の求められる姿の一つなのだと考えます。

例えば、カーボンニュートラルに関して、環境計画2050<sup>※1</sup>の新目標の中でも触れましたが、企業活動全体での目標達成のために BEV<sup>※2</sup>に限らず、様々な技術の可能性を追求していきます。製品使用時での低減に加えて、CO2を吸着するネガティブカーボン技術も探索します。そのチャレンジの中で、人に寄り添える楽しいモビリティや世の中を豊かにするビジネスを如何にして生み出せるか、が求められているのです。

また、ART for Human Possibilities 実現のためには多くの新しい技術開発が必要となります。それらの新しい技術は、今までのコア技術にとって代わるものとなる可能性もありますが、アドオンとして私たちの技術領域を更に広げるものもあります。

世の中では2030年くらいには全ての内燃機関がBEVやFCV<sup>※3</sup>に取って代わられるのだ、との論調もありますが、先進国と新興国では、エネルギー・ミックスも違いますし、グローバルな資源配分を考えると、地域差や速度感が大きく違ってくるはずです。今後、我々がグローバル企業として、各地のお客様にその時々の最適なソリューションを提供できるか、が非常に大事になってくると考えています。



出典:ヤマハ発動機 統合報告書2021(2020年12月期)

一方で我々のリソースは限られており、オープンイノベーションがより重要になってくると思います。異なる領域の技術を持つ他の企業や大学、政府などとの連携です。残念ながら、この領域では、当社はまだまだ遅れていますが、やるべきことは多いと感じています。視点を換えると、まだ多くの可能性が広がっており、伸び代は大きいということです。

世の中の課題をヤマハらしく解決し、ロボティクスやモビリティの技術を更に発展させて新しい価値提供と豊かな生活を実現していきましょう。

そのためには、オープンマインドで新しい技術領域に挑戦し続けることが大事です。

※1 環境計画2050:ヤマハ発動機株式会社企業サイト(ヤマハ発動機グループ環境計画2050・概要 - 企業サイト)

<https://global.yamaha-motor.com/jp/profile/csr/environmental-field/plan-2050/>

※2 BEV:Battery Electric Vehicle バッテリーの電力でモーターを駆動する

※3 FCV:Fuel Cell Vehicle 燃料電池で発電しモーターを駆動する

## ■著者



丸山 平二  
Heiji Maruyama  
取締役上席執行役員  
技術・研究本部長

## 製品紹介

Global モデル ALL NEW「NMAX」の開発  
Global model ALL NEW NMAX Development

竹花 大貴 石川 陽平 水澤 幸司 柴田 雅徳  
鈴木 竜太 大橋 直人 山田 宗幸 有松 和也



## Abstract

NMAX has been revered by many customers all over the world since its first generation, but five years have passed since its introduction and the model has undergone a complete renewal in accordance with exhaust gas regulations. This is a global model popular around the world with minimal changes in specifications for each destination, but it takes on many varied roles in each country. In Europe, there is a high percentage of beginners who purchase motorcycles for the first time, along with a high percentage of women. On the other hand, in the ASEAN region, as a step up from the existing AT model, there are many men with relatively high incomes. What is common in all of this is that they are used daily for commuting to work and school. This model has been developed in pursuit of improved usability by enhancing the functions and equipment as a means of transport for daily use.

## 1 はじめに

「NMAX」は初代から世界中で多くのお客さまに受け入れていただいているが、導入から5年が経過し排出ガス法規対応とともに全面刷新を行った。本モデルは仕向地毎の仕様変更を最小限とし世界展開を行う Global モデルであるが、各国での役割は様々である。欧州ではバイクを初めて購入する初心者のお客様率も高く、女性の比率も高い。一方 ASEAN では既存 AT モデルからのステップアップとして、比較的所得の高い男性が多いことが特徴である。そのような背景でも共通しているのは、通勤・通学など日常の足として使っていただいていることである。本モデルでは、日常使う足として機能・装備の充実を図り、使い勝手の向上を追求し開発を行った。

## 2 開発の狙い

使い勝手向上のため、多くのフィーチャーを採用した。また初代から好評であったデザインをより洗練させ、さらなる上質感を表現した。さらに開発としては上記に述べた商品性向上に追加し、さらなる開発効率向上を行うため新しいプラットフォームエンジン／プラットフォームシャーシを開発した。

以下にモデルのフィーチャーマップを示す(図1)。

## 3 デザイン開発

## ～品格と信頼の相乗デザイン～

日々の生活での快適性・信頼性と、ビジネスクラスに乗るような優越感を両立するデザインコンセプト“Prestige Confidence”を目指し、下記3つをキーワードにデザイン開発を行った。



図1 フィーチャーマップ

### 3-1. 安心と信頼の独自シルエット

ライダーを包み込む「コクーン(繭:まゆ)」のようなシルエットにより安心感を表現した。加えて「MAXシリーズ」の象徴でもある前後の車軸を貫くサイドカバーは走りへの信頼感を表現した(図2)。

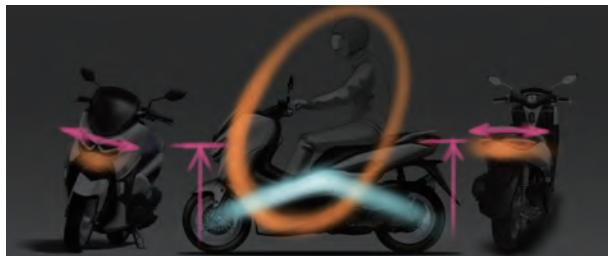


図2 デザインの表現イメージ

### 3-2. プライド×ユーティリティの両立

抑揚感をもつシンプルで深みのある面質でありながら、灯火器類を高めに配置するなど腰高な印象を持つことで、自慢しくなるような豊かで上質な造形美と日常生活で使いやすい軽快感を両立するスタイリングを目指した。

### 3-3. 「MAX」DNA の継承

アスリートの肉体のような力強いサイドカバーと前後タイヤを張り出したプロポーションにより「MAXシリーズ」にふさわしい高いスポーツ性を表現した。

またLED採用のヘッドライトは生命感のある2眼にこだわり、ロービーム点灯時に最も精悍な顔立ちを見せる(図3)。



図3 生命感にこだわった顔周り

## 4 各開発概要

主な開発内容を記す。

### 4-1. 「Yamaha Motorcycle Connect」

「もっと安心。もっと快適。そして、もっと楽しく。」をコンセプトに、新設計の CCU(Communication Control Unit)を搭載し、専用アプリ「Yamaha Motorcycle Connect (Y-Connect)」(図4)をインストールしたスマートフォンと連携することで、さまざまなサービスを実現している。エンジン回転数、スロットル開度などを表示する「Rev Dashboard」、バイクの利用状況に応じたエンジンオイルのメンテナンスリコメンド、第三者にもお知らせできる故障通知など、お客様へのさらに快適なスクータライフの提供を可能にした。

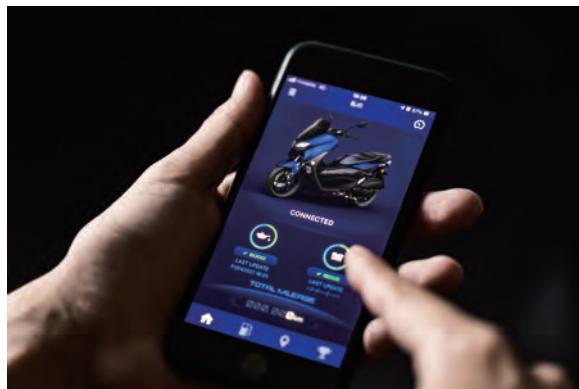


図4 「Y-Connect」

さらに、車両から取得したデータや位置情報はクラウドサービス(DAP-IoT ※当社コネクテッド基盤)に蓄積され、パーソナライズされたマーケティング施策の実現、次モデル企画への即时フィードバック、市場の使われ方に則した開発基準への反映など目的に応じた分析・活用が開始している。

本アプリケーションは継続的なバージョンアップが計画されており、これまでハードでは実現が難しかった購入後の価値向上にも挑戦している(2020年2月初版1.0.0リリース、2021年7月時点 Ver3.0.2にてサービス提供中)。

#### 4-2. 快適で上質な乗車感と便利機能

ベースモデルで評価の高いハンドリング、居住性を踏襲しつつ、乗車感と便利装備を、扱いやすさ、上質さ、快適さの視点で向上させることにより商品競争力を向上させた。

##### 4-2-1. 操縦安定性・ハンドリング

フレーム／エンジン懸架部品／クランクケースの剛性バランス調整、サスペンションのばね定数・減衰調整により、狙いの操縦安定性、ハンドリングを実現した。これに加えシート硬度の調整を加えることで乗り心地を向上させた。



図5 フレーム

フレームは剛性・強度への寄与率が高い主要構造部をプラットフォーム展開として他モデルと共通化した(図5青色部分)。

##### 4-2-2. 日常の利便性を向上させる収納

シート下 BOX 収納は XL ヘルメットの収納容量を確保しつつ、ヘルメットハンガーをシート下トランク前方左右各1カ所に追加し、日常の利便性を向上させた。さらにフロント収納では、収納するアイテムによって使い分けができるよう、ペットボトルが収納でき、給電ソケットがあるオープンタイプ(左側)とリッド付き(右側)の2種類を設定した(図6)。



図6 フロント収納

##### 4-2-3. 扱いやすく、見やすいメーター

メーター表示切替えスイッチを手元のハンドルスイッチに配置し、形状の作り込みにより操作性を向上させ、昼夜問わず視認しやすいサイズ(4.1インチ)とした。また、新規採用された「Y-Connect」機能で、見やすくデザイン性の高いインジケーターマークを開発し、採用した(図7)。



図7 メーターとハンドルスイッチ

##### 4-2-4. リヤサスペンション イニシャル調整

2段階のイニシャル調整構造を追加し、ライダー重量と積載に合わせた調整を可能とした。

調整構造には軽量で廉価な樹脂材料を採用し、手で操作可能な低トルクと握りやすい形状を実現した(図8)。



図8 イニシャル調整

#### 4-3. BLUE CORE 水冷エンジンのリファイン

ベースモデルで好評の、低速から高速まで伸びる力強いトルク特性と環境性能を両立したBLUE COREエンジンの基本設計を踏襲し、「NMAX」2代目エンジンとして新たな法規制や車両搭載性向上に対応した軽量・コンパクトなプラットフォームエンジンを開発した。ベースモデル同様、125cm<sup>3</sup>、155cm<sup>3</sup>、2つの排気量設定をしている。

##### 4-3-1. ハイレベルな排出ガス低減

一部販売地域向けに、二輪車としては最も厳しいレベルのEURO5排出ガス規制に適合する仕様とした。エンジン下部に触媒を配置し、燃焼室と触媒の距離を近づけることで、始動後早期の触媒活性を実現している(図9)。背反として、出力性能低下や触媒負荷増加の課題があったが、圧縮比、吸気レイアウト、触媒仕様、点火時期等を調整することで、ベースモデル同等の出力性能・信頼性を維持した。

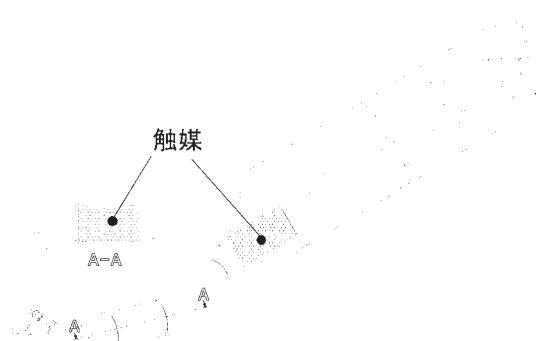


図9 触媒レイアウト

##### 4-3-2. プラットフォームとしての進化

本エンジンは、「NMAX」として43の国と地域に展開され、さらに「NMAX」以外の多くの車種に搭載されるプラットフォームエンジンとして開発した。全体最適により、エンジン部品点数の90%を共通仕様とした。残り10%は車種・排気量・販売国で仕様分けしているが、内部構成品を共通化するなど、差異は最小化している。仕様統合により、開発・調達・製造におけるQDC (Quality, Delivery, Cost)作り込みが効率的に行えている。

#### 4-4. 商品性や使い勝手を向上させる電装フィーチャー

##### 4-4-1. Smart Motor Generator

「NMAX」として、初めて「Smart Motor Generator」を採用した。ジェネレータに流す電流の向きにより、始動用モーターとして機能するため、従来の始動用モーターが不要となるだけでなく、ギヤの噛み合い音が無くなることで、静謐始動が可能となった。

##### 4-4-2. Stop & Start System

信号等で停車するとエンジンがすぐに停止、スロットル操作で再始動するStop & Start Systemを採用した(エンジン停止には一定の条件が必要)。

本機能により約9%の燃費向上を実現した(ECE R40モード社内テスト値)。停止間際、停止直後の再発進でも、その瞬間のエンジン回転速度やクランク位相に応じた再始動制御により、優れた再始動性を実現している。また、走行時の快適さ確保やバッテリ保護のために、走行状態やバッテリ状態を監視し、その状況に応じてシステムの作動を制限する制御を採用している。

##### 4-4-3. Communication Control Unit

スマートフォンと車両を接続するCommunication Control Unitを国内モデルとして初採用した。スマートフォンとはブルートゥースで接続され、エンジン回転数等の車両データや、メール着信等のスマートフォン情報を送受信することで、「Y-Connect」の各種機能を実現している。なお、汎用性を高めるため、42種類の情報を送受信できるように開発した。

##### 4-4-4. スマートキー

ポケットなどからキーを取り出すことなく、エンジン始動やシート下収納へのアクセスが可能となるスマートキーを採用した。

既存システムでは、フランジャー駆動機能をフランジャーーリーおよびスマートユニット(アンサーバック)が有していたが、車両システムの最適化を行い、メーターに集約することで既存機能を維持しつつ、システムコストを低減した。

## 5 おわりに

2020年初めのインドネシア発売を先頭に、世界各国への展開が広がっている本モデルであるが、本モデルで初めて仕向地として設定された国でも高評価をいただいている。コロナ禍で発表の場への参加やお客さまと直接お会いすることは叶わないが、我々の開発したモデルがお客さまの生活をより豊かにしていることを願う。

■著者



竹花 大貴

Daiki Takehana

PF 車両ユニット

PF 車両開発統括部

CV 開発部



石川 陽平

Youhei Ishikawa

パワートレインユニット

パワートレイン開発統括部

第1PT 開発部



水澤 幸司

Koji Mizusawa

パワートレインユニット

パワートレイン開発統括部

第1PT 開発部

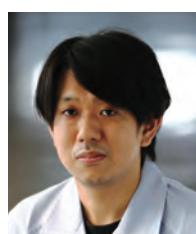


柴田 雅徳

Masanori Shibata

Yamaha Motor R&D

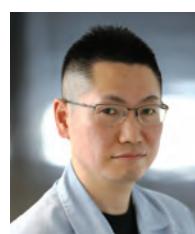
Taiwan Co., Ltd.



鈴木 竜太

Ryuta Suzuki

労働組合



大橋 直人

Naoto Ohashi

PF 車両ユニット

電子技術統括部

電子システム開発部



山田 宗幸

Muneyuki Yamada

ランドモビリティ事業本部

MC 事業部

グローバルプランディング統括部



有松 和也

Kazuya Arimatsu

ランドモビリティ事業本部

SPV 事業部

事業企画部

## 製品紹介

The Smartest Commuting Way 「TRICITY300」  
の開発

Development of the Smartest Commuting Way "TRICITY300"

浅野 大輔



## Abstract

In recent years, the speed of changes in the environments surrounding societies has rapidly increased. Under these circumstances, we have set "Transforming Mobility" as one of our focus areas in the long-term vision "ART for Human Possibilities" as we head toward 2030. LMW (Leaning Multi-Wheel) is one of the technologies that embodies "Transforming Mobility." Starting with "TRICITY 125" in 2014, "TRICITY 155" and "NIKEN" models have inspired a new appeal and a novel style that brings a more balanced feeling of stability and a sporty ride unique to front two-wheeled motorcycles. The "TRICITY 300" was developed as a commuter model for the LMW and as a high-end model of the "TRICITY series." This report introduces the development concept of the "TRICITY 300", as well as its product features and technical topics.

## 1 はじめに

近年、社会を取り巻く環境の変化はそのスピードを急速に上げている。そのような中で当社は、2030年に向けた長期ビジョン「ART for Human Possibilities」において、注力領域の一つに「Transforming Mobility (モビリティの変革)」を掲げている。LMW(リーニング・マルチ・ホイール)は「Transforming Mobility」を具現化した技術の一つであり、2014年の「TRICITY125」を皮切りに、「TRICITY155」や「NIKEN」を誕生させ、フロント二輪ならではの安定感とスポーティな走りを両立した新しい魅力や、斬新なスタイルを世の中に浸透させてきた。

「TRICITY300」はLMWのコミューターモデルとして、また、「TRICITYシリーズ」の上位機種として開発を行った。本稿では、「TRICITY300」の開発コンセプトや製品の特長、技術トピックスについて紹介する。

## 2 開発の狙い

LMWの第4弾として、「TRICITY」や「NIKEN」の開発で得られた知見や技術を活用もしくは応用し、開発に取り組んだ。"The Smartest Commuting Way"(賢い通勤手段)を開発コンセプトとして掲げ、日常的な移動や郊外などからの中・長距離



図1 フィーチャーマップ

の通勤などを想定し、LMWならではの安定感や安心感を生かすことで、お客様に快適な移動を提供できるコミューターの実現を目指した。四輪車からの乗り換えなど通勤方法の切り替えを考えているお客様や、「TRICITY」からのステップアップのお客さまを想定し、開発を行った。

### 3 製品の特長

コミューターとしてふさわしく、また、LMW機構の特長を生かすことのできる車体レイアウトとフィーチャーを採用している。図1にフィーチャーマップを示し、以下にその特長などを紹介する。

#### 3-1. 最適化された車体レイアウト

ライダーが好みの乗車姿勢を選ぶことができるよう、車体各部のレイアウトを行った。特にホイールベースは、ライダーが足を前方に伸ばした姿勢も選べることおよび、大径14インチのタイヤを配置することを考慮して決定した。また、これまでのLMWモデルと同様に、前後荷重配分を約50%:50%（1名乗車時）とし、優れた操縦性に貢献している。

#### 3-2. 専用設計のLMW機構

「TRICITYシリーズ」で実績のあるパラレログラムリンクや片持ちテレスコピックサスペンションなどを「TRICITY300」のレイアウトに最適化し、新たに設計を行った。リーニング機構の動きによるタイヤ等の軌跡を乗車空間から遠ざけ、乗車空間を大きく取れるレイアウトとすることを狙い、パラレログラム回転軸の仰角を決定した（図2）。また、「NIKEN」と同じくLMWアッ

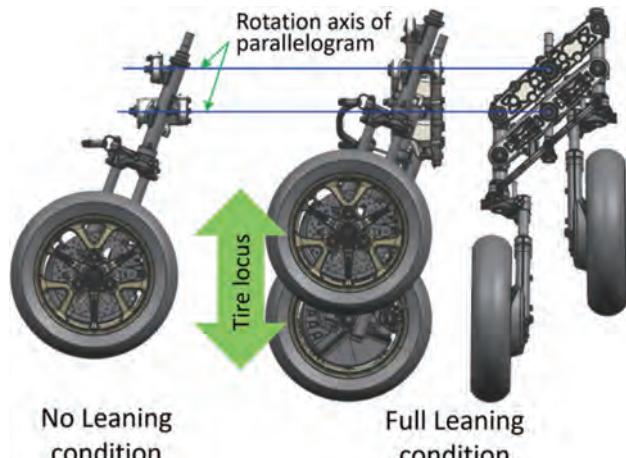


図2 パラレログラムリンク配置とタイヤ軌跡

カーマン・ジオメトリを採用し、リーン旋回時もフロント左右輪の軌跡が同心円を描くようにすることで、滑らかな旋回を実現している。

#### 3-3. 安定感としなやかさをもたらすフレーム

「XMAX」<sup>[1]</sup>のフレームをベースとしながら、LMW機構を支える前部周辺などを専用設計している。前部周辺はその強度・剛性の要求度を満たすべく、箱型構造としている。また、ヘッドパイプ周辺をフレームと別体のボルトオン構造とし、LMW機構を含めてサブアセンブリできる構造としている（図3）。これは、サブアセンブリとすることにより、LMW機構を組み立てやすくすることを狙ったものである。

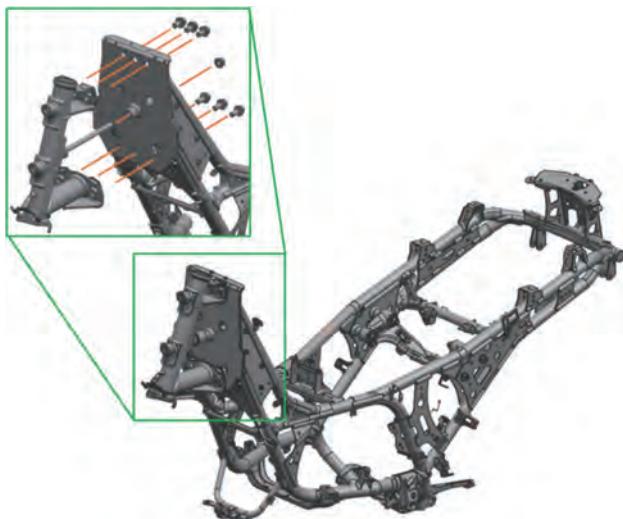


図3 フレーム及びボルトオン構造ヘッドパイプ

### 3-4. スタンディングアシスト

停車時や押し歩き時に車両の自立をサポートする機能として、当社初となるスタンディングアシストを開発した。スタンディングアシストのシステム構成を図4に示す。

スタンディングアシストの作動条件は、①車速10km/h以下、②スロットル全閉状態、③エンジン回転数2,000r/min以下、④スタンディングアシストスイッチがONとしている。これら①～④の全てを満たすとシステム作動状態となり、電動キャリパがパラレログラムリンク上部に取り付けられたディスクプレートを固定することにより、リーニング機構の動きを抑制する(図

5)。また、システムの作動状態はメーターに配置されたインジケーターの点灯により確認できるようにしている。スタンディングアシストスイッチはハンドルの左側に配置し、ライダーの操作性を熟慮して形状やクリック感などの作り込みを行った。システムの中核を担う電動キャリパは、パラレログラムリンク上方の限られた空間にレイアウトするためにモータ内蔵とし、新規開発を行った。



図5 電動キャリパとディスクプレート

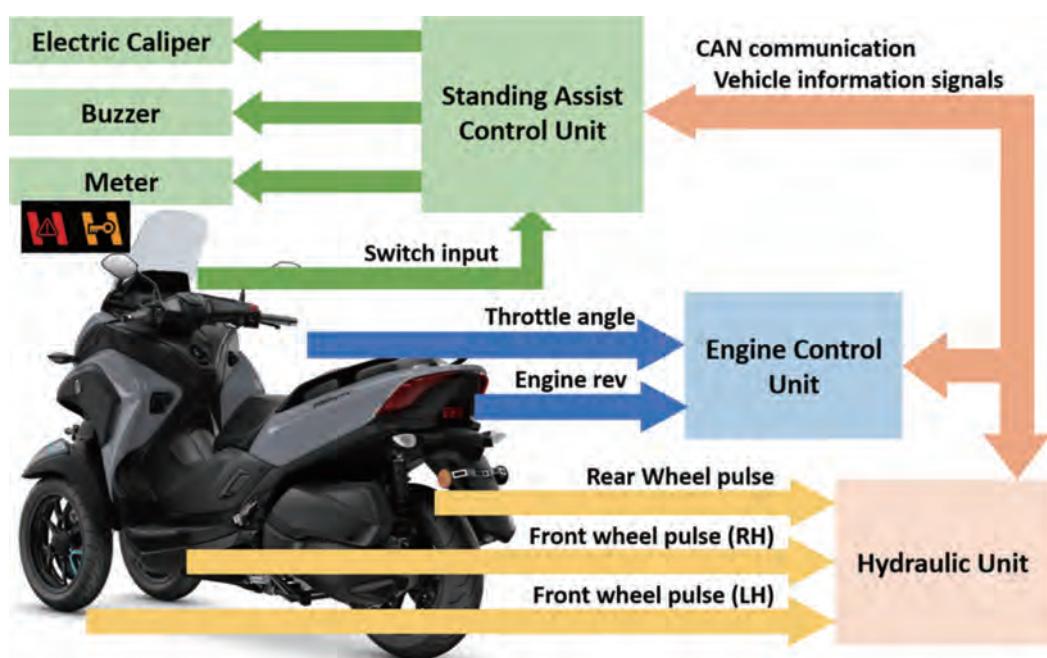


図4 スタンディングアシスト システム構成図

### 3-5. エンジン

水冷4ストロークのCVT“BLUE CORE”エンジンは、「XMAX」をベースとし仕様を最適化した。市街地から高速道路まで余裕のある爽快な走りを実現するため、排気量292cm<sup>3</sup>を選定した。発進停止が連続するシティユースを配慮した加速性と良好な燃費、環境性能を実現するため、専用のFIセッティングとしている。また、強度の要求度を満足するよう、駆動系ギアの見直しを行った。様々な路面状況での滑らかな発進性を支えるため、トラクションコントロールシステムも採用している。

### 3-6. 日常の使い勝手を高める装備

エンジン始動時や一時停車時などの利便性を考慮し、リヤブレーキロックを採用した。ラチェット構造の操作レバーを採用することにより、ライダーが状況に応じてレバーの引き量を調整することを可能にしている。また、レバーを1ノッチ引くことで解除される、PULLリターン式としている。操作時に手に伝わるノッチの感覚にもこだわり、ラチェットギアの大きさなどを選定した(図6)。



図6 リヤブレーキロックレバー

欧州地域では防寒装備としてエプロンと呼ばれるアクセサリーの普及が進んでおり、コミューターにおける必携アイテムとなっている。車体や外装にベルトなどで固定する後付けタイプのものが一般的であるが、本モデルではエプロンの取り付け構造を予め設定した。外装部品に、ベルトを通すスリットを設けてベルトが目立たないようにするなど、エプロン装着時の外観に配慮した構造としている(図7)。



図7 アクセサリーのエプロン装着状態

### 3-7. デザイン

デザインコンセプトは、“My Right Arm”(ビジネスを支えてくれる右腕)とし、信頼できるビジネスパートナーのようなパーソナルモビリティを目指した。「TRICITYシリーズ」の特長である“Y”モチーフを継承し、加えて、「TRICITY」のアイコンである逆三角形を2つ重ねたレイヤードトライアングルコンストラクションを上位機種にふさわしい立体感で表現した。信頼できるパートナーとしてふさわしい彫りの深い冷静な表情を付与している(図8)。

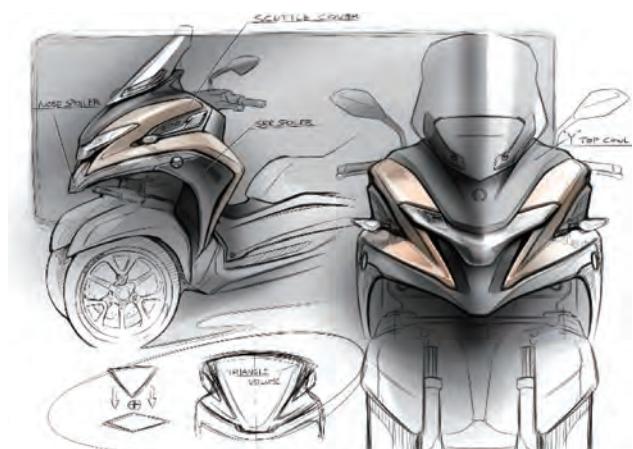


図8 イメージスケッチ

また、アクティブに動けそうな腰高の軸感を意識し、LMW機構の可動範囲にリーンおよびストロークを感じさせる空間を設けることで軽快感を演出した。同時に、ライダー中心のマス集中とサイドビューおよびフロントビューでの“ハ”の字スタンスにより、路面変化に対応できそうな凝縮感、LMW特有の踏ん張り感を表現した。

## 4 おわりに

LMW のコミューター モデルとして、また、「TRICITY シリーズ」の上位機種として「TRICITY300」の開発を行った。LMW ならではの安定感や安心感を活かしながらコミューターとしての基本機能を高めることで、お客様に快適な移動を提供できるモデルを実現した。また、車両の自立をサポートする新機能として、当社初であるスタンディングアシストの開発を行った。

本モデルの開発を通じ、前例の無いものを開発し実現するためには、メンバーが一丸となり挑戦することと諦めずやり抜くことが重要であることを再認識できた。特に、今後の社会の変革に対応していくためには、挑戦することが一層重要になるとを考えている。

「TRICITY300」は、新たなパートナーとしてお客様のライフスタイルに変革をもたらすきっかけになるモデルであると確信している。多くのお客様に、当社が目指す LMW の広がりと進化を体感していただくことを期待するとともに、今後も進化と挑戦を続ける LMW に期待して頂きたい。

### ■参考文献

[1] ヤマハ発動機株式会社製品サイト(XMAX- バイク・スクーター)<https://www.yamaha-motor.co.jp/mc/lineup/xmax/>

### ■著者



浅野 大輔

Daisuke Asano

PF 車両ユニット

PF 車両開発統括部

SV 開発部

## 製品紹介

新操船システム「Helm Master EX」の開発  
Development of the new vessel maneuvering system "Helm Master EX"

伊藤 誠 内藤 克俊 田形 彰大



## Abstract

Boating culture has taken root in North America and Europe, and it is not uncommon to see people enjoying marine leisure activities such as boating and yachting in their leisure time. There are various ways to enjoy marine activities, such as using a small boat with one engine for one person or a family to enjoy fishing and boating casually, or enjoying professional offshore (open sea) fishing with larger boats with multiple engines etc. On the other hand, as a common issue for boats, it can be difficult for operators in docking and undocking their vessels, this does not only effect inexperienced boat operators but also skilled ones. As a solution, each outboard motor manufacturer, including Yamaha Motor, have provided a joystick maneuvering system that allows vessels to be moved back and forth, left and right, and turned around using a single joystick. However, the conventional joystick maneuvering system has been introduced only to multi-engine boats because it is necessary to combine the thrusts of multiple outboard motors in order to move in the lateral direction, where docking and undocking remains an issue for many operators of single-engine boats.

In addition, existing systems need to be introduced at the time of boat manufacturing, making it difficult to add at the dealership post-manufacture. This has been a factor that hinders the spread of this highly convenient system. Also, unlike automobiles, most offshore boats are equipped with autopilot systems that automatically steer the vessels toward their destinations, however Yamaha Motor has not yet been able to provide products in this area, and as a system supplier, this has been an obstacle for our evolution.

Against the background of the issues detailed here, Yamaha Motor has developed the "Helm Master EX" as a next-generation boat maneuvering system that can be applied to any vessel. Operators can freely select their favorite functions, and can adopt a range of convenient maneuvering functions along with highly advanced features.

## 1

## はじめに

北米や欧州ではボーティング文化が根付いており、余暇にボートやヨットなどのマリンレジャーを楽しむことは珍しくない。楽しみ方としては、一人や家族で1機掛けの小型ボートを使い、

気軽に釣りやボーティングを楽しむ場合や、多機掛けの大型ボートで本格的なオフショア(外洋)フィッシングを楽しむなど、様々である。一方で、ボート共通の課題として離着岸が難しく、経験の浅い操船者だけでなく熟練者をも苦しめている。これに対処するため、昨今ではジョイスティック1本で船を前後、左右

に移動させたり回頭させることができるジョイスティック操船システムが、当社を含め、各船外機メーカーから提供されている。しかし、これまでのジョイスティック操船システムは、真横方向に移動するために複数の船外機の推力を組み合わせる必要があることから、多機掛け艇にのみ導入されており、1機掛け艇のユーザーは未だに離着岸に苦しんでいる。

また既存システムはボート製造時に導入が必要で、後工程のディーラーでの導入は困難なシステムとなっており、利便性の高いこのシステムの普及を阻害する要因となっていた。

また、自動車と異なりオフショア艇のほとんどには目的地に向けて自動操舵してくれるオートパイロットシステムが装着されているが、当社はまだこの領域での商材を提供できておらず、システムサプライヤーとして進化するための課題となっていた。

以上の様な課題を背景に、どの船にも適用でき、好きな機能を自由に選べ、かつ便利な操船機能と高い先進性を感じられる次世代操船システムとして「Helm Master EX」を開発した。

## 2 開発の狙い

前述した課題に対処しつつ、これまでのジョイスティックシステムと一線を画すような商品とするため、メインとなるシステムアーキテクチャや操船機能だけでなく、それにつながる各操船機器や表示器、キーに至るまで、全ての構成要素を刷新した。以下に主な特長を記す。

- ・ 後からアップグレードできるシステム
- ・ 1機掛け艇にも対応できるジョイスティック操船機能
- ・ 船外機と連携したオリジナルオートパイロット
- ・ 既存船外機に後付けできるボルトオン SBW (Steer by Wire)
- ・ 自動車と同じ感覚で扱えるキーレスエントリー
- ・ 操船席の取り付けスペースに応じて選べる表示器
- ・ 先進性と統一感のあるデザイン
- ・ 市場でのソフトウェアアップデート機能

## 3 商品の特長

### 3-1. 後からアップグレードできるシステム

ベースのシステムを変えることなく、機器を追加していくことで、使える機能が増えていくようなシステムアーキテクチャを構築した。

具体的には図1に示すような4つのアップグレードレベルを設定した。シフト・スロットルのみを電子制御化した。

Level1から、電子ヘルムとステアリングアクチュエータを追

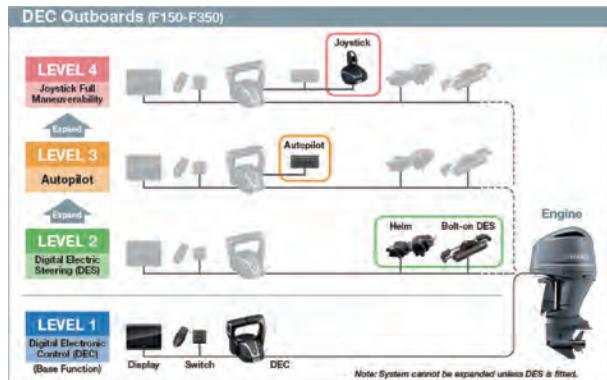


図1 アップグレードのイメージ

加することで軽いハンドル操作などを提供するLevel2のSBWへとアップグレードする。さらに操作パネルと制御コントローラを追加することでLevel3へアップグレードし、オートパイロット機能が使えるようになる。最後にジョイスティックを追加することでジョイスティック操船や定点保持機能などのより高度な操船機能が使えるようになる。

これにより、Level1やLevel2のシステムを購入したユーザーでも後から追加機器を購入し、接続することで、Level3やLevel4へアップグレードすることが可能となり、ユーザーの満足度向上だけでなく、購買機会を増やすことにもつながった。

### 3-2. 1機掛け艇にも対応できるジョイスティック操船機能

着岸操作が難しい原因の一つとして、船外機のシフト・スロットルを操作するリモコンと舵を操作するハンドルの両方をタイミングよく操作する必要があることが挙げられる。また自動車のハンドル操作範囲が3周程度に対してボートは7周程度あるため、切り返し時は特にハンドルを回す回数が多く大変である。このため「Helm Master EX」では船外機として初めて1機掛けシステムにジョイスティックを織り込み、レバー1本で簡単にシフト・スロットル・舵を統合的にコントロールできるようにした(図2)。これにより、初心者でも容易に操船ができるようになった。

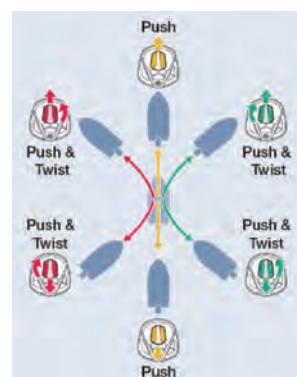


図2 1機掛け用ジョイスティック操船イメージ

### 3-3. 船外機と連携したオリジナルオートパイロット

オートパイロットは自動で舵角を制御して針路を保持したり、あらかじめ設定したルートに沿って目的地まで自動で操舵したりしてくれる機能である。従来の他社製オートパイロットでは船外機の推力調整ができず目的地を通り過ぎてしまうため使い勝手が悪かった。今回「Helm Master EX」ではオートパイロット機能を自社開発して船外機と連携することで、目的地手前で自動減速したり、目的地に到着時、定点保持機能に移行しその場にとどまったりすることができるようとした(図3)。これは現在、他社では行っていない新たな機能である。



図3 オートパイロット動作イメージ

またオートパイロット中のスピードや方位、針路の微調整をジョイスティックのレバーを倒したりひねったりすることによりユーザーが容易に調整できるようにした(図4)。

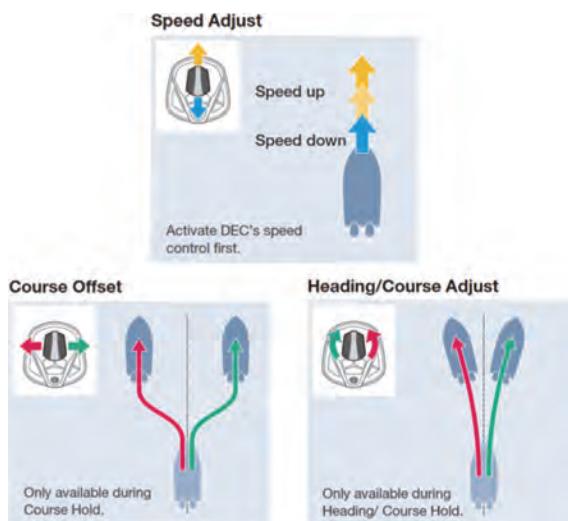


図4 ジョイスティックによるオートパイロット調整

### 3-4. 既存船外機に後付けできるボルトオン SBW

統合制御を進めるにあたり、当社最大馬力モデル船外機「F/FL425A」に組み込まれている Digital Electric Steering(デジ

タル電動ステアリング)同様の操縦精度と応答性を低馬力船外機に展開するため、150馬力から350馬力までのシフト・スロットルを電子制御化した船外機(一部を除く)に対し、取り付け可能なボルトオンの電動 SBW の開発を行った(図5)。

油圧ポンプやホース、配線といった従来の油圧関連機器が不要となることで、船内のスペースを広く使えるだけでなく、オイル注入やエア抜きといった作業がなくなり、ボートへのリギングも容易となった。



図5 ボルトオン SBW アクチュエーター

### 3-5. 自動車と同じ感覚で扱えるキーレスエントリー

船外機のキーシステムは自動車と異なり、キーシリンダーに差し込むタイプのメカニカルキーが主流となっている。盗難防止のための追加オプションとしてシステムをロックさせるための電子キーもあったが、ユーザーはメカニカルキーと電子キーを合わせて2つ持ち歩く必要があり、非常に煩雑であった。

今回、自動車で広く普及しているスマートキーの技術を操船システムに転用した(図6)。これにより、1つのキーで電源のオンオフとシステムのロックができる、かつ、キーをポケットから出さずに電源を入れ、エンジンを始動できるようになった。



図6 スマートキーとその仕組み

### 3-6. 操船席の取り付けスペースに応じて選べる表示器

多様化するボートシステムに対し、船外機やオートパイロットなどの操船機能の設定や情報表示ができる表示器が必須となってきている一方で、航海機器の機能向上や統合に伴い大型 Multi-Function Display(MFD)の複数搭載が一般化され、

操船席に設置する機器の省スペース化が求められている。

そこで、1画面で1~5機までの情報表示が可能な5インチのディスプレイ(CL5)(図7)と、他社画面上にエンジン情報の表示が可能なMFDインターフェイスの開発を行った。これにより、ヤマハシステムとして統一感のある表示、操作を継承しつつ、操船席のスペースに合わせて表示器を選択可能なシステムを実現した。



図7 CL5ディスプレイ

### 3-7. 先進性と統一感のあるデザイン

ヤマハの船外機が持つ力強さ(Dynamic)と、それを繊細にコントロールする優雅さ(Elegant)を想起させるようなデザインを目指した。また、リモコンやジョイスティック、スイッチパネル、表示器などの各操船機器が一つの操船席に並んで設置されることを想定し、全ての機器のデザインに統一感を持たせるように配慮した(図8)。



図8 デザインコンセプト

### 3-8. 市場でのソフトアップデート機能

アフターサービスにおける狙いとして、商品がユーザーに渡った後でも、市場でYDIS(Yamaha Diagnostic System)というサービスツールをつなげることでソフトをアップデートし、機能の追加や改良ができるような仕組みを入れた。

また、YDISの接続口(YDISスキャンポート)(図9)をリモコン上に設置することで、サービススタッフが配線の多い操船席の裏側に周り込むこと無く、簡単にシステムにアクセスできるようにした。

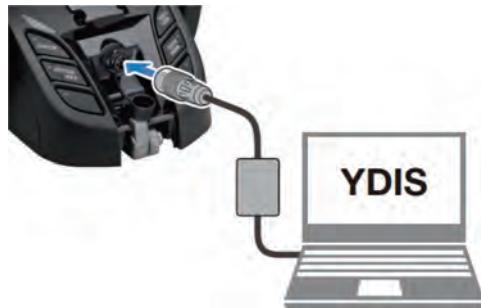


図9 YDISスキャンポート

## 4 おわりに

これまで説明したフィーチャーにより、「Helm Master EX」は2020年6月の発売開始以降、様々な市場で高評価を得ている。特に、1機掛けの操船機能はこれまでに無かった新たな価値として、アメリカで最大のマリン機器見本市である「IBEX(The International Boat Builder's Exhibition)」にて革新的な新商品に送られるInnovation Awardを受賞した。

最後に、「Helm Master EX」のEXとは、ExpandableやExtendedなど、拡張できることを意味している。つまり、今回の開発で終わりではなく、今後、このシステムをベースにさらなるフィーチャーを継続的に出していくことで、お客様が「現在の商品に満足する」だけでなく、「将来の商品にも期待を持って頂ける」ように今後も開発を進めていく所存である。

### ■著者



伊藤 誠  
Makoto Ito  
マリン事業本部  
開発統括部  
電動システム開発部



内藤 克俊  
Katsutoshi Naito  
マリン事業本部  
開発統括部  
電動システム開発部



田形 彰大  
Akihiro Tagata  
マリン事業本部  
開発統括部  
艇体開発部

## 製品紹介

Dual Suspension eMTB の開発  
Development of the Dual Suspension eMTB

渡邊 岳 江口 宗光 中林 雄介 関屋 広彰



## Abstract

The PAS (Power Assist System) is a bicycle that assists the peddling power of people with an electric motor. Yamaha Motor Co., Ltd. (hereinafter referred to as "the Company") developed and sold it as a new product across the world from 1993. The domestic electrically power assisted bicycle market, which initially started with PAS, has expanded to more than 700,000 units, and in 2015, in anticipation of further demand creation, as a pioneer in the Japanese sports electrically power assisted bicycle(hereinafter, E-Bike)market, the "YPJ" brand was launched and expanded to the US market in 2018, with a total of 6 models(7 models for the US)from on-road to off-road scenes by last year.

The Yamaha E-Bike is an electrically assisted bicycle, however by embodying the original enjoyment of riding a bicycle, we aim to shift the value from "electric assist for an easy ride" to "electric assist for more enjoyment." It has become established in the Japanese E-Bike market as a product designed to enjoy.

This Yamaha E-Bike series has a new full suspension electric assist MTB (hereinafter, eMTB), which has been introduced as the "YPJ-MT Pro" for Japan, and the "YDX-MORO Pro/YDX-MORO" for the United States. This report introduces the overview of the models.

## 1 はじめに

電動アシスト自転車 PAS (Power Assist System) は、電動モーターで人の漕ぐ力をアシストする自転車であり、ヤマハ発動機株式会社 (以下、当社) が1993年に世界新商品として開発・販売した。当初 PAS からスタートした国内電動アシスト自転車市場は70万台を超える規模に拡大する中、さらなる需要創造を見据えて2015年に日本のスポーツ電動アシスト自転車 (以下、E-Bike) 市場の先駆けとして「YPJ」ブランドを立ち上げ、2018年には米国市場にも展開し、昨年までにオンロードからオフロードまで合計6機種 (米国向けは7機種) を展開するに至っている。

ヤマハ E-Bike は、電動アシスト自転車でありながら自転車本来の走りの楽しさを具現化することで「楽するための電動アシ

スト」から「より楽しむための電動アシスト」への価値転換を図り、乗って楽しむ趣味材として日本の E-Bike 市場に定着している。

このヤマハ E-Bike シリーズに、新たにフルサスペンション電動アシスト MTB (以下、eMTB) を、日本向けは「YPJ-MT Pro」、米国向けは「YDX-MORO Pro/YDX-MORO」(以下、本モデル) を投入したので、その概要について紹介する。

## 2 開発の狙い

2015年、2016年に発売した「YPJ-R」「YPJ-C」は、バッテリ容量を絞ることでバッテリの小型化を図り、車両全体でも軽量化を狙った、趣味性の高い E-Bike として高い走行性能を備えたモデルであった。続いて2018年に発売した4機種は15年モデルより大容量のバッテリを搭載し、3機種は通勤や街乗りは

もちろん、サイクリングや自転車旅などの長時間のライドを可能にした。1機種は街乗りからオフロード走行までカバーできるハードテイル eMTB で、幅広い走行シーンを狙ったモデルであった。

本モデルは、既存のハードテイル eMTB 「YPJ-XC/YDX-TORC」に対し、オフロード専用モデルとし、オフロードでの登り、下りの両シーンでより高い走破性を得るために前後にサスペンションを装備した Dual Suspension eMTB である。ドライブユニットは欧州／北米 E-Bike 市場で高い評価を得ている「PW-X2」を搭載し、前モデルの「PW-X」より高ケイデンスに対応している。ハイレスポンスのアシスト性能は「YPJ-XC」を踏襲し、Dual Suspension フレームとセミファットタイヤを備える本モデルに向けてチューニングを施した。

### 3 開発の取り組み

#### 3-1. フレーム

リンク形式は市場実績から信頼性が高い HORST LINK を採用した。また、走行時の軽快性をもたらすためリヤショック配置は横置きとした。

フレームはハイドロフォーミング製法で成形されたアルミパイプと鍛造部品で構成されている。大容量バッテリを採用しつつコンパクトさも追及するべく、ツインダウントューブを採用した(図1)。多くのメーカーが採用している開放面を持たせたコの字断面のチューブに対し、断面を閉断面とすることで剛性の確保を容易にした。バッテリをダウンチューブの上に乗せず、二つのダウンチューブの間に配置することで機能面では低重心



図1 特徴的な造形のツインダウンチューブ

を実現した。バッテリをフレーム部材で覆い隠さないことで軽快感のあるスタイリングとした。

本フレームのもう一つの特徴となるのがリヤショックを挟み込んでいるツイントップチューブである。先に決定されたリヤショック配置と低いスタンドオーバーハイトを両立するためにツイントップチューブを採用した。ペダリングに影響が無いトップチューブ幅に抑えるため、前部は閉じた断面のパイプ形状とし、リヤショック取付け部を有する後部は鍛造部品で成形し、異なる工法で製造した素材で構成することによりトップチューブ幅と軽量化を実現することができた(図2)。また、ツイントップチューブの間には車載充電口を配置した。バッテリの配置同様にモーターサイクルをイメージさせるデザインに仕上げている。



図2 異なる工法で構成したツイントップチューブ

#### 3-2. 車体特性

ハードなオフロード走行に耐える信頼性の確保、高い操縦安定性の実現をターゲットに評価と作り込みを行った。

信頼性評価については、オフロード競技用モデル「YZ」の開発を参考に、実際の走行から計測した応力を軸とした評価手法を新たに導入した。国内 MTB コースにおいて様々な走行条件を設定し、応力計測を実施した(図3)。計測結果を評価条件に設定することで、実走評価の台上化を実現した。



図3 評価ライダーによるライディングシーン

操縦安定性の作り込みについては、これまで開発経験のなかったリヤサスペンションの作動性評価から着手した。リヤリンクを構成するフレームの剛性がリヤサスペンションの作動性に大きく寄与することから、試作、検証を重ね適切な剛性を作り込むことで高い路面追従性を実現した。また作動性の改善が進むにつれ操縦安定性を確保するために必要なダンパー特性が変化することが分かり、剛性作り込みと並行してリヤショックのダンパー選定も行った。車体ジオメトリについては、低速から高速まで幅広い速度レンジで安定性を確保しながら、軽快感も失わないよう注意して作り込み、初級者から上級者まで楽しめる乗り味を追求した。またダウンヒルでの特性だけでなく、アップヒルでのトラクション性能も重視する車体部品構成とすることで、eMTB ならではの「登りが楽しい」走行感に磨きをかけた。

### 3-3. MTB 特化のアシスト

#### 3-3-1. ドライブユニット

本モデルのドライブユニットは、MTB に特化して開発した「PW-X」の後継である「PW-X2」を採用した。

「PW-X」の特徴である「高出力」「素早い応答」「小型軽量」を維持しながらも、制御ソフトを新たに開発することにより高ケイデンス領域でのアシストを向上させた(図4)。

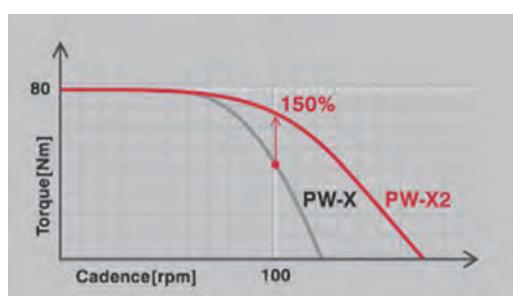


図4 ケイデンスとモータートルクの関係

#### 3-3-2. オートマチックアシストモード

本モデルはオートマチックアシストモードを新たに採用した。オートマチックアシストモードは走行状況に応じてアシストモードを自動で切り替えることにより、ライダーのアシストモード切り替え操作を減少し、ライディングにより集中することができる(図5)。



図5 オートマチックアシストモードのイメージ

#### 3-3-3. MTB モード

米国市場向けの本モデルには新たに開発した MTB モードを採用した。ECO ~ HIGH モードは、一定走行時の負荷低減を目的としているのに対して、MTB モードはテクニカルな走路での走行を主に考慮した。タイトな登りコーナーなどではペダリングが一定にならず、止める、漕ぐ、の繰り返しとなる場合がある。そのような状況で人の入力踏力への追従性を上げる制御をすることによりメリハリのあるアシストを提供し走破性を向上させる一助となる。

### 4 おわりに

今回紹介した「YPJ-MT Pro」「YDX-MORO Pro/YDX-MORO」では新規にフレームとアシスト制御ソフトの開発等に取り組み、本格的な MTB トレインに十分な性能を発揮できる eMTB を商品化することができた。本モデルが加わり合計7機種(米国向けは8機種)のラインナップとなったことにより、E-Bike の新たなニーズが広がり、ヤマハファンがさらに増える一助となれば幸いである。

#### ■著者



渡邊 岳  
Takeshi Watanabe  
ランドモビリティ事業本部  
SPV 事業部  
開発部



江口 宗光  
Munemitsu Eguchi  
ランドモビリティ事業本部  
SPV 事業部  
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  
開発部



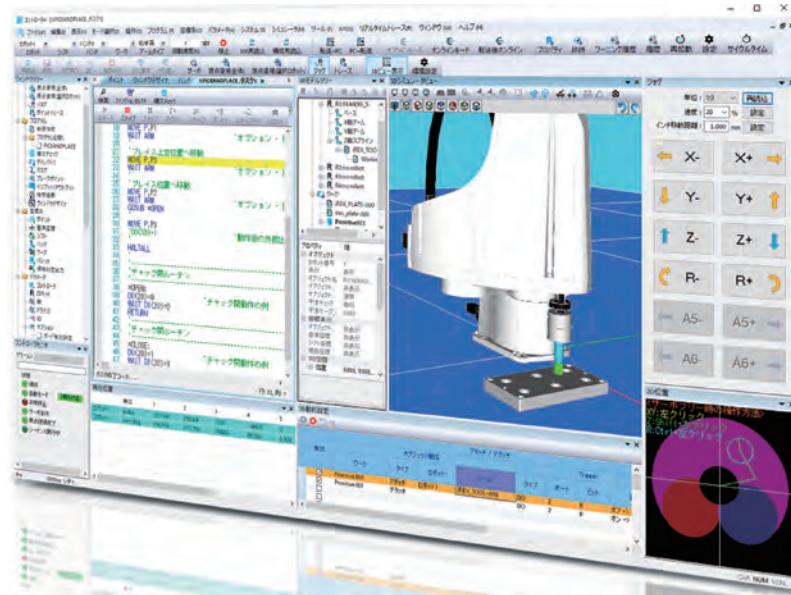
関屋 広彰  
Hiroaki Sekiya  
ランドモビリティ事業本部  
SPV 事業部  
開発部

## 製品紹介

産業用ロボットサポートソフト  
「RCX-Studio 2020」の紹介

“RCX-Studio 2020” industrial robot support software introduction

夏秋 力也



## Abstract

The Yamaha Motor Ltd. Robotics Division (hereinafter referred to as “The Company”) has been providing PC software (hereinafter referred to as “support software”) that enables customers to easily program, operate, and monitor the status of their robots during the start-up and subsequent operation of production facilities using Yamaha Motor industrial robots.

In recent years, there has been fierce competition in the industrial robot market, and usability has become more emphasized when selecting a robot, in addition to the functions and performance of the robot itself. The pros and cons of support software that customers use for a large amount of time is directly linked to usability, and the software must be more intuitive.

This paper introduces the support software “RCX-Studio 2020” that is designed to improved usability through incorporating new functions that contribute to reducing the man-hours required to set up production equipment for customers.

## 1 はじめに

ヤマハ発動機(株)(以下、当社)ロボティクス事業部では、当社産業用ロボットを使った生産設備の立ち上げやその後の運用において、お客様がロボットのプログラミングや操作、状態監視などを簡便に行えるパソコンソフトウェア(以下、サポートソフト)を提供してきた。

近年、産業用ロボットの市場では熾烈な競争が繰り広げられており、ロボット選定時にはロボット本体の機能や性能に加え、ユーザビリティが重要視されるようになってきている。お客様

が多くの時間使うことになるサポートソフトの優劣はユーザビリティに直結し、より直感的に操作できるソフトであることが求められている。

本稿では、お客様の生産設備立上げ工数削減に寄与する新機能を盛り込み、ユーザビリティを向上させたサポートソフト「RCX-Studio 2020」を紹介する。

## 2 開発の背景

近年、様々な業界で製品ライフサイクルの短期化が進んでお

り、お客様が生産設備の立ち上げにかけられる時間は短くなっている。そのため、ロボットのセットアップにおいては実機が無くても作業が始められ、かつ効率良くできることが求められる。特にユーザープログラムは多数のコマンドを組み合わせてお客様がゼロから全てを記述しなくてはならず、また作成したプログラムの妥当性は設備がある程度形を成してからでないと満足な検証ができなかった。この課題を解決するために、3D シミュレータとプログラムテンプレート作成機能を新規開発し搭載した。

また市場要望に応えるため、生産設備立ち上げ後に実際に設備を操作するオペレータのための専用操作画面を作成する機能も併せて新規開発し搭載した。

### 3 製品の特長

「RCX-Studio 2020」はお客様が設備を立ち上げ、運用する上で役立つ様々な機能を搭載している(図1)。本稿では新機能について紹介する。



図1 お客様のフェーズとRCX-Studio 2020の機能

#### 3-1. 3D シミュレータ

ロボットや周辺設備をパソコン上の仮想空間に3D 表示し、ロボットの動作をシミュレーションすることが可能である。これにより実際のロボットや設備が無くても、ロボットの選定や設備レイアウトの検討、プログラムの作成・検証を効率良く進められる。設備の破損防止にも繋がる。

##### 3-1-1. 設備レイアウト

ロボットはお客様が使いたい機種を選択肢から選ぶと自動的に仮想空間に表示される。また、周辺設備はお客様が持つ設備の CAD データや簡易形状を追加できる。マウス操作での配置変更も可能なので、自由かつ簡単に設備をレイアウトできる(図2)。

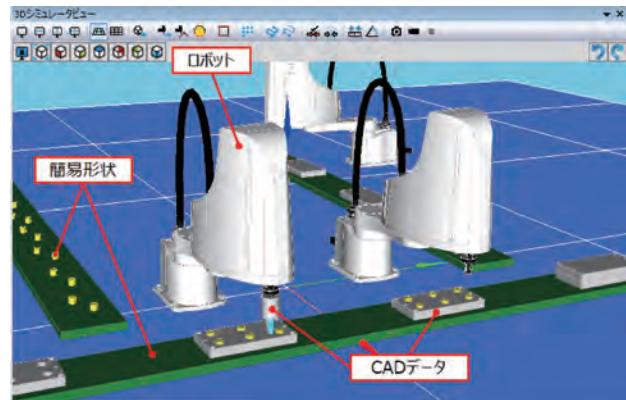


図2 仮想空間への設備レイアウト

#### 3-1-2. 仮想教示

ロボットを動作させるためには、ロボットの作業位置・姿勢を登録する必要がある。従来は設備が組み上がるのを待ち、ジョグと呼ばれるロボットを少しづつ動かす操作で実際のロボットを期待する位置・姿勢へと導いて教示するか、設備の設計情報を基に複雑な計算をしなければならなかった。この課題を解消するため、仮想空間上で教示に対応した。仮想のロボットを動かし、その位置・姿勢を登録することが可能である。仮想のロボットはジョグに加え、仮想空間でのマウス操作で動かすことができる。ロボット先端をレイアウトした設備の重心などの特徴点にワンクリックで合わせることもできるため、作業時間の大幅な短縮が見込める(図3)。

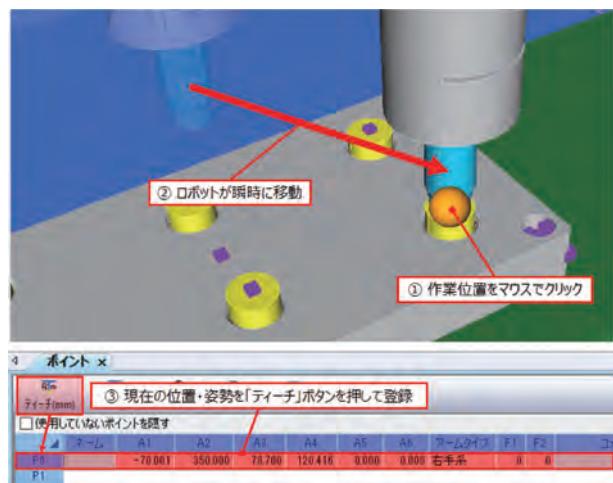


図3 仮想教示

また、レイアウトした設備 CAD データのエッジ上の点やその点をオフセットした点を、作業位置として教示無しで登録することも可能である(図4)。これにより、液剤塗布などロボットの作業軌跡がワークのエッジに沿ったものである場合、作業時間を大幅に削減することができる。

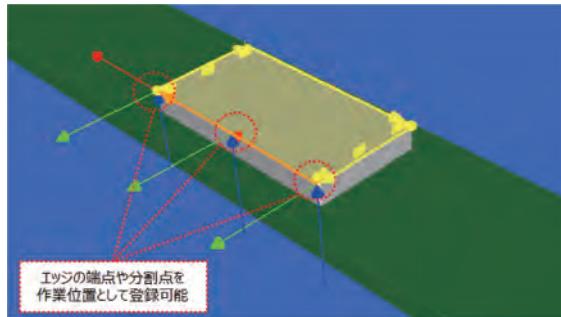


図4 CAD データからの作業位置登録

### 3-1-3. 検証

ロボットを動作させるためのプログラムを記述して実行すると、仮想ロボットの表示が更新される。この時、ロボットの先端が描く軌跡、およびロボットと設備の衝突チェックの結果を提示することで、ロボットの作業位置・姿勢やプログラムの妥当性、動作時間を検証できる。ワークをロボットに合わせて動かすこともできるため、現実に近い検証が行える。

最大4つのアングルから同時に検証できるのも、仮想空間での検証のメリットである(図5)。

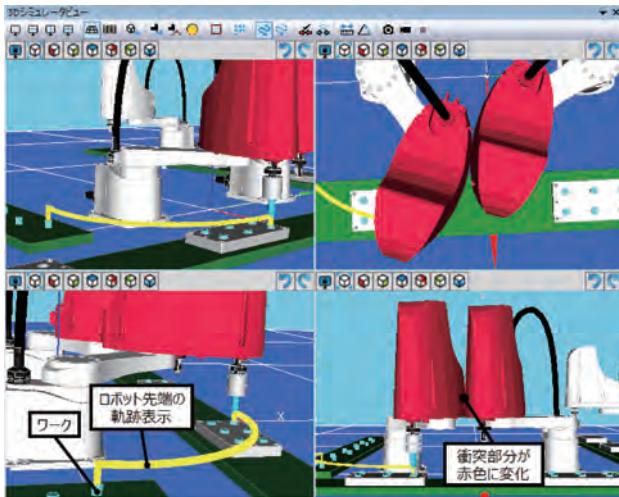


図5 仮想空間での検証

また、検証中画面の動画／静止画キャプチャに対応した。

ファイル形式に動画はAVI、静止画はBMP/JPEG/PNGを採用し、一般的なPCやタブレットなどで再生できるようにした。これにより、検証結果を簡単に共有することができる。デモ動画としての活用も可能なので、販促活動の一助としても期待できる。

### 3-2. プログラムテンプレート

ロボットのプログラミング言語(以下、ロボット言語)はメーカーによって異なる。そのため、当社ロボットを初めて使うお客様には、マニュアルを通じて当社ロボット言語を習得していく必要がある。また、画像処理装置との組み合わせなど高度な処理を行いたい場合は、当社トレーニングを受講していただくことが多い。このお客様の負担を軽減するため、ウィザード(対話形式)で設定を進めることでプログラムのテンプレートを自動生成する機能を開発した。3Dシミュレータとも連携できるため、ウィザードにてロボットの作業位置を設定する際には仮想教示により直感的に設定を進めることができる。また、よく使われる機能をオプションとして用意し、ワンクリックでの追加を可能とした(図6)。

自動生成されたプログラムはそのままでも動作可能だが、このプログラムをベースにカスタマイズしていただくことで自由な処理を効率良く作り上げることができる。



図6 プログラムテンプレート

### 3-2-1. 対応アプリケーション

お客様がどのような用途で当社ロボットを使っているのかをお客さまと直接関わりのある部署の協力も得つつ分析し、代表的な11アプリケーションのテンプレート作成に対応した(表1)。今後も市場動向を分析し、必要に応じて拡張していく予定である。

表1 対応アプリケーション

番号	アプリケーション名
1	ピック&プレイス
2	アーチモーションによるピック&プレイス
3	パレタイジング
4	塗布作業
5	汎用入出力による実行プログラム切り替え
6	コンベアトラッキング
7	ビジョンによるパレットピッキング
8	ビジョンによる塗布作業
9	ビジョンによる掴みずれ補正
10	ビジョンによる掴みずれ&搭載位置補正
11	ビジョンによる掴みずれ&搭載位置補正(マスタ無し)

### 3-3. カスタムウィンドウ

サポートソフトは、設備立ち上げ後もロボットの手動操作やプログラムでの自動運転の実行、状態監視などに使われる。ここではオペレータに必要な機能のみ使える状態となることが望まれるが、制限をかけたい機能はお客さまごとに異なる。例えば、プログラムでの自動運転の実行／停止のみ許可したい場合もあれば、ロボットの作業位置の編集や確認まで許可したい場合もある。監視したいロボットの状態もケースバイケースである。この多様な要望に応えるため、お客さま独自のオペレータ向け操作画面を作成できる機能を開発した。

#### 3-3-1. ウィンドウデザイナ

操作画面を作成する場合、一般的には Visual Studio<sup>®</sup>などのIDE(統合開発環境)が使われることが多い。画面デザインの自由度の高さや他社製品との統合制御が行えるメリットがあるため、当社では Visual Studio と組み合わせて使うライブラリ「RCX3-SDK」をリリースしている(3-3-2)。その一方、IDEの使い方やそこで使われるプログラミング言語を新たに習得しなくてはならないというデメリットもある。そこで、「RCX-Studio 2020」の中で画面をデザインし、必要な処理は当社ロボット言語で記述できるウィンドウデザイナを搭載した。

デザインに使える部品として、ボタンを始めとする汎用的な部品に加え、サーボ ON/OFF、ジョグなどの使用頻度の高い機能をパッケージ化した部品も用意することで、実用的な画面を短時間で作成できるようにした(図7)。作成した操作画面はパネルコンピュータなどに表示することができるため、専用の表示機器が不要となる。

※Visual Studio は米国 Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標です。

#### 3-3-2. RCX3-SDK

ここではオペレータ向け操作画面のもう一つの作成手段である「RCX3-SDK」、および「RCX-Studio 2020」との連携について紹介する。

近年、中国や東南アジアなどで設備全体を産業用 PC で統合制御するケースが増えている。このケースでは、お客さまは Visual Studio などを使って、操作画面を備えた、各社機器を制御するユーザー-applicationを作成することが多い。そのため、Visual Studio で当社機器を制御するプログラムを効率良く記述できるようにするためのライブラリ「RCX3-SDK」を開発した。従来、当社機器の制御に必要であった特有のプロトコルの習熟が不要となり、お客さまが行いたい制御内容を直感的に記述できるようになっている(図8)。

また、「RCX-Studio 2020」が仮想コントローラの役割を果たすため、実機がなくてもユーザー-applicationの開発を進めることも可能である。

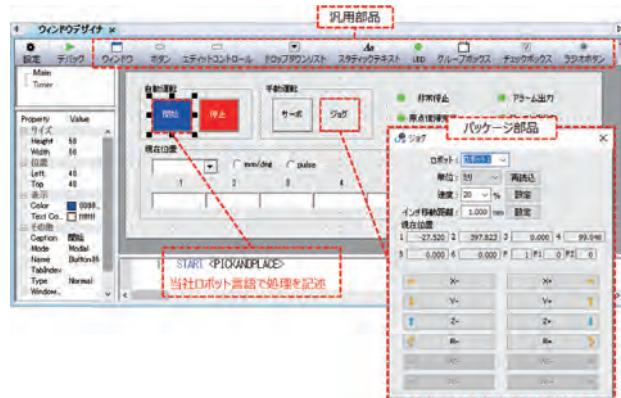


図7 ウィンドウデザイナでの操作画面作成

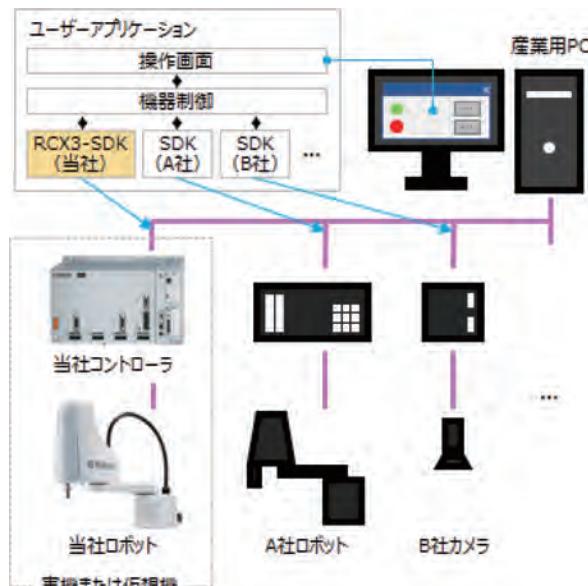


図8 SDK を使ったユーザー-applicationの構成例

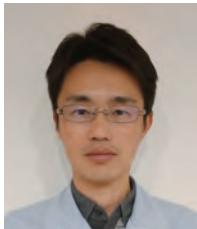
## 4 おわりに

「RCX-Studio 2020」は、当社ロボットのユーザビリティ向上を目標に開発を進めてきた。本稿で紹介した新機能がキーとなり受注に繋がった案件も出てきており、お客さまの要望に応える製品を開発チーム一丸となって生み出すことができたと実感している。今後は現時点では3D シミュレーション未対応の機種の対応や、画像処理機能のシミュレーション対応も予定している。

厳しい競争を勝ち抜くため、お客さまの要望に応えつつ、期

待を超える製品を目指し、さらに改善と新製品の開発を進めていく。お客様にとって価値のある時間に集中できるユーザーインターフェースをもったサポートソフトを追求していく。

■著者



夏秋 力也

Rikiya Natsuaki

ロボティクス事業部  
FA 統括部  
開発部

# 技術紹介

## 果樹園向け多用途自動走行車と省力樹形、車両管理 IoT システム

Multi-purpose Autonomous Orchard Vehicles, Tree-shaping for Labor Saving, and Vehicle Management IoT System

石山 健二 本田 士郎 今井 浩久

### Abstract

Our company conducted verification tests for labor saving options at 17 locations nationwide, including commercial orchards, using seven golf cart-based multi-purpose autonomous vehicles. Here we will introduce representative examples and the mechanism for autonomous driving. Additionally, we will introduce testing that applies our vehicle management IoT system, which consists of on-board communication equipment and cloud servers.

### 1 はじめに

農業人口の減少や高齢化が深刻化する中、果樹の生産基盤を強化し国際競争力を高めるため、自動化の仕組みを普及させることが求められている。

当社は以前から果樹園向け自動走行技術に取り組んできたが R&D としての色合いが強かった<sup>[1][2]</sup>。また国内の果樹園環境は同じ樹種であっても仕立てや作業様式が多様で、全ての環境に対応させることは、費用対効果の面で無駄も多い。

機械化に適した省力樹形により、栽培環境の面からもこの課題に対応する取り組みが農研機構果樹茶業研究部門を中心に企画された。当社もこれに参画し、農研機構生研支援センター「革新的技術開発・緊急展開事業（うち人工知能未来農業創造プロジェクト）」（以下、AI プロジェクト）の支援を受けながら、自動走行システムを開発してきた（実施期間：2016年4月～2021年3月）。

### 2 プロジェクトの2つの特徴

#### 2-1. 特徴1：ランドカーベース多用途自動走行車

当社は1996年から電磁誘導式ゴルフカーを販売している。スロットル、ブレーキ、操舵を電気的に動かすバイワイヤの仕組みが備わっており、量産車であるため信頼性も高く、比較的少ないコストで誘導線を使わない自動走行の仕組みを構築できる。

ゴルフ場以外で活用される車両を当社ではランドカーと呼んでおり、これをベースとする自動走行車を用いて、収穫物運搬や各種作業（剪定、整枝、受粉、摘果など）の支援、牽引型作業機械と組み合わせた農薬散布や草刈りなど単純作業の自動化を進める。

#### 2-2. 特徴2：機械化に適した省力樹形

9種類の果樹（ナシ、セイヨウナシ、リンゴ、モモ、オウトウ、ブドウ、カキ、カンキツ、クリ）において収量や品質を低下させず、機械化に適した樹形による栽培体系を開発する。これは樹を列状

に密植し、さらに結実面を平面的に整形することで、樹に対する作業動線を直線的にするもので、図1に代表的な樹形を3つ挙げる<sup>1)</sup>。これと自動走行車とを組み合わせ、各樹種の慣行栽培より三割の作業時間削減を目指す。



ナシ（ジョイントV字樹形）



リンゴ（トールスピンドル）



カンキツ（双幹形）

図1 省力樹形の例

#### 1) 図1の樹形の説明

- ・ ジョイント仕立て：隣の樹と接ぎ木して一本にする栽培方法。神奈川県農業技術センターが開発した。
- ・ トールスピンドル：高さ3mほどのリンゴの樹を薄い垣根状に配置する高密植栽培。イタリア南チロル地方で発祥した。
- ・ 双幹形仕立て：主幹部の50cmほどの高さから分岐させた2本の主枝をV字やY字型に仕立てる栽培方法。

### 3 自動走行の仕組み

国内は環境が整備された圃場であっても棚作やV字・Y字仕立てによる枝葉の広がり、防鳥ネットなどにより上空が覆われていることが多い、GPS に代表される全地球航法衛星システム（GNSS）の使用は適さない。仮に位置が取得できたとしても、

1.3m の車幅(荷台部)に対し、樹列間または支柱間距離は狭い箇所で1.8m となるので、高い方位精度も求められる。

そこで水平面上を放射状に走査するレーザセンサ(以下、LiDAR: Light Detection and Ranging)を2個使用し(図2)、ランドマーク(樹幹や構造物など環境に固定された特徴物)との位置関係や向きを計算しながら自動走行をさせる。繰り返し走行時の軌跡のばらつきは10cm 以下を実現している。

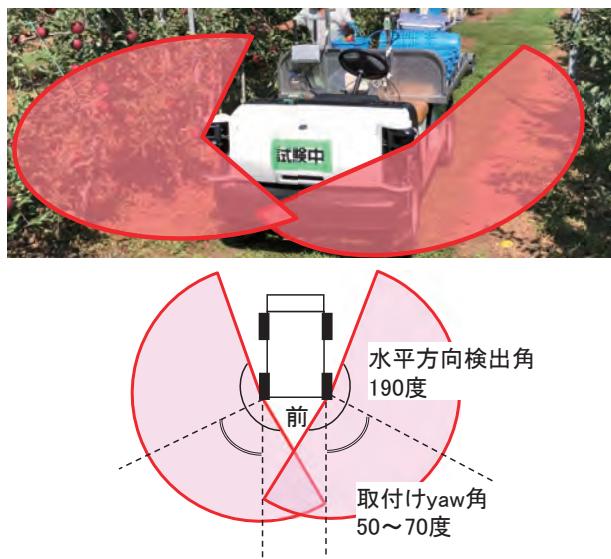


図2 LiDAR 搭載方法と検出範囲

### 3-1. LiDAR による走行制御

主に樹が直線状に並ぶ省力樹形圃場を対象としているので、①直線区間と②枕地旋回とで制御方式を切り替えている。

#### ①直線区間

片側または両側の樹列を直線近似し(図3)、それに沿うよう車両を制御する(以下、ガイド走行)。列からのオフセット距離も指定できる。車両の位置情報を陽に扱わないこの手法は、樹列が数百m に及ぶ海外の大規模圃場、丘陵地など樹列が緩やかにカーブしている圃場にも適用しやすい。



図3 ガイド走行のための目標線検出

#### ②枕地旋回

事前に作成したランドマークマップ(後述)と、走行中にLiDAR から得られる点群データとを照合し、自車の位置と向きを計算しながら、点列で近似された自由曲線経路に沿って走行する。

### 3-2. 枕地マップと旋回経路の設定

事前に LiDAR 搭載車両で両側枕地を手動運転し得られた点群データ(対象物との距離)からランドマークの輪郭マップを作成する。マップには制御切り替えのため樹列端付近に設置されたマーク(反射シート)情報も含まれる。

次に経路編集アプリを用いてマップをPCなどの画面に表示させ、ランドマークとマークの配置を見ながら、絵を描く要領で作業経路を作成し、その上に作業ポイントを置いていく(図4、5)。もし点群データ取得後に樹の植え替えやマークの配置変更などがあれば、ランドマークのマップ自体を編集することで対応できる。

最後に直線／枕地2つの制御の切り替え順序、区間車速、ガイド走行時オフセット距離などを入力することで、列状の圃場であれば様々なパターンの巡回走行を実現できる。

実走行時に使うタブレットPC向け操作アプリ画面を図6に示す。アプリは複数台の車両操作にも対応している。



図4 枕地旋回経路作成、作業ポイント追加

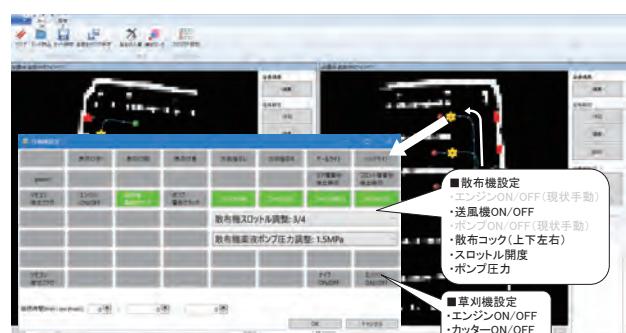


図5 作業機の制御設定

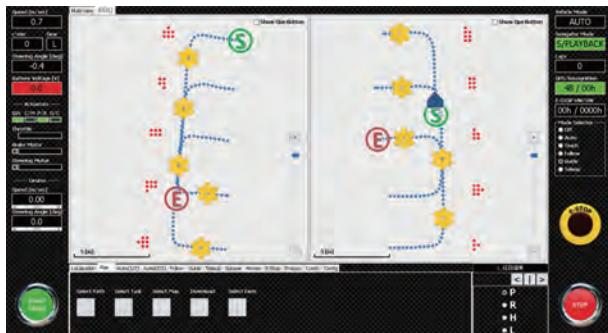


図6 操作アプリ画面



図7 自動散布走行(おけさ柿園)

## 4

### 実地試験事例

プロジェクト実施期間を通じ、自動走行車を7台使用し全国17カ所(試験場13、商用3、観光1)、31圃場(樹種・樹形の違い)で試験を実施してきた。この中には、操作説明や安全指導を行った上で、専門知識を有する当社社員が立ち会うことなく、試験場職員のみで実施された例もある。

ある程度整備された圃場とはいえ、自然物を対象とする環境で LiDAR などを使って周辺認識する場合、通常は現場環境に応じた調整に時間を要するが、詳細なデータがない初めて訪れる圃場でも、即日または翌日には自動走行を実現している。

提案手法は単純な幾何学的特徴を利用するだけなので、ディープラーニングのように事前に適切なデータを大量に用いた学習も不要である。樹の並びが乱れていたり、抜けていたりする圃場もあるが、ポールなど現場で入手可能なものを使って簡単に車両を誘導することもできる。次に4つの代表的な実施例を紹介する。

#### 4-1. 事例1: 自動農薬散布走行

佐渡のおけさ柿ジョイント栽培圃場<sup>2)、3)</sup>(図7、8)、山梨のシャインマスカット園<sup>4)、5)</sup>(図9、10)で農薬散布試験を実施した<sup>6)</sup>。

LiDAR を使うと散布霧による反射波を物体として誤検知する場合がある。開発した手法は第二反射波まで処理することでこの問題に対処しており、有色の混合薬液でも散布走行できることが確認できた。使用した薬剤を表1に記す。

シャインマスカット園では撒き残しがないよう棚を支える支柱間をジグザグに縫う経路となった。このような経路を手動運転する際は繊細な気配りが必要となる。また後方の散布状態を気にしながら運転することは危険を伴い、これまで国内果樹園の農薬散布作業中に重大事故が発生している。自動走行により再現良く繰り返し走行できるので、疲労を軽減でき、また事故発生を抑制できるメリットは大きい。

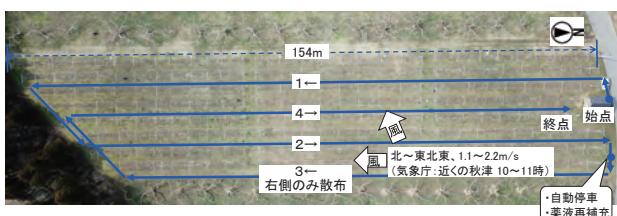


図8 散布経路(おけさ柿園)



図9 自動散布走行(シャインマスカット園)

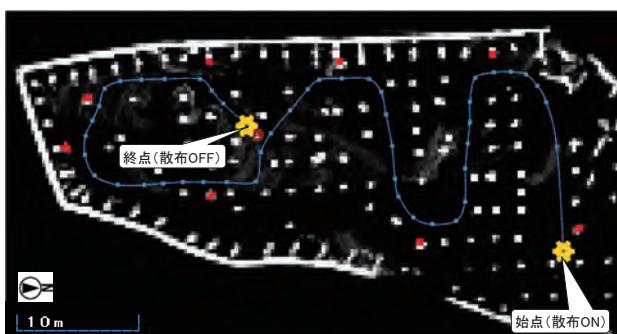


図10 散布経路(シャインマスカット園)

表1 使用した薬剤

図番	日付	場所	薬剤
①	2020/7/30	新潟県佐渡市 JA フーム佐渡 おかげ柿ジョイント栽培圃場	殺菌剤ビオネクト、殺虫剤キラップフロアブル混合液
②	2021/5/20	山梨県山梨市 商用シャインマスカット園	殺菌剤ジャストフィット
③	2021/5/26	同上	殺菌剤ベンコゼブ水和剤、尿素(葉面散布肥料)混合液



散布機(以下、SS: Speed Sprayer)は(株)やまびこ製の牽引型試作機である。エンジンとオルタネータを搭載し、送風機クラッチや電磁コックの制御に必要な電力は SS 単独で自給できる。自動走行車とは CAN 通信線のみで接続され、自動走行車からの指令により、送風機と散布コックの ON/OFF、ポンプ圧力とエンジン回転数の調整が可能である。

- 農林水産省が実施する「スマート農業技術の開発・実証プロジェクト」における佐渡「おかげ柿」スマート農業実証コンソーシアム(代表:新潟県、構成:(株)JA フーム佐渡、JA 佐渡ほか)による取り組み課題の1つとして実施された。
- 図7:安全のため防護服と防毒マスクを着用した作業員が乗車したが、走行や農薬散布に関する操作は一切行っていない。
- 「スマート農業技術の開発・実証プロジェクト」における匠の技による高品質シャインマスカット生産実証コンソーシアム(代表:(株)YSK e-com、構成:山梨県、山梨大学ほか)による取り組み課題の1つとして実施された。
- 図10:直線／枕地切り替え走行ではなく、全域自由曲線経路とした。
- 映像ライブラリー 事例1「農薬散布\_山梨シャインマスカット」(巻末参照)

#### 4-2. 事例2:自動草刈り走行

2019年6月に宮城県農業・園芸総合研究所のリンゴジョイント栽培圃場で草刈り試験を実施した<sup>7)</sup>(図11、12)。

牽引型草刈り機は(株)オーレックが同社製乗用草刈り機を改造したものである。車体左側に幹周刈用アームが付いており、自動走行車からの CAN 指令により、エンジンとカッターの ON/OFF、カッターデッキの上げ／下げが可能である。

圃場の列間は4mと草刈り機の刈り幅より大きいので、刈り残しがないよう、各列3回ずつ(異なるオフセット距離)×5列分走行した。オフセット距離は3-2節の経路編集アプリで指定できる。旋回経路が多くなるが、類似パターンの繰り返しなので、コピー＆ペーストし少し修正を加えるだけで簡単に全体の経路を作成できる。

なお、草刈りは農薬散布のように薬液補給といった付帯作業がないため、夜間など空いた時間に無人作業できれば大きな省力化につながる。



図11 自動草刈り走行

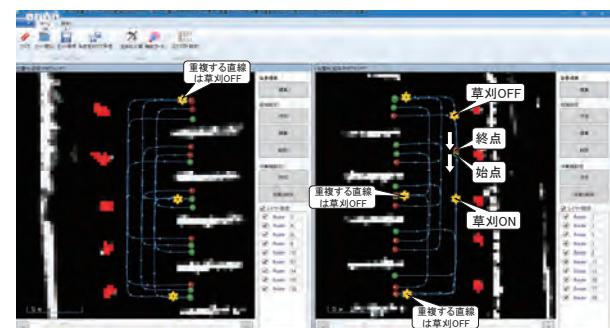


図12 草刈り経路

- 映像ライブラリー 事例2「全面草刈\_宮城福島ジョイント圃場」(巻末参照)

#### 4-3. 事例3:2台連携収穫物運搬走行

2019年12月に神奈川県農業技術センターのナシジョイント栽培圃場で2台の自動走行車を使った収穫物運搬試験を実施した<sup>8)</sup>(図13、14)。2人いる作業者がそれぞれ以下の作業を行った。

甲:収穫作業と同時に運搬用自動走行車を少しづつ進めながら収穫物を荷台コンテナに積み込む。この時、荷台は常に手の届く位置にあるので、収穫物は手かごなどを用いずに直接コンテナに入れることができる。また運搬車をこまめに移動させるための乗り降り動作も不要(後述)なので、従来方法に比べて効率的かつ身体的負担も大幅に軽減できる。

乙:枕地でコンテナの入れ替え作業を行う(山選果<sup>9)</sup>や軽トラ積み込みなど想定)。

ここでは運搬車荷台がいっぱいになり、乙がいる枕地まで往復する無駄時間を見なくすため、次の仮定をおいた。これはどのような場合でも当てはまるわけではないが、慣行の作業様式とは違う、自動システムならではの運用方法を導く発想の一例である。

- 1列走行すると荷台がいっぱいになる、またはそのように調整する(上／下段または左／右列で分けるなど)。
- 往路と復路で運搬車を入れ替えることで、甲は途切れなく収穫作業を継続できる。
- 乙は収穫作業をしない。

今後シミュレーションなども活用しながら、より現実的かつ効率的な運用パターンを生産者に提示することが重要となる。

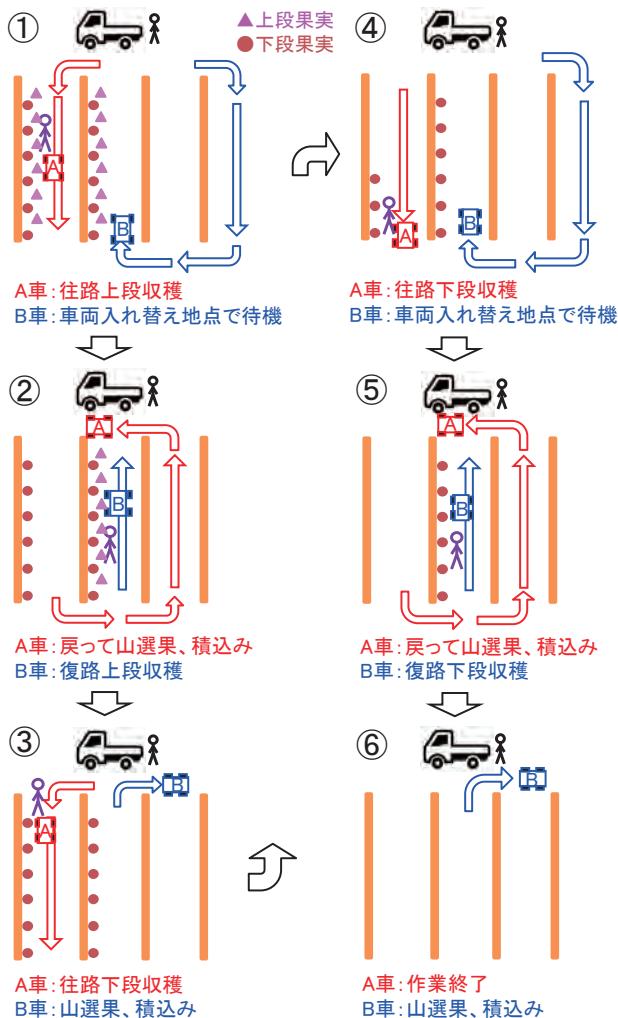


図13 2台連携収穫の手順



図14 2台連携収穫試験(①②は図13に対応)

8) 映像ライブラリー 事例3「2台収穫\_神奈川ジョイント圃場」(巻末参照)

9) 山選果(粗選果): 収穫した果実を農協や市場などへ運ぶ前に、圃場の一角で大きさや等級などによってある程度選別する作業。

#### 4-4. 事例4: 移動式作業台車

2019年2月に神奈川県農業技術センターのナシジョイント栽培圃場で移動式作業台を使った収穫デモを実施した(図15)。枝に付いているのはナシに見立てたボールである。V字樹形に合わせた高所作業用シート<sup>10)</sup>に座ったまま、ボタン1つで自動走行車を樹列に沿って移動させ楽に作業を続けることができる。



図15 移動式作業台

10) 試験場での評価のためだけに試作したものであり、商品化に際しては安全性に十分配慮して設計する必要がある。

## 5 操作用インターフェース

4章の事例3、4のように車両を少しずつ前進させるには寸進(一定時間走行:通常2~4秒に設定)用ボタン(図16)を押すだけよい。作業者がアクセスしやすいように、荷台後部に取り付けたり、作業者自身が携行したりできる。

押下ごとに発進／停止を交互に切り替える GO/STOP 用ボタン(図16)もある。列端付近に設置されたマーカの手前、あるいは枕地旋回経路上に設定されたタスクポイント(事例3の場合車両入れ替え地点とコンテナ入れ替え地点)では自動的に停車する。

これらをすることで収穫作業時の操作はボタン1つ(または2つ)で済み、乗り込む動作もなく、各地の試験実施者からは「非常に楽である」と好評であった。



図16 寸進用ボタンと GO/STOP ボタン

人に自動追従する機能を望む声もある。著者らは過去、LiDAR による人追従機能にもトライしており(図17)、今後この機能の現場実装も進めていきたい。



図17 LiDAR を用いた人追従

現状、薬液調合や補給のため作業者は現場にいる必要がある。作業効率を上げるために、1人2台運用を提案し、2017年8月に米国カリフォルニア州にある商用ワイン用ブドウ園で、(株)やまびこの協力を得ながらその効果を検証した。AI プロジェクトと同じく、ランドカーと同社製牽引型 SS(400L)を使用し、散布したのは水である。

2台の自動散布車を1列ずらして配置し、補給に必要な時間をおいて走行開始させ、それぞれ1列おきに走行させる。圃場は列長約500m、400L タンクでは2往復できないため、1往復ごとに補給作業が必要になる。最初に補給時間分ずらして走行開始しているので、2台同時に補給地点に戻ってすることはない。ここでは枕地を移動する薬液補給車を配備し、2台が散布している間に作業者自ら補給車を次の列に移動させる(図18、19)。

試験中ほとんどの時間で2台同時散布しており、さらに自動散布車が補給地点(通常は水源の近くにある)に移動する時間も削減できる。ここでは通常のトラクタ牽引式散布(同じ車速および補給流量、約1500L タンクで4往復可能)による計算上の作業時間に対し、3分の2の時間で散布作業を終えることができた。

複数の自動散布車と補給車を現場に運搬する手段、補給車自体の補給手段の課題はあるが、小さな作業機を複数台利用して効率良く作業できることが示された。



図18 2台散布試験

## 6 北米での2台連携散布試験

これは当社が独自に提案した取り組みである。無人走行により農薬散布時の作業者の身体的負担は大幅に軽減されるが、

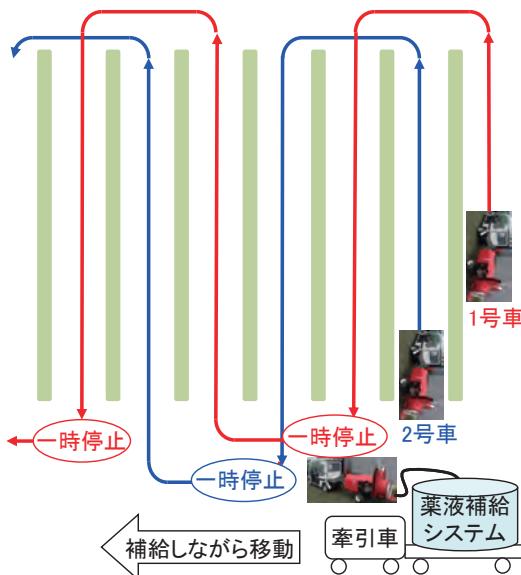


図19 2台散布の概要

4章の事例1(山梨の農薬散布)では、車両とSSの稼働状態を遠隔モニタリングし、データをクラウドに保存した。図21はこれらデータをプロットし見える化したものである。この仕組みを使えば作業実績の管理や工程分析などが容易になる。

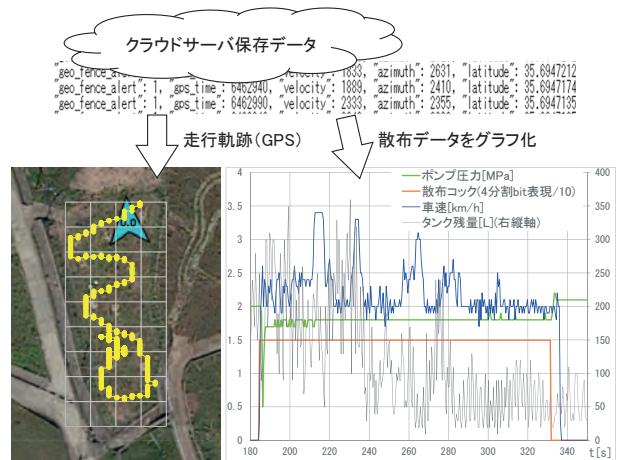


図21 作業データの見える化(山梨の農薬散布)

## 7 車両管理 IoT システムの適用

ランドカーは公道人輸送サービス(MaaS: Mobility as a Service)分野での活躍も期待されており、各地で実証導入が進んでいる。当社はこれら車両の稼働状態を管理するため、車載通信(LTE)機器とクラウドサーバで構成される IoT システムの開発も進めている。この仕組みを応用することで、各種農業サービス用アプリ向けに、API を介して車両や機械などの情報を提供できる(図20)。

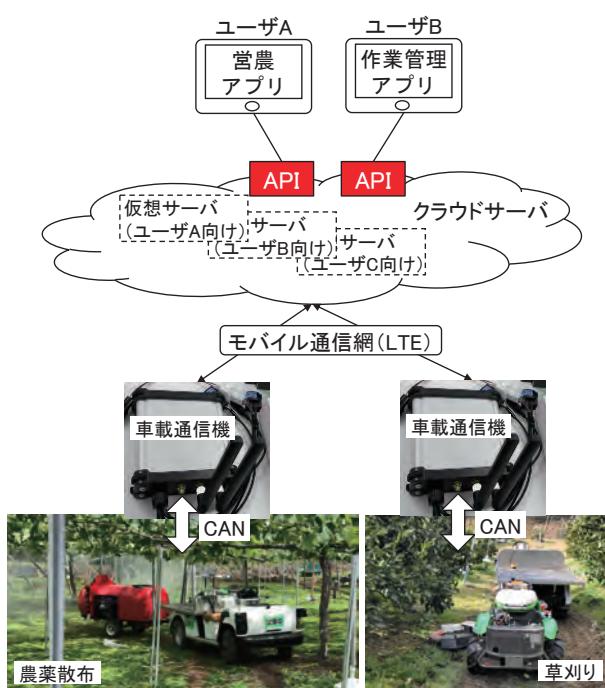


図20 車両・機械管理 IoT システム

## 8 おわりに

自動走行車と省力樹形とを組み合わせることで、年間作業時間を三割以上短縮できることが、各地試験場(一部を除く)による実験で示されている<sup>[3]</sup>。

今後は車両だけでなく人も含めた作業動線、複数台を活用する運用方法を提案し、かつシステム全体のコスト削減も図ることで、これらの普及に努めたい。

IoT システムを活用することで、例えば環境負荷となる農薬の使用実績管理が容易かつ確実となる。国際的に SDGs への取り組みが重要視される中、GAP(農業生産工程管理)、HACCP(食品衛生管理)といった基準化への対応も容易になると考えられるので、今後も力を入れていく。

ランドカーは郊外や農村など地域の足(ラストマイルモビリティ)としても注目されており、圃場内と公道とのシームレスな運用も提案しながら、地域の活性化にも貢献したい。

### ■参考文献

- [1] 石山, 吉田, 深尾, 村上:画像による無人車の不整地自律走行技術と果樹農業への活用提案, ヤマハ発動機技報49号, pp. 88-97, (2013) <https://global.yamaha-motor.com/jp/profile/technical/thesis/pdf/browse/49gr03.pdf>
- [2] 石山, 神谷, 深尾, 倉舗:パーティクルフィルタによる自己位置同定とロバスト制御を組合せた果樹園における UGV 巡回走行, ヤマハ発動機技報46号, (2010) <https://global.yamaha-motor.com/jp/profile/technical/thesis/pdf/browse/46gr03.pdf>

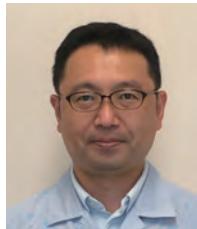
[yamaha-motor.com/jp/profile/technical/thesis/pdf/browse/46gr04.pdf](http://yamaha-motor.com/jp/profile/technical/thesis/pdf/browse/46gr04.pdf)

[3] 農研機構:「省力樹形樹種別栽培事例集」,(2021)[http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/publication/pamphlet/tech-pamph/138917.html](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/138917.html)

### ■著者



石山 健二  
Kenji Ishiyama  
技術・研究本部  
研究開発統括部  
先進システム開発部



本田 士郎  
Shirou Honda  
技術・研究本部  
研究開発統括部  
FSR 開発部



今井 浩久  
Hirohisa Imai  
技術・研究本部  
研究開発統括部  
先進システム開発部

### ■映像ライブラリー

事例1「農薬散布 \_ 山梨シャインマスカット」

[https://global.yamaha-motor.com/jp/design\\_technology/technical/library/mov/56gs07\\_1.html](https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/library/mov/56gs07_1.html)



事例2「全面草刈 \_ 宮城福島ジョイント圃場」

[https://global.yamaha-motor.com/jp/design\\_technology/technical/library/mov/56gs07\\_2.html](https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/library/mov/56gs07_2.html)



事例3「2台収穫 \_ 神奈川ジョイント圃場」

[https://global.yamaha-motor.com/jp/design\\_technology/technical/library/mov/56gs07\\_3.html](https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/library/mov/56gs07_3.html)





## Abstract

Platforms (hereinafter referred to as PF) using the CP2 engine have been expanded to various categories such as the "MT-07" (naked), "TRACER700" (tourer), "XSR700" (neo-retro), and "Tenere700" (on/off). On the other hand, in the super sports (SSP) category where CP2 engine PF's have not been developed, there is a significant difference in performance and price between models "YZF-R25/YZF-R3" and "YZF-R6/YZF-R1." Therefore, the market is looking for a SSP model that could fill the gap.

Under these circumstances, the "YZF-R7" is an SSP model developed based on the naked (NK) model "MT-07" with the aim of expanding the PF development of the CP2 engine and enhancing the SSP category.

## 1 はじめに

CP2エンジンを使用したプラットフォーム(以下、PF)展開はこれまで「MT-07」(ネイキッド)、「TRACER700」(ツアラー)、「XSR700」(ネオレトロ)、「Tenere700」(オンオフ)と多様なカテゴリーに広がっている。一方で、PF展開がされていないスーパースポーツ(以下、SSP)カテゴリーにおいては、「YZF-R25/YZF-R3」と「YZF-R6/YZF-R1」の間に、性能、価格面での大きなギャップがあり、その間を埋める SSP モデルの導入が市場から望まれていた。

このような状況の中で「YZF-R7」は、CP2エンジンのPF展開を拡大、SSPカテゴリーの充実をさせることを目的に、ネイキッド(以下、NK)モデルである「MT-07」をベースに開発された SSP モデルである。

## 2 開発の狙い

今回開発した「YZF-R7」は "Fun master of Super Sport" というコンセプトのもと、「悦に浸るデザインとフィーチャー」「操る楽しみを身体で覚えることができる」「優れたコストパフォーマ

ンス」という提供価値を掲げ開発した。これは、言い換えれば、「一目で SSP と分かる外観、装備」、「運転時の扱いやすさ」、「お手頃価格感」を高次元でバランスさせることである。

そのため、SSP モデルのアイコンとなるフルカウル外装の装着は前提とし、装着の要望が大きい倒立フロントフォーク、セパレートハンドル、ラジアルマウントキャリパ等を採用しながらも、エンジンおよびフレームの基本骨格を NK モデルと共にコストアップの抑制し、その上でスポーティーかつ扱いやすいハンドリングを有したモデルを目指して開発を進めた。

## 3 開発の取り組み

前述の開発の狙いを達成するために図1に示すようなフィーチャーを採用するとともに、"Skinny Proportion for Perfect Control" というデザインコンセプトを掲げ、外観からも扱いやすさを表現した。

ここでは、「MT-07」をベースとした「YZF-R7」の開発において、車体に施した主要なチューニングと外観デザイン面での取り組みについて紹介する。



図1 フィーチャーマップ

### 3-1. YZF-R7を特徴づける主要なチューニング

NK モデルをベースとした SSP モデルの開発においては、ターゲットとする走行シーンが市街地走行からスポーツ走行に変わることに合わせ、車体にも様々なチューニングが必要となる。逆説的に言うと、そのチューニングを怠ってしまうと、ただ単に NK モデルをフルカウル化しただけになってしまい、様々なカテゴリーへ展開している CP2 エンジン PF の中でこのモデルの存在意義が無くなってしまい、「YZF-R シリーズ」を名乗る価値のないモデルとなる。

以下に「YZF-R7」が「YZF-R」シリーズを名乗る上で施した主要なチューニングについて記述する。

#### 3-1-1. バンク角

サーキットにおけるスポーツ走行においてはコーナリングなどで車両を大きく傾ける必要があるため、NK モデルをベースとした SSP モデルの開発においてはバンク角の確保が重要である。

「YZF-R7」においては、エンジン下部を覆うアンダーカウルがバンク時に容易に地面に接触してしまう恐れがあり、従来の SSP モデルに対してアンダーカウルを車両内側に寄せ、すなわち、エンジンとのクリアランスを小さくしてバンク角を確保する必要があった。

そのため、アンダーカウルには従来機種で使用されている樹脂射出成型品ではなくアルミ板材のプレス成型品を採用し耐熱性を向上させ、従来機種に対しエンジンとのクリアランスを小さくした。

アルミ材の採用にあたっては質量を樹脂材採用時と同等にするため、薄肉でも強度の確保が可能な5000系のアルミ材を採用したが、同時にプレス成形性も確保するため成形解析を用

いて形状を調整した。

これらにより「YZF-R7」は53°という他の SSP モデル並みのバンク角を確保し、スポーツ走行を十分楽しめるモデルとなった(表1)。

表1 SSP モデルのバンク角比較

	YZF-R3	YZF-R7	YZF-R6	YZF-R1
バンク角	50°	53°	57°	57°

#### 3-1-2. 直進安定性

ベースモデルである「MT-07」が正立フロントフォークを装備しているのに対し、「YZF-R7」ではそのフレーム基本骨格を流用したうえで倒立フロントフォークを採用した。また、スポーティーなライディングポジションにするため「MT-07」に対し車両姿勢を前傾化させた。

これらは「MT-07」に対しフロントフォーク剛性が増加し、キャスター角が減少(それに伴いトレールが減少)することを意味し、そのままではフロントフォーク剛性の増加による外乱に対しての車両挙動の悪化や、トレール減少による直進安定性の低下が引き起こされてしまう。

そこで「YZF-R7」においては、フロントフォークオフセットを「MT-07」に対して5mm 減少させ、「MT-07」同等のトレールを維持するとともに、次項に記述の剛性バランスの最適化を行うことにより、「MT-07」に対してスポーティーなキャラクターであることを容易に体感できる車体剛性とスポーツ走行を行う上で十分な直進安定性も確保した(表2)。

表2 ベースモデルとのFr廻りディメンション比較

	MT-07	YZF-R7
キャスター角	24.8°	23.7°
フォークオフセット	40mm	35mm
トレール	90mm	90mm

### 3-1-3. 剛性バランス

前述した倒立フロントフォークの採用によるフロントフォーク剛性の増加に対し、フレームの基本骨格はコストUP抑制を目的として「MT-07」を流用したが、これにより、車体剛性のフロント偏重化を招き、コーナリング時に車両の前後それぞれの挙動が不自然になることが想定された。これは、いわゆる「曲がらないバイク」になることを意味するため、「MT-07」と基本骨格を共通化しつつも車体の剛性バランスを調整する必要があった。

「YZF-R7」においては、SD解析を用いてフロントフォークのアンダーブラケット形状を調整し、フロント剛性を調整すると同時に、フレームにもセンターブレースを追加し、車両全体の剛性バランスを整えた。

アンダーブラケットの形状調整においては、最適化解析を用いて、必要強度を有する最小剛性かつ最軽量の形状を導き出し、そこに製造要件を織り込み具現化した(図2)。

センターブレース追加においては、リヤアームピボット部のピボット軸方向の剛性に着目し、「MT-07」に対し20%の剛性向上を目標にSD解析で形状作り込みを行った。

これらにより、倒立フロントフォークの採用とフレーム基本骨格の流用という前提を守りつつも、扱いやすく、スポーツ走行にも適したハンドリングを有する車体骨格を実現させた。



図2 アンダーブラケット形状の最適化解析

### 3-1-4. ライディングポジション

サーキットにおけるスポーツ走行においては高速走行時に伏せて乗車する、コーナリング時にハンギングする等の市街地走行と異なる操作をすることがある。「YZF-R7」においても、それらのシーンでの操作性を確保するため、着座位置(ヒップポ

イント)、ハンドル位置(グリップポイント)、足乗せ位置(フットポイント)を「MT-07」に対し変更した。

この3点の位置関係はモデルのイメージを表現する上で重要な要素である。「YZF-R7」においてはワインディング路からサーキットまでがターゲットシーンのため、「YZF-R25/R3」と「YZF-R6」の間を取る位置に設定した(図3)。

また、ライダーはスポーツ走行時に着座位置の移動や、腕、膝、太ももを使って体を支える等、全身を使って走行している。その動作が邪魔されないこと、適切な支えを得られること、すなわち、ライダーの運動性と快適性をバランスさせることができることがSSPモデルにおいては重要である。「YZF-R7」においてはハンギング時の着座位置移動にも十分対応できるようシート後ろ半分の座面を広くとるとともに、腕、膝、太ももの支えを得られるようタンクカバーおよび周囲のカバーの形状を工夫している。

これらにより、スポーティーかつ操作性に優れたライディングポジションを実現させた。

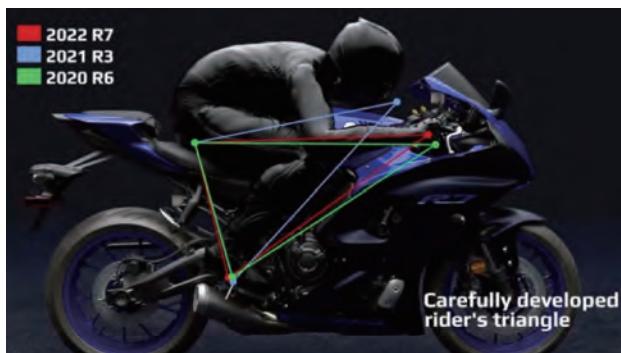


図3 ライディングポジション比較  
(ヒップポイント基準)

### 3-1-5. エアマネジメント

「YZF-R7」はフルカウル化による空力特性の向上によりCP2エンジンをPFとした他のモデルより最高速も高くなった。しかし、これは同時に最高速状態においてエンジン回転数が高くなり、エンジンの発熱量が増加することを意味するため、そのままではエンジンオイルおよびエンジン冷却水の温度上昇に繋がり、エンジンの信頼性へ悪影響を及ぼしてしまう可能性がある。よって、NKモデルをベースとしたSSPモデルの開発においては、空力特性の向上とともに、走行風を利用したエンジンの冷却効率の向上が重要である。

「YZF-R7」においては、フロントカウル下側とフロントフェンダの間から車両内部に流入する走行風を効率的にラジエータに導き、さらには、ラジエータを通過した風が効率的に車外に排出されるようにインナーパネル形状の作りこみを行い効率的

なエンジンの冷却を行った。

ラジエータへの導風においては、特にヘッドライト下側からステアリング軸までのインナーパネル形状に着目し、CFD解析を用いて、走行風がラジエータに到達する際の圧力が大きくなるように外表面の形状を調整した(図4)。

また、インナーパネルはラジエータ後方にあるサイドパネル中央の穴まで延長されており、その穴を通してラジエータを通過した走行風が車外へ効率よく排出される構造になっている。

これらにより、「MT-07」に対してフルカウル化により最高速を向上しつつも、同等のエンジン信頼性を確保できた。

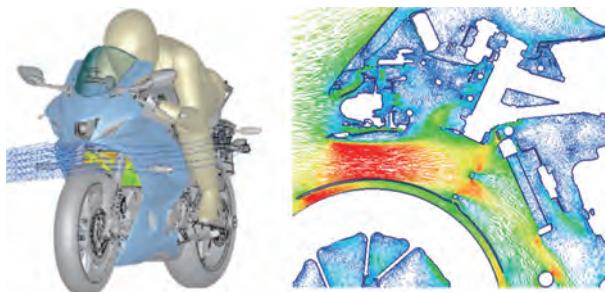


図4 CFD解析結果

### 3-1-6. ブレーキ

「YZF-R7」は前述したスポーツ走行性の向上を図るため、フロントブレーキシステムにおいて上位機種同等のラジアルマウントキャリパを採用するとともに、ブレーキレバーの入力に対してよりリニアでダイレクトな効力フィーリングを得られるラジアルマスターシリンダを新作した。

これらにより「YZF-R7」は良好なブレーキ効力のみならず、コントロール性にも優れたブレーキシステムを実現させた(図5)。



図5 ラジアルマスターシリンダ

### 3-2. "Skinny Proportion" スタイリング

「YZF-R7」のスタイリング開発にあたっては、“Skinny Proportion for Perfect Control”というデザインコンセプトを掲げて取り組んだ。これはCP2エンジンが持つ軽量・スリム・コンパクトという特性を生かし、コーナリングや切り返し等の運転操作において、車両を意のままにコントロールする楽しみを表現したコンセプトである(図6)。

本項では、このコンセプトに対する徹底したこだわりを記述するが、そのこだわりは、「YZF-Rシリーズ」の中で「YZF-R7」が最もスリムなカウリングを獲得している事からも伺い知れる(図7)。



図6 デザインコンセプト(イメージ図)



図7 現行Rシリーズ一覧

#### 3-2-1. 次世代Rを象徴するヘッドライトレイアウト

“Skinny Proportion”の実現においてまず直面した課題はヘッドライトレイアウトである。現行「YZF-R1/R6」と同等の位置にレイアウトするために、フロントフェンダと前輪の可動軌跡を避ける必要が生じるため、ヘッドライトを車両中央にレイアウトすることができず、その結果、カウリングの横幅が大きくならざるを得ない状態であった。



図8 ヘッドライトレイアウト

そのため、車両中央にヘッドライトを収めることを試行錯誤した結果、行きついた解決策がM字ダクト内にヘッドライトを収めることであった(図8)。

同時にM字ダクトのイメージを守るために、ヘッドライトを可能な限りダクトの奥に収められるように、ヘッドライトの光線の広がり方を調整した。

この大胆なチャレンジにより、上述した「YZF-Rシリーズ」の中で最もスリムな車体を獲得し、“Skinny Proportion”コンセプトを実現することができた。

#### 3-2-2. ウイングレット+エアマネジメントカウル

3-1-5項で記述の通り、エアマネジメントは「YZF-R7」の開発における大きな課題であった。これはラジエータへの導風に限らず、車体内部に散りばめられた電装部品の冷却に対しても言

えることである。

一方、前項で記述したヘッドライトのM字ダクト内部へのレイアウトは、ダクトを通過し車両内部に導風される走行風の流量を減らしてしまうため、いかに走行風を効率よく車両内部へ導くかということが重要になる。

この課題に対するデザイン面での対応がM字ダクト下側のウイングレットや、フロントカウルステーのカバーや、タンクカバー前端中央の梁出し形状等のエアマネジメントパーツの新設であり、ポジションライト下へのダクト追加である。

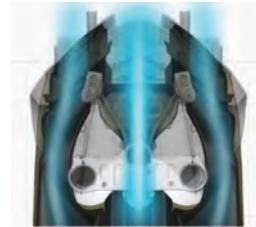


図9 ダクトからの導風 (イメージ図)

これらによる車体内部への導風により、必要十分な電装品の熱的信頼性を得た。またこれは「YZF-R7」においては一見、デザインパーツと思われるパーツでも機能的役割を担っていることを示す例である(図9)。

### 3-2-3. コックピットを演出するメーター

コックピットはライダーの視界に入る機会が多く、ライダーが「YZF-R7」に対して抱くイメージを決めるうえでも重要な部位である。そのコックピットを彩る部品として、「YZF-R7」においてはメーターを新作した(図10)。

デザイン検討においては造形的なデザインだけでなくディスプレイ内の各機能の表示や各種インジケーターの配置までこだわり、「YZF-R7シリーズ」としてのリレーションを取りると同時に、コンパクトな車体にもマッチしたデザインにした。



図10 メーター (デザインスケッチ)

このPF展開の一翼を担うのに十分なモデルを開発できたことに喜びを感じるとともに、多くのお客さまに本モデルを通して、走る喜びを感じて貰えることを願っている。

#### ■著者



今村 充利  
Mitsutoshi Imamura  
PF 車両ユニット  
PF 車両開発統括部  
SV 開発部



脇本 洋治郎  
Youjiro Wakimoto  
PF 車両ユニット  
PF 車両開発統括部  
SV 開発部



蓮見 洋祐  
Yousuke Hasumi  
PF 車両ユニット  
PF 車両開発統括部  
車両実験部



柳原 慶志  
Keishi Yanagihara  
PF 車両ユニット  
PF 車両開発統括部  
車両実験部



南雲 正智  
Masatomo Nagumo  
PF 車両ユニット  
PF 車両開発統括部  
機能モジュール開発部



木下 保宏  
Yasuhiro Kinoshita  
クリエイティブ本部  
プランニングデザイン部

## 4 おわりに

ここまで記述を通して理解して頂けると思うが、本モデルは最新の製造技術や電子制御を盛り込んで開発されたモデルではなく、既存の技術の創意工夫で創られたモデルである。

しかし、そうであるからこそ丁寧な作り込みによって、本モデルを「MT-07」の良き素性を生かしつつも、スポーツライディングをする上でも十分な適性を有したSSPモデルとして昇華させることができた。

また、本稿冒頭でも記述した通りCP2エンジンを使用したPF展開は多岐に渡っているが、それぞれが異なる特徴を有した非常に興味深いPFである。



### Abstract

Under the condition of adventure category expansion globally, we decided to start development of all new middle-class adventure motorcycle with CP2 PF engine in YMRE under the brand "Ténéré". In parallel, its manufacturing sites were decided as both MBK in France and YMC in Japan to be as close as possible to main markets.

For YMRE, it was very first time to develop such a global model with high development rank. Though we faced a lot of difficulties, we accomplished it together with all the related divisions and companies, and as a result, this motorcycle has been very well appreciated in the global market after its launch.

## 1 はじめに

世界的なアドベンチャーカテゴリの伸長を受け、「Ténéré」ブランドの下、CP2プラットフォームエンジンを使ったミドルクラスアドベンチャーモデルの開発を Yamaha Motor Research & Development Europe s.r.l. (以下、YMRE) で行なった。同時に主要市場にできるだけ近いところで生産をするため、フランスの MBK Industrie (以下、MBK) と日本の二か所で生産することも決定した。

本稿ではこの「Ténéré 700」の開発概要を紹介する。

- ・ 幅広い路面状況において、ワクワクし楽しく乗れる。

これらのブランドプロミスを満足させるため、軽量化、良好なライダーエルゴノミクス、コントロール性の高いエンジンキャラクタを作りこむことにより、「車両トータルとしての良好なコントロール性」と“自信を持って乗れる”ことを目指し、集中して取り組んだ。加えてデザイン面では、オフロードや市街地など様々なライディングシーン、背景において映える、シンプルかつ機能的で美しいスタイリングを目指した(図1)。



図1 機能性とデザインの両立

## 2 開発目標

「Top of Adventure Ténéré」というコンセプトの下、開発を開始した。

まず40年の歴史がある「Ténéré」ブランドとは何なのか考え、議論することから始め、以下のように結論付けた。

- ・ 世界中どこへでも行きたい所へ行けるという夢を持てる。
- ・ お客様の挑戦心、冒險心に応えることができる。

そして上記の大きな方向性の下、プロジェクトメンバーによる長い議論や経験、体験の共有の末、ターゲットカスタマのプロファイル、どんなシーンで(各路面、スピード、操作)、どのように感じて欲しいのか、詳細にわたる目標を決めることができた。

## 3 開発内容

開発着手の際、我々の手の中にあったのは CP2エンジンのみであった。このエンジンを白紙の上に置いて、開発目標を達成するために計画に着手した。基本計画に着手し、まずは良好なライダーエルゴノミクス、シート高、最低地上高、燃料タンク容量、そして美しいシルエットのベストバランスを成立させることに苦しんだ。この課題解決は、開発チームだけでなくマーケティング、販売、品質保証、製造エンジニアなどの協力無くしては不可能であった。

また機能面では、良好な軽快感／俊敏性と高速安定性を両立させることができが開発の鍵であった。YMRE の優秀な設計エンジニアや実験スタッフの力に加え、当初はコミュニケーションに課題があったものの、日本を初めアメリカ、オーストラリア、欧州の世界中から集まったライダー達の強力なサポートがあって、この課題を解決することができた。

### 3-1. エンジン

下記理由により、本モデルに向けて CP2エンジン (Cross-Plane Twin, 689cm<sup>3</sup>) を選定した。

- 必要十分な54kW @ 9000rpm の出力を備えた、軽量、コンパクトさ
  - 素のままでも非常にコントロール性が高い
  - トルクフルでレスポンス良く、Fun 性の高いキャラクタ
- 加えて、ベースに対し下記ポイントについて改良を加えた。
- 中速域の幅広いトルク特性
  - より素早い回転上昇とダイレクトなレスポンス
- そのため、図2に示すアイテムについて変更した。

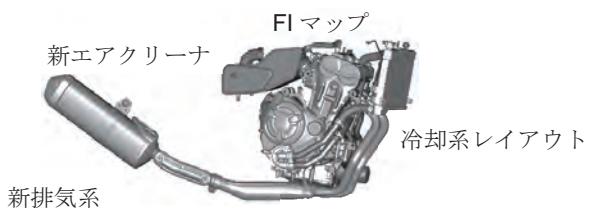


図2 エンジン変更点

### 3-2. フレーム

フレームは下記要件を満たすため、完全に新作した(図3)。

- 軽量・スリム・コンパクト
- 想定される路面・乗り方に耐える十分な強度
- 良好なライダーエルゴノミクス
- ニュートラル・直観的なハンドリングを産み出す剛性バランス

上記要件を満たしつつ、CP2エンジンを搭載するため、フレームは下記の形式とした。

- 高張力鋼を使用したダイヤモンド型
- 強固にサポートされたヘッドパイプ
- 取り外し可能なダウンチューブ
- 高荷重に耐えるリヤフレーム部



図3 新作フレーム外観

### 3-3. サスペンション

ニュートラルで直観的なハンドリングを達成し、ライダーが自信を持ってライディングを楽しめるよう、以下のような仕様のサスペンションを前後に採用した。

#### 3-3-1. フロントフォーク(図4)

- インナーチューブ径  $\phi 43\text{mm}$  KYB 製倒立
- 210mm ストローク
- 伸圧減衰調整機構
- エアブリードスクリュー



図4 フロントフォーク

### 3-3-2. リヤサスペンション(図5)

- ・ ボトムリンクタイプ、200 mm ストローク
- ・ 軽量高強度なアルミ重力铸造製リヤアーム
- ・ リザーブタンク付アルミシリンダーKYB ユニット
- ・ 伸圧減衰調整機構
- ・ リモートプリロード調整機構



図5 リヤサスペンション

このような組み合わせにより、各種走行における十分な制動力と、オフロード走行における特にブレーキングの初期フィーリングを重視した良好なコントロール性を達成することができた。

### 3-5. オフロード性を高めるアイテム

オフロード性を高めるため、下記のようなアイテムを選定し搭載した。

- ・ ヤマハ初となる、オフロード走行用 ABS 機能 ON/OFF スイッチ(図8)



図8 メーター配置の ABS スイッチ

### 3-4. ホイール／ブレーキ

フロント21インチ、リヤ18インチホイールを採用し、オフロードでの良好なハンドリング、走破性を狙った(図6)。

- ・ フロント:282mm ダブルウェーブディスク
- ・ リヤ:245mm シングルウェーブディスク
- ・ 前後 Brembo 製軽量ブレーキキャリパ(図7)



図6 スpokeホイール

- ・ 最低地上高240mm を確保したアルミ製スキッドプレート(図9)



図9 スキッドプレート

- ・ ブラッシュガード(図10)



図10 ブラッシュガード



図7 フロントブレーキ

- ・取り外し可能なゴム装着のワイドフットレスト
- ・可倒式ブレーキ、シフトペダル(図11)



図11 フットレスト、ペダル



図13 縦置きメーター

### 3-6. 電装系

オフロード走行性能とイメージを確保することを狙い、社内 DAKAR バイク開発チームとも情報共有、協力しながら電装系部品の開発を進めた。

#### 3-6-1. 新作ヘッドライト

良好な性能とデザインを達成するため、4つの LED ユニットを、デザインされた強固なアルミ製ブラケットに搭載するヘッドライトを新規に開発した(図12)。これにより特に点灯時は、遠くからでも一目で Ténéré 700 と分かる特徴のある外観を獲得することができた。



図12 4灯 LED ヘッドライト

#### 3-6-2. 新作テールライト

LED 採用により、コンパクトで信頼性の高く、電力消費量を抑えたテールライトを開発した。

#### 3-6-3. 新作メーター (ABS 機能 ON/OFF スイッチ付)

通常とは異なる「縦置き」メーターを採用し、ラリーイメージを訴求した。ディスプレイは奇をてらわず、必要十分な情報をシンプルに表示し、視認性と信頼性を高めている(図13)。

## 4 まとめ

開発の結果、我々は下記のような目標を達成することができた。

- ・装備質量204kg／乾燥質量187kg (クラス最軽量)
- ・前後荷重配分48%:52%
- ・シート高875mm、シート形状も合わせて良好な足つき性
- ・直観的、ニュートラルかつアジャイルなハンドリングと良好なライディングポジションにより、幅広い状況・場面で自信を持ってライディングできる
- ・エンジン性能の作りこみ、搭載位置やディメンジョン等の選定により、エンジンのコントロール性が高く、トラクション感を感じやすい

2019年5月にスペイン・トルトーザにてグローバルプレス発表会、2019年7月には MBK で生産立ち上がりとなった(図14)。

プレス発表における評価は非常に高く、特にオン・オフ問わないコントロール性の高さと美しいスタイリングは好評であった。



図14 プレス発表会(於スペイン)

メディアも一般のお客さまも、競合に対する差別化ポイントである機能性、オフロード性能、軽量さ、手の届きやすい価格をすぐに理解していただけた。またこれらの性能、機能、スペックのみならず、発表前からのマーケティング活動 (T7コンセプト

バイク、Ténéré World Raid) や、購入されたお客様が本物のオフロードやアドベンチャーライディングで満足度を高め、ソーシャルメディアで発信することにより、Ténéré 700は「Ténéré ブランド」を素早く広め、高めることができた。結果として、販売もグローバルで非常に好調である。

成功要因のひとつは、本モデル創りに携わった、事業企画、原価企画、商品企画、デザイナー、設計、実験、品質保証、調達、製造、マーケティング、販売、サービスといった、すべてのバリューチェーンの方々が「ワンチーム」となったことだと考える。最後に、開発チームは解散となつたが、今回の開発における成功要因、失敗をそれぞれが生かし、次に創造する価値を高めていきたい。“grazie mille!!”

### ■著者



白石 隼士郎

Takushiro Shiraishi  
PF 車両ユニット  
PF 車両開発統括部  
PF 戰略部



Stefano Galimberti  
YMRE<sup>1)</sup>  
BD Engineering  
PC



Stefano Sarti  
YMRE<sup>1)</sup>  
EL Engineering  
PC



Paolo Barlaam

YMRE<sup>1)</sup>  
Testing  
PC



Leon Oosterhof

YME<sup>2)</sup>  
Product Planning  
Product management

1) YMRE: Yamaha Motor Research & Development Europe s.r.l.

2) YME: Yamaha Motor Europe N.V.

# The Rodeo Master 「MT-09/SP」

## Multirole fighter of the Motorcycle 「TRACER 9 GT」

北村 悠



## Abstract

Continuing from its first generation as a new model in 2013, and its successive second generation with a renewed appearance, we have newly developed the third generation "MT-09," with completely redesigned engine, body, and electrical components while maintaining the role of an image leader for the "Master of Torque," used as the overall slogan for the "MT series." In addition, the Versatile model "Tracer 9 GT," which has both high mobility and functionality, has also evolved into its third generation.

These two models use a common platform (hereinafter referred to as PF) such as the engine and mainframe, but while the PF aims for class-leading performance and weight reduction, the details have been crafted to achieve the extremes of the two models' concepts. This paper introduces initiatives used in the development of these models.

## 1 はじめに

2013年にNEWモデルとして登場した初代、外観を一新した2代目に続き、「MTシリーズ」共通スローガンである“Master of Torque”的イメージリーダーとしての役割はそのままに、エンジン・車体・電装部品を全面刷新した3代目となる「MT-09」を新たに開発した。また、高い運動性と機能性を両立させたVersatileモデルである「Tracer 9 GT」も3代目への進化を果たした。

この2モデルはエンジンやメインフレームなど、共通のPlatform(以下PF)を採用しているが、PFはクラストップレベルの性能や軽量化を目指しつつも、細部は2モデルのコンセプトの極限を目指して作り込みを行っている。本稿ではその開発の取り組みを紹介する。

ンを手足のように操れることをイメージしている。このコンセプトを具現化するための開発テーマとして、“More Torque & Agile + Feel”を掲げた。レベルアップして日常域からでも楽しめる“Torque & Agile”な走りに加えて、ライダーの感覚に訴える官能性能を高めることで、走りのエキサイトメントをより強く感じることを進化のポイントとした。排気量アップにより増強した低中速トルクを600cm<sup>3</sup>クラスの軽量な車体と各種電子制御とデバイスのサポートを活用し、自由自在に操ることで、日常域でも非日常的な刺激を楽しめるマシンを目指した。

### 2-2. 「Tracer 9 GT」

商品コンセプトは“Multirole Fighter of the Motorcycle”とし、陸海空の様々な作戦を高い機動力と積載能力でカバーする多目的戦闘機をイメージしている。初代から一貫して、スポーツ性能とツーリング性能の両立を目指しているが、本モデルではよりスポーツの刺激を高めることと、多用途性を向上させることを目指した。そのために技術的に背反することを高い次元で両立する取り組みを行った。

## 2 開発の狙い

### 2-1. 「MT-09」

商品コンセプトは“The Rodeo Master”とし、刺激的なマシ

### 3 開発の取り組み

#### 3-1.「MT-09」

##### 3-1-1. "More Torque & Agile"

"More Torque & Agile" を達成するために、888cm<sup>3</sup>に排気量アップしつつも、軽量コンパクトな新設計3気筒エンジンを開発した。従来のエンジンに対し、87Nm から93Nm に増大した最大トルクを1500回転低い7000回転で引き出している。全域でトルクアップしており、街中ではトルクフルで扱いやすく、開ければ強大なトルクによるダイナミックな加速を楽しめる。最高出力も85kW から88kW にアップし、リッタークラスから乗り換えたお客さまでも満足できる性能となっている(図1)。このエンジンはピストン、コンロッド、クランクシャフト、カムシャフト、クランクケースといった主要パーツのほとんどを新設計しており、性能アップしながら燃焼改善と軽量化により、燃費向上とEU5対応を実現した。

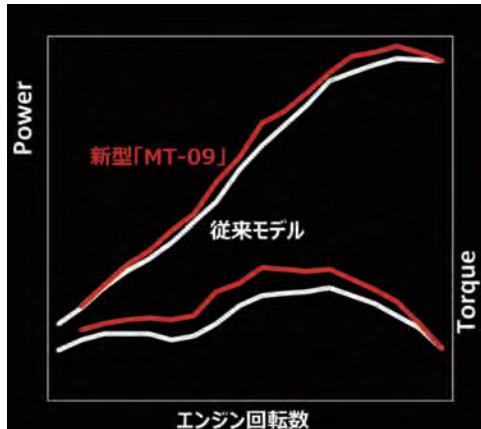


図1 エンジン性能

ただトルクが太いというだけではなく、軽量かつ自由自在に操れる車体があるからこそ "More Torque & Agile" として成り立っている。本モデルでは、車体全体にわたって徹底的な軽量化に取り組んだ。

メインフレームとリヤフレーム(図2右側)は、CFアルミダイキャスト技術により、最低肉厚を従来の3.5mm から1.7mm まで下げる達成し、軽量なアルミパネルのボックス構造リヤアームと合わせて、骨格系で2.3kg の軽量化を実現した。

エンジンも吸気系や排気系を含め1.7kg の軽量化(図2左側)、ホイールは新たに採用した「SPINFORGED WHEEL」技術により、前後で700g の軽量化を実現した(図3)。この軽さは、押し歩きやまたがっただけでも体感できる。



図2 エンジン及び、フレームとリヤアーム



図3 SPINFORGED WHEEL

また、軽いだけでなく、リヤアームピボットを外側からフレームで支える構造に変更することや(図4)、フレームの縦・横・ねじりの剛性バランスの最適化を行っている。ハンドル、コンパクトなヘッドライト、フロントフォークやフロントホイールといった操舵系の慣性モーメントの低減とも合わせて、より自然でアジャイルな操縦特性と、直進安定性、コーナリング時の安定性を作り込んだ。

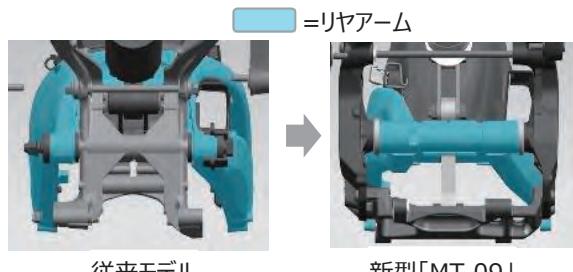


図4 ピボット周り締結構造

"More Torque & Agile" なマシンを手足のように操るライダーをサポートするために、Inertial Measurement Unit (IMU)を活用した各種制御を採用した(図5)。当社のスーパースポーツのフラッグシップである「YZF-R1」の高精度なIMUをベースとして新開発し、基本性能を維持しながら、小型化・軽量化を実現した。

IMUとEngine Control Unit(ECU)、Hydraulic Unit (HU)が連携し、各種制御を行っている。Traction Control SystemはIMUで推定したバンク角の情報を反映して、介入度を補正し、加速時の後輪駆動力を効率的に引き出すシステムである。Slide Control SystemはIMUで推定したリヤタイヤの横滑り

情報を反映して出力を補正し、ライダーのスポーティな走りを支援する。Lift Control System は IMU の車両姿勢情報などから、前輪の浮き上がり傾向を推定し、加速時の車体挙動を穏やかにする。Brake Control は、通常の ABS に加えて、バンク角と横滑り情報を反映して、前後輪ブレーキ圧力を制御するシステムである。Traction Control System、Slide Control System、Lift Control System はライダーの好みに合わせて、介入度の変更が可能である。制御介入時にライダーの走りをサポートする自然な介入となるように作り込みを行った。



図5 IMU

### 3-1-2. “+ Feel”

“More Torque & Agile”なマシンをよりエキサイティングに感じることと、買っていただいたお客様に使うたびに所有する満足感を感じていただくために“Feel”をテーマに官能性能と質感、所有感の向上も行った。

最もこだわったのがサウンドである。排気音と吸気音の質が乗り味に寄与する重要な因子であるため、サウンドデザインのキーワードとして、トルク感・加速感を決定した。

発進時はリヤの駆動力と同期した排気音によってトルクを感じ、スロットルを開けた瞬間に音が増大して聴こえるような、スイッチ感のあるサウンドが響きわたる。そして回転上昇に従って、ライダーへの主音源が排気音から吸気音へ切り替わるように調整を行った(図6)。

排気音の特徴は、サイレンサーの膨張室容積、パイプ長さ・径・パンチング面積、パンチングパーテーション、グラスウールなどが絡みあって形成される。低速コーナーからの立ち上がり時などのシーンを中心として、トルク感を演出できる新しい形が1.5段膨張室と左右シンメトリーのテールパイプである(図7)。

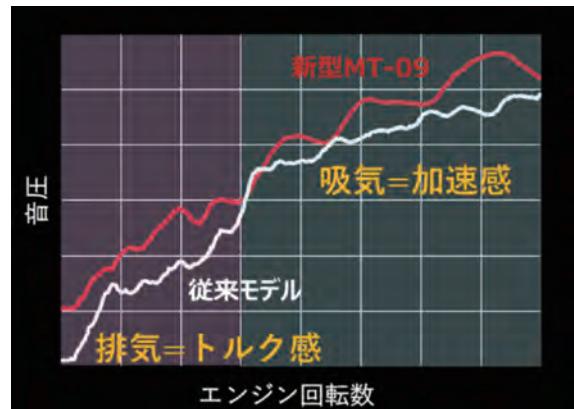


図6 ライダー耳位置サウンドカーブ

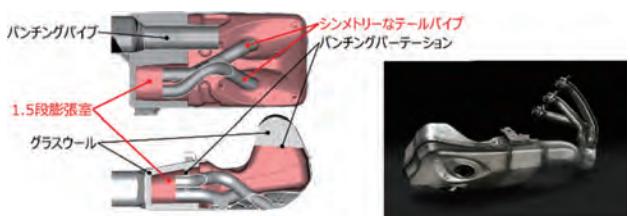


図7 サイレンサー構造

吸気音は、加速感の向上を狙いに開発した。様々なダクト形状や本数を手作業で試作し、官能評価を重ねた結果、辿り着いた新フィーチャーが3本ダクトである(図8)。さらに3本ダクトそれぞれの断面積・長さを調整し、3つの共鳴の組み合わせにより、中・高回転領域でのサウンドを強調している。こうしてエンジン回転が上昇するにつれて音圧が高まり、気持ちの良い加速感を演出。厚みがある音質、スロットルにリニアな音を奏でる。



図8 開発中のダクト形状と製品形状

また、官能性能や所有感はライダーが操作したり、視覚や聴覚で接する各コンポーネントでも作り込んでいる。

コンパクトなヘッドライト周りの造形に合わせて、3.5インチのフルカラーTFTメーターを採用した。回転数に応じて色が変化するデジタルバータコメーター、燃料計、平均燃費、水温計、外気温計、シフトインジゲーターなどの機能を搭載している。各機能の情報操作、セレクトはハンドルスイッチの操作で可能で、走行中に必要な情報が瞬時に把握でき、直感的な操作が可能であるように作り込んだ(図9)。

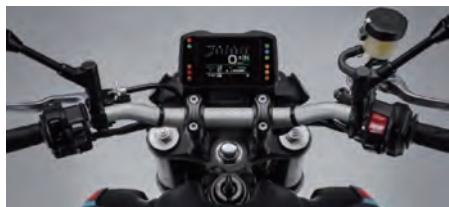


図9 メーター及びハンドルスイッチ

スロットルバルブ駆動は、従来同様 YCC-T(ヤマハ電子制御スロットル)を採用した。従来はアクセル操作をケーブル経由でブーリーに伝えていたが、本モデルではそのスロットルケーブルを廃した APSG(Accelerator Position Sensor Grip)を採用している(図10)。軽量化し、同時に優れたアクセル操作感を実現した。APSG では、アクセル開度をセンサーとマグネットにより検出、スロットルバルブの駆動モーターに反映する。また APSG の操作感はスプリング、スライダー、ギアで作り出され、アクセルオーブンに伴い摩擦感(抵抗感)を生み出すのが特徴である。仕組みは2020年「YZF-R1/R1M」同様の構造だが、本モデル用に開度、摩擦感などを専用チューニングしている。

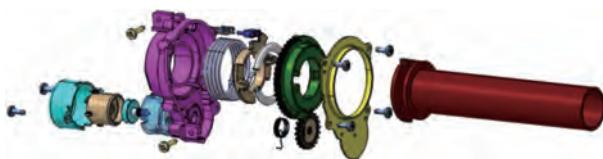


図10 APSG 構造

シフト操作を支援する Quick Shifter には、ダウントに対する機能を新たに追加した。シフトペダルの動きをシフトロッドにあるセンサーが検知すると、ECU 演算により出力を補正、ギアにかかるトルクを瞬間的にキャンセルし変速を促進する。自然なシフト操作荷重と心地よいシフトフィーリングにこだわって作り込んでいる。

灯火器には、コンパクトでデザイン性に優れ、優れた照射性をもつバイファンクション LED ヘッドライト(Hi-Lo 一体)を採用した。照射範囲と範囲外の境目のコントラストが穏やかで、柔らかく、ムラのない配光となっている。従来のモノフォーカス式ではなくプロジェクター式による配光としており、外側の厚肉レンズの内側にもうひとつのレンズを配置している。かつ複数の LED 光源からの照射により複雑に光を分散させ、幅広い配光を作り出す。ポジションライトも、導光体を備えた LED タイプとし、新しい「MT」フェイスを印象づける意匠となっている(図11左側)。リヤの灯火類も一新を図った(図11右側)。

スポーティな走りを支えるため、ブレーキは入力系のバージョンアップを図った。フロントのマスターシリンダーのピスト

ンは、レバーと同方向に動くラジアルマスターシリンダーを採用した。入力を、よりリニアにブレーキ油圧へ伝えることが可能となり、優れたコントロール性をもたらす(この機構は、「YZF-R1」に次いで今回が2モデル目の採用となる)。



図11 ヘッドライト及びテールライト

### 3-1-3. スタイリング

本モデルでは、大きく進化したマシンのポテンシャルを、より表現するため、そのパワーを視覚的に強く印象づけるスタイリングを求めた。

デザインコンセプトは、“Instrument for the Senses”とおり、キーワードは3つ、“Evolution of MT DNA”、“Bare and Beautiful”、“Hearable with the Eyes”とした。

管楽器のように、機能のための最低限の外観でありながら、そのものの美しさが目を楽しませてくれ、感性 “Feel” を刺激する、というイメージのデザインコンセプトとした。見かけだけの美しさでなく、本モデルがもつ“音・トルク感・自由自在・軽快感”といった持ち味を、生み出す機構・構造そのものが美しいことを伝えたいと考え、本質的な美しさの表現に強くこだわった。

#### 3-1-3-1. サウンドの表現

空気を吸い込むエアインテークとそこに風を導くフロントウイング、エンジンの燃焼が、空気を通じてライダーに届くサウンドを表現した。その空気の“流れ”や音の“波”をスタイルに込めている(図12)。



図12 インテークとエギゾーストで魅せる音

### 3-1-3-2. トルク感の表現

トルク感・加速感をスタイリングで表現するため超凝縮のマス集中化と、力が溜まっている様を示唆するエンジンまわりとした。

### 3-1-3-3. 自由自在感の表現

マシンの上で自由自在に動き、マシンと一体になって "Agile" にコントロールできそうなスタイリングを追求した。マシンとライダーがシンクロし、ライダーの意のままに操れるイメージを持たせている(図13)。



図13 モタード的ライダーコンタクトエリアで魅せる自由自在

### 3-1-3-4. 軽快感の表現

軽量化したボディによる軽快なハンドリングの表現に注力した。外装パーツ類のない骨格状態での本質的な凄みを表現するため、カバー類を極力減らし、骨格での機能表現に注力している。

### 3-1-4. 「MT-09SP」

「MT-09」に対してより高い車速域で楽しめることと、クラスを超えた上質感、所有感を提供することを目的に上級バージョンの「MT-09SP」も設定した。フルアジャスタブルな前後専用サスペンションや専用カラーリングを採用した。フロントフォークは、インナーチューブにDLCコーティングを採用し、フリクション低減により作動性を向上、上質な乗り心地を実現するとともに、ブラックの外観が精悍な印象となっている。ツーリングでの快適性に貢献するクルーズコントロールシステムも装備している。

## 3-2. 「Tracer 9 GT」

### 3-2-1. 刺激的な走りと安定性の両立

刺激的な走りを楽しむために、エンジンは「MT-09」と同時に開発し、ライダーを支援するIMUによる制御も「MT-09」同様に採用した。軽量な「SPINFORGED WHEEL」とメインフレームは「MT-09」と共通であるが、ツーリングで積載しながら高速走行するようなシーンでの直進安定性を高めるために、専用設計のスチールパイプ製リヤフレームと、「MT-09」に対して、60mm延長した専用設計のアルミ製ロングリヤアームを採用した。ヘッド

パイプ後ろのステーやエンジン懸架のブラケットを専用チューニングすることでも、剛性バランスの最適化を行った(図14)。



図14 共通フレームと専用設計のリヤフレーム、リヤアーム

また、タイヤはブリヂストンと共同開発した新作タイヤ「Battlax Sport Touring T32」を採用した(図15)。新型「Tracer 9 GT」に合わせ専用チューニングを行った。

これにより、「Tracer 9 GT」は、刺激的な走りと安定性を高次元で両立することができた。



図15 専用タイヤ

### 3-2-2. 刺激的な走りと快適性の両立

「Tracer 9 GT」にはスポーツ性と乗り心地の両立を図るために、KYB社と共同開発による電子制御サスペンション「KADS」を採用した。走行状況に応じ最適な減衰力を発揮し、優れた乗り心地、接地感をもたらす。

仕組みは6軸のIMUとECU、HUの情報にもとづき、SCU(Suspension Control Unit)が、減衰レベルを最適化する(図16)。減衰力の調整機構には、ヤマハ初となるソレノイド駆動を用いており、素早く減衰力を調整できる。またこの新減衰調整機構は、減衰を大きく変化できることも特徴である。

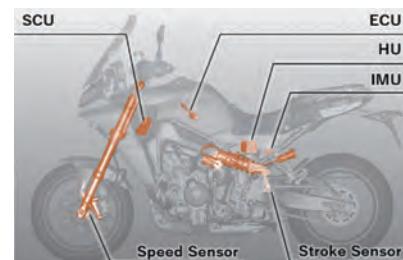


図16 電子制御サスペンション システム構成

ピストン低速時でもしっかり減衰力を発生させ、発進時の車輌姿勢の安定化にも貢献する。その他、加減速時の車輌姿勢安定化、旋回時の走行性に効果がある。フロントは伸側・圧側減衰力を、リヤは伸側減衰力を調整する。モードは、スポーツモード(A-1)とコンフォートモード(A-2)を設定した(図17)。A-1モードは、ドライのスポーティな走りを主体にウェットにも対応できるモードとし、A-2は、アスファルトの継ぎ目や、石畳路など、荒れた路面での快適な乗り心地を狙ったモードとした。

これにより、目的地までの快適な移動と、ワインディングでの刺激的な走りを高いレベルで両立することができた。

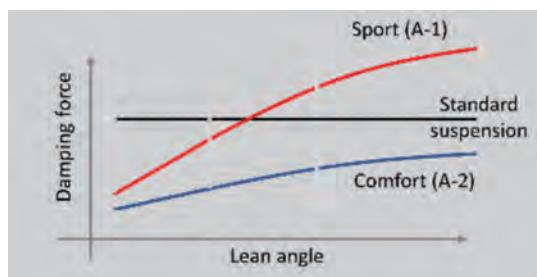


図17 減衰力特性イメージ

### 3-2-3. 多用途性の向上

スポーツツアラーとして、多用途性をさらに高めるため、純正アクセサリーのトップケースとサイドケースの合計3バッグを搭載可能な仕様とした。上側のサイドケース取付用ステーは、車両本体装着とし、は新たにダンパー内臓の構造とした(図18)。サイドケースの振動を車体と切り離しながら、ダンパーで減衰させることで、高速走行時の高い直進安定性を実現した。また、積載しない状態と積載した状態でのハンドリングの変化も少なく、積載時でも走りを楽しむことが可能である。

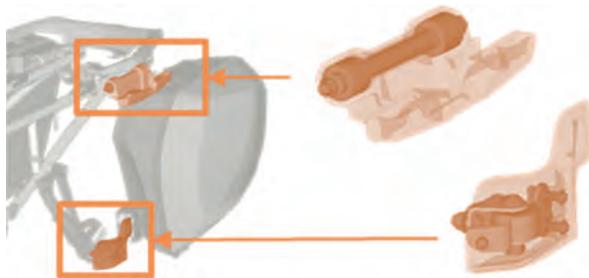


図18 サイドケース懸架構造

ロングツーリングに使っていただくことを考え、夜間の走行にも快適性の向上を図った。そのために新開発のLEDコーナリングランプを採用している。車速5km/h以上で、バンク角が7度を超えるとハイビーム・ロービームいずれの場合もイン側の

コーナリングライトが点灯を開始し、バンクが深くなるに伴いリニアに明るくなる。照射エリアが広がることで夜間走行でのライダーの負荷軽減を図った(図19)。またエイミング(光軸)の最適設計により、コーナリングライトとヘッドライトの照射範囲の間に暗がりができる、シームレスな照射となっている。



図19 コーナリングライト照射イメージ

バンク角検出は、IMUの高速演算処理で行い、通信によりコーナリングライトコントロールユニットにて点灯する仕組みである。コーナリングライトは、「FJR1300AE」に続く2機種目の採用となる。片側3灯のLEDが調光しながら点灯する「FJR」に対し、「Tracer 9 GT」は片側1灯のLEDの明るさが徐々に上昇し、機能的かつ質感の高い配光となっている。

### 3-2-4. スタイリング

スタイリングコンセプトは、“Agile & Minimalist Traveler”である。旅慣れた人は両手を自由に使って身軽に動けるバックパックで荷物を運ぶ。そんな“機動性と機能性”をデザインで表現した。そこに求められるのは、旅のプロフェッショナルが使う道具のような雰囲気である。モーターサイクルに置き換えれば、最適なウインドプロテクションや走行に必要な機構のミニマム化と積載物のインテグレーションである。

スタイリング創作のキーワードは“Professional Traveler”と“Tour Invitation”とおき、意匠のための要素をなるべく取り除くことで、旅するための機能を最優先にしたバックパックのような印象を創り上げた。

#### 3-2-4-1. “Professional Traveler”

「MT-09」がもつ超凝縮マスのPFをもとに、最適なウインドプロテクションのための最小限の機構を追加した。そのために、スクリーン、フロントカウル、ブラッシュガードをライダーに寄せたデザインとしている。さらに機動性と機能性に絞ったコンパク

トな灯火器を採用することで、旅のための機能を最優先した“Professional Traveler”を表現した。

ハードケース装着時のスタイルは、積載物のインテグレーションによる身軽な印象を具現化している(図20)。コンパクトな灯火器とライダーに寄せたウインドプロテクションパーツは、機動性や機能性の表現だけでなく、PFの特徴である凝縮マスの視覚化や先進的な表情にもつながっている。



図20 スポーツライディングを楽しむための積載インテグレーション

### 3-2-4-2. “Tour Invitation”

目的地へ向かう推進力表現や視界・可動範囲の広さを感じる表現により、旅に出たくなる雰囲気を持たせた。最適なウインドプロテクションを確保するスクリーンやフロントカウルにより、推進力・進む方向を指し示す“Arrow Silhouette”を形作っている(図21)。



図21 推進力を感じるアローシルエット

スクリーン、フロントカウル、ブラッシュガードは、ウインドプロテクション機能や“Arrow Silhouette”的構成部品としての役割だけではなく、視覚的に“ボディの凝縮感”と“抜け感(軽快感)”をバランスさせたデザインとした。

加えて、コンパクトなブラッシュガードやフローティングさせた3.5インチダブルTFTメーターは広い視界や、ハンドル切れ角の可動範囲の確保に貢献し、旅の中での軽快なハンドリングや風景を楽しめそうな雰囲気を醸し出している。

メインシートは、長時間のライディングも楽しめる快適性や、ホールド性と足つき性をバランスさせたデザインとした。タンデムライダーの快適性も重視し、厚みのあるタンデムシートを採用している。グラブバーは、腰のホールド性やタンデムグリップの握りやすさと車体デザインの調和を図ったデザインとした。

## 4 おわりに

前述の通り、それぞれ特徴的で大きく個性が異なる2モデルを開発することができた。それは、クラストップレベルの商品競争力と高い汎用性に着目し、軽量・スリム・コンパクトな車体とトルクフルかつ官能的なエンジンを軸にPFを開発してきた結果に他ならない。

「MT-09」と「Tracer 9 GT」は、電子制御や新技術によるフィーチャーなどが注目されやすいが、開発を進めるにあたっては、それらの進化が、お客様が乗るたび・使うたびに悦びを感じてもらえるように実機での官能評価を大切にし、試行錯誤を重ねて作り込んでいる。このヤマハの“人機官能”思想により生み出された感動を、多くのお客さまに体感していただくことを期待する。

### ■著者



写真提供:レスポンス

北村 悠

Yu Kitamura

PF車両ユニット

PF車両開発統括部

SV開発部

琴野 瑛仁 対馬 翔大



### Abstract

In recent years, the needs of boat users have changed, and the move to bigger boats is accelerating. At the same time, even for large boats, where inboard motors and sterndrive motors have traditionally been the mainstream, outboard motors have had their field expanded due to reasons such as maintainability and superiority in utilizing inboard space, and the usage areas for these models have also increased in line with their demand.

In addition, due to the influence of the COVID-19 pandemic that is rampant all over the world at present, boating has come into the limelight as a means of staycation that avoids close contact with others. Not only those who have the special operational skills to enjoy marine leisure on a daily basis, but also the number of users who are inexperienced, such as beginners with little experience, and users who have switched to larger vessels, are increasing. There is also a growing need for improvement in line with this trend.

The "F/FL300F" developed is a product designed with the aim of allowing more users to enjoy boating more comfortably and safely.

## 1 はじめに

近年、ボートユーザーのニーズに変化があり、艇の大型化がさらに加速している。同時に、従来、船内機や船内外機が主流となっていた大型艇に対しても、メンテナンス性や船内スペース活用に対する優位性などの理由により、船外機の活躍の場が広がり、大型船外機の需要が拡大している。

また、昨今、世界中で猛威を振るっている新型コロナウイルスの影響により、外部との接触や密を避けられるステイケーションの手段として、ボーティングが脚光を浴びることとなった。従来からマリンレジャーを日常的に楽しむ操船スキルを持った方だけではなく、操船経験の少ない初心者や大きな船に乗り換える

たユーザーなど、操船スキルの未熟なユーザーも増えており、自ずと操船性や安全性の向上に対するニーズも高まっている。

今回開発した「F/FL300F」は、より多くのユーザーに対して、より快適に、そして、より安全にボーティングを楽しんでいただくことを目指して開発した商品である。

## 2 開発の狙い

本モデルでは、世界中のユーザーの様々な使い方に適応することを目指して、弱点の無い、総合力の高いモデルを目指して、下記5項目を主要な狙いと定めた。

- ・世界中のユーザーから高い評価を得ている、現行機「F300B」の良さをしっかりと継承
- ・内蔵型電動ステアリングなどの先進技術の取り込みと技術進化
- ・外観品質、デザイン性の向上
- ・次世代ポート統合制御システム「HELM MASTER EX」との組み合わせによる価値の最大化
- ・ヤマハ船外機伝統の信頼性の強化

### 3 商品の特長

本モデルでは、開発の狙いでも示した通り、軽量ハイパワーと高い信頼性の両立により、世界中のお客様の様々な使い方に適応し、高い評価を得ている現行機「F300B」の良さをしっかりと生かしたうえで、先進技術との融合を図った。また、同時にNEWプロペラ「Saltwater Series II HP」をセット開発することで、航走性能の改善を実現した。

表1に主要諸元を、図1にレーダーチャートを示す。

表1 主要諸元

モデル名	F300B	F300F
出力	220.6 KW/5,500 rpm	
エンジン形式	4ストローク V6 DOHC with VCT	
排気量	4,169cm <sup>3</sup>	
圧縮比	10.3	
質量	260kg	288kg
ギヤ比	1.75	
燃料	プレミアムガソリン	
シフト方式	電動 DBW	
ステアリング方式	メカニカル	電動 SBW
トータルチルト	—	○
チルトリミット	オプション	○

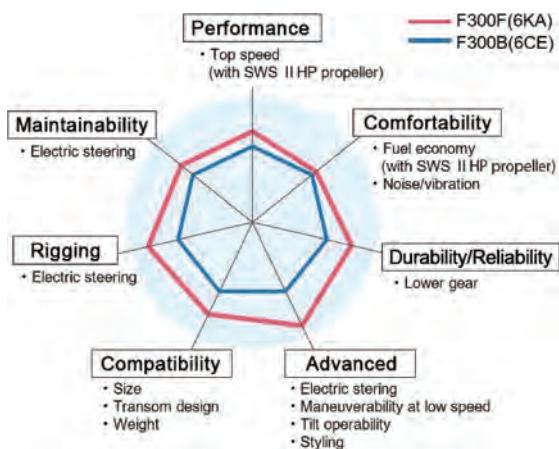


図1 レーダーチャート

### 3-1. 内蔵型電動 SBW システム

本モデルでは、ヤマハ船外機のフラグシップモデルであるF425Aより採用されたヤマハ独自の先進技術である、電動SBW(Steer By Wire)システムを採用した。電動SBWは、操船者のハンドル操作を電気信号に変換して、操舵ユニットに伝達する。操船者のハンドル操作を、機械的なロスなくダイレクトで正確に再現することで、快適な操船性を実現した(図2)。また、従来の油圧系のステアリングシステムには必須であった、油圧機器や配管、メカニカルケーブルなどの接続が不要となることで、ボートへのリギング作業が容易になるとともに、ボートのトランサム周りがすっきりし、スペースの有効活用に貢献することができた(図3)。

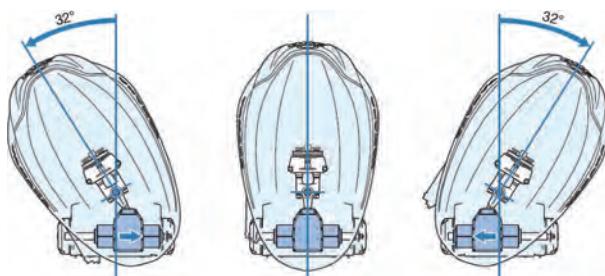


図2 電動 SBW 転舵図



図3 トランサム周り

### 3-2. デザイン性の向上

本モデルでは、デザイン性の向上に力を入れた。上位モデルとのラインナップの統一感を意識した上で、“Absolute Elegance”をデザインコンセプトに設定した。最大限に無駄を削ぎ落したシンプルさの中に、最上級の上質感を表現した。また、カラーリングについても、ヤマハ船外機伝統色のダークブルーイッシュグレー仕様に加えて、市場要望の高かったロワーユニットを含むホワイトパール仕様を追加した(図4)。



図4 F300F

### 3-3. リバーススラストの向上

本モデルでは、リバース時のスラスト向上を狙って、新たな排気構造を採用した。従来の構造ではパワーユニットから排出された排気ガスがプロペラの後端より排出されるため、リバース時には、排出された排気ガスをプロペラが巻き込むことで、プロペラ効率を低下させていた。そこで、本モデルでは、ロワーケース後方のアンチベンチレーションプレートの上部に、低～中速度域に機能する排気通路を設定した(図5)。排気ガスの巻き込みを低減させることで、プロペラ効率の低下を防ぎ、低～中速域のリバーススラストの向上に成功した(図6)。ボートの減速、停止、後進を思い通り実現するとともに、より低いエンジン回転数にて必要なリバーススラストを発生できることで、エンジン騒音や振動の低減に繋がり、快適性を向上させることができた。

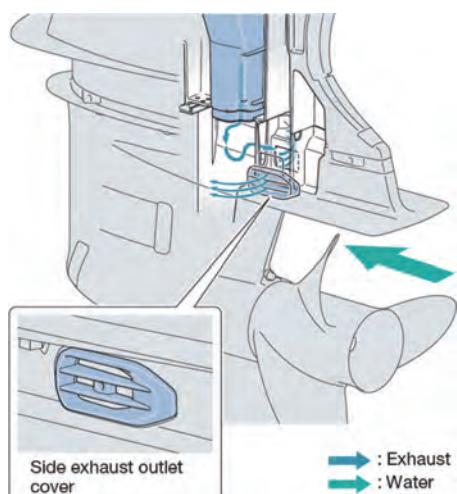


図5 リバース時の排気の流れ

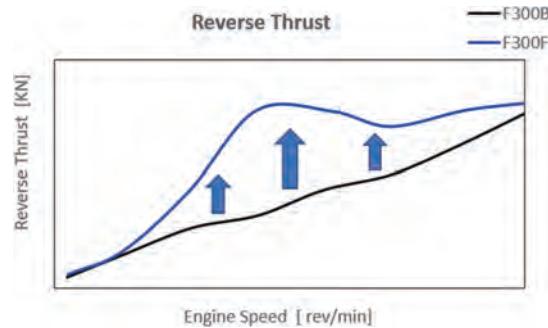


図6 リバーススラスト

### 3-4. トータルチルト機能

この機能は、本モデルより世界初採用されたヤマハ独自の先進機能である。本機能を有効にすると、パワートリム&チルトスイッチを押し続けることなく、スイッチを素早く2回押すことで、船外機のチルトアップ／ダウン操作を自動で行うことができる(図7)。トータルチルト機能は、エンジン停止時ののみ使用可能であり、自動作動中はブザーが鳴り、周囲に警告をする。

出港前後の準備や片付けなど、ユーザーの時間のロスを削減する効果が得られた。

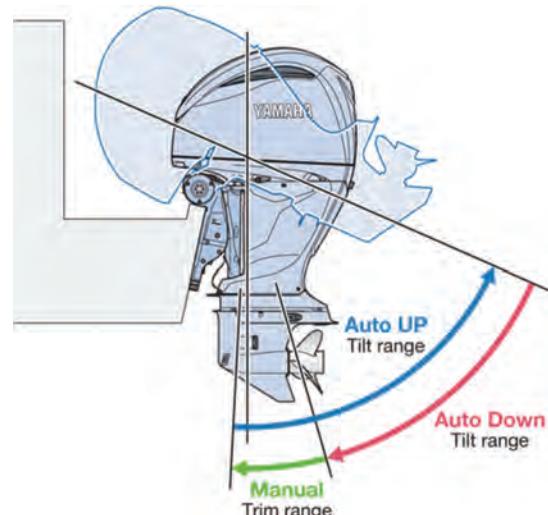


図7 トータルチルト

### 3-5. エンジン内蔵プロペラライト

本モデルは、ヤマハ独自の次世代ボート制御システム「HELM MASTER EX」と組み合わせた際の価値の最大化を狙って開発を進めてきた。「HELM MASTER EX」の機能には、各種操船支援が含まれており、選択したモードに応じて、シフトやステアリング操作を自動で行う。その際に自動モードであることを周囲に知らせる「プロペラライト」を設定しているが、従来ではボートへの取り付けを基本としており、ボートへの穴開け

を含む、面倒な取り付け、配線作業を必要としていた。そこで、本モデルでは、プロペラライトを船外機後方に内蔵するオプションを設定する事で、手間のかかるボートへの取り付け作業を無くすことができた(図8)。

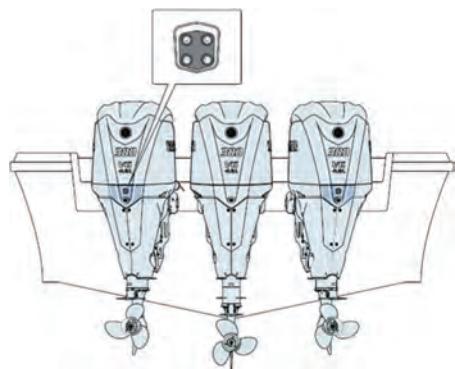


図8 プロペラライト

### 3-6. 分割ドライブシャフト、シフトロッド

新設計のロワーユニットには、分割式のドライブシャフトおよび、ジョイント式のシフトロッドを採用した。中間ドライブシャフトと中間シフトロッドの長さを切り替えることで、共通のロワーユニットにて複数のトランサムに対応することが可能となった(図9)。中間シャフトが取り外せることで、保守や保管が容易になるとともに、社内の倉庫だけではなく、ディーラーや代理店、お客様の在庫保管スペースや補修パーツの低減につなげる効果も得ることができた。

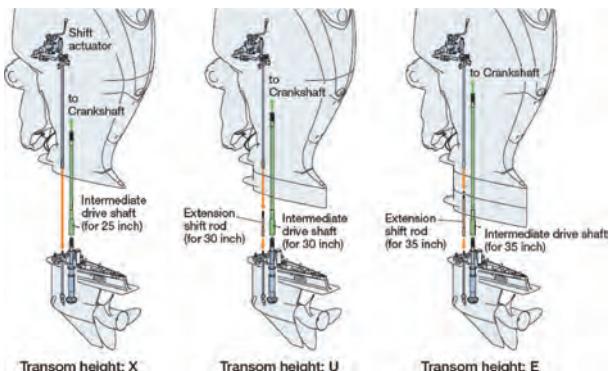


図9 分割シャフト構造図

### 3-7. NEW プロペラ

本モデルでは、エンジン本体と一緒に、新しいプロペラ「Saltwater Series II HP」をセットで開発した(図10)。シフトイン時のショックヒート、トロール時の音や振動を低減する SDS(シフト・ダンパー・システム)とともに、新しい翼断面の採用により、加速性能を落すことなく、最高速の向上を達成した。



図10 Saltwater Series II HP プロペラ

### 3-8. 多機掛け水洗 KIT

船外機を運転した後には、水洗キットを使用した冷却水路の洗浄を推奨しているが、船の大型化、多機掛け化にともない、水洗作業には、多くの手間と時間を要するようになった。そこで、今回オプションの多機掛け水洗 KIT を設定した(図11)。この KIT を使用することで、船内より簡単に水洗作業をすることができる。また、船の設備と組み合わせることで複数の船外機を同時に洗浄することも可能になり、ロスの削減に貢献することができた。

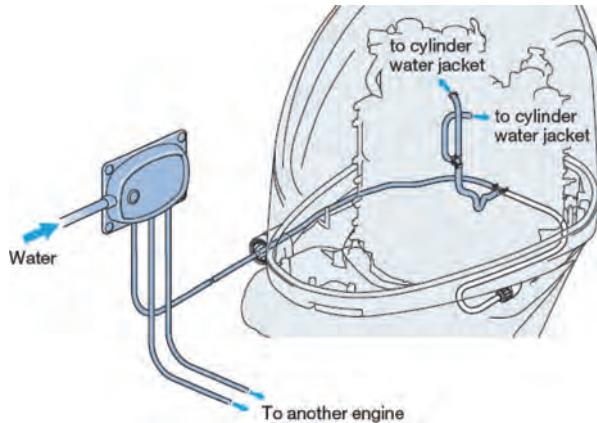


図11 多機掛け水洗 KIT

### 3-9. 高耐久性ロワーユニット

本モデルでは、ロワーユニットの耐久性の向上にも取り組んだ。ヤマハ最新のギヤ設計思想に基づき、歯面中央部の広い面積で負荷を受けることで面圧を下げるとともに、製造面においても、最新の歯切り設備の導入によって、歯面性状のばらつきを低減させた。

また、ロワーケース内のオイル流れの最適化や、ドライブシャフトを支えるペアリングについてもサイズアップを織り込むことで、耐久性の向上に成功した。

## 4 おわりに

昔、上司より「ヤマハでいい。じゃなくて、ヤマハがいい!と言ってもらえる製品を目指そう」という言葉を頂き、強い共感を抱いたことがある。「ヤマハがいい!」と言ってもらうことは、簡単なことではない。お客様の声にしっかりと耳を傾け、ニーズに高いレベルで応えていく。さらに、お客様が驚くような、期待を超える新たな価値を創造、提供していくことが必要である。

「ヤマハがいい!」とお客様に言っていただける未来を思い描き、ヤマハスピリットを持って、失敗を恐れずにチャレンジを続けていく。

### ■著者



琴野 瑛仁  
Akihito Kotono  
マリン事業本部  
開発統括部  
エンジン開発部



対馬 翔大  
Shota Tsushima  
マリン事業本部  
開発統括部  
エンジン開発部



## Abstract

Yamaha Motor Co., Ltd. (hereinafter referred to as "the Company") has introduced new entry models such as the "SRV-20" and "AS-21" that support various ways of playing as multi-purpose models from successive generations in order to expand demand from the general public, targeting new entrants to the market. In recent years, social media and other digital devices have permeated every scene, and people's lifestyles have changed significantly with the further spreading of diverse values. It has been expected that sharing types, which emphasize "experience" rather than "ownership", will emerge, and that these customers will play a leading role in the new generation entry class and become the basis of new business in the sector. At the same time, the social background has further increased the interest and demand for outdoor leisure. Under these circumstances, the company has newly developed and introduced the entry model "AX220" [1] targeting new entrants, which is compatible with multi-purpose type styles, so that even beginners can easily maneuver allowing them to have a comfortable and enjoyable boating experience without limiting how they use it.

## 1 はじめに

ヤマハ発動機株式会社(以下、当社)では、一般顧客の需要拡大を図るために歴代よりマルチパークモデルとして、様々な遊び方に対応する「SRV-20」、「AS-21」といった新規参入層をターゲットとしたエントリーモデルを市場導入してきた。また近年、あらゆる場面にSNSやデジタルデバイスが浸透し、多様な価値観の広がりとともに人々のライフスタイルは大きな変化が見られるようになってきた。遊びの嗜好においても「所有」より「体験」を重視するシェアリング型が台頭し、こういった人々が新世代エントリー層の主役となり新たなビジネスの基軸になっていくだろうと予測された。同時に、社会的な背景によりアウトドアレジャーへの関心や需要がより一層高まってきていた。こ

ののような中、新規参入層をターゲットに遊び方を限定せず、初心者でも操船しやすく快適で楽しいボーティングを体験できるマルチパーク対応なエントリーモデル「AX220」<sup>[1]</sup>を新規開発し、市場導入した。

## 2 コンセプト

旧モデルである「AS-21」は、一般販売はもとより当社会員制のレンタルボートシステム「ヤマハマリンクラブ・シースタイル」(以下、シースタイル)において今なおトップの配備隻数<sup>[1]</sup>を誇るマルチパークモデルである。初心者にとって魅力的な「クルージング」「フィッシング」「トーリング」などのボーティングに多彩に対応する汎用性を持ち、「エントリーマルチ」の完成形に

近い”と形容される程人気を博したロングセラーモデルだった。しかし、その「AS-21」も発売以来15年以上が経過し、今後の一 般販売およびレンタル利用のお客さま需要に応えシースタイル ビジネスの拡張を支援していく上で、ニューモデルが必要だつた。

したがって、「AS-21」に学びそのレガシーを未来に継承することと新世代取り込みへの魅力向上を付加した正統進化形モ デルへの昇華が求められ、モデルコンセプトを次のように定めた。

### 1. 初心者利用への配慮

年齢、性別を問わず様々なマリン入門者に配慮した素直で 扱いやすい、快適なモデルとする。

### 2. 正統進化

「AS-21」をはじめ当社小型マルチが構築してきたアイデン ティティーを継承しつつ15年分の進化を注入しアップデー トする。

### 3. ライフスタイル変化への対応

人々の生活嗜好や遊び方の変化に合わせて遊びの質を高 めることができるツールや装備に対応する。

1) 開発時(2019年当時)の配備隻数として

## 3 特長

### 3-1. 主要諸元

「AX220」の主要諸元を表1に、一般配置図を図1に示す。シースタイルにおける使用シーンにも配慮した結果、従来モ デルに比べ全長・全幅ともに大きめの船体とし、定員を1名付 加することで遊びの魅力向上を狙った。また、搭載エンジンは 高い信頼性を誇る当社製115馬力船外機との組み合わせとし オールヤマハのパッケージモデルとした。

表1 主要諸元

全長	6.80m
全幅	2.45m
船体質量	1,013kg
完成質量	1,190kg
定員	7名
搭載エンジン	F115BETX
搭載馬力	84.6kW(115ps)
燃料タンク容量	110L
航行区域	限定沿海



図1 一般配置図

### 3-2. 性能

船型性能を開発する上でマルチや専用にとらわれず、『いい ものはいい』を追求することが正統進化であり初心者利用に とって扱いやすいボートになると考へた。例えば、21フィートと 23フィートあるいは25フィートなど異なるサイズ同士で比べた 場合、安定性や快適性など大きなサイズのボートの方が余裕と 利点が多くあることは明白である。したがって今回は、“The bigger, The better”の通り、当社上位機種にフォーカスし、そ のボディを用いた「プロトタイプ」をモディファイしていく手法で 性能の正統進化を進めた。この手法により、ウェーブ・スラスター・ブレード、リバース・チャイン、スクエア・バウといった15年分 の当社船型の進化を同時に織り込むことができた(図2)。



図2 船型 フィーチャー

次に、より大きなボディを埋め込むために用いた手法を図3 に示す。船首チャインとフォアフットの交点までを従来通りに、 通常水に触れないチャインから上の空気層部分のステム形状 に着目し、垂直近くまで整理していくことで特徴的な『斧』のよう な船首形状が生まれ「アックスバウ」として提案した。

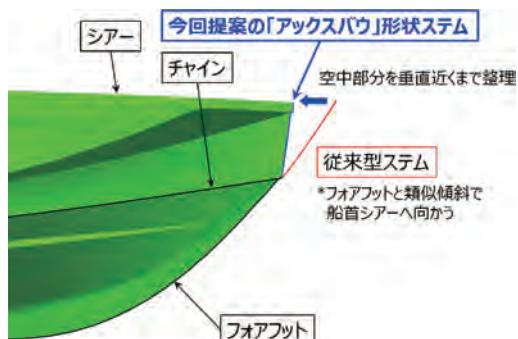


図3 アックスバウ 概念

全長を22フィートとした本モデルの水線長およびチャイン幅は、当社上位機種と同等となり、当社同クラス艇比では水線長を約13%、チャイン幅を約11%拡張することができた（図4、5）。



図4 水線長の比較

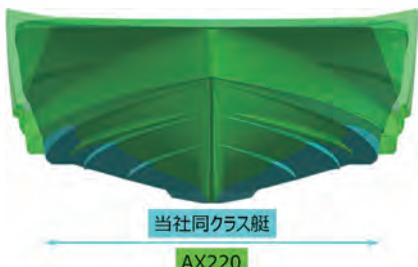


図5 チャイン幅の比較

水線長の拡張は、特に走行時ピッティングの衝撃緩和（当社同クラス艇比、約17%改善）や保針性能に好影響を与え、さらに船首水面下投影側面積が増加することによる風流れ抑止性能の向上（当社同クラス艇比、約21%向上）にも寄与した。特に操船スキルが必要とされる離着岸時にボートが流されにくくなることから、初心者にとって有効な性能向上になった。

チャイン幅の拡張は、メタセンタ高（以下、GM）と呼ばれる船の安定性に関わる重要な物理量の増大に貢献する。横安定性の評価指標である初期復原力（GMと排水量の積）が当社同クラス艇比、約53%も改善され乗降時やフィッシング時の静止安定をより一層向上させる結果につながった。

新船型におけるこのスケールアップの試みはこれらの特長をもたらし、初心者でも扱いやすく、快適な乗り心地と操船性の向上、停船時の安定性を高いレベルで実現した。

### 3-3. 機能

初心者にとって周囲を360°オープンに見渡すことができ、風や潮の感覚を肌で感じられるシンプルなデッキレイアウトが、船の動きを理解しやすく操船にも慣れやすいとされていて、当社小型マルチのアイデンティティーにもなっている。したがって、「AX220」もこのヤマハらしさ（オープンで安心して前後の往来がしやすいセンターウォークスルーやデュアルコンソールの配置）を継承した（図6）。



図6 当社小型マルチのアイデンティティー

一方、新たな創意工夫としてスクエアバウの採用とデッキレイアウトを見直し、図7に示すようにマルチな遊びに対応できる凹凸の少ないフラットスペースを大幅に拡大した。また、左右非対称コンソール（図8）にすることで、視認性を優先したコンパクトな運転席側と個室トイレ（オプション）スペースを確保した大きめの左舷側と各々の機能を成立させた。

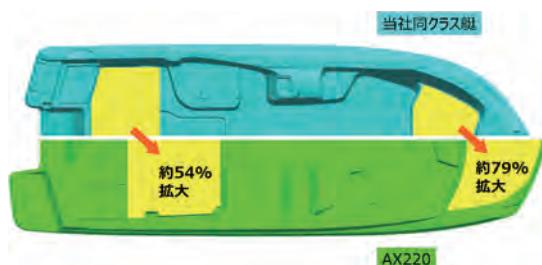


図7 デッキ床面積の比較



図8 左右非対称のデュアルコンソール

これらの継承とアップデートがより魅力的な「クルージング」 「フィッシング」「トーリング」などに多彩に対応する快適なボーティングの基本機能になると考へた。

### 3-3-1. クルージング

クルージングを想定したフィーチャーを図9および10に示す。

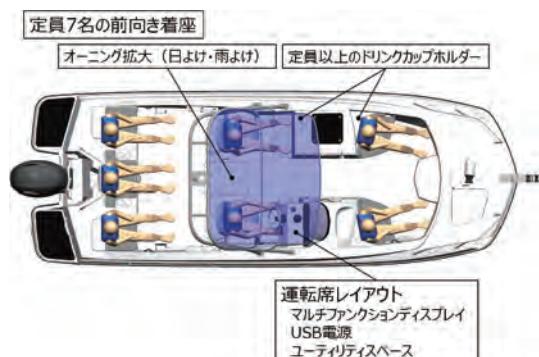


図9 クルージング フィーチャー



図10 7名前向き着座のクルージング想定シーン

定員7名全員が前向き着座できるシートアレンジを基本に定員数以上のドリンクカップホルダーの設置やオーニング有効面積の拡大など快適性向上を織り込んだ。

運転席周辺は、最大12インチサイズまでのマルチファンクションディスプレイの設置を可能にし、USB電源とスマートフォンやポータブルオーディオなどのユーティリティースペースの提供といった遊びのツールの変化にも対応した(図11)。



図11 運転席周辺

### 3-3-2. フィッシング

フィッシングを想定したフィーチャーを図12および13に示す。

4名で同時に釣りができる充分なスペースの確保とともに船首でのキャスティングやバウモーター(以下、i-Pilot)(オプション)の設置に配慮したスクエアバウの採用により最新のフィッシングトレンドにも高いレベルで対応した。

その他、イケスを標準装備しクーラーボックスなどの置き場スペースやロッドホルダー(オプション)の取付けスペースなどフィッシングの機能性を高める配慮を行なった。

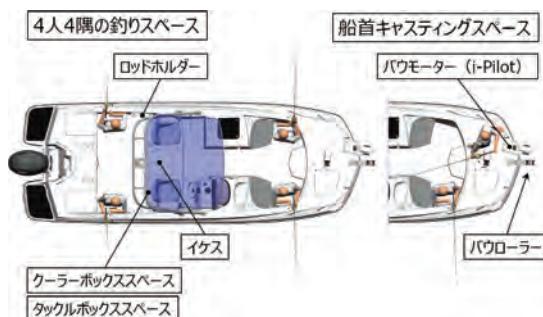


図12 フィッシング フィーチャー

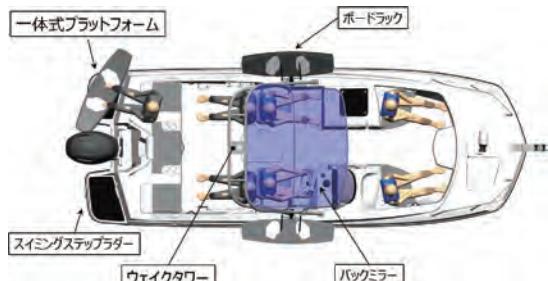


図13 4人4隅でのフィッシング想定シーン

### 3-3-3. トーリング

トーリングやスイミングなどのマルチなマリンプレイを想定したフィーチャーを図14および15に示す。

親水性を高めるために足場が広く水中へエントリーしやすい一体式プラットフォームを船尾両舷に配置し、どちらにも設置できるスイミングステップラダー(オプション)を設定した。また、トーリングプレイに欠かせないフック付きウェイクタワーに汎用ボードラック、バックミラーなどのオプション装備を充実させた。



## 4 おわりに

モデルネーム「AX220」には、今もなお愛されるマルチボート「AS-21」の正統後継の証として「A」を付し、多くのファンにそのDNAを想起し続けていただけるようメッセージを込めた。

一方「X」は、新たな試み(experiment)や先端を行く(extreme)、あるいは経験(experience)など eX の略称から構成されている。加えて特徴的な『斧』のような船首形状(図17)が、大海原を勇猛果敢に航海する姿を彷彿させることも、「AX」の由来の一因となっている。



### 3-4. スタイリング

モデルコンセプト同様にスタイリングに求められたのは、初心者に判りやすいこと、爽快感のある「AS-21」のイメージを継承し正統進化させること、SNSに映え、心を動かすようなカタチであることだった。エントリーマルチとして機能から生まれた独特的のシルエットを、無駄を省いた引き算の美学によって素の造形の美しさを魅せることでそのカタチを追求した。その結果、抑揚のあるガンセルからウェイクタワー、オーニングにつながる流麗でリズミカルなラインと象徴的な「アクセスパウ」シルエットとの組み合わせがスタイリングの特徴となった。そして、モデルコンセプトをストレートに表現したこのカタチを新世代に向けたスタイリングアイコン“Simple Beauty”として提案した(図16)。



最後に当社事業方針が掲げるマリン版 CASE 展開による「信頼性と豊かなマリンライフの実現」を目指し、「AX220」を利用いただぐすべての人々に魅力的で豊かなマリンエクスペリエンスを提供し続けたい。

### ■参考文献

[1] ヤマハ発動機株式会社製品サイト(AX220- マリン製品)  
<https://www.yamaha-motor.co.jp/marine/lineup/boat/ax220/>

### ■著者



Yasushi Mochizuki  
マリン事業本部  
開発統括部  
艇体開発部



### Abstract

Principally in North America, the ROV (Recreational Off-Highway Vehicle) market enjoys high demand with its wide range of uses from agricultural and dairy farming work to recreational uses such as hunting and trail driving, as well as for sports driving and racing. Demand is expected to increase further in the future. To cover this wide range of uses, since 2013 Yamaha Motor has developed and launched the VIKING, the WOLVERINE, and the YXZ series of models. The WOLVERINE, which is a model mainly targeted for recreational use, follows the 4-seater WOLVERINE X4 equipped with a 2-cylinder 847 cm<sup>3</sup> engine (see Yamaha Motor Technical Report No. 53 2018 model ROV WOLVERINE X4). The model lineup has been expanded by introducing the two-seater 2019 model WOLVERINE X2 with a dump bed structure.

Here, as a high-end model, we introduce the simultaneously developed WOLVERINE RMAX2/RMAX4 (hereinafter referred to as this model) equipped with a 2-cylinder 999 cm<sup>3</sup> engine for enjoyment driving in a range of areas more comfortably and with greater confidence.

## 1 はじめに

ROV(Recreational Off-Highway Vehicle)市場は北米を中心に、農業／酪農などの業務用途からハンティングやトレール走行などのレクリエーション、そしてスポーツ、レースまで幅広い用途と高い需要があり、今後も伸長していくことが予想される。それらの広範囲な用途をカバーするために、2013年から「VIKING/WOLVERINE/YXZ シリーズ」を開発、市場導入してきた。

レクリエーション用途をメインターゲットとしたモデルである「WOLVERINE」は、2気筒847cm<sup>3</sup>エンジンを搭載した4人乗り「WOLVERINE X4」(ヤマハ発動機技報No.53 2018年モデル

ROV WOLVERINE X4参照)に続いて、ダンプベッド構造を持った2人乗り2019年モデル「WOLVERINE X2」を導入しモデルラインナップを拡充してきた。

今回、上位モデルとして、さらに快適に、自信をもって様々なエリアでの走行を楽しんでいただけるように、2気筒999cm<sup>3</sup>エンジンを搭載した「WOLVERINE RMAX2/RMAX4」(以下、本モデル)を同時開発したので、ここに紹介する。

## 2 開発の狙い

本モデルのコンセプトである“Most Exciting Recreation Versatile Machine”(「RMAX2」)/“Highest luxury and excit-

ing shared trail riding experience”(「RMAX4」)の具現化に向けて、下記3項目を主要な狙いと定めた。

1. カテゴリーを越えた圧倒的な走破性の実現
2. 高い走破性を予感させ一目で YAMAHA だと分かるスタイル
3. 快適装備と洗練されたコックピット

### 3 開発の取り組み

前述の開発の狙いを達成するための主な取り組みとして下記3項目を行った。

- (1) 2気筒999cm<sup>3</sup>エンジンとワイドレシオ CVT トランスミッションの新規開発
- (2) 「WolverineX2/X4」(以下、「X2/X4」) プラットフォーム拡張シャーシに新設計前後サスペンションと大径タイヤ採用
- (3) インテリア、エクステリアの一新

#### 3-1. パワートレイン概要

グループ走行時に仲間をリードできるパワー感と極低速走行時の十分な駆動力を確保するため、水冷4ストローク999cm<sup>3</sup>並列2気筒エンジン、およびCVTトランスミッション、前後ファイナルギアの新規開発をした。

基本レイアウトは「X2/X4」に搭載した847cm<sup>3</sup>並列2気筒エンジン(以下847cm<sup>3</sup>エンジン)を踏襲し、「X2/X4」プラットフォーム拡張シャーシへ搭載するため、コンパクト設計と走行性能向上に伴う衝撃入力増加への対応を行った(図1)。



図1 エンジン/駆動系/吸・排気系レイアウト

##### 3-1-1. 新設計2気筒エンジン

オープンエリアでの高速走行性能とロックセクションでの極低速走行の両立のため、クラストップのピーク性能および扱いやすい中低速トルク特性を目指した。ボア93.0mm、ストローク

73.5mm、圧縮比11.2とし、バルブタイミング、吸排気管長の最適化により狙いである性能特性を実現した。結果として、エンジン最高出力は847cm<sup>3</sup>、エンジンに対して56%向上した(図2)。

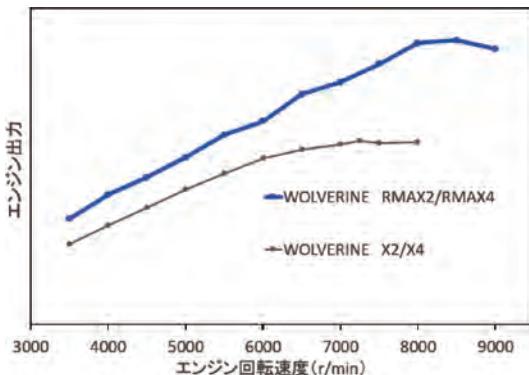


図2 出力カーブ

様々な走行シーンにおいてドライバーの意図に応じた車両挙動の実現のため、設計段階でエンジンレスポンス向上への取り組みを行った。吸入空気量向上のため、各部の経路拡大、スロットルボディに連結されたアキュムレーターの容量を増やした。また、インテークマニホールドをヘッドシリンダへのボルトオン構造とし、スロットルバルブ下流の容積低減を図った。さらに、クランク軸上の慣性マス低減のため、新摩擦材採用によりクラッチの小径化を実現した。

エンジンサイズは、ショートストローク化、カムチェーンラインのクランク軸方向位置の見直しを行い、全幅は847cm<sup>3</sup>エンジン同等に抑え、全高は短縮した(図3)。

また、アクセサリー追加対応のため、ACM(発電機)ローター径はそのままで、発電性能は11%向上させた。

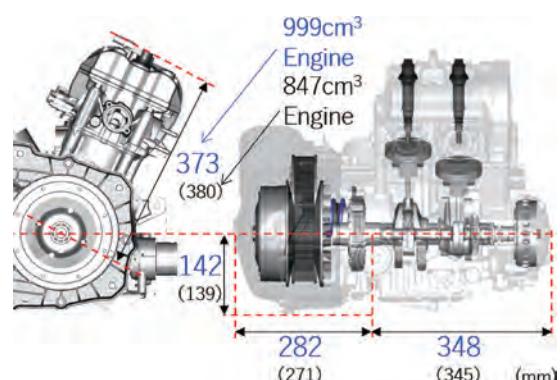


図3 エンジンサイズ

### 3-1-2. トランスマッision

ATV(All Terrain Vehicle: 四輪バギー)、ROV にて実績のあるウルトラマチックトランスマッision(全速度域で滑らかな走行とエンジンブレーキの作動を可能とする駆動、変速システム)構造を踏襲しながら、以下の対応を行った。

トランスマッisionケースは、「X2/X4」と共用することでコンパクト性を維持し、各ギアはモジュール、歯幅、熱処理の変更、ペアリングのラージボール化などの諸元変更による耐久性向上を図った。

CVTは、加速性能と最高速の両立のため、ワイドレシオ化(「X2/X4」比23%向上)した。CVT室冷却用に完全独立した2本の吸気ダクトを設けることで、ベルト冷却性能を高めて耐久性を担保し、ベルト軸間距離は「X2/X4」と同等とすることでコンパクト化に貢献した。

### 3-1-3. 前後ファイナルギアケース

前(フロント)ファイナルギアケースは、衝撃入力増加対応のため、入力軸を支えるハウジングペアリングの材質をアルミニウムから鋳鉄へ変更した。また、デファレンシャルギアヘショットピーニングを追加、ケースは強度向上のため再設計した。

新設計の後(リア)ファイナルギアケースは、高強度かつコンパクト化のため、リングギアは当社二輪製品で実績があるハイポイドギアを採用した。また、ドライブピニオンギアは、当社マリンエンジンで実績のある高強度材および熱処理を採用した(図4)。

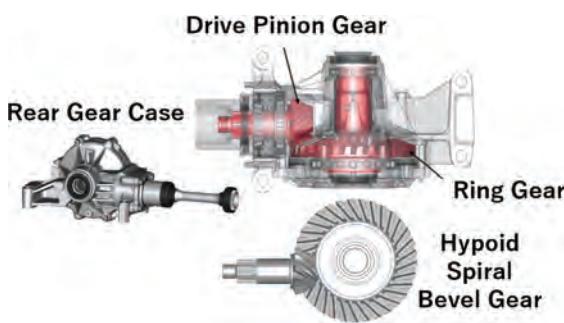


図4 後(リア)ファイナルギアケース

### 3-2. 車体概要

走破性・快適性の目標達成のため、「Wolverine X2/X4」のプラットフォームを活用しつつ、各コンポーネントの見直しを行った。結果として高次元で“Proven off-road”を達成し、お客様がより過酷なオフロードで冒険を楽しめる車両となった。

### 3-2-1. フレーム構造

フレームは、フロント、ミドル、リアの3部構成となっており、フロントクリップは新作し、スタイリングの差別化を図りながらタイヤを大径化かつロングホイールトラベルを達成した。ミドルとリアは「X2/X4」を流用かつ極力部品共通化を図り、投資低減に貢献した(図5)。

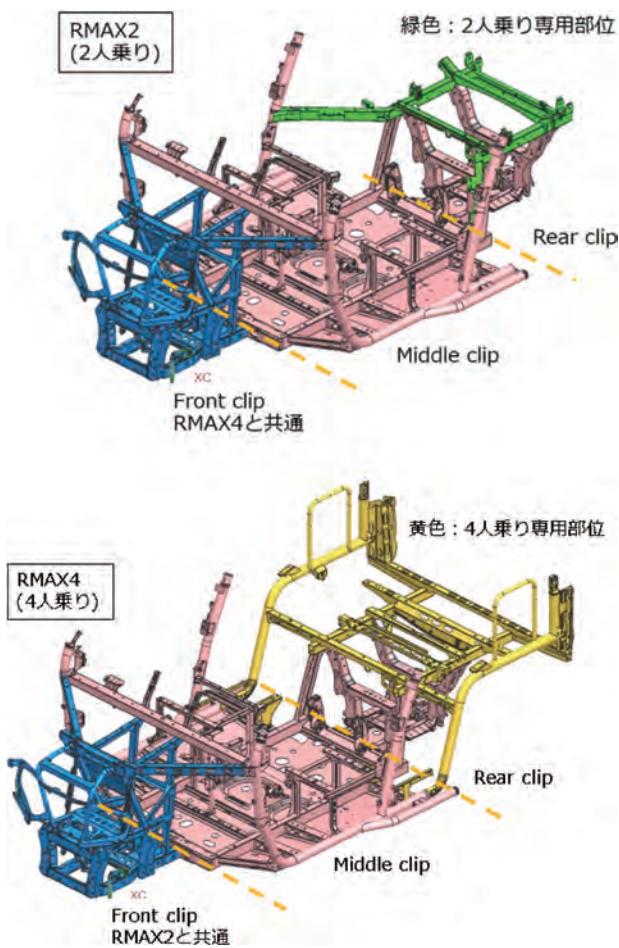


図5 フレーム構造

### 3-2-2. フロントサスペンション

基本構造はこれまでの当社ROV同様のダブルウィッシュボーンを採用し、狙いとする車格に合わせてアームなどの各部品を新設計した。またフロントフレームの新作も行い、大径タイヤに対応しつつホイールトラベル(361mm(14.2 in))も満足する仕様を達成した。

フロントサスペンション、ステアリング周りはRMAX2/RMAX4で部品を共通化し、投資低減に貢献している。

### 3-2-3. リアサスペンション

フロント同様に基本構造はダブルウィッシュボーンを採用し

ているが、アームは「RMAX2/4」それぞれの車格に合わせて新作している。

リア用等速ジョイントには揺動角を現行比 +30% (40°) した CVJ(Constant Velocity Joint: 等速ジョイント) を採用した。かつてアギヤケースの全幅を極力抑えることで、目標のトレッド幅を維持しつつ、ロングホイールトラベル(「RMAX2」: 430mm (16.9 in)/「RMAX4」: 338mm (13.3 in))を達成した。

### 3-2-4. LE 用ショックアブソーバー

上位バリエーションの Limited Edition(「LE」)のショックアブソーバーには FOX 社製 iQS(Intelligent Quick Switch)を標準装備とし、ROVとしては他社も含めて初採用した。キャビン内のスイッチにより乗車したまでの減衰切り替えを可能とし、ユーザーの利便性を向上させた(図6)。



図6 iQS用切替スイッチ

### 3-2-5. ユーザーインターフェースの進化

「RMAX」では、「X2/X4」ではアクセサリー設定のみであった「Adventure Pro」(インフォテインメントシステム)を工場装着とし、ダッシュボード内にインテグレートされた搭載ができる様にしたこと、質感を向上させている。脱着が可能で鍵も付いており盗難防止にも配慮している(図7)。

駆動モードや灯火器の切替スイッチはノブ形状および文字盤を一新した。上位バリエーション(「XTR」および「LE」)は文字盤が光る仕様で、夜間の走行時でもスイッチ位置を分かりやすくしている(図8)。

パッセンジャー・アシストグリップは、95mm の範囲でレバー操作で簡単に多段の調整が可能であり、幅広い体格に合わせられる(図9)。



図7 ダッシュボードにインテグレートされた Adventure Pro



図8 各切替スイッチ



図9 多段階調整のパッセンジャー・アシストグリップ

### 3-2-6. D-MODE

走行するシーンに応じて、最適なエンジン応答性を実現するため、アクセル開度に対するスロットル開度の特性を3種から選択できる機能(D-MODE)を搭載した(図10)。

走行シーンとしては大きく3つに大別でき、さらに、各シーンで求められるエンジン応答性が異なるため、それぞれ最も使用頻度が高いアクセル開度領域において、ドライバーが操作しやすく、自信をもって走行できるスロットル開度特性を作り込んだ。

Sport-MODEでは、オープンエリアでの走行を想定し、素早い応答性を実現するとともに、高開度でのコントロール性を向上させた。Trail-MODEでは、森林などのタイトコースを想定し、よく使用される中開度の分解能を上げ、中開度での操作性を向上した。Crawl-MODEでは、大きな岩場など極低速での低開度を多用する場面を想定し、滑らかな応答性を実現するとともに、低開度での操作性の向上を図っている。その結果、岩場での繊細な操作を実現可能とし、進みたい方向へ嗜みしめるよう進むことを容易にした。それにより、ビギナーでも難易度の高い場所での走行を可能とした。



図10 手元で切替可能な D-MODE スイッチ

### 3-3. スタイリング

#### 3-3-1. スタイリングの狙い

人の情報は80%以上が目から入ると言われている中で、一目でYAMAHAだとわかるスタイリングであることが重要なポイントだと考える。また、車両性能の目的や当社初の1000cm<sup>3</sup>レクリエーションカテゴリーへの参入に込めた思いを伝えることを使命と考えた。それを最もよく表しているのがフロント周りである。YAMAHAのシンボルである“Evil Eyes”を表現したツインLEDマーカーライト、ラジエターグリル中央に誇らしげに座る特大の音叉マーク、一体感のあるフロントバンパーなどを「Y」の字を描くように配置することで、アグレッシブで迫力ある存在感を表現した(図11)。また全体としても、造形と機能が融

合し、ユーザーが期待するパワフルな走りを、スタイリングで可視化することができた。



図11 スタイリングと機能が融合したフロント周り

また、本モデルコンセプトである“Highest luxury and exciting shared trail riding experience”を実現すべく、“High-Class Cockpit”と“Armor-Tough Details”をKeywordに、外装だけでなく内装の素材や仕上げにもこだわった。機能性だけでなく、高級感や上質感を感じさせるキャビンを実現した(図12)。



図12 所有感を満たす質感の高いインテリア

#### 3-3-2. スタイリングプロセスの改革

本開発では、2Dスケッチやクレイモデルを使用せず、3Dスケッチという、直感的にアイデアを立体可視化する独自の手法と最先端デジタルツールでの評価を導入し、デザインプロセスのデジタル化変革を行った。開発初期の企画段階から3Dスケッチの3Dデータを用いて、タイヤクリアランス、部品レイアウトや空力特性などの検討を実施することで、車両機能とスタイリングの両立を高次元かつ短期間で実現した。スタイリング確認と評価には、3Dプリンター部品を活用した実物大モデルを用いた。さらに、現実世界に3Dデータを実寸で浮かび上がら

せる Mixed-Reality(複合現実)カメラ技術を導入することで、アイデアの比較評価をする際に、実物サイズでの可視化／評価を低コストで実現した(図13)。上記手法により、スタイリング開発期間50%減、経費80%減を達成し当社独自の早期可視化プロセスを確立できた。



図13 MR カメラを使った外観評価

### 3-3-3. ヘッドライト & マーカーライト

ヘッドライトはLEDで新作、当社ROVでは初となるLoとHiでモジュール(Lo:モノフォーカス/Hi:リフレクター)を分ける構成とし、今後のモデルのスタイリング変更に対応しやすい構造とした。またYAMAHAのシンボルである“Evil Eyes”を表現するために、これまでのヤマハROVには無いLEDマーカーライトを新作した(図14)。



図14 ヘッドライト(下)とマーカーライト(上)

## 4 おわりに

当社PF・パワートレインユニット、RV開発陣をはじめ、YMMC (Yamaha Motor Manufacturing Corporation)開発陣、YMUS (Yamaha Motor Corporation, U.S.A.) Design Centerとの協働により、US市場調査、現地テストを実施するとともに、新たなスタイリングプロセスの導入にも取り組んだ。その結果、快適に、自信をもって Outdoor Adventure を楽しんでいただける

高い走破性をもった商品を開発することができた。

今後も進化を重ねることで、お客さまの期待を超えて、ROV市場の成長に貢献できる商品となるよう開発を継続していく。

今後の新製品および改良モデルに期待をしていただきたい。

### ■著者



杉浦 利一  
Toshikazu Sugiura  
PF車両ユニット  
PF車両開発統括部  
OV開発部



野口 浩稔  
Hiro Noguchi  
クリエイティブ本部  
イノベーション・デザインG  
OV開発部



江島 誠  
Makoto Eshima  
パワートレインユニット  
パワートレイン開発統括部  
第2PT開発部



中村 信一郎  
Shinichiro Nakamura  
PF車両ユニット  
PF車両開発統括部  
OV開発部



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

2021モデル Drive2 PowerTech ACゴルフカー  
の製品紹介

Product Introduction - 2021 Model Drive2 PowerTech AC Golf Car

佐藤 佑也 宮田 彰一郎



## Abstract

In North America, which is the largest market for the LLV (Low Speed & Light Vehicle) business, the quiet vehicle "Drive 2 QuieTech EFI" was first introduced in 2016. While its power source is an engine, it was as quiet as an electric vehicle (EL model). As a result, Yamaha succeeded in differentiating itself from competitors and solidified its position as the No. 1 gasoline engine vehicle (GAS model) manufacturer. However, the implementation of Yamaha Motor EL models has been lagging behind the introduction of other products that differentiate it from competitors. Normally, in addition to the high proportion of EL models in the golf car market, we would have expected to see even more EL models coming to the market in the future due to changes in the external environment, as well as the introduction of more competitive EL models becoming a priority for manufacturers.

Therefore, with the model concept of "Boost" Enhance electric business," we worked on increasing profitability by reducing costs while retaining our existing models strengths. In addition, by adopting the rear independent suspension developed in "QuieTech", the ride quality improved and the model achieved its distinction from its competitors. Moreover, in order to compete with other models equipped with lithium-ion batteries, a maintenance-free AGM battery (described later) with a good balance of price and performance has been set as an option for this model. As a result, we are able to introduce the "Drive2 PowerTech AC," a model that can compete with other models in terms of price, function, and performance. This paper introduces the model.

## 1 はじめに

LLV (Low Speed & Light Vehicle) 事業の最大市場である北米において、動力源はエンジンながら、電動車 (EL モデル) に負けない静肃性を実現した静音車両「Drive2 QuieTech EFI」を2016年に市場導入した。それにより、Yamaha は競合他社との差別化を図ることに成功し、ガソリンエンジン車 (GAS モ

デル) No.1 の座を確固たるものにした。しかし、その一方で EL モデルでは競合他社差別化商品の導入に遅れをとっていた。

人々、ゴルフカー市場では EL モデルの比率が高いことに加え、外部環境変化により、今後より一層市場の EL 化が進むことが想定され、競争力のある EL モデルの導入が急務となつた。

そこで "Boost" Enhance electric business" をモデルコンセプトに掲げ、これまでの強みを残しながら原価低減を図ることで

収益性を上げ、また、「QuieTech」で培ったリア独立サスペンションを採用することで乗り心地を向上、競合他社のモデルとの差別化を実現した。また、競合他社のリチウムイオンバッテリー搭載モデルに対抗するために、価格・性能のバランスの取れたメンテナンスフリーのAGMバッテリー(後述)をオプションとして設定した。これにより価格、機能・性能面で競合他社のモデルと渡り合うことができるモデル「Drive2 PowerTech AC」を市場導入することができた。本稿では、そのモデルについて紹介をする。

## 2 開発の狙い

「Drive2 PowerTech AC」では電動車の特徴をさらに伸ばし機能性を向上させる目的で以下の4項目を開発の狙いとして掲げプロジェクトを推進した。

### 1) Power

従来モデルのユーティリティ車(以下、UTV)/パーソナルトランスポーターショーンビークル(以下、PTV)と共に5kw ACモータからゴルフ場の使用用途に最適化した3.3kw ACモータへの変更による従来モデル同等の登坂性能達成

### 2) Drive Feeling

従来モデル同等の加速フィーリング、回生ブレーキフィーリングの達成

### 3) Riding Quality

リア独立サスペンション採用による業界No.1の乗り心地と安定性の両立

### 4) Efficiency AGM Battery

メンテナンスフリータイプのAGMバッテリー(後述)採用によるメンテナンスコスト削減

従来の液式鉛バッテリーに対し、2倍の寿命保証獲得

## 3 製品の概要

既存のELモデルに対し、電動車の特長をさらに伸ばし機能性を向上させる目的で、効率やメンテナンス性を高めたAC誘導モータを採用した。また、ドライバーの操作を忠実に反映させる車両(モータ)制御の独自開発アルゴリズムをベースとして、四輪独立ストラットサスペンションを採用し、フェアウェイ走行や一般路の乗り心地と操作性をさらに向上させている(図1)。

### 3-1. Power

従来モデルには、より負荷の大きいUTVやPTVと同一の定格出力5kw ACモータを搭載していたモデルとDCモータを搭載していた2つのモデルが存在した。しかし、前者はコストが高いという問題点があり、一方後者では、ブラシ付きのDCモータを搭載していたため、ブラシ摩耗が発生した時のメンテナンスが必要となっていた。

この課題を解決するために新たに定格出力3.3kw ACモータを採用することとした。AC誘導機の特徴として、構成材料に磁石を使用しないことから安価であり、効率もIPM<sup>1)</sup>に匹敵するため、コストパフォーマンスが高く、新幹線のメインモータとしても採用されている。

定格出力を落とすことによる懸念点に登坂性能の低下があ

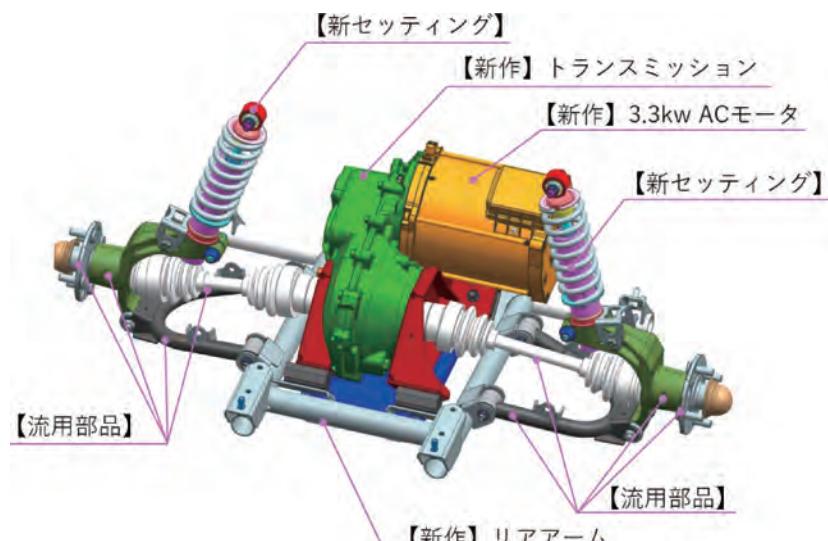


図1 リア独立サスペンション周辺構造

るが、最大出力350Aの3相ベクトルドライブ回路を有するACモータドライバをゴルフカー向けに最適化することで、定格出力が劣る新モデルで、従来モデル同等の登坂性能を確保することに成功した。

また、ゴルフカーには、リース期間が終了すると、PTVとして再販される市場形態になるという特徴がある。AC誘導機の特性を利用し、モータ制御パラメータをディーラーでも変更できる仕様とし、特に界磁特性を作り込むことでPTVとして十分な性能を確保することを可能とした。

1) IPMモータ:Interior Permanent Magnet Motorの略で、回転子内部に永久磁石を埋め込み、固定子側の巻線に交流による回転磁界を与えて、磁石トルクとリラクタンストルクを発生させるモータである。

### 3-2. Drive Feeling

モータを変更することによるもう一つの懸念点として、ドライブフィーリングの悪化が挙げられる。こちらに対しても、前述したACモータドライバに対しオリジナルのパワー制御アルゴリズムを開発し、アクセル開度に応じた滑らかで操作性の良い制御とし、四象限動作をシームレスに実現して、ドライバーの意のままにコントロールできる制御としている。これにより、従来モデル同等の加速フィーリング、回生ブレーキフィーリングを達成することができた。

### 3-3. Riding Quality

従来のゴルフカーは、フロントストラット<sup>2)</sup>、リアリジッドアクスル<sup>3)</sup>の形式であったが、今回、リアサスペンションを左右独立化することで、四輪ストラットとし、ゴルフ場特有の不整地をスムースに走行できるように各種ディメンジョンの最適化を図っている。これにより“従来機種同等の安定性”と“乗り心地の改善”を両立することが可能となった。

また、先に立ち上げたリア独立サスペンションを採用した静音車両「Drive2 QuieTech EFI」とできる限り共通の部品を採用することで、開発の工数、投資を抑制することに成功した。

この機構により、大幅に乗り心地を改善でき、カップホルダーに入れた飲料がこぼれるといったコンプレインも解消している。

2) ストラット:ストラット式サスペンション。ショックアブソーバにばねと車輪をつけたもの。周辺部品の設計自由度が高いことと、構成部品が少なく安価であることが特徴。ホイールの上下移動時にキャンバー角が変化してしまうという特徴がある。

3) リジッドアクスル:リジッドアクスルサスペンション。左右のタイヤを一本の車軸で繋いだサスペンション形式。構造が簡単で安価であるが、片方のタイヤで受けた衝撃がもう片方にそのまま伝わってしまうという特徴がある。

### 3-4. Efficiency AGM Battery

競合他社がディープサイクル鉛バッテリーとリチウムイオンバッテリーのラインナップを揃える中、Yamahaはディープサイクル鉛バッテリーのみのラインナップであった。リチウムイオンバッテリーは高寿命、長期保証が得られる反面、まだ高価であることから、メンテナンスフリーで寿命、保証とコストのバランスが取れたAGMバッテリーをオプションとして採用することとした。

AGMはAbsorbed Glass Matの略称で、従来のディープサイクル鉛バッテリーの電解液を、グラスマットに含侵させ、補水不要としたタイプの鉛バッテリーである(図2)。

含侵した電解液だけで、生涯電気量50kAh(ゴルフ場5年使用想定)を確保するため、充電器も高精度な充電制御が求められる。そのため、バッテリー温度を計測するセンサを新作し、バッテリー温度と放電量に応じた精密な充電制御を行う制御アルゴリズムを採用した。



図2 AGM バッテリー構造

## 4 おわりに

「Drive2 PowerTech AC」は、高度なメンテナンスフリー化によるゴルフ場の経営効率向上と、快適なゴルフプレイをプレイヤーに提供する商品となっている。

今後も乗り物としてのパフォーマンス向上はもちろんのこと、ゴルフ場の運営効率・プレイヤーの顧客価値を向上させるべく、新たな商品の開発を継続していく所存である。

### ■著者



佐藤 佑也

Yuya Sato

ヤマハモーターパワープロダクツ㈱

LLV 開発部

設計課



宮田 彰一郎

Shoichiro Miyata

ヤマハモーターパワープロダクツ㈱

制御開発部

LLV 制御課

## Abstract

In recent trends, riders are looking for motorcycle headlights to have a freer and more unique look. This paper introduces a newly developed compact and lightweight headlight module that realizes an attractive design while ensuring its function as a headlight [1].

This module was developed with the aim of expanding the light distribution performance that can be deployed in global platform models and increasing the degree of freedom in design layout by downsizing of the lamp body itself. Here, we introduce technical topics related to this concept. This module was jointly developed with lighting equipment supplier, FIEM INDUSTRIES LTD.

## 1 はじめに

近年のトレンドにおいて、二輪車のヘッドライトにはより自由で、個性のある表情を創ることが求められている。本稿では、ヘッドライトとしての機能を担保しながら魅力的なデザインを実現する新開発の小型軽量ヘッドライトモジュールについて紹介する<sup>[1]</sup>。

本モジュールは、グローバルプラットフォームモデルに展開可能な配光性能、灯体の小型化によるデザイン・レイアウトの自由度拡大を目標に開発した。

ここではその技術的トピックスを紹介する。なお、本モジュールは、灯火器サプライヤの FIEM INDUSTRIES LTD. と共同開発したものである。

## 2 開発のねらい

本開発は、「世界最小、最軽量のヘッドライトモジュールの実現」をコンセプトとし、車両搭載時の信頼性確保、前照灯法規適合の上、グローバルプラットフォームモジュールとして、優れた商品性配光、魅力的なデザインの実現を目指した。

## 3 新光学方式の発明

開発コンセプトの実現には、内部に搭載する光学構造自体が小型軽量であることに加え、高性能・高効率であることが必要であった。そこで光学方式としては小型化可能なプロジェクタ方式を選択し、さらに Lo・Hi 両ビームの照射機能を単独モジュールで実現可能な“バイファンクション”タイプを検討することにした。

灯体サイズにおいては、高効率かつ安価である当時最新の LED 光源を先行採用することにより、外部から直視できるアウタレンズを既存の  $\phi$  70~90mm に対して、 $\phi$  40mm まで小径化することが可能となった。

基本構造は、当初プロジェクタ方式として一般的であった上下配置のインナリフレクタを検討したが、この方式には以下の特徴的な課題があった。

- ・ 小さな灯体採用に伴う配光作りこみにおける照射範囲確保と一部への照射集光(Hot Spot)課題
- ・ インナリフレクタおよび大容量光源採用による放熱課題

これらを解決し、開発コンセプトを実現するには、前述の構造採用は得策ではないと判断し、集光率の高い Hi ビームのみ従来の1光源1インナリフレクタを採用し、Lo ビームに関しては樹脂内屈折を利用した光束利用効率の高い平行光を作り出すコリメータレンズを使用した新光学方式を採用した(図1)。

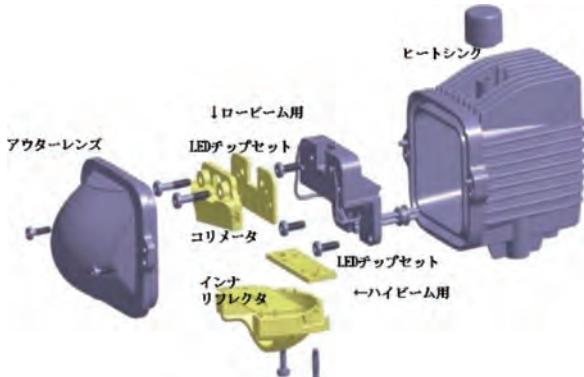


図1 モジュール展開図

さらに集光ポイントを分散するために、従来の1光源を4つに分割しそれぞれの光源にコリメータレンズを配置することで集光を抑えた。またインナレンズ表面に光拡散用のカットを入れることで配光ムラの原因となるコントラストを抑え、視認性の良い配光を狙った。

しかし、各コリメータから発した平行光は小さな筐体内ではアウタレンズの屈折のみでは十分に配光幅が取れなかつたため、従来のインナリフレクタと同様に筐体内部で光線経路をクロスさせるよう、インナレンズ照射表面を山型にカットしたレンズを新設計して対応した(図2)。

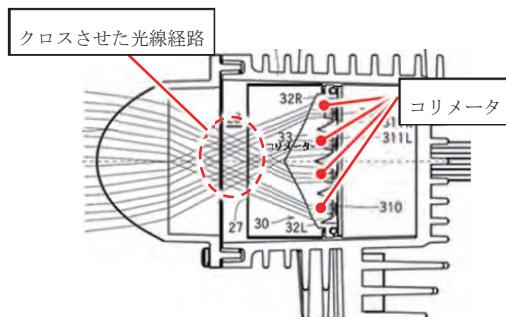


図2 インナレンズと光線経路図

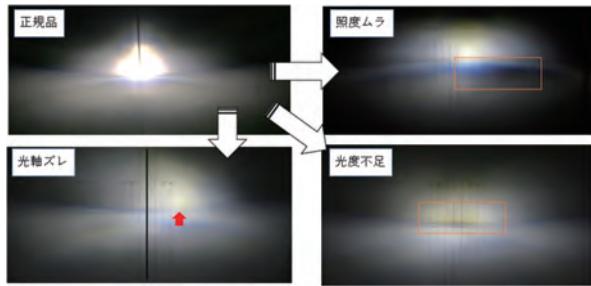


図4 スクリーンでの実機検証

これらの施策織込みと光学シミュレーションによる各レンズ面の形状調整により、当社で開発した大型モーターサイクルモデルのヘッドライト(UNECE\_ClassD)と同等以上の配光性能を持つ光学方式を完成させることができた。

## 4 厚肉光学レンズの成立性検証

### 4-1. 厚肉光学レンズ採用と課題

Lo・Hi ビームの二つの異なる特性を持つ光学系を1つのモジュールで成立させるには、これまでにない高屈折率をもつ厚肉光学レンズの採用が必須となった(図3)。

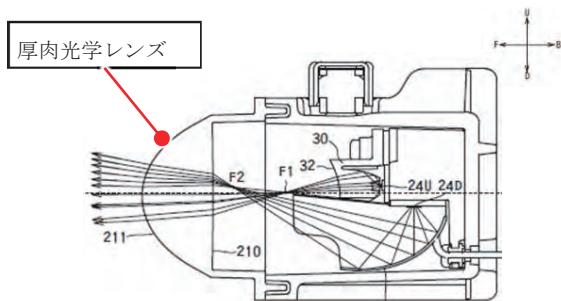


図3 厚肉光学レンズの採用

厚肉レンズを採用したヘッドライトはこれまで開発実績はあるが、いずれも屈折倍率が大きく連続的な形状を持つことから、すべての光線経路とその色収差の状況を把握することが困難であった。

特に小型化された今回のモジュールでは、わずかな焦点位置や光線経路のズレが配光不良につながるため、構成品の形状や位置には高い精度が求められる。また、灯体内に焦点を持つことで太陽光の集光による周辺パーツへの熱害も配慮すべき特性となった。生産金型による試作段階においては、机上検証で抽出しきれなかった照度、色ムラ、漏光が発生し、現物を用いた検証が必要となった(図4)。

配光品質を確保するため、構成品の位置・形状精度検証、周辺部品への影響がある漏光、太陽光集光を重点確認項目とし、光学シミュレーションによる先行評価を実施した(表1)。

表1 重点確認項目

課題	施策	結果
① 構成品位置ズレ	公差再現シミュレーションの実施	位置決めピント寸法適正化
② 形状精度	TOトライへのYMC製造参加	成形パラメータの適正化
③ 太陽光集光	切削品による確認	周辺部品への耐熱性要求
④ 漏光	切削品による確認	周辺部品のレイアウト要求

### 4-2. 構成品位置・形状精度検証

構成品(レンズ、インナレンズ、LED)をX、Y、Z方向に3Dデータを移動し、各公差内のバラつきをシミュレーションで再現した(図5)。

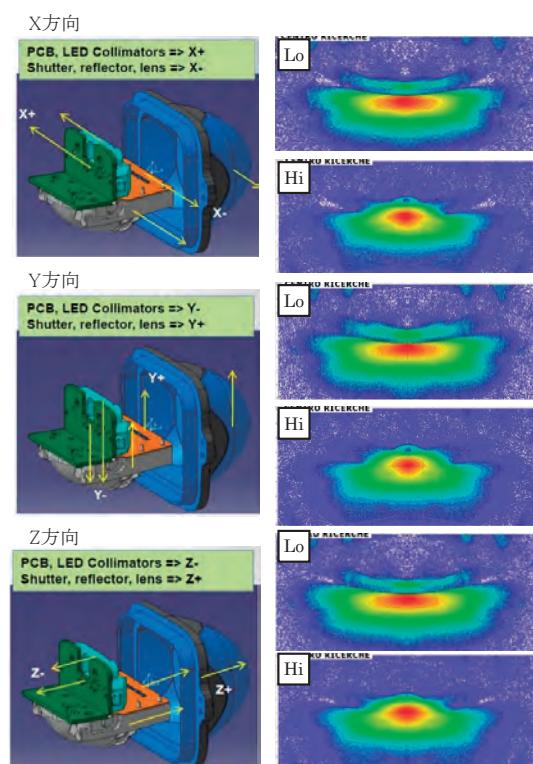
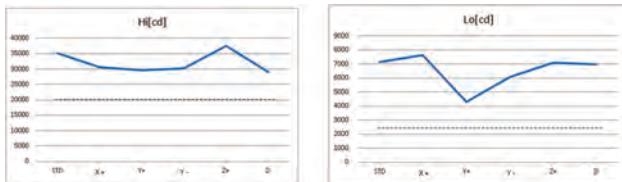


図5 公差ずれ検証配光シミュレーション

【結果】

公差内では、シルエット変化は少なく要求光度に対し十分な余裕を確認した(表2)。

表2 要求光度検証



4-3. 漏光

他の走行車両や歩行者に対する有害な漏光を抑制するため、光度シミュレーションの範囲を広げ、周辺への漏光を確認し、逆光線追跡機能によってその経路を把握した。

【結果】

側方90°～50cd相当の漏光を確認した(図6)。経路は凸レンズ内を全反射した光が照射面の広範囲から発生していたため、外装カバーで遮光した。

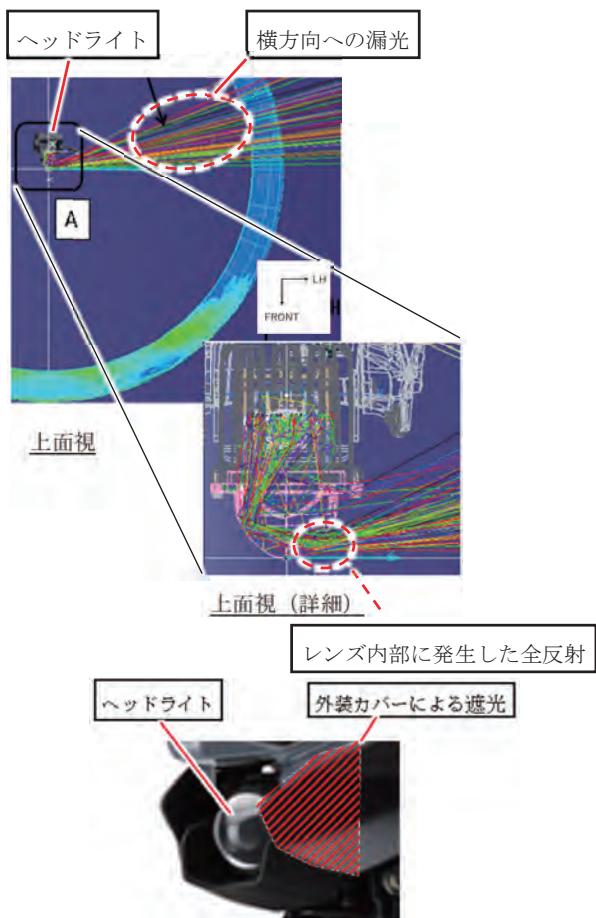


図6 漏光の光線経路と外装カバーによる遮光

4-4. 太陽光集光

凸レンズの特性上、特定方向への集光は避けられないため、太陽光を入射させない、耐熱温度の低い部品を集光ポイントに配置しない等の施策をとった。

幅広いモデルへの展開を想定し、光学シミュレーションより集光率を算出し、一般樹脂材耐熱温度を上回る可能性がある範囲を特定した(仰角90°～55°、レンズ距離6～21mm:図7)。試作レンズおよびテストピースを用いて特定ポイントの実測をおこなった。

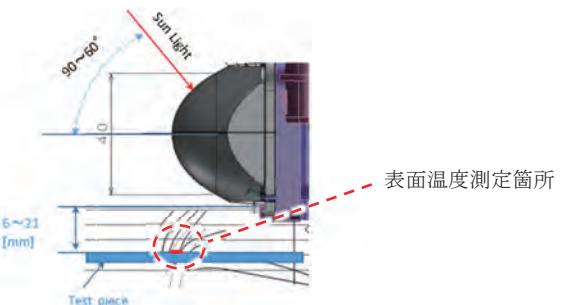


図7 集光予測箇所

【結果】

仰角90°、レンズ距離6mm、霧開気温度40°Cの条件において、一般樹脂材の耐熱温度(PP: 85°C、ABS: 79°C)を上回る107°Cの部位があった(図8)。

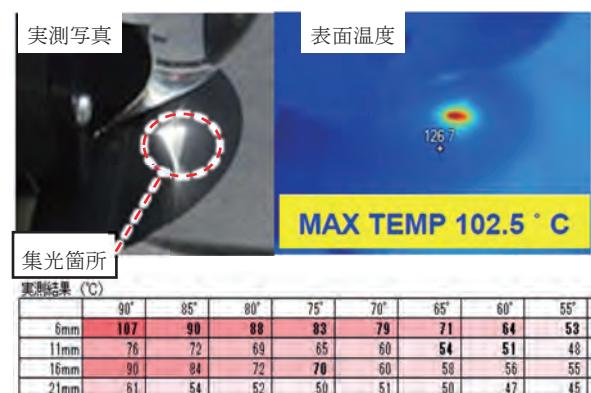


図8 集光実測結果

溶損につながる集光範囲と温度を特定することにより、集光部エリアを3Dデータ化し、モジュール共用時のデザイン要件として提示できた(図9)。

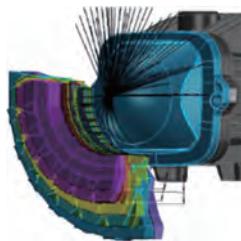
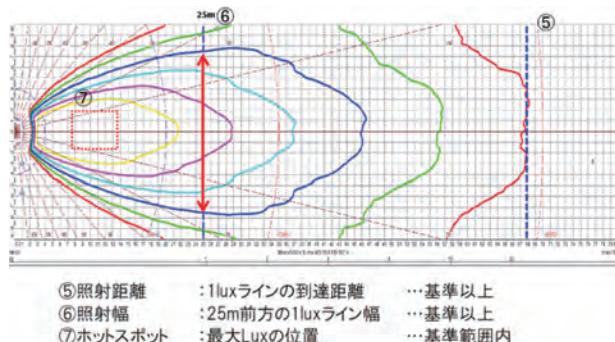


図9 データ化した集光影響要件



## 5 開発成果・評価

### 5-1. 小型化・軽量化

同等の明るさでこれまでに当社で採用実績のある最小ヘッドライトモジュールと比較した結果を下表に示す(表3)。

デザインの小型化に直結する正面視サイズは、既存最小品に対し約70%の小型化を達成した。重量については、Lo・Hiビームの2機能を一体化することで約30%の軽量化を達成した。

表3 開発品比較結果

	開発品	既存最小品
正面視サイズ [mm <sup>2</sup> ] <sup>※1</sup>	1,257 (70%ダウン)	4,225
重量 [g] <sup>※2</sup>	282 (30%ダウン)	400

※1:発光領域の投影面積

※2:ヘッドライトモジュール部分のみ。取付機構はモデル毎に最適設計するため除外。

### 5-2. 配光評価

従来当社で開発した大型モーターサイクルモデルのヘッドライト配光をもとに配光設計で押さるべき項目を設定し、それらを満足する性能を達成した(図10、11)。

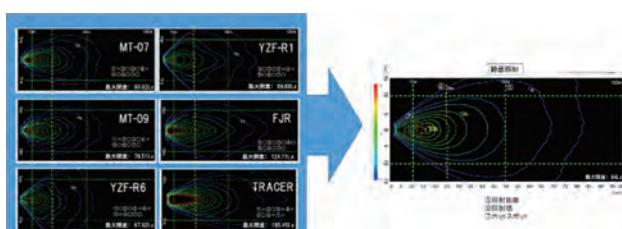


図10 配光目標の設定

## 6 おわりに

今回開発したヘッドライトモジュールは、MTシリーズを初めとする複数のモデルに採用され、新たなフェイスデザインを生み出すことに貢献している(図12)。

モーターサイクルにおける灯火器部品は安全機能部品であるだけではなく、車両デザインの魅力創出につながる部品である。そのため、多彩なデザインの提供に貢献できるよう今後もさらなる研究開発に努めていきたい。

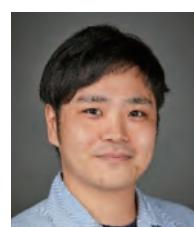


図12 MTシリーズフェイスへの採用

### ■参考文献

[1] CQ 出版株式会社:高輝度／パワーLEDの活用テクニック (2008)

### ■著者



山田 卓央  
Takahiro Yamada  
PF 車両ユニット  
PF 車両開発統括部  
機能モジュール開発部



干場 純  
Jun Hoshiba  
PF 車両ユニット  
PF 車両開発統括部  
機能モジュール開発部



井上 武宏  
Takehiro Inoue  
PF 車両ユニット  
PF 車両開発統括部  
機能モジュール開発部

# 最適工法で業界最軽量級を実現する、 YAMAHA SPINFORGED WHEEL

YAMAHA SPINFORGED WHEEL achieves the industry's lightest class with its optimum construction method

末永 健太郎 大島 かほり 香島 仁 塚本 耕平 鈴木 康修 松原 圭佑

## Abstract

Yamaha Motor has played a role as a pioneer in the history of aluminum alloy cast wheel adoption in motorcycles. While being involved in the establishment of quality standards, the company has contributed to the expansion of their adoption, and while establishing its own evaluation methods, it has completed high-quality, high-performance cast wheels made of aluminum alloy unique to Yamaha Motor.

Furthermore, cast wheels use in-house manufacturing technology for important parts that characterize product performance, and while developing manufacturing methods in gravity and die type casting, the company has worked to expand its manufacturing bases both in Japan and overseas.

On the other hand, Yamaha Motor has a history of, and is actively adopting new technologies related to raw materials, such as CF die-cast frames (Controlled Filling Die Casting) and Mg die-cast wheels, in order to improve product appeal by integrating development, materials, and construction methods.

The "YAMAHA SPINFORGED WHEEL" introduced here is a new lightweight technology realized by a development system that adopts wheel manufacturing and material technologies, as well as new construction methods that the company has cultivated to date. This is a new lightweight technology and is the world's first technology for motorcycle wheels using a double-sided design.

## 1 はじめに

二輪車向けのアルミ合金製キャストホイール採用の歴史において、ヤマハ発動機はパイオニアとしての役割を担ってきた。品質規格の制定に携わりながら、採用の拡大に貢献、また、独自の評価方法を確立しながら、ヤマハ発動機ならではの高品質、高性能なアルミ合金製キャストホイールを完成してきた。

さらに、キャストホイールは、商品性能を特徴づける重要パートとして、内製製造技術を有し、製造方法を重力鋳造、ダイキャストへ発展させながら、国内外へ製造拠点を拡大してきた。

一方、ヤマハ発動機は、CFダイキャストフレーム (Controlled Filling Die Casting)、Mgダイキャストホイールなど、商品魅力向上のため、開発・材料・工法、一体となって、素形材に関する新技術を積極採用してきた歴史を有する。

今回紹介する、「YAMAHA SPINFORGED WHEEL」は、当社がこれまで培った、ホイール製造技術、材料技術、新工法を採用する開発体制をもって実現した、新しい軽量化技術であり、両面意匠を有する二輪車用ホイールとしては、世界初の技術である。

り、部位ごとに、求められる特性が異なる(図1)。

- ・ ハブ:駆動力や制動力を直接受けるための高剛性
- ・ スpoke:車両の外観を左右するデザイン性
- ・ リム部:車両の高い運動性、操縦安定性を構成する一つの要素である軽量性(低い慣性モーメント)

このような要求機能、特性に応えるために、様々な材料・熱処理と工法の組み合わせが適応されている。二輪車においては、中空構造による高剛性や、自由な意匠による高いデザイン性が得られ、また量産性の高い、AC4CH・T6+重力鋳造、またはLP鋳造が用いられることが一般的である。内製技術が対象とする二輪用のキャストホイールにおいても、前述の組み合わせを基に発展してきた。



図1 キャストホイールの構造と要求機能

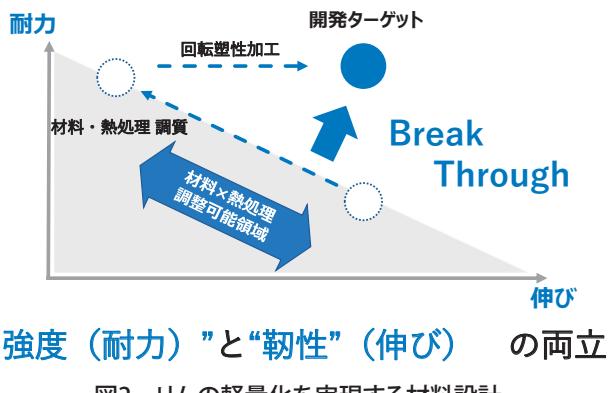
## 2 開発背景と課題

キャストホイールは、大きく3つの部位から構成され、足回りの部品として安全性を確保するための必要強度、韌性はもとよ

一方、リム部の要求特性に対しては、強度・韌性の観点から、前述の組み合わせは、鍛造や、回転塑性加工、といった方法に対しては優位性がなく、軽量化に対しては課題を抱えている。

今回我々は、課題解決のためにリム部の軽量化(慣性モーメント低減)による優れた車両運動性および商品魅力向上を実現できる二輪車用キャストホイール製造方法を開発することを狙いとした。

軽量化のためには材料強度の向上が必要となるが、キャストホイールのリム部には、足回り部品として、路面、および車両からの衝撃に対して変形しない高い強度と、衝撃に対して破壊しない高い韌性という、相反する2つの機能を両立して向上させる必要がある(図2)。



“強度（耐力）”と“韌性（伸び）”の両立  
図2 リムの軽量化を実現する材料設計

一般的に、材料成分、熱処理で、材料特性を調整する場合、強度と韌性はトレードオフの関係になる。

本開発では、この関係をブレークスルーすることで、強度・韌性を両立する、軽量キャストホイールを実現することができた。我々はこの技術を、「YAMAHA SPINFORGED WHEEL」(以下、「YSFW」と略)と名付ける。以下、その詳細を紹介する。

### 3 課題解決方法

前項にあるように、キャストホイールの軽量化には、強度と韌性の両立が必要である。このトレードオフの関係を、解消する技術として、回転塑性加工に着目した。

回転塑性加工とは、管状、棒状の素材を回転させ、工具によって、局所的な変形を与えながら局所的な塑性変形を徐々に繰り返し与え、成型していく塑性加工方法の総称である。今回使用するアルミ合金においては、回転塑性加工を加えることで、韌性が向上することが報告されている<sup>[1]</sup>。

この特徴を活かし、材料・熱処理にて強度向上側に調質した鍛造素材を、リム部に回転塑性を加えることで、韌性を確保す

る。ホイールに求められる機能要件を部位ごとに満足する最適な材料・工法の組み合わせ、これが「YSFW」である。

本技術の開発目標は、2020年にリリースされる、「MT-09」への搭載と設定した。その車両コンセプトを“Torque & Agile”とする「MT-09」においては、常に俊敏で扱いやすいハンドリングが求められる。この車両コンセプトから、リム部の慣性モーメントを従来比△10%に設定し、これを達成するリム部の軽量化を行った。以下、課題解決手法を述べる。

#### 2-1. ホイール設計

前述の慣性モーメントを達成する場合、リム部の大幅な軽量化をするために、リム板厚をこれまでにない薄肉にする必要がある。設計目標値としては、リム板厚を従来品より△15%以上低減することとした(図3)。また、実際の机上検討で必要な材料強度については、材料開発部門、製造部門と協業にて、求める材料設計を行った。

開発を進めるにあたり材料の再調整や工法の再検討などにより、検討を進める中で解析をうまく活用できない状況が出てきた。こちらについてはその都度、材料特性データの取得を進め、工法によりその値が達成できるかの見積を進めるなど、解析に使用する材料データを検討前に確定することにより、より精度の高い検討を進めることができた。

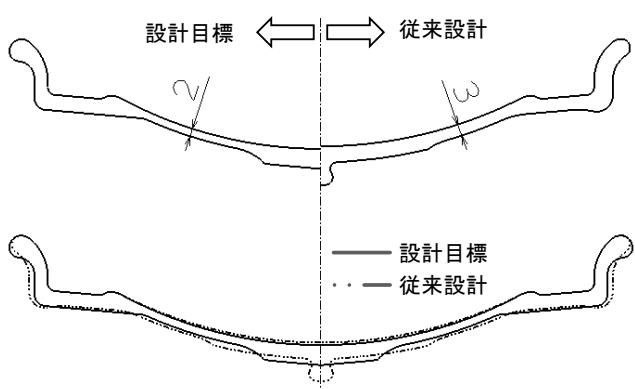


図3 リムの設計目標

#### 2-2. 材料

2節冒頭で述べたように、本開発では材料で強度、回転塑性加工で韌性を付与する構想である。しかし、実際は回転塑性加工が施されない部位もある程度の韌性が必要である。そこで、材料の時点で強度と韌性のバランスを調整した「YSFW」専用材料を開発した。

材料のベース合金には、良好な強度と韌性から一般的にアルミ鍛造ホイールに使用されるAC4CH合金を採用した。この

材料に対して、強度として耐力、韌性として伸びに着目しながら以下3点を調整した。

1. Mg 含有量

Mg を増やすことで、耐力を向上させることができるが、伸びは低下する(図4)。

2. 溶体化処理条件 (温度)

温度を高くすることで、短時間でも耐力を向上させることができる(図5)。本試験範囲では、伸びへの影響は小さかった。

3. 人工時効処理条件 (温度、時間)

温度を高くすることで、短時間で耐力を向上させることができるが、伸びは低下する。ここでは、耐力の代替として硬度を測定した結果を示す(図6)。

これらの結果をもとに、設計要求に適した耐力・伸びを發揮できる組み合わせを選定した。また、生産性も考慮して、Mg 含有量は可能な限り広い範囲、熱処理条件は短時間となるように生産条件を決定した。

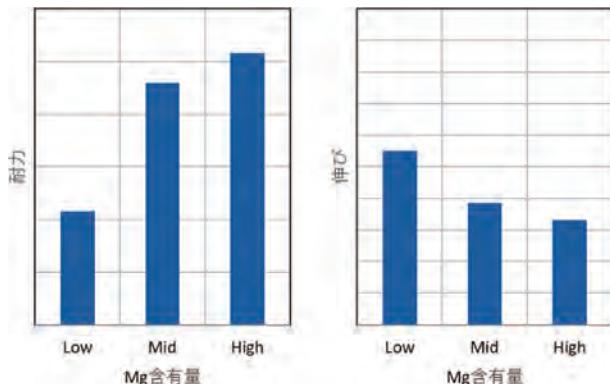


図4 Mg 含有量が耐力、伸びへ及ぼす影響

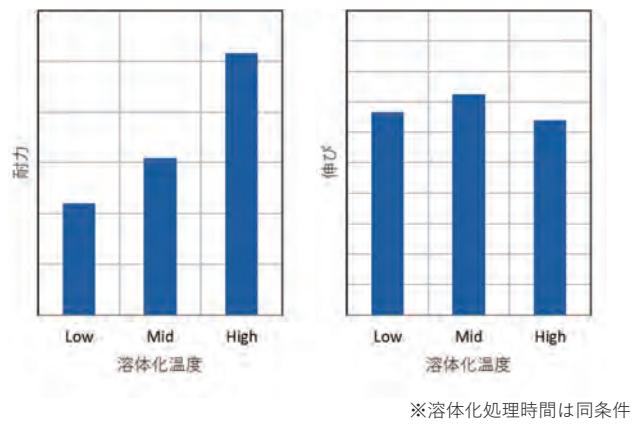


図5 溶体化処理温度が耐力、伸びへ及ぼす影響

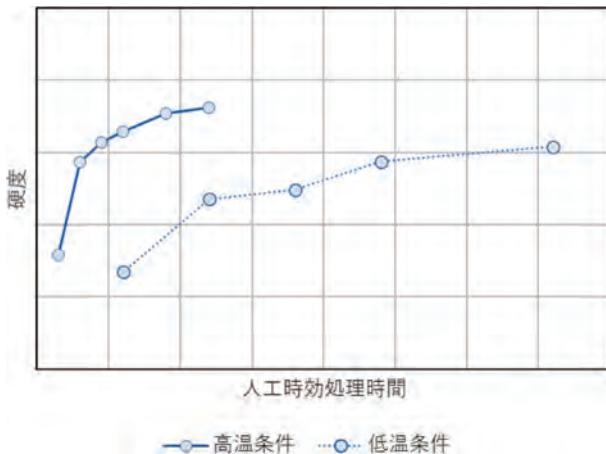


図6 人工時効処理温度ごとの時効曲線

## 2-3. 工法

図7に韌性を付与する回転塑性加工の概要図を示す。マンドレルと呼ばれる金型にホイール素材をクランプし、リム部をローラーで加工する。四輪車のキャストホイールでは広く利用されている工法である。

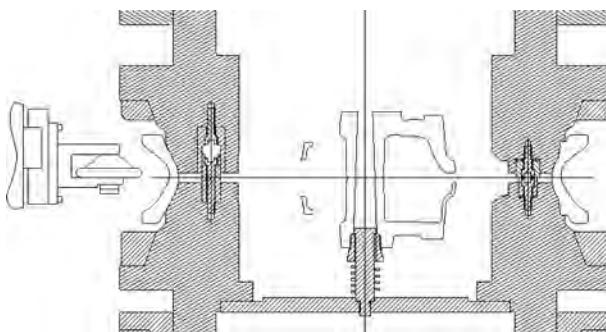


図7 回転塑性加工 概要図

ただし、二輪車の場合、採用に当たっては、2つの課題がある。

1. 四輪車に比べ、リム幅が小さいため、加工量が小さく、回転塑性加工による韌性向上の恩恵が受けにくい
2. ホイール両側がデザインであるため、マンドレルでクランプする際には、デザインへの影響がないこと

1の解決手法について述べる。鋳造素材に回転塑性加工を付与すると、鍛造組織のようなファイバーフローが観察される(図8)。我々は、基礎実験において、開発目標の達成に必要な韌性を確保するファイバーフローと、これを実現可能な、加工前後の素材形状を定義した。これによって、必要な材料状態を実現する、中間素材設計が可能となった(図9)。

また意匠影響がないようなクランプ形状と設置方法を工程設計の中で実現し、デザイン要求を満足しつつ、加工時のクランプ力と回転トルクを受ける、最適なクランプ形状を設定する

ことができた(図10)。

以上をもって、二輪車における回転塑性加工の課題をクリアすることができた。

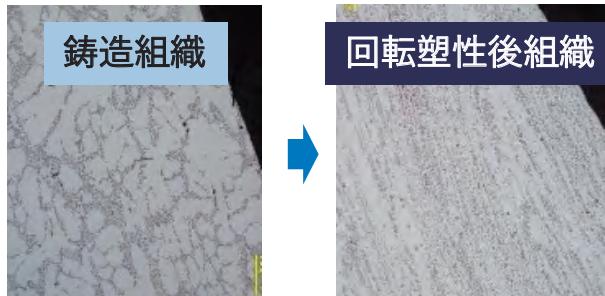


図8 回転塑性後のファイバーフロー

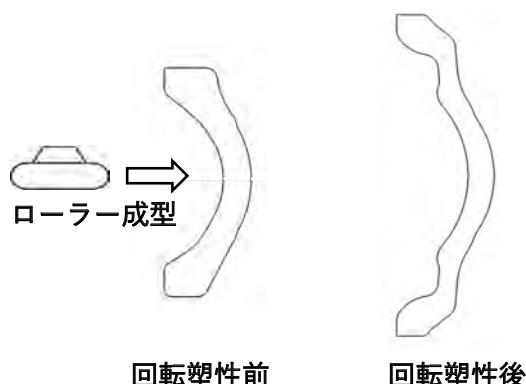


図9 回転塑性前後 リム断面模式図

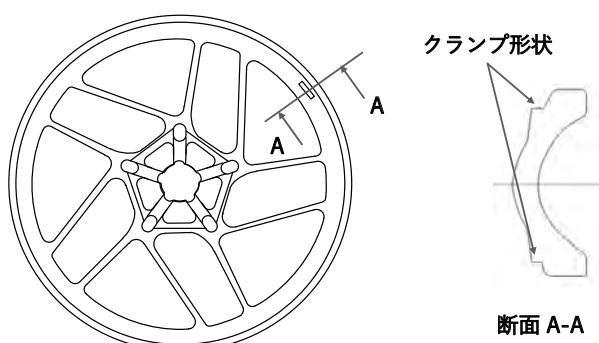


図10 クランプ形状 模式図

## 4 成果

以上、設計—材料—工法 の3つの要素技術開発により、2020年にリリースされた「MT-09」、「Tracer9」において、表1に示す軽量化効果を得ることができた。

また、本技術を導入した生産ラインは、鋳造—回転塑性加工—熱処理、それぞれが同期した1個流しの同期生産ラインとして、ラインオフしている。

熱処理時間は、2-2項の取り組みで従来条件に対して、▲70%を実現しており、従来ジョブショップ式であった生産方式に対して、リードタイムを▲80%短縮した高い生産性を実現している。

表1 前モデルに対しての効果

モデル	重量 軽量化	リム部慣性モーメント 低減率
MT09	700g	11%
Tracer9	1,000g	15%

※前後合算

## 5 製造ブランディング

我々は本技術を、お客様に商品を選んでいただけるための魅力技術として、また、開発・製造に携わる、全ての関係者が誇りに思える技術であるよう、以下の手法を用いて、ブランディング活動を行ってきた。

### 4-1. ネーミング

ネーミングに関して、我々の諸先輩が築き上げてきた、ヤマハ発動機のキャストホイールへのこだわりと、工法を特徴づける回転塑性加工をグローバルに理解していただけるよう、「YAMAHA SPINFORGED WHEEL」と命名した。

### 4-2. オリジナルロゴをホイールへデザイン

本ネーミングは、オリジナルのロゴを作成している(図11)。「MT-09」では、フロントホイールの車両右側スポークに、ロゴがデカールで掲載される(図12)。

YAMAHA SPINFORGED WHEEL

図11 オリジナルロゴ

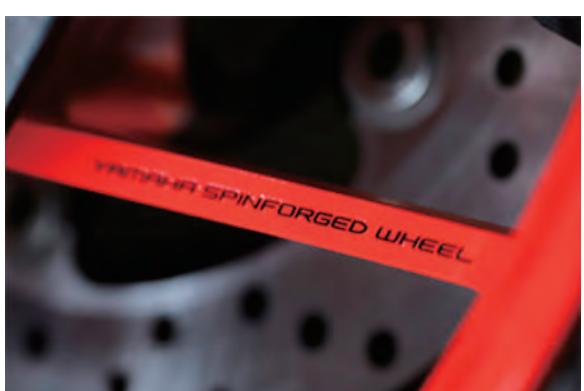


図12 製品へのデカール

#### 4-3. 社内外へのブランディング活動

2020年には、ヤマハ発動機の製造ブランディング活動、“ヤマハの手”のコンセプトに則り、価値ある一手間として、本技術を紹介させていただいた<sup>[2]</sup>。

本技術によって、我々の製品が少しでも多くのお客様の目に触れ、「MT-09」を選んでいただくなきつかけとなれば幸いである。

### 6 おわりに

本技術は、車両開発、製品設計、材料・工法開発が三位一体となつたからこそ、実現できた新技術である。

本技術は、製品軽量化の実現はもちろん、従来の鋳造のみの工法に対して、ニアネットの特徴を活かした、歩留まり性の向上も見込める期待技術である。そのため、今後よりいっそう重要性を増していく、カーボンニュートラルに対しても、Scope1,2,3において、有効な技術であると考える。

本開発で実現した軽量化技術を、新たな商品へ拡大しつつ、買い手よし、売り手よし、世間よし、の三方よしを実現する技術として、より一層発展させていきたい。

#### ■著者



末永 健太郎  
Kentaro Suenaga  
生産本部  
製造技術統括部  
PT技術部



大島 かほり  
Kahori Oshima  
生産技術本部  
材料技術部



香島 仁  
Hitoshi Kashima  
PF車体ユニット  
PF車両開発統括部  
機能モジュール開発部



塙本 耕平  
Kohei Tsukamoto  
PF車両ユニット  
PF車両開発統括部  
機能モジュール開発部



鈴木 康修  
Yasunobu Suzuki  
生産本部  
製造技術統括部  
PT技術部



松原 圭佑  
Keisuke Matsubara  
生産本部  
製造技術統括部  
PT技術部

#### ■参考文献

[1] *Journal of Materials Engineering and Performance*.  
Published: 02 February 2012. Effect of the Spinning Deformation Processing on Mechanical Properties of Al-7Si-0.3Mg Alloys, Yin-Chun Cheng, Chih-Kuang Lin, An-Hung Tan, Shih-Yuan Hsu & Sheng-Long Lee. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-0089-8>

[2] ヤマハの手. 回転塑性 SPINFORGED WHEEL | クラフトマニシップ<ヤマハの手> | ヤマハ発動機(yamaha-motor.com). [https://global.yamaha-motor.com/jp/design\\_technology/craftsmanship/new-methods/method2.html](https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/craftsmanship/new-methods/method2.html)

乾 雄太 大嶋 崇之 前田 智仁



## Abstract

As aluminum has a lower specific density than steel it is an indispensable material for reducing the weight of transportation equipment. Moreover, as the material has great corrosion resistance, it can also be applied to parts with stringent appearance requirements. For our large motorcycle frame parts where there is a lot of external exposure, "CF aluminum die-cast" 1) is used, which has excellent shape transferability and can realize complicated shapes with thin walls in order to achieve lower cost, light weight, and greater designs.

Starting with "FZ6" in 2004, the application of this technology to the front frame has expanded to "TMAX," "MT-01," "MT-09," and has contributed to the improvement of product presence with lightweight and high design.

Here, we introduce the fact that we were able to achieve further thinning by adopting the latest analysis method and gate design based on the technical theoretical values.

1)CF die casting = Controlled Filling Die Casting

## 1 はじめに

アルミニウムは鉄鋼に比べて比重が小さく、輸送機器の軽量化に必要不可欠な材料である。加えて、素材耐食性も良好であるため、外観上の要求が厳しい部品に対しても適用されている。中でも、外観上の露出が多い当社の大型モーターサイクルフレーム部品には、安価、軽量、高意匠を実現するために、形状転写性に優れ、複雑な形状を薄肉で実現できる特徴をもつ「CFアルミダイキャスト」<sup>1)</sup>が用いられている。

フロントフレームへの本技術の適用は2004年「FZ6」を皮切りに「TMAX」、「MT-01」、「MT-09」と採用を拡大し、軽量・高意匠で製品のプレゼンス向上に貢献してきた。

今回、技術理論値によるゲート設計ならびに最新解析手法の採用により、さらなる薄肉化を実現することができたので紹介する。

1) CF ダイキャスト = Controlled Filling Die Casting(制御充填ダイキャスト)

## 2 課題

### 2-1. 許容充填時間

図1に、ダイキャストにおける溶湯(溶融したアルミニウム合金)の流入経路を示す。スリーブに注がれた溶湯は、その後ブ

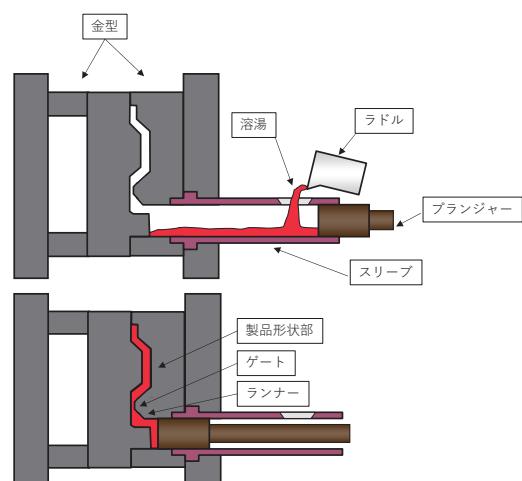


図1 溶湯流入経路

ランジャーの前進に伴い、ランナー、ゲートを経由し製品形状部に充填される。ここで、溶湯がゲートを通過し、金型を満たすまでの時間を「充填時間」と呼ぶ。

ダイキャストで良品を得るには、この充填時間を「許容充填時間」以下にすることが重要になる。許容充填時間とは、充填中の溶湯が液体状態を保つことのできる時間であり、いくつかの理論式が提唱されている。その一例を示す。

$$t = k \left( \frac{T_i - T_f + SZ}{T_f - T_d} \right) T \quad (1)$$

t:許容充填時間(s) k:伝達係数(s/mm)

T<sub>i</sub>:ゲート通過時の溶湯温度(°C)

T<sub>f</sub>:流動限界温度(°C) T<sub>d</sub>:充填前の金型表面温度(°C)

S:充填終端での固相率(%) Z:単位換算係数(°C/%)

T:製品肉厚(mm)

上式(1)から分かるように、製品が薄肉になるほど許容充填時間は短くなる。

先述したように、良品を得るには式(2)を満たす必要があるため、薄肉化においては、充填時間をより短くする必要がある。また、許容充填時間を延ばすことも有効である。

$$\text{充填時間} < \text{許容充填時間} \quad (2)$$

## 2-2. 短時間充填の課題

溶湯の流入経路において、その断面積が最小となるのが、ゲート部であり充填抵抗は最大となる。そのため、短時間で充填するためには、ある程度ゲート断面積を大きくする必要があるが、一方で、製品形状にとっては不要な部位であり、むやみに大きくしてしまうと、歩留まり、仕上げ性などの悪化を招く。

## 2-3. 充填時間延長の課題

前項、式(1)から分かるように、充填時間を延ばすにはいくつかの手法があるが、製品形状や材料物性に起因する因子が多い。その中で、金型温度は材料物性や製品形状に縛られず、比較的制御が可能なため、今回は金型表面温度を高くする検討を実施した。

ダイキャストの金型の熱収支は、溶湯からの入熱と金型の内部冷却、空気中への放熱、離型剤と呼ばれる油剤の塗布による抜熱でバランスしている。入熱、放熱の制御は難しく、今回は対象外とした。内部冷却もしくは外部冷却を少なくすることで抜熱を減らし、金型温度を高くできるが、今回、特に金型表面温度が重要となるため、外冷を減らす手法を選択した。

現在使用している離型剤は、水溶性希釀離型剤というタイプ

で、離型に必要な有効成分を乳化し、水と混ぜている。離型被膜の形成には、水分の気化が必要だが、気化により金型表面の熱を大幅に奪う。そこで今回は、油性原液タイプの離型剤を採用することにした。このタイプの離型剤は、高温での離型性が良く、また、ほとんど型の熱を奪わない。

しかし、課題は残る。高温状態の金型(鉄)は溶湯(アルミニウム)と化学反応を起こしやすく、「焼き付き」と呼ばれる不良が発生する。また、熱膨張による金型の反りが大きくなることで、金型の隙間が増え、高速高圧で溶湯を充填した際に発生する「バリ」の問題がある。

## 3 解決手段

### 3-1. ゲート断面積最適化

最適断面積の理論値を導出するための理論式の精度向上を行ったので詳細を後述する。

2-2項のデメリットを最小化するためには、鋳造機の射出能力に応じて最適断面積を導出する必要がある。この計算には図2に示す PQ<sup>2</sup>線図が広く用いられている。

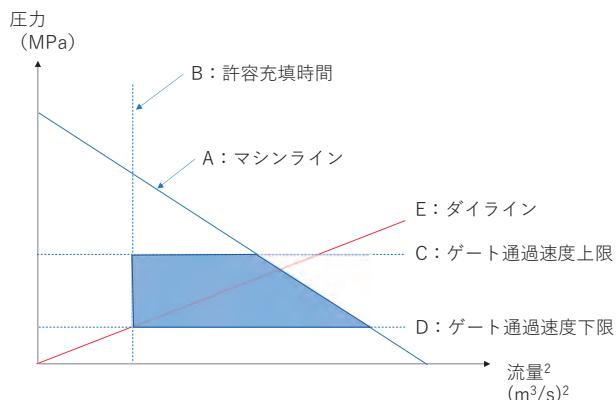


図2 PQ<sup>2</sup>線図

図中Aのマシンラインは鋳造機の「射出能力」を表し、B、C、Dはそれぞれ、「許容充填時間」「ゲート通過速度上限」「ゲート通過速度下限」を表す。Eはダイラインと呼ばれ、以下の式(3)にて表すことができる。ゲート断面積を大きくしていくと、傾きが小さくなっていく。

$$P = \frac{\rho Q^2}{2C^2 A_g^2} \quad (3)$$

P:圧力(Pa) ρ:溶湯密度(kg/m<sup>3</sup>)

Q:ゲート流量(m<sup>3</sup>/s) C:流量係数

A<sub>g</sub>:ゲート断面積(m<sup>2</sup>)

A～Dで囲まれた範囲をプロセスウインドと呼び、このエリアの中央を横切るようなダイラインが引けるゲート断面積が、最適な断面積とされている。

このように、各ラインを引く理論式は提唱されているが、実績に合わせて補正が必要となる。特にダイラインを表す式の「流量係数」については0.5～0.6の範囲で設定することを提唱されているが、ゲート厚さや材料によって変化するとの報告もあり、はっきりしない。

そこで、我々は金型に圧力センサを設置し、式(3)の溶湯圧を計測することで、流量係数の値をより正確に把握、ダイラインの精度を上げ、薄肉化するために必要な断面積を精度よく導出した。

### 3-2. 内冷最適化

ダイカスト1サイクルにおける金型表面の温度変化を少し詳細に見てみる。温度、時間変化を図3に示す。ここでAは充填開始時間である。許容充填時間に影響する型温度とは、点Aにおける金型表面温度である。それに対して、前項で挙げた「焼き付き」に対して最も影響する金型表面温度は、点Bのピーク温度である。充填時の温度は高く、ピーク温度を下げることで両立を試みる。そのためには、今までの勘、コツによる冷却配置ではなく、精度を上げた焼き付き解析で「焼き付き」発生を予測することが必要になる。

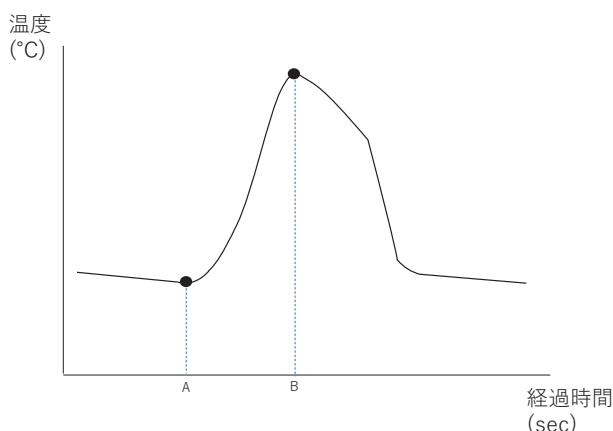


図3 ダイカスト1サイクル中の金型表面温度変化

焼き付き解析の精度向上のため、机上試験により導出した、離型剤被膜形成上限温度や金属の拡散を考慮し、「焼き付き」が発生する金型上限温度の理論値を導出した。また、解析する3Dデータおよび解析条件を、より現実に近づけることで、型温度解析自体の精度向上を行った。

事前予測精度上げることで、試作段階で製造要望を入れた

製品形状を提案することができ、金型の過熱部位の発生を無くすことができた。

また、この高精度金型温度解析により、熱変形予測精度も向上した。これにより局所的な熱変形を抑制する冷却配置が実施でき「バリ」の発生を抑えることができた。

## 4 結果

### 4-1. 軽量化

前項までの取り組みにより、「MT-09」の新フレームは、当社ダイキャストフレームとしては最も薄い最低肉厚1.7mmを実現できた。リアフレーム、リアアームを含めた骨格合計で前モデル比約2.3kgの軽量化に繋がっており、アジャイルな走りを一層引き立てるフィーチャーとなっている。

### 4-2. 製造プランディング

2020年には、ヤマハ発動機の製造プランディング活動、“ヤマハの手”\*のコンセプトに則り、価値ある一手間として、本技術を紹介させていただいた。

本技術によって、我々の製品が少しでも多くのお客様の目に触れ、「MT-09」を選んでいただききっかけとなれば幸いである。

\*ヤマハの手 HP:

[https://global.yamaha-motor.com/jp/design\\_technology/craftsmanship/](https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/craftsmanship/)

## 5 おわりに

温暖化への対応は、“脅威”から“成長の機会”へとその認識が変化してきた。証拠に、「ESG投資」は世界で約35兆ドルとの報告もある。

当社でも「環境計画2050」を策定し、事業活動を含む製品ライフサイクル全体の二酸化炭素排出を2050年までに2010年比で9割削減する目標を打ち立てている。本稿で紹介したような軽量化の技術開発は、燃費向上への貢献や、LCA(Life Cycle Assessment)の削減など、今後益々その役割が重要となるだろう。

### ■参考文献

- [1] 金内良夫:ダイカストの鋳造条件選定におけるPQ<sup>2</sup>線図とJ値の活用、日立金属技報、Vol. 23, (2007).
- [2] 山崎吾郎、川谷龍勢:ダイカスト湯口方案のノンパラメトリック最適化技術、ヤマハ発動機技報、No. 53, (2017).

[3] GLOBAL SUSTAINABLE INVESTMENT REVIEW 2020  
<http://www.gsi-alliance.org/wp-content/uploads/2021/08/GSIR-20201.pdf>

■著者



乾 雄太  
Yuta Inui  
生産本部  
製造技術統括部  
PT 技術部



大嶋 崇之  
Takayuki Oshima  
生産本部  
製造技術統括部  
PT 技術部



前田 智仁  
Tomohito Maeda  
PF 車両ユニット  
PF 車両開発統括部  
SV 開発部

赤穂 夏来 多々良 俊哉

### Abstract

In recent years, from the viewpoint of protecting the global environment and preventing health hazards, a reduction of harmful substances in the atmosphere has been called for. Therefore, as higher environmental performance is now also required from motorcycles, emission regulations are being further tightened each year.

Currently, platinum(Pt), palladium(Pd), and rhodium(Rh) are used as active substances in the exhaust gas purification catalysts for automobiles and motorcycles. CO, HC, and NOx, which are subject to emission regulations, come into contact with these active substances and are converted into harmless H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, and N<sub>2</sub> by the simultaneous oxidation reaction of CO and HC and the NOx reduction reaction. Of the active substances Pt, Pd, and Rh, Rh is the only substance that can efficiently promote the reduction reaction, so the use of Rh is indispensable in NOx purification. However, the price of Rh has been subject to greater fluctuations than previously, and this therefore has a significant effect on the cost of the catalyst itself. In particular, the price has risen sharply in recent years and as an example, the price of 3,000 to 4,000 yen per gram in 2016 rose to nearly 80,000 yen in June 2021. Therefore, there is an urgent need to develop technology to reduce the amount of Rh used in the exhaust gas purification catalyst.

Due to this, we have placed our focus on the “pseudo-rhodium alloy”<sup>[1][2]</sup> developed by the ACCEL program of the Japan Science and Technology Agency as an alternative material for Rh, and have evaluated its application as a catalyst for motorcycles.

## 1 はじめに

近年、地球環境保護や健康被害防止の観点から、大気中の有害物質の削減が求められている。そのため、二輪車においても高い環境性能が求められており、年々排出ガス規制が強化されている。

現在実用化されている四輪車・二輪車向けの排出ガス浄化触媒では、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。排出ガス規制の対象物質であるCO・HC・NOxはこれらの活性物質と接触し、COとHCの酸化反応とNOxの還元反応が同時に起こることで、無害なH<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>に変換される。活性物質のPt・Pd・Rhのうち、効率的に還元反応を進行させることができる物質はRhのみであるため、NOxを浄化するためにはRhの使用は不可欠である。

一方、Rhは過去より価格の乱高下を繰り返しており触媒のコストへの影響が大きい。特に近年の高騰が著しく、例えば2016年に1gあたり3,000～4,000円であった価格が2021年6月時点では80,000円近くまで高騰している。よって、排出ガス浄化触媒中のRhの使用量を削減する技術開発が急務となっている。

そこで我々は、(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」<sup>[1][2]</sup>をRhの代替材料として着目し、二輪車用触媒としての適用評価を行った。

## 2 Rh 使用量削減のための方策

排出ガス浄化触媒の活性物質はRhのみならず、PtやPdも高価である。よって、これら貴金属の使用量を削減するための取り組みは、四輪車メーカー・二輪車メーカーにおいて精力的に進められている。

貴金属の使用量を削減するために、従来は、助触媒のOSC(酸素貯蔵能 Oxygen Storage Capacity)や耐熱性を向上させること、ハニカム中の貴金属配置を適切にすることなどの手法で、より少ない貴金属で浄化性能を担保する方策が用いられてきた。その一方では、様々な研究機関において、貴金属の代替となる材料の研究・開発が進められている。

我々は、(国研)科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業のACCELプログラム「元素間融合を基軸とする物質開発と応用展開」で北川、草田らによって開発された擬ロジウム合金をRhの代替材料として着目した。この擬ロジウム合金は、PdとRuを原子レベルで固溶させた「PdRu合金」材料であり、Rhと類似した電子状態を有する。また、この材料は机上評価においてRhより優れるNOx浄化性能を有することも報告されている<sup>[1][3]</sup>。

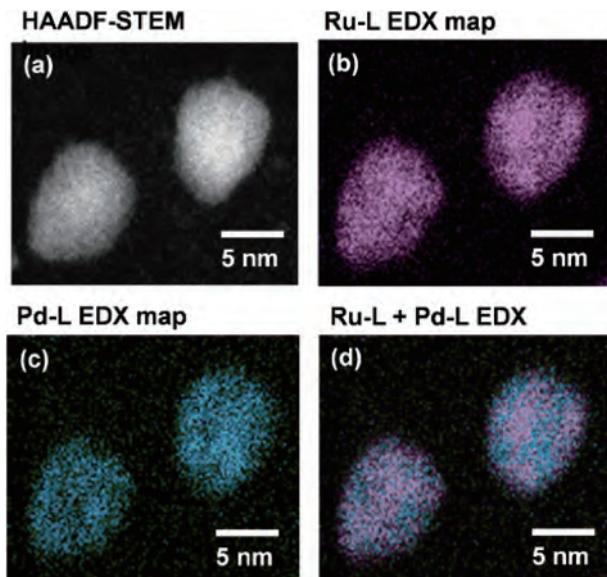


図1 PdRu 合金の HAADF-STEM 像および元素マップ<sup>[1]</sup>  
(写真は(大)京都大学提供)

本報告では、二輪車用排出ガス浄化触媒のRhの代替となる材料仕様の狙いを定めるために、ACCEL プログラムより擬ロジウム合金材料の提供を受け、その適用評価を行った結果について述べる。

(ACCEL プログラムでは、一般企業がユーザーとして材料の提供を受け、評価することが可能である。)

### 3 評価材料の選定

ACCEL プログラムで開発された擬ロジウム合金材料の基本となる「PdRu 合金」は、二輪車用排出ガス浄化触媒の使用温度域において、相分離が起こり、活性が低下するといった課題がある。そこで、同プログラムで開発された材料より、使用温度域において熱的に安定で相分離が起こらない「PdRuIr 合金」を評価材料として選定した<sup>[4]</sup>。評価には Pd、Ru、Ir の元素比が等比である合金材料を用いた。助触媒材料には、CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>を用いた。

### 4 試験方法

#### 4-1. 金属表面積評価

金属表面積は CO パルス吸着法を用いて評価した。測定は日本ベル製 BELCAT-A を用い、触媒学会参考触媒部会の条件を準用して行った。

#### 4-2. モデルガス浄化性能評価

測定は、(株)堀場製作所製 触媒評価装置 SIGU-1000を用いた。試料は、触媒粉末をプレス機で圧粉したものを粉碎してペレット状にし、さらに0.5~1.0mm のサイズにふるいわけしたもの用いた。測定条件を表1に示す。

表1 モデルガス浄化性能評価条件

温度	150→600°C
昇温速度	30°C/min
ガス組成	CO 0.92%、C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> 3360ppmC、C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> 840ppmC NO 1200ppm、O <sub>2</sub> 0.92%、CO <sub>2</sub> 12.12% H <sub>2</sub> O 10%、N <sub>2</sub> balance

#### 4-3. 実車評価

EU3(EURO3)規制対応の125cm<sup>3</sup>強制空冷エンジンの車両を用い、UDC(Urban Driving Cycle)モードで走行し、EU3モード排出量を測定した。測定は、(株)小野測器製シャシダイナモーター(37kW)によって行い、排出ガスの分析は、(株)堀場製作所製自動車排ガス測定装置 MEXA-7200で行った。

## 5 試験結果

#### 5-1. 材料調整

供試材料の材料形態・合成方法を表2に示す。

表2 供試材料

	材料①	材料②	材料③
材料形態	PdRuIr 合金粉末	PdRuIr 合金担持 CeO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> 粉末	PdRuIr 合金担持 CeO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> 粉末
合成者	(株)フルヤ金属	(大)京都大学	(株)フルヤ金属
手法・設備等	液相還元法	フローリアクター (ラボ機)	ソルボサーマル連続 フロー型製造装置 (量産機)

評価するにあたって、材料①の PdRuIr 合金は CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>に担持する必要がある。そこで、PdRuIr 合金粉末をイオン交換水に分散させた液と CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>をイオン交換水に分散させた液を混合し室温で12時間攪拌することで PdRuIr 合金を CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>の表面に吸着させた。その後、ロータリーエバポレータで水を除去することにより、PdRuIr 担持 CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>を得た。材料②、③は、液相中で合金の生成と CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>表面への担持を同時に行う手法で合成された材料である。比較対象の Rh 担持 CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>は、量産工程で一般的に用いられている含浸法で、Rh(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>溶液を CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>に担持させて調整した。

以下、PdRuIr合金担持CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>粉末、Rh担持CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>粉末をそれぞれPdRuIr/CZ、Rh/CZ、と略して記述する。

## 5-2. モデルガス浄化性能評価

合金の粒径の異なるPdRuIr/CZについて、COパルス吸着法による金属表面積評価とモデルガス浄化性能評価を行った。評価に用いた材料仕様、金属表面積評価結果、モデルガス評価の仕込み重量を表3に示す。

COパルス吸着法は、金属の表面に化学吸着したCOガスの量を測定し、金属の表面積や平均粒径を算出する手法である。このCOガス吸着量は金属表面の活性点の指標となる。COガス吸着量から金属の表面積や平均粒径を算出する計算式には、原子量、密度、金属断面積といった元素固有の値を含む。今回は、それらの値が互いに異なる材料が評価対象となるため、COガス吸着量の値を用いて比較・検討を進めることとした。

**表3 モデルガス浄化性能評価材料  
(粒径 TEM データは(大)京都大学、(株)フルヤ金属提供)**

項目	単位	Rh/CZ	PdRuIr/CZ		
材料仕様	粒径(TEM)	nm	<1	4.0	1.9
	金属濃度	Wt%	1.12	1.12	1.12
	合金材料	—	—	材料①	材料②
COパルス吸着法 測定結果	CO吸着量	mL/g <sub>metal</sub>	259	70	114
	金属表面積	m <sup>2</sup> /g <sub>metal</sub>	521	135	221
	金属平均粒径	nm	0.9	3.0	1.8
モデルガス 浄化性能評価 仕込み量	Rh/CZ	mg	179	170	170
	PdRuIr/CZ	mg	179	170	189
	Rh, PdRuIr	mg	2	2	2

モデルガスの入りガス温度に対する浄化率を図2～4に示す。浄化性能が高い触媒は、浄化が開始する温度が低く、また、浄化開始後の浄化率が高い。PdRuIr/CZは合金粒径が小さくなるほど、より低温で浄化が開始し、Rh/CZに近づく傾向にあることが分かる。

各材料のCOガス吸着量と50%浄化温度T50の関係を図5に示す。浄化性能が高い触媒はT50の値が小さい。PdRuIr/CZのCOガス吸着量が増える程、T50はRh/CZに近づく傾向にあることが示される。しかし、PdRuIr/CZのCOガス吸着量をRh/CZと同等にしたとしても、浄化性能はRh/CZには及ばないと考えられる。

モデルガス浄化性能評価により、PdRuIr/CZがRh/CZと同等の浄化性能を示すには、Rh/CZに対しCOガス吸着量、つまり、活性点を増やす必要があることが分かった。

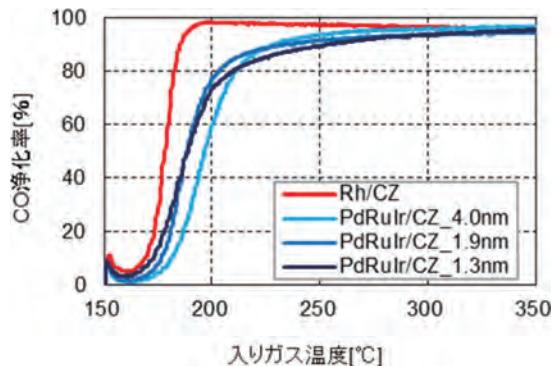


図2 モデルガス浄化率(CO)

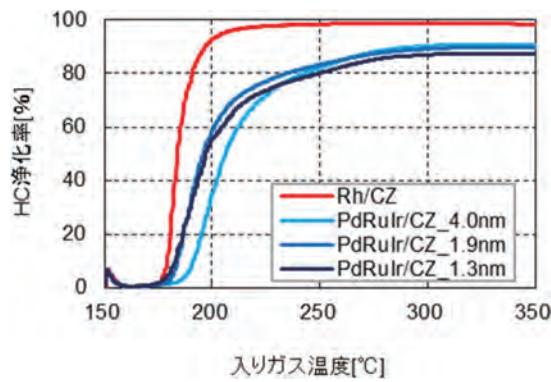


図3 モデルガス浄化率(HC)

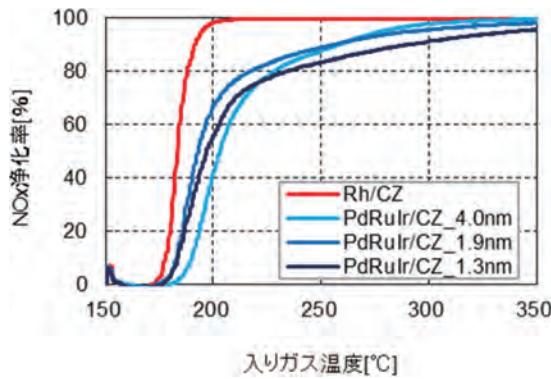


図4 モデルガス浄化率(NOx)

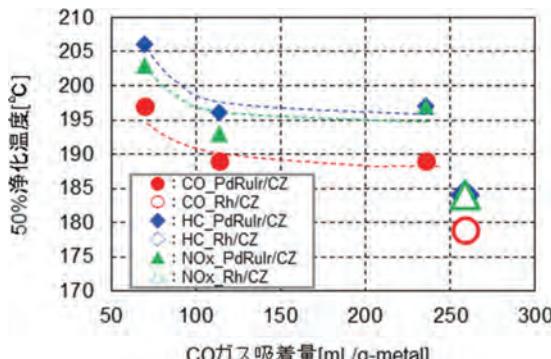


図5 COガス吸着量と50%浄化温度の関係

### 5-3. 実車評価

実車評価は、モデルガス浄化性能評価に対し空間速度(SV)が大きく、また、試験中にガス組成や温度が大きく変化する。そのため、モデルガス評価で互いに同等の性能を示した触媒材料であっても、実車評価で差異が生じる場合がある。今回、PdRuIr/CZ の浄化性能が Rh/CZ と同等になり得るための活性点の狙いについて、実車評価におけるモード排出量の値を用いて検討を行った。

実車評価用の PdRuIr 触媒は PdRuIr/CZ、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、無機バインダーを混合したスラリーを調整し、メタルハニカムに塗布、焼成して試作した。Rh 触媒も同様の手法で試作した。

触媒1個分に換算した CO ガス吸着量比とモード排出量の関係を図6～8に示す。PdRuIr 触媒の CO ガス吸着量が Rh 触媒と同等である場合、PdRuIr 触媒の CO 排出量は、Rh 触媒の CO 排出量のばらつきの範囲内に收まることが予想される。一方、THC 排出量、NOx 排出量は Rh 触媒と差異がある。PdRuIr 触媒の CO ガス吸着量と、THC、NOx 排出量は凡そ比例関係にあり、Rh 触媒の約2倍の CO ガス吸着量を有すれば、Rh 触媒と同等の浄化性能が得られる可能性がある。

### 5-4. Rh 代替となり得る PdRuIr 触媒の仕様検証

検証のために、触媒1個分に換算した CO ガス吸着量比が Rh 触媒に対し2倍となるように PdRuIr 触媒を調整した。PdRuIr/CZ は表2の材料③を用いた。この時の金属担持量は Rh 触媒が0.2g/L、PdRuIr 触媒が0.85g/L である。

EU3モード走行時の排出ガス量、その時の浄化率をそれぞれ、図9、図10に示す。浄化率は、触媒を担持していないハニカムを装着してモード排ガス測定を行ったときの排ガス量を触媒通過前のガスの値として求めた。

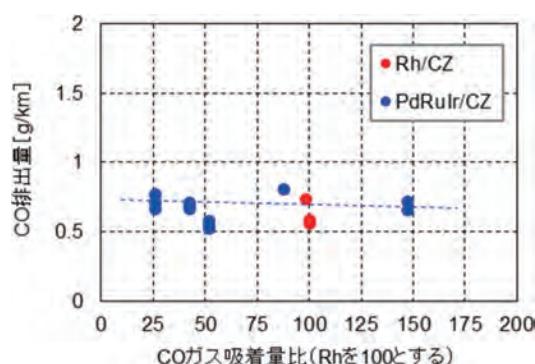


図6 触媒の CO ガス吸着量比と CO 排出量の関係

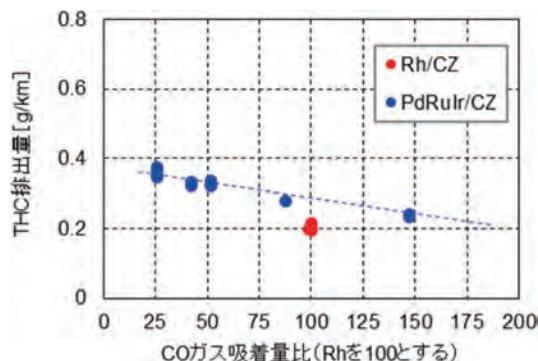


図7 触媒の CO ガス吸着量比と THC 排出量の関係

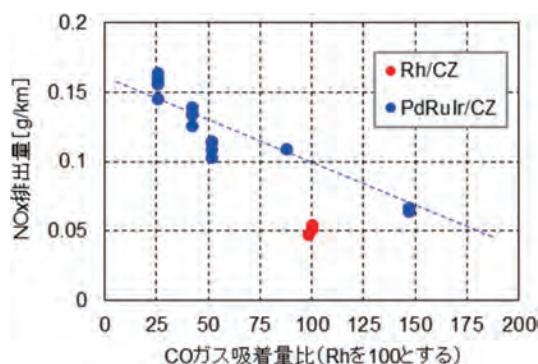


図8 触媒の CO ガス吸着量比と NOx 排出量の関係

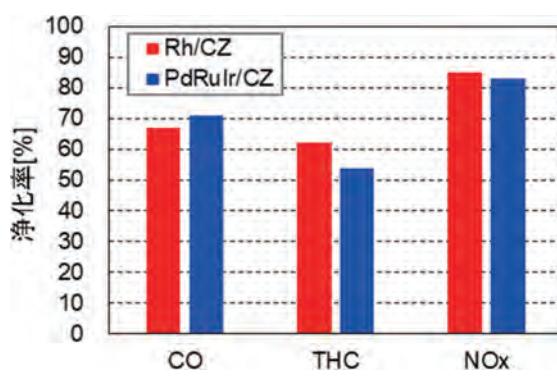


図9 EU3モード排出量

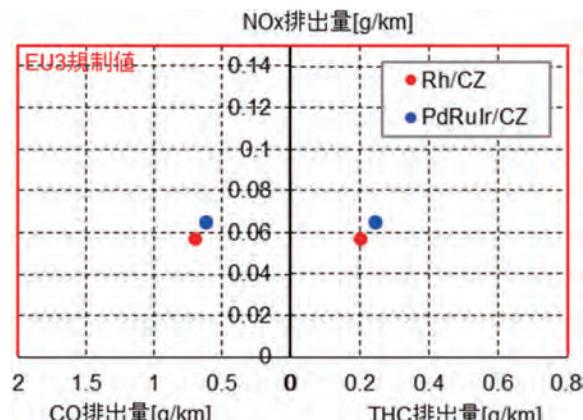


図10 EU3モード排ガス試験における浄化率

排出ガス種類によって、多少の優劣はあるものの、COガス吸着量比をRh触媒の2倍としたPdRuIr触媒は、Rh触媒とほぼ同等の浄化性能が得られることを確認できた。

今回はまず、EU3規制への適用評価を行ったが、地域によってはEU4/EU5規制が施行されている。これらの規制に対応するためには、耐熱性・耐被毒性といった耐久性能の確保が必須となる。今後の課題は、耐久性能の確認およびその強化であると考える。

## 6 おわりに

ACCELプログラムで開発されたPdRuIr合金材料は、二輪車用排出ガス浄化触媒のRhの代替材料となる可能性を見出すことができ、また、Rhと同等の性能を得るために初期の材料仕様の狙いを定めることができた。

今後は、EU4/EU5向けの触媒をターゲットとし、耐久性能の確保を目標に活動を進めたい。

### ■謝辞

ACCELプログラム「元素間融合を基軸とする物質開発と応用展開」の研究代表者の国立大学法人京都大学 北川宏先生、プロジェクトマネージャーの三井化学株式会社 岡部晃博氏、合金材料をご提供いただいた国立大学法人京都大学、株式会社フルヤ金属殿をはじめとする、関係者の皆様に感謝申し上げます。

### ■参考文献

- [1] K. Kusada, H. Kobayashi, R. Ikeda, Y. Kubota, M. Takata, S. Toh, T. Yamamoto, S. Matsumura, N. Sumi, K. Sato, K. Nagaoka, H. Kitagawa, *J. Am. Chem. Soc.*, 136, 1864, (2014).
- [2] <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20140122/>
- [3] K. Sato, H. Tomonaga, T. Yamamoto, S. Matsumura, D. Zulkifli, T. Ishimoto, M. Koyama, K. Kusada, H. Kobayashi, H. Kitagawa, K. Nagaoka, *Sci. Rep.*, 6, 28265, (2016).
- [4] K. Kusada, D. Wu, Y. Nanba, M. Koyama, T. Yamamoto, X. Q. Tran, T. Toriyama, S. Matsumura, A. Ito, K. Sato, K. Nagaoka, O. Seo, C. Song, Y. Chen, N. Palina, L. S. R. Kumara, S. Hiroi, O. Sakata, S. Kawaguchi, Y. Kubota, H. Kitagawa, *Advanced Materials*, 33, 2005206 (2021).

### ■著者



赤穂 夏来  
Natsuki Ako  
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

原 以起 藤井 茂 服部 孝史



### Abstract

In Yamaha Motor's aim to popularize marine sports, the company has been involved in world-class yacht racing as a boat builder, such as in the Trance-Pacific-Okinawa Single-handed yacht race(1975), Melbourne-Osaka double-handed yacht race(1990), Auckland-Fukuoka yacht race(1993), America's Cup(1992). In addition, since acquiring the construction license of the world-famous "International 470 Class Dinghy" in 1975, the company has mainly contributed to the spread and raising of the domestic sailing sports. After that, due to the slump in the domestic economy after the collapse of the economic bubble, the company lost its involvement in yacht racing in 2002, but due to the recent rise in global sailing sports, Yamaha Motor is returning to the world racing scene for the first time in about 20 years. In order to do this, we decided to work on the development of the "International 470 Class Dinghy", which has a large number of participants both in Japan and overseas and has many technical challenges. This report provides an overview of the development process.

## 1 はじめに

当社では、マリンスポーツの普及を目的として、太平洋一沖縄・単独横断レース(1975年)、メルボルンー大阪ダブルハンドヨットレース(1990年)、オークランドー福岡ヨットレース(1993年)、アメリカスカップ(1992年)など世界レベルでのヨットレースにボートビルダーとして関わってきた。また、世界的に普及している「国際470級ディンギー」の建造ライセンスを1975年に取得以来、主に国内のセーリングスポーツの普及と底上げに貢献してきた。その後バブル崩壊後の国内景気の低迷から2002年を最後にヨットレースへの関わり合いを絶っていたが、昨今の世界的なセーリングスポーツの盛り上がりを受け、およそ20年ぶりに世界のレースシーンに復帰すべく、国内外を問わず参加人口が多く、技術的にもチャレンジ要素が多い

「国際470級ディンギー」の開発に取り組むこととなった。本稿では、その開発過程について紹介する。

## 2 開発目標と設計コンセプト

国際470級ディンギーは、World Sailing および International 470協会によって、船型から構造に至るまで詳細かつ厳格にルール(クラスルール)が規定されており、定められた設計・製造基準の中で、競合艇に対してどこまで性能を高められるか、同時に選手のパフォーマンスをどれだけ引き出せるか、開発者には極めて繊細なバランス感覚が求められる。

我々開発チームは、次の3つの視点で開発方針を定め、ターゲットとする大会レース海面の過去海況データ分析、競合艇の船型・構造分析を徹底的に行い、目標値を設定した。

- (1) 艇体抵抗の減少
- (2) 規定重量と艇体剛性の両立
- (3) 艇体慣性モーメントの最適化



図1 試作艇航走(上)と全景(下)

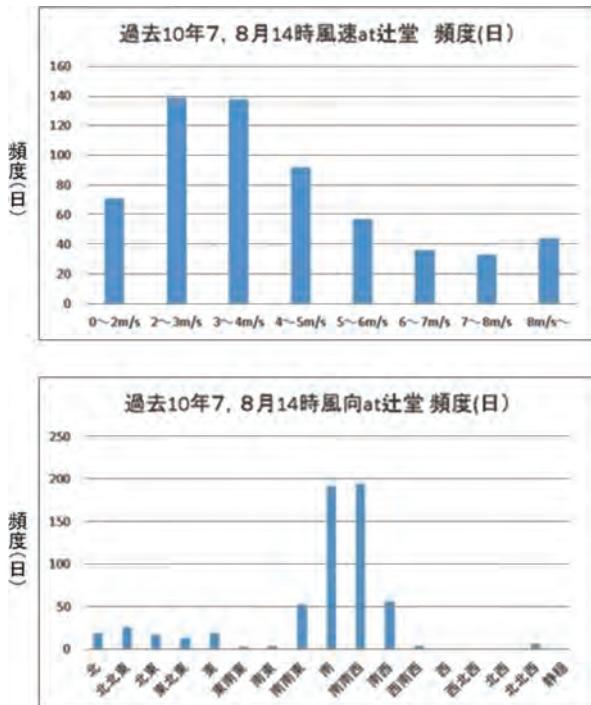


図2 風速データ一例 風速発生頻度(上) 風向発生頻度(下)

最終的に決定した船型は実物を用いた水槽試験とCFD(数値流体力学)との突き合わせ検証の結果、当社既存艇や競合艇に対し低速域(=ターゲットとする風速域)で4%ほど抵抗が少なく、高速域でも同等以上の性能が見込めるものになった。

### 3 技術開発

#### 3-1. 船型

船型は、艇の性能を決定づける最重要ファクターであり、一度モールド(型)を作ったら簡単には変更できないため、プロジェクトの序盤で最も慎重に検討される。クラスルールでは50年ほど前に設計された基本船型から7mmの幅の中で差異が許されているので、その範囲内でどのような形にするべきか、対象となるレース海面の平均的な海況において、航走抵抗が最小となるように設計する。

海況については、今後国内で国際大会が数多く開催される神奈川県江の島沖の風向・風速を主眼に置き、過去の気象データを収集・分析した。

特に最高峰の世界戦が行われる7月末から8月前半の江の島付近ではシープリーズが成熟しきらない軽風が多いことが示されており、また仮にレースシリーズ中に強風になっても、強風時は選手のテクニックによる差が大きく、船型の差で得られるメリットは軽風時の方が大きいことから、本プロジェクトでは軽風域で速い船を狙うこととした。

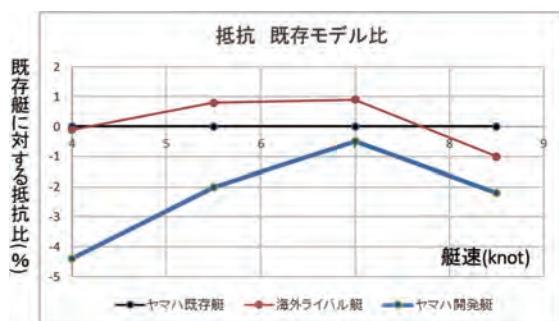


図3 航走抵抗比較図(当社既存モデルを水準とした抵抗比)



図4 水槽試験の様子  
(実艇を使ったヨットの水槽試験は希少な経験となった)

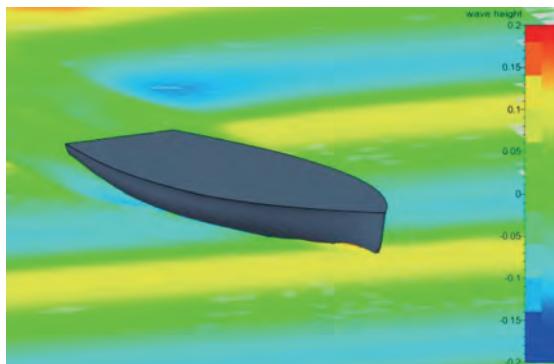


図5 CFDによる波浪海面中航走シミュレーション

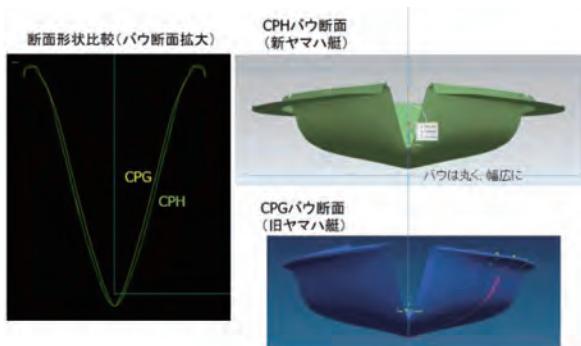


図6 当社旧モデル:「CPG」と新モデル:「CPH」の船型差異  
(一部抜粋)

### 3-2. 構造

470艇の構造についても船型と同様に、構造の形態、船殻板厚、材料、最低重量などが定められており大きな自由度はないものの、構造設計上、主に性能に寄与する重心位置(前後・上下)、慣性半径、動剛性、静剛性を軸に、当社既存艇と競合艇の特性と比較した上で攻め所を決めていった。

まず開発初期に着目したのは、ドイツ製の艇で高い値を示したねじり剛性であった。470艇では風の条件によって艇を揺らしつつ、セールを繰り返し煽る動作が許されているので、それに適した高いねじり剛性を狙った試作艇を建造した。この艇は目論み通りねじり剛性が競合艇をはるかに上回り、既存艇に比べて剛性が向上したものの、その反面、慣性半径が競合艇・既存艇よりも大きくなってしまい、選手による総合評価は芳しくなかった。

したがって、改めてレース艇開発の基本に立ち返り、慣性半径と剛性の最適値を探るため、重量を重心に集めると同時に評価時に重心位置を変更しやすいよう、規定重量下限より10%程度軽量の試作艇を新たに建造することとした。後の同艇の選手による評価では、必ずしも慣性半径は“小さすぎない”方がレースを戦う上では有利に働くということも判明し、最終的に慣性半径と剛性・強度のバランスは競合艇と同程度を狙った設計に落ち着いた。

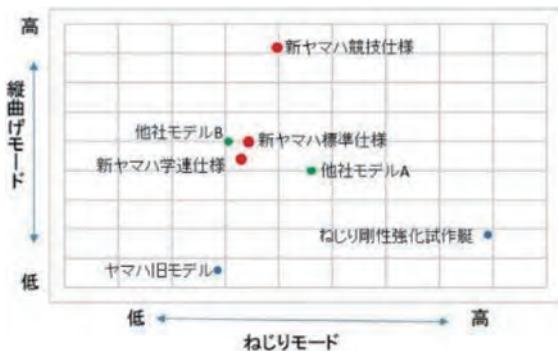


図7 剛性(縦曲げモード、ねじりモード)  
のポジショニングチャート



図8 慣性半径、重心高さのポジショニングチャート

一方で、艇を形作るFRP(繊維強化プラスチック)材料や積層構成の最適化についても検討を進めていった。

一般的なボートやヨットでは、比強度を高める代表的な手法としてガラス積層の間に低密度の発泡材やハニカムコアを挟むサンドイッチ構造をとることが多いが、470艇ではクラスルール上、FRPの単板構造しか認められていないことと、重量制限の中でルール上の最低板厚1.5mmを満たす必要があることから、近年各社ともに、チョップドストランドマット<sup>1)</sup>と引っ張り強度の高いダブルバイアス<sup>2)</sup>を交互に配置する積層構成が主流となっている。

1) チョップドストランドマット(短いガラス繊維をランダム方向で任意の密度となるよう接着しシート状にしたもの)

2) ダブルバイアス(±45°の2方向にガラス繊維を織らずに配置し糸で縫い合わせたもの)

本開発艇でも基本的には同様の積層構成を踏襲するが、ガラス繊維そのものについては従来品に対し単位断面積当たりの繊維密度を上げた製品を新規に採用したり、積層順序や枚数を工夫したりするなど、比剛性・比強度ともに高い積層構成を実現することができた。

主要構造を形成するFRP部品については、型構成と取付け

方法を全面的に見直した。特にリギン(マストとマストを支えるワイヤー)の加重を一身に受ける「Forward bulkhead」と「Forward Tank Web」と呼ばれる主要構造部材の船殻への設置方案は極めて重要で、方案検討とFEM構造解析を繰り返し、部材形状、接着部位の最適化に至った。

新たに決定した方案は、旧モデルの製造手順とは大きく異なり工数も増加してしまうが、比剛性向上のメリットは非常に魅力的で、コストアップ分を補って余りあるものとなった。

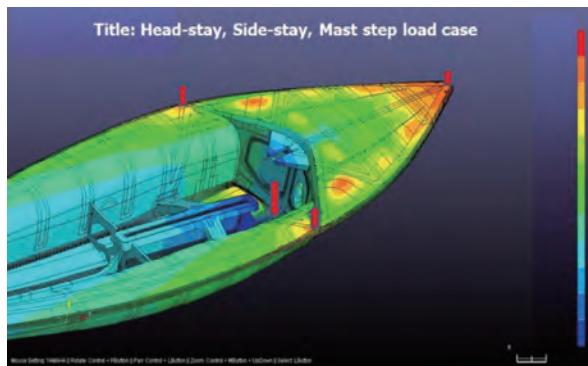


図9 構造解析一例  
(マストステップ部には下向きに1t もの荷重がかかっている)

### 3-3. 試作艇評価

ヨットのテストは、エンジンで走るボートとはかなり事情が異なり、「風」「波」「乗り手」「リグチューニング」などの条件が複雑に絡まり艇のパフォーマンスに多大な影響を与えるため、そうしたファクターを可能な限り“整理して”評価を行う必要がある。しかし実際には、クリーンに条件を同じにすることは難しく、開発艇とベンチマーク艇とが、互いの受ける風を乱し合わないギリギリの位置をキープする、セッションごとに選手を乗り換えて乗り手の要素を排除するなど、精密にコントロールされたフォーマットでテストを行った。



図10 上空から見た帆走テストの様子(ドローンで撮影)

さらに、乗り手の主観評価と計測データによる客観評価を突き合わせ、性能評価の“確からしさ”を高めた。実際のセーリング評価は、本プロジェクトと同時進行で活動している「YAMAHA Sailing Team“Revs”」および練習パートナー契約を結んでいる「Team Abeam」、470級ワールドランキング1位を保持しているオーストラリアの「Mathew Belcher & Will Lian」選手らにテストを依頼した。

テストを行う試作艇の最初の重要な任務は“慣性半径と剛性の最適値を探る”ことにあるので、艇の慣性半径や重心の前後位置と高さ変更を海上でも容易に行えるよう、艇上で複数の錘(1個1kg～2kg)の設置位置を自在に変えることで、効率的に最適値の絞り込みが行えた。

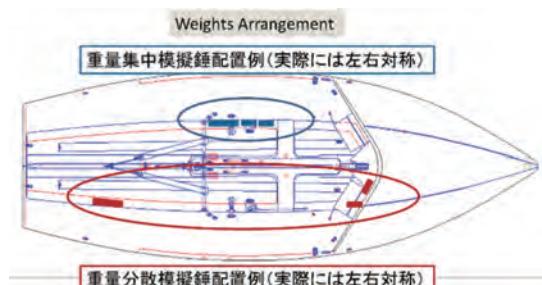


図11 重り配置計画

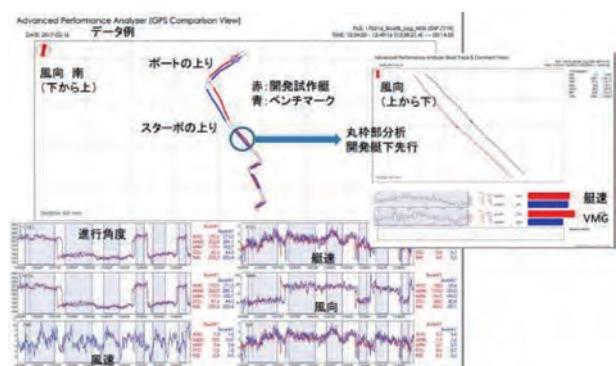


図12 テストデーター一例  
(風上航における2艇のスピード、上り角度を比較)

2nd prototype Evaluation Sheet

	bad	good
1 Boat Speed Light condition	2nd proto. 1 2 3 4 5 ZGM 1 2 3 4 5	Boat # slow in the wind ZGM slow in the wind wind present > full wind present > full wind present > full wind present > full
2 Boat Speed Heavy condition	2nd proto. 1 2 3 4 5 ZGM 1 2 3 4 5	Boat # slow in the wind ZGM slow in the wind wind present > full wind present > full wind present > full
3 Boat Handling/ Manoeuvrability	2nd proto. 1 2 3 4 5 ZGM 1 2 3 4 5	Boat # slow in the wind ZGM slow in the wind wind present > full wind present > full
4 Comfortability	2nd proto. 1 2 3 4 5 ZGM 1 2 3 4 5	Boat # slow in the wind ZGM slow in the wind wind present > full wind present > full
5 Fitting Layout	2nd proto. 1 2 3 4 5 ZGM 1 2 3 4 5	Boat # slow in the wind ZGM slow in the wind wind present > full wind present > full
6 Style	2nd proto. 1 2 3 4 5 ZGM 1 2 3 4 5	Boat # slow in the wind ZGM slow in the wind wind present > full wind present > full
Comments:		

図13 選手による主観評価記入チャート  
(競合艇との相対比較値とコメントを記入)

一連のテスト結果から、

- (1) ターゲットとしている風速域でのスピードは競合艇を凌駕する。
- (2) 慣性モーメントは小さすぎない方がレースの場面では性能を発揮しやすい。
- (3) 乗員の乗艇位置変化に対する艇挙動は競合艇に比べデリケートである。

ということが検証され、当初のスケジュール通りに生産仕様の設計に反映できた。



図16 完成したハリメ型。表面が鏡の様になるまで磨き上げる。

## 4 製造

### 4-1. 型

性能に大きく関与するハル(下部船体)は、接水面形状が設計通り正確にフェアリングされている必要があり、かつ、クラスルールで定められている形状許容値に対する余裕が本艇の場合2mm程度しかない部分が多くあるため、全長約5mにもなるオ型では±0.2mm、メ型では±1mmの精度が要求され、通常のFRP製品型の1桁上のオーダーで製作する必要があった。型の精度はオ型完成時、メ型完成時に3Dレーザー計測器で検品し目標値通りであることを確認した。



図14 フェアリング後のオ型を3D計測

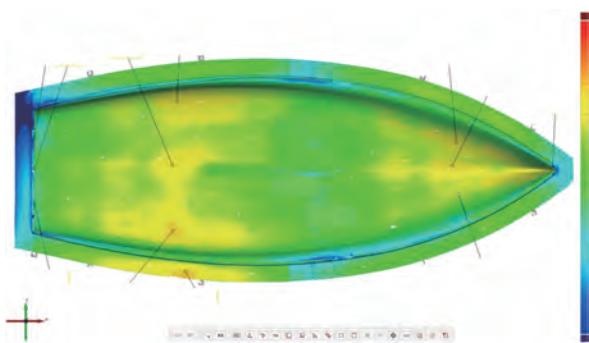


図15 メ型の3D計測結果(計測数値は伏せてある)

### 4-2. 治具

最終的な製品の出来栄えを決定付ける「ハル・デッキカップリング治具」については、精度と作業性の両立に主眼を置き計画した。旧モデル用は鉄鋼管溶接構造で構造材の剛性によって精度を担保する考え方で造られていたが、それゆえ重量も重く(300kg)、カップリング作業には天井ホイスト使用が必須となり、デリケートさが求められる上下左右同時の位置決め作業を困難にしていた。今回は重量剛性比に優れるアルミフレーム材を多用し、また製品を押さえる部分には偏荷重がかかるないよう、デッキマスターオ型上で“部分的FRPメ型”を製作し、先のアルミフレームと合体させる構造とした。こうして重量も大幅に軽減され(75kg)、軽量チェーンブロックの使用が可能となり、快適かつ高精度のカップリング作業を実現した。また、センターボードやラダーブレードなど、性能上、断面形状の精度が極めて高く求められる製品については、高密度ケミカルウッド(センターボード用)や、アルミ(ラダー用)を素材としたダイレクトメ型により製作した。



図17 センターボード用型(左)、ラダー用型(右)

### 4-3. 工程

通常、ハンドレイアップによるFRP製品では、ガラス繊維の重量バラつきに加え、成形時に投入される樹脂重量も「樹脂枯れ」による不良発生リスクを避けるため、設計・製造基準の範囲内で若干多めに投入されるのが一般的であり、最終的な製品重量は製造基準の範囲内でバラつくことが避けられない。しかし、470艇ではルール下限ギリギリの重量でできていないと、

選手やコーチが拒否反応を示すため、出荷時点で“絶対に”艇体重量がルール下限値になるよう、全FRP部品のガラス繊維重量、投入樹脂重量、接着剤(ペースト)重量を毎工程ごとに1g単位で計量しながら積層・組み立て作業を行っている。



図18 レイヤー毎に樹脂重量を計量し  
チェックリストに記録・管理する。

こうして470艇として認証を得るための重量計測時には、ルール下限値(ペアハル86kg)を常に達成している。つまり、出荷時の製品重量バラつきは±0%ということになる。

## 5 最後に

本プロジェクトに課せられたミッションは、世界レベルでのレースシーンで勝てる艇の実現であったが、20年にわたるヨット開発の中止は大きなハンデであり、これまでのやりかたが通用しないことはプロジェクト着手時点では明白であり、それをどう克服するかが最大のテーマであった。

幸いなことに、これまで我々が公私ともに培ってきたセーリング界のネットワークに助けられ、世界最高峰のヨットレースプロジェクトに関わってきたプロフェッショナルの方々との協業体制を早期に構築できたことが、限られた期間の中での目標実現の最大の成功要因となった。

ここに本開発の全てのプロセスにおいて関わっていただいた皆様に感謝申し上げます。

### ■著者



原 以起

Iriko Hara

マリン事業本部

開発統括部

艇体開発部



藤井 茂

Shigeru Fujii

マリン事業本部

開発統括部

艇体開発部



服部 孝史

Takafumi Hattori

マリン事業本部

開発統括部

艇体開発部



### Abstract

As a company, Yamaha Motor has enjoyed benefits from developing products used in Japan's mountains and forests since its inception. Most of our products are based in this field, from utilizing wood processing machines, motorcycles designed for mountain use, All-Terrain vehicles (ATV) for hunting, snowmobiles designed for snowcapped mountains, and pleasure boats used in the waters that flow from these areas. Furthermore, the plants growing there absorb carbon dioxide emitted by the models that use internal combustion engines. Now that the importance of SDGs has become more eminent, and as a company that has declared that it is aiming for carbon neutrality, there is no doubt that giving back to the forests that we have and will continue to enjoy the benefits of is an important mission as a company that can be proud of its standing in the world today.

The company's initiatives in the forest measurement business is one example of this commitment. In recent years, it has become necessary to quantitatively understand forest resources as the first step in improving the forest environment, which has become mandatory in Japan. Here we will introduce the measurement and analysis technologies that support this new solution.

## 1

### はじめに

当社は、創業当時から山や森から非常に多くの恩恵を享受し育ってきた企業である。木材の加工機を活用することで創業し、山間部を疾走して楽しむモーターサイクルをはじめ、ハンティング用途のATV(四輪バギー)や雪山を駆け抜けるスノーモービル、山から流れる水上を楽しむプレジャー・ボートなど、当社の取り扱う製品のほとんどは森林がフィールドとなっている。さらに、内燃機関を用いる発動機が排出する二酸化炭素を固

定していくのもまた、そこに生育している植物に他ならない。SDGsの重要性が説かれている今、そして、カーボンニュートラルを目指すと宣言した企業として、これまでとそしてこれからも恩恵を享受し続けていく森林に恩返しをすることは、世界に誇れる会社として重要なミッションであることは間違いない。

当社はその一つとして森林計測事業を始めた。近年、国内で義務化された森林環境整備の第一歩として、森林資源の定量的把握が必要となっている。その新たなソリューションを支える計測および解析技術について紹介する。

## 2 空から森林内部を把握する計測技術

### 2-1. 空からのアプローチ

国内における森林はそのほとんどが山間部に存在し、崖や沢、群生する下草などの障害、蛇や熊などの危険が潜む内部（地上）からの全域計測はかなり難しい。また、上部が樹冠（樹木の葉が生い茂っている部分）に覆われていることが多いため、衛星写真や飛行機のレーザ計測など、上空からでもその内部を把握することが困難だった。

そこで当社は、独自の製品である産業用無人ヘリコプター（以下、無人ヘリ）にレーザスキャナを搭載し、低空域から樹冠下の3次元点群データを効率よく得る手法を新たに開発した。

### 2-2. 樹冠を透過するための条件

レーザ光は近赤外線を用いているため、樹冠を物理的に回避しなければその下の森林内部に届かない。そこで、森林内部から空がみえる部分を全方位カメラで計測した結果と、照射角度ごとのレーザ計測結果を検証することで、森林内部を効率よく計測できる条件を静岡県立農林環境専門職大学との共同研究により特定した<sup>[1]</sup>。

図1および図2から、森林内部を計測するためには、開空率が高い鉛直上から20度～70度のレーザ照射が効率的といえる。

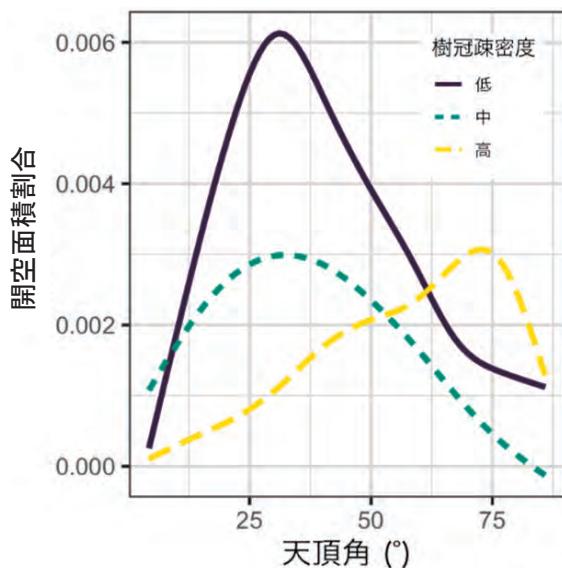


図1 全方位カメラ計測による天頂角ごとの開空割合

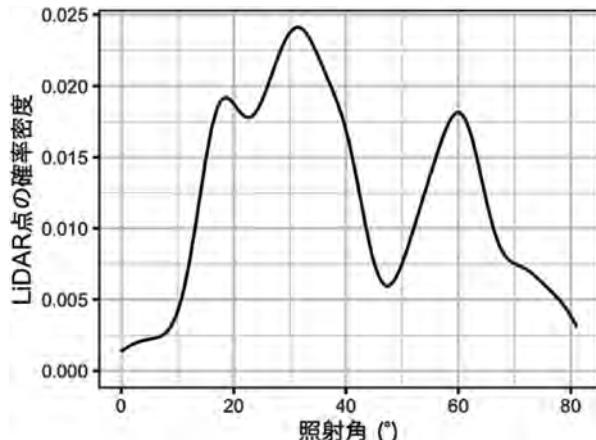


図2 幹上点群の照射角ごとの確率密度  
(50°付近の減少は機体障害物の影響によるもの)

### 2-3. 森林内部を計測するための手法

まず、一般的にレーザ径は小さいながらも発散する性質があり、対象物に照射する際のスポット径は距離とともに徐々に大きくなる性質がある。そこで、樹冠の小さな隙間を抜けるために、高度をできるだけ下げながら安全性を保つ条件を設定した（図3）。

次に、一般的に用いられているレーザスキャナは、センサが回転または揺動することにより広範囲のデータを取得する。この回転を利用して、先述の角度で森林内部を照射できるよう、進行方向にレーザ回転軸を向けて、等高線に沿った飛行で、鉛直方向以外の斜め方向にも効率よく照射できるようにした。

等高線に沿った飛行は、航路の高度変化、つまり上昇／下降が少なく、飛行するためのエネルギー消費を抑えられるうえ、前方の視界が開けるので、飛行の安全を確認しやすいというメリットもある。

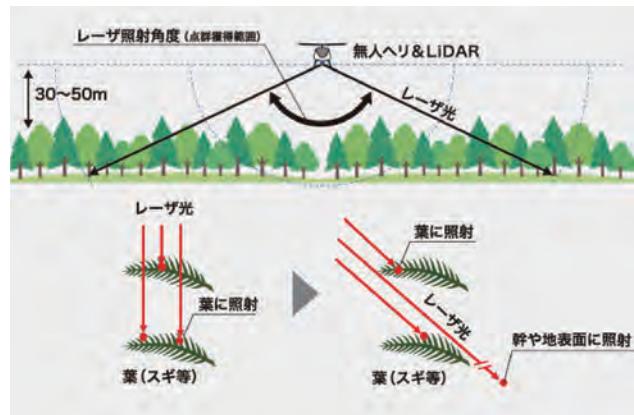


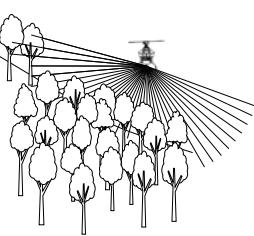
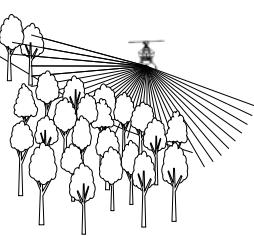
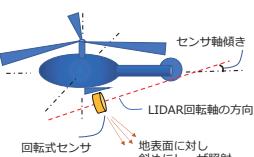
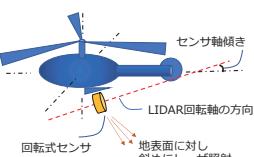
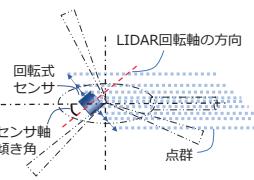
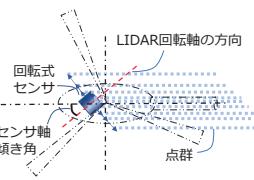
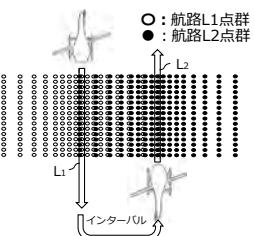
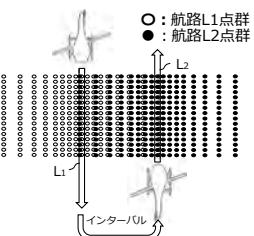
図3 低高度からのレーザ照射イメージ

このような条件を満たす飛行は、有人機には極めて困難であるため、無人ヘリやマルチコプターなどのドローン(UAV)を用いることで達成可能となる。

その中でも飛行時間の長い当社製無人ヘリは、飛行速度を下げることで、照射数を増やし、計測解像度を上げることができる。

上記手法のほか、センサ軸を水平から上下(ピッチ方向)に角度をつける手法や、進行方向の点密度を増やすためにセンサを左右(ヨー方向)斜めに搭載して飛行計測する手法などを検証中である。いくつかの計測手法とその効果を表1にまとめた。

表1 計測手法と特徴

手法	等高線に沿った飛行とセンサ軸方向	
効果	レーザの樹冠透過率向上	
手法	センサ軸を水平から上下に傾けて搭載	
効果	レーザの樹冠透過率向上 (照射角度を20~70°に集中)	
手法	センサ軸水平方向を飛行方向から傾けて搭載	
効果	航路直下付近の計測密度を上げる (背反として計測幅減少)	
手法	点群の分布を考慮し高度Hに対応した計測航路インターバルIの設定: $0.8 \leq I/H \leq 2.5$	
効果	幅広い照射角度でも点群密度のばらつきを抑える	

### 3 単木レベルの森林管理を可能とする解析技術

無人ヘリを含む UAV の森林上空飛行により得られたデータからは、樹冠、地面、幹の情報を得ることができる。

この情報から、単木(木一本一本)の属性データ(図4)や、森林内部の状況を分析する技術を開発した。

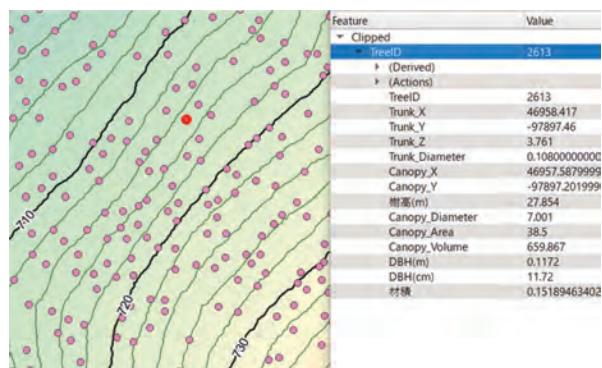


図4 得られる単木情報の照会  
(DBH:胸高直径、樹高、材積など)

#### 3-1. 単木形状解析

UAV により得られる幹の情報は限定的で、地上レーザ計測ほど密な点群が得られない。そのため、幹の抽出や直径の算出のためにいくつかの要素を用いた独自のアルゴリズムを開発し、単木情報の抽出を可能とした。

UAV 計測で得た単木点群の解析を行う際、幹の太さに関するデータが取得できない場合には、幹の太さデータが取得できた周辺樹木の幹の太さとその他のデータ(樹冠高さ、密度、地形など)との関係性を示す蓄積データなどを用いて機械学習モデルで幹の太さを推定し、森林の幹データを補完する。

#### 3-2. 樹種解析

森林の価値を見定めるための重要な要素の一つに樹種がある。これは、樹種により市場木材単価が異なるためである。

そこで、レーザ計測と同時に取得している画像を用いて、国内で最もポピュラーな木材である杉と檜を AI で判別する手法にも対応した。

#### 3-3. 森林状況診断

森林には樹木以外にも、笹やシダ類をはじめとする下層植生が存在している。これらは、生物多様性の醸成をはじめ、表土の流出や土砂災害防止などに重要な働きを持つため、その繁茂状態を把握する意義は非常に大きい。そこで、地上から任意の

高さごとに区切った点群をヒストグラムとし、その分布を分析することでその森林の状況を把握する手法を開発している。

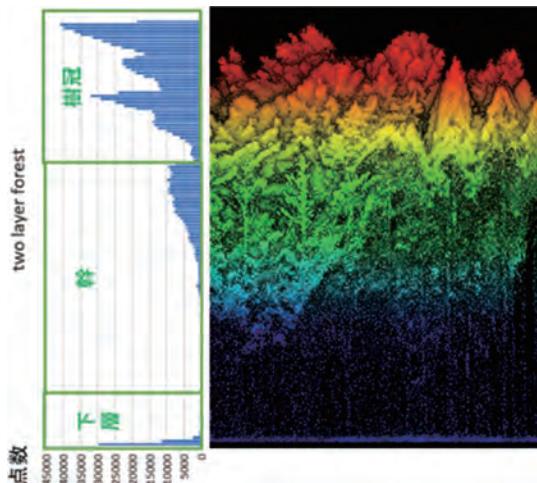


図5 高さごとの森林点群データ分布

森林状況判断への活用例：

- 樹冠に対する幹や下層の点群割合が所定以下の場合、多くの光が樹冠にさえぎられてしまう状態といえる。そのようなエリアは、林内の下層植生の生育に必要な太陽光が十分に届かず、間伐が必要な過密林分と推定できる。
- 地面付近の点群割合を用いて木の根元付近に生えている草など下層植生の繁茂状況を定量化する。
- 複数のデータセットを教師データとして用い、機械学習によりモデルを作成し、森林状態の推定に利用する。

また、樹冠のデータが点群全体の70～95%程度と、地面や幹などの情報より極端に多くなってしまい、データ処理に多くのコンピューティングパワーと時間を要する課題が見えたため、樹冠のデータのみを用いて解析時の効率を上げる手法も開発中である。

## 4 計測・解析結果を簡便に活用いただくUIの開発

航空レーザを用いた森林資源の計測サービスの結果を可視化・活用するためのツールとしては、非常に豊富な機能を有した複数のツール（地理情報システム）が市場に存在している。ただし、これらは多機能かつ専門的であるがゆえに経験の浅い顧客にとっては親しみにくく、データ処理能力の高い専用PCが必要になるなどの理由から、折角の計測・解析結果を活用しきれない事例が散見される。そこで、当社が持つ計測・解析技術を活かして得られた結果を、多くの顧客が簡便かつ直感的に活

用可能にすることを目指したクラウドシステム（YFMS: Yamaha motor Forest Management System）を開発している。既存の地理情報システムを追走するのではなく、当社の特長を活かして森林の詳細な現状把握とデータに基づいた施業計画立案、さらには現場での施業実施に役立てる機能に絞り込んで実装する方針であり、当社の森林計測サービスの顧客のみを対象に提供していく。

本稿執筆現在、第一段階の開発を終え、機能限定ではあるものの複数の先行顧客を対象にした試行運用を開始している。「こんな機能があったらさらに良くなる」という顧客の声を基にした機能追加・改良を継続することによって顧客からの信頼と親しみを醸成し、リピーター獲得に繋げていく。

表2 YFMS 開発状況概要

段階	目的	補足説明	提供時期
1	森林の現状把握に役立つ	固定の報告書から多面的に活用できる情報へ（立木検索、林内断面図）	2021年6月～
2	森林の施業計画立案に役立つ	経験値に基づく計画立案から共有情報を活用した計画立案へ（施業計画立案、施業状況把握）	2022年4月以降
	森林現場での施業実施に役立つ	実施するだけの施業から情報蓄積・活用に繋がる施業へ（施業計画参照、施業実績報告）	

## 5 おわりに

従来は、森林簿の情報やプロット調査と呼ばれる10m × 10m程度の代表エリアの地上調査単木情報により、1ha（100m × 100m）の森林状況を推測していた。これは前述の地上調査に対する物理的な制限ゆえの手法であり、現場はその情報に頼らざるを得ないという現実がある。それに対し、全域データを単木レベルで解析した精度の高い情報は、今後の森林整備への新たなソリューションになりえる。

前述の技術を高めていくことにより、国内はもとより、世界中の森林整備に役立てていきたい。

### ■参考文献

- [1] 星川 健史ほか: UAV-LiDARにおける樹冠の計測効率の定量化、日本写真測量学会、令和3年度年次学術講演会、39-40.

■著者



矢嶋 準

Jun Yajima

ソリューション事業本部  
UMS 事業推進部  
事業開発部



サンペイイ

Peii Tzaan

ソリューション事業本部  
UMS 事業推進部  
事業開発部



原田 丈也

Takeya Harada

ソリューション事業本部  
UMS 事業推進部  
事業開発部

■映像ライブラリー

森林計測サービス

[https://global.yamaha-motor.com/jp/design\\_technology/  
technical/library/mov/56gs06.html](https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/library/mov/56gs06.html)



## ダイナミックマップ2.0を活用した自動運転車両に対するインフラ情報配信システム

Digital transport infrastructure systems for automated driving systems using Dynamic Map 2.0

今 健人 渡辺 仁

## Abstract

In this technical paper, we introduce Digital Transport Infrastructure (DTI) systems using the Dynamic Map2.0 (DM2.0), which is being developed by Nagoya University. These systems supports low-speed automated driving systems by providing other road user information and traffic signal information.

Yamaha Motor is working on research and development of low-speed automated driving systems based on golf carts and control servers for centralized fleet management. The future aim is to provide mobility services for the public, covering a radius of several kilometers in depopulated areas, urban areas or resorts.

As there are always other road users and no dedicated roads available, multiple vehicles can be arbitrated by the control server, making smoother operations at intersections or junctions are possible. In environments where other vehicles that cannot be managed by the control server are running, it is effective to use DTI at such as intersections with poor visibility that are difficult to detect using onboard sensors alone. DTI supports are also effective even at intersections with obscure traffic signals.

## 1 はじめに

ヤマハ発動機(以下、当社)では電磁誘導式の自動運転ゴルフカーを1996年より発売している<sup>[1]</sup>。近年ゴルフカー(以下、ゴルフ場以外での活用のためランドカーと表記する)は生活圏内の短距離移動手段一ワンマイルモビリティとして注目を集めている。

当社はランドカーによる移動を社会実装できるよう、数々の実証実験を行ってきた。2002年のオランダ国際花博会場内シャトルサービス、2013年の千葉県柏の葉におけるオンデマンド型水平エレベータコンセプト、2014年には公道走行用の改良を加えたランドカーについて、電動小型低速車両としてナンバー取得が認められた。これによりランドカーの公道走行が可能となった。

そして2016年には公道における国内初の電磁誘導式自動運転の実証実験が石川県輪島市で開始された。続く2017年には経済産業省の端末交通システム実証事業<sup>[2]</sup>、国土交通省の中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービス事業に参加協力している<sup>[3]</sup>。2021年3月には、経済産業省の端末交通システム実証事業の成果として、国内初のドライバが乗車していない、遠隔監視・操作型のレベル3自動運転車両の認可を受けることができた<sup>[4]</sup>。さらに現在開発中のレベル4の自動運転システムはドライバが不要であるため、運用上はコストメリットがあり、社会普及促進の可能性が大きい。

また、先進的な自動運転技術やコネクテッドを活用した新し

い自動運転システムの開発<sup>[5]</sup>も進めている。ランドカーは低速で時間あたりの移動距離が制限されることから、数キロ四方程度の限定地域で複数の低速自動走行車両を管制システムによりオンデマンドで配車する「ラストマイルの移動サービスシステム」がサービスモデルとして適している<sup>[6]</sup>。

一般的な自動運転では、高度なシステム技術、社会全体のインフラ整備、法律など社会制度の変革、ユーザの心理的受容性への配慮など、大きな課題が山積している。しかし、低速で限定地域内の運用であれば走行環境条件が限定されるため技術的に必要な要件を見積もりやすく、運用方法によっては早期の実用化が期待できる。一方各地での実証実験の結果、車両のセンサのみではドライバレスの運用が難しいことが確認された。特に、車両センサで検知が難しい、見通しの悪い交差点での他車両の検知や、信号機の情報は通信可能な路側機などのデジタル交通インフラ(Digital Transport Infrastructure: DTI)からの支援が必要になる。自動運転管制システム配下の車両については各車両の状態を把握できるので、交差点等での調停が可能であるが、一般公道などの混在環境では車両のセンサ検知範囲外の他の道路使用者の位置などの状態を把握することができないため、調停機能を活用するのは難しい。また、交通信号機についても車載センサのみでは、天候などの影響を受け状態の把握が難しい場面が存在している。これらの課題に対して、DTIと自動運転管制システムの連携機能を構築することにより、自動運転システムの高度化を実現することができる。

本稿では、名古屋大学を中心にして開発が進められているDynamic Map 2.0(以下DM2.0)を使用し、路側センサによる他の交通参加者の検知や信号機情報の車両への配信について、基礎的なシステムを開発したので紹介する。

## 2 自動運転管制システム

### 2-1. 概要

本システムは、図1のように複数の低速自動走行車両と、それらを集中制御する管制システムによって構成されている。今回、インフラ連携システムを構築するにあたり、配車サービスを実現している管制システム構成<sup>[7]</sup>にDM2.0プラットフォーム(以下DM2.0PF)をインストールしたサーバを追加して路側機からの情報を処理している。

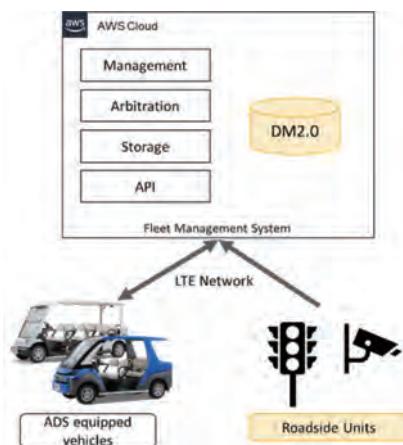


図1 自動運転管制システムの概念図

自動運転車両には自己位置推定などの基本的な自動走行機能が搭載されており、それらの演算結果がLTEを介してクラウドサーバ上に構築された管制システムに送信される。路側機からは信号機情報や道路上に存在する移動物の位置や状態に関する情報(物標情報)がLTEを介して管制システムに送信される。管制システムは車両や路側機の情報をもとに調停を行い、車両に対して制御情報を送信する。

### 2-2. 管制システムによる調停

管制システムは管理下の自動運転車両を制御しているため、交差点での調停が可能である。先に交差点に近づいている車両や優先度の高い車両を先に通過させ、他の車両の交差点への進入を排他制御で防いでいる(図2)。

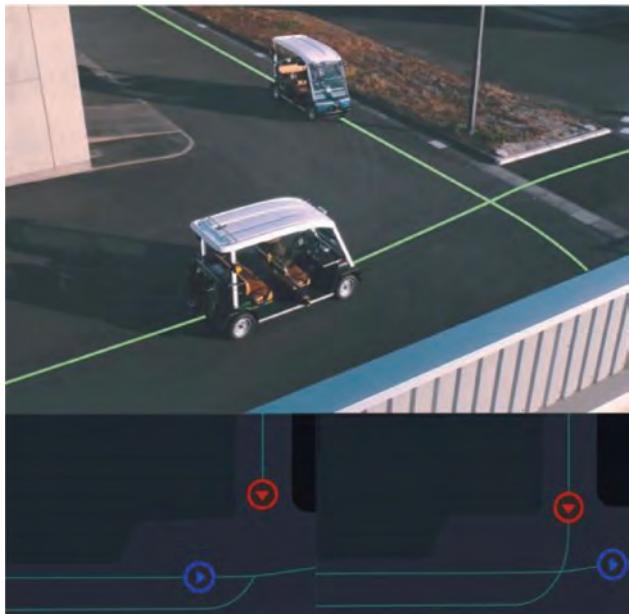


図2 管制システムによる交差点調停

しかし、他の道路使用者がいる環境では管制システムは他の歩行者や車両を検知できないため、車両は自立センサのみによりそれらを検知し走行する必要がある。特に図3のような見通しの悪い交差点では自立センサによる他車両の検知が難しく、現状ではドライバーの介入が必要になっている。



図3 見通しの悪い交差点

ドライバーの介入を不要にするためには、路側カメラと物体の認識、および、その情報を車両に配信する通信などのDTIによる支援が必要である。

## 3 Dynamic Map 2.0 (DM2.0)

### 3-1. 概要

名古屋大学のDM2.0コンソーシアムでは、Dynamic Map(図4)の概念に基づき高精度道路地図とセンサ情報を収集、統合、検索などが可能なデータ管理のシステム開発をしてき

た<sup>[8]</sup>。これは、データをクラウドに一括管理するものではなく、処理負荷の分散や通信遅延の解消を狙い、一極集中をやめ、車載組込みシステムや道路インフラのエッジと連携し、クラウド環境の複数サーバで並列動作などといった柔軟なデータ処理と通信の仕組みを実現するものである。

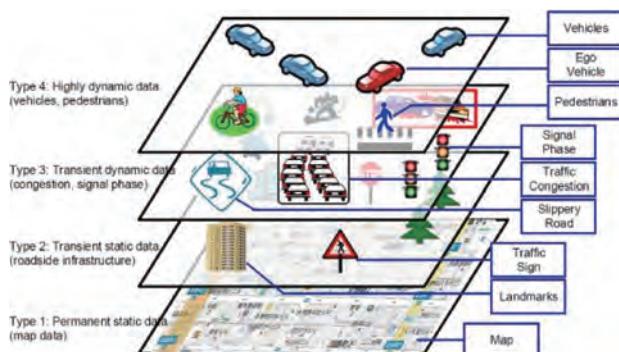


図4 Dynamic Map の構成<sup>[8]</sup>

クラウド、エッジ、車載組込みシステムをカバーするソフトウェアプラットホームの研究開発は、具体的には、①分散データ処理機構を備えたデータストリーム管理システム(DSMS)の設計と実装、②静的、準静的、準動的、動的情報のデータ定義、③通信方式の検討と評価、④Dynamic Map の利便性を訴求するユースケースの検討と交通アプリケーションの試作、⑤Dynamic Map の実験評価を行っている。

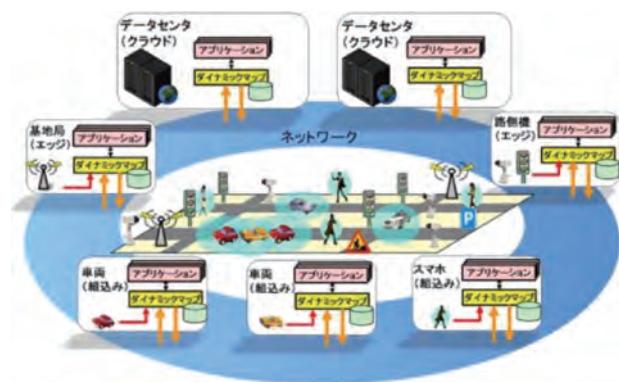


図5 Dynamic Map 2.0 コンセプト<sup>[8]</sup>

図5のように、クラウドサーバ、路側エッジや基地局エッジ、車両・スマホの組込みシステムに DM2.0PF を実装することで、データのやり取りが可能になる。

### 3-2. 動的データの取り扱い

DM2.0のデータの取り扱いは、信号データ、車両位置データなどの情報の種類が異なっても、共通のデータモデル、共通の

操作体系(クエリ言語)を使えるところが特徴である。

リレーションナルモデルを採用し、更新頻度が低いデータは従来のリレーションナルモデル(テーブル)として扱い、更新頻度の高い、動的情報や予測情報はリレーションナルモデルを時系列に拡張したストリーム形式で取り扱う。

ストリームでは、各行で Timestamp の情報を持ち、新規のデータは末尾に追加されていく。例として、車両情報のストリームを図6に示す。車両情報は自動運転ソフトウェアからアップロードされている想定である。

位置情報						
データ生成時刻	車両ID	X座標	Y座標	速度	現在のレーンID	...
Timestamp	id	pos_x	pos_y	velocity	lane_id	...
12:01:00	0	0.1	10.0	19	101	...
12:01:00	1	10.0	2.5	40	202	...
12:01:01	0	0.1	15.0	19	101	...
12:01:01	1	14.0	5.0	40	202	...
12:01:01	2	30.0	5.0	0	303	...

図6 車両の動的情報ストリーム例

データベースからデータを取り出すクエリにはワンショットクエリと継続クエリが用意されている。ワンショットクエリは同期で1度だけ取得するクエリで静的情報を検索する機能である。また、継続クエリは事前にクエリを登録し、特定のイベント発生や条件に合うデータが発生する度に非同期に結果を取得する、動的または静的情報に対する検索機能である。

今回、DM2.0PF 上で DTI 情報を動的情報ストリームとして扱うことで、車両が他の道路使用者を検知した情報と信号機の情報をネットワークを介して体系的に取得することが可能になった。

## 4 信号機情報の配信

信号機情報は図7のように、(i)車載されたカメラ、(ii)路側機に取り付けられたカメラ、(iii)信号制御機などから得ることができる。(i)の場合は画像情報を車両のコントローラに入力、画像分析を行い信号機情報にする。(ii)の画像は路側機端末内部で分析し、信号灯火色情報としてクラウド上の DM2.0PF に送信する。(iii)の場合は画像分析は不要で制御機の信号情報を DM2.0 に送信する。

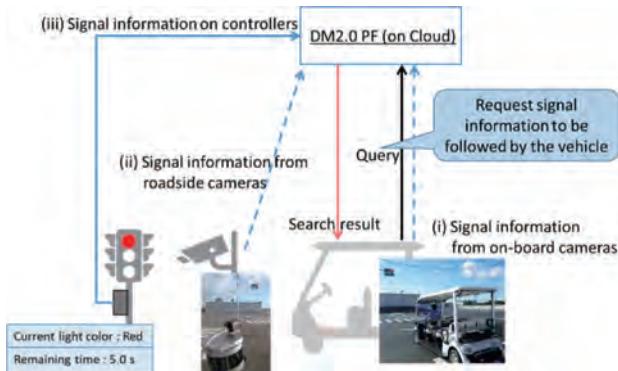


図7 信号機情報の取得と送信

しかし、車載カメラのみでは複数の信号灯火機が映っている場合など、自車が従うべき信号機の判別が難しい場合がある。そのため、並行して DTI により支援することが望ましい。特に、信号制御機からの情報は画像処理が不要であり、また、この先どのように信号が変わっていくかといった灯火制御情報の先読みが可能になるため、車両制御に活用する上でメリットがある。

今回は信号制御機の導入の前に、図8のように信号制御機を模擬したエミュレータを Raspberry Pi で作成し、DM2.0PF を使ったシステムを作成した。

このシステムにより、エッジで取得された信号制御機の情報を DM2.0PF を使いクラウド上の DM2.0 サーバに疑似的に収集することができる。図9のように DM2.0PF を介して車両に搭載した自動運転ソフトウェアの Autoware に対して信号機情報を配信することで(a)のように赤信号情報を配信して車両を停車させたり、(b)のように青信号情報を配信して車両を発進させたりするなどの車両の制御が可能になった。

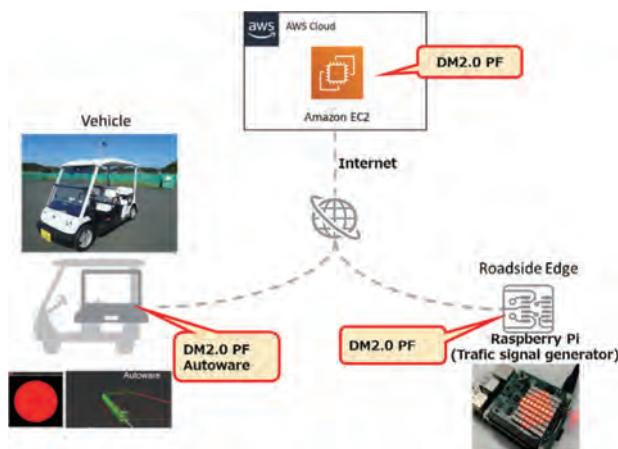


図8 信号機情報の取得・配信システム

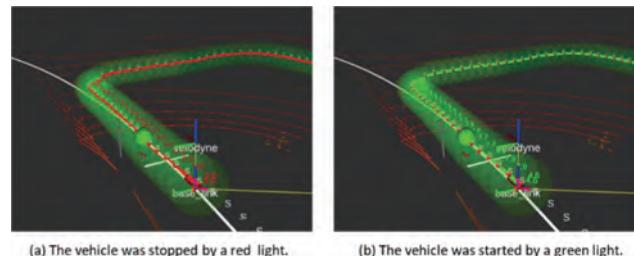


図9 自動運転車両への信号機情報配信

## 5 物標情報の配信

見通しの悪い交差点では、車載センサだけでは他の道路使用者が検知できない場合がある。その際に路側センサにより物標情報が取得できれば交差点をスムーズに通過することが可能になる。

今回は路側センサにカメラと LiDAR を使用した。カメラは物体が歩行者であるか自転車であるか車両であるかを分類するために必要で、LiDAR はその物体までの距離を測るために必要である。カメラと LiDAR はキャリブレーションにより、対象物検知の位置ずれが無いように調整している。DM2.0PF を使用したシステム構成を図10に示す。

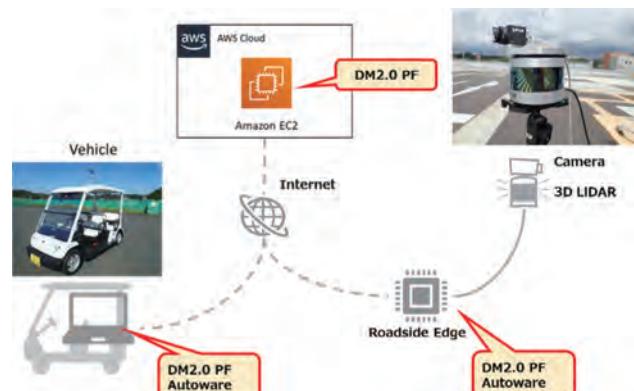


図10 路側センサ物標情報取得・配信システム

このシステムでは、路側センサにより取得された画像を、LiDAR データをエッジに実装した Autoware の障害物検知機能により分析し、物標情報を DM2.0PF に格納し、そこから車両に送信している。

検知された物標情報と車両に送られた情報を表示した様子を図11に示す。路側機のセンサで捉えた物標情報はクラウド上の DM2.0PF に送信される。クラウド上では DM2.0PF の情報を基にデータフュージョンを行い、静的情報(高精度地図)と動的情報(物標情報)を組づけて管理している。車両はクラウド上の DM2.0PF に対して横断歩道付近の物標情報を取得する継続クエリを発行し、検索結果として物標情報を受け取る。

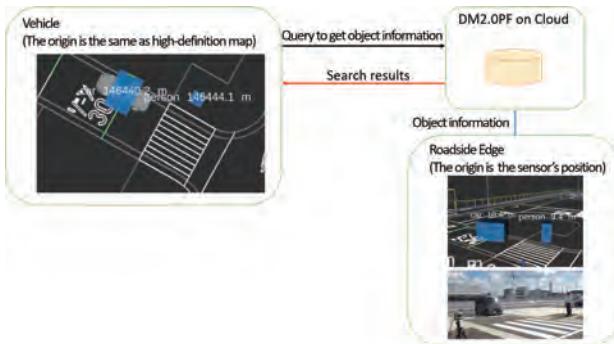


図11 DM2.0を介した物標情報配信例

## 6 まとめ

本開発では、低速自動走行による移動サービスシステムへのDM2.0を利用したインフラ支援(DTI)の例について、信号機情報の配信と路側センサによる物標情報配信システムを構築した。それにより、DTIの情報を自動運転制御に活用することで高度な自動運転システムを構築することが可能になった。

今後、信号機情報については当社内の市街地を想定したテストコースに設置された信号制御機からDM2.0のクラウドサーバへデータを送信するシステムを作成する。また、路側センサによる物標情報配信については、現行のLiDARとカメラを組み合わせたセンサから、より低成本で普及できるセンサへ切り替えるため、センサの調査を行う。一つの可能性として、高精細なLiDARだけでも障害物の分類が可能なシステムも検討に入れる。

またDTIの場合、路側機での計算処理遅延や路側機ークラウド間、車両ークラウド間の通信遅延などが課題になる。信号機情報配信の場合は現灯火色の残存時間や灯火色テーブルの共有などにより遅延を吸収する必要がある。物標情報配信の場合、複数のセンサの検知情報を集中的に管理し、各物標情報の整合性を取ることで各センサの処理や通信遅延を吸収するようなシステムが考えられる。いずれの場合もそれぞれの機器の時刻同期手法は深く検討する必要がある。

レベル4のドライバレスの自動運転には配車、車両管理などサービス面からも管制システムは必要であり、DTIによる支援が実装しやすいシステムである。また、ドライバレスのシステムの実現にはDTIによる支援が必須であり、今後はこの領域の研究開発を加速していく。

## ■謝辞

本システムの開発にあたり、名古屋大学の高田広章教授、渡邊陽介准教授、同志社大学の佐藤健哉教授をはじめDM2.0コンソーシアムのメンバー、および、株式会社NTTデータMSE

の水谷武彦氏、花井将臣氏に多大なご協力をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

## ■参考文献

- [1] ヤマハ発動機ホームページ「ゴルフカー電磁誘導式とは」, <https://www.yamaha-motor.co.jp/golfcar/technology/self-driving.html> (アクセス日 2021年7月31日)
- [2] 産業技術総合研究所:ラストマイル自動走行の実証評価(北谷町)を開始, [https://www.aist.go.jp/aist\\_j/news/pr20170627.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/news/pr20170627.html) (アクセス日 2021年7月31日)
- [3] 国土交通省:中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービス実証実験, <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/automated-driving-FOT/index.html>, (アクセス日 2021年7月31日)
- [4] 産業技術総合研究所:無人自動運転移動サービスが永平寺町で本格運用を開始, [https://www.aist.go.jp/aist\\_j/news/au20210323.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/news/au20210323.html) (アクセス日 2021年7月31日)
- [5] ITS WC 2018: AP-TP1313 Introduction of low-speed automated driving mobility-based service system(2018)
- [6] ITS WC 2019: AP-TP1739 Automated Driving Service Design for Low-Speed Mobility in Resort Facilities(2019)
- [7] 藤井 北斗、渡辺 仁:低速自動走行車両による移動サービスシステム技術紹介、ヤマハ発動機技報2017-12 No.53 (2017)
- [8] 名古屋大学:ダイナミックマップ2.0コンソーシアム, <https://www.nces.nagoya-u.ac.jp/dm2/index.html>, (アクセス日 2021年7月31日)

## ■著者



今 健人  
Kento Kon  
技術・研究本部  
研究開発統括部  
先進システム開発部



渡辺 仁  
Hitoshi Watanabe  
技術・研究本部  
研究開発統括部  
先進システム開発部

# EVミニカートレースを通じた電動制御技術／ シミュレーション技術の向上

Electric control & simulation technology improvement through EV mini cart racing

鷹野 雅一 藤原 朝記 友岡 祐弥 白澤 樹 鈴木 聖也

## Abstract

Currently, the uptake of EV's (Electric Vehicles) is accelerating against the backdrop of an era aiming for a recycling and carbon-free based society.

In order to develop more competitive EV's, it is important to have electric control technology that can bring out the best performance from each component such as the motor and battery. It is also therefore necessary to combine each component and continue to progress with the development over shorter periods while improving total performance. For this purpose, simulation technology using model-based development/design (MBD) - which has been a great focus of attention mainly in the automobile industry in recent years - can be very effective.

In order to acquire and improve the electric control and simulation technology using MBD, the company participated in an EV minicar race, in which teams competed for a number of laps with a cart kit that is simpler compared to the commercially available passenger car type EV. The company was able to achieve an overall victory in a 2020 tournament.

In this article, we will introduce the work and results of the technology that led to this victory.

## 1 はじめに

現在、循環型社会、脱炭素社会を目指す時代の流れを背景にEV(Electric Vehicle)の普及が加速している。

競争力のあるEVを開発するためには、モータやバッテリなどのコンポーネント単位で最高のパフォーマンスを引き出せる電動制御技術が重要である。また、各コンポーネントを結合し、トータルパフォーマンスを向上させながら短期間で開発を進めることも必要である。それには、近年、自動車業界を中心に注目されているモデルベース開発(MBD:Model Based Development/Design)を用いたシミュレーション技術が有効である。

当社では、電動制御技術とMBDを用いたシミュレーション技術を獲得・向上するために、市販の乗用車型EVに比べてシンプルなカートキットで周回数を競うEVミニカートレースに参戦した。そして、2020年の大会で優勝を達成することができた。

本稿では優勝に至った技術への取り組みと結果について紹介する。

## 2 EVミニカートレース

EVミニカートレースとは、CQ出版社主催で開催されている大会である。このレースは、『同一仕様のモータ、車体、電池を用い、モータ設計技術、制御技術の違いにより、30分間の走行距離を競う』というものであり、シンプルな構造のカートキットを使ったワンメイクレースである。

表1に競技ルールのポイント、図1にEVミニカート車両のシステム構成を示す。

表1 競技ルールのポイント

(1)バッテリ	完全密閉型鉛バッテリ 個数:2個以内 重量制限:3.0kg 以下／個
(2)モータ	CQ出版社提供のモータキット、ケース変更不可、銅線の巻き方・線径は規定なし
(3)モータコントローラ	規定なし
(4)駆動・タイヤ	減速比:変更可能、タイヤ:変更可能 ※リムの変更禁止
(5)車体	CQ出版社提供のカートキットとする 機構的／構造的改造禁止

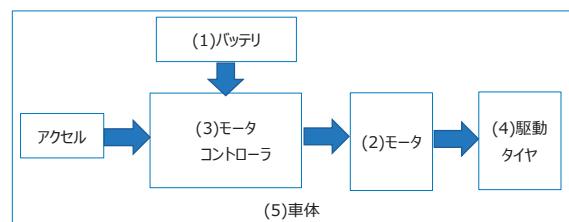


図1 システム構成

優勝のための目標周回数は、2018年大会<sup>1)</sup>の優勝チーム周回数が約8周だったため、9周と設定した。

1) 2019年ではなく2018年を目標対象にした理由は、2019年大会はカウルあり、2018年と2020年はカウルなしと競技ルールが異なるためである。

### 3 各コンポーネント

目標周回数を達成するために、大小様々な工夫をこらしたが、ここでは、主なものであるバッテリのセッティング、モータ仕様の選定、モータコントローラ(モータ制御)について述べる。

#### 3-1. バッテリのセッティング

鉛バッテリは40°C前後で最も効率的に充電できる。そこで、バッテリ全体を発泡断熱材で囲って保温し、充電による自己発熱の温度上昇を利用して40°C前後に維持することで、より多くの充電ができるようにした。図2に鉛バッテリの充電方法の違いによる充電量を示す。保温充電により12Wh(27%)の充電量増加を実現した。

充電方法	充電量	①-②
①保温充電	約 56 [Wh]	
②室温充電	約 44 [Wh]	12[Wh]

図2 鉛バッテリの充電方法による違い

#### 3-2. モータ仕様の選定

モータには、負荷トルクが大きくなると回転数が下がる基本的な特性がある。レースに勝つためには、「コースの最大傾斜を上りきれるトルク」と「最高速を出せる回転数」を両立させるモータパラメータ(モータ径、モータ長、磁石、巻き線の太さ、巻き数、巻き方など)を見つけ出す必要がある。しかも、限られたバッテリ充電量(電流消費)で、30分間走りきらなければならぬ。

図3にモータの概要を示す。競技ルールでは、巻き線の太さ、巻き数、巻き方が変更可能であるが、組み合わせは数十通りにも上る。実モータをいくつも作り、最適な組み合わせを見つけるには多大な時間とコストを要する。そこで、電磁解析ソフトJMAG<sup>2)</sup>を用いたシミュレーションにより、考えられる巻き線の太さ、巻き数、巻き方の組合せ44種類をシミュレーションし、目標回転数(速度)が達成できる8種類にモータ仕様に絞った。8種類の中から、最高速と駆動力が高く、かつ巻き線の太さと巻き数が手巻きで自作することが可能な2つの候補に絞り込んだ。この2つの候補は、トルク重視の組み合わせ①と回転数重視の組み合わせ②となった。

2) JMAG は株式会社 JSOL の商標

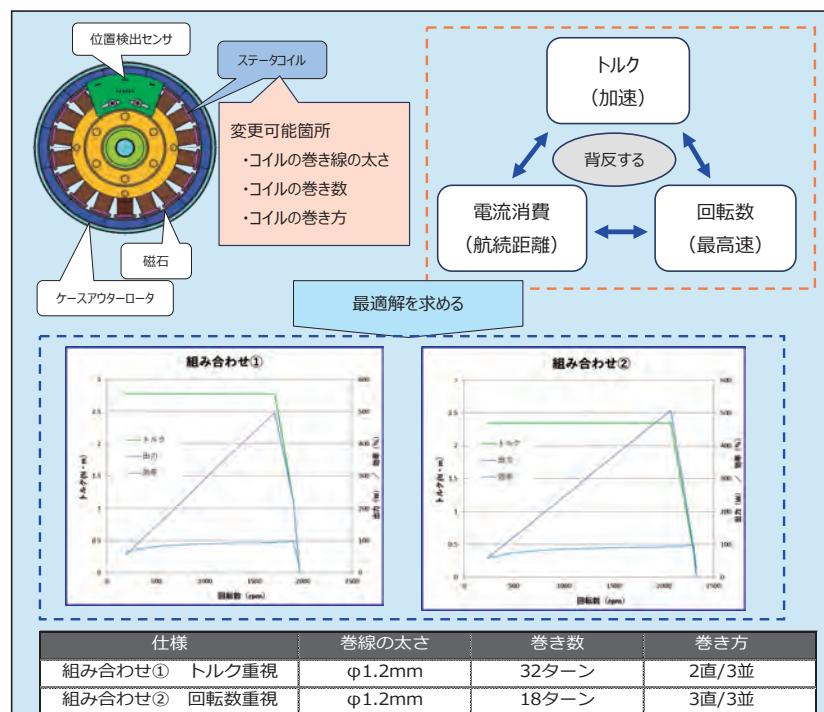


図3 モータの概要

### 3-3. モータコントローラ(モータ制御)

モータ制御は、モータ通電方式の違いによって効率が異なる。120°通電、180°通電というモータ通電方式は、当社として実績があるが、より効率の良い制御方式を探していたところ、150°通電方式<sup>[1]</sup>を見つけた。当社としては、新たな取り組みになるが、この方式にチャレンジすることにした。また、追い越しなどの一時的な加速のために、進角制御を織り込んだ。この制御は、ドライバーの手元のスイッチでON/OFFすることで、作動／停止できるようになっている。

## 4 MBDを用いたレースシミュレーション

30分間での周回数をシミュレーションするために、図4のようなレースシミュレーションモデルを構築した。以降でこれらのモデルひとつひとつについて説明する。

### 4-1. モータモデル

モータモデルは、車両速度とバッテリ電圧を入力とし、モータで消費される電流とトルクを出力とした。モータで消費される電流は、モータの回転により発生する起電圧とバッテリ電圧の電位差により決定される。トルクはモータで消費される電流により算出される。そのため、モータモデルは「回転数とバッテリ電圧に応じた電流テーブル」と「回転数とバッテリ電圧に応じたトルクテーブル」からモデル化した。

図5にモータモデル化の流れを示す。モータはJMAGの解析結果をもとに製作したが、手巻きで自作しているため、解析結果と実機において性能に差異がある。そのため、モータベンチにて手巻きモータの性能測定を行い、測定結果をモデルに反映した。

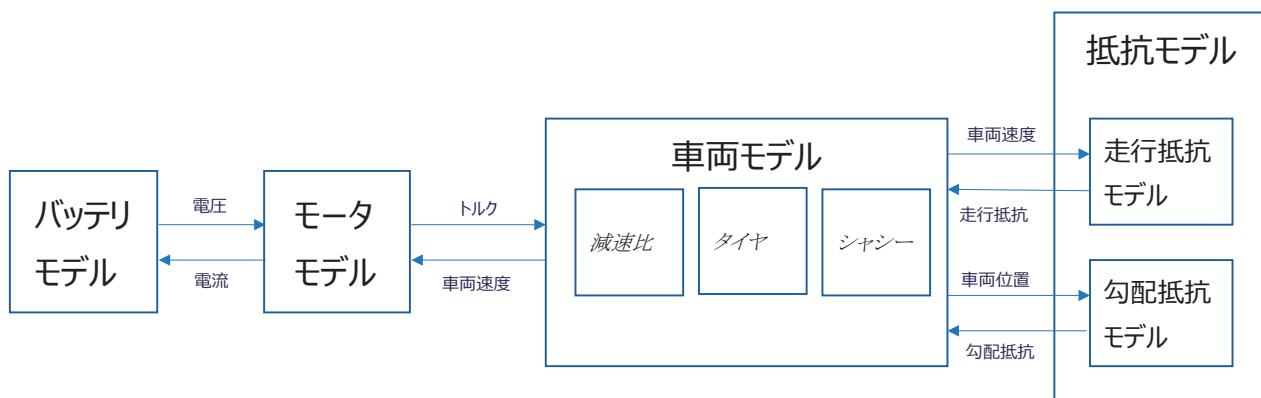


図4 レースシミュレーションモデル

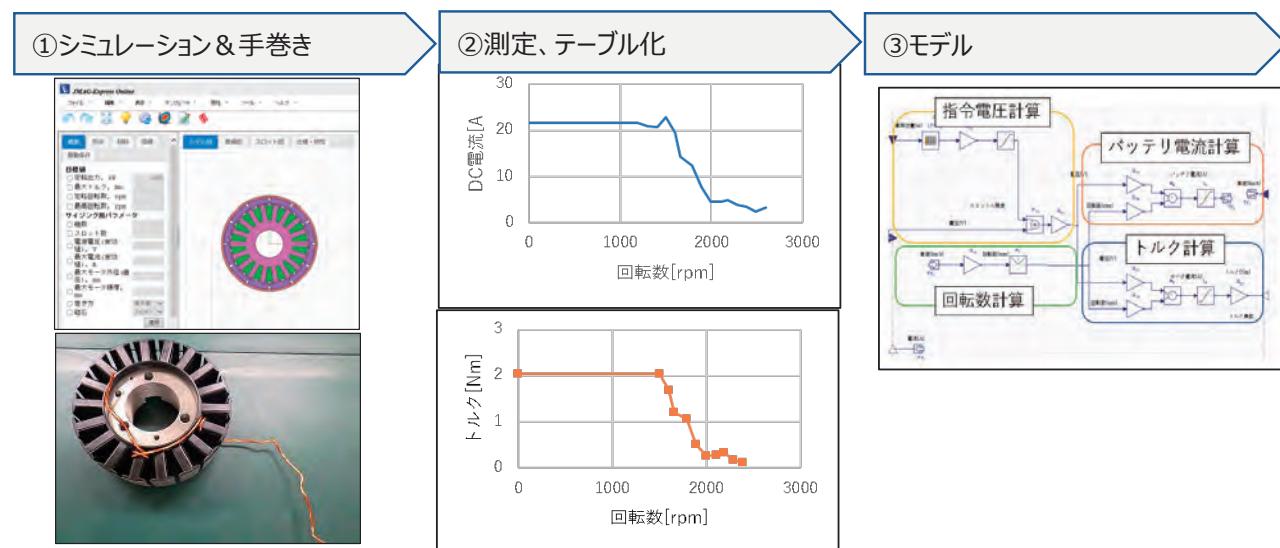


図5 モータモデル化の流れ

#### 4-2. バッテリモデル

バッテリモデルは、モータで消費される電流を入力とし、バッテリ電圧を出力とした。図6にバッテリモデル化の流れを示す。バッテリモデルは、「SOC<sup>3)</sup>とOCV<sup>4)</sup>のテーブル」と「通電時の電圧降下」からモデル化した。なお、「SOCとOCVのテーブル」と「通電時の電圧降下」は、実測して作成した。

3) SOC(State Of Charge)は、充電率または充電状態を表す指標

4) OCV(Open Circuit Voltage)は、バッテリの開放端子電圧

#### 4-3. 車両モデル

車両モデルは、モータからの駆動力と走行抵抗を入力とし、車両速度と位置を出力とした。車両モデルは、ホイールベース、車両重量、車両重心、タイヤ重心、タイヤ慣性モーメントを実測し、モデルに反映した。

#### 4-4. 抵抗モデル

車両の走行に伴い発生する主要な抵抗は、下記の2つが挙

げられる。

- ・ 走行抵抗(空気抵抗、転がり抵抗)
- ・ 勾配抵抗

これらのモデルについて下記に述べる。

##### (1) 走行抵抗モデル

走行抵抗モデルは、車両速度を入力とし、走行抵抗を出力とした。走行抵抗は、転がり抵抗と、空気抵抗により表現される。転がり抵抗は、タイヤの変形によるエネルギー損失であり、慣行法により測定した。空気抵抗は、空気と車体表面との摩擦による損失であり、空力解析により算出するこれらの結果をモデルに反映した。

ここで、縦列走行について述べる。縦列走行とは、空気抵抗は前走車よりも後走車のほうが小さくなるという効果を利用した走行方法である。図7に縦列走行時の空力解析結果を示す。このように前走車よりも後走車のほうが、空気抵抗が60%小さくなることが確認できたので、パラメータとしてモデルに実装した。

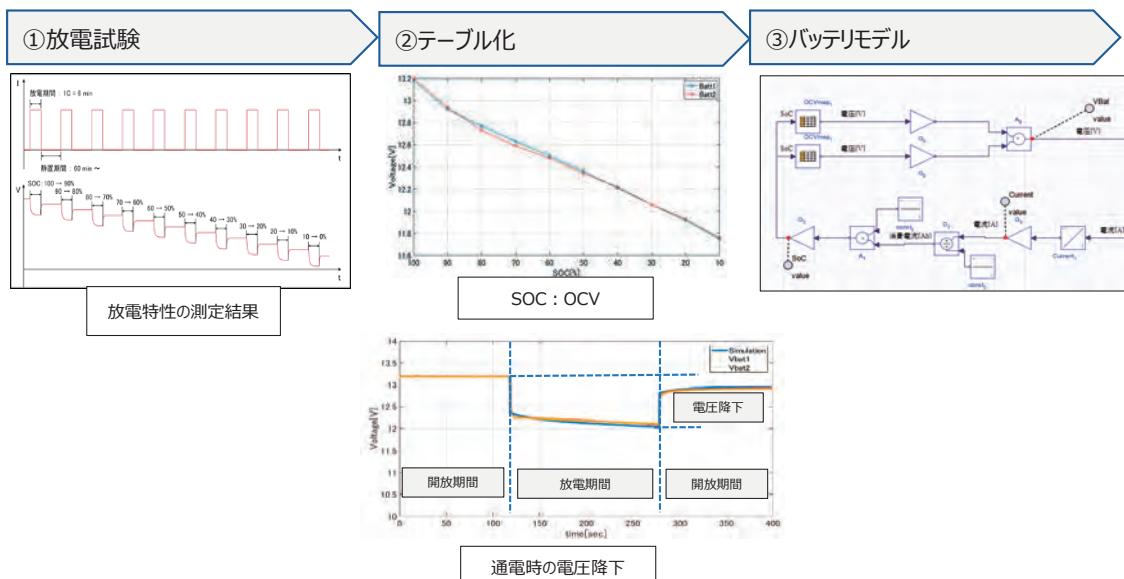


図6 バッテリモデル化の流れ

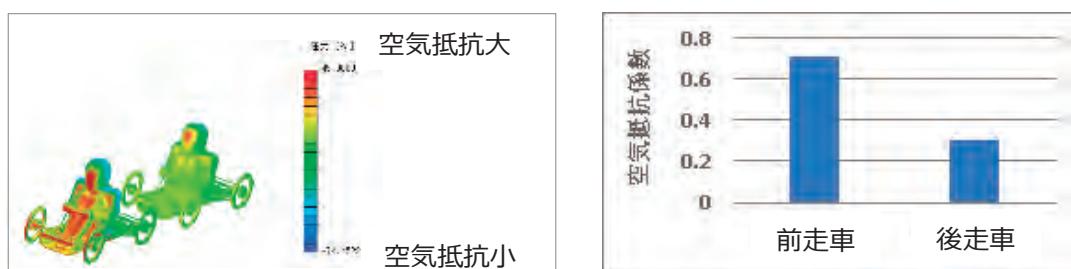


図7 空気抵抗結果

## (2) 勾配抵抗モデル

勾配抵抗モデルは、車両位置を入力とし、勾配抵抗を出力とした。勾配抵抗は、坂道を走行する際に発生し、主として車両重量と勾配に比例する損失である。図8にモデル化の流れを示す。地形データに走行経路を描画し、走行位置毎の標高を算出し、この結果をモデルに反映した。

### 4-5. レースシミュレーションモデル

レースシミュレーションモデルは、前述4-1～4-4の各モデル

を結合したものであり、モータのパラメータ（巻き線の太さ、巻き数、巻き方）を変えることで、周回数をシミュレーションするものである。JMAGで選定した2つのモータパラメータ（回転数重視・トルク重視）を、レースシミュレーションしたところ、どちらも、図9の「30分走ったが、周回数が足りなかった仕様」や「途中で止まった仕様」のグラフのようにはならず、大差なく9周走り切れることがわかった。

そこで、モータの作りやすさより、表2に示す回転数重視となるパラメータとした。



図8 勾配抵抗モデル化の流れ

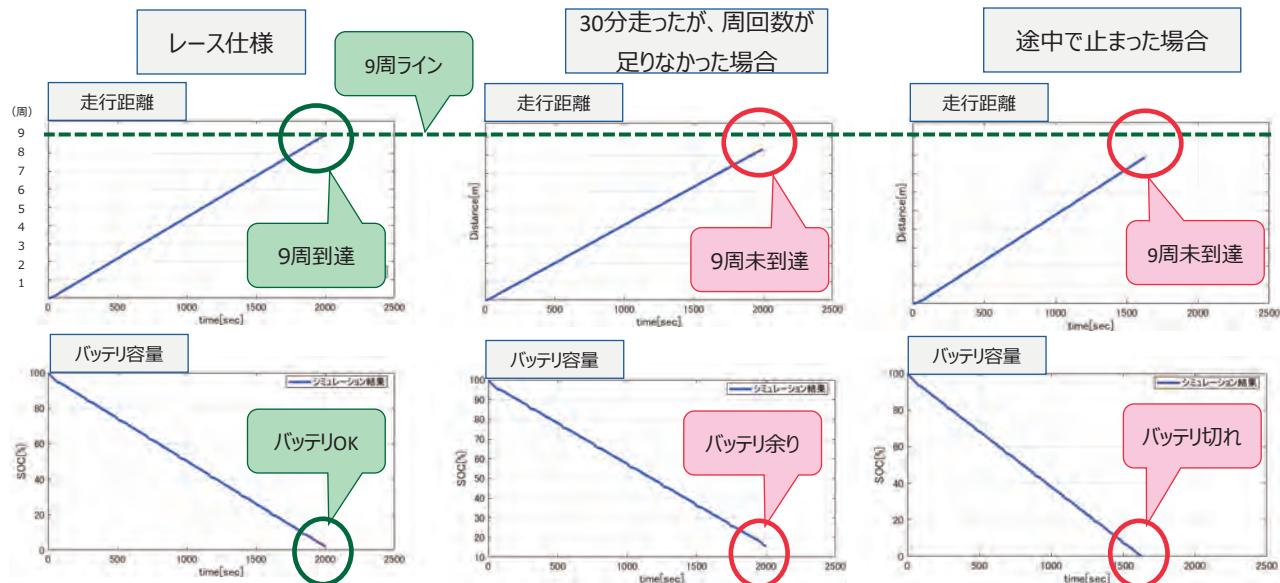


図9 統合シミュレーション結果

表2 選定したモータのパラメータ

巻き線の太さ	巻き数	巻き方
Φ 1.2mm	18ターン	3直2並列

## 5 レース結果

表3にレース結果を示す。レースシミュレーション通りの周回数9周を達成し、総合優勝を果たすことができた。

表3 レース結果

チーム	周回数	1位との差
1位 ヤマハモーターエンジニアリング ①	9	—
2位 ヤマハモーターエンジニアリング ②	9	0分00秒037
3位 他チーム ①	9	2分03秒538
4位 他チーム ②	8	1LAP

※同一周回数の場合、先にゴールラインを通過したチームが先着となる

図10に実走行データとレースシミュレーション結果の比較を示す。このグラフからレース終了時の周回数、およびバッテリ放電率が、実走行データとシミュレーションが同等であることが分かる。これにより、シミュレーションの有効性が確認できた。

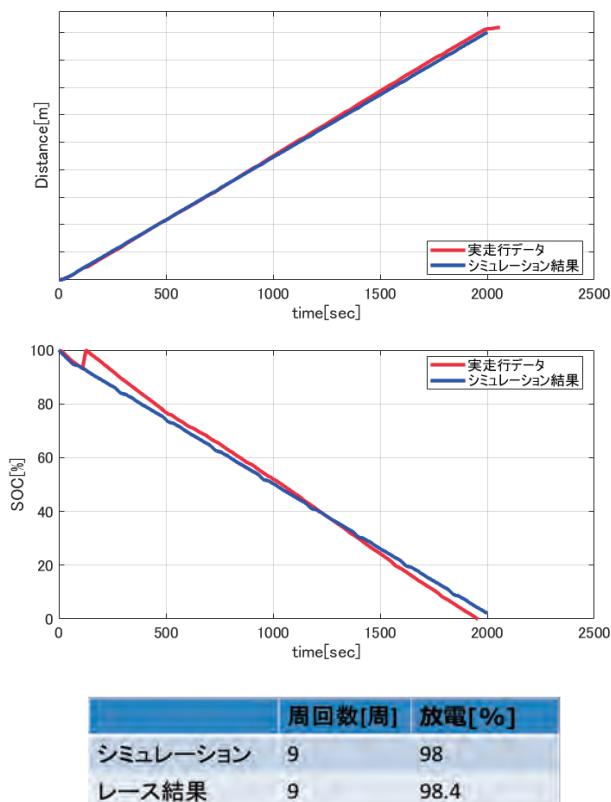


図10 実走行データとレースシミュレーション結果の比較

## 6 おわりに

EVミニカートレースに参戦し、各コンポーネントのセッティングおよびモデルを活用したレースシミュレーションにより総合優勝することができた。ワンメークレースで優勝できたことで、我々は、「同じコンポーネントを使用したとしてもより高いパフォーマンスを引き出せる技術を保有している」と示すことができた。今後は、各コンポーネントの損失を低減できる制御技術や、より実測に近いシミュレーションを行える技術の獲得を目指して、さらなる技術向上に努めていく。

### ■参考文献

- [1] 野口俊介, 鈴木憲史, 百目鬼英雄：“方形波ブレシレスDCモータの通電角による効率比較”, 日本AEM学会誌 Vol 23, No. 2, pp. 276-281, (2015).

### ■著者



白澤 樹  
Tatsuru Shirasawa  
ヤマハモーター  
エンジニアリング株式会社  
モビリティシステム開発部



藤原 朝記  
Asaki Fujiwara  
ヤマハモーター  
エンジニアリング株式会社  
モビリティシステム開発部



友岡 祐弥  
Yuya Tomooka  
ヤマハモーター  
エンジニアリング株式会社  
モビリティシステム開発部



鷹野 雅一  
Masakazu Takano  
ヤマハモーター  
エンジニアリング株式会社  
モビリティシステム開発部



鈴木 聖也  
Masaya Suzuki  
ヤマハモーター  
エンジニアリング株式会社  
モビリティシステム開発部

## 要旨

マリン事業では、プレシャーボートをはじめ、スポーツボート、パーソナルウォータークラフト(以下、PWC)など、マリンレジャーを通してお客様に感動を提供できる製品を開発・製造・販売している。そのモデルラインナップの中でも特に愛好家のお客さまから根強い支持を得ているモデルがスタンドアップモデル(「SuperJet」)である。

30年以上愛され続けたヤマハ「SuperJet」が、2ストロークエンジンの排ガス規制で市場は限られ、このままでは販売継続が危ぶまれる中、三気筒4ストロークエンジンを搭載した待望のNEWモデルを生み出すために、三つの重要な課題【フルモデルチェンジ】【新工法導入】【新工場立ち上げ】と向き合い、試行錯誤しながら行った工法開発～生産準備での取り組みの概要を紹介する。

## Abstract

In the marine business, we develop, manufacture and sell products that can provide Kando to customers through marine leisure, such as pressure boats, sports boats, and personal watercraft (PWC). Among our model lineup, the stand-up model SuperJet has gained strong support from enthusiasts.

The Yamaha SuperJet, which has been popular for more than 30 years, has a limited market due to emission regulations placed on 2-stroke engines, and while the model's future sales may be in jeopardy, in order to create the long-awaited NEW model equipped with a 3-cylinder 4-stroke engine, we faced three important issues; a [full model change], [introduction of new production methods], and [the startup of new factories]. Here we introduce an outline of the initiatives used from production method development to production preparation that were all carried out through trial and error.

## 1 はじめに

### 1-1. 新工法導入に向けて

PWC 船体のモノ創りは大きくは3つ、大量生産向け SMC (Sheet Molding Compound) と少量向けコンベンショナルな HLU (Hand Lay-Up) と VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) に分類され、各工法の現在対象とする製品サイズと年間生産数のレンジは下図(図1)のようになっており、今回狙いとする中量生産モデルにはどの工法も適していなかった。

この中量生産の規模レンジとして年間2,000～4,000台を設定した。今後ヤマハボート(PWC)のモノ創りの強みとしたい領域であり、新たな領域へのチャレンジである。

### 1-2. 製造拠点再編に向けて

従来モデル「SuperJet」は、製造委託先(ミツワ株式会社、以下ミツワ(株))にて年間1,000台規模で HLU にて生産されているが、今回狙いとする生産規模(年間2,000台以上)を実現するには、図2のように生産体制から見直しが必要であった。

お客様からの期待と社内からの大きな声を受けて社内工場・外部生産委託の可能性検討、また製造経験者を社内から募ることから検討を開始した。

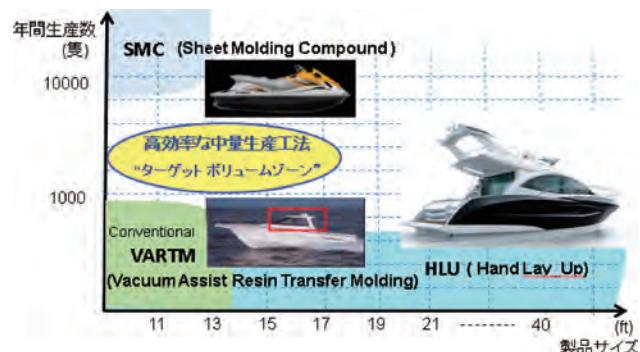


図1 新工法で狙うボリュームゾーン

### F 4 R 製造工程概要

#### 《従来モデル》

- 2st SJ (F4D)
  - ・製造工場：ミツワ(株)ホクト事業部 鹿田工場
  - ・日製台数：6～7船
  - ・契約：製造委託契約

#### 《新モデル》

- 4st SJ (F4R)
  - ・製造工場：ミツワ(株)ホクト事業部 萩井工場
  - ・日製台数：8船
  - ・契約：製造委託契約の継続

#### 生産準備のポイント



図2 製造工程の概要

## 2 新工法の導入

目指す新工法は、現 VARTM(注入成形)を中量生産向けに進化させた高効率 VARTM である。その対象が「SuperJet」(小型 PWC)ということもあり、運動性を際立たせる“軽量化”と“優美な外観キャラクター”の実現が求められ、また一方ではスポーティなライディングに適した“安定した強度”的確保が条件である。

その実現に向け、まず FRP (Fiber Reinforced Plastics) 業界で技術先進するヨーロッパ各国の技術が集結する「JEC Composites 展」にて、このクラスの FRP 製品を最も効率的に製造する技術ファクターを探り出し、先進技術メーカーと技術開発をスタートさせた。

新工法の量産化展開に向けた3つのキー要素2-1.「型製作プロセスの造り込み」、2-2.「成形工程の効率化」、2-3.「高い外観性と安定化」と2-4.「各プロセス効率化に向けた活動」に関し説明する。

### 2-1. 型製作プロセスの造り込み(高精度化と耐久性向上)

#### 2-1-1. 背景

従来 FRP 成形型は短期間・低成本で製作する目的で以下のようなステップで製作した。

- (1) オス型(マスター型)の製作(製品と同様の形状を発泡ウレタンや樹脂パテを使用して削り出す)
- (2) メス型の製作(製品に使用されるものとほぼ同様の FRP 材で成形され、金属フレーム等で剛性を補強したもの)
- (3) メス型を使用して製品を成形

今回のプロジェクトでは生産要求数に対応するため複数の型を製作する必要があり、メス型を製作するためのマスター型には複数回の脱型に耐えられる耐久性が求められる。したがって複数個製作が必要な FRP 製型作りはさらに以下の工程が追加される。

- (4) 耐久性を担保するため上記2のメス型を用いて FRP でオス型を再製作(ゼロマスターと呼ぶ)
- (5) 追加するメス型の複製(以降、4で製作したゼロマスターを使ってメス型を繰り返し製作)

ここで問題になるのが、FRP の収縮である。FRP は熱硬化性樹脂を使用するため硬化反応時に収縮するという特性がある。したがって、上記の型作りの場面で3回(オス型→メス型→ゼロマスター型→メス型)、製品の成形で1回、合計4回収縮が発生、同時に型や製品の形状についても収縮の影響を受け、

変形を起こすことが良くある。

以上により型の高精度化を達成するには「型づくり」工程から見直す必要があった。

また、型の耐久性において通常 FRP で成形するボートは年間最大100隻程度、型に求められる繰返しは500成形程度になる。一方、今回求められる耐久数は、1型あたり年間250隻程度、型に求められる繰り返しは1,000成形以上であった。

#### 2-1-2. 課題解決

##### 〈型 高精度化に向け〉

通常、製品を成形するまで3回型製作(反転)を繰り返し、これにより型精度(収縮により)が悪化し、型精度低下につながる。キャビ型(下型)とコア型(上型)を合わせて成形物を形成する VARTM 工法では、この型反転による精度低下がダイレクトに製品厚みに効いてしまう。

これをできる限り回避するため、型作り反転の回数を減らす手法として“エポキシマスターの製作”を採用した。

これは初ステップで直接ゼロマスターを製作する方法で、エポキシペーストを使用した強固な型を NC(数値制御)で削りだすことができ、型作り反転の回数をメス型製作と製品成型の2回に半減することができる。

また、高温でキュア(硬化)するため経時変化にも強く製品ライフを全うできるマスター型となる。

##### 〈型 高耐久性に向け〉

1型あたり1,000回以上の成形に耐えられる(一般的なボート FRP 型寿命の2倍以上)仕様としてキャビ型およびコア型ともに次の2要素を型作りに採用した。

- (1) 高効率成形を実現するため、下記(樹脂注入と製品離型までの時間短縮)に示すように成形中の最高発熱温度は100°C程度となる。この厳しい条件にも耐えうる仕様にするため荷重たわみ温度140°C以上有する樹脂材料を選定した。
- (2) また、この材料のパフォーマンスを最大限に生かすため段階的に100°Cまで型を加温することとした。

これらより製品成形の際に樹脂の硬化発熱温度が高温になることを許容し、かつ型劣化を最小に抑え耐久性を十分持たせることを可能にした。

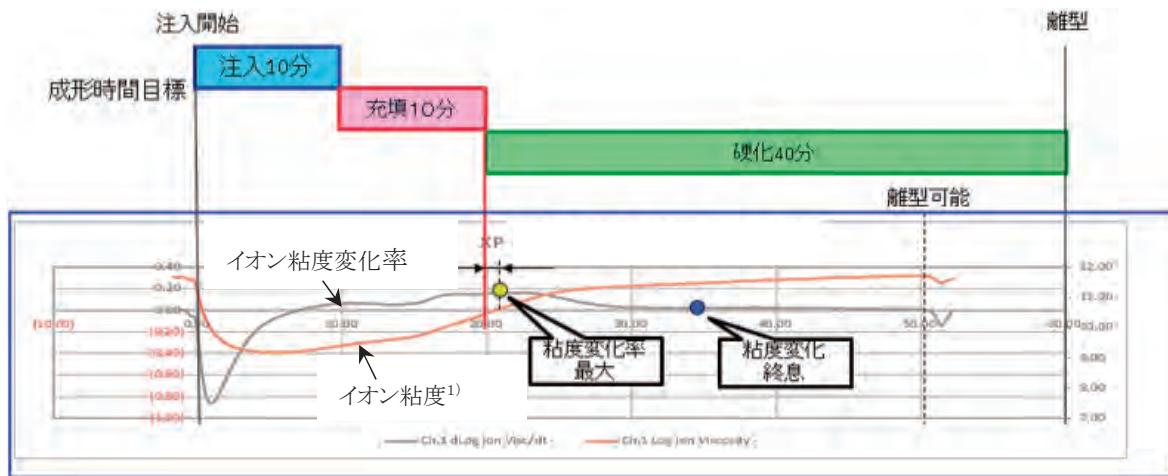


図3 成形時間と樹脂硬化データ 目標値

## 2-2. 成形工程の効率化

### 2-2-1. 背景

通常FRP製品の成形サイクルは1日1成形であり、既存の樹脂では硬化にかかる時間が長く今回求める短時間の成形には適していない。理由は、それを満足するため単純に樹脂の最大硬化発熱までの時間（製品離型できるまでの時間）を短くすると樹脂ゲル時間（流動可能な時間）がそれに比例して短くなってしまい、型内へ樹脂注入している間に硬化反応が始まってしまい、樹脂粘度が上昇し型内に樹脂が充填できないからである。

高効率な成形に求められる樹脂性能は、最大硬化発熱までの時間が短く、かつゲル時間をできる限り長く保つことのできるスペシャルな特性を有する樹脂であった。またそれを樹脂の開発のみでは達成することは難しく、型内への樹脂注入・充填にかかる時間をできる限り短縮する機構が必要であった。

樹脂の硬化特性に関する目標値と樹脂の型内充填に関する目標値を仮設定し、これら両面から達成を狙っていくこととした。以下がその値である。

1) イオン粘度とは硬化中の電子の動きにくさ（抵抗）のことをいう。

1日8成形（1成形／時間）達成に向け（年間2,000台、月間170台 要求台数による）以下を狙い設定値とした。

- (1) 型内への樹脂注入・充填を20分以内に完了させる。
- (2) 上記1に伴い樹脂のゲル化（図3 粘度変化率最大）までの時間を20分以上とする。
- (3) 製品が離型できるまでの時間（図3 粘度変化終息；樹脂硬化反応終了）を60分以内（型温調活用により）とする。

### 2-2-2. 課題解決

#### 〈樹脂注入～製品離型の時間短縮〉

型内への樹脂充填時間を最短にする（ガラスへの樹脂含浸速度向上）と同時に、樹脂の硬化特性としてゲル化時間と充填時間以上かつ高い硬化反応性を有する仕様の造りこみを実施してきた。そのキー要素が次の3つである。

- (1) 樹脂フローメディア（中間層にポリエスチル繊維配合）含む3層構造のコンポジットガラスの採用することにより、高い流動性を実現し型内への樹脂充填時間10分以内を成立させた。
- (2) 温調条件下（型温度40°C）にて、ゲル化15分以上、最大硬化発熱40分以内を満足する樹脂を開発した。これによりハル成形において図4のような硬化特性を得ることができた。
- (3) 上記2を達成するため成形用FRP型に温調機能を採用した（下記にその構造を記載）。

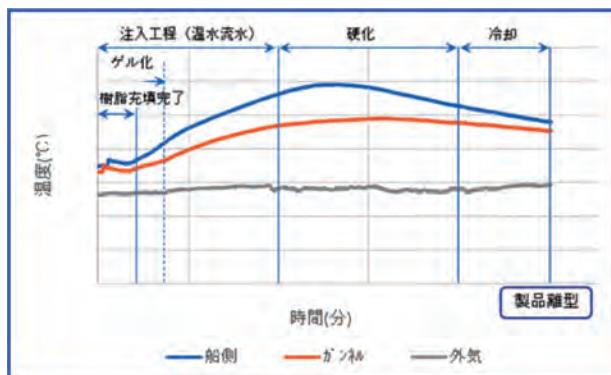


図4 樹脂充填時間と硬化データ

### <型の温調仕様>

成形工程の効率化(短時間での製品離型)と年間通し気温変化による影響を受けて安定した品質の成形を実現するには、型の温調機能がキー要素である。

通常FRP成形で型を加温するには硬化炉などのブース内で型温度を上げるのが一般的で、型温度を10°C程度上昇させるのに数時間要する。それを10分程度で達成する手段として、型の内部から温水により加温する構造を検討し、最終的に図5に示す型積層内部に中空層(パラビーム3Dグラスファイバー素材積層部)を設け、そこに温水を流し短時間で型を温める仕様(図6)とした。

これによりゲルコート塗布後の硬化にかかる時間および成形(型内樹脂注入)後の硬化時間を大幅に短縮させることを達成した。

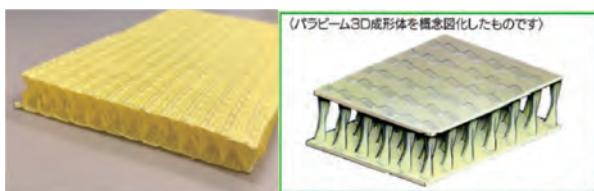


図5 パラビーム材と概念図



図6 パラビーム含むFRPテスト型

パラビーム採用にあたり、大きな懸念が成形性と耐圧・耐久性だが、成形性に関して、複雑形状各部エリアごとに形状を分割しそれをスパイラルチューブで繋ぐ方法を採用した。これによりハル、デッキの複雑形状部にも追従が可能となった。

次に、耐圧・耐久性に関して、パラビームはEガラス繊維で垂直方向の糸(長繊維)が上下層を連続して一体サンドイッチする織り込み構造のため、座屈強度に優れ、また、耐圧面でも1Mpa以上の内圧に耐えられる強度を有する。

経年劣化的にも4年以上に相当する連続浸漬加速試験(アレニウスの定理を適用)でパラビームの強度低下は20%程度であり、型全体に与える影響は少ない。

型内に積層されたこのパラビーム内に温水を流すことにより短時間での型昇温(15分以内で型表面20°C昇温)を可能とした。

### 2-3. 高い外観性と安定化

#### 2-3-1. 背景

ヤマハPWCの約9割強はアメリカで艇体をSMC+ウレタン塗装仕様にてモノ創りしており、今年間生産数と初期投資面からVARTM工法を選択(創り込み)するが、商品性要求からは工法が違っても同レベルのヤマハ外観品質が求められる。

そのため型の高品質な仕上げとその持続性(耐久性)、また同時に季節変動に左右されない成形環境(特に型温コントロール)の安定が求められる。

PWCの中でも最も小型の「SuperJet」に4ストロークエンジン(三気筒)を搭載し、また性能面で機敏性が重要となるモデルであることから、外サイズにも制約条件が入る。

これら空間制約がある中で、デザイナーが意図する鮮明な外観キャラクターを創り出し、またさらにこのデザインを際立たせるため、ヤマハPWCとして初の2色塗分けをデッキに採用した(図7)。

これらを品質良く実現するにはモノ創りの工夫が必要であった。



図7 「SuperJet」外観

#### 2-3-2. 課題解決

安定した外観品質づくりに次の3要素を採用することで高品質な外観を創り出した。

- (1) 鈍角な面の繋がりにもかかわらず、鮮明なキャラクターを創出するため、耐久性あるエポキシマスターをオス型に採用、またその仕上げ工程でキャラクターライン部強調。
- (2) 製品ゲルコート吹付け機械化により霧状の吹付けと厚みを均一にするため2段階吹付けとし、また基材ガラスの外観への映りこみをなくすためゲルコート層直下にパリアコート(フィラー含む表面平滑用低粘度樹脂)層を追加。
- (3) 成形時型内での硬化反応をより促進させるため型温度を40°Cに昇温。

また、2色塗分けに関して、「型と塗分けマスキングジグ」の精度がキーとなる。2-1で述べた型高精度化の活動結果と、マスキングジグについては3D粉末焼結造形を利用し高精度化を実現することで、塗分けを可能とした。

## 2-4. 各プロセス効率化に向けた活動

### ＜ガラス裁断自動化と賦形プリフォーム化＞

基材として使用するガラス材の裁断形状をデータ化し自動裁断機で複数枚カットする仕様を採用した(図8)。これによりネックであった基材準備(カッティング)工程の大幅な時間短縮、また同時にガラス材の使用効率(歩留まり)も大きく改善することができた。



図8 自動裁断機



図9 プリフォーム

また、裁断したガラスの型への賦形も工数のかかる工程であり、複雑形状部の小さく裁断したガラス材を複雑に組み合わせセットする工程を別工程(ガラス材のプリフォーム化)とすることで、メインのガラス材セット工程の平準化を図ることができる(図9)。

このガラス材のプリフォーム化にあたり、以下の取り組みを実施した。これら3要素によりポンプケース部のガラスプリフォーム化を実現した。

- (1) 使用するガラス材として熱可塑性繊維層を含むコンポジットガラスを採用し、これを外部からプレスし、加熱することにより形状を保持。
- (2) 上記プレスのために下型をFRP製、上型をシリコン製5mm程度の膜(柔らかく、形状追従性に優れている)とし、その間にガラス材をレイアウトし、中を真空状態にすることによりガラス材を下型の形状に追従。
- (3) 上記加熱のために熱伝導性に優れたカーボン繊維を採用。これをFRP製下型の表面へ高耐熱樹脂にてラミネートし、これに電気を流すことによりコンポジットガラス材

中のポリエステル層(低軟化点“110°C”仕様を選定)を120°C前後まで加温し(その後常温まで冷却)形状保持。

## 3

### 製造拠点の再編

#### 3-1. NEW モデル立上げに向けた製造課題

通常、新機種プロジェクトの中での製造パートは、既存モデルのスキームを基本として展開していく。しかし今回の「SuperJet」の場合は、心臓部であるエンジンが2ストロークから4ストロークに変更されることになり、艇体設計含め多くの新規構造、新規部品が採用された。それらを製造工程へ落とし込む過程の中で、旧モデルの製造工程が参考にならない場合にどうしたら良品を安定的に生産ができるかを模索し、決定していく必要があった。旧モデルは、長年大きな仕様変更がなかったので、それに対する蓄積されたノウハウがないことも新機種プロジェクトの大きな課題であった。

#### 3-2. 工程設計の進め方

「SuperJet」は、【フルモデルチェンジ】【新工法導入】という旧モデルから大きな変化点があり、工程設計としてはゼロからの作り込みが必要となった。従来の開発・生産準備プロセスでは、開発で仕様が決まることが遅れると、連れて工程設計への展開が遅れ、生産準備が後手にまわるという課題があった。その課題に対するプロセス改革として、以下の様な取り組みを行った。

##### (1) DRO、1次試作からの製造プロセスの参画

通常はまだ生産準備プロセスをスタートしていないDRO段階の情報を元に、工程設計の青図を作成し、1次試作の中で具現的な項目に変換、追加することで生産準備の精度を上げる。

##### (2) 実験、開発との工程設計の共有

開発プロセスの中で発生する仕様変更や設計変更に対し、工程設計に影響する部分を随時、1次試作で作り上げた青図に落とし込み、アップデートする。

##### (3) 開発課題の対策案検討に製造要求織込み

開発プロセスの中で発生する課題に対して、対策案の検討を設計、実験、製造のメンバーで行うことで、工程設計の青図で示した製造要求も含め、対策案の最適化を図る。

#### 3-3. 工場立上げに向けた製造ライン設計

##### 3-3-1. 製造ライン設計と工場

工程設計と製造条件をまとめた青図で工程の枠はほぼ完成していた。あとは工程間の物流や部品供給などを踏まえ、数パターンのレイアウトをパズルのように組み合わせ、製造ライン設計を進めた。しかしそう組み合わせても、旧モデルを製造して

いたスペースでは収まらなかったので、別の新たな生産スペースを確保する必要があった。その生産場所として候補に挙がったのは、ミツワ(株)袋井工場で、倉庫として使用していたエリアに「SuperJet」の製造ラインを新たに構築することになった。

既存の設備をエリア外に移設し、必要なスペースを空け、床や天井などの基礎部分も整備を行った。その空間に原材料⇒成形⇒組立⇒完成検査⇒梱包までの一貫製造ライン、それを取り巻く部品庫や受入・出荷のプラットホーム、作業者の休憩場に至るまで、必要なものを配置設計し、施工計画を作成した。施工完了のターゲットを型物試作に置き、成形条件が本工程に近い形でトライできるような準備を整えた(図10)。

ミツワ袋井工場 ラインレイアウト

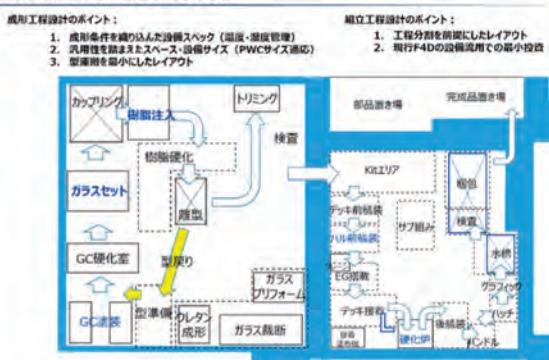


図10 工程レイアウト

### 3-3-2. 物流スキームの新規構築

工場での生産を行うには、工場を取り巻くサプライヤーと工場機能とを、効率よく繋ぐスキームと品質管理が不可欠である。「SuperJet」の製造工場となるミツワ(株)袋井工場はヤマハ社外であることから、通常ヤマハの社内工場にあるあたりまえの機能が揃っていない。よって、新たな物流スキームを構築する

ことが課題となった。

#### (1) 部品受入れ業務機能

通常、ヤマハの工場機能の一つとして、納入される部品に対して初品受入検査を実施し、良品のみを検収するQゲートがあるが、その機能と権限を社外に委託することは難しく、ヤマハ社内のどこかでその機能を補う必要があった。今回、その役割を製造部門が受け入れてくれることになった。本来 CKD(海外工場で完成するモデル)のパーツの受入、ピッキング、梱包を一手に引き受けている工場で、CKDのパーツで培った高い品質管理能力を「SuperJet」の構成部品にも展開していただくことで、管理された部品を社外に有償支給し、安心して組立、完成できる基盤となった。

#### (2) 台湾(台灣山葉機車)製品の国内輸入と供給スキーム

「SuperJet」の構成部品の中に JET PUMP ASSY という部品がある。これはエンジンと連結し、エンジンの動力を JET PUMP 内のインペラに伝え、推進力となるジェット水流を発生させる重要なパーツである。JET PUMP ASSY は、アメリカで生産している他の PWC やスポーツボートに対しても、YMT(台灣山葉機車)で生産し、供給されている。「SuperJet」の JET PUMP ASSY も、その流れで YMT での生産になることから、台湾から日本への輸入と、それを組立工場へ供給するという新たなスキームを構築する必要があった。そのスキーム構築に協力してくれたのが、YMT(台灣山葉機車 輸出管理部門)と調達推進部である。YMT と調達推進部は海外調達部品の手配スキームを持っており、そのスキームに「SuperJet」の JET PUMP ASSY を当てはめることを提案し、艇体の組立計画に対して最適な供給体制を構築することができた(図11)。

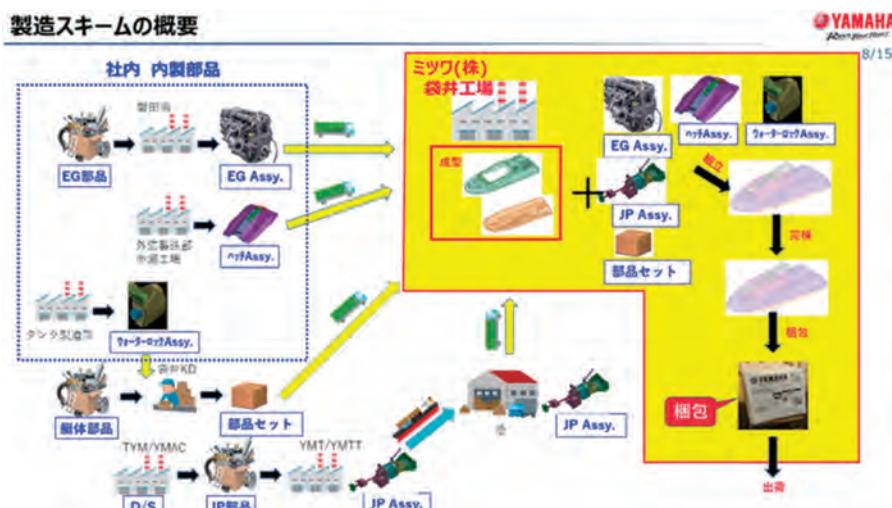


図11 製造スキームの概要

## (3)社内内製部品への展開

PWCの構成部品は、製造拠点がアメリカに集約していることもあり、エンジンと一部のパーツ以外は、日本での製造実績がなかった。「SuperJet」は唯一の国内完成モデルとして、社内工場の製造技術、生産能力を活用することが製造スキームの重要なキーと考えた。その要望に応えてくれたのが、製造部門の樹脂成型担当とアルミプレス担当である。樹脂成形では、大型の樹脂インジェクション成形で「SuperJet」の重要パーツであるエンジンハッチ ASSY を、アルミプレスでは、「SuperJet」の排気系統の重要パーツであるウォーターロック ASSY を、それぞれ製造して供給することになった。それぞれの生産準備担当者は、初めて関わる PWC 商材に対し、製品の使われ方、部品の機能や商材特有の市場影響まで深掘りし、緻密な良品条件を設定することで、精度の高い生産準備を展開してくれた。

## 4 おわりに

国内外の多くのお客さまからの期待と社内からの大きな声を受けて、【フルモデルチェンジ】【新工法導入】【新工場立ち上げ】の3つの大きな“新”にチャレンジし、非常に多くの課題を乗り越え、2020年8月生産立上げを実現した。

心配していた量産での品質のバラツキも現場製造スタッフの作業改善と熟練度向上、そして作業標準書ブラッシュアップにより高い完成度を達成した。

量産開始から一年(2021年8月時点)、年間2,000隻の生産と、狙いとしていた成形良品率97%を達成することができた。このプロジェクトを通し、中量工法のモノ創りの技術ノウハウと進化した高効率 VARTM というヤマハ独自の強みを手に入れ、今後さらなる商品競争力向上への戦略に繋げていく。

## ■著者



中辻 聰

Akira Nakatsuji  
マリン事業本部  
製造統括部  
ポート製造部



横大路 裕信

Hironobu Yokooohji  
マリン事業本部  
製造統括部  
ポート製造部

## ■開発メンバー



北川 鉄哉

Kinya Kitagawa  
マリン事業本部  
製造統括部  
ポート製造部



村越 功

Isao Murakoshi  
マリン事業本部  
製造統括部  
ポート製造部

# ボディシリンダのテクスチャリングによる 低フリクション化技術

Low friction technology using textured body cylinders

村瀬 雄太 伊東 明美

本稿は SETC2019 (Small Engine Technology Conference) および第30回内燃機関シンポジウムで発表された下記の論文を著作権者の許可を得て再編集したものです。

Murase, Y., Kumagai, H. "Friction Reduction of All-aluminum Cylinder for Motorcycles by a Mirror Finished bore with Dimples", SAE Technical Paper 2019-32-0530 (2019).

小林大吾, 伊東明美, 村瀬雄太: エンジンの燃焼室壁面から蒸発する潤滑油消費に関する研究, 第30回内燃機関シンポジウム講演予稿集, 20194773 (2019).

## 要旨

近年、小型エンジンの更なる競争力向上の為、燃費向上への要求が高まっている。

この問題の解決のため、特に燃費低減に対する寄与の大きいシリンダボアとピストン、ピストンリングとのフリクションロス低減を目的とした開発が盛んに行われている。本稿ではアルミ製シリンダボアのテクスチャに対するフリクションロスの影響に着目し、シリンダボアの鏡面化とディンプル付与の効果を浮動ライナ法により評価した。

評価の結果、従来のシリンダボア面にクロスハッチが付与された仕様(本稿では「プラトー仕様」と表す)に対し、鏡面化により摩擦平均有効圧力(Friction Mean Effective Pressure 以降、FMEP)が14.1%低減した。また、鏡面化とディンプル付与の組み合わせにより、プラトー仕様に対し、最大で FMEP が19.5%低減した。ディンプルを付与した仕様についてレーザー誘起蛍光法による油膜厚さ測定を行ったところ、プラトー仕様と比較して上死点から中央行程において油膜厚さの増加が顕著に見られ、ディンプル付与によりシリンダボア面への供給油量が増加したと推察された。

## Abstract

In recent years, in order to further improve the competitiveness of small engines, there has been increasing demand for improved fuel efficiency.

To help solve this problem, development is being actively carried out with the aim of reducing friction loss between the cylinder bore, piston, and piston ring, which contributes to greater fuel efficiency. In this report, we focus on the effect of friction loss on the texture of aluminum cylinder bores and evaluate the effects of mirroring the cylinder bores and adding dimples using the floating liner method.

As a result of this evaluation, the friction mean effective pressure (FMEP) achieved was 14.1% due to the mirror surface, compared to the conventional specification with a crosshatch on the cylinder bore surface (referred to as "plateau specification" in this report). In addition, the combination of mirroring and dimples reduced FMEP by up to 19.5% compared to plateau specifications. When the oil film thickness is measured by the laser-induced fluorescence method for the specifications with dimples, a remarkable increase in the oil film thickness was observed from the top dead center to the center stroke compared to the plateau specifications, suggesting that the amount of oil supplied to the cylinder bore surface increased due to the addition of dimples.

## 1

### はじめに

シリンダボアとピストン、ピストンリング間のフリクションロスはエンジン全体の損失中約35%を占める。ゆえにこれらのフリクションロスを低減することはエンジンの燃費や出力を向上させる上で重要である<sup>[1]</sup>。過去、輸送機器メーカー各

社はシリンダボア表面のテクスチャがフリクションロスに及ぼす影響について、多くの研究を行ってきた。これらの研究の中で、フリクションロスを低減する方法は主に2つに大別できる。一つ目はシリンダボア表面の鏡面化である。これは固体同士の直接接触を回避し、安定した油膜の形成を狙ったものである<sup>[2][3]</sup>。二つ目はディンプルの様な凹形状の付与である。これは

研究者らごとに様々な狙いがあり、代表的なものでは摺動面に供給する潤滑油量のコントロール、摺動面積低減によるオイルのせん断抵抗の低減、動圧効果によりオイルより浮上力を得ることなどが報告されている<sup>[4][5]</sup>。しかしながら、モーターサイクルのエンジンに対する研究事例、特にシリンダボアの鏡面化やディンプル付与の複合的効果に関する研究事例は乏しい。よって、本稿ではオールアルミシリンダを採用する小型のモーターサイクル用エンジンを用い、シリンダボアのテクスチャによるフリクションロス低減のメカニズムを考察する目的で、浮動ライナ法によるフリクションロスの評価と、レーザー誘起蛍光法による油膜厚さ測定を実施した事例について紹介する。

## 2 実験方法

### 2-1. フリクションロスの測定

ボディシリンダ周りのフリクションは浮動ライナ法を用いて測定し、得られたデータから FMEP を計算することでフリクションロスを評価した。浮動ライナ法による評価を行う利点は以下の2点である。

- 1) 実機の環境に近いファイアリングによる評価であること。
- 2) シリンダ周りのフリクションロスのみを測定するため、他部品の影響を受けにくく、測定結果の再現性が高いこと。

本実験に用いた浮動ライナ装置は単気筒のオールアルミシリンダ用に開発したもの用いた<sup>[6]</sup>。装置の構成を図1に示す。ボディシリンダがピストンやピストンリングから受ける摩擦抵抗をシリンダ下部に設置されたロードワッシャーにより計測する仕組みである。

また、評価に用いたエンジンの諸元を表1に示す。排気量 115cm<sup>3</sup>クラスの小型スクーターの空冷単気筒エンジンである。

ボディシリンダ周辺の部品の仕様を表2に示す。ボディシリンダの材料はボディシリンダ専用に開発<sup>[7]</sup>され、現在量産されているDiASil材(過共晶 Al-Si ダイカスト合金)<sup>[8]</sup>を用いている。ピストンリングの仕様はアルミ製のシリンダとの耐焼き付き性を担保する目的で DLC コーティングが処理されている。

また、各リングの張力を表3に示す。

試験条件を表4に示す。フリクションの測定は燃費への寄与の大きいエンジン回転数から代表で3水準(4400rpm、4800rpm、5200rpm)を選択して行った。また、シリンダボアテクスチャのフリクションロスに対する寄与を正確に評価するため、図示平均有効圧力(Indicated Mean Effective Pressure)、シリンダ壁温、油温を各試験で統一した。

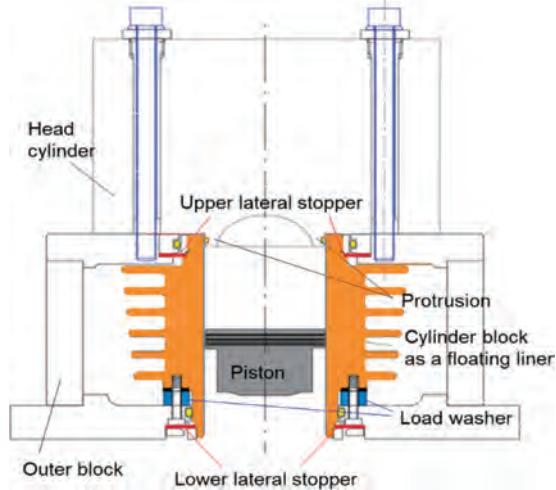


図1 浮動ライナ装置模式図

表1 試験エンジン諸元

Engine type	•Gasoline •Four stroke cycle •Air cooled single cylinder
Bore × Stroke(mm)	50.0×57.9
Displacement(L)	0.113
Connecting rod length(mm)	93.5
Reciprocating parts mass(kg)	0.136

表2 ボディシリンダ周辺の部品仕様

Parts	Material	Surface treatment
Piston	Alminum(For forging)	Iron plating
Piston ring	Top Steel	DLC
	Second Cast iron	None
	Oil Steel	DLC
Body cylinder	Aluminum(For die casting)	None(Except texturing)

表3 ピストンリングの張力

	Tangential Force(N)	Unit pressure(kPa)
Top	3	171
Second	3	120
Oil	10	571

表4 試験条件

Oil viscosity	10W-40
Oil temperature	70°C (at entrance of crankcase)
Body cylinder temperature	120~130°C (at middle position of thrust side)
Engine rotation speed and IMEP	①4400rpm, IMEP:354kPa ②4800rpm, IMEP:412kPa ③5200rpm, IMEP:494kPa

### 2-2. 油膜厚さの測定

油膜厚さの測定はレーザー誘起蛍光法(以降、LIF法)により行った。測定法の概略図を図2に示す。LIF法では光ファイバーをシリンダボア面に埋め込み、潤滑油に添加した蛍光剤が励起光の照射により蛍光を発する特性を利用する。発する蛍光の強度は油膜厚さに依存するため、光ファイバーを通して計測した

蛍光の強度を油膜厚さに換算して測定値とした。

LIF法による油膜厚さの測定は本稿のように、シリンダボアのフリクションロスと潤滑状態の関係を考察する目的のみならず、燃焼室に浸入する油量を推定することでオイル上がりによる潤滑油消費との関係を議論する上でも有用である。

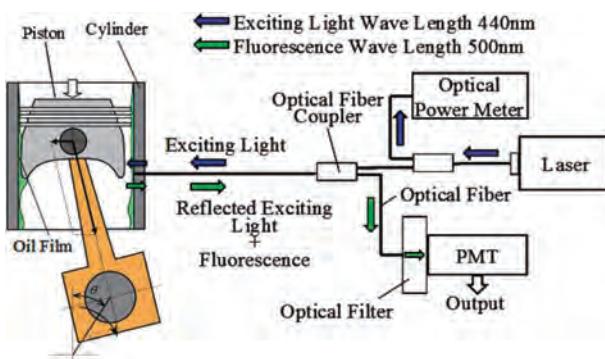


図2 レーザー誘起蛍光法(LIF法)による油膜測定の概略図

### 2-3. サンプル仕様

サンプルとして以下4種のシリンダを準備した。

- 1) プラトー仕様
- 2) 鏡面仕様
- 3) ディンプル仕様 A
- 4) ディンプル仕様 B

各仕様の概要を表5に示す。プラトー仕様はホーニング加工により、目の粗い砥石で谷部を、目の細かい砥石でプラト一部を形成した仕様である。また、鏡面仕様は目の細かい砥石のみを用いてホーニング加工を行い、凹凸の極めて小さい表面状態である。ディンプル仕様 A、ディンプル仕様 Bは鏡面仕様をベースとして一部にディンプルが付与されている。

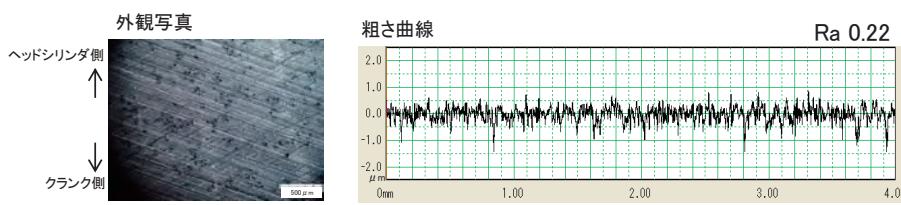
プラトー仕様と鏡面仕様の外観と粗さ曲線を図3に示す。プラトー仕様は深さ1~2μm程度の深溝が付与されている。対して鏡面仕様は1μmを超えるような凹凸は見られない。両仕様をRaで比較するとプラトー仕様がRa0.2~0.3μm程度、鏡面仕様はRa0.03μm前後である。

ディンプル仕様 A、Bについて、ディンプルの形態と付与範囲の詳細を表6、図4に示す。本品におけるディンプル付与の目的は浦部らの研究<sup>[4]</sup>で報告されている摺動面積の低減によるオイルのせん断抵抗の低減である。そのため、ディンプルはピストンが比較的高速で運動する行程中央部に付与した。また、ディンプル仕様 Aは行程中央部の全周に付与されており、ディンプル仕様 Bは膨張行程時に比較的大きなピストン側圧がかかる吸気側にのみ付与されている。

表5 各サンプルの概要

Cylinder type	Overview	Aim
Plateau	Having conventional cross-hatches	For comparison
Mirror	Having no cross-hatches and no irregular surface characteristics	Sliding loss reduction by reducing the frequency of direct contact between piston or piston ring and cylinder
Dimple A	Most of part is mirror finished but dimples are given at a limited part both of intake and exhaust side	Sliding area reduction of piston or piston ring and cylinder
Dimple B	Most of part is mirror finished but dimples are given at a limited part of only intake side	Sliding area reduction of piston or piston ring and cylinder

### プラトー仕様



### 鏡面仕様

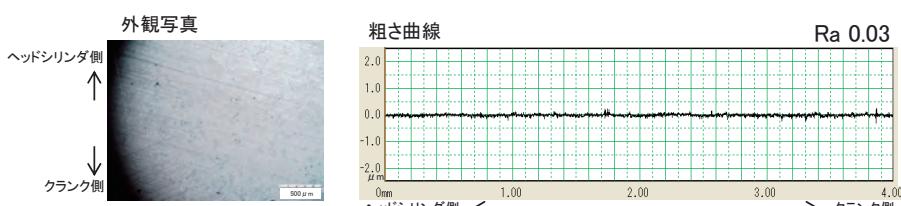


図3 シリンダボア面の外観写真と粗さ曲線(プラトー仕様、鏡面仕様)

表6 ディンプルの形態、付与範囲の詳細

Area ratio	40%				
Shape	Circle				
Diameter	0.5mm				
Depth	About 7μm				
Application range	<table border="1"> <tr> <td>Axial direction</td> <td>As shown in Figure 4</td> </tr> <tr> <td>Radial direction</td> <td>Dimple A Both of intake side and exhaust side Dimple B Intake side only</td> </tr> </table>	Axial direction	As shown in Figure 4	Radial direction	Dimple A Both of intake side and exhaust side Dimple B Intake side only
Axial direction	As shown in Figure 4				
Radial direction	Dimple A Both of intake side and exhaust side Dimple B Intake side only				

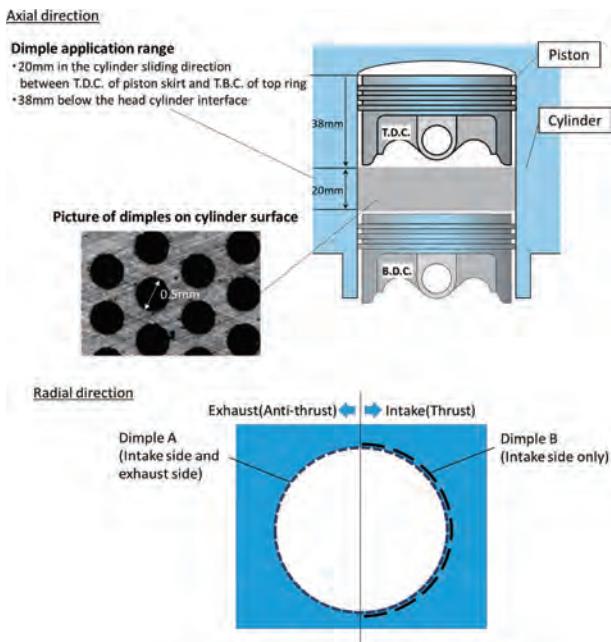


図4 ディンプル付与範囲の模式図

#### 2-4. ディンプルの付与方法

ディンプル仕様A、Bはホーニング加工後、レーザー加工により付与した。レーザー加工の模式図を図5に示す。シリンダボア内に挿入された鏡でレーザー光を反射し、シリンダボアを回転移動、平行移動させることで狙いの位置に加工を行った。

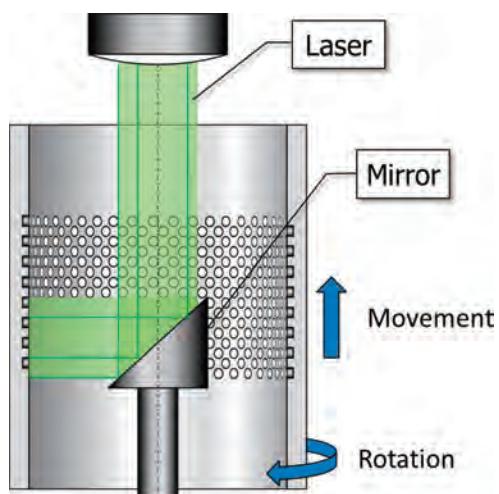


図5 レーザー加工の模式図

レーザー加工後のディンプル仕様A、Bのボア面の展開写真を図6に示す。加工範囲は四角に区切られており、同じ範囲で繰り返し加工を行うため、ディンプルの処理部にわずかに隙間が生じている。

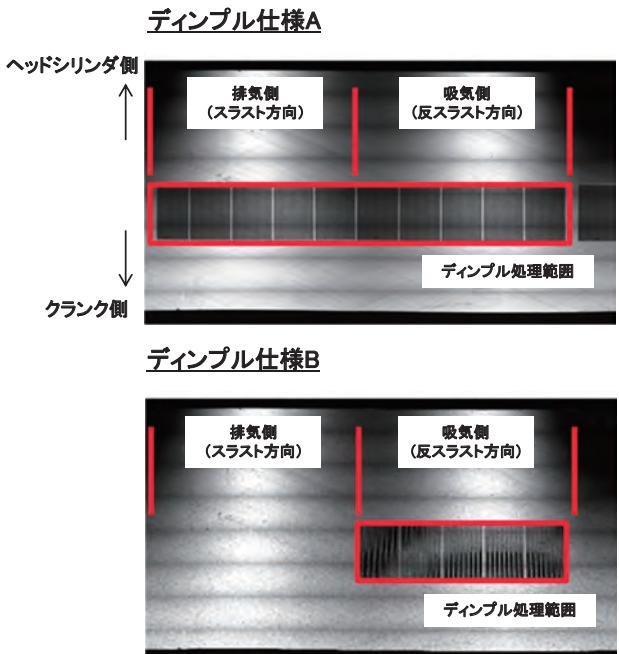


図6 シリンダボア表面の展開写真(ディンプル仕様 A,B)

また、レーザー加工によりシリンダの母材が蒸発する際、ディンプルの端部に微小突起が生じたため、再度ホーニング加工を行い除去した。仕上げホーニング前後のディンプル処理部の断面形状を図7に示す。微小突起は最大で5μm程度の高さがあり、仕上げホーニング後は完全に除去されている。また、ボディシリンダの材料は母材中に初晶Siや共晶Si等の晶出物が多量に存在しており、加工速度が場所により不均一である。そのため、ディンプル底部の形状は細かな凹凸を持っている。

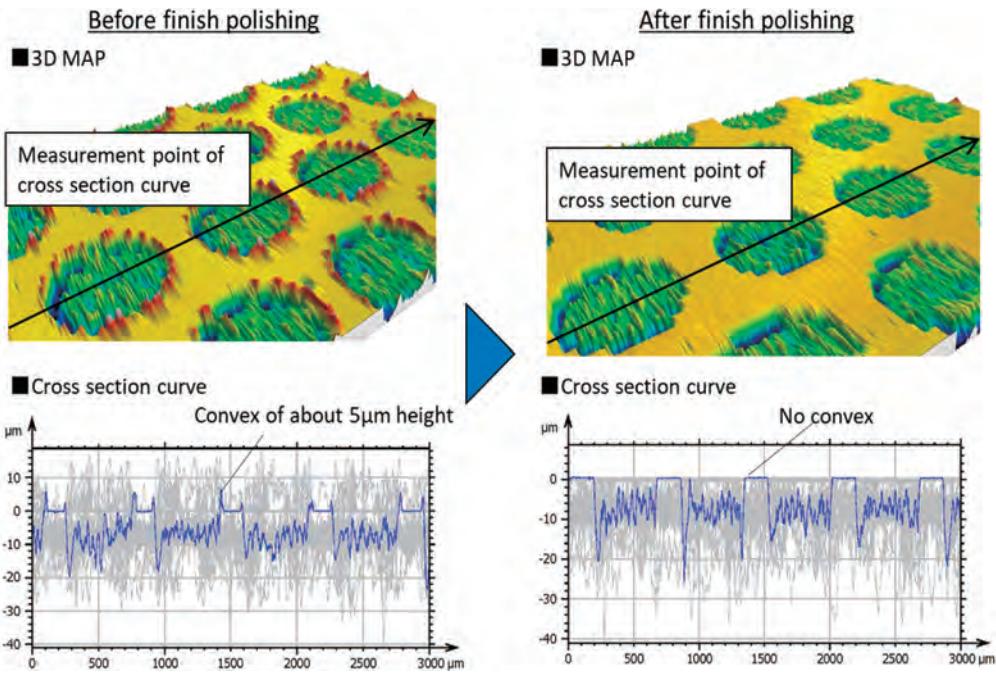


図7 ディンプル処理部の断面形状(仕上げホーニング前後)

### 3 結果と考察

#### 3-1. FMEP 測定結果

エンジン回転数4400rpm、4800rpm、5200rpmで測定したFMEPの平均値を図8に示す。クランク角度0~720°の合算値と、吸気行程(0°~180°)、圧縮行程(180°~360°)、膨張行程(360°~540°)、排気行程(540°~720°)の各行程に分割したFMEPがそれぞれ示されている。FMEPはプラトー仕様、鏡面仕様、ディンプル仕様A、ディンプル仕様Bの順で小さくなる。プラトー仕様に対するFMEPの低減率は鏡面仕様で14.1%、ディンプル仕様Aで17.3%、ディンプル仕様Bで19.5%である。膨張行程のFMEPはプラトー仕様、鏡面仕様、ディンプル仕様B、ディンプル仕様Aの順で小さくなり、他の行程(吸気、圧縮、排気)ではプラトー仕様、ディンプル仕様A、鏡面仕様、ディンプル仕様Bの順で小さくなる。

また、図9に摩擦波形の比較グラフを示す。横軸がクランク角度、縦軸が摩擦力を表す。摩擦力は正方向がシリンダボアをヘッドシリンダ側に押し上げる力、負方向がクランク方向に押し下げる力であり、絶対値が摩擦力の大きさである。図中矢印はディンプル処理位置直上を各部品が通過するクランク角度を表す。

#### 3-2. 鏡面仕様のFMEPの低減効果について

図10にプラトー仕様と鏡面仕様の摩擦波形を示す。第二軸はピストンに働くスラスト力を表し、正の値が吸気側、負の値が

排気側へ働く力の大きさを表す。鏡面仕様はスラスト力の正負によらず、吸気、圧縮、膨張、排気の全行程においてプラトー仕様よりFMEPが小さくなった。シリンダボア鏡面化のリスクとして、表面に凹凸が無いことから、保油性が低下し油膜が形成されずに摺動抵抗が大きくなることが挙げられるが、今回の試験下では凸部が小さく、物体の直接接触を妨げて摺動抵抗を低減する効果が勝ったものと思われる。野口らの研究<sup>[3]</sup>では鏡面化による保油量減少とそれに伴うフリクションロスの増大はエンジン始動直後にのみ見られ、エンジン始動の数10サイクル後には鏡面化した方が低フリクションであることが報告されている。

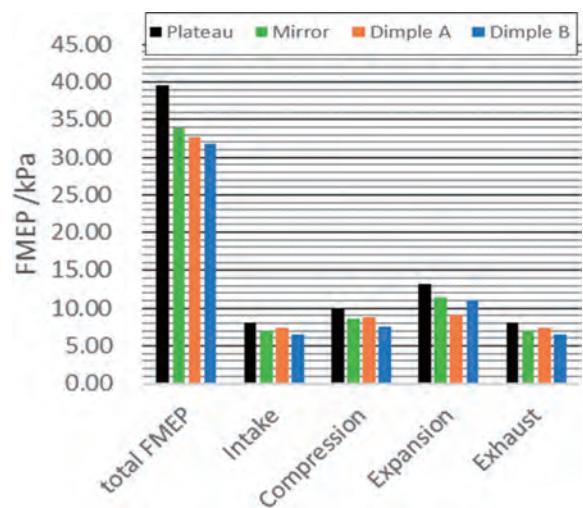


図8 各シリンダのFMEP (4400,4800,5200rpm 測定値平均)

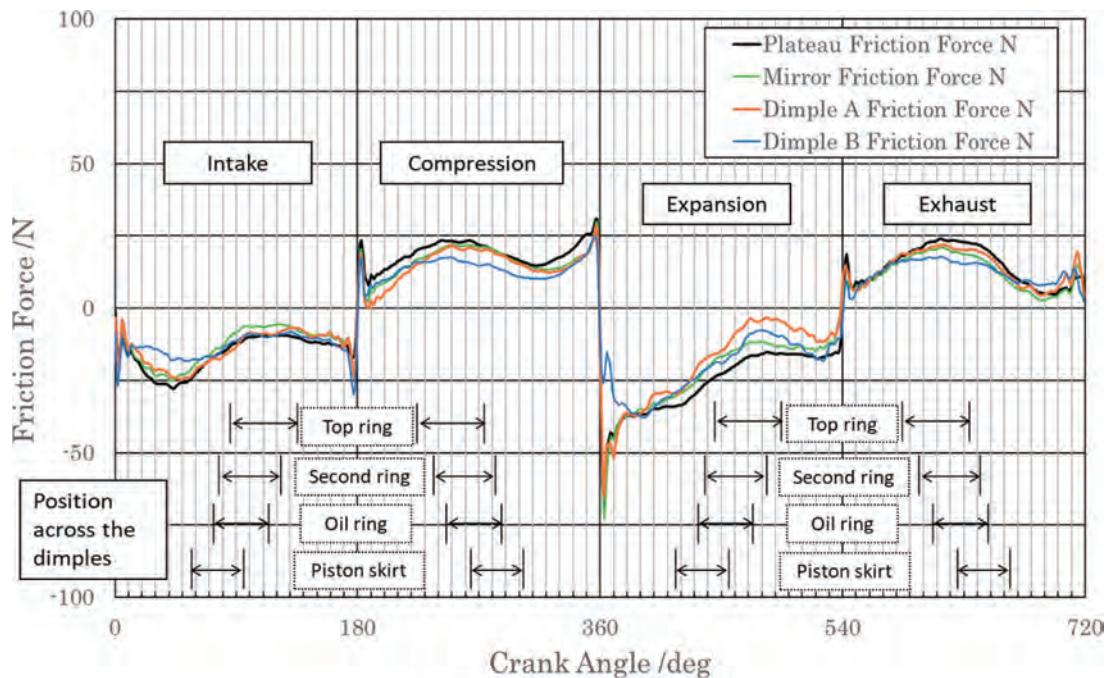


図9 各シリンダの摩擦波形データ(4800rpm 運転時)

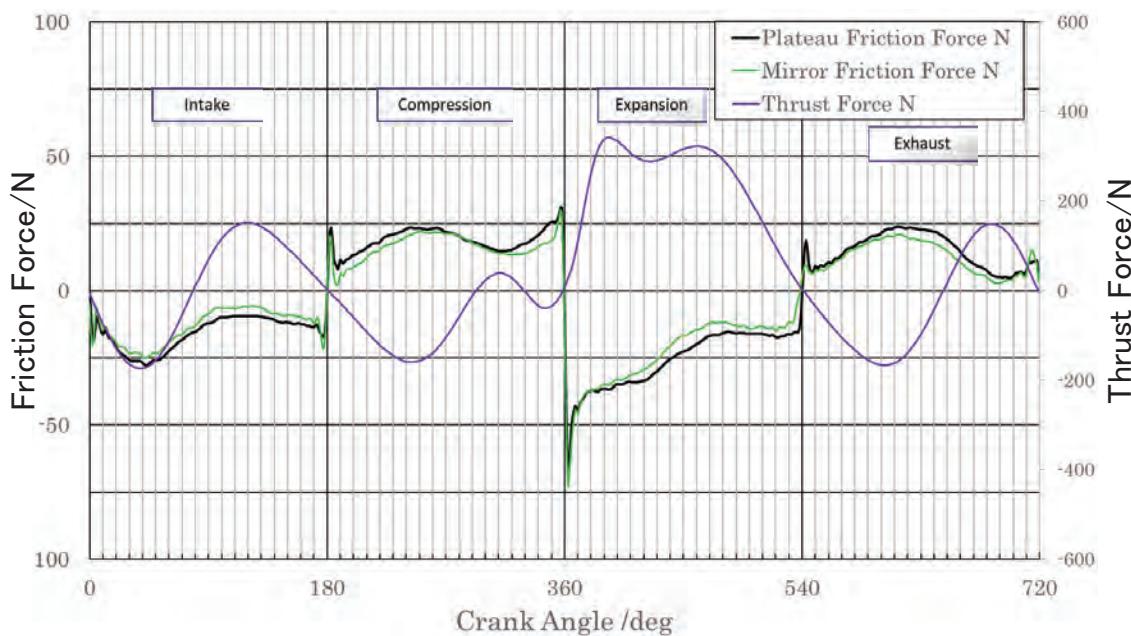


図10 プラトー仕様と鏡面仕様の摩擦波形データ(4800rpm 運転時)

### 3-3. ディンプル仕様 A、B の FMEP 低減効果について

ピストンスカート、各ピストンリングがディンプル上を通過している間の FMEP を比較すると、ディンプル仕様 A が最小となつたのはトップリングに対してのみであり、他の部品に対してはディンプル仕様 B が最小である。図11に鏡面仕様とディンプル仕様 A、B の摩擦波形を示す。例えばクランク角度360°前後のディンプルが付与されていない範囲においても各仕様のフリ

クションに差が見られることから、行程中央部に付与されたディンプルがディンプル付与範囲外の潤滑状態に影響を与えることが示唆される。また、ディンプル仕様 B(ディンプル仕様 A に対して付与範囲半分)が最もフリクションロスが小さかつたことから、フリクション低減効果はディンプルの付与範囲に比例して得られるものではなく、最適な配置があると言える。

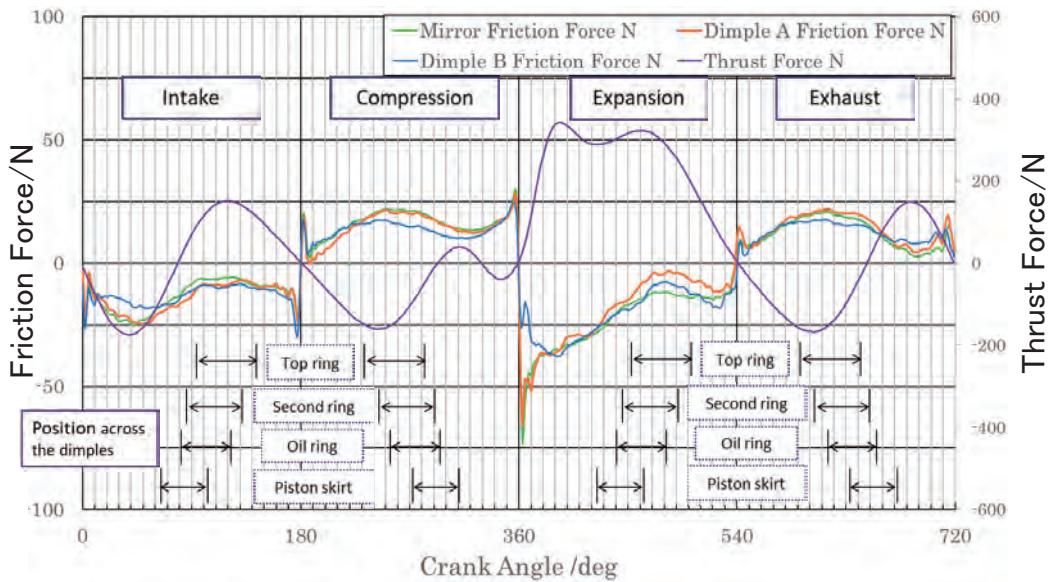


図11 鏡面仕様とディンプル仕様A,Bの摩擦波形データ(4800rpm運転時)

### 3-4. 油膜厚さ測定結果

油膜厚さの測定は最もFMEPの低減効果の大きいディンプル仕様Bと、比較対象とするプラトー仕様に対して行った。油膜厚さの測定位置、即ち光ファイバーの埋め込み位置は吸気側の上死点付近、ディンプル処理位置、下死点付近の3か所とした(図12)。

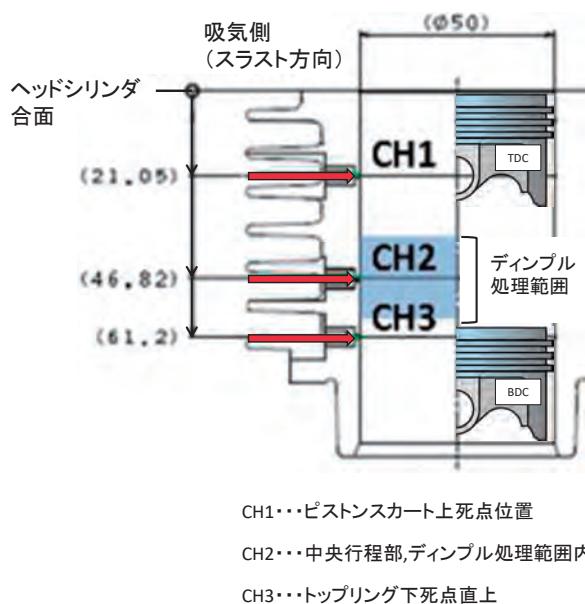


図12 光ファイバーの埋め込み位置(CH1,CH2,CH3)の模式図

エンジンの運転条件は浮動ライナ評価時と同様である。また、ディンプル仕様Bは圧縮行程(180°~360°)、膨張行程(360°~540°)において顕著なFMEPの低減効果が見られることから、これらの行程における測定結果について考察を行う。

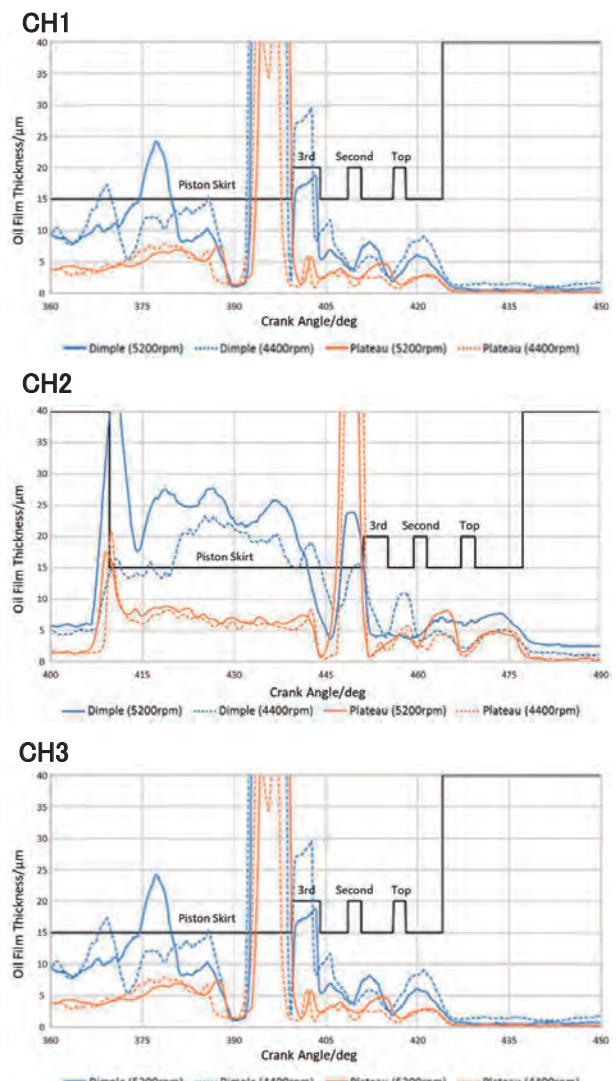
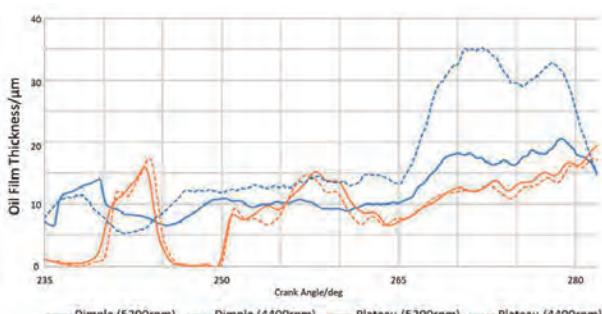


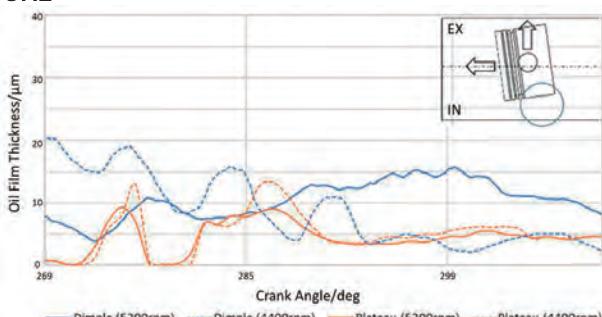
図13 膨張行程の油膜厚さ測定データ

図13に膨張行程における各測定チャンネルの油膜厚さの測定結果を示す。図中の黒色線はピストンの概略形状であり、油膜厚さの測定チャンネル直上を通過する際のクランク角度との関係を表す。上死点付近、ディンプル付与部(中央行程)において、ディンプル仕様Bはプラトー仕様と比較して厚い油膜厚さとなった。膨張行程ではピストンに対してシリンダの吸気側に強い側圧が加わり、潤滑状態は境界潤滑に近づくことが予想され、油膜が形成されることでフリクションロスは小さくなる。よって、測定結果はフリクションロスの測定結果と整合する。特にディンプル付与部のチャンネル2位置において両シリンダ仕様の油膜厚さの差異は大きくなっている。ディンプル付与によりシリンダ壁面への供給油量が増加し、油膜形成を促進したと推察する。

CH1



CH2



CH3

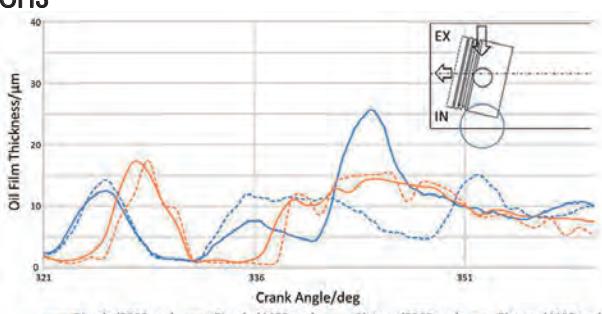


図14 圧縮行程の油膜厚さ測定データ

次に、図14に圧縮行程における各測定チャンネルの油膜厚さの測定結果を示す。ここではピストンスカートとの間の油膜厚

さが計測されるクランク角度の範囲を抽出して示した。図中に油膜厚さ測定時のピストン姿勢のイメージを併せて示す。圧縮行程においても、膨張行程と同様に油膜厚さはディンプル仕様Bの方が厚い傾向が見られる。また、形成される油膜厚さは膨張行程と比較すると不連続であり、部分的な油膜の破断を伴いながらピストンが上死点方向に移動していることが示唆される。

圧縮行程は膨張行程に対して側圧が小さく、潤滑状態はより流体潤滑状態に近いと予想され、流体潤滑状態においては油膜厚さの増大はオイルに作用するせん断抵抗からフリクションロスを増大する要素になると考えられることから、ディンプル仕様の方が低フリクションであるという浮動ライナの測定結果とは矛盾する。この点については今回実施していない排気側の油膜厚さの測定を踏まえて考察を深める必要があると考える。

## 4 終わりに

テクスチャの異なるアルミ製シリンダを用いて浮動ライナ法によるFMEPの測定を行い、下記の結果を得た。

- ・ シリンダ鏡面化により従来のプラトー仕様比でFMEPが14.1%低減した。
- ・ 行程中央部、特に吸気側に限定してディンプルを付与することでFMEPが大きく低減し、プラトー仕様比で19.5%低減した。

また、鏡面化とディンプル付与の複合した仕様の油膜厚さは、フリクションロス低減効果の大きい圧縮、膨張行程にてプラトー仕様比で増大する傾向が見られた。

## ■参考文献

- [1] Suzuki, H., "Approach to the Piston Friction Reduction(2)," Journal of Japanese Society of Tribologists, 49(10), 763-768, 2004.
- [2] Yoshida, N., "Development of New I4 2.5L Gasoline Direct Injection Engine," doi: 10.4271/ SAE Technical Paper 2019-01-1199, 2019.
- [3] Noguchi, Y., Chihara, H., Ito, A., Matsumoto, G., Arake, S., "A Study on the Surface Texture of a Cylinder for low Friction and High Reliability," Transaction of Society of Automotive Engineers of Japan 20174840, 1231-1236, 2017.
- [4] Urabe, M., Takakura, T., Metoki, S., Yanagisawa, M. et al., "Mechanism of and Fuel Efficiency Improvement by Dimple Texturing on Liner Surface for Reduction of Friction between Piston Rings and Cylinder Bore," doi:

10.4271/ SAE Technical Paper 2014-01-1661, 2014.

[5] Higuchi, T., Mabuchi, Y., Nakano, S., Mochida, H., "Friction influence of Surface micro texture and roughness on cylinder bore," Tribology Conference 2018 Spring in Tokyo2018 manuscript(A9).

[6] Ito, A., Iwasaki, H., Kurita, H., Sato, T., "A Study on the Measurement Method for Piston Friction Force of an Air-cooled Gasoline Engine under High Engine Speed," Transaction of Society of Automotive Engineers of Japan 20144651, 805-810, 2014.

[7] Kurita, H., Yamagata, H., Arai, H., Nakamura, T., "Hypereutectic Al-20%Si Alloy Engine Block Using High-Pressure Die-Casting," doi: 10.4271/ SAE Technical Paper 2004-01-1028, 2004.

[8] Ubara, T. and Kurita, H., "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 International Journal of Materials and Manufacturing, Vol. 7, No. 1 (January 2014), pp. 207-216.

## ■著者



村瀬 雄太

Yuta Murase

生産技術本部

材料技術部



伊東 明美

Akemi Ito

東京都市大学

内燃機関工学研究室

# 二輪車・車両運動の簡易的な計測・解析技術の開発と活用

Development of a Simplified Method for Measuring and Analyzing Motorcycle Dynamics

品川 晃徳 小林 寛 小島 儀隆

## 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、センサの車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。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。車両運動の基礎理論を用い、前後・横加速度、タイヤに発生する力、サスペンションの伸縮、ライダーの操作量の関連性を定式化した。一例として、走行教育に本手法を活用した。走行が容易なオーバルコースを工学的に設定し、一定速と直線加減速の2パターンで走行した。その結果、ライダー被験者の「走る・止まる・曲がる」の運動特性を抽出できた。さらに、運動特性の改善点を、車両運動理論を用いて考察した。本手法が走行教育に対して有用である可能性を示すことができた。

## 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. Using the basic theory of vehicle dynamics, the relationship between the longitudinal and lateral acceleration, the force generated from the tyres, the suspension expansion/compression, and the rider operation level is formulated. As an example, this method was used for riding education. The oval course, which is easy to drive, was engineered. The rider ran in two patterns: constant velocity in whole section and acceleration/deceleration in straight section. As a result, the riding characteristics of the rider subject to "driving/stopping/turning" could be extracted. Furthermore, improvements in driving characteristics were considered using the vehicle dynamics. We were able to show the potential for this method being useful for riding education.

## 1

## はじめに

二輪車の車両運動を解析する場合、スロットル開度、エンジン回転数、車速、シフトポジション、バンク角、前後ブレーキ液圧、サスペンションストロークなどを計測するセンサを車載し、必要な情報を直接取得することが一般的である<sup>[1]</sup>。センサの準備や車載に多くの工数やコストがかかるが、運動解析自体は取得情報から素早く実施できる利点がある。しかしながら、車両毎にセンサの車載が必要なため、異なる車両の走行性能の比較評価がすぐに実施できないなど、汎用性が低いという課題がある。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する。四輪車の場合、加速度センサを車載し、アクセル・ブレーキ・ステアリング操作と前後・横加速度を関連付け

て、車両運動の計測・解析を行うのが一般的である<sup>[2]</sup>。同様の手法を二輪車に適用する場合、前後・横加速度の座標変換のための姿勢角センサの追加や、前後独立のブレーキ操作・ライダー乗車姿勢の影響を考慮した運動解析が必要となるなど、そのままの適用は難しい。そこで、先行研究の手法<sup>[3][4]</sup>と同様に、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・横加速度を推定する。運動解析のために、車両運動の基礎理論から、車両の前後・横加速度、前後タイヤに発生する駆動力・制動力・横力・上下荷重、フロントサスペンションの伸縮、ライダーのスロットル・ブレーキ操作量、車両のバンク角の関連性を定式化する。一例として、走行教育に活用し、ライダーの運動特性の抽出や改善点の考察に、本手法が有用であるかどうかを検証する。

## 2 物体運動の位置・速度の計測と加速度の推定

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、車載も容易であるが、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 $\Delta t$ [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 $\theta$ [rad]から、以下の式を用いて、前後加速度 $a_{\text{LON}}$ [m/s<sup>2</sup>]と横加速度 $a_{\text{LAT}}$ [m/s<sup>2</sup>]を算出した。

$$\Delta\theta = \tan^{-1}(\Delta y \div \Delta x) \quad (1)$$

$$a_{\text{LON\_GPS}} = \Delta v \div \Delta t \quad (2)$$

$$a_{\text{LAT\_GPS}} = \Delta\theta \div \Delta t \times v \quad (3)$$

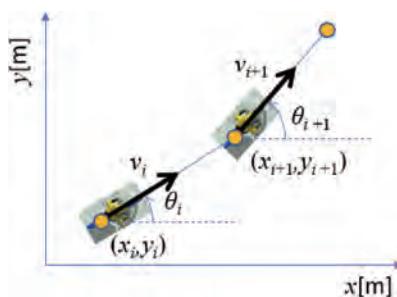


図1 GPSロガーによる位置と速度の計測



図2 小型GPSデータロガー

推定する前後・横加速度の妥当性を検証する。GPSロガーに加えて、振動ジャイロ姿勢センサ(IMU)を車載し、同時に計測を行った。オーバルコースを2周走行したときの両者の結果を比較した。図3はGPSロガーにより計測した位置(走行軌跡)と速度の時系列データである。図4に前後加速度 $a_{\text{LON}}$ [G]、図5に横加速度 $a_{\text{LAT}}$ [G]の時系列データを示す。赤線がGPSロガーの推定値、青線がIMUの計測値を表す。IMUの加速度は、車体座標系で出力されるため、3軸加速度の値を3軸の角度によ

り対地座標系に変換し算出した。その結果、両者はおおむね一致した。GPSロガーの位置・速度の計測値から算出した前後・横加速度の推定値が、妥当であることを検証できた。

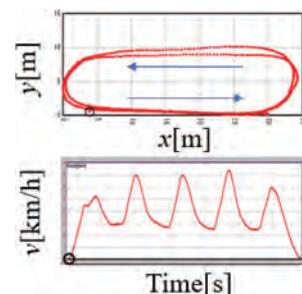


図3 加速度検証時の走行条件

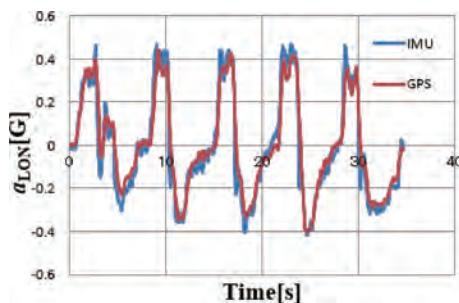


図4 前後加速度・推定値の検証

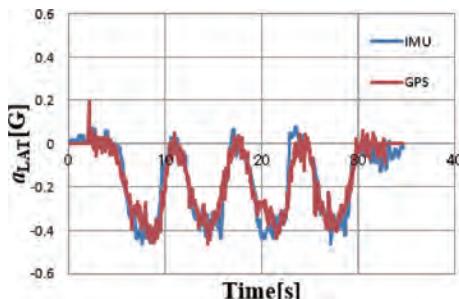


図5 横加速度・推定値の検証

## 3 二輪車の車両運動の解析

前節にて推定した前後・横加速度は、前後・横方向にタイヤが力を発生することで生じている。さらに、前後加速度の発生に伴い、タイヤ間で上下荷重が移動し、タイヤの摩擦状態やサスペンション伸縮に変化が生じる。これらの運動解析を行うため、車両運動の基礎理論を用い、車両の前後・横加速度、タイヤに発生する駆動力・制動力・横力・上下荷重、フロントサスペンションの伸縮、ライダーのスロットル・ブレーキ操作量、車両のバンク角の関連性を定式化する。本節にて述べる理論は既知のものではあるが、「走る・止まる・曲がる」を全て網羅し、車

両運動の理解のために必要最小限な式として簡潔に整理した例はない。直線部での加速時・減速時、曲線部での旋回時に分けて、前後・横加速度と二輪車の車両運動の関係について、以下に述べる。

### 3-1. 直線部での加速時の車両運動

直線部での加速時の車両運動について述べる。図6に示すように、リアタイヤ駆動力  $F_d$ [N]、空気抵抗  $F_{air}$ [N] により、前後加速度  $a_{LON}$ [m/s<sup>2</sup>] が発生している。総重量  $m$ [kg]、エンジントルク  $T_{EG}$ [Nm]、総減速比  $i$ [－]、伝達効率  $\eta$ [－]、リアタイヤ有効半径  $R_d$ [m]、空力係数  $C_d$ [－]、投影面積  $A$ [m<sup>2</sup>]、空気密度  $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>]、車速  $v$ [m/s] により、以下の式で表される<sup>[5]</sup>。ライダーがスロットル操作を行うことで、エンジントルクが上昇し、リアタイヤ駆動力を発生する。

$$a_{\text{LON}} = (F_d - F_{\text{air}})/m \quad (4)$$

$$F_d = T_{\text{EG}} \times \eta \times i \div R_f \quad (5)$$

$$F_{air} = C_d \times A \times 0.5 \times \rho \times v^2 \quad (6)$$

また、前後加速度が生じることで、フロントタイヤとリアタイヤの間で荷重移動が生じる。フロントタイヤ上下荷重  $F_{yz}$ [N] とリアタイヤ上下荷重  $F_{zr}$ [N] は、重心高さ  $H$ [m]、ホイールベース  $L$ [m]、静止状態でのフロントタイヤ上下荷重  $F_{zr0}$ [N]、リアタイヤ上下荷重  $F_{zr0}$ [N] により、以下の式で表される<sup>[5]</sup>。加速時、加速度は正の値なので、フロントタイヤ上下荷重は減少、リアタイヤ上下荷重は増加する。次節で述べるが、フロントサスペンションが伸びる方向に力が作用する。

$$F_{zf} = F_{zf0} - m \times a_{\text{LON}} \times H \div L \quad (7)$$

$$F_{zr} = F_{zr0} + m \times a_{\text{LON}} \times H \div L \quad (8)$$

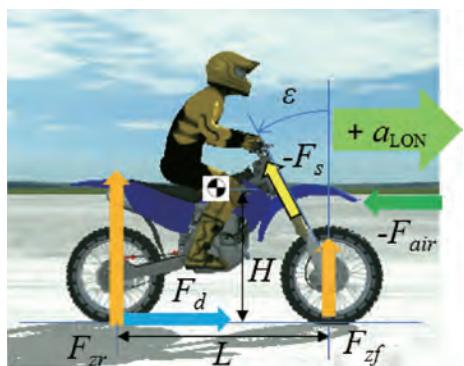


図6 直線部での加速時の車両運動

### 3-2. 直線部での減速時の車両運動

直線部での減速時の車両運動について述べる。図7(b)に示すように、フロントタイヤ制動力  $F_{bf}$ [N]、リアタイヤ制動力

$F_{br}[N]$ 、空気抵抗  $F_{air}[N]$  により、前後加速度  $a_{LON}[m/s^2]$  が発生している。フロントキャリパー面積  $S_f[mm^2]$ 、フロントディスク有効半径  $R_{df}[m]$ 、フロントディスク摩擦係数  $\mu_{bf}$ 、フロントタイヤ有効半径  $R_{tf}[m]$ 、フロントブレーキ油圧  $P_f[MPa]$  より、以下の式で表される<sup>[5]</sup>。リアタイヤについては同様であるので省略する。ライダーがブレーキ操作を行うことで、油圧が上がり、タイヤ制動力が生じる。

$$a_{\text{LON}} = (-F_{air} - F_{bf} - F_{br})/m \quad (9)$$

$$F_{bf} = P_f \times S_f \times R_{df} \div R_{tf} \times \mu_{bf} \quad (10)$$

$$F_{hr} = P_r \times S_r \times R_{dr} \div R_{tr} \times \mu_{hr} \quad (11)$$

前節でも述べたが、前後加速度が生じることで、式(7)(8)のように、フロント・リアタイヤの間で荷重移動が生じる。減速時、加速度は負の値なので、フロントタイヤ上下荷重は増加、リアタイヤ上下荷重は減少する。各タイヤの制動限界は、タイヤと路面の最大摩擦係数を  $\mu = 1$  とすると、以下の式で表される。

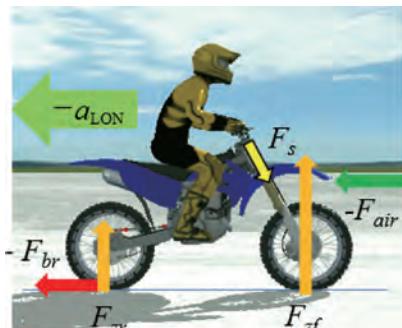
$$F_{bf}/F_{zf} \leq \mu \quad (12)$$

$$E_{bx}/E_{zx} \leq \mu \quad (13)$$

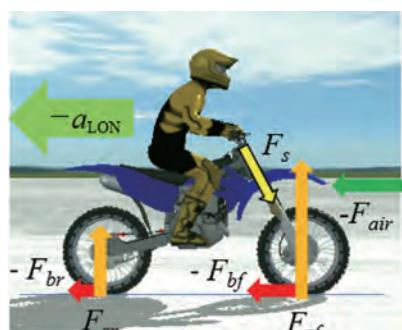
$F_{bf}/F_{zf}$  と  $F_{br}/F_{zr}$  は、前後タイヤの摩擦状態を表しており、 $\mu$ に達すると、タイヤがロックすることを意味する。さらに、荷重移動とフロントタイヤ制動力により、フロントサスペンションを縮める力  $F_s$ [N] が作用する。キャスター角  $\epsilon$ [rad] のとき、以下の式で表される<sup>[6]</sup>。

$$F_s = -m \times a_{\text{ION}} \times H \div L \times \cos \varepsilon + F_{bf} \times \sin \varepsilon \quad (14)$$

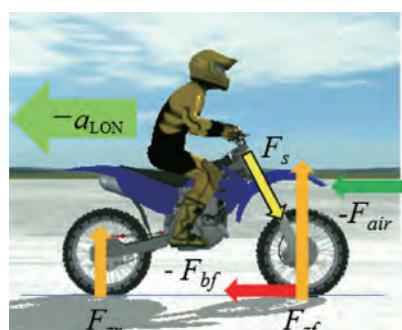
一例として、空気抵抗を無視し、 $H = 600[\text{mm}]$ 、 $L = 1290[\text{mm}]$ 、 $F_{zf0} = 663[\text{N}]$ 、 $F_{zr0} = 1075[\text{N}]$  の場合を仮定、減速度0.4Gでの車両運動について考察する。図7(a)はリアブレーキのみの場合で、 $F_{bf}/F_{zf} = 0$ 、 $F_{br}/F_{zr} = 1$ となる。リアタイヤの制動力が限界に達しており、リアブレーキのみで生じる最大の減速度は0.4Gであることがわかる。図7(b)はフロントブレーキとリアブレーキの場合である。ブレーキの配分を適切にした時、 $F_{bf}/F_{zf} = F_{br}/F_{zr} = 0.4$ となり、最もタイヤの摩擦が小さくなる。図7(c)は、フロントブレーキのみの場合で、 $F_{bf}/F_{zf} = 0.7$ 、 $F_{br}/F_{zr} = 0$ となっている。フロントタイヤの摩擦が大きくなるとともに、式(14)よりフロントサスペンションが縮み、車両が図7(b)よりも前傾姿勢となることがわかる。二輪車はフロントとリアのブレーキが独立した2入力となっている。変動する上下荷重に対して適切な前後ブレーキ操作を行うことで、前後タイヤの摩擦と車両の前傾姿勢変化を最小限することができる。



(a) リアブレーキのみで制動



(b) フロント・リアブレーキで制動



(c) フロントブレーキのみで制動

図7 直線部での減速時の車両運動

### 3-3. 曲線部での旋回時の車両運動

曲線部での旋回時の車両運動について述べる。ライダー姿勢をリーンウイズ、旋回によるタイヤの接地点の移動はないものと仮定する。フロントタイヤ横力  $F_{yf}$ [N] とリアタイヤ横力  $F_{yr}$ [N] により、横加速度  $a_{LAT}$ [m/s<sup>2</sup>] が発生している。バンク角を  $\gamma$ [deg] とすると、以下の式で表される<sup>[6]</sup>。

$$a_{LAT} = (F_{yf} + F_{yr})/m \quad (15)$$

$$F_{yf} = F_zf \times \tan \gamma \quad (16)$$

$$F_{yr} = F_zr \times \tan \gamma \quad (17)$$

$$a_{LAT} = g \times \tan \gamma \quad (18)$$

式(18)を図示すると、図8のようになる。バンク角が大きいほど

横加速度が大きくなる。同一の横加速度で、リーンインの乗車姿勢の場合、車体バンク角は  $\gamma$  よりも小さくなる。タイヤを立てて使うことで、前後方向の力の伝達能力は大きくなる。リーンアウトの乗車姿勢の場合、車体バンク角は  $\gamma$  よりも大きくなる。タイヤを寝かせて使うことで、前後方向の力の伝達能力は小さくなる<sup>[7]</sup>。

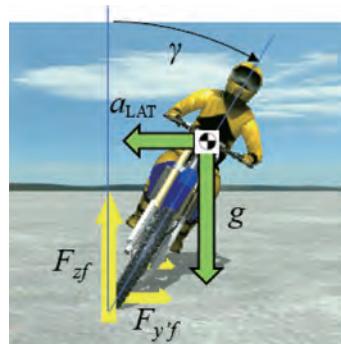


図8 曲線部での旋回時の車両運動

## 4 走行教育での活用事例

GPSロガーにて位置・速度を計測、前後・横加速度を推定し、基礎理論を用いて二輪車の車両運動を解析する手法を構築した。一例として、走行教育に本手法を活用し、有効性について検証する。活用目的は、ライダー被験者の「走る・止まる・曲がる」の運動特性を抽出し、改善点を車両運動解析により考察することとした。まずは、走行するコースの形状について検討する。運動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旋回半径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600cm<sup>3</sup>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、「曲がる」の運動特性を抽出する。2セット目は、直線路で加減速操作を行う。「走る・止まる」の運動特性を抽出し、減速操作追加による「曲がる」の運動特性への影響を考察する。旋回時に乗車姿勢を撮影し、横加速度の発生要因の詳細を考察する。

### 4-1. 指導員の運動特性

目指すべき姿を明確にするため、走行教育における指導員の運動特性を解析する。「走る・止まる・曲がる」の運動特性を直感的にわかりやすくするため、走行軌跡に前後加速度・横加速度をそれぞれグラデーションで上書き表示することで表した。前後加速度においては、青色が濃いほど加速度が大きく、赤色

が濃いほど減速度が大きいことを表している。横加速度においては、青色が直線部を表し、赤色が大きいほど横加速度が大きいことを表している。一定速走行時のグラフと乗車姿勢を図9に示す。大きな横加速度が発生し、リーンインの乗車姿勢となっていた。加減速走行時のグラフと乗車姿勢を図10に示す。大きな前後加速度が発生し、さらに、一定速走行時と同等の大きな横加速度が発生、乗車姿勢も不变であった。直線部では、適切な前後ブレーキ操作により前後タイヤの摩擦と車両の前傾姿勢変化を最小限とし(図7(b)参考)、曲線部では、リーンインの乗車姿勢によりタイヤを立てて使用することで余裕をもたせていると想定される。大きな前後・横加速度を生じながらも、タイヤへの負担は最小限となっているのが、指導員の運転特性であると考察した。

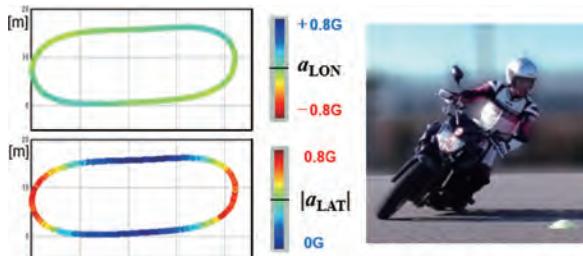


図9 指導員の走行データと乗車姿勢(一定速走行)

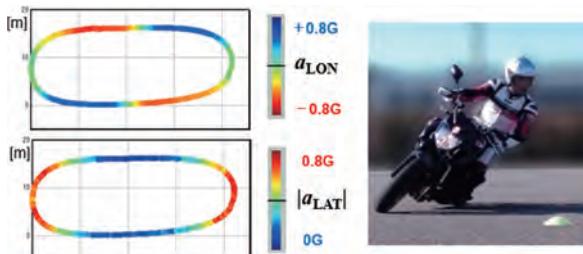


図10 指導員の走行データと乗車姿勢(加減速走行)

#### 4-2. 被験者の運転特性

次に、被験者(筆者)の運転特性を解析する。一定速走行時のグラフと乗車姿勢を図11に示す。指導員よりも横加速度が小さな値であり、乗車姿勢はリーンウィズとなっていた。加減速走行時のグラフと乗車姿勢を図12に示す。大きな加減速度が生じていたが、横加速度は一定速走行時よりも小さくなり、乗車姿勢もリーンアウトとなっていた。フロントブレーキが強めの制動操作(図7(c)参考)のため、車両が前傾姿勢になってしまい、横加速度の低下や乗車姿勢の乱れにつながったと想定される。横加速度の大きさが小さいことと、大きな前後加速度は生じているものの、前後ブレーキ配分が最適化されていないことが、被験者の運転特性であり、今後の改善点であると考察した。

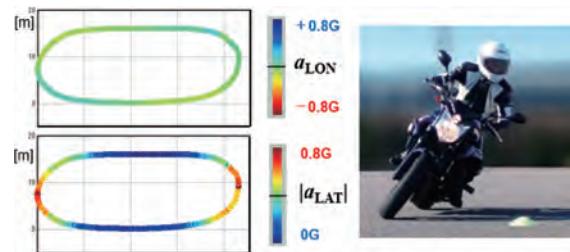


図11 被験者の走行データ(教育前・一定速走行)

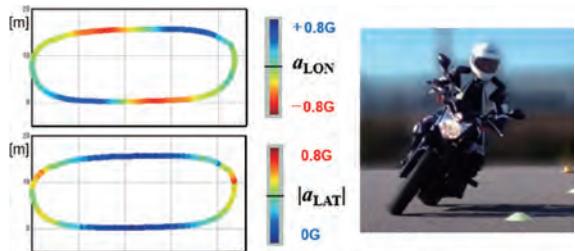


図12 被験者の走行データ(教育前・加減速走行)

上記の結果について、指導員と現状課題を共有した。第一段階として、車両倒し込みの習得とリーンウィズ乗車姿勢の取得、第二段階として、車両姿勢変化の少ないリアブレーキのみ(図7(a)参考)での乗車姿勢の維持、を目標として設定した。年間を通して、計5回の訓練を実施した。その結果を図13、図14に示す。走行教育前に比べ、乗車姿勢が改善し、リーンウィズの乗車姿勢と適切な車両倒し込みを習得できた。横加速度は増加し、リアブレーキ減速による影響もほとんど生じなかった。

以上より、ライダー被験者の「走る・止まる・曲がる」の運転特性を抽出し、改善点を車両運動解析により考察することができた。さらに、段階的な目標設定と訓練により、運転特性を改善できた。本手法が走行教育へ有用である可能性を示すことができた。

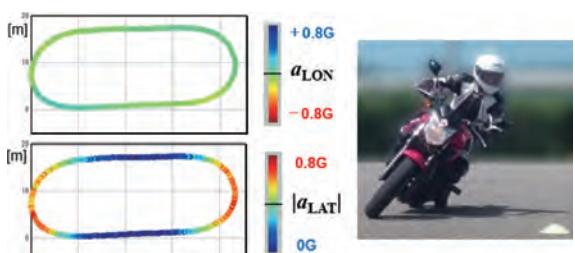


図13 被験者の走行データ(教育後・一定速走行)

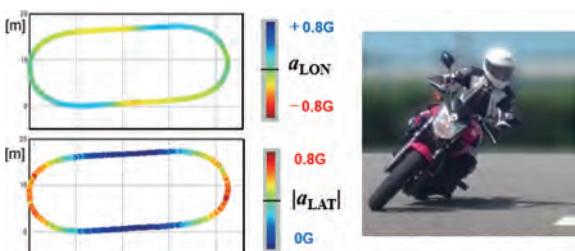


図14 被験者の走行データ(教育後・加減速走行)

## 5 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。振動ジャイロ姿勢センサとの比較により、推定値が妥当であることを検証した。車両運動の基礎理論を用い、前後・横加速度、タイヤに発生する力、サスペンションの伸縮、ライダーの操作量の関連性を定式化した。特に、減速時は、減速度自体が同じでも、前後ブレーキの配分によりタイヤの摩擦状態や車両姿勢が大きく異なることを示した。一例として、走行教育に本手法を活用した。走行が容易なオーバルコースを工学的に設定し、一定速と直線加減速の2パターンで走行した。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。その結果、ライダー被験者の「走る・止まる・曲がる」の運動特性を抽出できた。さらに、運動特性の改善点を、車両運動理論を用いて考察した。本手法が走行教育に対して有用である可能性を示すことができた。本論文で得られた知見の一部は、YRA (Yamaha Riding Academy) 大人のバイクレッスンにおける YRFS (Yamaha Riding Feedback System) にて導入されている<sup>[8]</sup>。

### ■著者



品川 晃徳

Akinori Shinagawa

技術・研究本部

研究開発統括部

先進システム開発部



小林 寛

Hiroshi Kobayashi

技術・研究本部

研究開発統括部

先進システム開発部



小島 儀隆

Yoshitaka Kojima

技術・研究本部

研究開発統括部

基盤技術研究部

### ■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] 梅津大輔, 岡本隆秀, 八木淳, 虫谷泰典, 斎藤茂樹:新型ブレマシー ダイナミックフィールの統一感, マツダ技報, No. 28 (2010), pp. 13-18
- [3] 品川晃徳, 野澤久幸, 内山裕太郎:全日本クロスカントリー選手権におけるオフロード二輪車の走行データ解析, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 854(2017)
- [4] 品川晃徳, 野澤久幸, 増田智義:全日本選手権におけるモタード二輪車の走行データ解析, 日本機械学会 交通・物流部門大会講演論文集, No. 26(2017)
- [5] 景山克己, 景山一郎:自動車工学, 理工図書(1984)
- [6] Vittore Cossalter: Motorcycle Dynamics, Lulu(2006)
- [7] カヤバ工業株式会社:オートバイのサスペンション, 山海堂(1993)
- [8] <https://www.yamaha-motor.co.jp/mc/yra/otona/>

小林 孝幸 杉村 拓実 水谷 浩幸 栗田 洋敬

本稿は、公益社団法人 日本自動車技術会 2021年日本自動車技術会 秋季大会 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 日本自動車技術会に属し、無断複製・転載を禁じます。

### 要旨

小型電動車両には薄型で高トルクなモーターが要求される。本開発では圧粉コア(SMC)を用い、その磁気的・機械的特性を考慮したアキシャルギャップモーターの開発をおこなった。ステータのティースとバックヨークを別体構造とし、ティースとバックヨークのクリアランスを調整することで最適な磁気回路を実現し、薄型高トルク化を実現した。また、トルクを維持しつつ磁石とコアの形状および位置関係の最適化をおこないコギングトルクの最小化を図った。

### Abstract

An axial gap motor for a small mobility using soft magnetic compound (SMC) cores was designed and prototyped considering its magnetic and mechanical properties. Teeth and a back yoke for a stator were separated and an optimum magnetic circuit was realized by controlling the clearance between the teeth and the back yoke. The performance of the prototyped motor was satisfied with the designed torque and rotational speed. Then, for the minimization of a cogging torque, the size and location of magnets of the rotor were optimized, consequently the cogging torque was minimized keeping a motor torque.

## 1 まえがき

カーボンニュートラルに向けた社会的要請の高まりを受け、近年低速小型モビリティ(図1)への注目度が高まりを見せている。これらは屋外での使用とともに屋内での使用も想定されることから、動力として電動(モーター駆動)が多く採用されている。これら小型電動モビリティには高トルク密度、高効率、低騒音等の特性が要求され、これら要求特性に応じてモーターの形式やそこに使用される材料が適宜選定されている。

モーターを構成する主要材料にコアを形成する軟磁性材料がある。軟磁性材料には従来広く用いられている電磁鋼板の他にアモルファス薄帯や軟磁性粉末材料があり、図2に示すように使用される周波数、要求される磁束密度に応じて使い分けがなされている。

この中で軟磁性粉末材料は電磁鋼板とアモルファス薄帯の中間的性質を有しており、高周波特性および等方的磁気特性を活かし、従来より主として車載用リアクトルコア<sup>[1][2]</sup>やDC-DCコンバータのチョークコイル用のコア<sup>[3]</sup>等に適用されている。

また粉末材料を型内で成形固化することによる成形自由度を活かし、駆動用モーターへの適用も検討されており、ラジアルギャップ、アキシャルギャップ、クローティース等の様々な形状で提案がなされている<sup>[4][5][6][7]</sup>。しかしながら現状は圧粉コアが広く駆動用モーターに使用される状況には至っておらず、

主機用モーターへの適用は一部高性能四輪車への適用<sup>[8][9]</sup>に留まっており限定的である。



図1 小型低速モビリティ

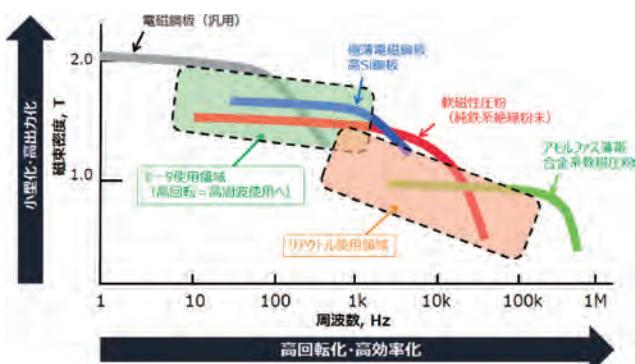


図2 各種軟磁性材料の磁気特性

圧粉コアは粉末の圧縮固化成形および熱処理条件によって磁気特性、強度特性が大きく異なる。そのため駆動用モーターとして成立させるためには、これら成形加工および熱処理条件が磁気特性および強度特性に及ぼす影響を把握し、モーター設計に反映させる必要がある。また特徴の一つである3次元的な磁束の流れを踏まえ、磁束の還流等が生じない磁路設計を行う必要がある。

本稿では適用対象としてJIS T9208:2016の規格を満たした小型低速モビリティ<sup>[10]</sup>を選択し、必要な動力特性を確保しつつ、快適性等の商品要求に対応するため、モーターの基本構造および最適磁気回路の検討を行った。

## 2 粉末および粉未成形品の特性

### 2-1. 軟磁性粉末

材料はHöganäs社製純鉄系軟磁性粉末であるSomalloy 700 3P<sup>[11]</sup>を用いた。粉末は99.99% (4N)の純鉄を水アトマイズすることで製作され、噴霧した液滴が表面張力によって真球状になる前に凝固させることで図3に示すような表面に凹凸を有する粉末を得ている。この凹凸が圧縮成形時に噛み合うことで一定レベルの成形体強度を得ることができる。

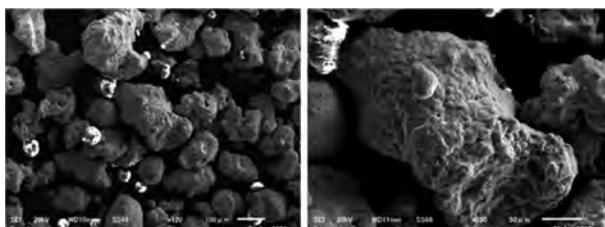


図3 軟磁性粉末の外観

### 2-2. 圧粉コアの磁気特性および機械的性質

圧粉コアを構成する軟磁性粉末は、粉末表面にリン酸系絶縁被膜が施され、粉末同士が絶縁された状態となっている。そのため3次元的に磁束を流すことができ、かつ渦電流の発生を各粉末粒子内に抑えることで鉄損の抑制が可能となる。

リング状試験片を用いて行った交流磁気特性測定結果を図4に示す。成形体密度を7.30、7.40、7.59g/cm<sup>3</sup>と変化させ、所定の熱処理を施したリング状試験片を用い、外部磁場に対する磁束密度の変化を、交流 BH アナライザを用いて計測した。計測時には電磁鋼板(35A440)も併せて計測し比較対象とした。圧粉コアの磁束密度は、成形体密度の増加とともに増加した。透磁率については密度7.40および7.59g/cm<sup>3</sup>の試験片ではほぼ同じ値であるが、7.30g/cm<sup>3</sup>の試験片では小さな値を示

した。電磁鋼板に対しては磁束密度、透磁率共に小さな値を示した。圧粉コアの磁束密度が成形体密度の増加とともに増加することはよく知られており、Somaloy 500を用いた評価では成形体密度の増加に伴い磁束密度が直線的に増加することが報告<sup>[12]</sup>されている。本研究の結果においても圧粉コアの磁束密度は成形体密度の増加とともに増加しているが、増加率については成形体密度7.40から7.59g/cm<sup>3</sup>の磁束密度増分は、成形体密度7.30から7.40g/cm<sup>3</sup>の磁束密度増分よりも小さく、その増加傾向は直線的ではなく、異なる傾向を示した。これは粉末粒子上の絶縁被膜厚さ、成形および熱処理条件等の違いに起因するものと思われる。

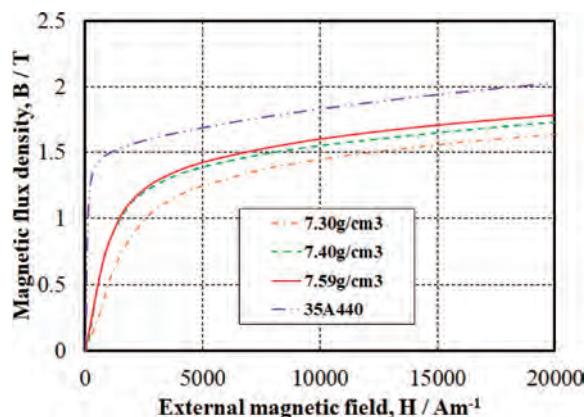


図4 圧粉コア及び電磁鋼板(35A440)の外部磁場と磁束密度の関係。透磁率  $\mu = B/H$

次いで圧粉コアの強度評価として密度7.59g/cm<sup>3</sup>とし、所定の熱処理を施した10×10×55mmの試験片を用いて4点曲げ試験を実施した。図5に代表的な応力歪み線図を示す。破壊の形態は圧粉粒子境界に沿って主亀裂が進展する脆性破壊であり。破面観察から塑性変形の痕跡は認められなかった。30本の評価を行った結果、曲げ強度は100±10MPaであった。4点曲げ強度のワイブルプロットを図6に示す。粒界強度が曲げ強度と直接的な相関があるものと思われる。

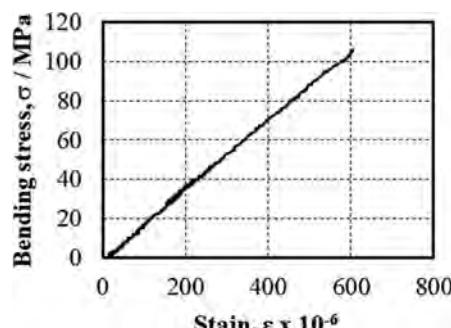


図5 圧粉コアの4点曲げ応力歪み線図

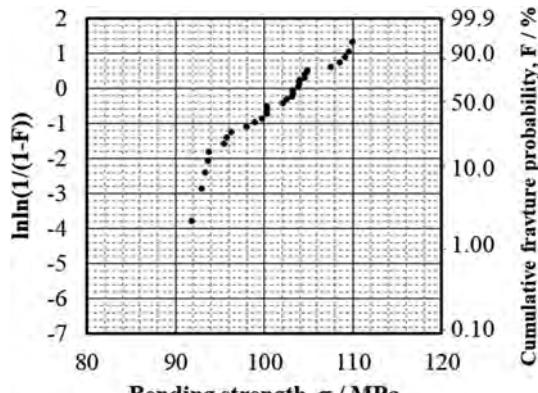
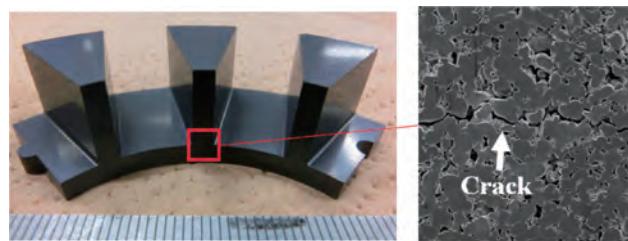
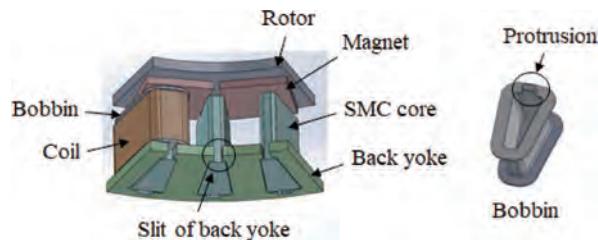


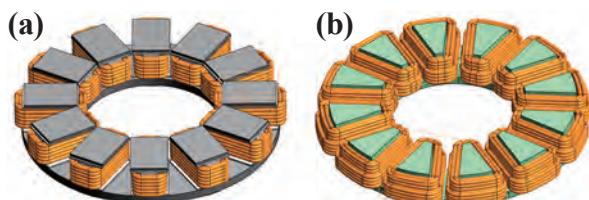
図6 4点曲げ強度のワイブルプロット

図8 圧粉コアの4分割ステータコア  
(a)コア外観 (b)ティース根元部の微小き裂図9 ステータ及びローターの基本構造  
ステータは圧粉コア、バックヨーク、ボビン及びコイルより成り、  
圧粉コアとバックヨークは別体として、ステータに設けた  
勘合孔に圧粉コアを挿入する構造

### 3 圧粉コアを用いたモーターの基本構造

#### 3-1. モーター構造の検討

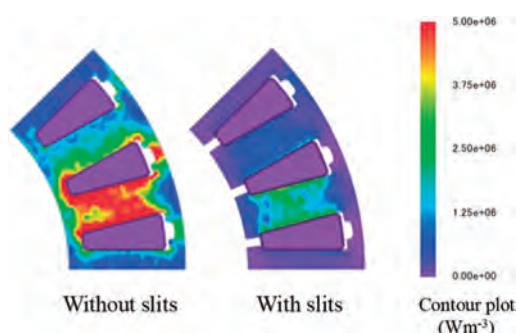
モーター構造としては小型モビリティに多く用いられているアキシャルギャップ型とすることとした。従来アキシャルギャップ型のコアは電磁鋼板を打ち抜き、積層しているため、巻線部分は直方体形状にせざるを得ず、図7(a)に示すようにコイルの占積率を上げられないという課題があった。ここに圧粉コアを適用することで巻線部分を略三角柱形状とし図7(b)に示すようにコイルの占積率を向上させ、モーターとしてのトルク密度向上が可能となる。

図7 アキシャルギャップ型モーターのステータコア構造  
(a)電磁鋼板コア、(b)圧粉コア

コアとバックヨークは当初4分割一体構造(図8(a))を検討したが、圧粉成形時に肉厚差の大きなコア根元部分に粒子同士が接合できていない微小亀裂(図8(b))が生じた。そのため図9に示すようにコアとバックヨークを別体構造とし、コアは圧粉により成形、バックヨークは電磁鋼板の積層構造とし、圧粉コアを電磁鋼板バックヨークに嵌めこむ構造とした。

#### 3-2. 磁気回路の検討

次いで別体構造詳細検討として、バックヨーク形状詳細について述べる。バックヨーク内周側には切り欠きを設けた。内周側切り欠き有無によるバックヨークに発生するジュール損失の違いを電磁界解析(JSOL 製 JMAG-Designer)により計算した結果(V相、q軸状態)を図10に示す。内周側切り欠きが無い場合、コアの周間に磁束の還流が生じ、渦電流が発生することでバックヨークに約17Wのジュール損失が発生している。一方、内周側に切り欠きを設けた仕様ではジュール損失は約7Wに抑えられており、内周側切り欠き構造が効率向上に寄与していることが確認された。

図10 バックヨーク勘合部の内周側切り欠き有無による  
ジュール損失比較(V相 q軸状態)

次いでバックヨークとティースのクリアランスがモーター性能に及ぼす影響について述べる。バックヨークに設けられた圧

粉コア嵌め込み部形状には内周側切り欠きとともに、外周側にもクリアランスを設けている。これは圧粉コアをバックヨークに嵌め込む際の作業性を確保するためであるが、この構造により圧粉コアの径方向位置によってバックヨークと圧粉コア斜辺のサイドクリアランスが変化する(図11(a))。また圧粉コアの配置パターンとして片側の斜辺がバックヨークと接触している場合(Case A)と両側の斜辺に均等なサイドクリアランスを有する場合(Case B)を想定し、圧粉コアの径方向位置を変化させた時のモータートルクを電磁界解析により計算した。結果を図11(b)に示す。Case A、Case Bいずれの場合も径方向位置が内径側に向かうにつれてトルクは増大し、圧粉コアがバックヨーク内周側切り欠きに接する径方向位置0の点で最大となった。またCase AおよびBを比較すると、圧粉コアの片側がバックヨークに接しているCase Aの方が発生トルクは大きくなつた。これは圧粉コアが内径側に位置するに従い斜辺部分のクリアランスが減少し、隣り合う磁極間の磁束が増大しているためであると考えられた。そこで圧粉コアに装着するボビン(図9参照)外周部に突起を設け、圧粉コアを内径側に押し付けることで斜辺部分のクリアランス最小化を図った。

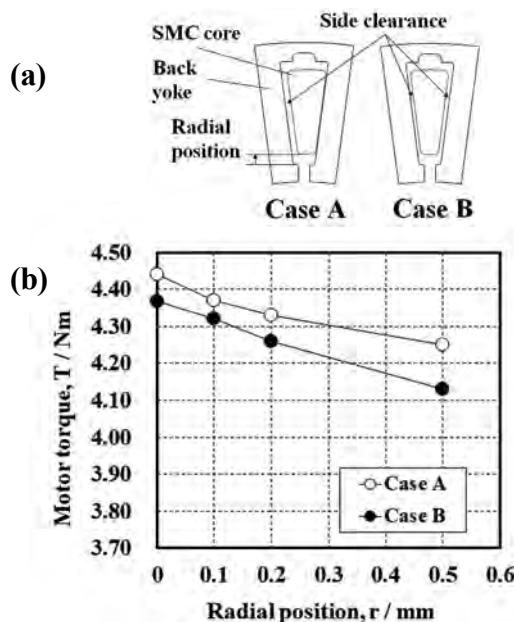


図11 モータートルクに及ぼす圧粉コア径方向位置の影響  
(a) バックヨークと圧粉コア斜辺のサイドクリアランス  
CASE.A, CASE.B  
(b) 圧粉コアの径方向位置とモータートルクの関係

## 4 モーター性能の最適化

### 4-1. モーター諸元と基本性能

上述の検討に基づいて決定したモーターの基本諸元を表1

に示す。モーター特性は22Apeak 時の最大トルク4.35Nm、無負荷回転数1,250rpmとして設計を行つた。モーター構造はアキシャル形式16極24スロットのSPMモーターとし、外径146mm、厚さ23.8mmとした。ステータを構成するティースには前述の通り圧粉コアを用い、組み合わせるバックヨークは汎用電磁鋼板積層構造とした。コイルは線径1.3mmの銅線を18ターン巻き付けて構成することとした。この基本諸元に基づき設計したモーターについて電磁界解析を実施し、トルク4.4Nm、無負荷回転数1,300rpmとなることを確認した。

上記諸元に基づきモーターの試作および性能測定を行つた。モーターおよび構成部品であるローター、ステータを図12に示す。図13にモーター性能測定に用いたベンチの構成を示す。供試モーターには直流電源からインバーターを介してU、V、Wの3相の電流が供給される。供試モーターの回転数はPLC(Programmable logic controller)につながれた誘導機により制御され、供試モーターのトルクは出力軸に取り付けられたトルクメータにより計測した。効率は所定回転数における供試モーターの最大出力をインバーターより投入される電力で除して求めた。得られた性能測定結果と電磁界解析によるシミュレーション結果を併せて図14に示す。

表1 開発モーターの基本仕様

Slot number	24
Pole number	16
Coil	$\phi 1.3 \times 18$ turns
Magnet	50 MGOe
Motor size	OD $\phi 192 \times t23.8$
Voltage	36V
Max. current	22A



図12 左図:モーターの外観 右図:ステータ外観

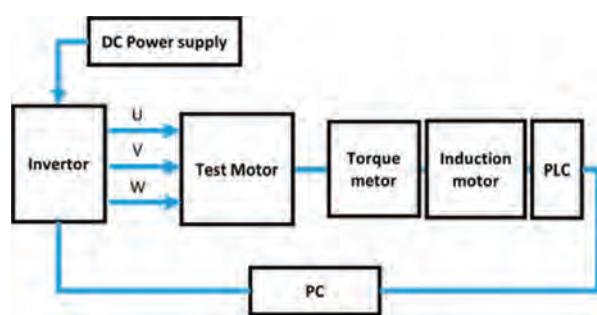


図13 モーター駆動性能計測用のベンチ構成

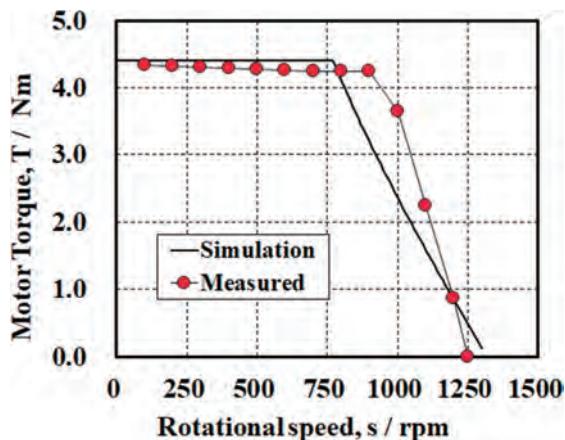


図14 モーター性能測定結果と電磁界解析結果

実測の結果、モーター回転数の増加に伴い、トルクは緩やかに低下し、900rpmを超えると急速に低下し、1,250rpmでトルクはゼロとなった。シミュレーション結果と比較すると、実測トルクは低い値となっており、トルク低下が始まる回転数は高い値となっていた。この理由としてシミュレーションで考慮していない鉄損、機械損の影響が考えられる。またシミュレーションでは750rpmでトルク低下が始まるのに対し実測では900rpmでトルク低下が始まっている理由としては、シミュレーションと実測で、1) 発生誘起電圧が異なったこと、2) 卷線抵抗分の電圧降下量が異なったこと等が考えられる。誘起電圧に影響を及ぼす因子としてはマグネットと圧粉コア間の距離であるエアギャップ量があるが、モーター組み立て時にギャップ量を実測、調整しているため、発生誘起電圧が大きく異なることは考え難い。一方、巻線抵抗については、実際の試作品巻線抵抗は電磁界解析で設定した巻線抵抗値より小さかった可能性がある。電磁界解析時の巻線抵抗の設定は、巻線時の巻太りなどを考慮して設定している。今回試作時には占積率向上のため巻太り抑制の施策を講じており、これにより電圧降下が抑制され、計算時よりトルク低下開始点が高回転側にずれたものと思われる。

#### 4-2. コギングトルクの低減

モーターの品質要求の一つにコギングトルクの低減がある。コギングトルクは永久磁石磁界による磁気エネルギーがローター回転角度とともに変化することで生じる脈動トルクであり、ラジアルモーターにおいてはコギングトルク低減の取り組みがなされ、ステータスロット数と磁石極数の組み合わせ、着磁パターン(スキー)の最適化、鉄心への溝形状等の付与等種々の方策が提案されている<sup>[13][14][15][16]</sup>。一方アキシャルギャップモーターにおいてはティースおよび磁石の輪郭線を互いに非平行状態とする試み<sup>[17]</sup>や、ティースに対する磁石の寸法およ

び位置を変化させてコギングトルクを抑制する試み<sup>[18]</sup>がなされている。

本論では図15に示す略台形の断面形状を有する圧粉コアと正方形断面を有する磁石の組み合わせにおいて、磁石幅と径方向位置をパラメータとしコギングトルクを最小化できる位置関係を電磁界解析により探索した。図16に計算結果を示す。いずれの径方向位置においても磁石幅の増加に伴いコギングトルクは減少し、最小値に達した後に増加に転ずる挙動を示した。また磁石外径位置の増加に伴いコギングトルクの増減を示す線は磁石幅が大きい側に移動した。

磁石外径位置63.5mmの場合の最小コギングトルク値近傍のコギングトルク波形(計算値)を図17に示す。磁石幅の増加に伴いコギングトルク波形の振幅は減少し、17.1mmで最小となった後再び増加に転じた。

図16中の各々の磁石外径位置におけるコギングトルク最小値を示す磁石幅でのモータートルクの電磁界解析による解析結果を図18に示す。磁石外径位置の増加に伴い、モータートルクは漸増する傾向を示し、63mm付近ではほぼ一定値となった。

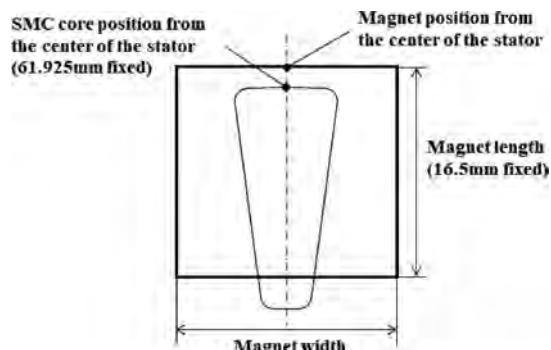


図15 圧粉コアと磁石の位置関係。磁石の径方向位置と磁石幅設計パラメータとし、圧粉コアと磁石長は固定

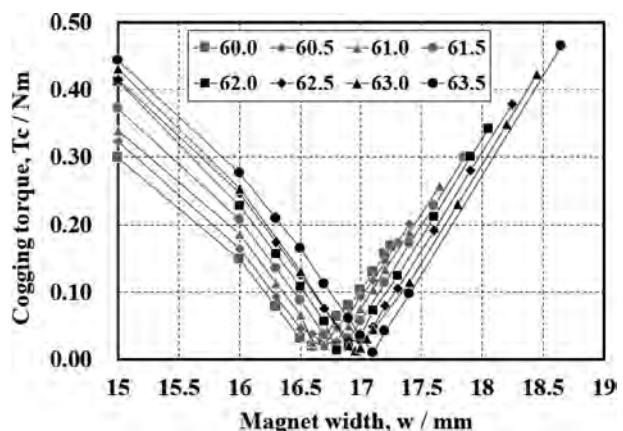


図16 コギングトルクに及ぼす各径方向磁石位置における磁石幅の影響(磁石位置:60.0mm から63.5mm)

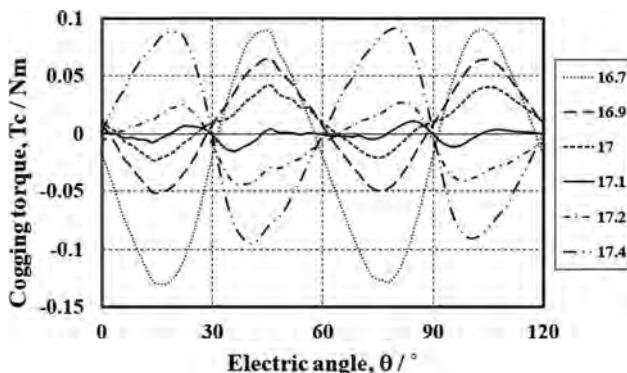


図17 コギングトルク波形に及ぼす磁石幅の影響  
(径方向磁石位置:63.5mm)

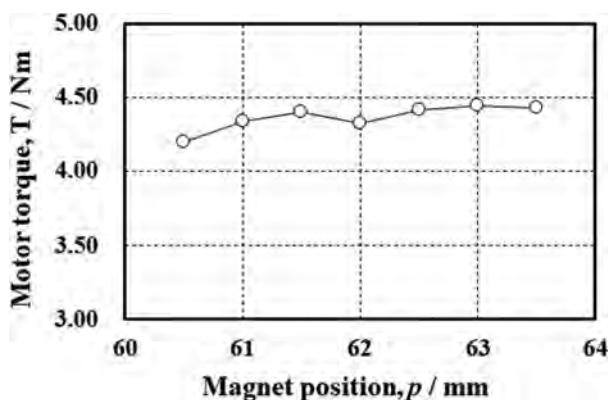


図18 モータートルクと磁石位置の関係

アキシャルモーターのコギングトルクは円周方向磁石ピッチに対する円周方向磁石長さの比および円周方向のティースピッチに対するスロット幅の比により変化する。またアキシャルモーターのローター位置  $\alpha$  におけるコギングトルク  $T_{cog}$  は以下のように表される。

$$T_{cog}(\alpha) = \sum_{i=1}^N T_{cog,i}(\alpha) \quad (1)$$

ここで  $N$  は半径方向の分割数であり、コギングトルクは半径方向の各々の位置におけるコギングトルクの重ね合わせにより決まる<sup>[18]</sup>。今回の検討で得られたコギングトルク最小値を示す条件においては  $T_{cog,i}$  の最小化あるいは各半径方向位置  $i$  における  $T_{cog,i}$  の相互作用(互いにトルクを相殺)が起こっているものと思われるが詳細検討は今後の課題である。

これらの結果より磁石外径位置と磁石幅を最適化することによりモータートルクを減少させることなくコギングトルクを大幅に低減可能であることが分かった。モータートルクとコギングトルクを最適化できる磁石の配置、寸法として磁石外径位置 63mm、磁石幅 17.1mm を選択し試作評価を実施、実機でモータートルク約 4.3Nm、コギングトルク約 0.05Nm の結果を得た。

コギングトルクの実測値と解析値のずれは磁石寸法および貼り付け位置精度が影響しているものと思われ、この精度向上は今後の課題である。

## 5 まとめ

純鉄系軟磁性粉末の圧縮成形および熱処理条件が圧縮成形体の磁気特性および強度特性に及ぼす影響を検討した上で、圧粉コアとバックヨーク別体構造アキシャルギャップ型モーターの設計仕様を検討し、ジュール損失を抑え高トルク密度を得られるモーター諸元を決定した。またコギングトルクの最小化を図るべく磁石配置および寸法の最適化を行い、モータートルクは維持しつつ、コギングトルクを最小化することができる磁石配置および寸法を見出した。

本開発モーターは小型低速モビリティに搭載し、市場実証に供した。

## ■参考文献

- [1] 五十嵐直人, 魚住真人, 小菅敏行, 佐藤淳, 草別和嗣, 山口浩司:車載用リクトルの小型化を可能にした純鉄系圧粉コア, SEI テクニカルレビュー, 186(2015)p. 92.
- [2] 石原千生, 小川哲矢, 中山紀行:粉末冶金法を用いたリクトルおよびモータ向け圧粉磁心, 日立化成テクニカルレポート, 62(2019)p. 15.
- [3] 徳岡輝和, 前田徹, 伊志嶺朝之:圧粉軟磁性材料の開発, 素形材, 52, 8(2011)p. 11.
- [4] 渡辺麻子, 斎藤達哉, 上野友之, 鶴田聖, 中村悠一:圧粉磁心による薄型・高トルクなアキシャルギャップモーターの実現, SEI テクニカルレビュー, 192(2018)p. 119.
- [5] 榎本祐治, 伊藤元哉, 正木良三, 山崎克之, 浅香一夫, 石原千生, 大岩昭二:圧粉磁心の磁気特性比較及びモータ特性の評価, 電気学会論文誌 D, 125, 1(2005)p. 106.
- [6] 田島伸, 服部毅, 堀田昇次, 近藤幹夫, 岡島博司, 東山潔, 岸本秀史:金型潤滑温感成形法により作製した高密度圧粉磁心(HDMC)の特性, 粉末および粉末冶金, 50, 7(2003)p. 577.
- [7] Ryosuke Akaki, Kazuhiko Matsunami, Tatsuji Mori: Variable Magnetic Flux PM-Motor with Automatically Flux Weakening Technique, EVD31 & EV Tec 2018, Kobe, Japan(2018)20189225.
- [8] <https://www.forbes.com/sites/michaeltaylor/2020/06/25/ferrari-sf90-stradale-driven-and-its-astonishing/?sh=1bfafbb83649>
- [9] <https://www.koenigsegg.com/car/regera/>

- [10] [https://global.yamaha-motor.com/jp/news/2021/0421/neemo.html#\\_ga=2.154086200.1662357184.1626053064-1378429845.1591225588](https://global.yamaha-motor.com/jp/news/2021/0421/neemo.html#_ga=2.154086200.1662357184.1626053064-1378429845.1591225588)
- [11] [https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/sharepoint/brochures-and-datasheets--all-documents/somaloy\\_somaloy-3p-material-data\\_2273hog.pdf](https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/sharepoint/brochures-and-datasheets--all-documents/somaloy_somaloy-3p-material-data_2273hog.pdf)
- [12] 田島伸, 服部毅, 堀田昇次, 近藤幹夫, 岡島博司, 東山潔, 岸本秀史: 金型潤滑温感成形法により作製した高密度圧粉磁心(HDMC)の特性, 粉末および粉末冶金, 50, 7 (2003) p. 577.
- [13] 大西和夫: 永久磁石ブラシレスモータのコギングトルク低減, 電気学会論文誌 D, 122, 4 (2002) p. 338.
- [14] 後藤誠, 小林一二: 直流モータのコギングトルクの解明と新しい低減方法, 電気学会論文誌 B, 103, 11 (1983) p. 711.
- [15] 蔡見崇生: 着磁の最適化による EPS 用永久磁石モータのコギングトルク低減: 電気製鋼, 76, 3 (2005) p. 171.
- [16] 榎本裕治, 北村正司, 酒井俊彦, 大原光一郎: 分割コアモータのコギングトルク要因分析, 電気学会論文誌 D, 124, 1 (2004) p. 85.
- [17] 豊田中央研究所: アキシャル型永久磁石モータ, 特許第4645130号, 2011-03-09.
- [18] Linyuan Xiao, et al.: Cogging Torque Analysis and Minimization of Axial Flux PM Machines With Combined Rectangle-Shaped Magnet, IEEE Transactions on Industry Applications, 53, 2 (2017) p. 1018.

## ■著者



小林 孝幸

Takayuki Kobayashi

技術・研究本部  
研究開発統括部  
基盤技術研究部

杉村 拓実

Takumi Sugimura

技術・研究本部  
研究開発統括部  
基盤技術研究部

水谷 浩幸

Hiroyuki Mizutani

ランドモビリティ事業本部  
SPV事業部  
JW ビジネス部

栗田 洋敬

Hirotaka Kurita

技術・研究本部  
研究開発統括部  
基盤技術研究部

当論文は、JSAE 20179018 / SAE 2017-32-0018として、SETC2017 (Small Engine Technology Conference) にて発表されたものです。

Reprinted with permission Copyright © 2017 SAE Japan and Copyright © 2017 SAE INTERNATIONAL  
(Further use or distribution is not permitted without permission from SAE.)

## 要旨

車両の旋回性能を表す指標としてスタビリティファクタは四輪では広く利用されている。二輪においても同様の考え方より旋回性能を示す指標としてスタビリティファクタが提案されている。また、二輪車の官能評価としてのライントレース性評価ではアンダーステア、オーバーステアと表現することがあるが、スタビリティファクタとの関連が調べられていない。本稿ではライディングシミュレータを用いて前後タイヤの滑り角特性を変えた実験を行い、ライントレース性についてスタビリティファクタとライダーの官能評価との相関を調査し、評価指標の検討を行った。

## Abstract

The stability factor is widely used for four-wheel vehicles as an index representing the turning performance of a vehicle. Stability factor for two-wheel vehicles has been proposed as an indicator of cornering performance from the same way of thinking. In line traceability evaluation as a sensory evaluation item of motorcycles, the expressions of understeer and oversteer are sometimes used, but the relation with stability factor for two-wheel vehicles has not been investigated. In this paper, a test in which the slip angle characteristics of the front and rear tires were varied using a riding simulator was conducted, and the correlation between the stability factor and the rider evaluation was investigated to derive an index showing the line traceability.

## 1 INTRODUCTION

The stability factor is widely used with four-wheel vehicles as an index of turning performance. Based on the same concept, the stability factor for two wheel vehicles<sup>[1]</sup> has been proposed as an index of turning performance for motorcycles as well. Understeer and oversteer are sometimes used in line traceability evaluations for sensory evaluations of motorcycles. However, the relationship with the stability factor has not been investigated. In this paper, a riding simulator was used and tests with different slip angle characteristics for the front and rear tires were performed in order to investigate the correlation between the stability factor and rider sensory evaluation and derive an evaluation index for line traceability.

## 2 TEST METHODS AND RESULTS

### 2-1. Test Methods

With motorcycles, the slip angle is extremely small and its measurement and reproduction are extremely difficult. Therefore, the tests were performed using a riding simulator<sup>[2]</sup> that can measure the slip angle, provide high reproducibility, and allow riding evaluations by the riders. The riding simulator used in the test is shown in Figure 1.



Fig. 1 Riding simulator.

The model used for evaluation was a large-size sports tourer with engine displacement of 1,300 cc. The evaluation course was an oval course with R30 curves as shown in Figure 2.

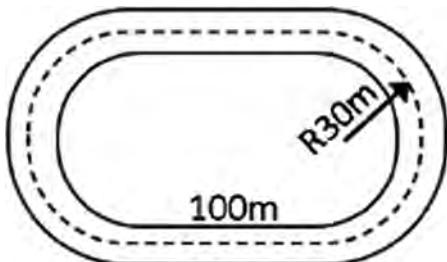


Fig. 2 Test course image.

The riding method was constant-speed driving at 50 km/h, and the evaluation was conducted by tracing the R30 line that was marked on the center of the course. An evaluation score method was used for the rider evaluation. For line traceability during constant turning in the curves, a path on the outside of the target line was considered understeer, and a path on the inside of the line was considered oversteer. The scores from +2 to -2 were used so that positive values indicate understeer, negative values indicate oversteer, and 0 indicates neutral.

The test was conducted by three evaluation riders who were experts capable of evaluating steering stability.

## 2-2. Tire Characteristics

The lateral force of a motorcycle is a combination of a camber thrust and a cornering force, and during the steady circle turning, the roll angle and the camber thrust are determined by the balance between the vehicle body weight and the centrifugal force, and the rider is adjusting with the cornering force. In this time we treated the slip angle as the vehicle parameter of lateral force generation because we fixed the driving conditions and the vehicle. The combinations of tire characteristics consisting of 4 front wheel specifications and 2 rear wheel specifications, each with different camber thrust coefficients, were used to prepare 8 types of slip angle characteristics (Table 1) with combining the direction of the slip angle of the front and rear wheels and the

magnitude relation of the front and rear wheels. The slip angle characteristics and stability factor for each of these are shown in Table 2.

The stability factor was found in advance based on formulas (1) and (2) by using the effective steering angles during R30 constant turning driving at a speed of 50 km/h.

Table 1 Test condition of tire select.

No	Specification	Tire type	
		Fr	Rr
1	Fr slip angle inside < Rr slip angle outside	Spec A	Spec a
2	Fr slip angle inside > Rr slip angle outside	Spec D	Spec a
3	Fr slip angle outside < Rr slip angle inside	Spec B	Spec b
4	Fr slip angle outside > Rr slip angle inside	Spec C	Spec b
5	Fr slip angle outside < Rr slip angle outside	Spec B	Spec a
6	Fr slip angle outside > Rr slip angle outside	Spec C	Spec a
7	Fr slip angle inside < Rr slip angle inside	Spec A	Spec b
8	Fr slip angle inside > Rr slip angle inside	Spec D	Spec b

$$\delta_0 = l/R \quad (1)$$

$$K_\delta = (\delta/\delta_0 - 1)/v^2 \quad (2)$$

where,

$\delta_0$ : Geometrical steering angle  $K_\delta$ : Stability factor

$l$ : Wheel base  $\delta$ : Front wheel effective steering angle

$R$ : Turning radius  $v$ : Vehicle speed

Coordinate: ISO11838

The relationship between stability factor  $K_\delta$  and understeer, neutral steer, and oversteer is as shown below.

$K_\delta > 0$ : Understeer

$K_\delta = 0$ : Neutral steer

$K_\delta < 0$ : Oversteer

Table 2 Stability factor value (R30, 50 km/h)

No	Effective steering angle(deg)	Fr slip angle(deg)	Rr slip angle(deg)	Steer torque (Nm)	Stability factor
1	2.5	0.21	-0.12	-16.4	-0.0006
2	2.1	0.69	-0.13	-18.9	-0.0015
3	4.1	-0.62	0.61	-10.8	0.0023
4	5.6	-2.13	0.59	-4.9	0.0050
5	3.4	-0.62	-0.10	-10.5	0.0010
6	4.9	-2.11	-0.11	-4.8	0.0037
7	3.4	0.20	0.59	-16.9	0.0007
8	2.8	0.69	0.57	-19.2	-0.0002

### 2-3. Test Results

Correlation analysis was performed of the stability factor and rider sensory evaluation results. The results are shown in Table 3.

Table 3 Rider score and correlation analysis result.

Stability factor	Rider score			
	Rider A	Rider B	Rider C	Average
1	-0.0006	1.0	1.0	1.0
2	-0.0015	1.5	0.5	2.0
3	0.0023	-0.5	0.5	-1.0
4	0.0050	-2.0	-1.0	-1.5
5	0.0010	-1.0	0.0	-0.5
6	0.0087	-2.0	-0.5	-2.0
7	0.0007	1.0	1.5	2.0
8	-0.0002	2.0	1.5	2.5
Correlation coefficient between stability factor and rider score	-0.90	-0.77	-0.86	<b>-0.84</b>
p value	0.00	0.03	0.01	<b>0.01</b>

The coefficient of correlation between the stability factor and rider evaluation result was a highly negative correlation of -0.84, indicating the possibility that stability factor can be used as an index of turning performance. However there remain concerns due to the fact that understeer and oversteer are reversed, and due to the rank characteristics of the different specifications. Figure 3 shows a graph of the sign reversed stability factor and the rider evaluation results reordered in order of the rider evaluations. Although specifications 7 and 8 show more understeer than specification 2 in the rider evaluations, the sign reversed stability factors indicate oversteer, showing a large discrepancy.

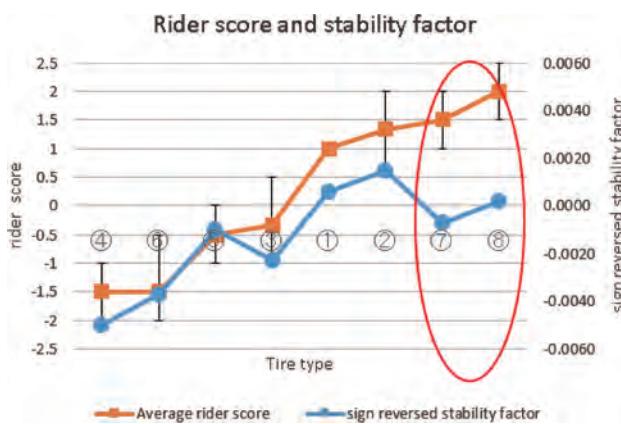


Fig. 3 Rider score and stability factor.

In order to satisfy the rank characteristics, it was deemed necessary to conduct a separate study of evaluation index for expressing line traceability.

## 3 STUDY AND VERIFICATION OF LINE TRACEABILITY EVALUATION INDEX

### 3-1. Index Study

The first object of our study was the stability factor which was a turning characteristic value. From the stability factor formula (2), it is obtained that the effective steering angle expresses the turning characteristic of each vehicle if the driving conditions are constant. Because this paper focuses on the front and rear slip angles, Formula (1) is transformed so that it can be expressed using the slip angle.

The slip angles  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$  of the front and rear wheels are defined as follows.

$$\alpha_1 = \beta + l_f \omega / V - \delta \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \beta - l_r \omega / V \quad (4)$$

$\alpha_1$ : Front wheel slip angle

$\alpha_2$ : Rear wheel slip angle

$\omega$ : Yaw rate

$l_r$ : Distance between center of gravity and rear wheel

$l_f$ : Distance between center of gravity and front wheel

$\beta$ : Vehicle slip angle

When Formulas (3) and (4) are organized for the front wheel effective steering angle  $\delta$ , the result is the following formula.

$$\delta = \alpha_2 - \alpha_1 + l / R \quad (5)$$

Inserting Formula (5) into Formula (2) produces Formula (6). This shows that the stability factor can be expressed as the ratio of the difference between the front and rear slip angles compared to the geometrical steering angle.

$$K_\delta = (\alpha_2 - \alpha_1) / \delta_0 / v^2 \quad (6)$$

Where the rider evaluations are concerned, the riders sensed the differences in the above turning characteristic.

However, the evaluation scores were deemed to be different from the stability factor. Therefore, a multiple regression analysis of the relationship between the front/rear slip angles and rider evaluations was conducted to derive a line traceability evaluation index that can be expressed by the front/rear slip angles.

### 3-2. Results of the Evaluation Index Study

Based on the earlier test results, a multiple regression analysis taking the front/rear slip angles as the explanatory variables and the rider evaluations as the objective variables was conducted. The results are shown in Table 4.

Table 4 Result of multiple regression analysis.

	Rider A	Rider B	Rider C	All rider
Coefficient	Fr slip angle	1.22	0.55	1.25
	Rr slip angle	0.97	1.28	1.52
p value	Fr slip angle	0.00	0.04	0.01
	Rr slip angle	0.12	0.08	0.13
				0.01

In Formula (6), the coefficient for the front and rear slip angles is negative for the front wheel and positive for the rear wheel, and the front/rear balance was equal. In contrast, the coefficients derived here are both positive, which presents that the front wheel coefficient tends to be larger.

The coefficients for each of the three riders were different, and when feedback of the results to each rider was performed, the riders commented that the results were similar to the feeling they experienced during the evaluations that the coefficient for the wheel that was of greater focus was higher.

Then, all of the rider results were collected and defined as the line traceability evaluation index  $K'_\delta$  as shown in Formula (7).

$$K'_\delta = \text{sgn}(\delta) (1.01\alpha_1 + 1.25\alpha_2) \quad (7)$$

The results from application of this evaluation index are shown in Figure 4.

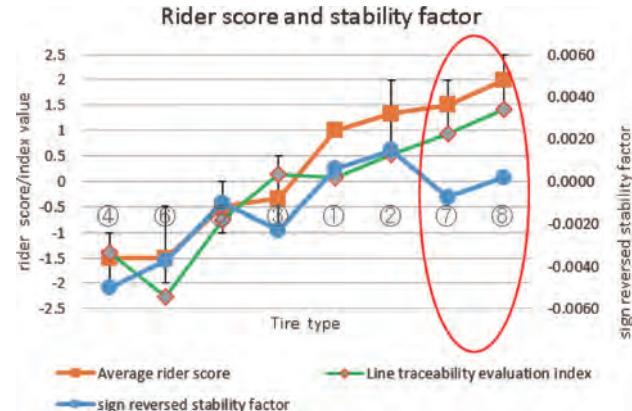


Fig. 4 Rider evaluation result and stability factor.

The graph shows that the rank characteristics of the different specifications that were previously a concern have been resolved. Quantitatively, when the correlation coefficient and rank correlation coefficient for the rider evaluations are compared, the results show that the overall correlation and rank correlation of this evaluation index are higher than the sign reversed stability factor.

Table 5 shows the correlation coefficient, rank correlation coefficient, and p values for the sign reversed stability factor and line traceability index.

Table 5 Correlation coefficient and rank correlation coefficient.

	Sign reversed stability factor	Line traceability evaluation index
Correlation coefficient	0.82	0.88
p value	0.01	0.00
Rank correlation coefficient	0.80	0.87
p value	0.02	0.01

### 3-3. Evaluation Index Verification Method

To verify the evaluation index shown in Formula (7), verification tests were conducted by using different slip angle characteristics and different driving conditions. The evaluation course was the same oval course as the previous test, and two courses were prepared (R30 and R100) according to the evaluation speed. The driving speed was constant and was 50 km/h on the R30

oval and 82 km/h on the R100 oval. Nine slip angle characteristic specifications were created from combinations of three front wheel specifications and three rear wheel specifications. The slip angle characteristics and stability factors are shown in Table 7. The evaluation rider was a single expert rider.

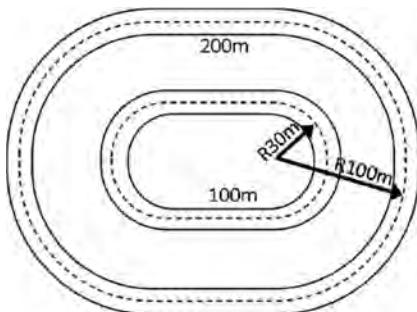


Fig. 5 Test course image.

Table 6 Test tire characteristics.

No	Tire type	
	Fr	Rr
1	Spec A	Spec a
2	Spec C	
3	Spec B	
4	Spec A	Spec b
5	Spec C	
6	Spec B	
7	Spec A	Spec c
8	Spec C	
9	Spec B	

Table 7 Stability factor value.

R30 50km/h					
No	Effective steering angle(deg)	Fr slip angle(deg)	Rr slip angle(deg)	Steer torque(Nm)	Stability factor
1	2.5	0.21	-0.12	-16.4	-0.0006
2	2.1	0.69	-0.13	-18.9	-0.0015
3	3.4	-0.62	-0.10	-10.5	0.0010
4	2.6	0.21	-0.02	-16.3	-0.0004
5	2.2	0.69	-0.03	-18.8	-0.0013
6	3.5	-0.62	0.00	-10.4	0.0012
7	2.8	0.20	0.16	-16.0	0.0000
8	2.4	0.68	0.16	-18.5	-0.0009
9	3.7	-0.63	0.19	-10.2	0.0016

R100 82km/h					
No	Effective steering angle(deg)	Fr slip angle(deg)	Rr slip angle(deg)	Steer torque(Nm)	Stability factor
1	0.5	0.22	-0.07	-10.2	-0.0007
2	0.2	0.56	-0.07	-12.0	-0.0015
3	1.1	-0.32	-0.05	-5.6	0.0007
4	0.6	0.22	0.00	-10.1	-0.0005
5	0.3	0.56	0.00	-11.9	-0.0014
6	1.2	-0.33	0.02	-5.5	0.0009
7	0.8	0.21	0.15	-9.9	-0.0002
8	0.4	0.56	0.14	-11.7	-0.0010
9	1.3	-0.33	0.17	-5.4	0.0012

### 3-4. Results of Evaluation Index Verification

The verification results are shown in Figure 6.

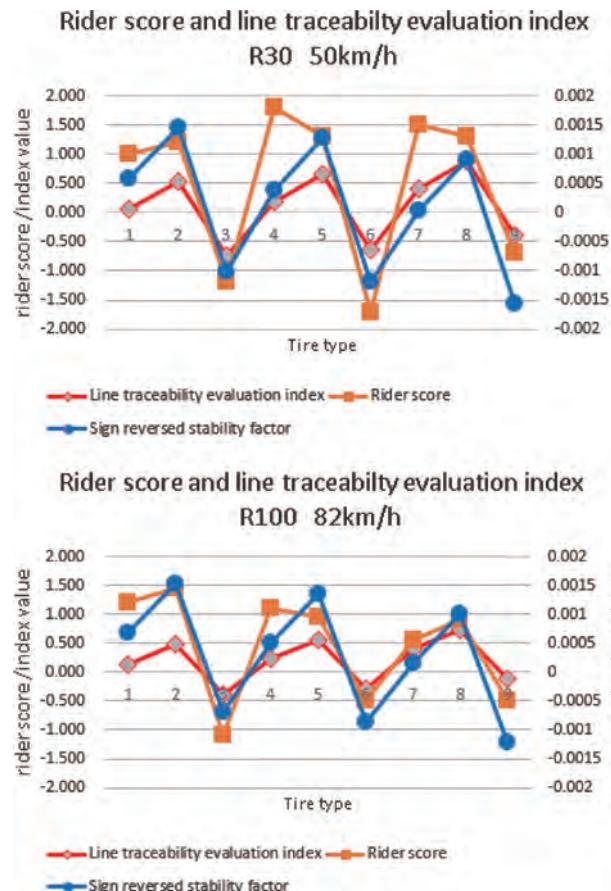


Fig. 6 Rider score and stability factor.

The correlation coefficient and rank correlation coefficient for the line traceability index and sign reversed stability factor with regards to the rider evaluation results are shown in Table 8.

Table 8 Correlation coefficient and rank correlation coefficient.

	Tire different evaluation		Driving condition different evaluation	
	R30 50km/h	R100 82km/h	R30 50km/h	R100 82km/h
Correlation coefficient	0.84	0.88	0.90	0.87
p value	0.01	0.00	0.00	0.01
Rank correlation coefficient	0.48	0.72	0.78	0.82
p value	0.22	0.05	0.02	0.01

In the test results both with different slip angles and different speeds, the correlation of the line traceability index and rider evaluation results was high, at 0.88 and 0.87. There was also high correlation of the sign reversed stability factor and rider evaluation results, at 0.84 and 0.9. For the rank correlation coefficient, the correlation between the line traceability index and rider evaluation results was high, at 0.72 and 0.82, and was higher than the sign reversed stability factor by +0.24 and +0.04 points, indicating specification rank characteristic more clearly.

Based on the above, it is considered that the line traceability evaluation index is a useful index, at least under the driving conditions used in this test.

## 4

## CONCLUSIONS

In this paper, a series of tests was conducted using a riding simulator with different front and rear tire slip angle characteristics, and the correlation between the stability factor and rider evaluation for line traceability was investigated. Also, a study was conducted on the evaluation index based on the front and rear tire slip angles as an evaluation index that expresses line traceability. The results of these tests indicated the following.

- (1) There is a high negative correlation between the stability factor and rider evaluations, however there is a large discrepancy in the rank characteristic when different specifications are used.
- (2) It was hypothesized that the front/rear tire slip angle characteristic affects turning motion. Multiple regression analysis was performed from the rider evaluation results and front/rear slip angles to derive a line traceability evaluation index. It was confirmed that applying this index yields higher correlation and rank correlation with the rider evaluations, and the discrepancy caused by the rank difference that had previously been a concern was resolved.

- (3) Verification tests of the derived line traceability evaluation index were conducted using different tire specifications and different driving conditions, and high correlation and rank correlation were confirmed.
- (4) It is considered that the derived line traceability evaluation index is a useful index, at least under the driving conditions used in this test.

This study was investigated and approved by the Yamaha Motor Ethics Investigation Committee. (Investigation and approval number: 0046)

Informed consent procedures were conducted for all test participants.

## REFERENCES

- [1] Ichiro Kageyama: Study on performance index for two-wheeled vehicle behavior, Proceedings of JSASE Annual Congress (Autumn), 2007, 150-07, pp.13-18.
- [2] Yasunobu Harazono, Tetsuya Kimura, Hitoshi Watanabe: Research on the Simulation of Low Speed by a Riding Simulator for Motorcycle, Proceedings of JSAE Annual Congress (Spring), 2013, 16-13, pp.1-6.

## ■著者



三木 将行

Masayuki Miki

技術・研究本部  
研究開発統括部  
基盤技術研究部



木村 哲也

Tetsuya Kimura

技術・研究本部  
研究開発統括部  
基盤技術研究部

# Analysis of Cycle-to-Cycle Variation in a Port Injection Gasoline Engine by Simultaneous Measurement of Time Resolved PIV and PLIF

Santa Haramiishi Takahiro Watanabe Minoru Iida Satoshi Hokimoto  
Tatsuya Kuboyama Yasuo Moriyoshi

当論文は、JSAE 2019-9552/SAE 2019-32-0552として、SETC2019(Small Engine Technology Conference) にて発表されたものです。

Reprinted with permission Copyright © 2019 SAE Japan and Copyright © 2019 SAE INTERNATIONAL  
(Further use or distribution is not permitted without permission from SAE.)

## 要旨

低負荷運転時における燃焼のサイクル変動は、エンジンの運転に様々な問題を引き起こす要因となる。この変動を低減するために可変バルブタイミングや可変点火タイミングなどの手法が用いられる。しかし、これらの手法は搭載性やコストの問題から二輪車用エンジンへ積極的に採用されることは少ない。そのため、複雑な機構や電子制御を用いることなく、燃焼サイクル変動を抑えたエンジンの開発が求められている。燃焼のサイクル変動は、筒内流動、空燃比、温度、残留ガス、点火エネルギーなどの変動によって引き起こされると考えられる。本研究では、燃焼サイクル変動と筒内流動の変動、および燃料濃度の変動との関係に着目した。筒内流動の変動を評価するために、高時間分解粒子画像流速測定法(TR-PIV)を用いた。さらに、燃料濃度の空間分布を計測するために、平面レーザー誘起蛍光法(PLIF)を用いた。これら二つの可視化技術を同時に用いて、連続燃焼サイクルを計測した。計測の結果、図示平均有効圧の変動は、乱流運動エネルギーと燃料濃度の変動によって説明することができた。多くのサイクルでは、図示平均有効圧と乱流運動エネルギーとの間で相関を確認することができた。また残りのサイクルでは、図示平均有効圧と燃料濃度の間で相関が確認できた。今後、図示平均有効圧に対する各要素の寄与度を考察する。また、乱流運動エネルギーの変動はタンブル渦構造の変動によって引き起こされることが著者らの先行研究で確認されている<sup>[2][13]</sup>。

## Abstract

Cycle-to-cycle variation (CCV) of combustion in low load operation is a factor that may cause various problems in engine operation. Variable valve timing and variable ignition timing are commonly used as a means to reduce this variation. However, due to mountability and cost constraints, these methods are not feasible for use in motorcycle engines. Therefore, development of an engine with minimal CCV without utilizing complicated mechanisms or electronic control is required. CCV of combustion may be caused by fluctuations in in-cylinder flow, air-fuel mixture, temperature, residual gas and ignition energy. In this study, the relationship between CCV of combustion, in-cylinder flow fluctuation and air-fuel mixture fluctuation was the primary focus. In order to evaluate in-cylinder flow fluctuation, Time Resolved Particle Image Velocimetry (TR-PIV) technique was utilized. In addition, Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) technique was used to measure spatial distribution of the mixture. These two visualization techniques were used together to measure continuous combustion cycles. The fluctuation of net IMEP can be explained by the fluctuation of Turbulence Kinetic Energy (TKE) and fuel concentration. In most cycles, net IMEP was correlated with TKE. In the remaining cycles, net IMEP was correlated with fuel concentration. The contribution of each factor towards net IMEP is to be discussed. It has been also confirmed that TKE fluctuation is caused by fluctuation in the tumble vortex structure, as shown in the authors' previous study<sup>[2][13]</sup>.

## 1

## INTRODUCTION

CCV of combustion not only limits the potential of the

output power characteristics but also causes various problems such as a decrease in thermal efficiency and deterioration of exhaust gas quality. Many pieces of

research have been conducted to reduce CCV of combustion. In particular, for a four-wheeled vehicle engine, the combustion fluctuation can be reduced by optimizing ignition system, fuel injection system and valve control system. To do so, many complicated mechanisms and electronic control systems are used. However, for a motorcycle engine, it is not feasible to use such complicated solutions due to mountability and cost constraints. Therefore, development of an engine with minimal CCV without utilizing complicated mechanisms or electronic control is required. Most motorcycles are targeted more towards the enthusiast market segment, as a result of which their engines are required to have high output power characteristics. These engines are usually not suited for low load operation, as they are optimized for operation under high load and high revolution speed conditions. Valve overlap optimized for high load operation often causes problems with high residual gas accumulation in low load operation, and worsens CCV of combustion. Also, the throttle valve usually has a large diameter in order to obtain a high maximum output power, which leads to a lack of controllability of the air flow into the cylinder in low load conditions. In some cases, the ignition timing is retarded to prevent a sharp rise in engine torque. This ignition timing retardation worsens CCV of combustion.

CCV of combustion depends on various elements in the cylinder at the ignition timing. CCV of combustion may be caused by fluctuations in in-cylinder flow, air-fuel mixture, temperature, residual gas and ignition energy. As these factors fluctuate from cycle to cycle, the conditions near the spark plug change, and that induces fluctuations in the initial flame growth. As a result, fluctuations in net IMEP occur. Several studies in the past have utilized flow visualization experiments to analyze combustion cyclic fluctuation. Müller *et al.* focused on the cyclic fluctuation of tumble vortex structure under motoring conditions. They reported that the position of the tumble vortices can fluctuate greatly in the horizontal direction, and that the kinetic energy and the turbulence kinetic energy history are affected significantly by variation in the vortex structure<sup>[1]</sup>. Furthermore, in this author's previous study,

it was confirmed that the cyclic fluctuation of intake flow increases as the engine operation load decreases under motoring conditions<sup>[2]</sup>. Sholes *et al.* confirmed that the cyclic fluctuation is suppressed under strong tumble flow condition<sup>[3]</sup>. Cyclic fluctuation of in-cylinder flow also affects spray shape. Zeng *et al.* experimentally confirmed that the spray shape changes due to cyclic fluctuation of in-cylinder flow before fuel injection in a direct fuel injection (DI) gasoline engine<sup>[4]</sup>. As an example of research on the firing conditions, Fontanesi *et al.* analyzed the effect of the spark plug ground electrode orientation on the local flow and on the cyclic fluctuation of the flame propagation pattern using LES (Large eddy simulation)<sup>[5]</sup>. Furthermore, as an example of experimental study of a DI gasoline engine, Peterson *et al.* conducted two studies, the first of which analyzed combustion cyclic fluctuation from simultaneous measurement of local flow and fuel concentration distribution, and the second evaluated ignition energy and initial flame growth<sup>[6][7]</sup>.

Although many studies about combustion cyclic fluctuation have been conducted, there are very few examples of analyses performed under low load firing and port fuel injection (PFI) conditions, where fuel concentration stratification is less likely to occur compared to direct fuel injection conditions. In this study, using PFI single-cylinder visualization engine, simultaneous measurement of flow field and mixture distribution under low load firing condition was conducted to analyze the factors that cause combustion cyclic fluctuation. TR-PIV was used to measure the flow field, and PLIF was used to measure the air-fuel mixture distribution. As described above, the cyclic fluctuation is caused by variation in various factors. In this study, the primary focus was to identify the relationship between CCV of combustion, in-cylinder flow fluctuation and air-fuel mixture fluctuation. Fluctuation in parameters other than in-cylinder flow and air-fuel mixture was minimized by optimizing the measurement conditions, and the contribution of these two parameters to CCV of combustion was analyzed.

## 2 EXPERIMENTAL SETUP AND ANALYTICAL METHOD

### 2-1. Optical Engine

The visualization single-cylinder engine (KOYAMA GARAGE) used in this study is shown in Figure 1. This visualization engine uses quartz glass for the pent roof and the cylinder liner, and thus, the entire area inside of the chamber and cylinder can be observed from the front. A quartz glass window is inserted into the piston crown. Using a light source and a mirror placed below the piston, the cylinder interior can be illuminated from underneath through this window. This visualization piston has been changed since the time of authors' previous study, and the visualization range has been expanded. Figure 2 shows the visualization piston used in this study (right) and the one used previously (left). The new visualization piston facilitates measurement of wider cross sections, as it has a width of 58 mm at the bore central cross section and 41 mm at the intake valve cross section. In this study, measurements were only taken at the central cross section. The specifications of the visualization engine is shown in Table 1. The engine head uses one cylinder from a 2-L, 4-cylinder mass-production four-wheeled vehicle engine, and the displacement per cylinder is 500 cm<sup>3</sup>. The bore and stroke are 86 × 86 mm square and the compression ratio is 9.2. The timing of the intake and exhaust valves of this visualization engine can be set arbitrarily. In previous sections, it was stated that the valve overlap is wide in motorcycle engines. However, in this study, the valve timing was set so that the valve overlap would be zero in order to reduce the influence of residual gas fluctuation on CCV of combustion. The valve timing is shown in Table 1. Although this visualization engine can be installed with either PFI or DI, experiments were conducted under PFI conditions since motorcycle engines are targeted. The in-cylinder pressure was measured using a piezoelectric pressure sensor (Kistler, 6052C) installed on the chamber, and the intake and exhaust pressure was measured using absolute pressure sensors (Kistler, 4005B, 4007C) installed on the intake pipe and the exhaust pipe, respectively. These were measured at 1

degree crank angle intervals by a high-speed data logger (YOKOGAWA, DL750). The in-cylinder piezo sensor was calibrated by adjusting its absolute pressure correction setting, such that it reported pressures equal to the

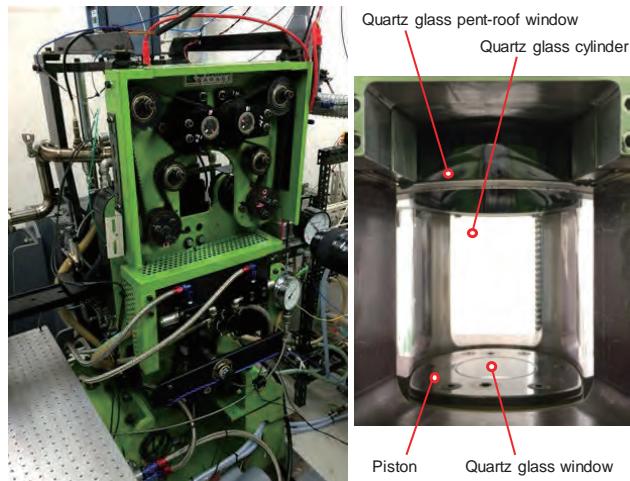


Fig. 1 Optical engine



Fig. 2 Visualization piston; Right is used in this study and left is used in previous study.

Table 1 Engine specification

Displaced volume	500 cm <sup>3</sup>
Stroke	86 mm
Bore	86 mm
Connecting rod length	139 mm
Compression ratio	9.2:1
Number of valves	4
Intake valve open	360 deg. ATDC
Intake valve close	600 deg. ATDC
Exhaust valve open	130 deg. ATDC
Exhaust valve close	360 deg. ATDC
Injection type	PFI
Material of cylinder liner	Quartz glass

intake pressure sensor between crank angle 390 deg. and 570 deg. ATDC (After Top Dead Center). The air-fuel ratio was measured using an A/F sensor (NGK, ZFAS-U1) installed in the exhaust pipe, and the intake and exhaust temperatures were measured using a K-type sheath thermocouple. These were measured at 200 ms intervals by a low-speed data logger (OMRON, ZR-45).

## 2-2. Optical Setup

A schematic diagram of the optical setup is shown in Figure 3. This optical setup is designed to simultaneously perform flow field measurement by PIV and fuel concentration distribution measurement by PLIF. The light source for PIV is a second harmonic generation of high frequency dual-cavity Nd: YLF laser (New Wave Research, Pegasus-PIV, 10 kHz, 527 nm, 4 mJ/pulse). Fourth harmonic generation of a dual-cavity Nd: YAG laser (New Wave Research, SOLO-120, 15 Hz, 266 nm, 25 mJ/pulse) is used as the light source for PLIF. The laser beams are placed on the same optical axis through a HR 266 nm mirror (SIGMAKOKI, TFMHP-266, HR 266 nm: 98%). These laser beams are formed into light sheet using two cylindrical lenses (SIGMAKOKI), and the sheet width and thickness are adjusted appropriately. These beams are irradiated into the cylinder through a mirror below the piston. PIV tracer particles suspended in the

flow, upon illumination by the Nd:YLF laser, perform Mie scattering at a wavelength of 527 nm. On the other hand, PLIF tracer emit fluorescence at wavelengths in the range of 420-450 nm when irradiated by 266 nm of the Nd:YAG laser. These two wavelength ranges are separated by a dichroic mirror (IRIDIAN, 495 DPS, HR> 500 nm: 99%, HT 400-500 nm: 96.3%) after passing through a long pass filter with a cutoff wavelength of 370 nm. After that, scattered light for PIV is reflected by the dichroic mirror and photographed by a high-speed CMOS monochrome camera (Photron, SA-X2) equipped with a macro lens (Nikon, AI AF Micro Nikkor 105 mm F 2.8 D). Fluorescent light for PLIF transmits through the dichroic mirror, and is photographed by a 16bit CMOS color camera (Photron, FASTCAM SA-X) equipped with a macro lens (Nikon, Ai AF Micro Nikkor 105 mm F 2.8 D) through an image intensifier (HAMAMATSU, C10880). In Figure 3, the part enclosed in red dashed lines shows the apparatus using which PLIF calibration data is acquired. The details are described in the “PLIF system” section.

## 2-3. PIV System

A schematic diagram of the measurement range is shown in Figure 4. The width of the measurement range is 58 mm, which is approximately 67% of the bore (86 mm). The specifications of the PIV system are shown in Table 2. PIV

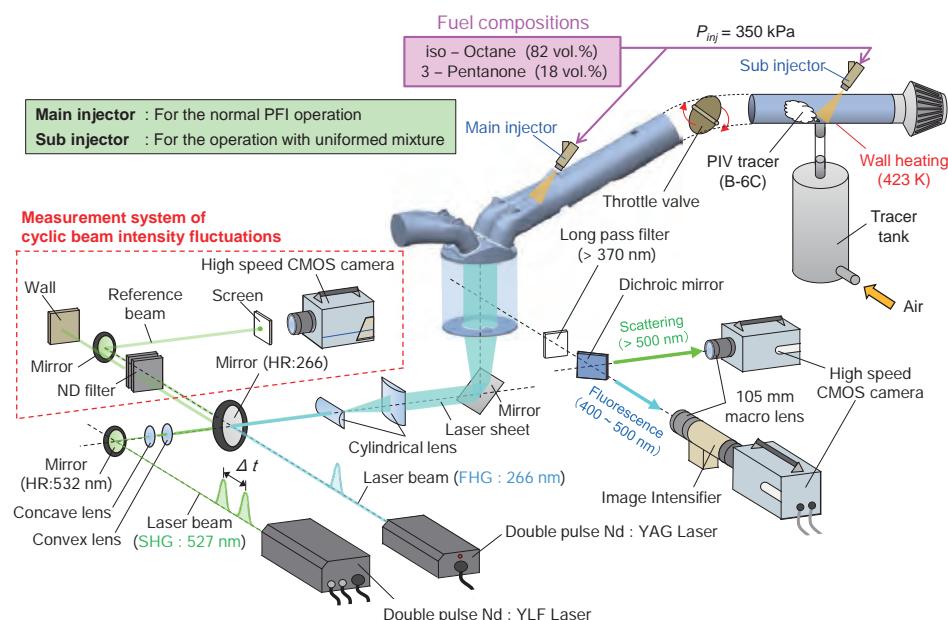


Fig. 3 Schematic of Optical setup

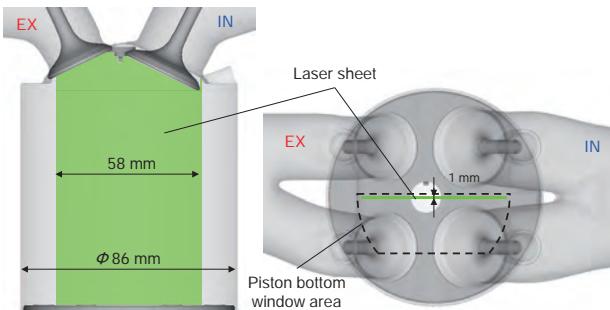


Fig. 4 Schematic of measurement range

Table 2 PIV and PLIF specifications

	PIV	PLIF
Laser types	Double pulse Nd: YLF	Double pulse Nd: YAG
Wave lengths	527 nm (SHG)	266 nm (FHG)
Sheet thickness	1 mm	1 mm
Shot timings	358 to 714 deg. ATDC	-120 and -7 deg. ATDC
Measurement intervals in a cycle	2 deg. (3 kHz)	None
Particle image intervals $\Delta t$	25 $\mu$ s (Intake stroke) 50 $\mu$ s (Compression stroke)	None
Frame rates	20000 fps	6000 fps
Shutter speeds	1/20416	1/6037
Spatial resolutions	672 $\times$ 1024 (0.8 mm/vector)	1024 $\times$ 1024 (0.15 mm/pix.)

measurement was performed from 358 deg. ATDC to 714 deg. ATDC, which is 1 degree before the ignition timing. The measurement interval was 2 degrees, corresponding to a measurement frequency of 3 kHz at an engine rotating speed of 1000 rpm. The oscillation timing of the Nd:YLF laser was controlled by a trigger signal synchronized with the crank angle. The synchronized signal was generated by a divider circuit and a pulse generator (nf, WAVE FACTORY WF1946) based on an angle signal from a rotary encoder (OMRON, E6B2-CWZ3E) connected to the crankshaft.

$\text{SiO}_2$  hollow porous particles (SUZUKI YUSHI KOGYO, Godball B-6C) with a diameter of about 2 ~ 5  $\mu\text{m}$  were used as the PIV tracer. The tracer particles were introduced into the intake flow using compressed air upstream of the throttle valve. At a PIV measurement frequency of 3 kHz, this tracer exhibits as high as 99.3% frequency responsiveness (@ 2  $\mu\text{m}$ ). The flow trackability is also adequate<sup>[8]</sup>.

The thickness of the PIV laser sheet was set to 1 mm based on the quarter rule, which states that particle displacement perpendicular to the measurement plane between two consecutive image captures should not be more than 1/4 of the laser sheet thickness<sup>[9]</sup>. For optimal tracking of particle trajectories, the in-plane particle displacement between two consecutive images should be 5 to 10 pixels<sup>[10]</sup>. The average flow velocity in the cylinder varies by as much as an order of magnitude between the intake and compression strokes. Therefore, if PIV analysis is performed on the entire process at a constant particle image interval  $\Delta t$ , the measurement accuracy is not adequate. In this study, the particle image interval  $\Delta t$  was chosen to be 25  $\mu\text{s}$  in the intake stroke, and 50  $\mu\text{s}$  in the compression stroke. This switching of particle image interval within a single cycle led to an improvement in measurement accuracy. The images were taken using frame straddling technique to synchronize the laser oscillation timing with the imaging timing of the camera.

PIV analysis was performed using commercial software DANTEC, Dynamic studio ver. 2015a. Analysis was performed using the FFT (Fast Fourier Transform) correlation method. Correlations were made using 50% overlap in three stages with each stage having a different search area (8  $\times$  8, 16  $\times$  16, 32  $\times$  32 pixels). Erroneous vectors were removed using a median filter with a window size of 3  $\times$  3 vectors. The obtained numerical data was post-processed using open source software SCILAB Enterprise, Scilab ver. 5.5.2 and C# original codes. Vector maps and contour maps were made using a post-processing commercial software i-WORKS, GraphR plus, ver.1.57.

#### 2-4. Separation between Averaged Flow and Turbulent Component from Instantaneous Flow

In order to evaluate cyclic fluctuation of in-cylinder flow, it is necessary to separate the turbulent flow component from the instantaneous flow. The resulting average flow component represents time-averaged flow in one cycle, and therefore includes the effects of cycle to cycle flow variation. Overall the instantaneous flow velocity,  $\tilde{u}$  is

defined as sum of ensemble-averaged,  $\langle u \rangle$  cyclic fluctuation component,  $u_c$  and turbulent component,  $u'$  (1). Since it does not include cyclic fluctuation component, ensemble-averaged alone cannot be used to evaluate cyclic fluctuation. The ensemble-averaged flow velocity component and cycle variation component combined represent the time-averaged flow velocity component,  $\bar{u}$  (2).

$$\tilde{u} = \langle u \rangle + u' + u_c \quad (1)$$

$$\tilde{u} = \bar{u} + u' \quad (2)$$

Many methods have been proposed for separating turbulent components from instantaneous flow velocity. The method used in this study was to use a cut-off frequency to separate between time-averaged components and turbulent components in the frequency domain<sup>[11][12]</sup>. This method has also been used by this author previously<sup>[2][13]</sup>. For frequency analysis, a fixed point in the central cross-section, just below the spark plug was used. Using a Fourier transformation on the velocity time-series data at this point, power spectra were obtained for every cycle (Fig. 5). The gray thin lines show the power spectra of the flow for one cycle each. The red thick line shows the power spectrum of the 45-cycles ensemble-averaged flow. Comparing the power spectra in Figure 5, it can be observed that all single cycle flows show power distributions very similar to the ensemble average up to about 100 Hz. Beyond this point, however the individual cycle's spectra deviate sharply from the ensemble-averaged, showing much higher power distribution compared to the ensemble-averaged between 100-1000 Hz. Therefore, it can be concluded that this

frequency range contains the turbulent component of the instantaneous flow. Thus, 100 Hz can be selected as the cutoff frequency.

This result differs from other literature referenced in this study. Kamimoto *et al.*<sup>[11]</sup> defined the cut-off frequency such that the non-turbulent component of the flow contained 90% of the accumulated power. This was done by integrating the power spectrum from left to right and choosing the frequency where the integral reached 90% of its total value. By this method, the cut-off frequency for the current data would be 400 Hz, which is significantly larger than the result of this study. It must be noted that Kamimoto *et al.* used the flow velocity during only the compression stroke to decide the cut-off frequency. On the other hand, in this study the cut-off frequency was decided based on the flow velocity in both the intake and compression strokes. As a result, a much higher range of velocity was considered in this study, which led to significant difference in cut-off frequency from the work of Kamimoto *et al.* Okura *et al.*<sup>[12]</sup> also decided the cut-off frequency using data from both intake and compression strokes. They defined the cut-off frequency as the frequency that exhibits the first minima of the power spectrum curve. Using this rule, the cut-off frequency for the current study would be 120Hz, as shown by red circle in Figure 5. This is almost the same as the result of this study. The cut-off frequency of 100 Hz adopted in this study was therefore judged to be appropriate when dealing with such a wide velocity range.

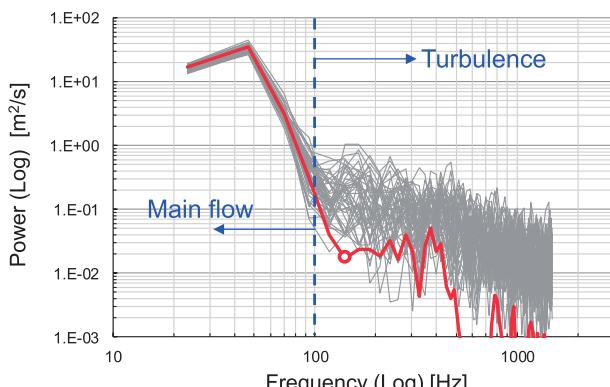


Fig. 5 Power spectra of single cycle flows and ensemble average flow

## 2-5. PLIF System

The intake system in Figure 3 is equipped with two injectors, a main injector at the port injection location and a sub injector placed further upstream to simulate uniform fuel distribution. These two injectors are same in terms of specifications. Since only the injector mounting positions are different, it is easy to obtain the same overall A/F ratio in both PFI and uniform conditions, and the flow pressure field is not affected. This helps reduce both errors due to unequal A/F and errors due to pressure dependence of the PLIF tracer. The fuel used in

this PLIF study was a mixture of 82% iso-octane and 18% 3-pentanone by volume. 3-pentanone is a widely used fluorescent tracer for PLIF measurements due to its strong fluorescence and low sensitivity to oxygen quenching. In addition, 3-pentanone has a boiling point of 101.5 degree C, which is quite similar to the boiling point of iso-octane (99 degree C).<sup>[14]</sup>

The fluorescence intensity is calibrated using the process shown in Figure 6. First, images are taken for several cycles with light sheet irradiation and without fuel injection. These images are ensemble-averaged to produce a background image. This background image is subtracted from the raw images during the 45 cycles. By doing so, the noise due to laser oscillation or optical defects is removed. Then, after cleaning and resetting the apparatus, another background image is acquired in a similar manner, and 45 cycles are performed using only the sub injector to produce a uniform fuel distribution. These 45 images are ensemble-averaged and then de-noised using the new background image. The resulting image represents the fluorescence intensity distribution of a homogenous stoichiometric mixture. Each de-noised PFI image is then divided by this homogenous distribution image to obtain the relative fuel concentration distribution. The final images therefore represent fuel concentration in one PFI cycle, normalized using the fluorescence intensity of the homogeneous stoichiometric mixture. To clarify, a value of 1 in the relative fuel

concentration images represents a stoichiometric mixture. Furthermore, since the fluorescence intensity and concentration of 3-pentanone are linear<sup>[14][15]</sup>, the fuel concentration in the lean and rich regions does not require any further calibration.

Fluorescence of 3-pentanone excited at 266 nm shows dependence on pressure and temperature<sup>[16][17]</sup>. The measured in-cylinder pressure under PFI and uniform conditions are shown in Figure 7(a). Since the PFI condition and the uniform condition were set to the same load, the in-cylinder pressure was the same. Therefore, in the current case, pressure dependence of 3-pentanone can be ignored. The in-cylinder average temperature history is shown in Figure 7(b). This temperature was calculated using TPA (Three Pressure Analysis) model (GT-power ver7.3) from measured intake, exhaust and in-cylinder pressures. The in-cylinder temperature was different under PFI and uniform conditions. In PFI condition, fuel droplets evaporate more readily while suspended in the flow, since fuel is injected into the negative pressure field inside the intake port. On the other hand, in the uniform condition, fuel is injected into atmospheric pressure, so a large part of the evaporation occurs at the liquid wall film. The latent heat of vaporization from air is small, which leads to a higher in-cylinder temperature in the uniform condition. Figure 7(c) shows the temperature dependence of the fluorescence intensity of 3-pentanone referenced from Koch, Hanson, *et al.*<sup>[17]</sup>. Temperature correction was performed according to the calibration curve.

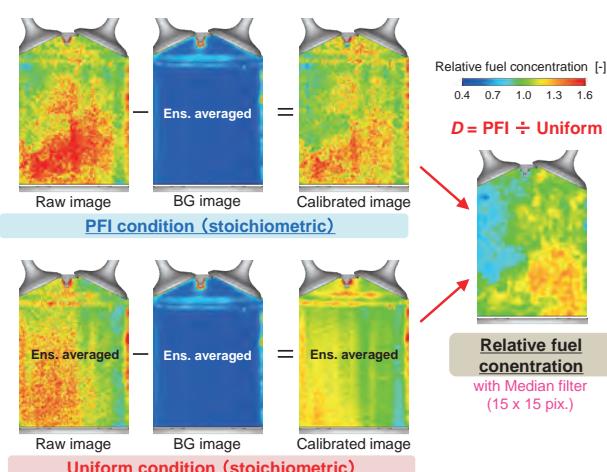


Fig. 6 Calibration process of fluorescence intensity

The fourth harmonic generation of Nd: YAG, used as the PLIF light source has a large shot-to-shot variation, so it is necessary to correct for laser intensity variation. In Figure 3, the part of the setup enclosed by red dashed lines is responsible for this correction. The light component transmitted through the HR266 nm mirror is photographed, and the correction coefficient is determined from the average luminance value of the image. The measured beam intensity fluctuation was approximately 9%, which is as per the catalog spec.

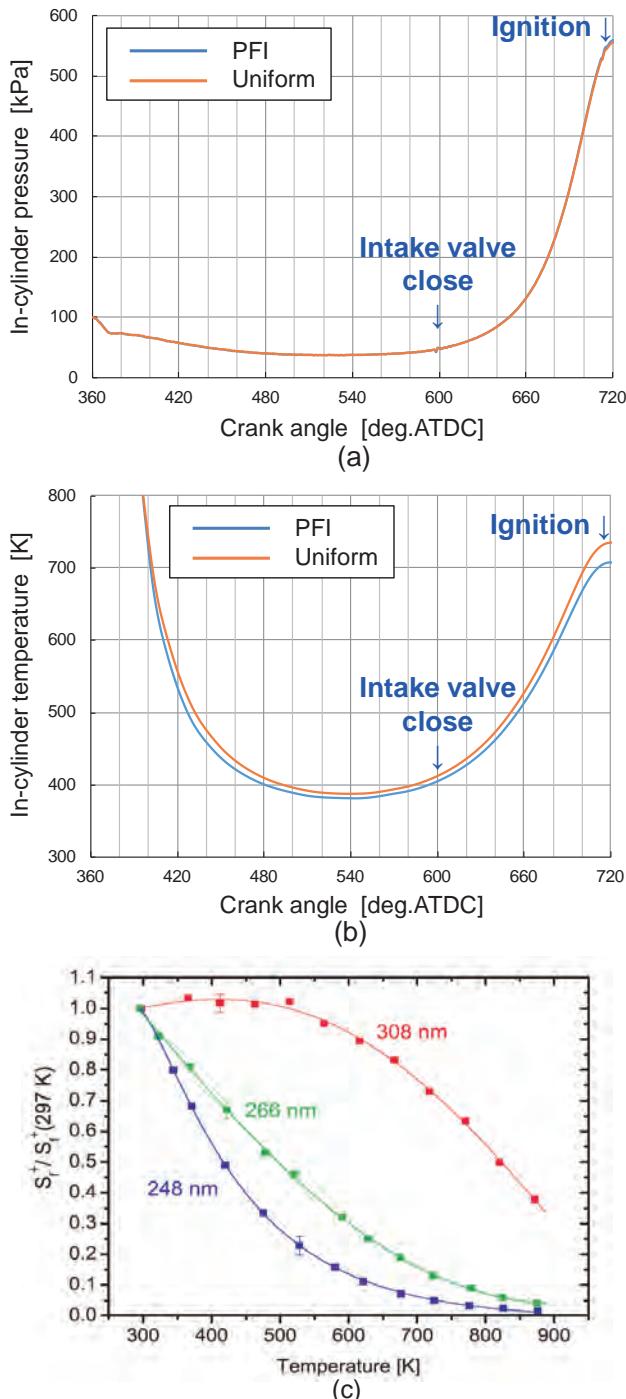


Fig. 7 (a): Measurement result of in-cylinder pressure  
 (b): In-cylinder temperature estimated by 1-D simulation  
 (c): Temperature dependence of 3-pentanone<sup>[17]</sup>

The relative fuel concentration  $D$  is expressed by the following equation (3)<sup>[15][18]</sup>:

$$D = C \frac{F_{PFI} - \langle B_{PFI} \rangle}{\langle F_{Uni} \rangle - \langle B_{Uni} \rangle} W_L c_{temp} \quad (3)$$

where  $F_{PFI}$  is the individual image intensity of RAW image

in PFI condition,  $\langle B_{PFI} \rangle$  is the ensemble-averaged image intensity of the background image obtained from the motored engine with light sheet and without fuel injection,  $\langle F_{Uni} \rangle$  is the ensemble-averaged image intensity of the homogeneous fuel field in uniform condition,  $\langle B_{Uni} \rangle$  is its ensemble average of background image for the uniform condition,  $W_L$  is correction factor of shot-to-shot variation of beam intensity,  $c_{temp}$  is correction factor of 3-pentanone's temperature dependence. It must be noted that  $F_{PFI}$  is the fluorescence intensity obtained under simultaneous measurement of PIV and PLIF, while  $\langle F_{Uni} \rangle$  was obtained while performing only PLIF measurement. It was observed that when PIV and PLIF were measured simultaneously, the fluorescence intensity became higher than only PLIF measurement results. It is speculated that this is probably because the laser sheet thickness is increased by Mie scattering at 266 nm with the PIV tracer. The coefficient,  $C$  is introduced to correct the difference between simultaneous with PIV and only PLIF measurement.

## 2-6. Simultaneous Measurement of PIV and PLIF in Engine Firing Condition

Engine operating conditions are shown in the Table 3. The flow chart for the whole process of the measurements is shown in Figure 8. Warm-up is performed until the coolant temperature reached 70 degrees C with the engine stopped. After that, background images are acquired and simultaneous measurement of PIV and PLIF are performed in the order shown in Figure 8(a). The cylinder liner temperature increases rapidly during the firing operation. After 45 cycles of firing operation, the engine is stopped and cooled until the water temperature reaches approximately 30 degrees C. After sufficient cooling, the inside of the engine is cleaned. In order to minimize the influence of glass stains, the inside of the engine is cleaned after every firing operation. Next, a background image and a homogeneous pre-mixed gas image are taken as correction data (Fig. 8(b)).

The timing chart for the lasers and the cameras just before ignition are shown in Figure 9. The measurement timing just before ignition is 714 deg. for PIV and 713 deg. for PLIF. In the simultaneous measurement of PIV

and PLIF, the two lasers are controlled to not operate at the same time. The fluorescence intensity detected by PLIF is weak compared to the scattered light intensity

detected by PIV. In order to measure the weak fluorescent light accurately, the oscillation timings of the two lasers are shifted.

Table 3 Measurement conditions

Engine speed	1000 rpm
Minimum intake pressure (abs.)	37 kPa
Ignition timing	-5 deg. ATDC
Net IMEP (average)	150 kPa
CA50 (average)	50 deg. ATDC
Start of injection	180 deg. ATDC
Injection duration (average)	2.9 ms
A/F	Stoichiometric
Measurement cycles	45 cycles

(Fuel: iso-octane 82 vol. % + 3-pentanone 18 vol. %)

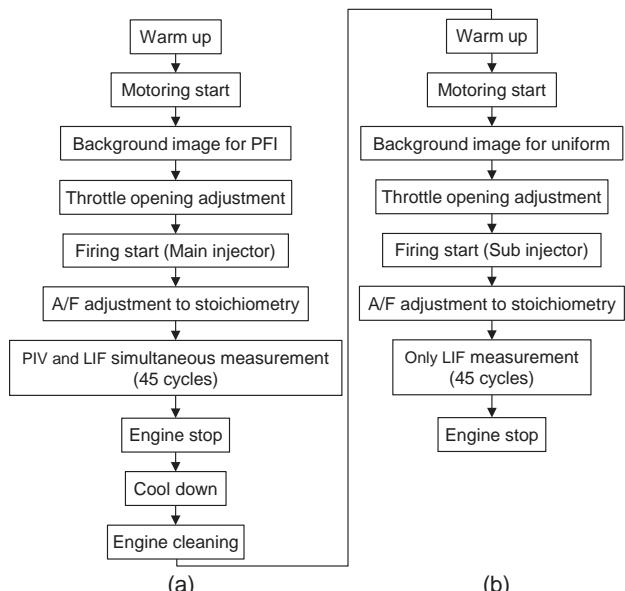


Fig. 8 Measurement flow chart: (a) PFI condition (TR-PIV + PLIF) (b) Uniform mixture condition (PLIF only)

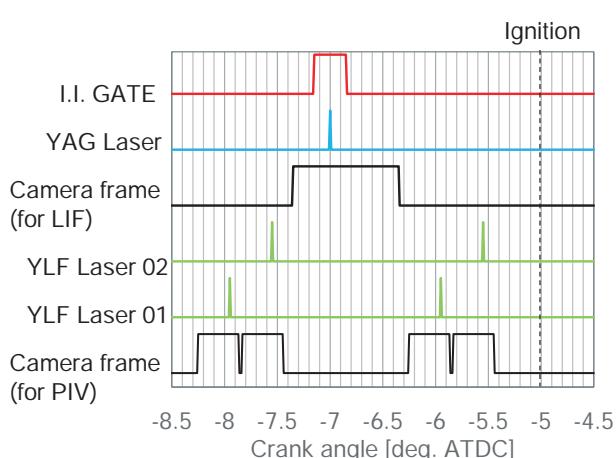
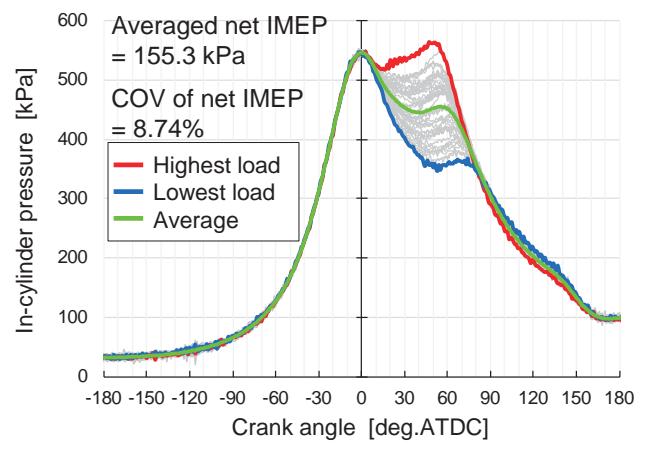


Fig. 9 Timing chart for TR-PIV and PLIF

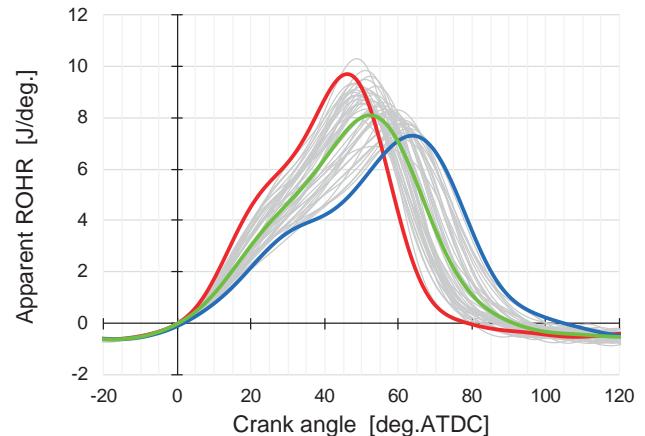
### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 3-1. Combustion Analysis for 45 Continuous Engine Cycles

Simultaneous measurement of TR-PIV and PLIF was performed under firing condition during 45 continuous cycles, and the cyclic fluctuation of the combustion was measured. The operating conditions are shown in Table 3. The results of the in-cylinder pressure history and the apparent heat release rate history are shown in Figure 10. The COV (Coefficient of Variation) of net IMEP in this measurement was 8.74%, which was equivalent to the COV measured while steady operation under the same

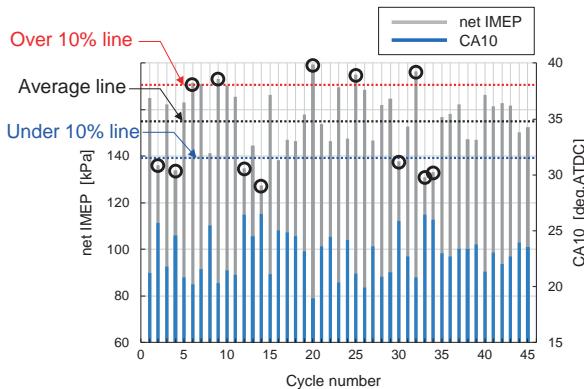


(a) In-cylinder pressure



(b) Apparent ROHR

Fig. 10 In-cylinder pressure and apparent rate of heat release during 45 cycles



**Fig. 11 Individual cycle data on net IMEP and CA10**

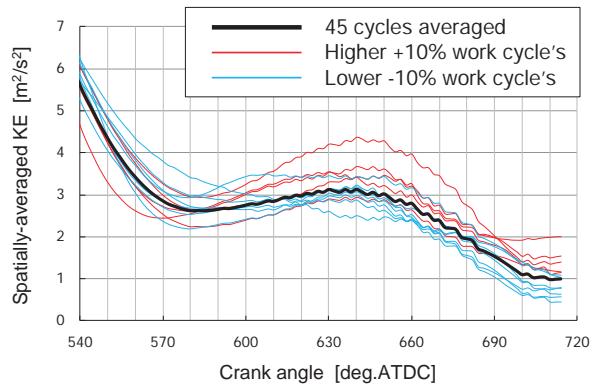
load with a metal sleeve. Figure 11 shows the net IMEP and CA10 for each cycle. In order to identify the factors affecting cyclic fluctuation in both high and low net IMEP cases, cycles with greater than 10% variation from mean net IMEP were extracted and analyzed. A total of 12 cycles were found to fit this criterion, out of which 5 were high work cycles and 7 were low work cycles. Although up to -20% variation has been reported in the past under similar load conditions, such a high variation was not observed in the 45 cycles analyzed in the current study.

### 3-2. Comparison of Kinetic Energy and Turbulence Kinetic Energy

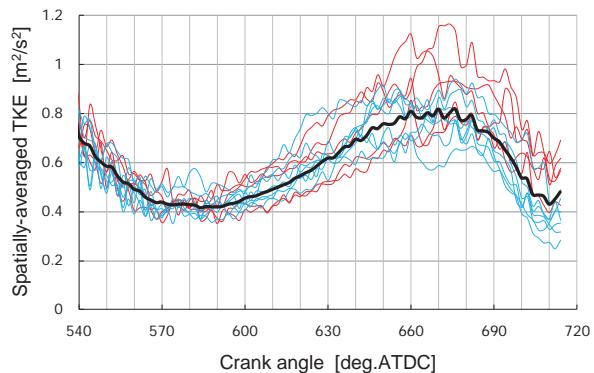
Kinetic energy (KE) and turbulence kinetic energy (TKE) were obtained from the results of TR-PIV and the 12 cycles picked as mentioned were analyzed. Spatial averages of both kinetic energy and turbulence kinetic energy over the entire measurement area were calculated. Spatial averages were calculated for each crank angle using equation (4) and (5). In the equations,  $\tilde{u}$  indicates instantaneous flow velocity,  $\bar{u}$  indicates time averaged flow velocity, the subscripts,  $i, k$  indicate  $X, Z$  coordinates and the subscript,  $CA$  indicate crank angle. Note that equation (4) and (5) use time averages rather than ensemble averages as the mean value. Therefore, KE and TKE are the values for one cycle only.

$$KE_{(CA)} = \frac{1}{N_x N_z} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{k=1}^{N_z} \frac{1}{2} \left( \tilde{u}_{(i,k,CA)}^2 + \bar{u}_{(i,k,CA)}^2 \right) \quad (4)$$

$$TKE_{(CA)} = \frac{1}{N_x N_z} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{k=1}^{N_z} \frac{1}{2} \left[ \left( \tilde{u}_{(i,k,CA)} - \bar{u}_{(i,k,CA)} \right)^2 + \left( \tilde{w}_{(i,k,CA)} - \bar{w}_{(i,k,CA)} \right)^2 \right] \quad (5)$$



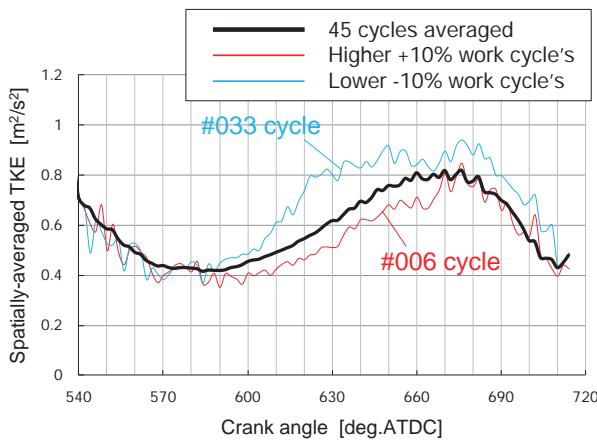
**(a) Spatially-averaged kinetic energy**



**(b) Spatially-averaged turbulent kinetic energy**

**Fig. 12 Spatially-averaged kinetic energy and turbulence kinetic energy**

Figure 12 shows the spatially-averaged history of KE and TKE. The black thick line in the figure is the average value of 45 cycles. Blue thin lines indicate the 7 cycles with low net IMEP, while red thin lines indicate the 5 cycles with high net IMEP. From the KE history shown in Figure 12(a), a correlation between net IMEP and KE cannot be confirmed up to around CA = 600 deg. ATDC. However, from CA = 660 deg. ATDC onwards, the high net IMEP cycles (red lines) exceed the average value and the low net IMEP cycles (blue lines) are consistently below the average value. This correlation is especially clear at the right end of the graph (CA = 714 deg. ATDC), just before ignition timing. It is therefore, reasonable to infer that high net IMEP cycles show high KE, and that the converse holds for low net IMEP cycles. A similar trend is observed for TKE (Fig. 12(b)), with high net IMEP cycles showing higher than average TKE and low IMEP cycles showing lower than average values for crank angles after ~660 deg. ATDC. However, two out of the 12 cycles do not strictly follow the aforementioned

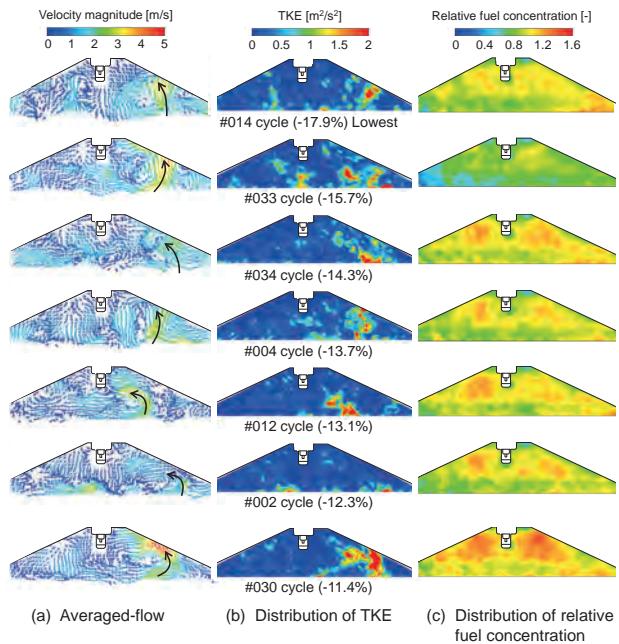


**Fig. 13 Two irregular cycles on TKE**

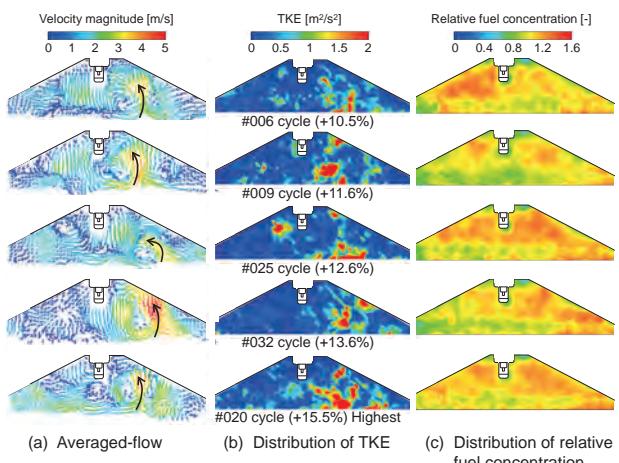
correlation. As shown in Figure 13, the # 033 cycle, despite being a low net IMEP case, shows higher than average TKE. On the other hand, cycle # 006 has high net IMEP but its TKE is similar to the average value. For these two cycles, it is possible that factors other than TKE have a stronger influence on net IMEP. Therefore, in order to analyze these cases further, the time-averaged flow distribution, TKE distribution and fuel concentration distribution at just before ignition timing are also compared.

### 3-3. Comparison of Spatial Distribution Just Before Ignition

Figures 14 and 15 show the time-averaged flow and TKE distribution 1 degree before ignition timing, and the relative fuel concentration distribution 2 degrees before ignition timing respectively. From left to right the figure shows the time-averaged flow pattern, TKE distribution, and relative fuel concentration distribution. In Figure 14, the 7 low work cycles are arranged from top to bottom in ascending order of net IMEP. In Figure 15, the 5 high work cycles are arranged in a similar order. Comparing the time-averaged flow patterns in Figures 14 and 15, the difference in the tumble vortex is the most notable feature. In high work cycles, a strong upward tumble flow can be observed close to the spark plug in the right half of the cross section. However, in low work cycles, this flow is generally weaker and farther away from the spark plug.



**Fig. 14 Average flow pattern, distributions of TKE and fuel concentration at 714 deg. ATDC in low work cycle**



**Fig. 15 Average flow pattern, distributions of TKE and equivalence ratio at 714 deg. ATDC in high work cycle**

Comparing TKE distribution, it can be seen that the high work cycles generally have higher TKE throughout the cross section compared to low work cycles. Furthermore, in high work cycles, regions of very high TKE exist close to the spark plug. The exceptions to this rule is the low work cycle # 033, where a high TKE distribution can be observed under the spark plug, and the TKE appears to be relatively high as a whole. This agrees with the result of TKE spatial average shown in Figure 13.

Comparing the relative fuel concentration distribution, all the results appear similar. In the case of PFI exhaust stroke injection, the fuel is almost uniformly distributed at the ignition timing. Unlike in DI conditions<sup>[7]</sup>, any localized variation of fuel distribution that could cause significant cyclic fluctuation cannot be identified. Focusing on the # 033 cycle in Figure 14, it can be seen that the relative fuel concentration is clearly leaner than all other cycles. As discussed above (Fig. 12, 13), # 033 cycle does not conform to the apparent relation between net IMEP and TKE, showing higher than average TKE despite having low net IMEP. In this cycle, it is assumed that low fuel concentration is the reason for the net IMEP being below average. On the other hand, looking at the # 006 cycle in Figure 15, it can be seen that the relative fuel concentration is one of the highest among all cycles. As discussed above, net IMEP in cycle # 006 should be low because the TKE is low. However, it appears that the rich mixture compensates for the low TKE, resulting in a high net IMEP.

Therefore, considering from the above results, a clear correlation has been established between TKE and net IMEP for 10 of the 12 (about 80%) cycles analyzed. In the remaining 2 cycles (about 20%), it is found that the fuel concentration just before ignition timing has a greater effect on net IMEP than TKE.

### 3-4. Contribution of TKE and fuel concentration to combustion fluctuation

In previous section, relatively low and high net IMEP cycles have been explained with TKE and fuel concentration of each cycles. In this section, the contribution of the two physical properties are analyzed. A dataset of another 45 cycles measured under the same conditions is added, and analysis is performed using data from a total of 90 cycles.

Figure 16(a) shows a scatter plot of the net IMEP for all 90 cycles. The contours show normalized net IMEP, and the 12 cycles analyzed above are marked with triangles (yellow triangle: high work cycle, purple triangle: low work cycle). The horizontal axis is the normalized relative

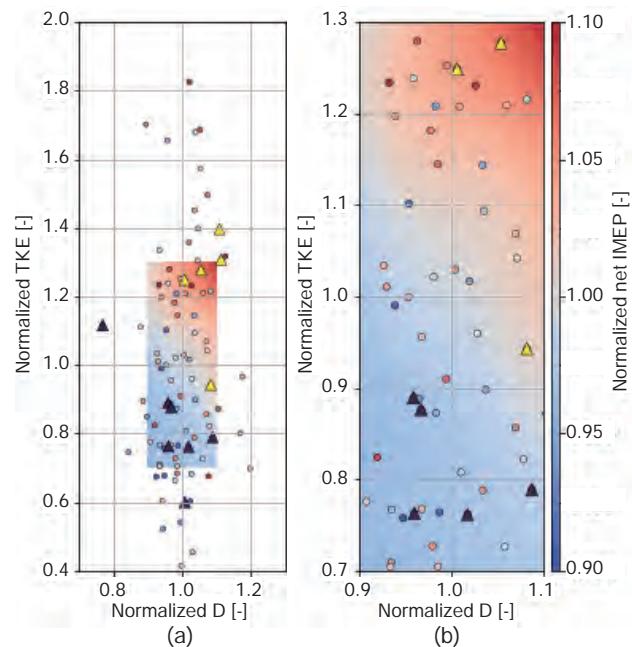


Fig. 16 Scatter plot and response surface: (a) A region containing all 90 data (b) A region with densely populated data (48 of 90 data)

fuel concentration  $D$ , and the vertical axis is normalized TKE. A response surface was calculated from this data by smoothing with RBF (Radial basis function) interpolation. RBF interpolation was calculated using the Python library (Python 3.7.2, ScyPy 1.2.1). The response surface within the range  $D = 0.9$  to  $1.1$  and  $TKE = 0.7$  to  $1.3$  is shown in Figure 16(a). This range contains 48 of the total 90 data points, and the density of the data is relatively high. Due to the nature of RBF interpolation, the response surface may not be sufficiently accurate in regions where data is sparse. Thus the response surface calculation is limited only to this region with densely populated data. Figure 16(b) shows a zoomed-in image of only the response surface area.

Figure 17 shows the error between the response surface prediction and the actual measurement value. The solid line indicates the mean value ( $\mu$ ) of the error, and the dashed line indicates the standard deviation ( $\sigma$ ). The error of the response surface is within  $\pm 15\%$ , and the standard deviation is about 7%.

Figure 18 shows the plots for net IMEP vs. TKE at  $D = 1$ , and net IMEP vs.  $D$  at  $TKE = 1$ . From the net IMEP vs.  $D$

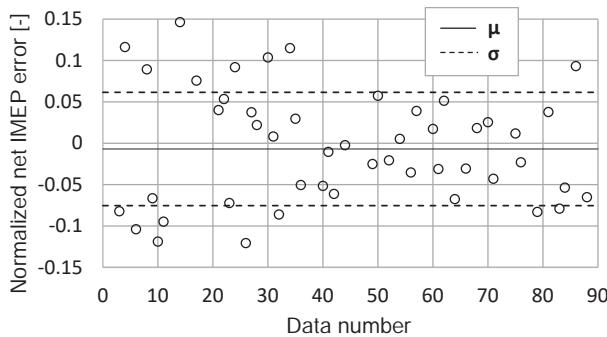


Fig. 17 Error between the response surface prediction and the actual measurement value.

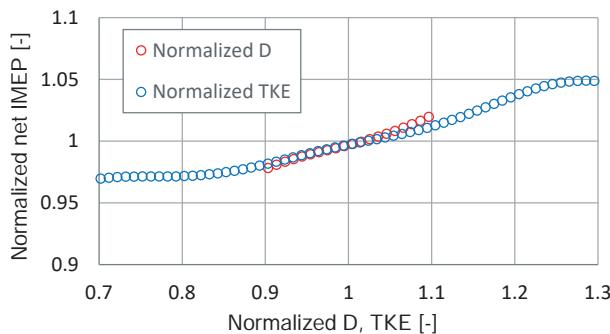


Fig. 18 Plots for net IMEP vs. TKE at  $D = 1$ , and net IMEP vs.  $D$  at  $TKE = 1$

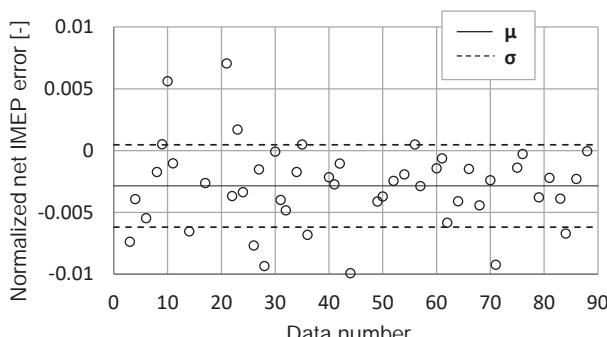


Fig. 19 Error between the approximate response surface equation and the RBF response surface prediction value.

graph, net IMEP was expressed as a polynomial of  $D$ . Similarly, from the plot of TKE and net IMEP, net IMEP was expressed as a polynomial of TKE. The product of these two polynomials was taken to create an approximation of the net IMEP response surface.

$$netIMEP_{norm} = \sum_{k=0}^n a_k D_{norm}^k \sum_{k=0}^n b_k TKE_{norm}^k \quad (6)$$

In the equation (6), the subscript, norm means a value normalized by ensemble average value. Figure 19 shows

the error in this approximate response surface compared to the response surface obtained using RBF interpolation. The error in the approximate response surface is within  $\pm 1\%$  of the RBF surface, and the standard deviation is approximately 0.3%. Thus, the approximate response surface equation and the response surface obtained using RBF interpolation are almost equal.

As can be seen from Figure 18, the slopes of net IMEP with respect to fuel concentration  $D$  and TKE are almost equal in the area where data is densely populated. This indicates that the sensitivity of net IMEP to  $D$  and TKE is almost the same in this region. The standard deviation of TKE for all 90 data points is approximately 0.31, and the same for  $D$  is approximately 0.07. Since the overall variation in TKE is about 4 times larger than the variation in  $D$ , it can be concluded that the fluctuation of TKE is responsible for the fluctuation in net IMEP in most cases in this measurement.

### 3-5. Factors Affecting TKE Fluctuation at Ignition Timing

The previous section shows that most of the combustion fluctuation is caused by TKE fluctuation in this study. In order to realize an engine with minimal CCV, it is necessary to clarify the mechanism of TKE fluctuation. In this section, the characteristics of time-averaged flow are analyzed for cycles with large combustion fluctuations.

Time-averaged flow was compared for the cycles with maximum and minimum net IMEP. Figures 20 and 21 show the vector maps of the time-averaged flow from CA 420 deg. to 660 deg. in intervals of 30 degrees and vector maps of the time-averaged flow just before ignition. It must be noted that the color scale of the flow velocity is different for the intake strokes, compression strokes and just before ignition. Velocity magnitude ranges from 0 to 25 m/s in the intake stroke, 0 to 7 m/s in the compression stroke and 0 to 5 m/s at just before ignition. Figure 20 shows the time-averaged flow pattern of the maximum work cycle (# 020), and Figure 21 the minimum work cycle (# 014). Comparing the two time-averaged flows, it can be observed that significant

## Analysis of Cycle-to-Cycle Variation in a Port Injection Gasoline Engine by Simultaneous Measurement of Time Resolved PIV and PLIF

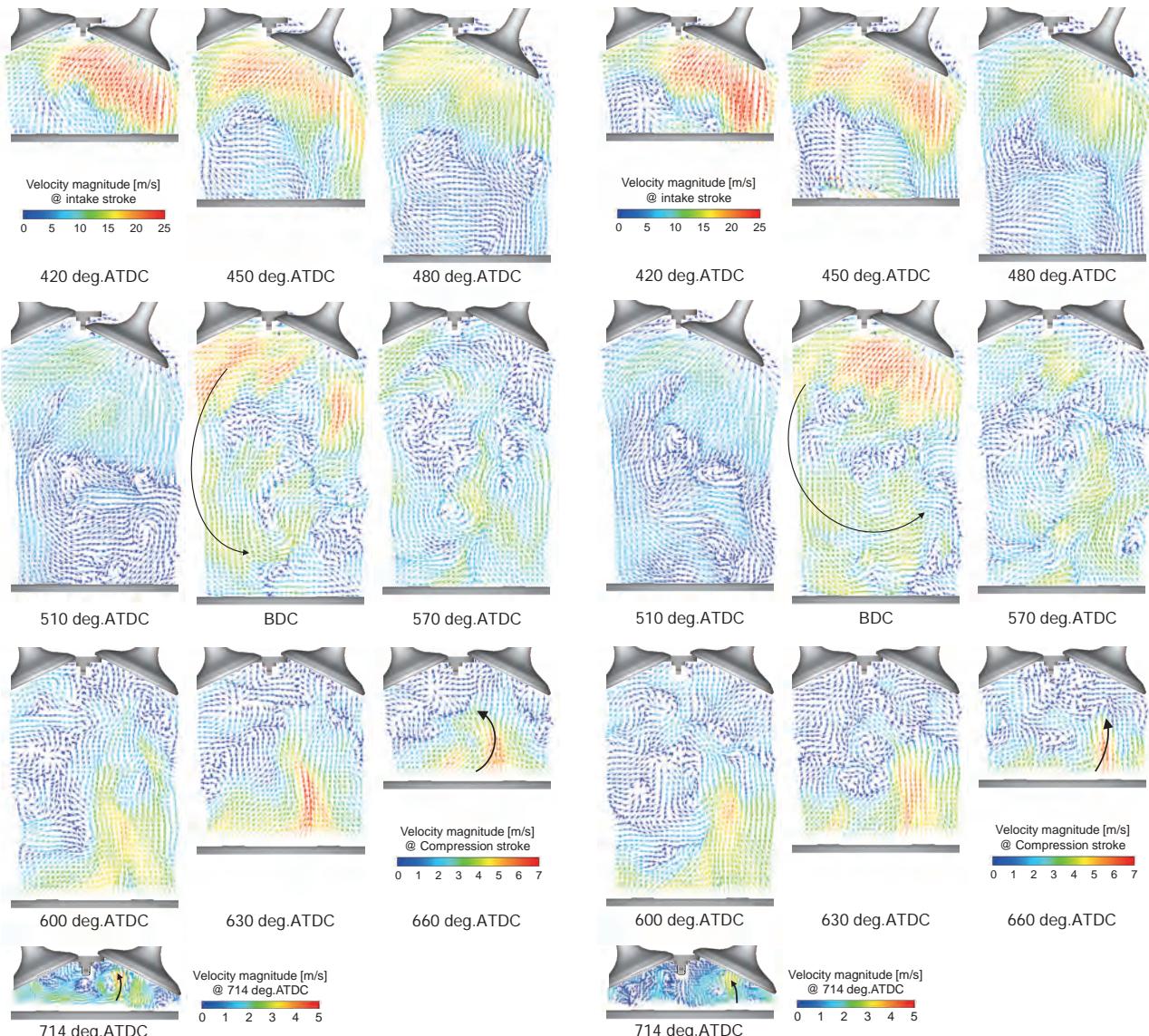


Fig. 20 Time-averaged flow patterns in the highest work cycle (# 020)

difference exists in the direction and size of the tumble vortex during the intake stroke, as highlighted by black arrows at BDC (bottom dead center) in either figure. For the maximum work cycle, the flow entering from the top of the intake valve rotates counter-clockwise in a wide arc, contacting the piston crown near the center of the bore. On the other hand, in the minimum work cycle, this flow appears to follow a tighter arc, and is nearly parallel to the piston surface near the center of the bore. This difference is likely due to the horizontal offset of the large scale tumble vortex structure during the intake stroke. A schematic diagram of this horizontal offset is shown in Figure 22. In this figure, the red arrow

Fig. 21 Time-averaged flow patterns in the lowest work cycle (# 014)

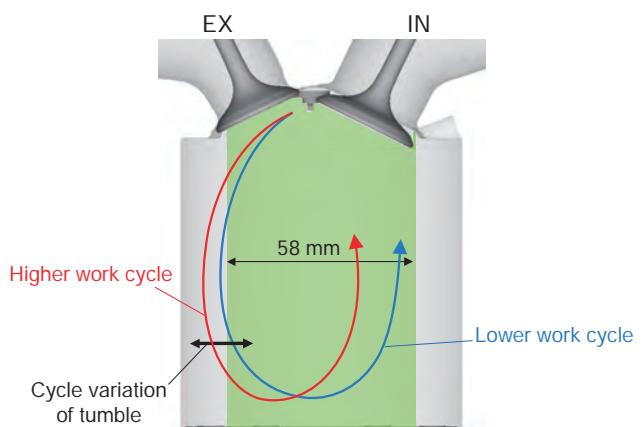


Fig. 22 Schematic drawing of horizontal offset of tumble flow structure

indicates a high work cycle, the blue arrow indicates a low work cycle, and the region highlighted in green represents the TR-PIV measurement range. It can be seen from this schematic that the tumble flow in the higher work cycle is offset to the left and approaches the piston crown at a downward angle, while the same flow in the low work cycle is offset to the right and is almost horizontal as it approaches the piston crown at the center of the bore. Focusing within the measurement range, this vortex structure is consistent with the flow patterns of Figures 20 and 21. Moving further to the compression stroke, another noticeable difference is apparent in these two cases. The flow patterns on the piston crown surface after BDC are compared in Figure 20 and Figure 21. As indicated by the black arrow at CA = 660 deg. ATDC in either figure, it can be seen that a strong upward flow is formed near the spark plug in the maximum work cycle. On the other hand, in the minimum work cycle, this upward flow is farther from the plug towards the right and the flow velocity is relatively lower. This upward flow remains until the ignition timing, resulting in a strong average flow near the plug just before ignition in the

maximum work cycle. On the other hand, in the minimum work cycle, this upward flow is at a position farther away from the plug, and a weak average flow is distributed near the spark plug just before ignition. Furthermore, as discussed before and shown in figures 14 and 15, patches of high TKE are distributed near the plug in the maximum work cycle (# 020), whereas TKE distribution near the plug in the minimum work cycle (# 014) is generally lower. Thus, it can be confirmed that the cyclic fluctuation of the tumble vortex structure during intake stroke has a significant effect on the fluctuation of the flow and TKE distribution at ignition timing.

In order to obtain further confirmation of the

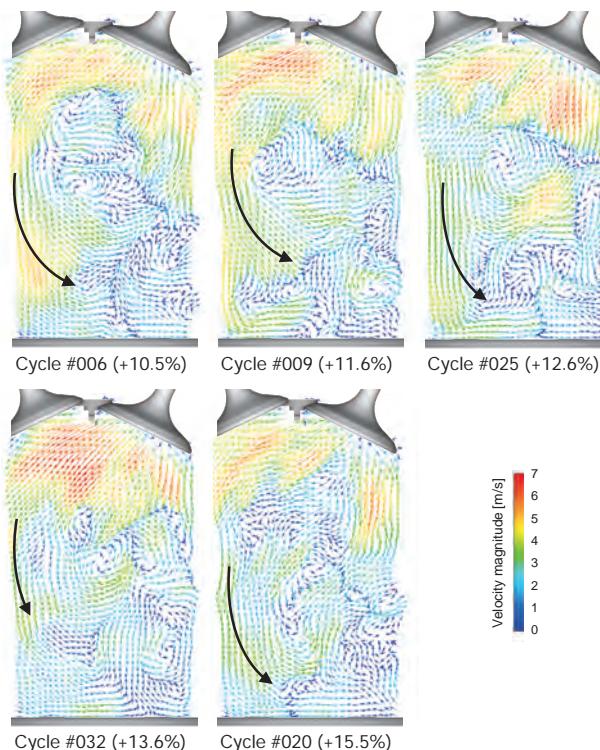


Fig. 23 Flow patterns at BDC in the case of the higher work cycles

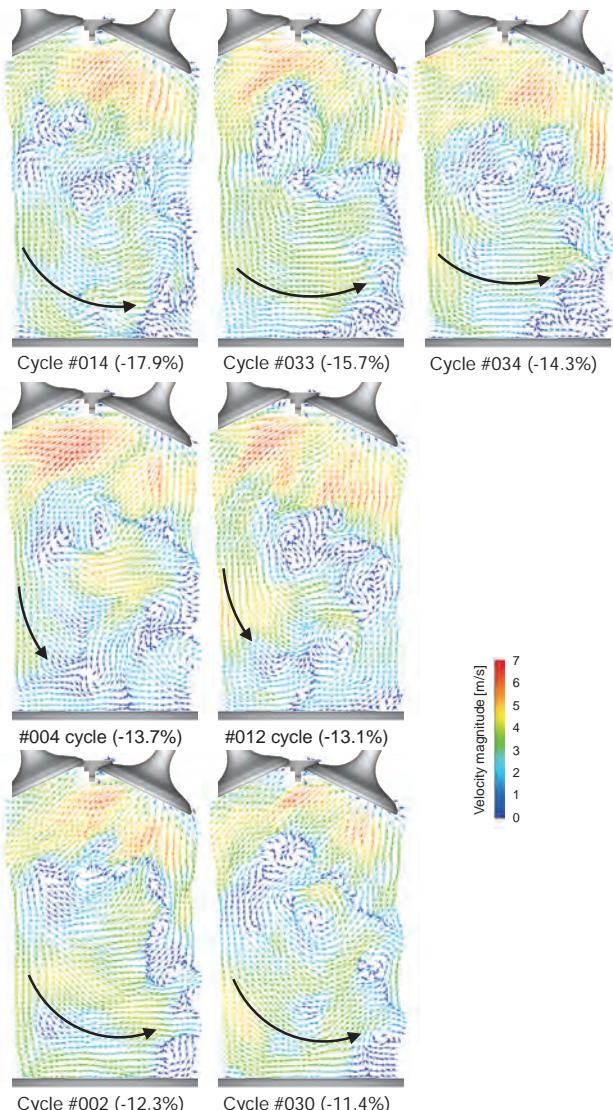


Fig. 24 Flow patterns at BDC in the case of the lower work cycles

aforementioned tumble vortex offset, time-averaged flow patterns at BDC were compared for all 12 shortlisted cycles with high variation from mean IMEP. Figure 23 shows the time-averaged flow patterns at BDC for the 5 higher work cycles, and Figure 24 shows that of the 7 lower work cycles. For the high work cycles shown in Figure 23, it can be seen that the tip of the tumble flow is at or to the left of the center of the bore as indicated by the black arrows. On the other hand, for the lower work cycles shown in Figure 24, five out of 7 cycles have a flow feature supporting the aforementioned tumble vortex offset. In these 5 cycles (# 014, # 033, # 034, # 002, # 030), it can be seen that the tumble tip is on the right side of the bore center and the flow direction itself is almost horizontal near the center. Therefore, the correlation between tumble vortex offset and net IMEP holds true not only for the two extrema cycles, but also for the most of high variation cycles analyzed in this study.

## 4 SUMMARY

In this study, simultaneous measurement of TR-PIV and PLIF was conducted to analyze the influence of flow and fuel concentration fluctuations on CCV of combustion.

Out of 45 cycles measured successively under continuous engine firing, analysis was performed on 12 cycles which have big difference of net IMEP from the average. It has been confirmed that the cycle-to-cycle variation of combustion can be connected to the fluctuation of TKE and relative fuel concentration at the ignition timing. It has been also observed that the number of cycles showing high combustion fluctuation due to TKE variation was significantly greater than the number of cycles showing fluctuation due to fuel concentration.

From 90 cycle data, a response surface of net IMEP on two parameters, fuel concentration and TKE, was calculated by smoothing with RBF interpolation. The response surface shows about 7% standard deviation from the experimental results. From the characteristics of this response surface, it is judged that net IMEP is almost

equally sensitive to variations in both fuel concentration and TKE. Furthermore, by comparing the relative variation of fuel concentration and TKE, it has been confirmed that TKE variation is the primary cause of cyclic fluctuation in a majority of the cases measured in this study. This is likely due to the fact that in a PFI engine, variations in fuel concentration are usually not very high.

As in the previous author's study, it has been confirmed that the fluctuation of TKE at the ignition timing is affected by the tumble vortex structure during the intake stroke. In the future, it could be worthwhile to further investigate and elucidate the mechanism by which the tumble vortex structure changes during the intake stroke.

## REFERENCES

- [1] Müller, R. H. S., Böhm, B., Gleißner, M., Grzeszik, R., Arndt, S. and Dreizler, A., Flow field measurement in an optically accessible, direct-injection spray-guided internal combustion engine using high-speed PIV, *Experimental Fluids*, Vol. 48, Issue 2 (2010), pp.281-290.
- [2] Hokimoto, S., Kuboyama, T., Moriyoshi, Y., Iida, M. and Watanabe, T., Analyses of cycle-to-cycle variation of combustion and in-cylinder flow in a port injection gasoline engine using PIV and PLIF techniques, *SAE technical paper* (2017), 2017-01-2213.
- [3] Sholes, R. K., Kawashima, J. and Mori, S., Analysis of in-cylinder gas flow and its cyclic variability using PIV, *Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.36, No.6 (2005), pp.25-30 (in Japanese).
- [4] Zeng, W., Sjoberg, M. and Reuss, D., Using PIV measurements to determine the role of the in-cylinder flow field for stratified DISI engine combustion, *SAE International Journal of Engines*, Vol.7, No.2 (2014), pp.615-632, doi:10.4271/2014-01-1237.
- [5] Fontanesi, S., d'Adamo, A. and Rutland, J. C., Large-eddy simulation analysis of spark configuration effect on cycle-to-cycle variability of combustion and knock, *International Journal of Engine Research*, Vol.16, Issue 3 (2015), pp.403-418.
- [6] Peterson, B., Reuss, L. D. and Sick, V., High-speed

- imaging analysis of misfires in a spray-guided direct injection engine, Proceedings on the Combustion Institute, Vol.33, No.2 (2011), pp.3089-3096.
- [7] Peterson, B., Reuss, L. D. and Sick, V., On the ignition and flame development in a spray-guided direct-injection spark-ignition engine, Combustion and Flame, Vol.161, No.1 (2014), pp.240-255.
- [8] The Visualization Society of Japan, PIV Handbook, The first edition issued 4th Printing (2013), Morikita Publishing Co., Ltd (in Japanese).
- [9] Keane, D. R. and Adrian, J. R., Optimization of particle image velocimeters: II multiple pulsed systems, Measurement Science and Technology, Vol.2 (1991), pp.963-974.
- [10] The Visualization Society of Japan, The 20th Visualization frontier "Training session of PIV 2015 (Osaka)" (2015) (in Japanese).
- [11] Kamimoto, T., Yagita, M., Moriyoshi, Y., Kobayashi, N. and Morita, H., An experimental study of in-cylinder air flow with a transparent cylinder engine, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.53, No.492 (1987), pp.2686-2693 (in Japanese).
- [12] Okura, Y., Higuchi, K., Urata, Y., Someya, S. and Tanahashi, M., Measurement of in-cylinder turbulence in an internal combustion engine using high speed particle image velocimetry, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.79, No.806 (2013), pp.319-332 (in Japanese).
- [13] Hokimoto, S., Kuboyama, T., Moriyoshi, Y., Haramiishi, S., Watanabe, T. and Iida, M., Analyses of cycle-to-cycle variation of combustion at low load condition by using high-speed PIV and direct photographing of early flame propagation, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.84, No.865 (2018), pp.18-00051 (in Japanese).
- [14] Fujikawa, T., Hattori, Y. and Akihama, K., "Quantitative 2-D Fuel Distribution Measurements in a SI Engine Using Laser-Induced Fluorescence with Suitable Combination of Fluorescence Tracer and Excitation Wavelength", SAE Technical Paper 972944, 1997, doi:10.4271/972944.
- [15] Fujikawa, T., Hattori, Y., Koike, M., Akihama, K., Kobayashi, T. and Matsushita, S., "Quantitative 2-D Fuel Distribution Measurements in a Direct-Injection Gasoline Engine Using Laser-Induced Fluorescence Technique", JSME International Journal, Series B, Vol.42, No.4, pp.760-767, 1999.
- [16] Modica, V., Morin, C. and Guibert, P., "3 - Pentanone PLIF at elevated temperatures and pressure: measurements and modeling", Journal of Applied Physics B, Vol. 87, Issue 1, pp.193-204, 2007.
- [17] Koch, D. J. and Hanson, K. R., "Temperature and excitation wavelength dependencies of 3-pentanone absorption and fluorescence for PLIF applications", Journal of Applied Physics B, Vol.76, Issue 3, pp.319-324, 2003.
- [18] Kim, S., Yan, Y., Nouri, M. J. and Arcoumanis, C., "Effects of intake flow and coolant temperature on the spatial fuel distribution in a direct-injection gasoline engine by PLIF technique", Fuel, Vol.106, pp.737-748, 2013.

## **DEFINITIONS/ABBREVIATIONS**

---

<b>CCV</b>	Cycle-to-cycle variation
<b>PFI</b>	Port fuel injection
<b>DI</b>	Direct injection
<b>TR-PIV</b>	Time resolved particle image velocimetry
<b>PLIF</b>	Planer laser induced fluorescence
<b>HR</b>	High reflection
<b>HT</b>	High transmission
$\Delta t$	Interval between two laser shots
<b>ATDC</b>	After top dead center
<b>COV</b>	Coefficient of variation
<b>I. I.</b>	Image intensifier
<b>net IMEP</b>	Net indicated mean effective pressure
<b>CA10,(CA50)</b>	Timing at 10% (50%) of accumulated heat release
<b>FFT</b>	Fast Fourier transform
<b>KE</b>	Kinetic energy
<b>TKE</b>	Turbulence kinetic energy
<b>BDC</b>	Bottom dead center

■著者



孕石 三太  
Santa Haramiishi  
技術・研究本部  
研究開発統括部  
先進システム開発部



渡辺 敬弘  
Takahiro Watanabe  
技術・研究本部  
FSR 開発部



飯田 実  
Minoru Iida  
技術・研究本部  
研究開発統括部



保木本 聖  
Satoshi Hokimoto  
サステナブル・エンジン・  
リサーチセンター  
研究員



窟山 達也  
Tatsuya Kuboyama  
千葉大学大学院  
工学研究院 機械工学コース  
次世代モビリティパワーソース  
研究センター 准教授



森吉 泰生  
Yasuo Moriyoshi  
千葉大学大学院  
工学研究院 機械工学コース  
次世代モビリティパワーソース  
研究センター長・教授

## 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) 経営企画部  
 石塚 健次 ソリューション事業本部 ロボティクス事業部 FA 統括部 開発部  
 伊藤 正二 技術・研究本部 AM 開発統括部 第1技術部  
 岡田 芳郎 ヤマハモーターパワープロダクツ(株) パワートレイン開発部  
 奥山 高志 マリン事業本部 開発統括部  
 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 第1開発部  
 近藤 巧 PF 車両ユニット PF 車両開発統括部 企画推進部  
 沢瀬 敦志 パワートレインユニット パワートレイン開発統括部 第2PT 開発部  
 渋谷 啓之 クリエイティブ本部 プランニングデザイン部  
 土居 航介 生産技術本部 材料技術部  
 曾根 和也 ヤマハモーターエレクトロニクス(株) PAS 開発部  
 野澤 伸治郎 ランドモビリティ事業本部 SPV 事業部 開発部  
 原 以起 マリン事業本部 開発統括部 艇体開発部  
 平野 雅彦 ソリューション事業部 UMS 事業推進部 開発部  
 村松 恭行 技術・研究本部 EM 技術統括部 EM 戰略部

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  
 高関 久美子 クリエイティブ本部 コーポレートデザイン部  
 村松 恭行 技術・研究本部 EM 技術統括部 EM 戰略部  
 神野 裕文 技術・研究本部 NV・技術戦略統括部 技術企画部  
 久米 裕子 技術・研究本部 NV・技術戦略統括部 技術企画部

## ヤマハ発動機 技報 第56号

YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW 2021 No.56

印 刷 2021年11月30日  
 発 行 2021年12月 1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 0538-32-1171  
 (技術・研究本部 NV・技術戦略統括部 技術企画部)  
 ホームページ [https://global.yamaha-motor.com/jp/design\\_technology/technical/](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。



**YAMAHA**

ヤマハ発動機株式会社  
〒438-8501 静岡県磐田市新貝2500