



# YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW

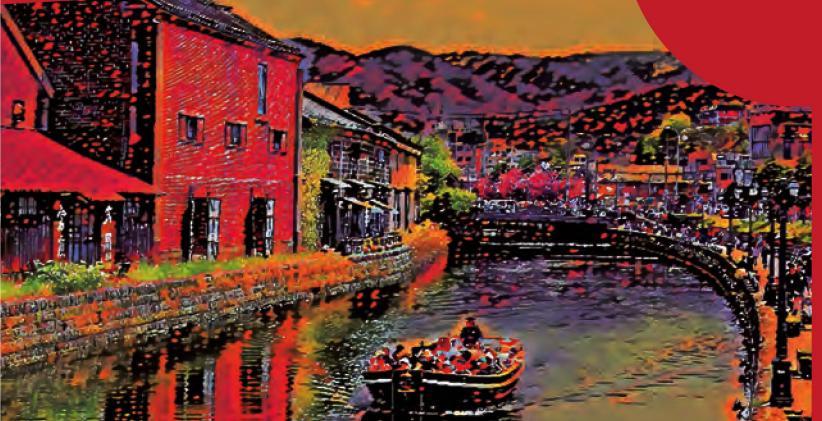
ART for Human Possibilities

人はもっと幸せになれる



2022  
No.57

ヤマハ発動機 技報



## 特集テーマ

## ART for Human Possibilities

人はもっと幸せになれる

## 巻頭言

モノづくり現場の“ART for Human Possibilities”	3
松山 智彦	

## 製品紹介

Plugged YAMAHA to New Era 「E01」の開発	6
丸尾 卓也 中尾 利樹 神田 栄作 後藤 慎太郎 桃井 雅之 矢崎 勝也 秋元 雄介	
New Standard of Mobility for the Next Generation 「NEO'S」の開発	10
松澤 虎勇 佐藤 節 松本 成 鶴見 昌弘 斎藤 亮 渡瀬 雄司 下村 伊千郎	
電動操船システム「HARMO」の開発	15
前島 将樹 安川 光 水島 義博	
フラッグシップスポーツボート「275SDX」の開発	20
村山 卓弥 竹若 誠人 沼田 裕貴	
自立型工場自動搬送車「FG-01」	25
岡田 健史 岸 知昭 西村 政哉 實生 達朗 中谷 和弘 松本 順文 山内 拓也	
US 向け ANSI/PGMA 規格対応 CO センサー付発電機	30
大久保 公貴 長澤 佑樹 勝田 悠馬 八木 哉幸 山谷 聰 金子 誠孝	
E054 LED 可搬式投光器「X-BUSTER LED」	34
鶴田 祐大	

## 技術紹介

「E01」電動コンポーネント技術紹介	39
後藤 慎太郎 清水 司 矢崎 勝也 山崎 好紘 上岡 隆真	
AI ピッキングシステム	43
山本 淳史 有田 航 齊藤 嵩 駒池 国宗	
船外機の音開発プロセスの MBD 化	48
原 和宏 高橋 徹 佐野 一樹	
電着塗装シミュレーションを活用した部品形状の作り込み	54
清水 拓也	
船外機用パワートリム & チルトモーターの原価低減	57
加地 裕考 辻村 拓	
アシストタイプ電動ユニットの片流れ制御技術	61
水野 正光	
製造業 DX を支えるデータ分析基盤とその活用事例	65
藤井 北斗 佐々木 誠 宮本 悠矢 鈴木 博順	
モーター熱流体解析の精度向上に貢献するモデル化手法の紹介	71
山内 拓也 石川 さとみ 猪上 美佳 沖 秀樹	

## 技術論文

スマートファクトリー技術を用いた設備の新予知保全	76
熊田 知也	
Development of Resin Coated Piston suitable for Monolithic Cylinders made of Hypereutectic Al-Si Alloy	81
渡邊 慧太 栗田 洋敬	
Stiffness optimization process using topology optimization techniques and lattice structures	92
永本 洋之 小林 光司 藤田 英之	

ヤマハ発動機は、企業目的「感動創造企業」のもと、2030年に向けて「Art for Human Possibilities～人はもっと幸せになれる～」という長期ビジョンを策定し、「Advancing Robotics(ロボティクスの活用)」「Rethinking Solution(ヤマハらしいソリューション)」「Transforming Mobility(モビリティの変革)」の3つの注力領域に取り組むことで人々の可能性を拡げ、より良い社会と生活の実現を目指しています。今号では、この3つの注力領域「ART」に関するさまざまな取り組みについてご紹介します。

## Foreword

Monozukuri - ART for Human Possibilities . . . . .	3
Satohiko Matsuyama	

## New Products

Development of Plugged YAMAHA to New Era "E01" . . . . .	6
Takuya Maruo Riki Nakao Eisaku Kanda Shintatou Gotou Masayuki Momoi Katsuya Yazaki Yusuke Akimoto	
"NEO'S" Development - New Standard of Mobility for the Next Generation . . . . .	10
Torao Matsuzawa Takashi Sato Naru Matsumoto Masahiro Tsurumi Ryo Saito Yuji Watase Ichiro Shimomura	
Development of the "HARMO" electric boat maneuvering system . . . . .	15
Masaki Maejima Hikaru Yasukawa Yoshihiro Mizushima	
Development of the flagship sports boat "275SDX" . . . . .	20
Takuya Murayama Masato Takewaka Yuuki Numata	
Self-support Automatic Factory Vehicle "FG-01" . . . . .	25
Takeshi Okada Tomoaki Kishi Masaya Nishimura Tatsuro Mibae Kazuhiro Nakatani Yorifumi Matsumoto	
Takuya Yamauchi	
ANSI/PGMA Standard Compliant Generator with CO sensor for the U.S. Market . . . . .	30
Yoshitaka Ookubo Yuki Nagasawa Yuuma Katsuda Naoyuki Yagi Satoshi Yamaya Masataka Kaneko	
E054 LED Portable Floodlight "X-BUSTER LED" . . . . .	34
Yudai Tokita	

## New Technologies

"E01" Electric Component Technology . . . . .	39
Shintarou Gotou Tsukasa Shimizu Katsuya Yazaki Yoshihiro Yamasaki Takamasa Kamioka	
The AI picking system . . . . .	43
Atsushi Yamamoto Wataru Arita Takashi Saito Kunimune Komaike	
MBD of the Sound Development Process for Outboard Motors . . . . .	48
Kazuhiro Hara Toru Takahashi Kazuki Sano	
Part shape design using electrodeposition coating simulation . . . . .	54
Takuya Shimizu	
Cost reduction of Power Trim & Tilt motor for outboard units . . . . .	57
Hirotaka Kaji Taku Tsujimura	
One-sided flow prevention technology for assist type electric units . . . . .	61
Masamitsu Mizuno	
Data Analysis Platform Supporting Manufacturing Digital Transformation and Examples . . . . .	65
Hokuto Fujii Makoto Sasaki Yuya Miyamoto Hironobu Suzuki	
Modeling methods that contribute to improvements in accuracy of CFD analysis on electric motor . . . . .	71
Takuya Yamauchi Satomi Ishikawa Mika Inoue Hideki Oki	

## Technical Papers

New predictive facility maintenance using smart factory technology . . . . .	76
Tomoya Kumada	
Development of Resin Coated Piston suitable for Monolithic Cylinders made of Hypereutectic Al-Si Alloy . . . . .	81
Keita Watanabe Hirotaka Kurita	
Stiffness optimization process using topology optimization techniques and lattice structures . . . . .	92
Hiroyuki Nagamoto Koji Kobayashi Hideyuki Fujita	

The phrase “once in 100 years” has now come to be used almost on an annual basis. The environment surrounding us is constantly changing due to various factors such as pandemics, military conflicts, lockdowns. Therefore, the power of Agile (agility) and Resilience has become indispensable areas for corporate management. Even though the environment is changing, I think we need to be strongly aware of our own values (value definitions).

The company has “ART for Human Possibilities” as our long-term vision. We believe that this value is where our customers can be not only impressed, but find greater happiness through our products and services, and that we too can feel our own growth and be happier as well. Waving this flag as our value, we need to move forward in this era of great instability.

The word ART has the meaning of Advancing Robotics, Rethinking Solution, and Transforming Mobility, but on the other hand, it is important for Yamaha Motor, that our focus on “Artistic Commitment” is at the manufacturing sites of development and manufacturing. Not only the efficiency of using Robotics and Solutions, but also the value of craftsmanship and workmanship can be compatible, which should lead to further the company’s efforts in the unique style of Yamaha.

Our Monozukuri-manufacturing has accumulated improvements and reforms centered on the methods of theoretical-value-based production. This is a method of thinking about “what is the value in the essence (theoretical value)?” The value in the essence does not only lie in efficiency that achieves the target quickly and conveniently, but also the value of the product that moves the customer and the improvement of one’s own skills and techniques increasing the human resource value.

In order to achieve our long-term vision, the evolution of digital technology in recent years has been tremendous, and now there is an urgent need for further transformation through digitalization. Our DX activities define four areas: marketing, engineering, supply chains, and smart factories.

In the area of “Monozukuri-manufacturing,” which is where I work, the activities of smart factories are named “Value Innovation Factory (VIF)”. This is not just autonomation and labor savings, but also involved in the pursuit of “human value” and expanding the human potential (Human Possibilities). In other words, DX’s D (Digital) is just a means, but it aims to reform the value of people working in factories for the purpose of X (Transformation).

For example, in a low-pressure casting site, we connect a lot of production condition data such as mold temperature and cooling water flow rate with quality as a result index for each shot. This by itself, is just visualization and does not create any value. Members with abundant on-site experience find good product conditions from the connected data and help to mature the management and monitoring process to create “new value” that was not achievable before, such as areas in the prevention of mass defects as well as halving the defect rate. Workers have come to perform value-added work that makes full use of technology and craftsmanship based on data and experience, rather than just simple labor. Then, through the monitoring process, we work to build forecast & predictive management that takes immediate action based on the current production condition data.

This activity is an example of using DX in our thinking of theoretical-value-production and connecting it not only to efficiency, but also to human value reform and on-site management reform.

The background to the unique style of Yamaha is to enrich the abilities and sensibilities of the “people,” as represented by Jin-Ki Kanno (The Seductive Exhilaration of Being One With the Machine)\*. This idea is also incorporated into ART for Human Possibilities. I would like our engineers to not only to pursue efficiency, but also to look to the potential of the “people” who create new value, and to further develop technologies and develop human resources.

If one were to just think about value even a little, this message will hold more value. I hope you will all find value in this piece too.

\*Yamaha Exclusive Development Ideal

The seductive exhilaration felt when one with the machine that is shared as a baseline when quantifying and integrating it into a Yamaha’s performance

“100年に一度の”という言葉が毎年のように使われるようになりました。パンデミック、軍事紛争、ロックダウンなどで、我々を取り巻く環境は激変しています。そのため、企業経営には Agile(俊敏)、Resilience(強靭性・回復力)の力が必須となりました。環境が変化する中ですが、私たちは自分の価値観(価値定義)を強く意識する必要があると思います。

当社では、長期ビジョンとして、“ART for Human Possibilities”を掲げています。これは、お客さまが当社の製品・サービスを通して感動し、もっと幸せになれる事、私たち自身も自分の成長を感じ、もっと幸せになれる事を価値と定義していると考えています。この価値を旗印にして、激変の時代を進んでいく必要があります。

ART という言葉には、Advancing Robotics、Rethinking Solution、Transforming Mobility という意味が込められていますが、一方でヤマハ発動機ならではの、“芸術的(ART)なこだわり”が開発・製造のモノづくりの現場では重要だと思います。Robotics や Solution を用いた効率だけでなく、匠や技巧といった価値の両立ができる、それがヤマハらしさに繋がるはずです。

当社のモノづくりは、理論値生産という手法を中心に改善・改革を積み上げてきました。これは、“本質の価値は何か(理論値)”を突き詰めて思考する手法です。本質の価値とは、単純に早くできる、便利になる効率だけでなく、お客さまに感動していただく商品の価値や、自身の技能・技術が向上し人財の価値を上げることが重要です。

長期ビジョン達成には、近年のデジタル技術の進化はすさまじく、デジタル化による変革も急務です。当社の DX 活動には、マーケティング、エンジニアリング、サプライチェーン、スマートファクトリーの4領域が定義されています。

私の管掌領域である、“モノづくり”領域では、スマートファクトリーの活動を “Value Innovation Factory(VIF)”と名付けています。これは、単に自働化、省人化を行うことではなく、“人の価値”を追求し、人の可能性(Human Possibilities)を拡げていこうとするものです。つまり DX の D(Digital)はあくまで手段であり、X(Transformation)を目的として、工場で働く人の価値を改革しようとするものです。

例えば、低圧鋳造職場では、金型温度や冷却水流量など多くの生産条件データと結果指標としての品質を毎ショット単位で紐づけを行いました。これだけでは、単なる見える化であり何も価値は生まれません。紐づけされたデータから現場経験豊富なメンバーが良品条件を見出し、管理・監視プロセスを成熟させることで、大量不良発生防止、不良率の半減など従来実現できなかった“新価値”を生み出しました。作業者は単純労働でなく、データと経験を基にして技術と匠を駆使した価値作業を行うようになりました。そして、監視プロセスを通して、生産条件データのワーニングに基づき即アクションを行う予知・予測型のマネジメントを構築しています(図1)。



図1 鋳造職場のマネジメント改革事例

この活動は、当社の理論値生産の思考にDXを用いて、効率だけでなく、人の価値改革、現場のマネジメント改革へと結びつけた事例です(図2)。

ヤマハ発動機らしさは、人機官能に代表されるように“人”的能力や感性を豊かにすることであり、その思いはART for Human Possibilitiesにも込められています。当社の技術者が、効率だけを追い求めるのではなく、新しい価値を生み出す“人”的可能性を追求し、技術開発、人財育成を行って欲しいと思います。

皆さんのが少しでも価値について考えていただければ、この文章も無価値でなく、価値に変わります。価値文章となることを願っています。

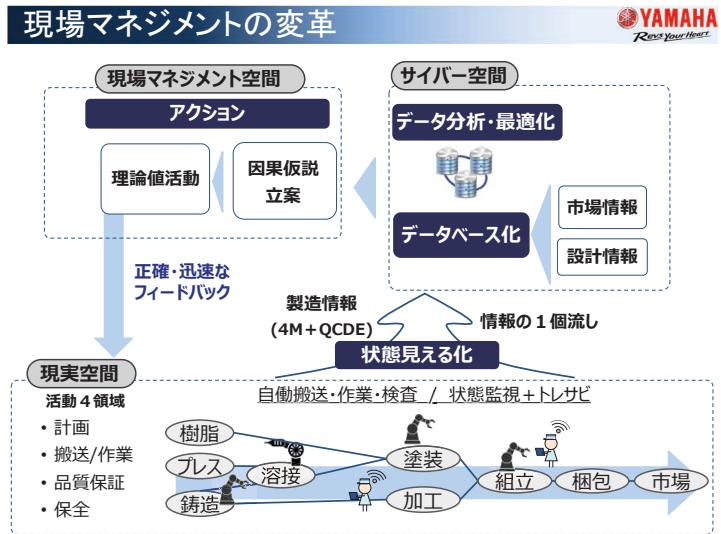


図2 モノづくりマネジメント改革概念図

### ■著者



松山 智彦  
Satohiko Matsuyama  
取締役上席執行役員



## Abstract

In recent years, concerns over the environmental impact of CO<sub>2</sub> emitted from various economic activities have raised environmental awareness around the world. In particular, the automotive industry is attracting attention, and environmental regulations are becoming stricter in many countries to meet the 2050 CO<sub>2</sub> reduction target established in the Paris Agreement. In such an environment, there are high expectations for EVs, which do not emit CO<sub>2</sub> while driving. In this context, the company has developed the "E01," an EV scooter with performance equivalent to the globally popular 125 cm<sup>3</sup>.

## 1 はじめに

近年様々な経済活動にて排出されるCO<sub>2</sub>による環境への影響が懸念され、世界各国での環境意識が高まっている。とりわけ自動車業界への注目度は高く、パリ協定で制定された2050年CO<sub>2</sub>削減目標に向け各国の環境規制が強化されている。そうした中、走行時に排出ガスを出さないEVに期待が寄せられている。

こうした背景から世界的に人気の高い125cm<sup>3</sup>相当の性能を持つEVスクーター「E01(イーゼロワン)」を開発した。

### 2-2. 開発コンセプト

EVの魅力、価値を多くの人に知ってもらうことで将来の普及に繋げていきたいとの意思を込め、開発コンセプトを“Plugged YAMAHA to New Era”と設定した。

そのためにはEVの特徴である「クリーン」「低振動、低騒音」「低中速の高トルク」を「毎日の通勤通学でCO<sub>2</sub>削減」「疲れにくく、早朝深夜でも気を遣わない」「渋滞路、市街地での乗りやすさ」というEVの魅力に置き換えることが重要だと考え、世界的に支持されている125cm<sup>3</sup>相当スクータータイプがこのコンセプトに最適であると判断した。

## 2 開発の狙い

### 2-1. PoC(仮説検証; Proof of Concept)

本モデルは顧客ニーズの把握、周辺ビジネスの可能性、新たな市場開拓などを目的としたPoCモデルとしての市場導入を行う。導入先は欧州、日本、台湾、インドネシア、タイ、マレーシアの国々へ、台数を限定しての運用とする。

## 3 開発の取り組み

### 3-1. PT(Power Train)の開発

125cm<sup>3</sup>相当のEVを初めて自社開発するということで、ゼロからのパワートレーン開発が始まった。その目標には、下記の動力性能を設定した。

- 最高車速: 100km/h (メーター読み)
- 航続距離: 100km (60km/h 定地走行テスト時)

### 3-1-1. モーター

二輪車に採用するモーターにはコンパクトかつ高回転での使用が求められる。そのため「E01」専用となる空冷永久磁石埋込型同期モーター(IPMSM)の新規開発を行った(図1)。



図1 車体フレームヘリジット搭載されたモーター(イメージ)

これによりわずか0~2,000rpmの低回転域で30.2Nmもの高トルクを発生させ3,500~7,800rpmという幅広い回転域で高出力を発揮し続けるパワーバンド特性を実現した(図2)。

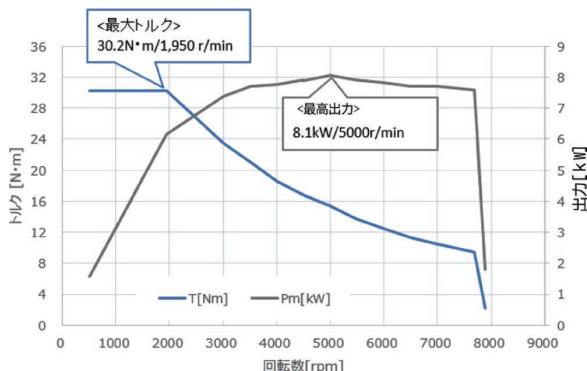


図2 トルク・パワー特性(PWRモード)

この特性により従来のスクーターにあった変速機構構造(CVT)とクラッチが不要になることで、渋滞路・低速走行時の扱いやさと全域でのリニアな加速感をもたらした。

さらに静粛性にも大きく貢献しており、40km/h走行で比較した際の騒音値は約58dBと、同カテゴリのエンジン車と比べ約10dB程静かな走行を可能としている(図3、図4)。

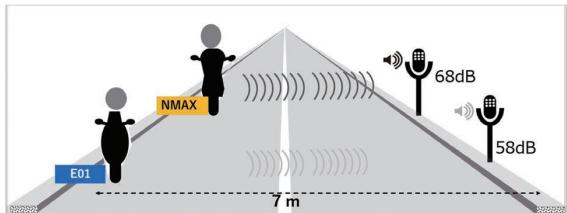


図3 40km/h走行時、反対車線側歩道での走行音比較  
125cm<sup>3</sup>スクーターNMAXの68dB(新幹線車内※1レベル)に対しE01は58dB(銀行の窓口周辺・博物館の館内※1レベル)です。

※1 下記【ご参考】ご参照

### 【ご参考】

#### 《騒音の目安》\*

50dB……●高層住宅地域(昼間)

●役所の窓口周辺

60dB……●銀行の窓口周辺・博物館の館内

●ファミリーレストランの店内

●コーヒーショップの店内

70dB……●新幹線の車内

●主要幹線道路周辺(昼間)

80dB……●航空機の機内

\*環境省「生活騒音パンフレット」(2019年3月発行)より

図4 騒音値の目安

この扱いやすい特性、高い静粛性を獲得したこと、「E01」はEVの魅力を充分に引き出した非常に上質なクルージングを可能としている。

### 3-1-2. Li バッテリー

電源は二輪車専用に自社で開発・組み立てた大容量かつ高出力を両立する車両固定型のリチウムイオンバッテリーとなる。その容量は4.9kWh(社内計測値)で、満充電での航続距離は104km(60km/h定地走行テスト時)を達成した。

またバッテリーケースはCFアルミダイキャスト製であり、ヤマハ発動機が長年培った鋳造技術と加工技術を融合することで、コンパクトで軽量な車両構成に貢献している。これによりバッテリーをシート前方へ配置することができ(図5)、ヘルメットが入るシート下収納を実現した。



図5 車体フレームに搭載されたバッテリーとモーター(イメージ)

### 3-1-3. コントローラー

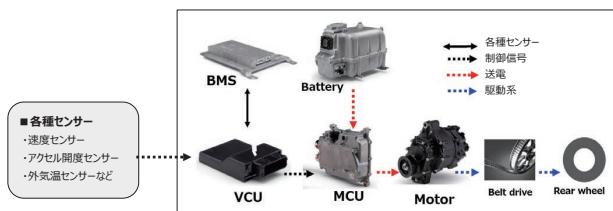
EVという電子制御で駆動するユニットにおいて、そのコントローラーは非常に重要な役割を担っている。「E01」では3種類の電子制御デバイス「VCU」「BMS」「MCU」を搭載している(図6)。

VCU(Vehicle Control Unit)は速度センサー、APSG(Accelerator Position Sensor Grip)など各種車体センサーからの情報を統合演算することで「BMS」「MCU」に適切なエネルギー制御を指示する。

BMS(Battery Management System)は電流、電圧、使用頻度、温度などのバッテリー状況を検出、管理を行うことで、高効率かつ安定したエネルギー・マネジメントを保証している。

MCU(Motor Control Unit)は VCU、BMS より送られるトルク指令値を元にモーターへ送るエネルギーを制御している。

これらの緻密な制御により、エンジン車を思わせる扱いやすい出力特性、3段階(PWR、STD、ECO)の走行モード、1km/hで後進するリバースモード、エンジンブレーキを想起させる回生ブレーキ、TCS(トラクションコントロールシステム)の搭載を可能とした。



### 3-2. 車体の開発

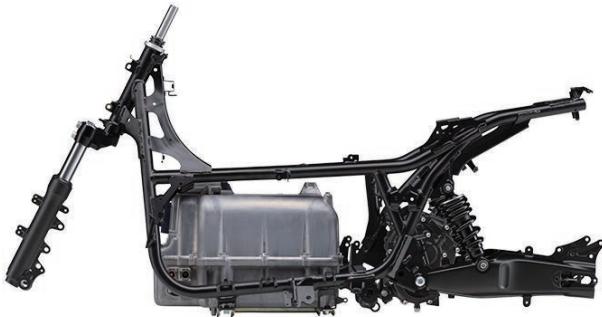
コンピューター用途のスクーターに於いても YAMAHA 独自の開発思想である“人機官能”に基づく操る悦びは非常に重要な。そこで車体開発では各部品を新規開発し、「E01」にとて最適な車両ディメンジョンを追及している。

#### 3-2-1. フレーム&リアアーム

優れた走行性能を実現するため高強度・高剛性に優れたバックボーンフレームを新規開発した。重量物であるバッテリー、MCU、モーターを中央に包み込むフレームワークによりマスの集中化と、前後分布荷重はおよそ50:50配分を実現した(図7)。

さらに後輪懸架には当社のスポーツバイクで実績のあるCFアルミダイキャスト製スイングアームを採用し、軽量かつ高剛性を実現した。

これらによってスポーツスクーターのような高い安定性とライダーの意図通りに駆け抜ける操縦性能を獲得することができた。



#### 3-2-2. サスペンション

フロントにはインナーチューブ径Φ33の正立式テレスコピック、リアには大径コイルバネの2本式サスペンションを車両中央に配置した。これにより30.2N・mという大トルクを吸収しつつコーナリング時のリア捩れを抑えることで、高い運動性能を実現している。

また前後のホイールトラベル量を100mm/90mm 確保し衝撃吸収に優れた減衰特性のバランスによって、石畳などの荒れた路面でも快適で上質な乗り心地を体感することができる。

#### 3-2-3. ドライブ方式

EVらしい静肅性、チェーンメンテナンスからの解放のため、新設計のベルトドライブを採用した(図8)。前述したモーター特性も相まって高い静肅性を獲得したほか、注油等のメンテナンスが不要となる利点がある。



#### 3-2-4. 12V 電源と灯火器

「E01」では87.6V の動力用電源とは別に、12V の補器電源を持つ。これにより既存エンジン車の電装システムを共用することが可能となった。さらに灯火器は全て LED とし、省電力に貢献しつつもスタイリッシュで洗練された外観を実現している。

#### 3-3. 充電システムの開発

バッテリーへの充電は1種類の車体コネクターへ3種類の充電器からの充電が可能な新システムを開発した。市場での使用環境、用途に応じた選定を可能とした。

### 3-3-1. 充電コネクター

充電コネクターは駐輪時の充電作業のしやすさを考慮し、車両前面に配置している(図9)。



図9 フロントに設けた充電コネクター

### 3-3-2. 急速充電器

シェアリング会社、二輪ディーラー等への設置に適した充電器を用意した。1時間の充電で残量0%→90%までの充電が可能であり、1台の親機に1~3台の子機が接続される。

### 3-3-3. 普通充電器

自宅等の私有地への設置に適している。200V 電源で作動し、5時間の充電で残量0%→100%の充電を可能とする。

### 3-3-4. ポータブル充電器

シート下へ収納し携帯することができる(図10)。100V 電源で作動し、14時間の充電で残量0%→100%の充電が可能である。



図10 シート下トランクに収納できるポータブル充電器

## 3-4. 通信機、Web アプリの開発

PoCで車両情報を取得するため、CCU(Communication Control Unit)を搭載した。これには3G/LTE 通信を行う e-SIM と GPS が搭載されており、車両の使用情報がアップロードされる。

またそれらの情報は Web アプリにアクセスすることでユーザーも利用可能となる。走行ログ、バッテリー残量、最終駐輪位置などのデータが確認できる。

このデータ収集から、将来的な二輪 EV 利用団体、運転者のニーズを推測し、社会ニーズに呼応したインフラ提唱や、その知見を製品開発へ反映していく。

## 4 おわりに

これまでヤマハ発動機が培ってきた67年間の二輪車開発技術、1991年 TMS の Frog 発表から31年間の二輪 EV 開発技術を結集した最新鋭のモデルがこの「E01」となる。できるだけ多くの方々に EV モデルならではの魅力を体験していただければと思う。

ヤマハ発動機はより快適で楽しい将来に向けて、「E01」で得た知見を生かして世の中へ新たな感動を創造し続けていく。

### ■著者



丸尾 卓也

Takuuya Maruo

PF 車両ユニット

PF 車両開発統括部

CV 開発部



中尾 利樹

Riki Nakao

PF 車両ユニット

PF 車両開発統括部

CV 開発部



神田 栄作

Eisaku Kanda

PF 車両ユニット

PF 車両開発統括部

車両実験部



後藤 慎太郎

Shintatou Gotou

PF 車両ユニット

電子技術統括部

電子システム開発部



桃井 雅之

Masayuki Momoi

パワートレインユニット

PT プロダクト開発統括部

第1PT 設計部



矢崎 勝也

Katsuya Yazaki

パワートレインユニット

PT プロダクト開発統括部

第1PT 設計部



秋元 雄介

Yusuke Akimoto

PF 車両ユニット

電子技術統括部

電子システム開発部

# New Standard of Mobility for the Next Generation 「NEO'S」 の開発

“NEO'S” Development - New Standard of Mobility for the Next Generation

松澤 虎勇 佐藤 節 松本 成 鶴見 昌弘 斎藤 亮 渡瀬 雄司 下村 伊千郎



## Abstract

In the L1e category (vehicle category under European law), we have introduced many fun scooters in the past increasing the number of younger users. Among these, the scooter “NEO'S(engine model)” (hereafter, the engine model “NEO'S”) equipped with a 50cm<sup>3</sup> engine and capable of carrying two people has been used as a means for short-distance city travel in Europe since its first introduction in 1997. It is especially popular among teenage students.

The 50cm<sup>3</sup> scooter market has seen the introduction of EV models by various companies in recent years, changes in urban systems such as entry bans, departure from four-wheeled commuting due to parking issues and traffic congestion, and therefore a shift to EVs among new and current 50cm<sup>3</sup> users. Demand for EV scooters in the 50cm<sup>3</sup> segment is expected to expand into the future. The EV scooter “NEO'S”(hereafter, EV “NEO'S”)is a model developed to respond to the needs of the EV scooter market in this segment.

In this article, we will introduce an overview of the development of the next-generation EV “NEO'S” as one of our above urban mobility solutions.

## 1 はじめに

L1e(欧州法規上の車両カテゴリー)カテゴリーで、当社は過去に多くのファンスクーターを導入し、若年層のお客さまを増やしてきた。その中で50cm<sup>3</sup>エンジンを搭載し2人乗り可能なスクーター「NEO'S(エンジン車)」(以降、エンジン車「NEO'S」)は、1997年の初代導入以後、欧州・都市内短距離移動のツールとして、とくに10代学生を中心に関心を抱かれている。

この50cm<sup>3</sup>スクーター市場は、近年の各社のEVモデル投

入、進入禁止等の都市制度の変化と駐車問題・渋滞などによる四輪通勤からの脱却、EV化する新規層と従来50cm<sup>3</sup>利用者層のEVシフトの進行により、今後50cm<sup>3</sup>クラスでEVスクーターの需要が拡大すると予想される。EVスクーター「NEO'S」(以降、EV「NEO'S」)は、このクラスのEVスクーター市場のニーズに呼応すべく開発したモデルとなる。

本稿では、上記都市部のモビリティソリューションの1つとしての次世代EV「NEO'S」の開発概要について紹介する。



図1 フィーチャーマップ

## 2 開発の狙い

今回開発したEV「NEO'S」は“New Standard of Mobility for the Next Generation”を商品コンセプトに掲げ、以下の5項目を開発の狙いとして設定し、開発を行った。

- (1)大都市内の短距離移動に十分な動力性能
  - (2)老若男女、幅広いユーザーが扱いやすく、フレンドリーなボディデザイン
  - (3)EVとしての先進機能
  - (4)普及価格帯での販売の実現
  - (5)今後のビジネスユースまで見越した車体機能の拡張性
- 本モデルのフィーチャーマップを図1に示す。

## 3 開発の取り組み

前述の開発の狙いを達成するため、快適性・利便性・拡張性を支える機能と装備を積極的に採用した。また、スタイリングにおいては、「MOTOROID」\*を頂点とした“人機官能EVデザイン”的もと、エンジン車「NEO'S」のシンプルさを継承したEVデザインを表現した。

ここでは、EV「NEO'S」の開発において、車体・EVコンポーネントの作り込み内容およびデザイン面での取り組みについて紹介する。

### 3-1. EV プラットフォームとなるボディ構成

仕向地である欧州に求められる機能のみならず、派生となる仕様および仕向地展開も意識した開発を行った。

#### 3-1-1. 新設計フレーム

フレームは既存のフレームのノウハウを活用しつつEV「NEO'S」用に専用設計し、ビジネス用途への拡張性も備えた強度・剛性を確保した(図2)。



図2 フレーム

\*「MOTOROID」: 東京モーターショー2017に出展した知能化技術を用いて「人とマシンが共響するパーソナルモビリティ」を目指す概念検証実験機

### 3-1-2. 快適なライディング

現行のエンジン車「NEO'S」のライディングポジションを基本とし、大柄なライダーでも快適に乗れるようフットボードの位置を17mm下げ、乗車時の膝の窮屈感を低減させた(図3)。また、欧州向けターゲットに設定されているシート高に対し、小柄なライダーの足つき性も考慮し、シート先端部の形状やフットボードの形状作り込みを行い、幅広い体格のライダーに対応した。



図3 ライディングポジション

### 3-1-3. 前後13インチタイヤ

欧州の波状路を快適に安定した走行ができるよう、前後に専用設計の13インチタイヤを採用した。また、航続距離の向上を目的とし、リヤタイヤに低ロスコンパウンドを採用した。ギア・ベルトドライブ・チェーンなどの機械的ロスのないダイレクトドライブモータ(以降、DDモータ)の採用と相まって、従来コンパウンドに対し約3%の電費向上を達成した。

### 3-1-4. 大容量シート下収納 BOX

収納BOXの開発においては、ヘルメット収納に加え、リチウムイオンバッテリ(以降、Liバッテリ)2台の搭載および前述のライディングポジションの3要素をバランスさせたレイアウトを成立させた。また、ユーザーの日々の着脱性を考慮し、ワンアクションで2台同時に固定可能な構造を採用した(図4)。



図4 大容量 BOX

### 3-2. パワーユニット

電動コンポーネントは、主にモータ・コントローラ・Liバッテリで構成されている。以下の項で、本モデルの特徴について述べる。

### 3-2-1. YIPU II

本モデルでは、機能を集約したYIPU II(ヤマハインテグレーテッドパワーユニットII)(図5)を採用する。YIPU IIは、①ブラシレスモータ、②モータコントロールユニット(以降、MCU)、③ドラムブレーキ、④リヤアームなどを集約することで、軽量・コンパクト・高効率を実現すると同時に、車体のデザインの自由度アップにも貢献しており、アーム前方の高さを抑えたことで、Liバッテリ2台の搭載を可能とした。

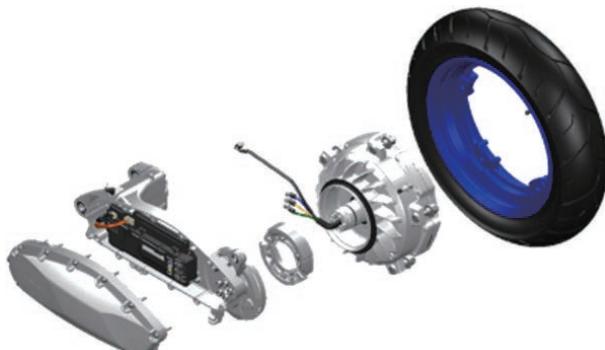


図5 YIPU II

モータは、後輪ハブ部に配置されるDDモータである。減速機を有していないことから、配置部品点数削減によるコストダウンと、ギヤ噛み合いノイズの発生がないEVらしい静肅性を得ることができる。

これまでのDDモータ採用の車両では、リヤタイヤ交換時にモータを外す必要があった。タイヤも含めると後輪が20kg近くあり、また高電圧配線の着脱も必要であるため、エンジン車での作業とは異なり、作業者の負担も増えてしまう。EV「NEO'S」では、モータ本体とホイールリムを分割構造とし、さらにモータ片持ち構造とすることで、ホイールリムだけの着脱という、容易なタイヤ交換を可能とした。

### 3-2-2. 軽量・高出力 Li バッテリ

Li バッテリはこれまでの当社着脱式 Li バッテリパックの設計技術を基盤に高出力18650型セルを採用し、14直列8並列で接続することで出力電圧を50.4Vとし、後輪出力2.5kWを達成する高出力を発揮する。また、出力を維持しつつ着脱操作時のハンドリングの負担を軽減するため、重量を8kgに抑えている。満充電時の容量は新品時約19.2Ah(5HR)であり、約37km(WMTC クラス1/STDモード、バッテリ温度25°C)の走行が可能である(図6)。



図6 Li バッテリ

制御性を生かすべく駆動制御を作り込み、廉価な回転角検出デバイスを採用しつつも高度な制御技術により、リニアなスロットルレスポンスを実現した(図8)。

また、回生ブレーキ※も装備し、既存モデルユーザーにも違和感のないエンジン車のエンジンブレーキのような減速感を演出した。

※ Li バッテリの温度や残容量に従って制動力は制御または制限される。

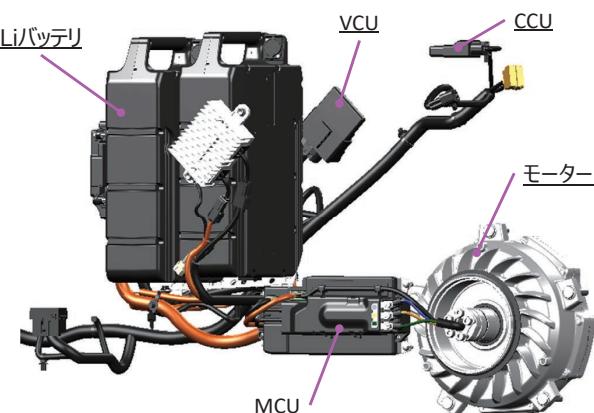


図8 EV コンポーネント構成

### 3-2-3. バッテリ自動切り替え機能

本車両では追加でもう1台 Li バッテリを接続状態で搭載でき、手動による Li バッテリ差替えをすることなく航続距離を延長することが可能である(図7)。使用する Li バッテリの切り替えは、VCU(Vehicle Control Unit)、MCU といった車両システムにて自動制御され、Li バッテリの SoC(State of Charge)などを監視しつつ、交差点の信号での停車時等、走行の妨げにならないよう切り替えを行う。

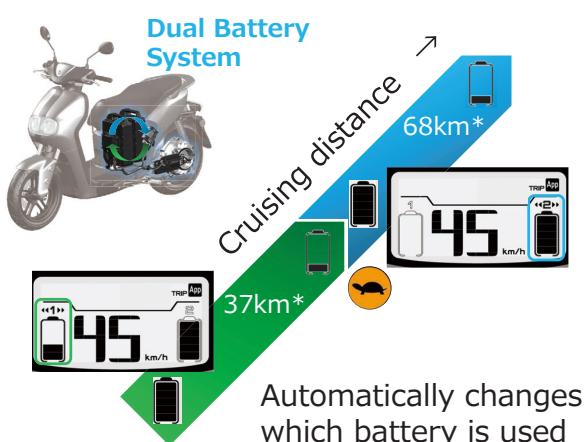


図7 バッテリ自動切り替え機能

\*WMTC クラス1/STD モード、バッテリ温度25°C

### 3-2-4. 自然でコントローラブルな駆動／回生制御

以下に示す EV コンポーネントにおける制御ユニットはエンジンとモータとの特性差である低回転での高トルクとリニアな

### 3-2-5. コネクテッド機能 (CCU)

既にエンジン車に採用されている CCU (Communication Control Unit)<sup>[1]</sup>を最大限共用する形で、EV 対応させ採用している。これにより、ユーザーは専用スマートフォンアプリケーションを用いて CCU とペアリングすることで、Li バッテリ残量、航続可能推定距離、電費などの EV としての特性を含めた車両情報をスマートフォンで確認することが可能となる。

### 3-2-6. 充電器

耐環境性に優れる空冷ファンレス構成を採用し、充電コードの手動巻き取りが可能な筐体構造を設けることで、すっきりとしたコード格納を可能とした(図9)。仕向地の家庭

用電源(AC220V、2極プラグ)から充電が可能で、満充電までの時間は約8時間である。Li バッテリは車両に搭載した状態でも取り外した状態のいずれでも充電が可能である。



図9 充電器

### 3-3. デザイン

#### 1) エンジン車「NEO'S」のシンプルさと、スポーティさを受け継いだデザイン

50cm<sup>3</sup>スクーター「NEO'S」は、丸味のあるボディ、2灯ヘッドライトなどが特徴のシンプルでスポーティな外観で人気のモデルである。

今回のEV「NEO'S」は、これまでのエンジン車「NEO'S」の凜としたシンプルさや余白感を引き継いだ、新しいヤマハEVミュータードのデザイン提唱となる(図10)。



図10 フロントデザイン

#### 2) 欧州の街に溶け込むプロポーション

前後のオーバーハングが少なくアップライトなスタイルは、前後タイヤを力強く大きく見せている。欧州の石畳などを駆ける情景を予感させるが、これは1988年のオフロードスクーター「BWS」誕生以降、ヤマハが継承してきた普遍的なプロポーションである。

#### 3) 水平・垂直を軸としたEVデザイン

クリーンで滑らかに走るEVのイメージを表現するため、水平・垂直軸を基調にデザイン開発した。エルゴノミクス造形(縦軸)と、Liバッテリや足回りなどのメカニカル造形(横



図11 デザインの軸

軸)が互いに交じり合うようにし、“人機官能EVデザイン”を具現化した(図11)。柔らかなラウンドフォルムと2眼ヘッドライトなどとの調和は、穏やかな走りの風景を連想させる。

## 4 おわりに

本プロジェクトは紹介の通り、これまで「Vino」をベースに開発した当社のエレクトリックコミューター「E-Vino」をはじめとして、培ってきたEV制御技術をベースに「車両の扱いやすさ」や

「新世代EVとしての先進装備」、「市場競争力のある価格設定」これらをバランスよく成立させたモデルである。

まだまだEV化へのハードルは高いものの、私たちは本モデルを通じ、製品ライフサイクル全体のカーボンニュートラルへ貢献し、またEV「NEO'S」が一人でも多くのお客様の生活をより豊かにしていくことを願っている。

### ■参考文献

- [1] ヤマハ発動機技報 No. 56,「Global モデル ALL NEW 「NMAX」の開発」,(2021)[https://global.yamaha-motor.com/jp/design\\_technology/technical/feature/pdf/browse/56ss01.pdf#page=2&\\_ga=2.246175430.373992165.1658965959-94613654.1658731602](https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/feature/pdf/browse/56ss01.pdf#page=2&_ga=2.246175430.373992165.1658965959-94613654.1658731602)

### ■著者



松澤 虎勇  
Torao Matsuzawa  
ヤマハモーターエンジニアリング(株)  
事業推進センター



佐藤 節  
Takashi Sato  
ヤマハモーターエンジニアリング(株)  
ボディ開発部



松本 成  
Naru Matsumoto  
ヤマハモーターエンジニアリング(株)  
ボディ開発部



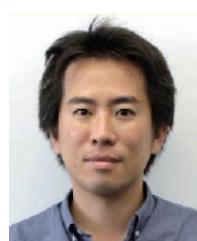
鶴見 昌弘  
Masahiro Tsurumi  
パワートレインユニット  
プロダクト開発統括部  
第1PT 設計部



齋藤 亮  
Ryo Saito  
パワートレインユニット  
プロダクト開発統括部  
第1PT 設計部



渡瀬 雄司  
Yuji Watase  
パワートレインユニット  
プロダクト開発統括部  
第1PT 実験部



下村 伊千郎  
Ichiro Shimomura  
クリエイティブ本部  
プランニングデザイン部

# 電動操船システム「HARMO」の開発

## Development of the "HARMO" electric boat maneuvering system

前島 将樹 安川 光 水島 義博



### Abstract

On the back of heightened environmental awareness in recent years, a wide range of products have been converted to electric power. Yamaha Motor is no exception. The company has many electrification initiatives underway working toward carbon neutrality by 2050.

About 10 years ago, as the automobile industry saw more vehicles converted to EVs, Yamaha Motor anticipated a similar change in the marine industry and the need to prepare itself for electrification in the future. The big challenge the company had at the time was around cruising ranges, as boats, unlike automobiles, are subject to water resistance. This results in the motor's power consumption being large especially when traveling at high speeds, and the weight and size of the battery installed on the boat are major considerations. Thus, the company began the development of a product designed for low-speed applications, to take full advantage of an electric motor's high torque at low speeds, at the same time as minimizing the weight and size of the battery. Yamaha Motor set Europe as its main target for the region's high environmental awareness, with a use scenario of low-speed tourist cruising in canals such as those in Amsterdam. Feedback from local exhibitions and test-ride events was considered in the value verification process to ensure the right direction of development. Thus, the product development concept was defined to provide unprecedented, brand-new value where "passengers on a low-speed tourist cruising boat can feel a sense of unity with nature while hearing the sounds of the water and wind, or simply find greater enjoyment having conversations with their families and friends". The "HARMO" is also the embodiment of the company's effort in the "electric" part of the marine CASE strategy.

### 1 はじめに

近年、環境意識の高まりから様々な製品の電動化が進んでいる。現在ヤマハ発動機においても2050年カーボンニュートラルに向けた電動化の取り組みが進められている。

今から10年ほど前、当時自動車業界のEV化が進む中で、マリン業界においても変化が起きると予想し、将来の電動化に向

けた備えが必要と考えた。当時、大きな課題は航続距離であり、自動車との違いは船の場合は航走時に水中抵抗を受けることである。そのため、特に高速時においてモータ電力消費が大きくなり、船に搭載するバッテリの重量サイズが課題となる。そこで、電動の強みである低回転高トルクを最大限に活かし、それと同時にバッテリの重量サイズを最小限にすべく低速用途に限定した開発を開始した。メインターゲットは環境意識が高い

欧州を中心とし、用途はアムステルダム運河などの低速遊覧を想定した。現地での展示会や試乗会を通じて価値検証を行なながら開発の方向性を確認し、「低速遊覧で乗船者が水の音や風の音を聞いて自然との一体感を感じながら家族や友人と会話を楽しむことができる」今までにない全く新しい価値を提供するという開発商品コンセプトを固めた。また、この「HARMO」はマリン版 CASE 戦略における“Electric”分野の結実である。

## 2 開発の狙い

低速用途に限定し、“低速を究める”コンセプトのもと「圧倒的な静肅性」「高効率」「低速高推力」を実現すべく、電動推進モータはリムドライブ方式を採用した。インペラとダクトは低速で大きな推力を取り出せるように低速に特化した形状の作り込みを行った。ステアリングは小回りや回頭性の向上のために舵角が実現できる一体型電動ステアリングとした。操船制御システム「HELM MASTER EX」<sup>[1][2]</sup>の技術を活かしたジョイスティックなどの制御システムを採用し、ただの電動推進機ではなくヤマハの強みの技術を取り入れることで高付加価値となる製品を目指した。

市場導入に先立ち、2020年7月より実証運航を開始した小樽運河クルーズでの「HARMO」の運航の様子を図1に示す。クルーズ所有艇のうち、カナル7号に搭載されている。「モータ音も静かなので、乗りながらより一層水の音や風の音を楽しむことができます」「ジョイスティックのシンプルな操作で直感的なかじ取りができる、(中略)Uターン時、船をより簡単に回転させることができる」<sup>[3]</sup>と紹介されている。



図1 小樽運河クルーズの様子

## 3 商品の特徴

### 3-1. 基本諸元

上述の通り、「HARMO」は従前の電動推進機と異なり、ガソリンエンジンの置換でない新たな価値を創造する低速専用の電動操船システムとして開発した。表1に電動推進機本体の主要諸元、図2に構成部品を示す。電動推進機ユニットの駆動モータには48Vバッテリ、それとは別にシステム駆動用に12Vバッテリの組み合わせとなる。

表1 主要諸元

モデル名	HV3.7A
モータ出力	3.7kW/970rpm
定格電圧	48V
重量	55kg
インペラ	「HARMO」専用(交換不可)
ステアリング方式	電動 SBW
舵角	±70deg
チルト方式	電動チルト



図2 電動推進機と操船システムを構築するリギング類

### 3-2. 電動システム

図2に示される電動推進機構造を実現するために、モータ、モータコントロールユニット(MCU)は「HARMO」専用設計をしている。図3に内部構造を示す。モータはコルトノズル部分にステータコイルを、インペラリム部分にロータを埋め込んでいる。これにより、減速ギアを用いなくても、中心軸から大径プロペラリム部に発生する力から高トルクを生み出し、低速でも高いスラストを発生させることができる。さらに、大径モータによる腕の長さに加えて、多極化(50極 60スロット)も高トルクに貢献している。

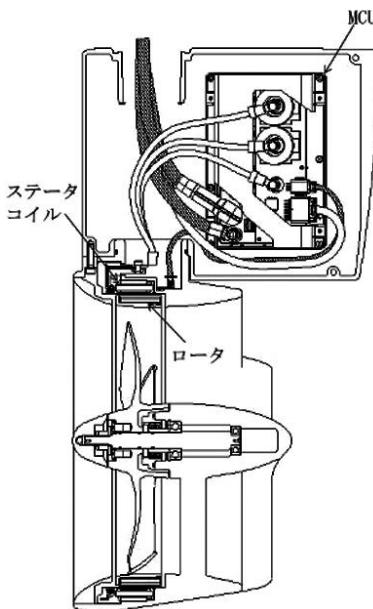


図3 電動推進モータ、MCU の配置図

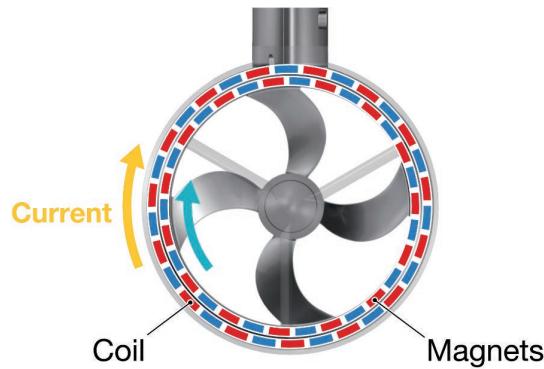


図4 リムドライブ駆動

### 3-3. 推進システム

「HARMO」の推進システムは図5に示すようにダクト、インペラ、インペラの保持軸を支えるステータフィンの3要素で推進システムを構成している。

ダクトは断面が翼形状しており、内側のインペラが回転することでダクト内外の圧力差よりダクト自体が推力を発生させる。その大きさは最も推力の大きい動きだしのシーンでインペラ推力の約7割の大きさとなる。

インペラは低速から大きなトルクを出せるモータの特性に合わせ、大径化し低回転から高スラストを出せるように設計を行った。高回転で使用する船外機プロペラとは設計思想の異なる商船の技術を取り入れている。

ステータフィンは翼形状をしており、インペラから発生する旋回方向の流れを打ち消す方向に角度をつけて設置している。本来の軸を支える機能のみでは抵抗になる部品だが、翼型と迎え角の最適化を行うことでステータフィン自体が推力を発生させ推進効率改善に貢献している(特許出願中)。

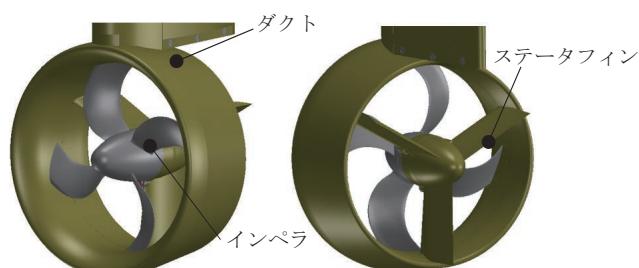


図5 推進システム

### 3-4. 電動ステアリングシステム

システムは、ステアリングモータと減速機構とステアリングコントロールユニット(SCU)で構成されており、船側に設置されたヘルムユニットからの信号を受けたSCUがステアリングモータをコントロールする。モータの駆動力は減速ギアを介して電

動推進モータ部と一体化されたシャフトを回転させることで、推力方向を変える仕組みである。図6のように従来の船外機の舵角士35degから2倍の士70degの大舵角を確保できる構造とした。リムドライブモータが圧倒的な静肅性を持つため、従来の船外機では気にならなかったステアリング減速機構のギア音に対してもギアバックラッシュ調整やギア研磨を行うことで音の低減を図った。



図6 電動ステアリング舵角範囲

### 3-5. 操船システム

「HELM MASTER EX」を活用し、図7で示すように直感的な操船が可能なジョイスティックや推進機2機掛け時に横移動が可能な操船システムを開発した。図8に操船システムを示す。ヤマハ独自の通信ネットワークにより、推進機システムと操船システムを繋げることで統合制御が可能なシステム構成とした。また、将来の先進システムとも繋がることを想定した次世代電動操船システムのプラットフォームとして開発した。

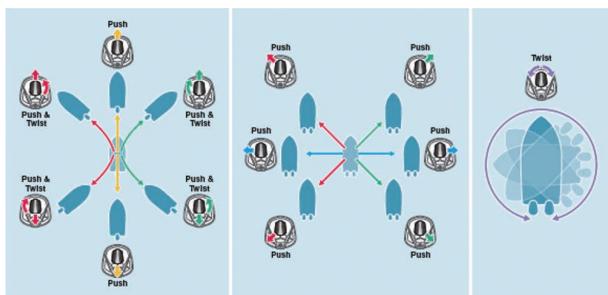


図7 ジョイスティック操作と船挙動



図8 操船システム

### 3-6. デザイン

図9の“SMART&ELEGANCE”をデザインコンセプトとし、高い環境性能を実現する先進技術(ADVANCE)と共に、名前「HARMO」の由来であるヒト・環境・ボートとの調和(HARMONY)を意識して、クリーンかつエレガントなボートテールシリエットによりヤマハらしい上質さ(PREMIUM)を表現した。



図9 デザインコンセプト

### 3-7. 信頼性

「HARMO」は従来の船外機と同等の信頼性を確保すべく、船外機で行っている評価基準を基に開発を進めた。耐食性は船外機で採用している耐食技術や塗装技術を織り込み、海水環境でも問題無く長い期間使用できる品質を確保している。また、強度に関しては、船外機で考えられた開発品質基準を基に設計し、実機評価をクリアしている。また、図10に示したように停泊時に推進機の腐食や海藻などの付着を防ぐために、推進機を水面から出すことができる電動チルトアップ機能を織り込んだ。定期メンテナンスは、アノード交換と定期グリス充填のみとなっている。

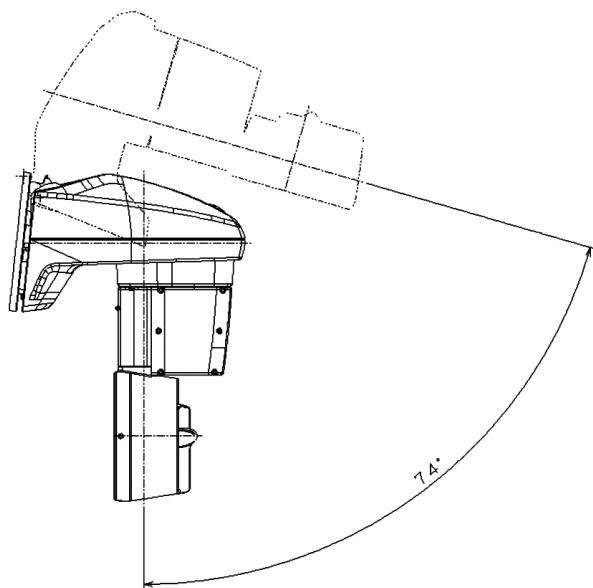


図10 電動チルトアップ可動範囲

■著者



前島 将樹

Masaki Maejima

マリン事業本部

開発統括部

先行開発部



安川 光

Hikaru Yasukawa

マリン事業本部

開発統括部

先行開発部



水島 義博

Yoshihiro Mizushima

マリン事業本部

開発統括部

電動システム開発部

## 4 おわりに

2022年春から欧州向けに「HARMO」の販売を開始しており、市場から「HARMO」の商品性に対し好評な声が届いています。マリン事業部門において電動製品を一から開発することは初めてあり、また売り先を探しながら、市場を開拓しながらの開発ということもあり、通常の開発とは異なった点が多くあったが、失敗を恐れずにチャレンジしてここまで来られたことは大きな自信になった。今後「HARMO」をさらに進化させながら、新しい価値を提供できるようチャレンジを続けていく。

■参考文献

- [1] ヤマハ発動機 ホームページ「ヘルムマスターEX- マリン製品」<https://www.yamaha-motor.co.jp/marine/lineup/outboard/helmmasterex/>(アクセス日 2022/7/13)
- [2] 伊藤 誠, 内藤 克俊, 田形 彰大:「新操船システム「Helm Master EX」の開発」, ヤマハ発動機技報 2021-12 No. 56
- [3] 小樽運河クルーズ(otaru.cc) ホームページ「船のご紹介」<https://otaru.cc/canalboats/>(アクセス日 2022/8/10)

村山 卓弥 竹若 誠人 沼田 裕貴



## Abstract

Yamaha Motor have installed the maneuvering assist system "DRiVE®" on the sports boat(hereinafter, SB)"275SD" [1][2] announced in 2019 and have also expanded this system to other models.

Previously, it was necessary to operate the remote-control lever with the right hand while turning the steering wheel with the left hand, but "DRiVE" makes it possible to move forward and backward at low speeds using the paddles without removing both hands from the steering wheel. As a result, even in crowded marinas, it is now possible to approach and dock at the pier without stress. Because of its uniqueness and ease of maneuvering, it won the NMMA Innovation Award at the Miami Boat Show, the world's largest boat show, and has received great interest from the market.

Due to the recent increase in boat sizes and the growing emphasis on premium levels, there has been a growing demand for such advanced boat control systems. In addition, new customers are entering the marine leisure business due to the growing interest in outdoor activities.

Under such circumstances, we have developed the second-generation maneuvering assist system "DRiVE X®" with new functions to expand the versatility of maneuvering the SB at low speeds and make it easier to dock and depart. As a result, it is now possible for further maneuverability, such as lateral movements and pivot turns, which were not possible with the DRiVE. This article introduces the flagship model "275SDX" equipped with the "DRiVE X".

## 1 はじめに

当社では2019年に発表されたスポーツボート(以下、SB)「275SD」[1][2]に操船アシストシステム「DRiVE®」を搭載し、その他のモデルにも展開をしてきた。

従来は左手でステアリング操作をしながら右手でリモコンレバーを調整する必要があったが、「DRiVE」はステアリングから両手を離さず手元のパドルで低速での前後進を行うことを可能とした。これにより混雑したマリーナでもストレス無く桟橋へのアプローチや離着岸が可能となった。その独自性と操船のし

やすさから、世界最大規模のボートショーである「マイアミボートショー」でNMMA イノベーションアワードを獲得し、市場から高い評価を得ている。

近年の艇体の大型化やプレミアム指向の強まりによって、このような操船アシストシステムの需要が高まっている。またアウトドアマインドの高まりにより新規顧客のマリンレジャーへの参入も拡大傾向にある。

そのような中で、SB の低速領域での操船の自由度をさらに高め離着岸をより容易にするため、新たな操船機能を追加した第二世代の操船アシストシステム「DRiVE X®」を開発した。これ

により「DRIVE」では行えなかった横移動やその場回頭などの操船も可能となった。本稿ではその「DRIVE X」を搭載するフラッグシップモデル「275SDX」を紹介する。

## 2 開発の狙い

### 2-1. 企画目標

「275SDX」では下記3点を企画目標とした。

- ・ ヤマハ SB の独自技術である「DRIVE」を正統進化させる
- ・ 洗練されたデザインによりプレミアム感を演出する
- ・ 低速操船時(主に離着岸時)の操作性向上によりユーザーへ安心感を提供する

### 2-2. 技術目標

企画目標を達成するため、下記3点を技術目標として開発を行った。

- ・ ステアリングから手を離さずに横移動やその場回頭ができるインターフェースを開発する
- ・ インターフェースのデザインは「275SDX」のコックピットと統一感をもたせる
- ・ メイン市場である北米の風速環境から想定される逆風条件下でも押し戻されない横移動の推力を実現する

### 2-3. デザイン

“Intelligent Dynamism(知的躍動感)”をデザインコンセプトとし、知的に調整された機能形状を躍動的に表現することを意図してデザインに落とし込んだ(図1)。



図1 デザインコンセプト

ボートのヘルム回り(図2)と一体感を持たせ、フラッグシップモデルにふさわしい高級感を演出するために、ヤマハ SB 初となる音叉マークのライトアップを織り込んだ(図3)。



図2 「275SD」のヘルム



図3 音叉マーク背面のライトアップ

初めて「DRIVE X」に触れるお客さまでも簡単に操作できるよう、直感的なボタン配置とした(図4)。またステアリング全体を俯瞰して見たときにボタンがバランスよく配置され、美しいY字のシェイプでシャープに見えるようデザインした。



図4 ボタン配置

### 3 仕様と技術の特徴

#### 3-1. 「DRIVE X」機能

「DRIVE X」の機能について紹介する。第一世代の「DRIVE」パドルでの前進／後進機能に加え、「DRIVE X」はステアリングスイッチによる横移動やその場回頭、さらにSBオリジナル機能として桟橋ホールド機能も搭載した(図5)。



図5 「DRIVE X」の機能

横移動はステアリングスイッチの左右に設置されたボタンを押すことで作動し、スイッチを押している間だけ横向きの一定の推力が発生するシンプルな操作方法である。横移動中にパドルを操作することで斜め移動となり、ステアリングホイールを操作すると船の向きが変わる。風が強い時などは HIGH MODE を有効にすることで推力を大きくすることができます。

その場回頭は PIVOT TURN ボタンを押すことで機能が有効になり、ステアリングホイールを一定以上回すとその方向に船が回転する。

桟橋ホールド機能はワンタッチで横向きの推力が維持される機能で、着岸後に同乗者がロープワークをしている間の操船者の負担を減らすことができる。

また低速時の旋回性を向上するため、低速旋回補助制御も織り込まれている。ステアリングホイールを一定以上回すとその操作量に応じてスロットルやシフトを自動的にコントロールし、低速領域での船の旋回性を向上させる。シームレスな制御により操船者は違和感なく操船ができる。

以上のようにSBの操船性を向上する機能を多数織り込んだ。

#### 3-2. 「DRIVE X」開発

「DRIVE」は、低速での操船性を向上させた業界初のパドル操船システムである。その最大の特徴は“ステアリングから手を離すことなく”手元のパドルでシフト／スロットルを操作できることである。通常ボートを操船する時は、片手でステアリング、片手でリモコンレバーを持って操船するため、狭水路や桟橋での操船には慣れと練習が必要である。「DRIVE」では、操船で一

番難しい“離着岸での安心感”を提供している。

これらの特徴をさらに向上させるためのアイデアが、ステアリングスイッチによる船の横移動である。“ステアリングから手を放さない”という安心感を残しつつ、横移動機能の追加によってより簡単に“離着岸ができる”価値を提供した。

パドル操船がしやすく、かつ容易に指の届く位置に横移動スイッチを配置し、着座状態・立ち乗り状態のどちらでも違和感なく押せるボタンレイアウトとした。スイッチを直視しなくても押し間違えないように、ピアノの白鍵・黒鍵のレイアウトから着想を得て、横移動ボタンを凸形状としリップを付けた。一方で桟橋ホールドモードボタンは、不意に押すことが無いようにボタン面を横移動ボタンやケース面よりも奥に配置した(図6)。



図6 ステアリングスイッチのボタン形状

「ヘルムマスターEX」<sup>[3][4]</sup>のJoystickを参考に、防水構造の開発を行った。基板や配線貫通部に直接水がかかる(水圧がかかる)ことをケースで防ぎつつ、凍結による破損を防ぐためにスイッチ内部の水抜け性を確保した。

音叉マークのライトアップは、マーク背面のLEDレンズの光をスイッチカバーの表面で反射させて、上質な存在感を演出した。

ステアリングスイッチのデザインと組立性を向上するために、ステアリングホイールの新作も行った。組立・交換を容易にするため、既存の「DRIVE」の組立手順から大きくそれることなく、ホイールへの取り付けが可能な構造とした。

これらの取り組みにより、操作性とデザインを両立し、信頼性や組立性も確保することができた。

#### 3-3. ディスプレイ

12.3インチの大型液晶ディスプレイ上には、「DRIVE X」動作中の船の動きが一目で分かるPop-up tipsを表示し(図7)、より直感的かつユーザーフレンドリーな操作システムを実現した。



図7 12.3インチディスプレイ

### 3-4. 新開発リバースバケット

充分な横移動の推力を得るため、高効率のリバースバケット(図8)を開発した。横移動を行うためには、推進器を2基搭載している船の場合は片方を前進方向に、もう片方を後進方向に推力を発生させ、それぞれの推進器の舵角を船の重心付近に向ける。SBのジェット推進器の場合、リバースバケットでジェット噴流の向きを変えることで後進方向の推力を発生させる。従来のリバースバケット(図9)では横移動に必要な後進推力を発生することができなかったので、高効率のリバースバケットの開発を行った。

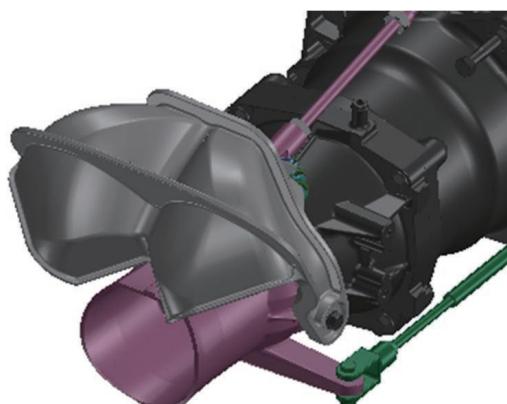


図8 新開発リバースバケット

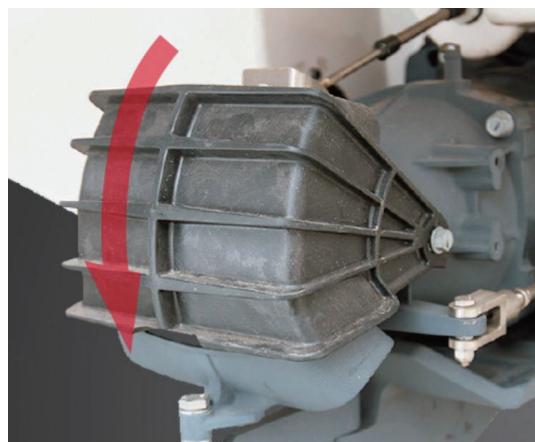


図9 従来のリバースバケット

流れ解析によりバケット内の水流を可視化し(図10)、水流漏れを低減させながら後進推力に寄与する水流を増やすことで、流れを最適化した。これにより、後進推力が従来比で約2倍となるリバースバケットを開発することができた(図11)。

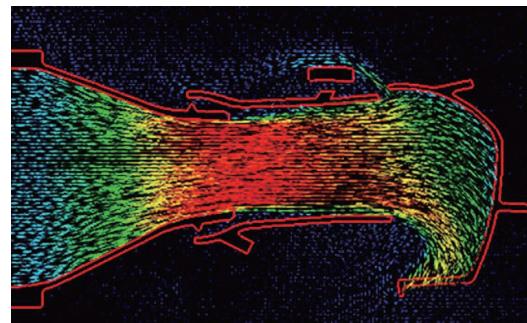


図10 新開発リバースバケットの流れ解析

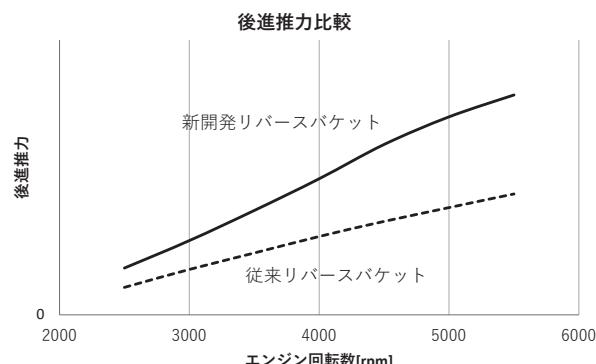


図11 後進推力の比較

### 3-5. 操船性能

新開発リバースバケットにより、メイン市場である北米の風速環境から想定される逆風条件下でも押し戻されない横推力を実現することができた(図12)。

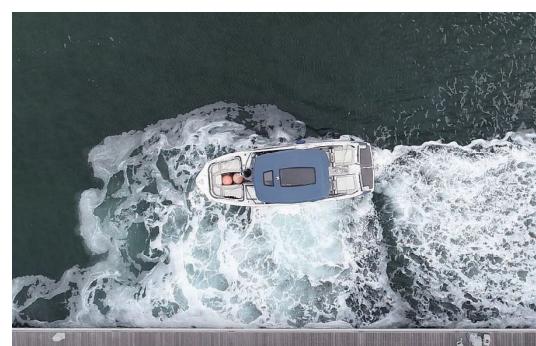


図12 横移動

また上述した低速旋回補助制御や新開発リバースバケットの効果により、低速領域での操船性がより向上した(図13、14)。



図13 前進スラローム



図14 後進スラローム

### ■著者



村山 卓弥

Takuya Murayama

マリン事業本部

開発統括部

艇体開発部



竹若 誠人

Masato Takewaka

YMMC<sup>1)</sup>



沼田 裕貴

Yuuki Numata

YMUS<sup>2)</sup>

1)YMMC: Yamaha Motor Manufacturing Corporation of America

2)YMUS: Yamaha Motor Corporation, U.S.A.

### ■映像ライブラリー

275SDX\_DRiVE X 機能紹介

[https://global.yamaha-motor.com/jp/design\\_technology/technical/library/mov/57ss04.html](https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/library/mov/57ss04.html)



## 4 おわりに

「275SDX」に搭載された「DRiVE X」は、「DRiVE」の正統進化として低速操船の幅を広げるため多くの新機能、新機構を織り込み、ヤマハ独自の技術によってお客様への提供価値を高めた。また、今回の新機構によってSBを前後左右・回転方向に動かすことができるようになったため、Autonomous(自律航行)の基盤技術を確立できた。引き続き進化と改良に取り組み、お客様に選ばれ続ける商品を提供していきたい。

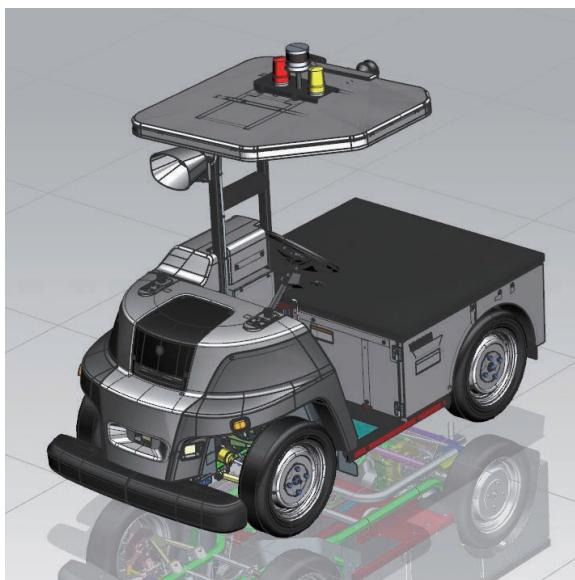
### ■参考文献

- [1] ヤマハ発動機ホームページ「275SD」<https://www.yamaha-motor.co.jp/marine/lineup/boat/275sd/>
- [2] ヤマハ発動機技報 No. 55、「フラッグシップスポーツボート「275SD」の開発」,(2019)[https://global.yamaha-motor.com/jp/design\\_technology/technical/product/pdf/browse/55ss04.pdf](https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/product/pdf/browse/55ss04.pdf)
- [3] ヤマハ発動機ホームページ「ヘルムマスターEX」<https://www.yamaha-motor.co.jp/marine/lineup/outboard/helmmasterex/>
- [4] ヤマハ発動機技報 No. 56、「新操船システム「HelmMasterEX」の開発」,(2021)[https://global.yamaha-motor.com/jp/design\\_technology/technical/feature/pdf/browse/56ss03.pdf](https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/feature/pdf/browse/56ss03.pdf)

# 自立型工場自動搬送車「FG-01」

Self-support Automatic Factory Vehicle "FG-01"

岡田 健史 岸 知昭 西村 政哉 實生 達朗 中谷 和弘 松本 順文 山内 拓也



## Abstract

In April 2020, Yamaha Motor Co., Ltd. (hereinafter, the Company) and Tier IV Co., Ltd. (hereinafter, T4) established the joint venture, eve autonomy Co., Ltd. (hereinafter, eve autonomy), which provides automated goods transportation solutions, including those within factory premises, and the three companies have developed the new self-driving EV "FG-01." The "FG-01" is a partner Factory Gear that can automatically deliver items within the factory by combining our vehicle development technology for eve and the open-source automatic driving software "Autoware" (hereafter, Aw) promoted by T4.

## 1 はじめに

2020年4月にヤマハ発動機株式会社(以下当社)と株式会社ティアフォー社(以下T4)は、工場敷地内をはじめとしたモノの自動搬送ソリューション事業を行う合弁会社「株式会社eve autonomy(以下eve)」を設立し、三社で新型自動運転EV「FG-01」を開発してきた。「FG-01」はeve向けに当社の車両開発技術と、T4が推進するオープンソース自動運転用ソフトウェア「Autoware」(以下Aw)を融合した、工場内のモノを自動で配送できる相棒Factory Gearである。

## 2 開発の狙い

工場の物流現場は、高まる多品種少量生産のニーズと慢性的な人手不足により、作業員配置を前提とした従来型の設備・運用では、需要に合わせた効率的な生産体制の維持が難しくなってきている。この課題に対し、商品コンセプト“REAL WORK HORSE”を掲げ、以下に主眼をおいて開発をおこなった。

- 1) 建物内部、建物間の物流ができるコンパクトな車格
  - 2) 荷物積載、牽引ができる
  - 3) 人にやさしく容易に周囲から認知できる
  - 4) 障害物が回避できる
  - 5) 簡単に走路設定ができる自動運転システム
- 図1に本モデルのフィーチャーマップを示す。

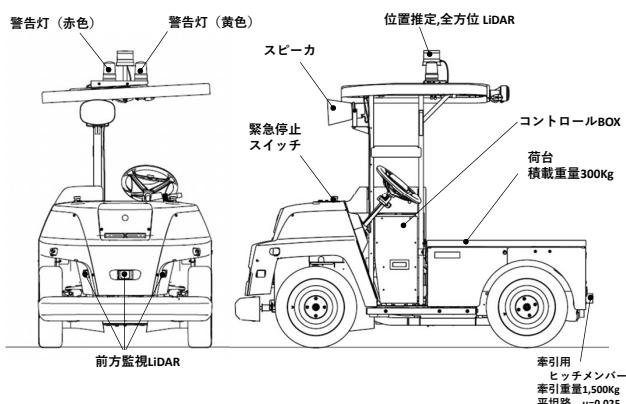
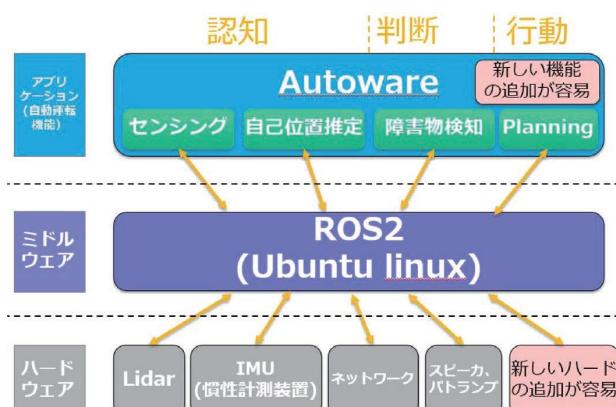


図1 フィーチャーマップ

### 3 開発の取り組み

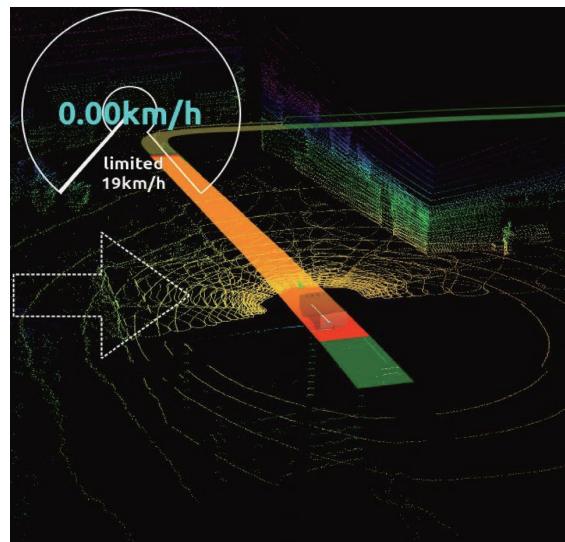
#### 3-1. Aw を活用した自動運転への取り組み

Aw とは ROS2 (Robot Operation System 2) をベースとしたオープンソースの自動運転ソフトウェアであり、図2のように自動運転に必要な「認知」、「判断」、「行動」のすべての機能を有し、効率的なソフト開発が可能である。本プロジェクトでは、LiDAR (ライダー:Light Detection And Ranging)などのセンサ構成の再構築や経路計画機能の向上、パトランプや音声による周囲への警告機能などを追加した。このように今後も市場の要望に沿ってハード、ソフトともに比較的迅速な対応が可能な点が特徴である。



「FG-01」にはセンシングのための LiDAR が搭載されており、LiDAR はレーザー(近赤外線)を照射し、その反射光をスキャンすることで周囲環境との距離情報を取得する。Aw はその情報を利用して3D の点群を生成し、事前に作成した3D の点群マップと、リアルタイムで取得した点群のマッチングを行うことで自らの車両の位置を推定することができるため、昼夜を問わず自動走行が可能である。図3に実際の走行中の点群と走行経路の様子を示す。

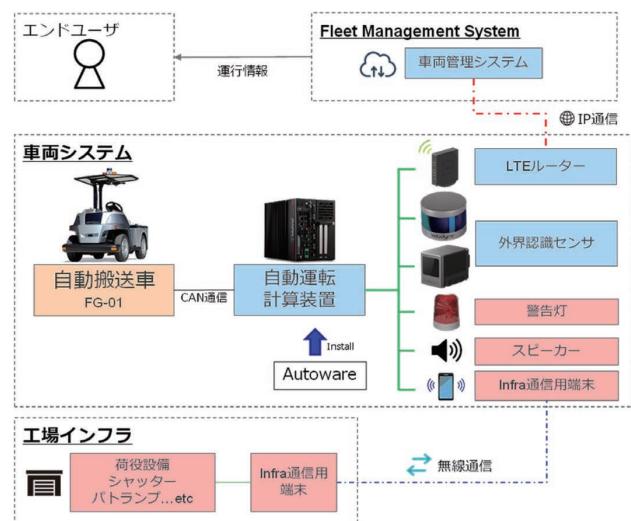
また Aw が改良された場合、ネットワークから機能をアップデートする OTA (Over The Air) なども開発されており、これらの新規機能に関して、車両と Aw のエラー情報などを三社で共有しながら Aw を評価し、製品全体としての成熟を図りつつ、今後の自動運転車両に必要な機能の蓄積を行ってきた。



#### 3-2. 無人搬送システム

「FG-01」の無人搬送システムは、Aw をベースに、各種工場向けの追加機能を組み合わせて構成している。

Aw は、3D-LiDAR とデジタル地図のみで、自動運転機能を実現することができ、磁気ネイル等、走行経路を表現するためのインフラ設備を必要としない。このため、初期導入コストを抑えて省人化ソリューションを提供することが可能である。無人搬送システムの全体構成を図4に示す。



### 3-3. 狹い工場通路の物流を可能とするコンパクトな車体

「FG-01」車体開発にあたり建物内部の物流ができるコンパクトな車体をヤマハモーターパワープロダクツ株式会社(以下YMPG)製ランドカー(以下LC)ベースで検討した。LCとの部品や製造工程の共通化によって、部品コスト、投資および開発工数を削減することが重点テーマの一つであった。狭い建物内部を走行するためにはホイールベースの短縮は必須でありフレームの新作は避けられなかったが、LCのサスペンションおよびステアリング、ブレーキ、モータ等を LC のまま搭載できるフレーム構成とし部品構成を共通化したこと、製造ラインも LC と一緒に共通化することが可能となった。また、LC と一緒に共通化が不可能な荷物積載やけん引に関わる新規の構造部位に関しては、当社の解析技術を活用することにより、強度剛性を確保した上で複雑な板金の使用を減らしつつ既成のパイプ形状を最大限そのまま使用する構造とした。これにより金型投資や加工、溶接の工数を抑えて投資の最小化を実現した(図5)。

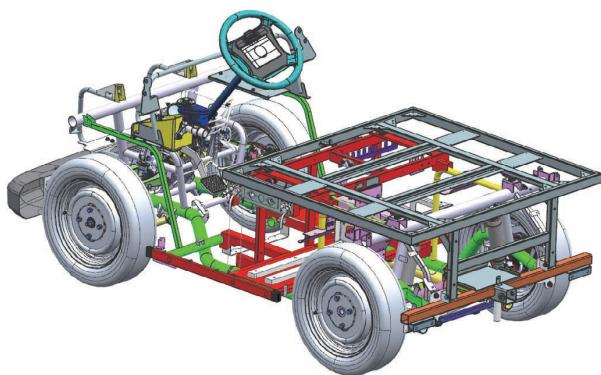


図5 パイプ材を活用したフレームワーク

### 3-4. 稼働率向上のためのバッテリ交換システム

BEV(Battery Electric Vehicle)にはエネルギー密度や安全性の制約により充電ごとの走行距離が短く、充電には長い時間がかかるという課題が未だ存在する。一方、工場における物流は操業時間中常時稼働できることが求められるため長時間の充電による停止をすることは困難である。そこで「FG-01」では最大限まで車両の稼働率を向上させることを目的とし、クレーンやフォークリフトを使用することなく、一人でバッテリを簡単に交換できるシステムを開発した(図6)。これにより数分のバッテリ交換だけで稼働し続けることが可能となり、長時間操業する工場物流の需要に対応できる車両となった。

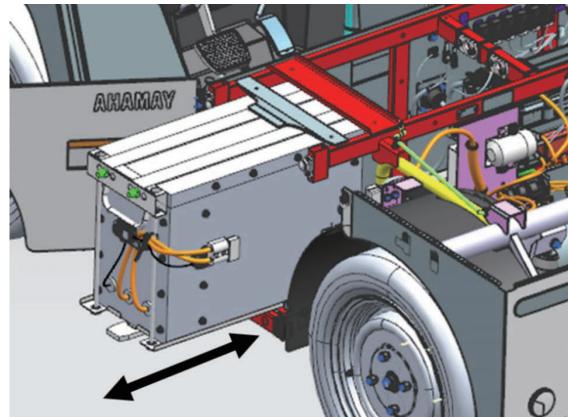


図6 バッテリ交換構造

### 3-5. 駆動モータのサーマルマネジメントシステム

高負荷、連続稼働、力行効率が低い低速が増加するなど従来と異なる使われ方で、モータの温度上昇が課題となる。内部の温度変化を予測できる非定常の熱伝導、熱伝達、発熱(電流、摩擦)モデルを開発、実装し、モータ保護を行った。

ブラシモータの構成部材をステータ側の界磁コイルとコア、モータカバー、ローター側のブラシとアーマチュア、モータ内外の空気で代表させ、各パーツの熱収支をモデル記述し結合した(図7)。これにより駆動モータの全体の熱収支、各部の温度変化が計算できるようになった。熱伝導率は部材の物性値、熱伝達率は論文から相場値で0.9以上の高い相関を示した<sup>[1][2][3][4]</sup>。そこから実走データを元に熱伝達率を最適化し同定した。初期温度が合えばRMSE(Root Mean Squared Error:二乗平均平方根誤差)3°C以下と高い精度を示す。この精度を維持しながら、コントローラへ実装できるレベルへ分割要素を減らし、時間刻みの幅を広げ、計算コストを圧縮して実装することができた。課題は初期温度の決定で、車載ではモータカバー温度を計測して参照温度とし、初期温度のあたり付けと収束性を高めている。この機能から温度上昇とともに走行可否を判断し、モータ保護を実施している。

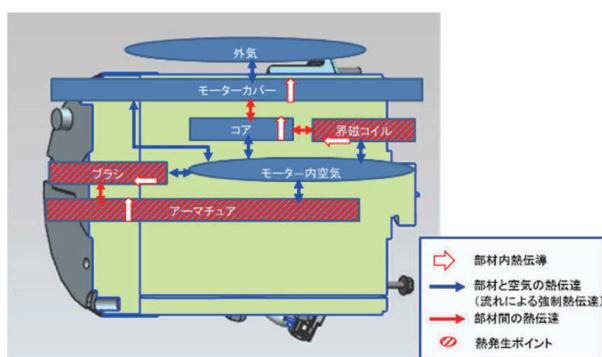


図7 駆動モータのサーマルマネジメント

### 3-6. 自動運転を支える高精度な角度検出と故障検出機能を兼ね備えた舵角センサ

車両の進行方向を検出する舵角センサ(図8)は前左輪・前右輪に近い位置に搭載されており、前輪タイヤの切れ角を検出する。舵角センサは旋回時に前輪が転舵する中心軸上に取り付けられており、フロントサスペンションの伸縮の影響を受けずに純粋な切れ角を得ることができる。また、舵角センサを左右の二重系とすることでセンサ値の比較による故障検出も可能としている。なお、「FG-01」では一般的な四輪車と同様にアッカーマン機構が採用されており、旋回時では内輪と外輪で切れ角が異なるため、舵角センサ値を操舵制御や故障診断に用いる際には切れ角の差異の影響を無くすための角度変換を実施している。

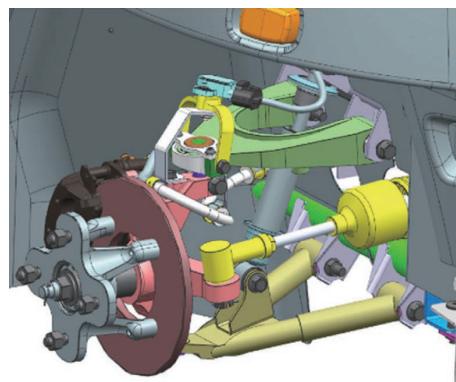


図8 舵角センサレイアウト

### 3-7. 部品レイアウトと放熱設計のための CAE 活用

「FG-01」は荷物積載用の荷台寸法を大きく取ることが求められ、相対的に無人搬送システムの構成部品を限られたスペースにレイアウトする必要がある。また、無人搬送システムは、車両の周囲環境をリアルタイムに把握するため、負荷が高い演算を繰り返し実行しており、計算端末から発生する熱量を効率的に放出するための熱設計も重要である。

図9は新規開発した、無人搬送システムデバイス収納用コントロール BOX の熱流体シミュレーション結果であり、筐体内の空気の流れとヒートスポットを評価した時の様子である。開発の初期段階から CAE(Computer Aided Engineering)を活用し、車体設計、電装設計、熱流体解析の担当者が連携することで、厳しい制約条件下でも、高い部品充填効率と放熱性能を両立させることに成功している。

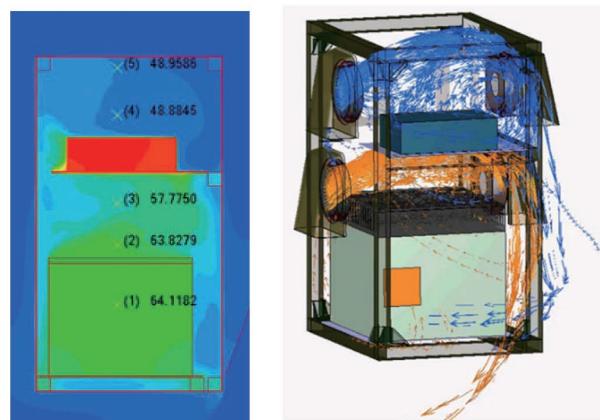


図9 放熱性能評価のための、熱流体シミュレーションの様子

## 4 おわりに

eve、T4、YMPC、当社、各社の企業文化、風土が違う複雑な環境下でのモデル開発であり、価値観の違いにより開発中いくども衝突したが、最終的には深く合意し、お客様のニーズにこたえる自動搬送運転車両を世の中に送りだすことができた。引き続き市場の声に耳に傾け改善に努め、自動運転技術を活用した省力化に貢献していく。

※Autoware は The Autoware Foundation の登録商標です。

### ■参考文献

- [1] 異材界面における接触熱抵抗の評価、福岡俊道、日本機械学会論文集(A編), 76巻763号(2010)
- [2] エレクトロニクスのための熱設計完全制覇、国峰尚樹、日刊工業新聞社
- [3] 波動テイラーカーブ流れの変調、黒田泰平、可視化情報、27巻(2007)
- [4] 溝付回転二重円筒内流動の可視化観測、湯浅朋久、日本機械学会論文集、第83巻(2017)

■著者



岡田 健史

Takeshi Okada

技術・研究本部

技術開発統括部

プロジェクト推進部



岸 知昭

Tomoaki Kishi

技術・研究本部

技術開発統括部

制御システム開発部



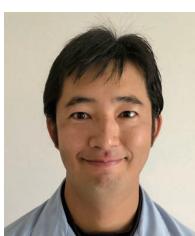
西村 政哉

Masaya Nishimura

技術・研究本部

技術開発統括部

制御システム開発部



實生 達朗

Tatsuro Mibae

技術・研究本部

技術開発統括部

制御システム開発部



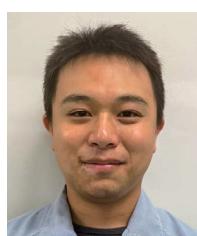
中谷 和弘

Kazuhiro Nakatani

技術・研究本部

技術開発統括部

制御システム開発部



松本 順文

Yorifumi Matsumoto

技術・研究本部

技術開発統括部

先進プロダクト開発部



山内 拓也

Takuya Yamauchi

技術・研究本部

技術開発統括部

先進プロダクト開発部

## Abstract

The ANSI<sup>\*1</sup>/PGMA<sup>\*2</sup> G300-2018, a standard which includes requirements for an engine stop function using a CO sensor, was enforced in the American market in April 2020 in order to prevent an excessive carbon monoxide environment during generator misuse.

Yamaha Motor Powered Products Co., Ltd. (hereafter referred to as the Company), as a member of the PGMA, has decided to introduce to the American market products that comply with this standard and are therefore equipped with a CO sensor. Here we introduce the details of the development.

## 1 はじめに

発電機誤用時に過度な一酸化炭素環境になることを抑制するため、COセンサーによるエンジン停止機能の要求が含まれた規格：ANSI<sup>\*1</sup>/PGMA<sup>\*2</sup> G300-2018がアメリカ市場で2020年4月に施行された。

ヤマハモーターパワープロダクツ株式会社(以下、当社)はPGMAメンバーとして、本規格に対応しCOセンサーを搭載した商品をアメリカ市場に導入することとした。ここにその開発内容を紹介する。

※1: ANSI(American National Standards Institute):米国規格団体

※2: PGMA(Portable Generator Manufacturers' Association):発電機業界団体

## 2 開発の狙い

今回の対象機種は当社からアメリカ市場で販売する防音カバータイプ4モデル、オープンフレームタイプ2モデルの計6モデルである(図1)。

ANSI/PGMA G300-2018への確実な対応をするため、従来発電機の基本機能は維持したままCOセンサーシステムを確立させる。構成部品であるCOセンサユニットはメーカー既製部品を一部アレンジし使用するが、レイアウトやCO感度閾値を工夫することで全モデルを共通化する。

また、外装部品等の変更は極力抑えることで、日程短縮と型投資削減を狙う。



図1 対象モデル外観

## 3 ANSI/PGMAG300-2018規格対応概要

下記が今回対応した内容の一部である。

- COセンサーシステム追加(CO検出、故障診断、改造防止、寿命によるエンジン停止および通知機能)
- 樹脂エンクロージャー材料燃焼性適合
- 実機および梱包材にラベル追加
- オーナーズマニュアル:COセンサーシステム関連の記載内容追加

## 4 COセンサーシステム仕様と課題対応

## 【COセンサーシステム仕様概要】

COセンサーシステムはCOセンサユニット、コントロールユニット、LEDランプ(赤、橙)の3部品で構成されており(図2)、各部品の主な機能は下記の通りである。

## 1) COセンサユニット

- CO検出
- COセンサー素子の故障診断
- コントロールユニットへの失火指示

## 2) コントロールユニット

- CO センサユニット指示による失火実行

## 3) LED ランプ

- 高 CO 濃度検出時、赤 LED 点滅
- 故障診断 NG 検出時 or 電池電圧低下時、橙 LED 点灯
- 発電機始動時、CO センサユニット正常作動により赤 & 橙 LED 同時点滅



図2 CO センサーシステム構成 (EF2200iS)

携帯型発電機用の CO センサユニットを開発するにあたり、以下の課題に対応する必要がある。

- 1) CO センサー素子の経時変化への対応
  - 2) CO センサー素子への VOC(揮発性有機化合物)影響把握
- 上記課題を満たすための施策概要を下記に示す。

### 4-1. 経時変化対応

携帯型発電機用 CO センサユニットで多く採用されている電気化学式 CO センサー素子は、ANSI の閾値である環境濃度 800ppm 以下の領域において良好な出力直線性、高分解能といった特長がある。一方、経時変化により CO 検出感度が鈍化する性質があるため、CO 検出感度を補正する手段が必要となる。このため、本 CO センサユニットはコイン電池を内包しており、発電機が停止中であっても CO センサユニット製造からの経過時間をカウントしている。この経過時間に対して発電機使用環境・長期保管環境を考慮した劣化係数を用いて補正することで、経時変化による CO 検出鈍化を低減している。

### 4-2. VOC 影響把握

採用した電気化学式 CO センサー素子は、主に室内用の CO

警報器における使用が意図されている。CO センサー素子メーカーからの情報で、スチレンや  $\alpha$ -ピネンといった VOC が CO センサー素子感度へ影響を与えることは既知であったものの、発電機で CO センサーシステムを採用するにあたっては、発電機の製造工程や発電機筐体内で使用されている VOC による CO センサー素子への影響を把握する必要がある。このため、製造工程内で使用するガソリンやオイル、筐体部品に使われている接着剤、輸送時に使われる梱包材料などと CO センサー素子を個別に同一環境にて長期保管することで CO センサー感度への影響を把握し、得られた知見を検査工程の見直しや梱包材料選定に活用している。

## 5 レイアウト

PGMA 規格を満足させるため、CO センサユニット(以下、センサユニット)は下記1)~4)の要件を網羅しレイアウトする必要がある。

- 1) 発電機周辺と同等の CO 濃度を検出できること
  - 2) 通常使用状態でセンサユニット機能に影響がない温度環境であること
  - 3) CO ガスの滞留がないこと
  - 4) センサユニットを取り外し又は改造されるリスクが低いこと
- 次に、防音カバータイプ発電機およびオープンフレームタイプ発電機それぞれのレイアウト概要を示す。

### 5-1. 防音カバータイプ発電機へのレイアウト

防音カバータイプ発電機は、エンジン冷却ファンを利用して筐体内に外気を循環させる方式を採用している。この冷却風の通路上にセンサユニットを配置させることで発電機外部と同等の CO 濃度を検出でき、かつセンサユニット周辺の温度安定性を確保することに成功している(図3)。

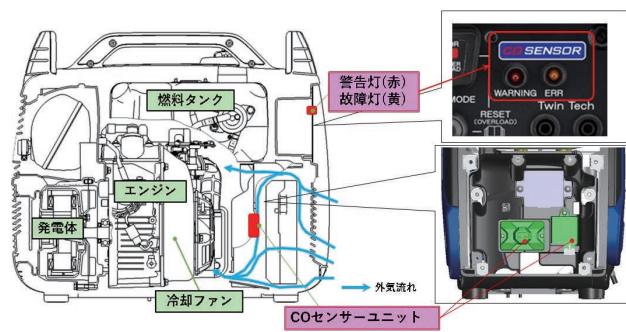


図3 防音カバータイプ発電機の CO センサーシステム配置 (EF2200iS)

## 5-2. オープンフレームタイプ発電機へのレイアウト

一方、オープンフレームタイプ発電機は機体の外郭を覆わない形態であるため、レイアウト上、空気の循環性を確保できない。そこで、センサユニット収納ボックスを新設し、発電体の冷却ファンカバーとホースで接続する。冷却ファンの回転により発生する負圧を利用して、収納ボックスに外気を取り込む構造とした。これにより発電機周辺と同等の CO 濃度検出を実現させた(図4)。



図4 オープンフレームタイプ発電機のCOセンサーシステム配置(EF7200)

## 5-3. 改造対策

センサユニットいたずら対策として、今回の機種は下記の対策を施す。

- 1) センサユニットへ安易に触れることができないよう、防音カバータイプ発電機の場合はその筐体内部(図5(a))、オープンフレームタイプ発電機の場合は収納ボックス内部(図5(b))にレイアウトする。



図5 COセンサユニット改造対策①  
COセンサユニット配置位置

- 2) 通常工具でセンサユニットにアクセスできないよう、筐体および収納ボックスの締結部にヘックスローブタイプのスクリュを採用する。



図6 COセンサユニット改造対策②  
ヘックスローブタイプスクリュ採用

- 3) 通常使用やメンテナンス時等にセンサユニットの配線が断線した場合、エンジンが停止するよう設計する。

## 6 完成検査および梱包対応

VOC影響評価によりCOセンサー素子は高濃度のHC(炭化水素)環境に長期晒されると感度が鈍化する傾向があることが分かっているが、これまでの完成検査工程と梱包仕様では完成検査後の梱包箱内のHC濃度が高いため、COセンサー感度への影響が避けられない。このため、下記の取り組みを工場技術部と協働で実施している。

- ・ 許容可能な HC 濃度の定量化  
環境 HC 濃度が CO センサー感度に与える影響を定量化し、HC 濃度許容値を決定する。
- ・ 残留ガソリンの低減  
キャブレターチャンバーのガソリン吸引時間と吸引圧、ドレインスクリュー緩め開度などの作業工程を確立する。
- ・ 梱包仕様の見直し  
ビニール袋で覆っていた仕様を廃止する。キズ防止等の必須要求を維持しつつ、籠らない梱包仕様を採用する。
- ・ 良品保証するための管理  
団面要求値(HC濃度許容値や使用機器)に対して、定量的な検査を実施する。

これらにより、完成検査後の製品梱包による梱包箱内 HC 環境を改善し、CO センサー感度鈍化に対応している。

## 7 おわりに

本プロジェクトは、新機構となる CO センサユニット開発であったため、多くの課題があったが、CO センサーシステム確立、レイアウト最適化、部品共通化等を達成したこと、開発日程お

よりコストを抑え、PGMA 規格に合致した商品作りができた。

また、CO センサーシステムに関する部品単体の輸送や保管に関する取り扱い、開発評価方法、完成検査工程、梱包仕様、サービス対応等をメーカーと関連部署との協働により、確立させた。

発電機の正しい使用方法については、オーナーズマニュアルや HP 等でも周知させていただいているが、今回追加した CO センサーシステムにより、お客様の間違った使い方による CO 中毒事故抑止に繋がることを期待している。

今後もお客様の声や市場情報を収集し、ヤマハユーザーが安心してご使用いただける製品開発を進めていく。

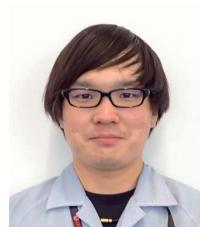
### ■著者



**大久保 公貴**  
Yoshitaka Ookubo  
ヤマハモーター・パワープロダクツ(株)  
PP 開発部設計課



**長澤 佑樹**  
Yuki Nagasawa  
ヤマハモーター・パワープロダクツ(株)  
PP 開発部設計課



**勝田 悠馬**  
Yuuma Katsuda  
ヤマハモーター・パワープロダクツ(株)  
PP 開発部設計課



**八木 哉幸**  
Naoyuki Yagi  
ヤマハモーター・パワープロダクツ(株)  
PP 開発部実験課



**山谷 聰**  
Satoshi Yamaya  
ヤマハモーター・パワープロダクツ(株)  
PP 開発部実験課



**金子 誠孝**  
Masataka Kaneko  
ヤマハモーター・パワープロダクツ(株)  
制御開発部 PP 制御課

# E054 LED 可搬式投光器 「X-BUSTER LED」

E054 LED Portable Floodlight "X-BUSTER LED"

鶴田 祐大



## Abstract

Yamaha Motor Engineering Co., Ltd., plans, develops, and sells firefighting motorcycles, hose cars(vehicles for fire hose carriage), and portable floodlights with signal lights designed for use in Japanese domestic firefighting. A signal fitted portable floodlight(hereinafter referred to as a floodlight)is a portable lighting device that is loaded on a fire engine or rescue vehicle. When firefighters search for survivors in need of help at fire scenes, they carry floodlights with them. This paper introduces the LED portable floodlight "X-BUSTER LED," which was developed in pursuit of "ease of use" and has changed the light source from conventional halogen types to LED types.

## 1 はじめに

ヤマハモーターエンジニアリング株式会社(以下、当社)では、国内消防向けに消防活動二輪車(通称:赤バイ)やホースカー、信号器付可搬式投光器を企画開発、販売している。信号器付可搬式投光器(以下、投光器)とは、消防自動車や救助工作車等に積載される携行式の照明器具で、要救助者検索時は、火災現場に投光器を携行して突入する。投光器は以下の5つの機能を有する。



- 二焦点ワンタッチ切替え

集光・拡散の照射選択が可能



- 信号連絡機能

投光器とコントロールボックス間で音と光の  
相互連絡が可能



- 断線警告機能

ケーブル断線や接続外れを音と光で警告



- 緊急脱出口一ヶ機能

緊急脱出口一ヶとして活用可能な強度を確保



- 蓄光ストライプケーブル

蓄光させれば暗所でもケーブルの存在を確認

## 2 「X-BUSTER LED」開発

### 2-1. 開発方針と製品コンセプト

当社は20年以上に渡り国内の消防市場に投光器を導入してきた。2017年、東京消防庁の仕様書が改訂されたことをきっかけに、市場ニーズが光源のLED化に変化し始め、当社も従来のハロゲン式からLED式に改めた新製品の開発に着手、市場調査を実施した。お客様アンケートやコンセプトモデルを使ってマーケティング活動した結果、以下のコメントを得た。

#### LED投光器への期待／従来機への改善要望

- ・ 照度性能の向上
- ・ 投光器操作ボタンの操作性改善
- ・ 投光器の身体への固定／装着を可能にしてほしい

#### LED投光器に対する懸念点

- ・ 白色光は煙に反射し視界不良の原因となるのではないか。  
上記を踏まえ、当社のLED投光器は「使い勝手の良さ」を追求することを念頭に開発、製品コンセプトは“もう一人のバディ”といつとならどんな現場にも立ち向かえる頼れる相棒”と設定した。

以下本稿ではLED化にともなう投光器の改良点について触れる。

## 2-2. 煙に強い色調選定と光源開発

### 1) 煙に強い色調

消防市場では LED 光は白色のイメージが強く、煙に反射することによる視界不良が懸念されていた。そこで、当社は煙に強い光を追求することとし、黄色や赤色に近い長波長光は煙透過性が高くなるという光の波長特性を活用することとした。しかし、煙透過性が高いからといって赤色光では、炎が燃え盛る中では照明としては使い難い。そこで従来のハロゲン式に近い色調で、消防隊員の馴染みやすさと、透過性の良さから黄色光を採用した(図1参照)。

### 2) モード切替えによる色調の選択

市場調査から集光モードと拡散モードでは使用する場面が異なることが分かった。集光モードは、火災現場突入で使用されることが多い、拡散モードは三脚に取り付けてのスタンド照明としての使用が多い。すなわち、煙での反射による視界不良を懸念されているのは火災現場突入時で使用する集光モードであり、広範囲を照らす拡散モードでは広範囲照明に適している白色光とすることで、状況に応じて最適な光を選択できるようにした(図1、2参照)。

### 3) 照度設計と放熱設計

LED 化にともない従来機よりも高い照度性能が求められており、これに対し、高輝度 LED チップを複数配置することで開発目標の達成を試みたが、「発熱」という大きな課題に直面することとなった。投光器はその特性上、放熱フィンによる自然放熱とせざるを得ないが、当初想定していた高輝度 LED チップでは照度を満足させると発熱が非常に大きくなってしまい、火災現場などの高温環境下では、製品の耐熱許容温度を超えてしまい、使用ができないことが分かった。「照度→放熱」で進めていた設計順序を、「放熱→照度」に見直し、照度優先から放熱優先に切り換えた。火災現場ではどの程度の発熱まで許容できるか、どの LED チップを何個使えるか、その中で目標照度を満たす組み合わせはどれかという手順で再設計を実施した。必要電流を小さくし、発熱量を抑え、目標照度を満たす光源を開発した。

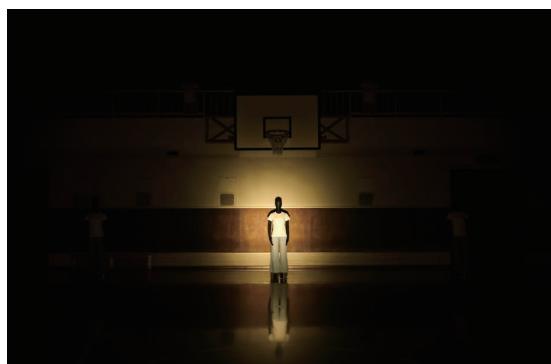


LED 黄色光 \_ 集光モード

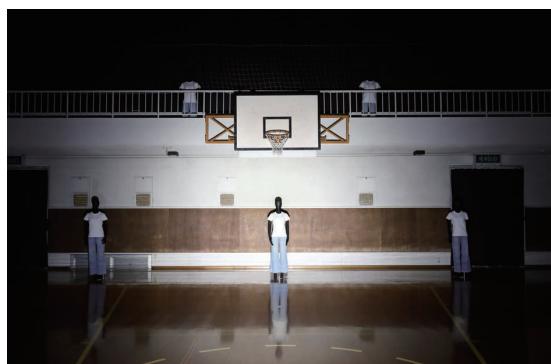


LED 白色光 \_ 拡散モード

図1 煙内での色調による見え方の違い



集光モード



拡散モード

図2 集光モード・拡散モード照射範囲比較(10m 先)

## 2-3. 片手操作の実現

投光器のグリップを握ったまま、集光・拡散切替えボタンおよび信号連絡ボタンを操作できるよう開発を行った。従来機は信号連絡ボタンのみがグリップを握る手で操作でき、焦点切替えボタンは投光器を持たない方の手を使って操作する必要があった。

火災現場突入時は投光器以外の消防機器を携行したり、煙で視界が悪い際は片手を壁伝いに這わせて侵入したりする。お客様の使用場面を考慮し、使い勝手を向上させるために、投光器を握った手で全ての操作ができるようこだわって開発を進めた。図3に示すように、グリップ前方に操作スイッチを集中配置し、片手で操作ができるような配置としている。消防隊員が厚手のグローブを着けた状態で、利き腕、手の大きさに関係なく扱える最適なレイアウトを実現した(図4参照)。片手操作を実現させるグリップ前方へのボタンの集中配置に関して特許も取得している(特許第6976218号)。

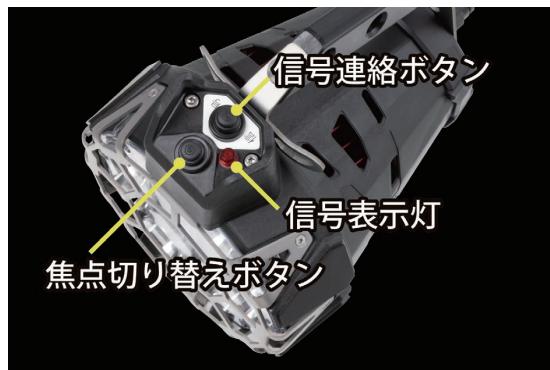


図3 投光器操作ボタンレイアウト



図4 グローブ装着状態でのスイッチ操作

## 2-4. 4段カラビナフック

消防現場では手で投光器を持って使用するだけではない。梯子を上ったり、他の機器を扱ったり、要救助者を助け出したりする際に、防火衣や安全帯にカラビナを用いて固定し、両手を自由に使えるようにすることも多い。従来機にはカラビナ取付けフック等ではなく、ほぼすべてのお客さまが独自に工夫してカラビナを取付けできるようにしていることが市場調査でわかった。そこでカラビナ取付けフックを投光器に標準装備として設定することとした。かつカラビナで固定した際の投光器の姿勢が、固定した状態で前方を照らす、足元を照らす、光を下向きにするなど状況に応じた姿勢を選択できるようにカラビナフックの位置を4か所に設け、使い勝手の向上にこだわった(図5、6参照)。グリップの軽量孔兼カラビナフックに関しては特許も取得している(特許第7058589号)。



図5 4か所のカラビナフック



図6 投光器固定と姿勢

### 3 販売促進に向けたな新たな取り組み

#### 3-1. 興味関心をひきつけたティザーアド

「販売開始前からお客様の興味を引き続ける」ことを目的とし、開発と平行して販売促進活動を展開した。開発スタートと同時に戦略を立て、製品デザイン確定前からアクションを開始した。ティザーアドを行って、製品世界観、ビジュアル、特徴や機能を販売開始1年前から少しづつ情報発信することで、製品受注開始時には、想定以上の受注を得られた。



●製品イメージ編



●機能紹介編



図7 広告紙面

#### 3-2. 製品紹介動画によるプロモーション活動

広告で興味を持っていただいたお客様へのさらなる情報発信手段として、動画を作成した。機能紹介にとどまらず、現場での使用感を感じていただくため放水銃を構えたり、要救助者を抱えてみたり、と世界観や演出にこだわった。作成した動画は当社の製品ウェブサイトでの公開のほか、DVD化し全国の消防本部へダイレクトメールと一緒に配布した。

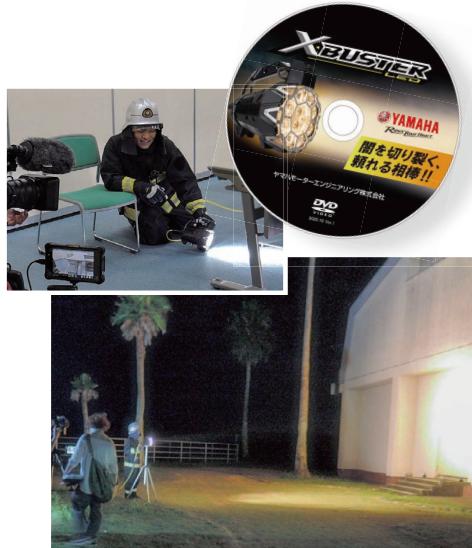


図8 動画撮影とDVD

表1 「X-BUSTER LED」諸元表(参考掲載)

型式／種別	E054 / LED 可搬式投光器	
入力電源	交流100V	
使用光源	発光ダイオード(LED)(集光8 拡散4)	
照明性能	集光(黄色光)	1250ルクス(10m 前方)
	拡散(白色光)	170ルクス(10m 前方平均)
投光器 (LED式)	筐体材質	炭素繊維強化プラスチック、チタン
	全長／全幅／全高	192/162/200(mm)
	重量	1.5kg
コントロール ボックス	全長／全幅／全高	200/74/164(mm)
	重量	2.3kg
三脚	材質	アルミニウム合金
	高さ調整	890~1600(mm)
	重量	2.0kg
ケーブル	構成	ポリアミド繊維強化ケーブル
	寸法	50/30(m)
	引張強度	7,845N
	重量	7.0/4.3kg

### 4 おわりに

当社は、消防向け投光器の差別化戦略として「使い勝手の良さ」を追求した。機能の正常進化だけではなく、使い勝手の良さを飛躍的に向上させたことで、市場からも好評を得ることができた。今後も消防隊員の頼れる相棒となる製品を追い求め、提供していきたい。

■著者



鶴田 祐大

Yudai Tokita

ヤマハモーターエンジニアリング(㈱)

事業推進センター

事業企画推進室

# 「E01」電動コンポーネント技術紹介

“E01” Electric Component Technology

後藤 慎太郎 清水 司 矢崎 勝也 山崎 好紘 上岡 隆真

## Abstract

Since announcing the electric scooter “FROG” at the Tokyo Motor Show in 1991, Yamaha Motor has continued to develop electric models.

In its production of class-1 mopeds, Yamaha Motor was able to hone the company's development technology through models such as the “Passol”, “EC-02”, “EC-03”, and “E-VINO”. However, the “E01” is the first electric version that achieves a 104km range<sup>\*1</sup>.

The “E01” has practicality and comfort as a class-2 moped scooter (less than 125cm<sup>3</sup>) and has a specification suitable for short to medium distance travelling (such as commuting). To achieve these specifications, the company took on the challenge of developing new technologies that were not previously available.

This article introduces an overview of the electrical components and new technologies of the electric systems that form the core of the “E01”.

In addition, in the Yamaha Motor Group Environmental Plan 2050 announced last year, the company set a goal of reducing CO<sub>2</sub> emissions by 2050 in Scope 3 (mainly during product use) by 90% compared to 2010. The “E01” is a strategic model for electric products aimed at achieving this goal.

## 1 はじめに

当社は、1991年に「東京モーターショー」で電動スクーター「FROG」を発表して以来、継続的に電動車を開発してきた。

原付一種クラスの生産においては「Passol」、「EC-02」、「EC-03」、「E-VINO」等を通じ、その開発技術を成熟させてきたが、今回初めて航続距離104km<sup>\*1</sup>を達成する電動二輪車「E01」を開発した。

「E01」は原付二種クラス(125cm<sup>3</sup>以下クラス)のスクーターとして十分な実用性と快適性を持ち、短～中距離移動(通勤)に適した仕様となっている。これらの仕様を達成するために、過去開発実績のない新たな技術にもチャレンジした。

当稿では「E01」の心臓部となる各電動コンポーネントおよび電動システムの新たな技術を中心に概要を紹介する。

また当社は昨年発表した「ヤマハ発動機グループ環境計画2050」において、2050年までに「スコープ3(主に製品使用時など)」におけるCO<sub>2</sub>排出量を2010年比で90%削減する目標を掲げており、「E01」はその目標達成に向けた電動製品戦略車となっている。

## 2 バッテリパック

「E01」のバッテリパックを紹介する。外殻となるバッテリケースの中には、バッテリセルの集合体であるバッテリセルモジュールと、バッテリセルの温度や電圧を監視するBMS

(Battery Management System)と、リレー回路により電力の供給・遮断・分配を行うジャンクションボックスを内蔵している。

バッテリセルは、民生用ではなく自動車用に開発された高出力で高エネルギー密度のセルを採用した。これにより、最高速度100km/h<sup>\*2</sup>の出力特性を達成している。また、4.9kWhの大容量を確保することで、航続距離104km<sup>\*1</sup>を達成している。

前記性能を持つバッテリセルを物理的に保護する役割も担うバッテリケースは、保護機能と小型化の両立を狙いCFアルミダイキャスト製とした(図1)。これにより、バッテリセルを保護しつつ、当社125cm<sup>3</sup>スクーター「NMAX」相当の車格に収まるコンパクトなバッテリパックとなっている(図2)。

また充電についてはお客様の使い方の多様性に配慮し、後述する3種類の充電器に対応させた仕様となっている。



図1 CFアルミダイキャスト製を採用したバッテリケース



図2 4.9kWhの大容量ながら「NMAX」相当の車格に収まるコンパクトさ



図3 (左) ポータブル充電器・(中) 普通充電器・(右) 急速充電器の外観

### 3 充電器

「E01」はお客様の使い方の多様性に配慮し、ポータブル充電器・普通充電器・急速充電器の3つの充電器に対応させた。3つの充電器は接続部を共通化しており、ユーザーの使用環境や用途に合わせて充電器を選択できる。この点が「E01」の大きな特徴となっている。ここでは、今回開発した3つの充電器の概要について紹介する。

1つ目のポータブル充電器(図3左)は車両標準装備とし、ヤマハ発動機の二輪車として初めて車載に対応させた。家庭用コンセントでの充電が可能であるとともに、車載に耐えうる耐久性と、シートボックスに収納可能な携帯性を両立させた。出力は400Wで幅広いシーンで利用できる充電器となっている。

2つ目の普通充電器(図3中)は、自宅等の私有地への設置を想定して開発した。200Vコンセントを電源とし、1kWの出力により約5時間で満充電が可能であり、通勤など連日の使用にも十分対応できる仕様としている。

3つ目の急速充電器(図3右)は、オリジナルの充電システムを構築した。1時間で残量0%→90%まで充電が可能な仕様となっており、シェアリングビジネスや、インフラが整えば長距離移動に適した充電方法になると考える。

また、3つの充電器で共通して採用しているコネクタは、日本主導で開発を進めてきたLEV(Light Electric Vehicle)用急速充電器のIEC 62196-6規格のコネクタを採用している。コネクタ自体を小型にでき、120V・100A以下という範囲で、ポータブル充電器から急速充電器で広い用途で使える特徴がある(図4)。

3つの充電器の開発においては充電システムの開発および新規コネクタの採用、国際標準化と挑戦の多いプロジェクトとなった。

これらの充電方式をそれぞれお客様に体感していただき、使い勝手をフィードバックしていただくことで、二輪EVの知見を蓄え、今後もより利便性の高い充電器の開発に反映していきたい。

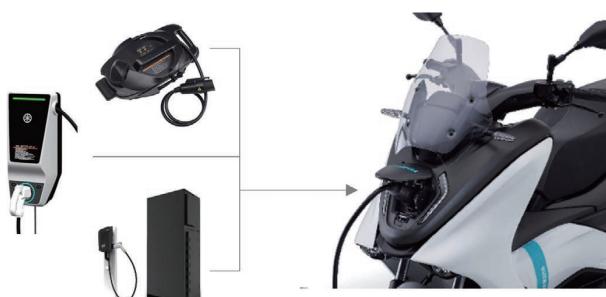


図4 IEC 62196-6規格のコネクタを採用  
接続部を共通化することで様々なタイプの充電器を利用できるようにした

### 4 パワーユニット、モータ

前方にバッテリパック、MCU(Motor Control Unit)が配置され導風が難しい状況で、車両のフレーム内にパワーユニットを配置する必要があり、高いレベルの小型化が求められた(図5)。

巻線(図7)は、効率よく配置可能な平角線にて、原付二種クラスの出力帯に適した集中巻きとし、冷却は、導風が難しい状況でコイルの熱を効率的にケースへ伝え外気へ放熱する構造を取り、空冷モータとして業界最高レベルの出力密度、トルク密度、高効率化を実現した(図6)。



図5 「E01」パワーユニット

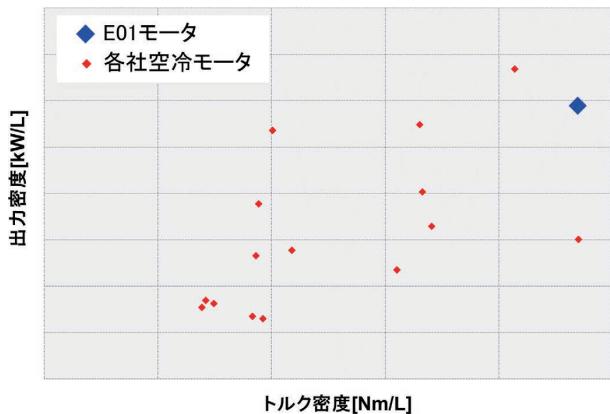


図6 空冷モータ 出力密度／トルク密度マッピング



図7 卷線画像

最大トルクは発進～1,950r/minの低回転で30N・m、最高出力は8.1kW/5,000r/min、幅広い回転域で出力を発揮する。低回転からのトルク特性と幅広いパワーバンドにより全域でのリニアな加速感を実現した。平角線を用いたことで広い運転領域で高効率を実現し充電の走行距離104km(60km/h定地走行テスト)にも貢献している。

また、EVの魅力である静謐性の高さを生かすため、開発初期段階からトルクリップルを抑制する磁気回路の適性化と、駆動伝達系の作り込みを行い、極めて静かな走りを実現した<sup>※3</sup>。

## 5 EVシステム

ヤマハらしい電動車の実現に向けて、過去から培ってきた制御技術をベースに、「E01」では新たなシステム開発を行った。

「高効率と高出力」を両立させるため、3個の電子制御デバイス、「VCU」「BMS」「MCU」で互いの情報を共有して統合制御を行っている(図8、図9)。

BMSが電流、電圧、温度などのバッテリ状況をもとに最適な放電・充電特性を演算し、VCU(Vehicle Control Unit)が、この情報に加え、ユーザーのアクセル操作量や、車速センサーなどの車両の各種情報から最適なトルク値を演算し、MCUがモー

タ特性に応じて最適な電流でモータをコントロールする。これらの制御を瞬時にすることで、力強くも扱いやすく、ヤマハらしいなめらかな走行特性を実現している。

また、以下の制御機能も「E01」において新たに作り込みを行い、搭載した。

- ・ 走行環境、好みに応じて選択できる3つの走行モード
- ・ 約1km/hで後進するリバースモード
- ・ エンジン車のエンジンブレーキを再現した自然な減速フィーリングの回生ブレーキ
- ・ スムーズな発進を支援するトラクションコントロールシステム

「E01」での実証実験にあたっては情報収集のため、CCU(Communication Control Unit)を搭載している。eSIMとGPSを内蔵しており、VCUの情報と統合し、車両情報(位置情報・走行状況)をヤマハ発動機のWebサーバに定期的にアップロードを行う。Webアプリケーションにアクセスすることで、走行ログ、バッテリ残量、最終駐車位置などが確認できる。当社はこれらのデータを分析することで今後の製品開発にフィードバックを行っていく。

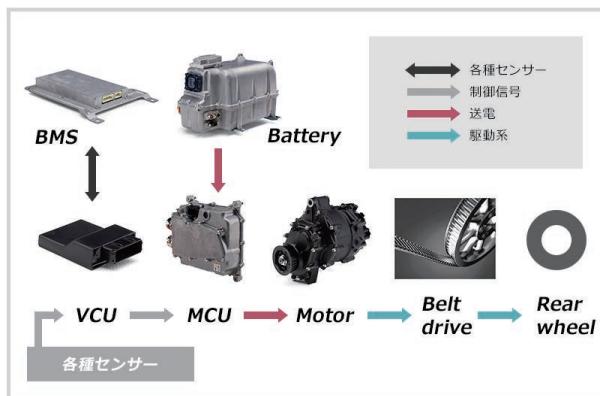


図8 システム概要1

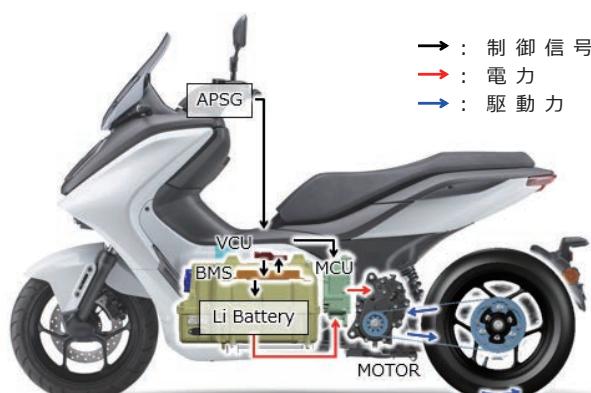


図9 システム概要2

## 6 おわりに

「E01」は、前述したようなコンポーネントおよび車両全体の作り込みによって、今までにない「次世代の乗り物」と言ってふさわしい、静かで上質な乗り物に仕上げることができた。

これを達成できたのは技術開発だけでなく、新たな開発体制の構築や新規サプライヤの開拓など、社内関係部門の妥協のない努力の結果である。

電動車はエンジン車の置き換えと位置づけると、航続距離や電池を含む車両価格に大きな乖離があり、市場に浸透させていくのが難しい商材である。

「E01」はそういう背景を鑑み、実証実験用車両となったが、まずはお客さまにはエンジン車とは異なる「次世代の乗り物」としての新たな価値を感じていただければと考えている。

同時に我々開発者は、実証実験を通して得られた知見を活かしさらなる提供価値の創造、そしてたくさんのお客さまが購入できるリーズナブルな製品価格への作り込みを進め、ひいてはカーボンニュートラルを目指し低炭素社会へ貢献していくたい。

※1:日本仕様車60km/h 定地走行テスト値。各国仕様により数値は異なる。

また実航続距離は走行条件により変動する。

※2:メーター読み。走行条件により異なる。

※3:「NMAX125」75.2dB(A)「E01」62.2dB(A) ECE R41-04 Lwotでの比較。

### ■著者



後藤 慎太郎

Shintarou Gotou

PF 車両ユニット

電子技術統括部

電子システム開発部



清水 司

Tsukasa Shimizu

パワートレインユニット

プロダクト開発統括部

第1PT 設計部



矢崎 勝也

Katsuya Yazaki

パワートレインユニット

プロダクト開発統括部

第1PT 設計部



山崎 好紘

Yoshihiro Yamasaki

パワートレインユニット

プロダクト開発統括部

第1PT 設計部



上岡 隆真

Takamasa Kamioka

パワートレインユニット

プロダクト開発統括部

第1PT 設計部

## Abstract

The AI picking system is a bulk bin picking system (the work of picking parts from the parts box which is filled with randomly piled parts) that uses an image processing AI method. This system is currently being brushed up to be used as a facility, and is undergoing the proof of concept in the kitting process where automation has not progressed in the Robotics Division (see Fig. 1). Here, we introduce technical topics related to this concept.

## 1 はじめに

AI ピッキングシステムとは、画像処理 AI によるバラ積みビンピッキング(バラ積み部品を部品箱から取り出す作業)のことである。本システムはロボティクス事業部内で自動化の進まないキッティング工程において実証実験を進めつつ、設備としてのプラッシュアップを図っている(図1参照)。ここでは、その技術トピックを紹介する。

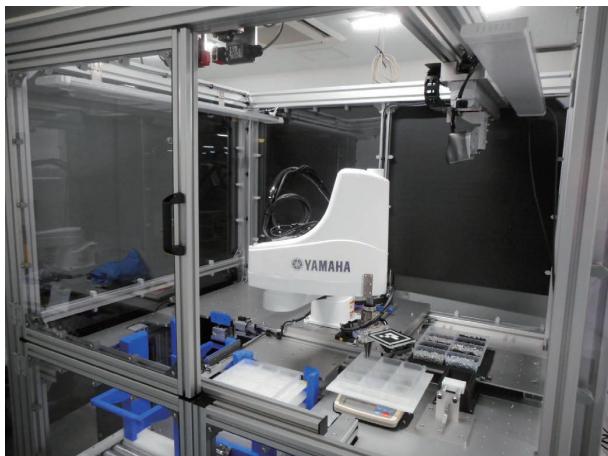


図1 設備外観

者が、ピックシステムの準備にかかる工数の低減を図ることが急務な課題であった。

## 2-2. システム概要

本システムの動作原理を示す(図3参照)。システムの流れとしては、マスタキットの把握(自動)から始まり、その入力条件に従い、供給ビン(部品箱)から適切な部品種を員数だけ、トレーにピックアップする。この作業を実現するのは時間も労力もかかるため、特別なプログラム作成が不要なこと(表1参照)を目標に開発した。この要素技術の1つが把持位置推論 AI である。

また、実証実験を進めながら、設備性能を維持する上で重要な機能:品質 AI も独自開発してきた。ここでは、本システムを支える AI 技術として、把持位置推論 AI(詳細は3章参照)と実証実験からのフィードバックである2つの品質 AI(詳細は4章、5章参照)について紹介する。

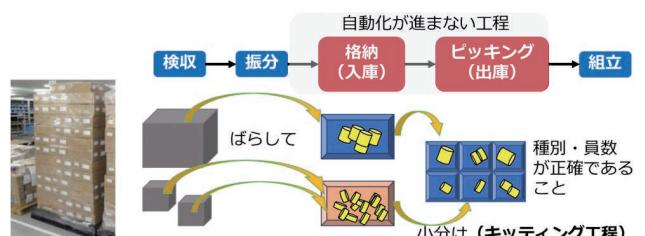


図2 自動化が進まない工程

## 2 AI ピッキングシステム

## 2-1. 開発背景と課題

近年の省人化・自動化の流れを受けて、各業界で様々な取組みが進んでいる。ロボティクス事業部内でも自動化を推進しているが、困難な工程として組立部品の小分け作業『キッティング工程』が挙げられている(図2参照)。一般的に、この工程を市販のビンピッキングパッケージで作り込む場合、担当者が関わる作業は設備設計だけでなく、実際にピッキングに必要な部材の準備や実運用、品質維持の仕組みづくり等、負荷は膨大なものとなり、結果としてうまく利用できない状況に陥ることが多々ある。現場の生産技術や SIer(システムインテグレーター)の担当

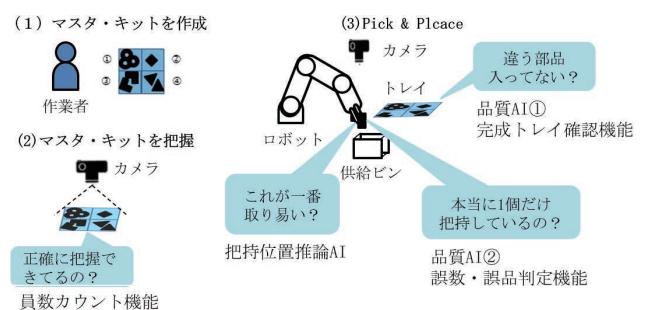


図3 AI ピッキング動作原理

表1 プログラミングを不要とするための技術

特別なプログラミング(手順)	従来	本システム
	下記の通り必要	下記の通り不要
把持するまでの準備	バーツライブラリで部品毎に認識方法や制御方法の設定と下記把持位置指定が必要である。	あらかじめ CAD を用いた深層学習で把持可能となるため特別な設定不要である。
把持位置の設定	部品のどこを把持するか指定が必要である。AI を用いる場合でも部品姿勢毎の学習が必要な場合がある。	上記学習で把持可能と判断した位置を掴むため作業者による指定は不要。
マスタキット状態のシステムへの入力	手作業	カメラで撮像し自動設定(開発中)

### 3 把持位置推論 AI

#### 3-1. 既存技術

ピンピッキングでは箱の中にランダムに入れられたバラ積み部品の中から、最も取りやすい部品を選び出す必要がある。取れそうな部品を選択するアルゴリズムとして、一般的には点群テンプレートマッチングが用いられることが多い。この手法では図4のように事前登録された部品の CAD の点群(テンプレート)を用意し、バラ積みしたBINの中からそのテンプレート点群と類似した箇所を探査し部品として選択する。



図4 テンプレート部品をバラ積みされた部品の中から検出する様子<sup>[1]</sup>

#### 3-2. 開発した手法について

しかしこの手法では、部品の CAD データを事前登録する必要がある。また、ネジなどでは太さ違いや長さ違い、ヘッドの形状の違いなど類似した部品が多く、それぞれに登録し直す必要がある。そこで、今回採用したのは深層学習による認識である。深層学習により、点群テンプレートマッチング時に使用する特徴量よりも柔軟な特徴量を見つけ出し、把持位置を検出させる。

深層学習の学習データの収集には物理シミュレーションも併用する。この物理シミュレーションでは部品の形状、配置、摩擦

係数が調整できる。条件を多様化させるためにランダムに部品を配置させ、ピンピッキングを行う。図5にデータ収集の様子を示す。バラ積み部品が格納された容器の画像を x,y 方向に一定サイズに切り取る。この時、容器の画像も回転させた後に同様の処理を行う。この回転角度はハンドの回転角度に一致する。このようにして切り取られた画像から方策に従って1枚選び、物理シミュレーションでピッキングを行い、把持が成功したかどうかのデータ収集を行う。これを繰り返すことである程度まとまった学習データセットを準備し、その後に学習を行う。

シミュレーション画像での学習が完了した後、必要であれば、実機での画像を追加学習させる。こうして作成した深層学習モデルを用いてバラ積みBINの中から把持できそうな部品の場所を画像から推論することができる。

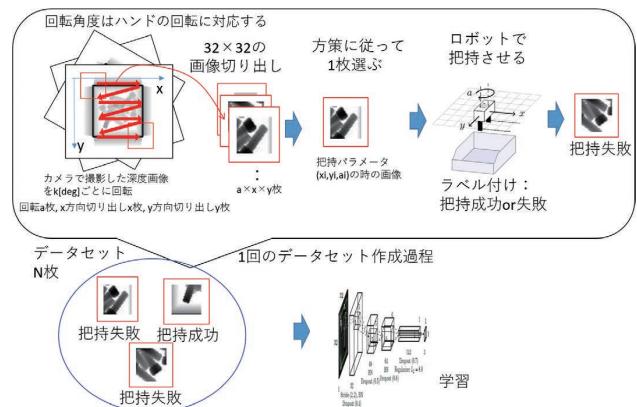


図5 ピッキングデータ収集の様子

#### 3-3. 効果確認

本開発で作成した深層学習モデルを用いてピッキングを行った結果を示す(表2参照)。類似のねじに関してはサイズ違いであっても同程度の把持成功率を実現できている。

表2 部品ごとの把持成功率

把持成功率80%	把持成功率80%
把持成功率73%	把持成功率67%

## 4 品質 AI①:誤数・誤品判定機能

### 4-1. 目的・機能概要

今日の製造現場では、締結部品の締め忘れや締結箇所間違いなどを防ぐため、必要な部品を必要な個数だけ小分けするボルトキットを作成し作業することが一般的である。

この判定機能はトレーへ部品を入れる際に作業者が目視などで部品の個数・種類を確認する作業を代替するものである。本機能で対象とする入力画像を図6-1に示す。本機能では部品を供給ピンからトレーへ運搬する過程でロボットハンドが部品を掴んでいる状態を撮像し、その画像をもとに部品の種類や個数を判定するものである。

### 4-2. 既存技術

画像分類を行う手法は数多く存在するが、近年では深層学習ベースの手法が多く開発されている。深層学習ベースの手法には、いくつか課題が存在する。そのうちの一つが判断基準の難解さである。一般的に深層学習においては損失の値や注目領域の可視化により、その手法が何を基準に判定を下したかの説明を行う。しかしながら、誤判定した画像に関しては有意な説明が得られないことが多い。

こうした課題がある一方で、深層学習ベースの手法ではルールベースに比べ、入力画像に対するロバスト性が高く撮影条件の多少の変化や部品の姿勢などには柔軟に対応できるなどの優位性が挙げられる。今回のターゲットとなる状況では、図6-1に示すように把持される部品の姿勢が様々である。それゆえ今回の開発手法では深層学習ベースの距離学習<sup>[2]</sup>を用いた。



図6-1 本機能の対象とする入力画像

### 4-3. 開発した手法について

距離学習では、図6-2に示すように入力画像を二次元の特徴量空間に落とし込み、同じクラスの画像の特徴点同士を近づけ、異なるクラスの画像の特徴点を遠ざけるように学習する。推論時には、入力した画像の特徴点と学習時の各クラスの中心点との距離を算出し最も距離の近いクラスを推論結果として判定する手法である。この手法では二次元の特徴量空間での各画像の位置関係を可視化できるため、深層学習ベースの手法では難解である判定基準についても理解が容易であることも利点である。

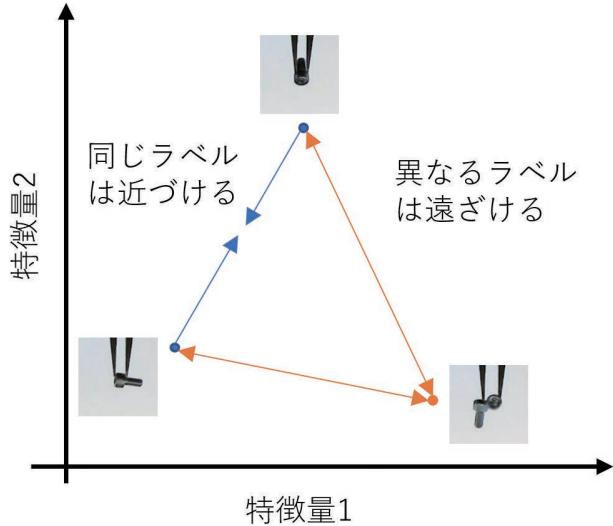


図6-2 本機能で用いられる距離学習の仕組み

### 4-4. 効果確認

図6-1で示した部品の画像1000枚に対し、ルールベース、一般的な深層学習モデル(ResNet50)、本手法での比較を行った。

表3に示すようにルールベースに比べ、深層学習ベースの本手法やResNet50では学習データの枚数に大きく差がある。この学習に必要なデータ数の多さは深層学習ベースの手法の課題であり、今後の改善が必要である。しかしながら、正解率では深層学習ベースの手法がルールベースに比べ高く、特に本手法の精度が一番高い結果となった。

表3 本手法とルールベース、ResNet50の効果比較

手法	学習データ枚数	正解率
本手法	1500枚	99.9%
ルールベース	100枚	85.0%
ResNet50	1500枚	98.8%

## 5 品質 AI②:完成トレー確認機能

### 5-1. 目的・機能概要

ピッキング後のプレース時に、部品のピンへの入れ間違いや移動途中の落下などにより、トレーのセルに入った部品の種類・員数間違いが発生することがある。そこで、実際の生産現場ではキッティング後に人間による目視確認が行われる。本機能はその作業を自動検査により代替することを目的としている。

本機能でターゲットとする状況を図7-1に示す。複数個の部品が未整列、平置き状態となっている。また、部品背景には識別用の印字があったり、部品の隣接などの発生により部品の輪

部の特徴が変わったり、部品の向きによって見え方が変わったりする。そのため、画像による認識には、これらの特徴の変化を許容できる手法を採用する必要がある。

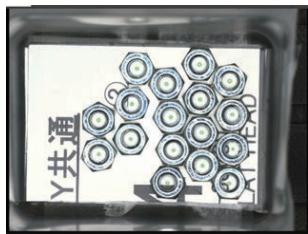


図7-1 セル内の部品の例



図7-2 尤度マップ

## 5-2. 既存技術

部品を認識する手法は多数存在する。大きく分けて2つのカテゴリに分類できる。1つは手続き的な処理によって構成されたルールベース、もう1つは経験から学習して処理を決定する機械学習を用いた手法である。ルールベースでは、テンプレートマッチング、キーポイントマッチング等が存在し、産業界で多くの実用例が存在する。一方で、認識対象物やカメラ・照明条件に合わせてパラメータ調整など作り込みが求められ、高精度を実現するためには高度な技術力が必要である。本製品の狙いとして、お客様が専門技術を持たなくとも利用できることが求められるため、本手法をそのまま適応することは難しいと考えた。

他方、機械学習を用いた手法では、近年は Deep Learning (DL) ベースが興隆を見せ、主なものとして Object Detection (OD) モデルを用いたものが挙げられる。こちらも産業界で実例が多数存在する。しかしながら、DL ベースの手法では、パラメータが多いことが起因し、高精度を実現するためには大量の学習用データが必要といわれている。実運用を想定した時、学習用データを作るために大量の画像の収集と、画像上の部品位置をデータ化するアノテーション作業が必要となるが、お客様が作業することは工数的にもスキル的にも難しい。その負担を解消するための、学習用データを減らす研究が進められており、例えば、少ないデータから効率的に学習する few-shot learning などが存在する<sup>[3]</sup>。しかし、いずれも部分的には強力な効果を発揮するものの、他方では効果が弱まるなど、タスクに合わせた慎重な手法の選択と検証が必要となる。

## 5-3. 開発した手法について

今回開発した手法では、ルールベースと機械学習を組み合わせた。これにより、ルールベースと機械学習の長所を生かし、短所を打ち消すことを狙った。

ルールベースをベースとした手法に対して機械学習的に精度を上げていくフローを作成した。これにより精度を確保するとともに、データセット作成工数の課題を解決する。その他にも、機械学習モデルのみを採用する場合よりも、判定ミスした際の原因究明や改善も実施しやすくなるという優位点を併せ持つ。

本手法では部品が存在する尤もらしさをマップ化した尤度(ゆうど)マップを作成し、尤度が高い位置を部品位置と判定する。一例として、図7-1を対象としたときの尤度マップを図7-2に示す。

## 5-4. 効果確認

形状が類似した部品が混入した場合を想定したケースにて、ルールベース、OD、本手法の比較を行った。図8に画像の例を示す。



図8 対象画像の例

M4長さ8mm ボルト4本の中に、M4長さ10mm ボルト1本が混入した状況を想定した。現場での運用を想定し、以下の条件の下で、各手法の比較を行った。

- ・ 学習用データに関して、段取り替えの際に不都合のない程度の工数としてアノテーションが10分以内で完了する分量を想定した。実測の結果、画像20枚分を実施した。
- ・ ルールベースに関して、現場に画像処理の専門家がいるとは限らないため、パラメータ調整を行わない。

結果を表4に示す。OD では学習用データが足りず、正解率を高めるレベルまで学習が完了できなかった。ルールベースでは、OD よりも正解率が高いものの、生産現場で利用するには難しい。一方で、本手法では少ないデータ数でも高い正解率を確保することができた。

表4 完成トレー確認機能 手法による精度の比較

手法	学習用データ	精度
ルールベース(ZNCC)	1枚	70%
OD(yolo v5 fine-tuning)	20枚	0%
本手法	20枚	96%

## 6 おわりに

今回、本システムの基本機能である把持位置推論 AI、設備性能の維持を目的とした2つの品質 AIについて紹介した。本システムは、2022年国際ロボット展に参考出展し、好評を得たことで、ソリューション展開の必要性をより一層実感した。現在は、外販向けた商品企画を策定中である。お客様に、『こんな設備が欲しかった』と言ってもらえるように現場と一丸となって設備のプラッシュアップを進めていく。

### ■参考文献

- [1] K.-T. Song, C.-H. Wu, S.-Y. Jiang; CAD-based Pose Estimation Design for Random Bin Picking using a RGB-D Camera; 2015
- [2] Y. Wen, K. Zhang, Z. Li, Y. Qiao; A Discriminative Feature Learning Approach for Deep Face Recognition; 2016
- [3] Q. Sun, Y. Liu, T. Chua, B. Schiele; Meta-Transfer Learning for Few-Shot Learning; Computer Vision and Pattern Recognition; 2019

### ■著者



山本 悅史  
Atsushi Yamamoto  
ソリューション事業本部  
ロボティクス事業部  
先行開発部



有田 航  
Wataru Arita  
ソリューション事業本部  
ロボティクス事業部  
先行開発部



齊藤 崑  
Takashi Saito  
ソリューション事業本部  
ロボティクス事業部  
先行開発部



駒池 国宗  
Kunimune Komaike  
ソリューション事業本部  
ロボティクス事業部  
先行開発部

**Abstract**

The sound of an outboard motor is an important factor that helps to define comfort. In recent years, the demand for comfort has increased due to the more output and radiated sound due to the installation of multiple units, as well as changes in the user base and how they are used. In addition, the time span for introducing new models is becoming shorter, and therefore the company must try to realize higher marketability over shorter time periods. In order to meet these demands, we applied a new method using "Model Based Development" (MBD) to outboard motor sound development, and through this, we have looked into whether product development with a higher level of competitiveness could be realized over a shorter period of time.

## 1 はじめに

船外機の音は快適性を決める重要な要素である。近年、高出力化や複数機搭載による放射音の増加、そしてユーザー層や使われ方の変化により、快適性への要求が高まっている。また、新規モデル投入のスパンも短くなっているため、短期間で高い商品性を実現しなくてはならない。

こういった要求を実現するために、我々は『モデルベース開発』(MBD: Model Based Development)を用いた新たな手法を船外機の音開発に適用し、短期間で高い競争力を持った商品開発が実現できないか検討を行った。本稿では、その取り組み内容を実際の結果も交えて紹介する。

これらの課題を解決するために、我々は従来のモノベースからモデルベースに開発プロセスを変革することで課題解決を試みた。

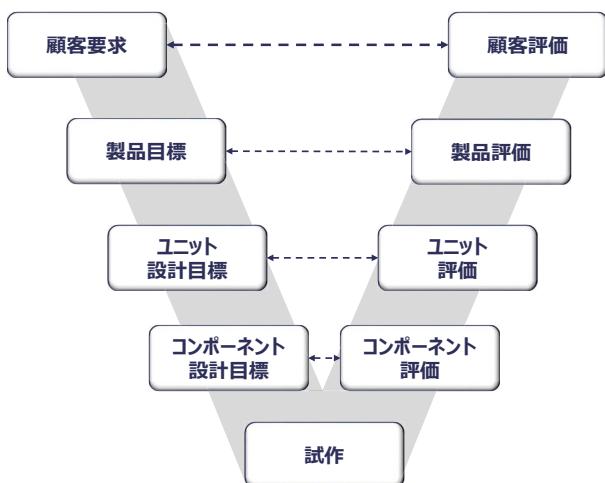


図1 V プロセスの概要図

## 2 MBD 化の背景と狙い

### 2-1. 現行プロセスとその課題

船外機では、Vプロセスへ仕事のやり方を移行してきた。Vプロセスとは顧客要求から製品目標、ユニット、コンポーネントそれぞれへの開発目標の設定を段階的に詳細化し、それを開発フェーズごとに検証していくプロセスである(図1)。船外機開発においてもこのVプロセスを適用し、後工程での手戻りリスク低減を目指してきたが、課題として機能ごとの個別最適による他機能との不整合の解消、そして仕様設定までの開発期間短縮の必要があった。現在の船外機は高い耐久性や信頼性を満足した上で、高出力化、軽量化を実現し、そして静謐性や意匠性などの背反する複数の機能を全体最適で実現することが求められている。このため、1つの機能をしっかりと作り込めば良いわけではなく、トータルの商品性として顧客要求を満たす製品が必要となる。また、市場での商品競争力強化のために開発スピードが求められており、開發生産性向上による期間短縮は急務である。

### 2-2. 音開発プロセスの MBD 化

一般的に MBD とはコンピューター上で再現した「モデル」を活用することで、部品試作やテストにかかる時間およびコストを減らそうとする開発手法である<sup>[1]</sup>。

一方で、我々は MBD を以下のように捉えている。モデルを広義に捉えており、いわゆるシミュレーションモデルだけでなく、要求や機能を図や表にしたツリーやブロック図などの抽象化したものから統計値や実験値をつかって数学的な形として表現したものもモデルと定義している。従来の V プロセスの各開発フェーズの検証に見合うモデルを作成し、フェーズごとに成立性を検証した目標値を割り付けることを MBD 化としている。

モデルを使うことで、試作の必要がなくなることと、目標未達の際の手戻りを最小限に抑えられることから、期間短縮を行う

ことができる。また、各フェーズに見合ったモデルを使用することで、目標成立性を担保して、全体最適が可能なコンポーネントレベルまで詳細化することができる。そのため、各機能との最適な特性値を見出すことができ、個別最適ではなく全体最適による製品開発を可能とする。

### 2-3. 新プロセス試行の対象機

今回の新プロセスを適用する製品として「F425A」<sup>[2]</sup>を選択した(図2)。「F425A」は当社のフラッグシップモデルであり、市場からの期待も高く複数の機能で高い商品性が求められる。そのため MBD を適用してさらなる商品競争力向上の検討に適すると考えた。



図2 「F425A」

「F425A」の主要諸元を表1に示す。

表1 主要諸元

エンジン形式	4ストローク V型8気筒 DOHC
総排気量	5,559cm <sup>3</sup>
ボア×ストローク	96mm × 96mm
圧縮比	12.2
最大出力	312.6kW(425ps)/5,500rpm
燃料供給装置	電子制御筒内燃料直接噴射
推奨燃料	無鉛プレミアムガソリン
ギヤ比	1.79(25/14)

※仕向地：国内仕様

## 3 目標値設定

### 3-1. 目標値の設定方法

お客様の要求、期待を満足する船外機を実現するためには、顧客要求からコンポーネント設計目標まで各特性の因果関係を明確化し、開発階層ごとに目標値を割り付ける必要がある。そこで各開発階層において適切なモデルを使って、各特性の関係と目標値の成立性を検証した。

### 3-2. 顧客要求の定義

市場調査の結果から、移動時に会話ができないことや船外機の騒音に長時間さらされることがマイナス要因であると分かった。市場ではエンジン回転数4,000rpm–5,000rpm のクルージング速度域の使用頻度が高い。このエンジン回転領域はスピードと燃費が最良となることから、使用頻度が高く、重要視される。この領域の静肅性を向上させることで顧客要求を満たせると考えた。そこで、我々は顧客要求を静肅性の向上とし、「クルージング領域で「F425A」に対して違いの分かる静けさの実現」を要求レベルとして定義した。

### 3-3. 製品目標の設定

顧客要求から製品目標へ根拠ある目標値設定を行うために、ベンチマーク結果から算出した統計モデルを活用した。航走時のキャビン内の音圧レベルをエンジン出力で整理したグラフを図3に示す。市場で静肅性が高いと評価されている船外機とそうでない船外機の近似曲線を算出し、その差分を比較すると約3dBAの違いがある。そこで、目標とする音圧レベルの低減量は「F425A」に対して「3dBA以上」とし、製品目標は「POT(Partial Open Throttle)=5,000rpm の船外機放射音が「F425A」に対して3dBA以上低減できていること」とした(図4)。

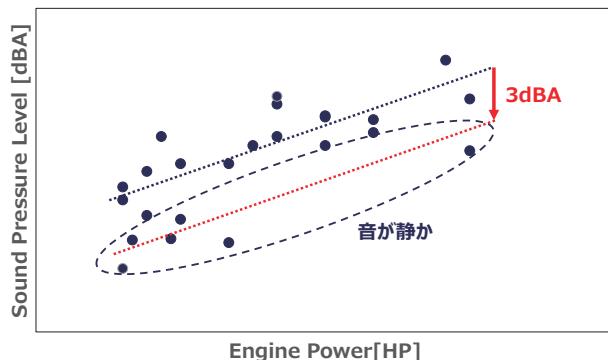


図3 航走時の音のベンチマーク結果

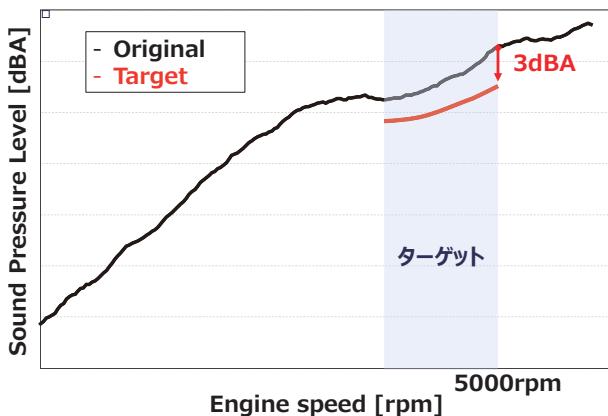
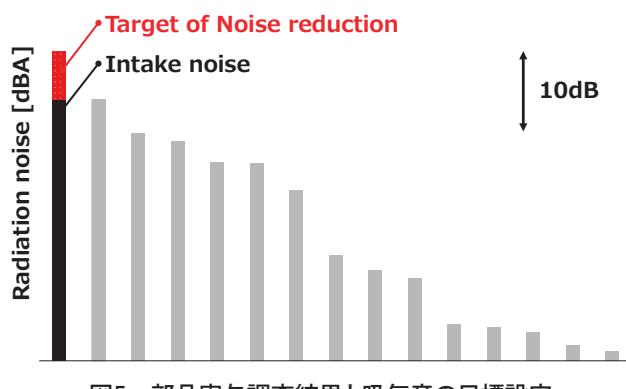


図4 製品目標

### 3-4. ユニットの設計目標設定

製品目標を達成するユニット目標を設定するために、各ユニットの音圧への寄与度から着目すべきユニットの特定と各ユニットへの設計目標の割付けを行った。図5に「F425A」の部品寄与調査結果を示す。部品寄与調査の結果、吸気吸入口から放出される吐出音(以下、吸気音)の寄与が非常に高いことが判明した。そこで、設計検討すべき対象を吸気音に絞り込んだ。次に、根拠を持って吸気音の低減目標を定めるために、全体音に対する吸気音の比率を定量化し、製品目標である3dBAの低減に必要な吸気音の低減量を65%と算出した(図5赤字部分)。



### 3-5. コンポーネントの設計目標設定

吸気音は吸気バルブ開閉時の圧力変動が吸気管内に伝播することで発生する脈動音と、空気が通過する際に発生する気流音がある。事前調査の結果、対象機においては気流音の影響は微小であることが判明しており、対象現象を脈動音に絞った。脈動音は、加振源と伝達特性の掛け算で表される。加振源の改善はエンジン出力性能への影響が大きいため、伝達特性で改善することとした。伝達特性は吸気管内の共鳴系の指標と

なる「音響伝達特性」を代用特性値として設定し、音響伝達特性の低減目標は吸気音の低減目標と同じ65%とした。

## 4 仕様検討

### 4-1. 部品の特性値の目標を満たす仕様の検討

#### 4-1-1. 仕様検討の進め方

吸気音の低減目標達成のために、代用特性値を計算するモデルを活用し、目標成立性の検証を実施した。その際、背反影響を予め明確にすることで全体最適で仕様検討を行った。

音響伝達特性は、吸気管の径や長さ、容積や断面積比により決定する特性値であるが、スロットルボディより下流側の形状変更は出力性能および製造課題への影響が大きく、スロットルボディより上流側で対応することとした(図6)。

減音量と減音帯域および出力性能への影響の観点から拡張室形サイレンサをスロットルボディ上流に設置することを基本構造として検討することとした。

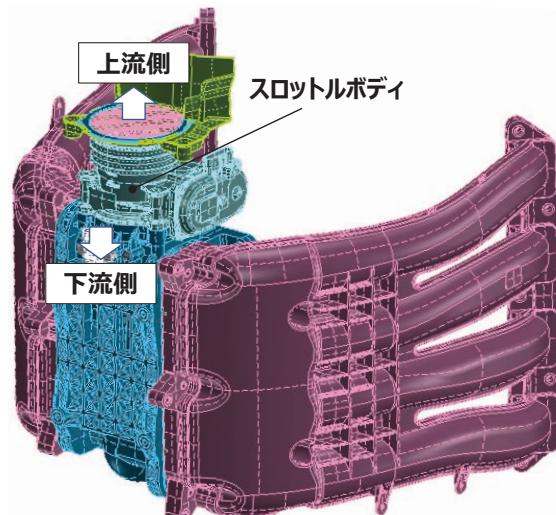


図6 「F425A」の吸気システム

#### 4-1-2. 制約条件の設定

拡張室形サイレンサの背反影響として、圧力損失の増加による出力性能の低下がある。そこで、出力性能についても、音と同様に目標成立性を検討し、1%以下の出力低下を目標として設定した。また、出力性能に対する圧力損失の影響度をモデルによって算出し、出力性能を評価する代用特性値として圧力損失の目標値を設定し、制約条件とした。

製品として搭載可能な形状で検討を進めるため、サイレンサの外観寸法についても制約条件を付与して検討を実施した。

#### 4-1-3. 検証モデルの概要

検証に用いたモデルを図7に示す。モデル化範囲は吸気ポート、インテークマニホールド、ミキシングチャンバ、スロットルボディ、ファンネルとし、各部品の内部形状で構成される空間を3D-有限要素法(Finite Element Method: FEM)でモデル化した。音響伝達特性は開口端補正端部の入力点とバルブ中心部の応答点の音圧比から式(1)を用いて計算した。拡張室形サイレンサの効果検証は図7のモデルの吸気口先端にサイレンサを設置して検討を行った。

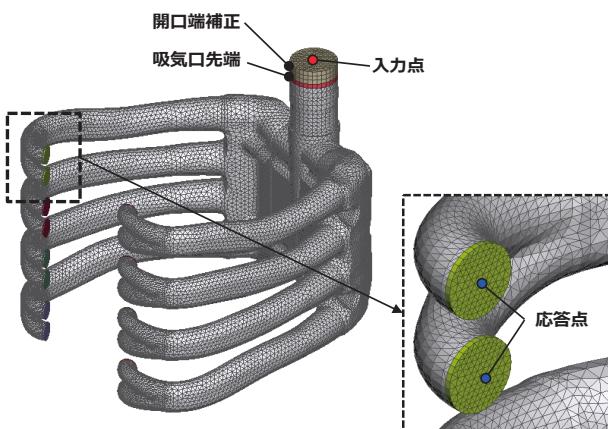


図7 検証モデル

$$\text{音響伝達特性} \left( \frac{1}{D} \right) = 20 \times \log_{10} \frac{\text{入力点} [Pa]}{\text{応答点} [Pa]} \quad (1)$$

#### 4-1-4. 代用特性値への寄与度調査

拡張室形サイレンサの消音性能として感度が高いパラメータを特定するために、簡易モデルを用いてパラメタスタディを実施した(図8)。使用したパラメータを表2に、簡易モデルのみの音響解析結果の一例を図9に示す。図9のType1とType2は拡張室端面からの吐出口の位置の違いによる音響伝達特性を示している。この結果から、吐出口の位置(La)によって減音帯域が変化することを示しており、吐出口の位置(La)が短いと低周波側、長いと高周波側で減音帯域が発生する。これは、拡張室内で発生する定在波の節の位置が吐出口の位置(La)と重なるためである。パラメタスタディの結果から、吐出口の位置(La)は減音帯域に、吐出口と拡張室の断面積比( $S_2/S_1$ )は減音量に感度が高いパラメータであることを特定し、音低減目標を達成するための吸気系部品の要件を設定した。

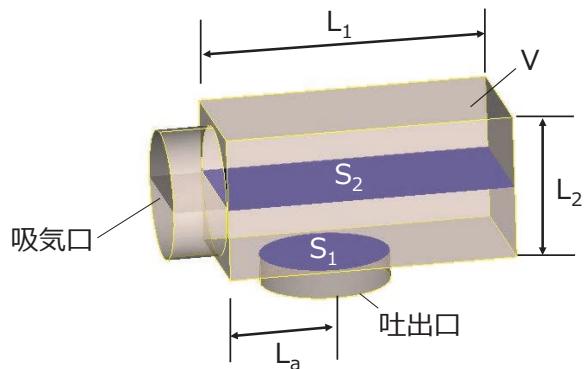


図8 拡張室形サイレンサの簡易モデル

表2 パラメータ

No	パラメータ	単位	記号
1	断面積比	—	$S_2/S_1$
2	拡張室の縦横比	—	$L_1/L_2$
3	拡張室の高さ	mm	$L_2$
4	拡張室の長さ	mm	$L_1$
5	拡張室の容積	$mm^3$	$V$
6	吐出口の位置	mm	$La$

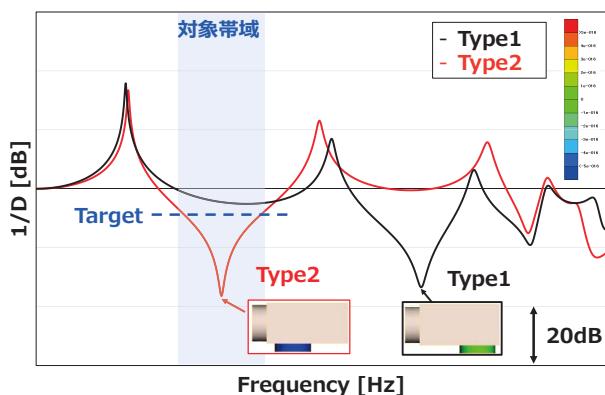


図9 簡易モデルの音響伝達特性

#### 4-1-5. 製品形状検討

次に、他機能との両立と制約条件を考慮し、製品形状での目標成立性を検証した。4-1-2で定めた制約条件にレイアウトと製造要件を織り込み、4-1-4で明らかにした成立要件を基に拡張室形サイレンサの製品形状の検討を実施した。図10に製品形状の音響伝達特性を示す。パラメタスタディによって定めた音要件を適用することで、制約条件のある製品形状でも目標を満たす仕様を実現できた。

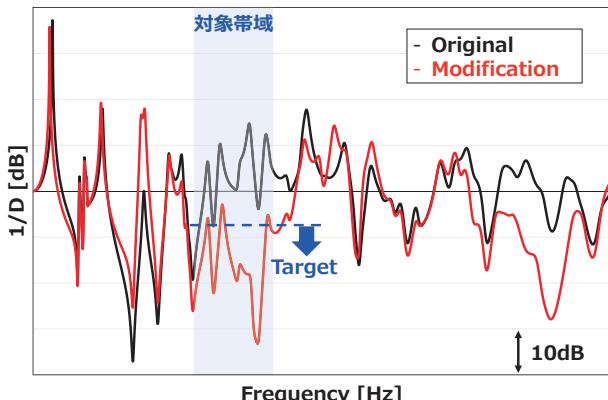


図10 製品形状の音響伝達特性

## 5-2. 航走試験

音の商品性評価として航走試験による音圧評価を実施した。実際にお客様が体感する音に近い音で評価するために、乗船席にダミーヘッドマイクロホンを設置した(図13)。

航走時のキャビン内の騒音分析結果を図14に示す。サイレンサ設置により、目標としていた POT=5,000rpm で3dBA以上の騒音低減が実現できた。また、関係者で乗船席の音の主観評価試験を実施した結果、ほとんどの被験者が「F425A」に対して静粛性で明確な違いを実感できたと回答した。この結果から、最初に掲げた顧客要求レベルである「違ひの分かる静けさ」を実現できていることを証明した。



図13 航走試験の様子

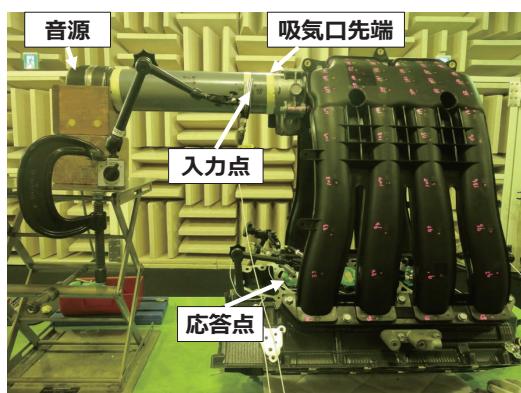


図11 台上試験の様子(Original)

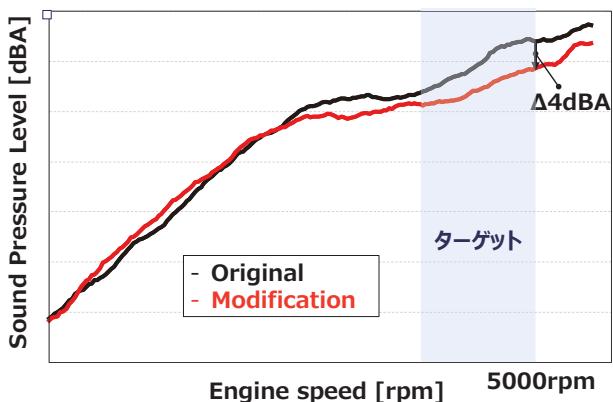


図14 航走時の騒音結果

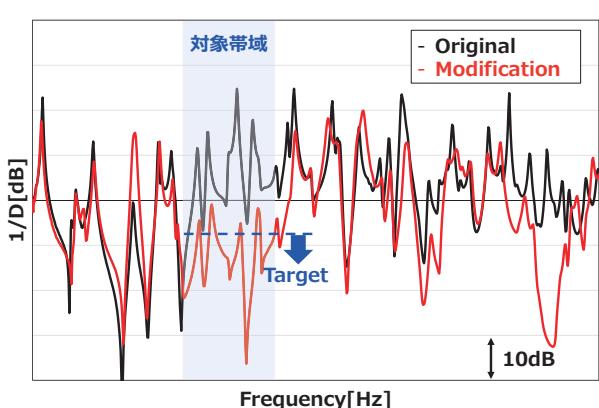


図12 台上試験の結果

## 5-3. 背反機能評価結果

サイレンサ設置による出力性能への影響は実機での評価から目標としていた1%以内を満足することを確認した。また、レイアウト確認の結果から干渉等ではなく設計規定および製造要件を満たすことが確認できている。

## 6 おわりに

船外機の音開発を MBD 化することで、顧客要求を満たす音低減を短期間で実現できることが示せた。また、出力性能、レイアウトという全体最適化を実現できることも確認ができた。今回は出力性能とレイアウトという2つの機能に絞って音との成立性を検討したが、軽量化や意匠性など複数の機能に対しても機能間の繋がりを明確にし、モデルを使って最適化を行うことで対応できると考えている。

今後、船外機に求められる機能は高度化、多様化し、構造や制御システムは複雑化していく一方で、開発期間の短縮も実現していかなくてはならない。こういった環境変化の中で「お客様の期待を超える価値」を実現していくためには、MBD は有効であり今後もこの取り組みを進めていく所存である。

### ■参考文献

- [1] MBD 推進センター「MBD(モデルベース開発 \*1)推進センターが発足～モノづくりの輪を広げ、日本の自動車産業の発展に貢献～」P4 2021年 <https://www.jambe.jp/uploads/20210924a.pdf>
- [2] 小久保幸栄、他 ヤマハ発動機技報第54号「船外機「F/FL425A」の開発」P56-59 2018年

### ■著者



**原 和宏**  
Kazuhiro Hara  
マリン事業本部  
開発統括部  
機能開発部



**高橋 徹**  
Toru Takahashi  
マリン事業本部  
開発統括部  
機能開発部



**佐野 一樹**  
Kazuki Sano  
ヤマハモーターエンジニアリング㈱  
ボディ開発部

# 電着塗装シミュレーションを活用した部品形状の作り込み

Part shape design using electrodeposition coating simulation

清水 拓也

当論文は、日本プラントメンテナンス協会(JIPM)の2021年度 TPM 優秀論文賞を受賞した内容に基づくものです。

## Abstract

Outboard motors are designed to pump water from around the vessels they are sailing in to help cool the engine. When used at sea, as the cooling water is sea water, the temperature of the water increases due to the heat of the engine. The cooling water passages of engine parts made of aluminum alloy are exposed to the severe corrosive environment of "high-temperature seawater," meaning high corrosion resistance measures are required. For this purpose, Yamaha Motor has adopted a cationic electrodeposition coating system with the aim of improving corrosion resistance through forming a coating film on the intricate cooling water passages in the machine, therefore blocking the aluminum parts from direct seawater contact.

In the production preparation for electrodeposition coating, 3D CAD data is used from the design study stage, then the design department, the casting process before and after the electrodeposition coating process, and the machining process work together to create the shape of the parts.

In the production preparations to date, the deep parts of the cooling water passages have been confirmed using a prototype, with the end shape being created through trial and error. However, with more complicated shapes and new parts, there is a problem that the work so far is no longer valid and therefore the number of times required to check the product increases. In addition, as the shape change affects the redoing of performance evaluations and production preparations for other processes, there is a requirement for a rework of the product preparation.

In this paper, we introduce an electrodeposition coating simulation system to help improve the electrodeposition coating production preparation process.

## 1 はじめに

船外機は航行している水域の水を汲み上げ、エンジンを冷却する構造となっている。海での使用において冷却水は海水であり、エンジンの熱によって冷却水は高温となる。アルミニウム合金で作られたエンジン部品の冷却水路は「高温の海水」という厳しい腐食環境にさらされるため、高い耐食性が求められる。そこでヤマハ発動機は、複雑に入り組んだ冷却水路に塗膜を形成させ、海水からアルミ部品を遮断することで耐食性を向上させる狙いでカチオン電着塗装を採用している。

電着塗装の生産準備では、設計検討段階から3DCADデータを使用し、設計部署、電着塗装の前後工程の鋳造工程、加工工程などとともに、部品形状の作り込みを行う。

これまでの生産準備では、冷却水路の奥まった部分は、試作品による現物確認を行い、トライ＆エラーにて形状を作り込んできた。しかし、複雑な形状や新規部品では、これまでの経験が通用しなくなり、現物確認の回数が増えてしまうという問題があった。また、形状変更は、性能評価のやり直しや他工程の生

産準備にも影響があり、後戻りのある生産準備となっていた。

本稿では、電着塗装の生産準備プロセスを改善すべく、電着塗装シミュレーションの導入に取り組んだので、その概要について紹介する。

## 2 カチオン電着塗装の原理と付き回りについて

カチオン電着塗装とは電着塗料の中に被塗物を浸漬し、被塗物を一極、電極を+極とし、被塗物と電極の間に電位を生じさせ、直流電流を流すことで、被塗物に+の電荷を持った塗料粒子を析出させる塗装方法である(図1)。吹き付け塗装では塗装することが困難な複雑な内部構造にも、均一な塗膜を形成できるという特徴がある。

塗装初期では、電流は電極に近い被塗物の外面の方が流れやすく、外面に比べて内面は流れにくい。被塗物表面のある一部を見ると、塗膜が析出し、膜厚が増加することで塗膜の電気抵抗が増加し、電流量が低下する。したがって、被塗物表面に

電流が流れやすい外面から塗膜が析出し、次第に塗膜の析出していない内面へ析出が進んでいく(図2)。

この内面への塗膜の析出のしやすさ、回り込みやすさは「付き回り性」と呼ばれ、電着塗料の基本性能を表す重要な項目となっている。また、内面へ十分な電流が届かず、塗膜が形成できない不具合を「付き回り不足」と呼んでいる。

付き回りを被塗物形状から考えると、内面への開口部面積または水路断面積が小さいほど、内面へ通過できる電流量は少なくなる。したがって、入り口が狭く、奥が広くなっている内部形状が付き回り不足が発生しやすい形状であり、ヘッドシリンダーや二重管構造の排気部品は特に注意が必要である。

つまり、電着塗装の付き回りは、被塗物にどう電気を流すかといった塗装条件と電着塗料の基本性能と被塗物の形状に依存していると言える。

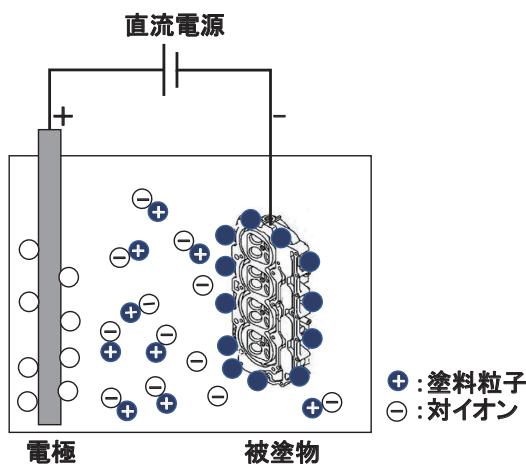


図1 力チオ電着塗装の原理

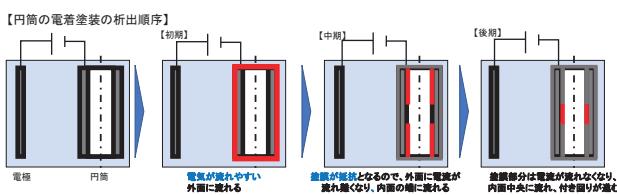


図2 付き回り性の原理

### 3 開発の概要

#### 3-1. 電着塗装シミュレーションの課題

前述のように、塗装条件と塗料性能と被塗物形状によって、冷却水路の隅々まで塗膜が形成されるかの付き回りが決まる。当社は、連続処理設備のため、主要な塗装条件(例 | 電圧、電極配置、通電時間)と塗料は変更することが難しく、付き回り不足を発生させないためには、被塗物形状と一度に塗装する部

品個数でのみ調整を行える。言い換えれば、塗装条件と塗料を制約条件とし、電着塗装シミュレーションにより付き回りを評価することで、被塗物形状を作り込むことができる。

過去にも電着塗装シミュレーションの検討を実施してきた。しかし、当社は、汎用電着塗料と塗膜析出形態が異なる耐食性と付き回り性に優れた特殊な電着塗料を採用しており、特殊な塗膜析出形態によって、シミュレーションができなかった。

#### 3-2. 船外機用の電着塗料への適用

汎用電着塗料は、ある量の電流が流れると塗膜が析出はじめ、流れた電流に比例し膜厚が増加し、膜厚増加に比例して塗膜抵抗が増加する。したがって、汎用電着塗料用の電着塗装シミュレーションは、通電量と膜厚、膜厚と塗膜抵抗の2つの関係を実験的に求めることで塗料固有パラメータを取得し、部品形状と電着浴槽のデータをもとに電位解析を行う。各部位に流れる電流から膜厚を計算し、膜厚から塗膜電気抵抗を計算し、部品の境界条件として次ステップへ反映させ、逐次計算を進めることで、各部位の膜厚を得る手順である(図3)。

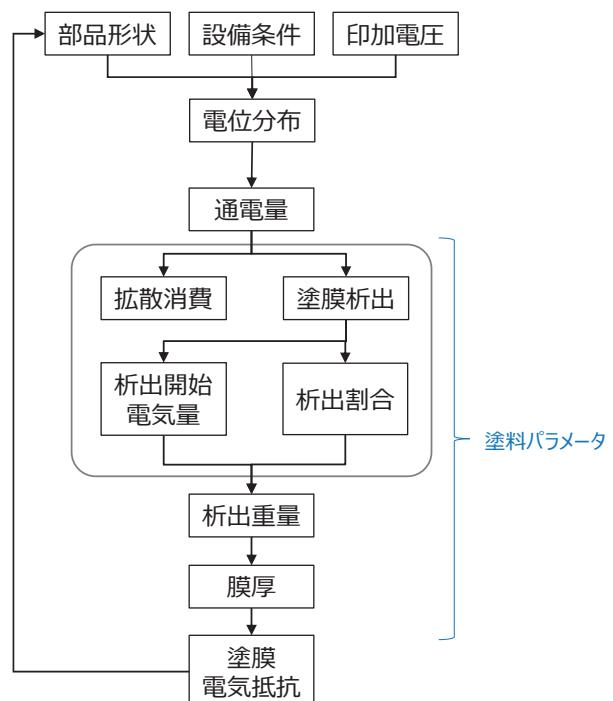


図3 汎用塗料用の電着塗装シミュレーションの概要

一方、当社の船外機用電着塗料は、付き回り性を良くするために、少量の電流で塗膜が析出はじめ、流れた電流が膜厚増加と塗膜抵抗増加に作用する特徴を持っている。流れた電流が膜厚増加と塗膜抵抗増加の両方に作用するため、従来の電着塗装シミュレーションをそのまま適用することができない(図4)。

そこで、各要因の関係性を見直すと、通電量と塗膜電気抵抗に比例関係がみられ、汎用電着塗料の通電量と膜厚の関係に類似していることが分かった(図5)。通電量と塗膜電気抵抗の関係を直接利用し、従来の電着塗装シミュレーションソフトを改良することで、当社の船外機用の電着塗料でもシミュレーションを行うことができると考えた。

この通電量と塗膜抵抗の関係は、汎用電着塗料でも成り立つため、従来の電着塗装シミュレーションの計算をシンプルにすることができる。

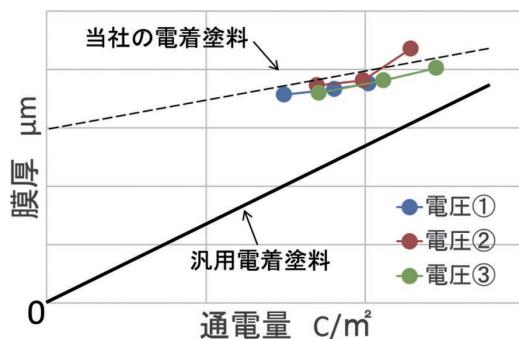


図4 船外機用電着塗料の通電量と膜厚の関係

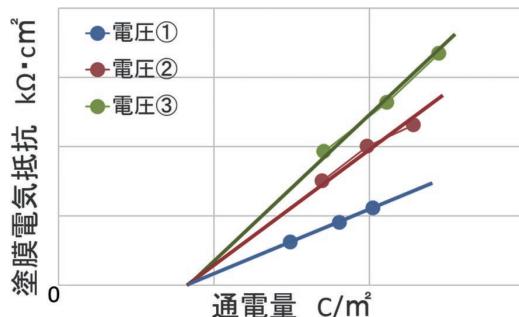


図5 船外機用電着塗料の通電量と塗膜電気抵抗の関係

## 4 実部品での確認

過去に生産準備の中で付き回り不足の発生した二重管構造の排気部品において、対策案の一つである電流経路のための孔を2つ開けた対策品で電着塗装シミュレーションを行った。

塗装部品を切断して付き回り不足を確認した結果とシミュレーション結果を図6に示す。部品写真のピンク色部分が付き回り不足箇所である。また、今回の電着塗装シミュレーションでは、膜厚をイメージしやすいよう、塗膜電気抵抗と膜厚の関係を以下のように定めた。

$$\text{塗膜電気抵抗 } 1 \Omega \cdot \text{m}^2 \Rightarrow \text{膜厚 } 0.1 \mu\text{m}$$

本塗料は、ある塗膜電気抵抗以上にならないと塗膜析出が

見られないことから、塗膜析出の閾値を設定した。

シミュレーション結果では冷却水路の奥まった部分での膜厚が薄くなっていることが分かり、塗膜析出の閾値以下の付き回り不足部分も確認することができた。シミュレーション結果の方が、実部品よりも付き回り不足部分が小さい結果となったが、付き回り不足の傾向は現物と一致していると言える。また、膜厚については、シミュレーション結果と実態とでは乖離があることが分かった。

膜厚には実態との乖離はあるものの、対策として開けた2つの電流経路用の孔の影響範囲を明確にすることができた。つまり、付き回り不足が発生しそうな部分の想定や形状検討は現物品が無くても行うことができると言える。

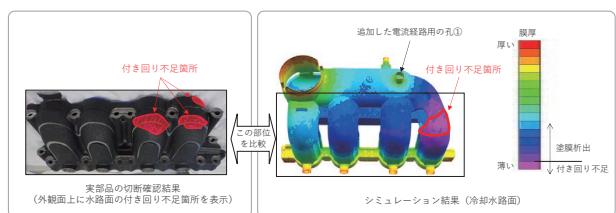


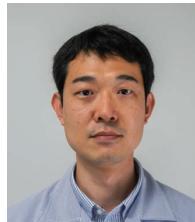
図6 二重管排気部品の実部品確認結果とシミュレーション結果の比較

## 5 おわりに

船外機用電着塗装の生産準備プロセスの改善として、当社船外機用の特殊な電着塗料に対応するため、通電量と塗膜電気抵抗の関係に着目し、既存のシミュレーションソフトの改良を行った。これにより、設計初期段階から船外機部品の電着塗装での問題点の抽出ができるようになり、3DCADでの部品形状の作り込みが行えるようになった。

今後もより低コストで高い品質の商品を提供できるよう、船外機用電着塗装シミュレーションを工程改善でも活用していく。

### ■著者



清水 拓也

Takuya Shimizu

マリン事業本部

製造統括部

マリンエンジン製造部

加地 裕考 辻村 拓

## Abstract

Yamaha Motor Electronics Co., Ltd. (hereafter, the company) supplies POWER TRIM & TILT MOTOR (hereafter, PTT motors) for hydraulic pressure generation for lifting outboard motors.

Although the company has been involved in the development and manufacturing of PTT motors for medium-sized outboard motors, we realized there was margin for improvement in terms of overall quality in response to the requirements to further reduce the cost when we first entered the PTT motor market for large outboard motors.

This paper introduces the company's development efforts aimed at reducing these costs.

## 1 はじめに

ヤマハモーターエレクトロニクス株式会社(以下、当社)は船外機昇降用の油圧発生用 POWER TRIM & TILT MOTOR(以下、PTT モーター)を供給している。

当社では以前から中型船外機向けの PTT モーターを開発・製造していたが、大型船外機向けの PTT モーターへ初参入した際に、要求に対して全体に品質的に余裕があり、さらなるコストの作り込みが課題であった。本稿ではコスト低減を目的とした開発の取り組みについて紹介する。

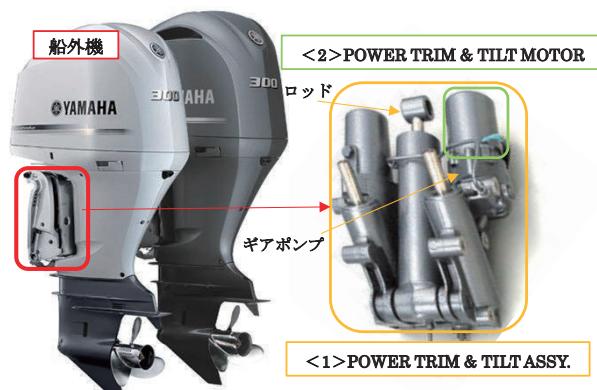


図1 PTTシステムの搭載状況と外観

## 2 開発の狙い

今回は材料費・加工費を抑えるため、モーター性能の最適化を検討した。また当社では部品の海外調達を進めている背景もあり、海外生産・現地調達を前提とした。これら全体的な仕様の見直し、特に海外調達可能な部品への置換、さらに組立工程の簡素化による大幅な原価低減に挑戦した。

## 3 システム構成

PTTシステムの船外機への搭載状況と外観を図1に、PTTシステムの油圧回路と作動概要を図2に示す。

### <1> POWER TRIM & TILT ASSY.

ギアポンプから各シリンダへ作動油を出し入れすることで各ロッドを伸縮する。また、船外機が上がっている状態を維持するために油圧を保持する。

### <2> POWER TRIM & TILT MOTOR

モーター出力軸がギアポンプを駆動する。  
モーターの回転方向を変えることでギアポンプから吐出される作動油の方向を切り替える。

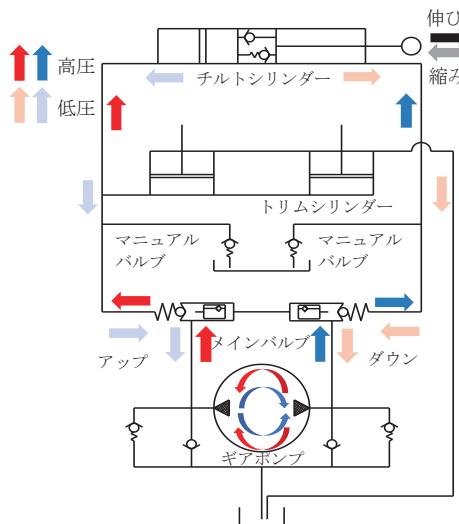


図2 PTTシステムの油圧回路と作動概要

## 4 コスト低減の取り組み

モーター性能の最適化については磁界解析を活用した。前提条件および解析水準はそれぞれ以下のとおり設定し、磁界解析を行い最適解を導き出した。

### ●前提条件

- マグネット材料は海外調達可能な6材(図6)へのグレードダウン
- モーター外寸は現行生産品以下、モーター性能は要求負荷での性能を満足
- ヨーク材質はPTTシステムにモーターを組み込み後に塗装(以下、ASSY. 塗装)を実施するため、樹脂+鉄材インサートから鉄材+電着塗装

### ●解析水準

- アマチュア長さ:2水準
- マグネット厚さ:2水準
- 巻線仕様組合せ:4水準

巻線電流による磁力とマグネットの合成磁力により発生するトルクと出力を導き出しているため、上記水準の組み合わせにてトルクと出力の比較をした。一例として図3に回転中の磁束密度分布を確認した磁界解析結果を示す。

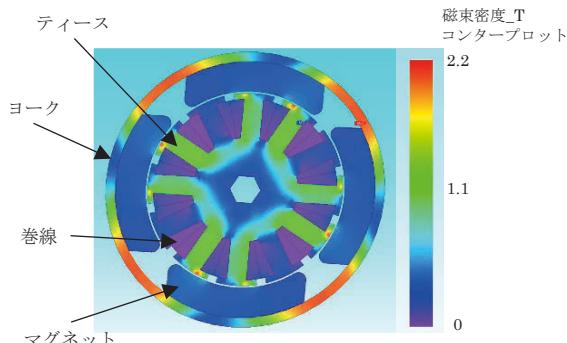


図3 磁界解析(参考)

図4にモーター構成比較図を示す。主なモーターの構成部品は、アマチュア、ヨーク、マグネット、ブラケット、コードである。現行部品のコスト構成を図5に示す。

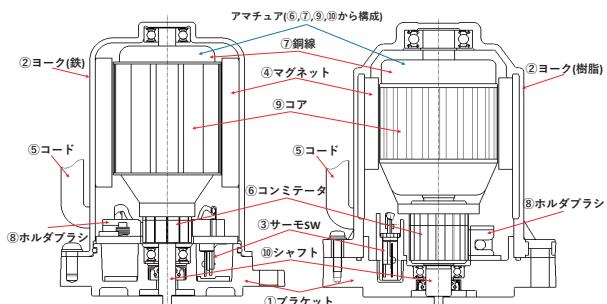


図4 モーター構成比較図(左:開発仕様、右:現行仕様)

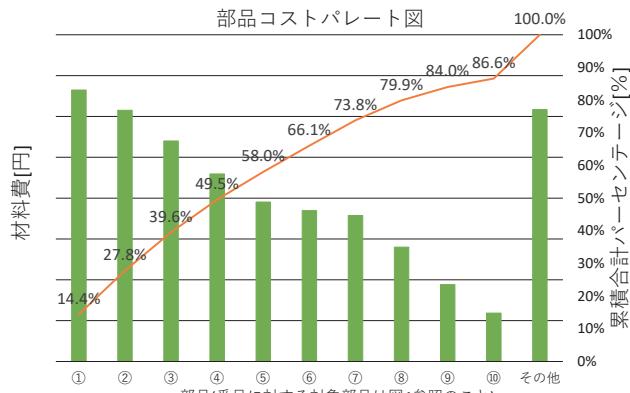


図5 現行部品のパレート図

以下、コスト低減のための取組内容について紹介する。

### 4-1. マグネットの材料変更

海外調達にあたり入手性の課題を持つ部品の一つとしてマグネットがある。現行生産品の日本製は12材を採用していたが、海外調達で入手可能なものは6材までである。また、12材は高グレードであり、図6の④に示すコストが高い部品の一つである。

12材から6材へ変更する場合、有効磁束が減少しモーター性能が低下してしまうため、同等の有効磁束を確保する必要がある。図6にマグネットのグレードと残留磁束密度(Br)の関係を示す。12材に対してBrが約13%小さいため、マグネットの厚さを13%以上厚くすることにより6材でも必要な有効磁束を得ることができ、従来同等のモーター性能を得ることが可能となる。

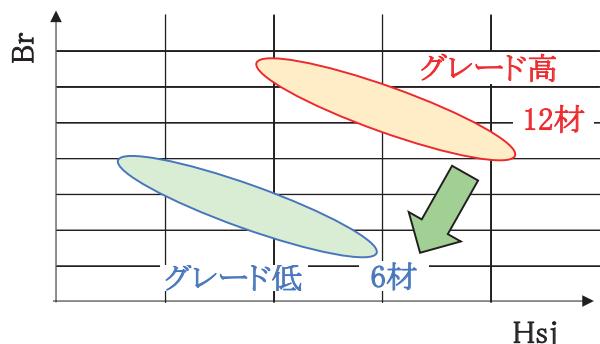


図6 マグネット グレード分布(文献1を基に作成)

モーター性能に関連する要素として、回転体であるアマチュアとの組合せもある。モーター外径を固定した場合、マグネットを厚くするとアマチュア径は小さくなり出力は減少する。そこで、マグネットの厚さと長さ、アマチュア径と長さおよび巻線仕様の最適組合せを磁界解析にて検討し、さらに実機で検証した。

表1 性能解析結果

要求	モータートルク 低負荷時		モータートルク 高負荷時		最大出力 [W]
	電流	出力	電流	出力	
	A[A] 以下	B[W] 以上	C[A] 以下	D[W] 以上	
現行 (要求比 ≈1)	79%	107%	90%	123%	E
解析結果 (要求比 ≈1)	78%	109%	93%	115%	79% (E 比較)

※1 要求比：要求値に対する実測値及び解析結果の割合

表1に性能解析結果を示す。開発仕様は現行仕様より最大出力が低くなるものの要求出力は満たせることが分かった。ただし、現行生産品に対し高負荷時の出力から最大出力までの余裕度が低下するため、生産での出力バラツキを抑制する必要があった。出力バラツキの要因を調査した結果、マグネットの磁束量のロット間バラツキが大きく、磁束量の最大・最小品で確認するとモーター性能に影響していることが分かった。そこで、マグネットメーカーにて製造ロット毎に磁束量を確認しマグネットの厚さを調整することで磁束量を管理することにした。これにより、モーター出力のバラツキを抑え工程能力を満足することが可能となった。表2に開発仕様での工程能力を示す。

表2 最終モーター性能

要求	モータートルク 低負荷時		モータートルク 高負荷時		最大出力 [W]
	電流[A]	出力[W]	電流[A]	出力[W]	
	A[A] 以下	B[W] 以上	C[A] 以下	D[W] 以上	
AVE. (要求比 ≈1)	76%	111%	88%	121%	82% (E 比較)
$\sigma$	0.36	1.60	0.60	4.62	
CP ≈2	6.52	3.82	5.86	6.91	

※2 Cp(工程能力指標)

以上のことから、6材マグネットでも要求性能を満足できる仕様に見直すことができた。

#### 4-2. アマチュア部品費削減と生産性向上

当社では、アマチュア巻線機の仕様として同時巻線機とフライヤー巻線機がある。同時巻線の特徴としては太い銅線(約  $\phi$  2程度)を巻くことができ、多くの電流を流せることから高出力が得られ大型モーターに採用することが多い。同時巻線では銅線を予め必要な長さ、必要な本数にカットしておき、同時にアマチュアのティースに巻く。対してフライヤー巻線は細い銅線(約  $\phi$  1程度)で巻くことから小型～中型モーターに採用することが多い。フライヤー巻線では一本の銅線をアマチュアのティース

に順次巻いていく。当社の設備はフライヤーが対に配置されており、2箇所同時にアマチュアのティースへ巻くことが可能なダブルフライヤー巻線機となっており、短時間での巻き上げが可能である。現行生産品は同時巻線機を採用していたが、デメリットとして使用する銅線の太さや本数に制約があり汎用性が低いため、日本でしか使用していない。また、アマチュア1台を製造するのに約2分かかる。対してフライヤー巻線機は銅線の太さによらず海外拠点所有の汎用巻線機で対応可能である。また、アマチュア1台を製造するのに約0.5分と同時巻線機に比べて約1.5分の短縮が可能となり、工数面からはフライヤー巻線機の方が有利である。

しかし、上述の通りフライヤー巻線機では細線を使用するため、大きな電流が流せず最大出力は低下する。そのため、表1のように最大出力が低くても、要求性能を満足できる巻線仕様を検討した。さらに、少しでも出力の損失を抑えるため、シャフト径およびベアリング径を約30%小径とし、損失を減らすことでの出力の最適化を図った。その結果、アマチュアの巻線仕様は銅線径を約40%減とし、銅線使用量も約25%削減できた。また、アマチュアの構成部品であるコンミテータにおいては、細線化により専用部品から汎用部品が使用できるようになり(図7)、大幅に部品費を削減することができた(図10)。



図7 アマチュア仕様差(左：開発仕様、右：現行仕様)

#### 4-3. ヨークの材料変更

図5にて材料費が高い部品の一つとしてさらに図5②で示すヨークがある。ヨークの機能としては使用環境が海上ということもあり外観の耐食性が必要となる。現行生産品は樹脂に鉄材のインサート成形と座屈防止用カラー(SUS材+ジオメット処理)で構成されるため材料費が高い。また、現行生産品ではASSY. 塗装しているため、防錆仕様としては余裕があった。また他のモデルでは鉄材のヨークを塗装した後、ASSY. 塗装した製品の採用実績がある。したがって、コスト削減のため鉄材のヨーク+塗装仕様を採用することにした(図8)。

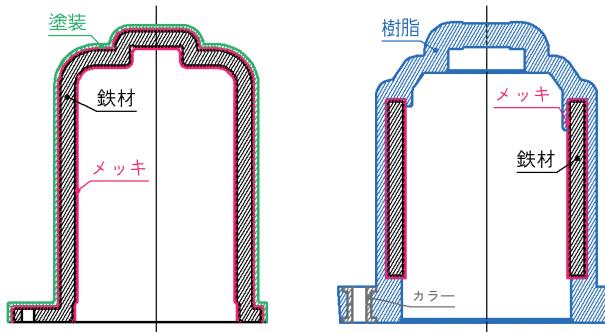


図8 ヨーク仕様差(左:開発仕様、右:現行仕様)

課題となる促進耐食試験による耐食性と塗装密着性についてはモーター単体および ASSY. 塗装の耐食性と密着性も問題がないことが確認できている(図9)。



図9 評価終了時状態(左:耐食性、右:密着性)

#### 4-4. その他部材の対応

図5①ブラケットについては海外調達および ASSY. 塗装を行う前提で防錆処理の仕様を見直した。同⑤コードについては海外調達および、アマチュアの巻線仕様を見直した。同⑧ホルダーブラシについてはサーモスイッチの取り付けを段付き構造から平置きに変更したことにより、インサートプレートの平面化と立体交差の廃止にて形状を簡略化し工数削減を実現することができた。これらを含め全ての部品を見直すことで最終的には図10のように大幅な材料費削減を実現することができた。

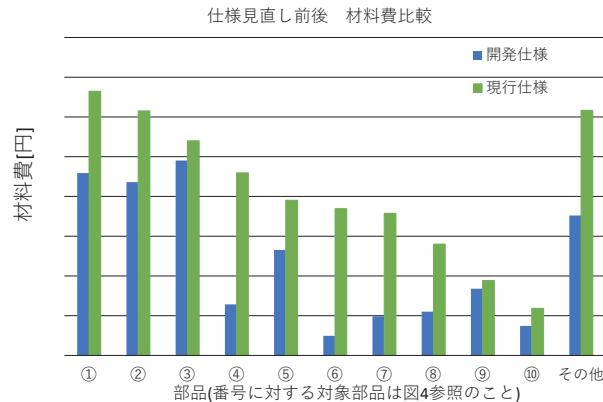


図10 仕様見直し前後による材料費比較

## 5 おわりに

本開発において海外生産・現地調達可能な仕様で要求を成立させることができ、製造原価は58%低減することができた。

今後もヤマハ発動機グループとして、商品のコストと要求品質を両立させられるような開発に努めていく所存である。



図11 開発品

### ■参考文献

- [1] 日立金属株式会社 機能部材事業本部 磁性材料統括部: Permanent Magnets カタログ, p.10, 2019年

### ■著者



加地 裕考  
Hirotaka Kaji  
ヤマハモーター  
エレクトロニクス株式会社  
事業統括部  
製品技術部



辻村 拓  
Taku Tsujimura  
ヤマハモーター  
エレクトロニクス株式会社  
事業統括部  
生産技術部

## Abstract

Yamaha Motor Co., Ltd. (hereafter, "the Company") began selling electric units for wheelchairs in 1995. In 1996, the "JW-II" - the predecessor model of the assist-type electric unit "JWX-2" currently on sale - was placed on the market. The assist-type electric unit (hereafter, "the electric unit") is an application of the power-assist technology used in electric-assisted bicycles, applied to wheelchairs in this case. The electric unit detects the magnitude of the force applied to the hand-rims used to operate the wheelchair and outputs a corresponding driving force from the motor as required. In addition, by attaching the electric unit to a manual wheelchair, it can be easily transformed into an assist-type electric wheelchair. However, in the same way as a manual wheelchair, when an assist-type electric wheelchair must be used on a one-sided slope (a slope that is inclined in either direction with respect to the direction of travel), there is a phenomenon called one-sided flow, in which the course of the unit turns along the slope. When a unidirectional phenomenon occurs, the user needs to strongly operate the hand rim on the lower side in order to correct the course. Reduction of this phenomenon has been a long-standing issue.

This paper introduces the one-sided flow prevention mechanism jointly developed with the Hori Laboratory of the University of Tokyo<sup>\*1</sup>, which has a proven track record in this research, in order to help overcome the above problems.

## 1 はじめに

ヤマハ発動機株式会社(以下当社)では、1995年から車椅子用電動ユニットの販売を始め、1996年には現在販売中のアシストタイプ電動ユニット「JWX-2」の前身モデルである「JW-II」の販売を開始している。

アシストタイプ電動ユニット(以下本電動ユニット)は、電動アシスト自転車に使われているパワーアシスト技術を車椅子に応用したものである。本電動ユニットは、車椅子の操作に使うハンドリムに加えられた力の大きさを検出してそれに応じた駆動力をモーターで出力できる。また、本電動ユニットを手動車椅子に装着することで簡単にアシストタイプ電動車椅子(図1)に変身させることができる。

ところで、アシストタイプ電動車椅子には手動車椅子と同じようにやむを得ず片斜面(進行方向に対してどちらかに傾斜した斜面)を進まざるを得ない場合、斜面に沿って進路が曲がってしまう片流れという現象が発生する。片流れ現象が発生すると使用者は進路を補正するために谷側のハンドリムを強く漕ぐ必要があり、疲労のみならず左右不均衡な体の使い方による二次障害を発生させる要因となることから、片流れ現象の低減は永年の課題であった。

本稿では、前記課題を克服するために当該研究で実績のある<sup>[1]</sup>東京大学堀研究室<sup>\*1</sup>と共同開発した片流れ制御について紹介する。



図1 アシストタイプ電動車椅子例

## 2 アシストタイプ電動ユニットのセンサー

本電動ユニットには、左右のホイールの中央に位置するハブの中に、ハンドリムに入力されたトルクを計測するトルクセンサー、モーターの電気角および回転数を計測するエンコーダー、モーターに流れる電流値を計測する電流センサーなどを備えている。

### 3 片流れ抑制の基本構想

車椅子が直進時にどちらかに曲がるのは、車椅子のヨー方向になんらかの外力(片斜面では主に重力が働く)によるモーメントが働くことが原因である。このモーメントの大きさを推定して、そのモーメントを打ち消す方向にモーメントを与えてやることができれば、ヨー方向に働くモーメント(図2)をゼロとすることができ、結果として車椅子を直進させることができるというのが片流れ制御の基本的な考え方である。

なお、打ち消しモーメントは、モーターの出力トルクを調整してやることで発生させることができる。



図2 ヨー方向に働くモーメント

### 4 打ち消しモーメントの推定

#### 4-1. ヨー方向の回転運動の運動方程式

車椅子が片斜面を直進する時のヨー方向の運動方程式は、次のように記述できる。

$$J \cdot d\omega/dt = Tg + Th + Tm - Ta + Tf \quad ①$$

Tg:重力に起因するモーメント

Th:使用者がハンドリムに入力したモーメントのヨー方向成分

Tm:モーターが出力するモーメントのヨー方向成分

Ta:ヨー方向の空気抵抗に起因するモーメント

Tf:ヨー方向の摩擦に起因するモーメント

J:車椅子のヨー方向の慣性モーメント

$\omega$ :車椅子のヨー方向の角速度

#### 4-2. ヨー方向の運動方程式の近似

一般的に、①の運動方程式を解くのは容易ではないが、車椅子の使用条件を考慮することで簡略化できる。①の式をいかに簡略化したかについて概要を述べる。

#### 4-2-1. Ta の近似

アシストタイプ電動車椅子は時速6km/h程度の低速度で使用され、また車椅子が走行する片斜面は3°程度の斜面を想定している。そのため、片斜面を曲がっていく時のヨー方向の角速度は極めて遅く、空気抵抗自体をゼロと考えても差し支えない。このことから、ヨー方向の空気抵抗に起因するモーメントTaをゼロとする。

#### 4-2-2. Th の近似

使用者がハンドリムに入力したモーメントのヨー方向成分であるが、前述したように本電動ユニットではハンドリムに入力されたトルクを計測できるトルクセンサーを備えているため、原理的には計測された値から計算をすることができる。しかしながら、本電動ユニットで備えているトルクセンサーは、力の弱い使用者の入力トルクを計測できるようにダイナミックレンジが設定されている。その影響により比較的力を出せる方や走行中のブレーキング(ハンドリムを握れない力の弱い方でも専用グローブをはめてハンドリムに手をあてると、グローブとハンドリムの摩擦を利用した比較的強い減速操作が可能)時には、簡単にトルクセンサーのダイナミックレンジを超ってしまう。このような状態の時には正しい計測ができないことからハンドリムに入力されたトルクからヨー方向成分の計算をすることをあきらめ、使用者がハンドリムに入力したモーメントのヨー方向成分も含めて外力によるモーメントとして扱うようとする。なお、重力に起因するモーメントと使用者がハンドリムに入力したモーメントのヨー方向成分を合算したモーメントを新しく外力によるモーメントTdと定義する。

#### 4-2-3. Tf の近似

ヨー方向の摩擦に起因するモーメントはこれらのモーメントの中で最も近似が難しいが、次のように考える。

静止摩擦が働いている状態は、実際にはモーメントが働いてはいるが、車椅子の動きとしては片流れ現象が発生しているわけではない(片流れしないように踏ん張っている状態)。そのため、静止摩擦が働いている状態のTfを便宜的にゼロとみなすことにする。

次に動摩擦が働いている状態であるが、回転運動方向とは反対の方向に摩擦に起因するモーメントが働くため、次のようにTfを記述できる。

$$Tf = -A \cdot \omega / |\omega| \quad \text{ただし、} \omega \neq 0 \quad ②$$

前述したように車椅子のヨー方向の角速度は極めて遅く、値が取り得る範囲も極めて狭い範囲である。このことから  $|\omega|$  を

一定値として扱い、以下のように近似する。

$$T_f = -B \cdot \omega \quad (3)$$

なお、この近似式は  $\omega$  をゼロにすることで静止摩擦が働いている場合の近似も表現ができる。よって、ヨー方向の摩擦に起因するモーメント  $T_f$  を(3)式で近似する。

#### 4-2-4. ヨー方向の運動方程式の近似式

4-2-1から4-2-3の結果からヨー方向の運動方程式①を近似した式を用いると外力によるモーメント  $T_d$  は、以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} J \cdot d\omega/dt &= T_d + T_m - B \cdot \omega \\ T_d &= J \cdot d\omega/dt - T_m + B \cdot \omega \quad (4) \end{aligned}$$

#### 4-3. 打ち消しモーメントの算出

##### 4-3-1. 角速度 $\omega$ および $d\omega/dt$ の計測

前述したように  $\omega$  は車椅子のヨー方向の角速度である。右車輪および左車輪にはそれぞれにモーターが接続されるため、エンコーダーから計測されるモーター回転数とタイヤ径などからそれぞれの車輪速度を算出することができる。さらに、右車輪速度と左車輪速度の差と右車輪と左車輪のトレッド幅から車椅子のヨー方向の角速度を算出することができる。また、 $d\omega/dt$  は  $\omega$  の微分値なので、 $\omega$  の時間変化から求めることができる。

##### 4-3-2. 車椅子のヨー方向の慣性モーメント $J$ の算出

車椅子のヨー方向の慣性モーメントは、車椅子や使用者の形状(姿)や質量が決まるとき計算可能であるが、一意に定まるわけではない。とはいっても、アシストタイプ電動車椅子の場合には、使用者がハンドリムを漕いで操作することを前提にしているため、前輪(キャスター)上げのために重心と車軸との距離が離れているということもなく、全体的な形状は円筒と考えても差し支えない。

以上のことから本開発では、代表的な車椅子の諸元を代表値に  $J$  を算出する。

##### 4-3-3. 係数 $B$ の算出

係数  $B$  は、摩擦に関連する係数であり、摩擦係数や車椅子や使用者の形状や質量、斜面の傾斜角度等から求めることができる。一般的にこれらの数値も一意には定まらないが、片流れが発生する状況が屋外の舗装路が多いことや代表的な車椅子の諸元を代表値として係数  $B$  を算出する。

#### 4-3-4. $T_m$ の計測

前述したように右車輪および左車輪にはそれぞれにモーターが接続されるため、電流センサーで計測されるモーター電流とタイヤ径などからそれぞれの車輪モーメントを算出することができる。さらに右車輪モーメントと左車輪モーメントの差と右車輪と左車輪のトレッド幅から、モーターが输出するモーメントのヨー方向成分が算出できる。

#### 4-3-5. $J$ および $B$ の補正

当社の車椅子用電動ユニットシリーズは、使用者個々の残存能力に応じて電動車椅子の加減速度などを調整できるように「JW スマートチューン」というアプリケーションをセラピストや販売店向けに提供している。

前述したように車椅子のヨー方向の慣性モーメント  $J$  や係数  $B$  は、代表的な車椅子の諸元を元に算出を行っているが、 $J$  や  $B$  の算出要素である質量については使用者の個人差が大きく、結果として実際の値と算出結果との間に乖離を発生させる要因となっている。その乖離を少なくするように「JW スマートチューン」で使用者の質量(体重)を入力できるようにし、補正をかけられるようにした。

#### 4-3-6. $T_d$ の計算

4-3-1から4-3-5の結果から外力によるモーメント  $T_d$  を計算することができる。

#### 4-3-7. 打ち消しモーメントの算出

打ち消しモーメントは、 $T_d$  と同じ大きさで  $T_d$  と向きが反対方向のモーメントになる。

なお、本電動ユニットで打ち消しモーメントを発生させるためには、打ち消しモーメントを右車輪モーメントと左車輪モーメントに分割し、さらに各車輪モーメントを各車輪に接続されたモーターの電流値に換算する必要がある。これらは、4-3-4の計算手順とは反対の計算を行うことで算出することができる。

#### 4-4. 旋回運動時のゲイン抑制

ここまで説明してきた片流れ抑制は、直進時に斜面に沿って進路が曲がっていく片流れ現象を抑制することを考えているため、基本的には  $|\omega|$  が大きくならないように制御することを前提にしている。そのため意図的に旋回運動をしているような場合には片流れ制御が働かないようになる必要がある。

上記要求を満たすために本制御では、車椅子の直進方向の速度によりゲイン  $G$  を算出し、4-3-7で算出した打ち消しモーメントにゲイン  $G$  を乗算することで車椅子が旋回運動をしている

場合には片流れ制御が効かないようした。

なお、ゲイン G の算出に車椅子の直進方向の速度を利用しているのは、車椅子の運動として直進方向の速度が高くなると旋回成分が小さくなることや、車椅子の使い方として直進方向の速度が低い領域では片流れ制御への要求が相対的に低いことが理由である。

図3に車椅子の直進方向の速度とゲイン G の関係を示す。

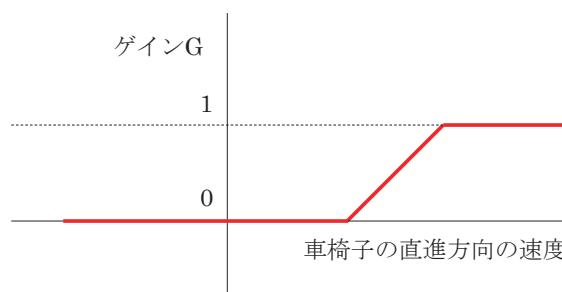


図3 車椅子の直進方向の速度とゲイン Gとの関係

### ■著者



水野 正光

Masamitsu Mizuno

ランドモビリティ事業本部

SPV事業部

JWビジネス部

## 5 おわりに

アシストタイプ電動ユニットに導入した片流れ制御について概要を説明した。本制御によりアシストタイプ電動ユニットが備えるセンサー情報をを利用して車椅子の片流れ現象の抑制が図れることを示した。

なお、今回の紹介記事では効果の程度についての説明は省いている。当社ホームページの電動車椅子の製品紹介<sup>[2]</sup>に本制御の効果を示す動画が掲載されているため興味がある方はぜひ見ていただきたい。

### ■謝辞

本制御の開発に協力をいただいた国立大学法人東京大学 堀 洋一先生、金 佳英氏はじめとする関係者の皆様<sup>\*1</sup>に感謝申し上げます。

\*1 開発当時

### ■参考文献

- [1] 金 佳英, 南 康鉉, 吳 世訓, 藤本 博志, 堀 洋一:パワーアシスト車椅子における人間親和型ヨー運動制御, 平成22年電気学会産業応用部門大会, VOL. 2, pp. II-603-II-606, 2011
- [2] ヤマハ発動機 ホームページ「JW スwingー電動車椅子」  
<https://www.yamaha-motor.co.jp/wheelchair/lineup/swing/>  
(アクセス日 2022/7/11)

### Abstract

Yamaha Motor has set “Yamaha Motor to the Next Stage” as its digital transformation for further strategic use of the latest digital technology and data. In order to strengthen existing businesses through the use of data, analysis of various types of business data is essential to promote this, and therefore the company is collecting and analyzing manufacturing data, product IoT data, and customer data. One example of this is by analyzing vehicle data from connected motorcycles on the market, it is possible to more accurately understand users’ market levels, which was previously an unknown sector. In addition, by analyzing the user’s activities records on the web page, it is further possible to understand the customer’s journey leading up to the purchase of a product, etc. Using data and these measures, the company aims to create new, and greater customer experiences.

This paper introduces the data analysis platform to conduct data analysis. Specifically, we will introduce a “data analysis platform” that enables data collection, conversion, analysis, reporting, and other processes to be performed by data stores and analysis sites. In addition, examples of data analysis for marketing and manufacturing systems using this data analysis platform will also be introduced.

## 1 はじめに

ヤマハ発動機は、最新デジタル技術やデータのさらなる戦略的活用を図るための DX として「Yamaha Motor to the Next Stage」を掲げている。その推進にはデータ化された各種業務データの分析が必須となり、既存事業をデータ活用で強くするために製造データ、製品 IoT データ、顧客データの収集と分析を行っている。例えば、市場を走行しているコネクテッドモーターサイクルの車両データを分析することで、従来分からなかつたユーザの市場での利用状況を正確に把握することができる。また、Web ページ上でのユーザの行動履歴を分析することで、製品の購買に至るまでのカスタマージャーニーなどを把握することができる。これらの施策によってデータによる新たな顧客体験の創出を目指している。

本稿ではデータ分析を行うためのデータ分析基盤について紹介する。具体的には、データストアサイトおよび分析サイトによって、データ収集・変換・分析・レポートなどの処理が実行可能な“データ分析基盤”について紹介する。また、本データ分析基盤を活用したマーケティング系、製造系のデータ分析事例を紹介する。

## 2 背景

当社ではクラウドサービスを用いた自動運転運行管理システムなどのクラウドシステムの開発実績や、さらには運行データを使った顧客行動分析の実績がある<sup>[1][2]</sup>。しかしながら、当社のグローバルに広がる顧客情報や全コネクテッド製品情報のデータ分析を行う場合、複数のデータウェアハウスの統合やビッグデータを分析するための高性能な演算性能を有したデータ分析基盤が必要となる。具体的には製品 IoT データウェアハウスや顧客データウェアハウスなどのデータを統合するために、転送、抽出、加工が必要となる。また、そのデータを AI や統計によって分析する機能が必要であり、さらには分析した結果を共有するためのレポーティング機能が必要となる。

そこで、社内で育成がすすむデータ分析官が分析で必要とするそれら機能を備えたデータ分析基盤を構築した。

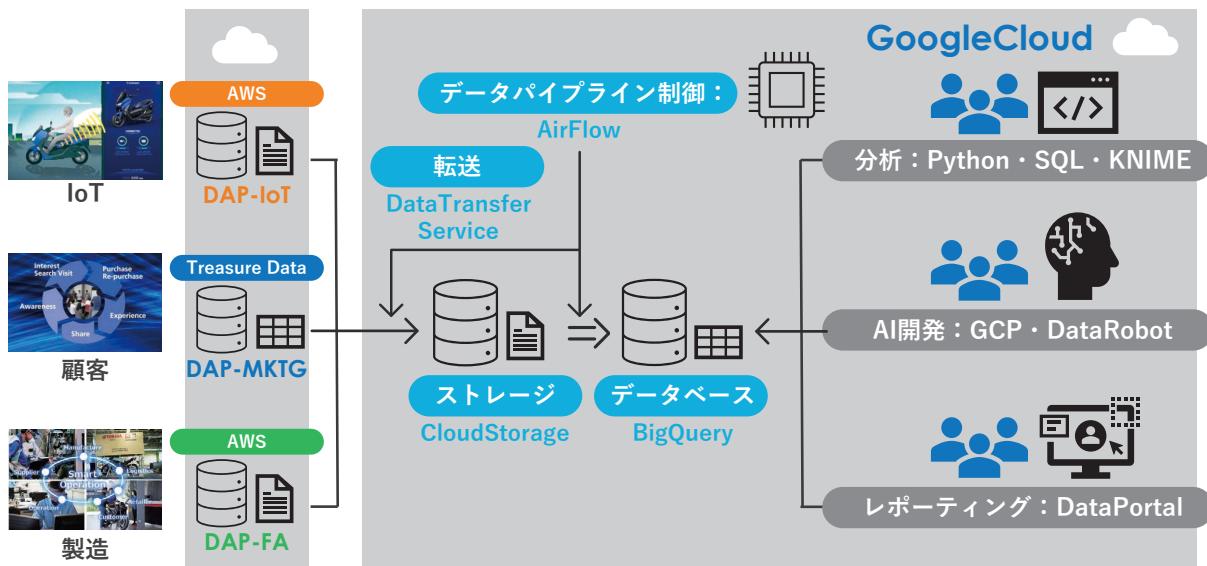


図1 データ分析基盤全体構成

### 3 データ分析基盤概要

データ分析基盤の概要を図1に示す。本データ分析基盤は「探索的データ分析”、“機械学習”、“分析結果レポート”などのデータ分析を行うための基盤であり、図1に示すようにデータソースである“DAP-IoT”、“DAP-MKTG”、“DAP-FA”などのデータウェアハウスと接続することで、それらデータの収集・蓄積・加工・分析・可視化のすべてを行うことができる。具体的にはクラウド IaaS、PaaS サービスである GoogleCloud<sup>1)</sup>の各種サービスを中心に構築されており、統計解析などを行うための探索的データ分析については、GoogleVertexAI<sup>1)</sup>(以下 VertexAI)による Python プログラミング環境、ペタバイト級データの抽出が可能な GoogleBigQuery<sup>1)</sup>(以下 BQ)、ローコードプログラミングツールである KNIME<sup>2)</sup>による分析機能を有している。分析者はビッグデータの中から任意の情報を抽出し、統計解析することができる。

また、多変量解析や予測を行うための機械学習については、構造化データ、画像認識 AI、自然言語解析などの分析が可能な VertexAI や、ノーコーディングでトップデータサイエンティストと同等の予測精度の AI を開発できる DataRobot<sup>3)</sup>を備えている。

さらに、分析結果の共有ツールとして GoogleDataPortal<sup>1)</sup>(以下 DataPortal)が利用可能であり、グローバル拠点間でのデータ共有を行うことができる。

これらの分析機能を活用することで、顧客の Web 行動解析によるニーズ把握や各種マーケティング施策、製品開発へのフィードバックを行うことができる。

#### 3-1. データ分析基盤詳細

本データ分析基盤は、データを収集・蓄積・加工するための「データストアサイト」と、データを分析・可視化するための「分析サイト」とによって構成される。これらデータストアサイトと、分析サイトについて詳細に説明する。

#### 3-2. データストアサイト(データウェアハウス & データパイプライン)

当社はデータウェアハウスとしての DAP (Data Analytics Platform) の構築を進めている。例えば、DAP-IoT には製品 IoT データが、DAP-FA には製造データが、DAP-MKTG には顧客データが収集されている。本稿で紹介するデータ分析基盤はこれらのデータウェアハウスと接続可能であり、クラウドサービスである GoogleCloud 上でそれらデータの分析を行うことができる。

一例として製品 IoT 向けデータウェアハウスの構成について説明する。図2に製品 IoT 向けデータウェアハウスの構成を、図3に処理の流れを示す。本データ基盤は、データソースからのデータ転送サービスとして GoogleDataTransferService<sup>1)</sup>(以下 DataTransfer)、データストアサイトのインプットストレージとして GoogleCloudStorage<sup>1)</sup>(以下 GCS)、データウェアハウスとして BigQuery、データ転送処理を制御するためのオーケストレーションサービスとして AirFlow<sup>4)</sup>を採用しており、いわゆるデータパイプライン処理とデータウェアハウスによって構成されている。

本データパイプライン処理によって、一連のデータウェアハウスのデータの取り込み処理、データ加工処理が自動実行される。

具体的には図3に示すように、DAP からデータ分析基盤へのデータの取り込みは、AirFlow によって制御される。AirFlow はデータ転送処理およびデータ変換処理などのフロー制御をつかさどるサービスである。AWS S3<sup>5)</sup>に保存されているデータを DataTransfer サービスによって GCS に転送する。転送されたデータは JSON 形式で保存されており、データベースに取り込み可能なデータ形式である Parquet に変換される。この際、データの検索性を向上させるために、データ分割単位であるパーティションの変更を行うことで検索性能を最適化している。また図2および3に示すように、データウェアハウスはマスタ情報としての SCCU カタログと、各車両ごとの走行データ統計値を表す SCCU サマリと、時系列走行データが収納された SCCU ログとを備えている。

これらデータウェアハウスのデータには、後述するデータ分析サイトからアクセス可能であり、データ分析官は図4に示すように分析サイト上で統計解析や AI による多変量解析などを行うことができる。

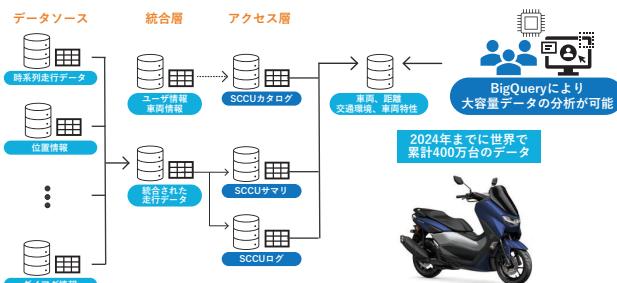


図2 製品 IoT 向けデータウェアハウスの構成

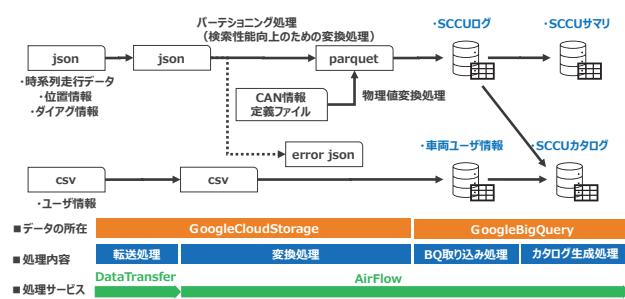


図3 データパイプライン処理の流れ

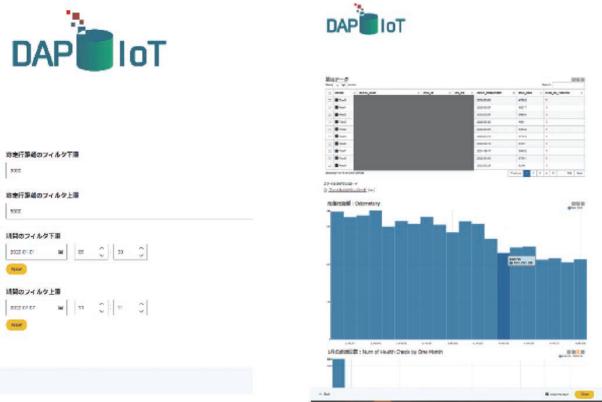


図4 製品 IoT データの検索画面と検索結果

### 3-3. データ分析サイト(機械学習パイプライン)

#### 3-3-1. 背景

一般に機械学習モデルを業務システム化する際には、データの収集、特徴量の取捨選択、機械学習モデルの作成、作成したモデルを動かすためのコンピューティングリソースの提供など、さまざまな業務を並列に、かつ継続的に行う必要があることが知られており<sup>[3]</sup>、それらの管理を容易にするための開発環境として ML-Ops.(Machine Learning Operations)が一般的になりつつある。当社では陸海空それぞれの領域における自動運転や製造現場での異常検知など、さまざまな領域で機械学習システムを業務に導入しているが、導入された機械学習システムの数の増加とともにこれらの業務負荷も増加しており、技術者の作業時間の確保が課題となっていた。

業務負荷が増加する大きな要因として、当社においてはこれらの業務をそれぞれ別のツールを用いて独立して実施していたため、業務間のデータの受け渡しやバージョンおよび組み合わせの管理に非常に大きなコストがかかっていたことが挙げられる。そこで ML-Ops. の機能である機械学習パイプラインの整備を進めた。具体的には、前述のデータストアサイト上に構築されたデータウェアハウスのデータを分析するための機械学習パイプラインを導入し、データの受け渡しや業務管理を自動化することによりこの問題の解決を図った。

#### 3-3-2. 本機械学習パイプラインの処理

DataRobot などの ML-Ops. 環境も導入しているが、本稿では VertexAI を用いた機械学習パイプライン構築事例について紹介する。図5に構築した機械学習パイプライン処理を示す。

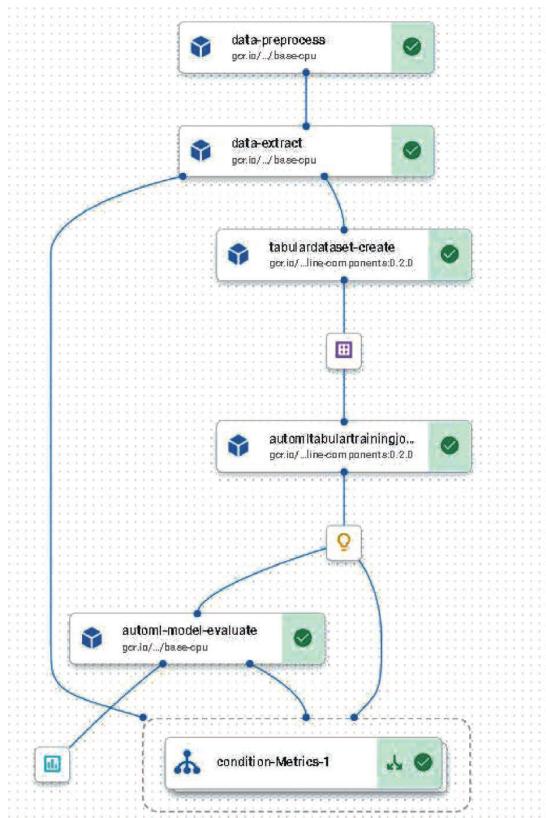


図5 構築した機械学習パイプライン処理

まず、従来は作業者の手作業で行われていた予測に必要な特徴量を含むデータの受信や AI による予測結果の送信などの外部システムとの連携自動化を目的に本プロジェクト専用のデータウェアハウスを BigQuery によって構築し、それを介してデータ連携・システム連携を行うよう設計した。また、従来は手作業によって表計算ソフトなどのツールで処理していたデータ前処理や機械学習トレーニング処理、機械学習予測処理などの複数の処理を Python でプログラム化しており、それらの処理を API (Application Programming Interface) 経由で呼び出し可能とした。これら一連の処理の実行順序やタイミングを制御するためのパイプライン処理(図5)を VertexAI Pipeline によって制御することで、自動化を実現している。またこのパイプライン処理も API 化されており、外部関数やスケジューラなどを用いて API を呼び出すことで定期実行やイベント駆動を実行することができる。

なお、機械学習システムの実運用には予測結果の精度検証を目的とした結果の再現性が求められる。具体的には、AI に投入したデータの履歴や機械学習モデルのトレーニングバージョンなどを管理することで予測結果の再現性を担保し精度検証を行うことができる。VertexAI Pipeline によれば、処理手順を図5のように可視化しさらに、そのパイプライン上の各処理の

実行ログを自動で記録することができる。従来はこういった管理やそれを行うために必要な情報の記録も技術者の業務であったが、それが不要となる点もこのツールを使用する利点である。

機械学習パイプライン処理の導入により、手動での業務記録や業務間のデータ転送が不要になり、またすべての業務を一括して管理できるようになった。これにより、機械学習プロジェクトに必要となるコストを大幅に削減できると考えられる。

## 4 活用事例

### 4-1. 製品 IoT データ分析事例

データストアサイトの活用事例として、製品 IoT のデータ分析事例について説明する。図6に製品 IoT データ分析のユースケース例を示す。

図6に示すように、前記データストアサイトの機能を使うことで、分析者は必要なデータに簡単にアクセスできる。例えば、分析者は車種、国、走行距離、ECU 診断回数などの条件でデータをフィルタリングすることで、従来知りえなかった、該当する条件での走行データが市場の車両の何%に相当するかなどの検証をデータに基づき正確に行うことができる。今後は、これらの検討結果を車両開発にフィードバックしていく予定である。



図6 製品 IoT データ分析のユースケース例

## 4-2. マーケティングデータ分析事例

本節では、前節で説明した機械学習パイプラインを実業務に用いた事例を紹介する。図7にマーケティングデータ分析のユースケース例を示す。

自動車業界を含めた小売業界では、懸賞付きキャンペーンの応募者やイベントの参加者を潜在顧客とみなし、彼らに対して電話営業などのアプローチをとることで購入者数を増やすといったような活動がよく行われる。このような方法の抱える課題の一つとして、潜在顧客の中に、懸賞目当てで申し込み、実際に買う気のない人や転売目的のブローカーなどが含まれてしまい、そういった人へも営業活動が行われてしまうという点がある。そこで、当社では図7に示すようにウェブ行動やアンケートの回答結果などの情報から購入意欲の高い個人利用者とみられる潜在顧客を選定し、そこに営業活動を限定することで効率を上げるという活動を行っている。これをリードスコアリングと呼ぶ。今回、機械学習パイプラインを用いて、ベトナムの潜在顧客を対象に機械学習を用いたリードスコアリングのシステムを開発した。

結果として、データベース形式などが異なるため単純な比較はできないものの、別地域で行った類似のシステム開発と比較して、機械学習システムの開発に必要となった時間は増加した一方、モデルを学習させるための特徴量を修正して再び評価を行うといった業務に必要となる時間は大幅に減少した。アップデートなどの業務は今後も継続して行わなければならないことを考慮しても、機械学習パイプラインを用いたことでトータルでかかるコストは減少すると考えられる。

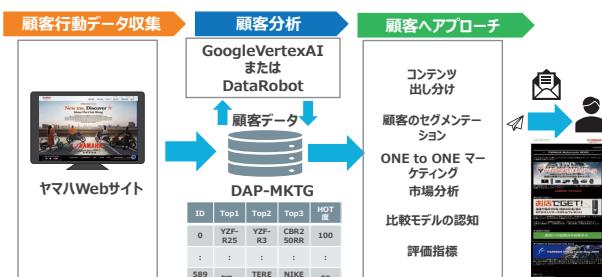


図7 マーケティングデータ分析のユースケース例

## 5 おわりに

データパイプライン処理と機械学習パイプライン処理とを備えたデータ分析基盤について紹介した。

当社はデータ分析官を含む DX 人材を1200名以上育成することを目指しており<sup>[4]</sup>、データ分析人材の活躍にはデータの

運用ルールや体制づくりが必須となる。

そこで、多くのデータ分析官によるデータ活用を可能とするため、図8に示すようなデータマネジメント活動を現在進めている。本データ基盤構築活動に加え、データセキュリティ、データガバナンス、メタデータ整備などの活動を推進している。今後は、秘密情報管理のための行単位でのアクセス権制御機能や、データのアクセスを容易にするためのデータカタログ機能の開発などを行う予定である。

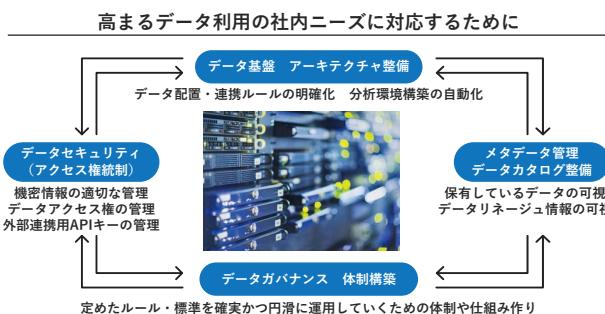


図8 安全安心便利に分析するためのデータマネジメント活動

- 1) GoogleCloud[およびかかる資料で使用されるその他の GoogleCloud 商標]は、Google LLC の商標です。
- 2) KNIME は KNIME 社の商標です。
- 3) 「DataRobot」は DataRobot, Inc. の登録商標です。
- 4) AirFlow, <https://airflow.apache.org>
- 5) Amazon Web Services、“Powered by Amazon Web Services” ロゴ、[およびかかる資料で使用されるその他の AWS 商標]は、米国その他の諸国における Amazon.com, Inc. またはその関連会社の商標です。

## ■参考文献

- [1] 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)
- [2] 荒木 幸代, 藤井 北斗, 見米 清隆, 渡辺 仁:「リゾート施設における低速モビリティの利用調査と自動運転サービスデザイン」, ヤマハ発動機技報, 2018-12 No.54 (2018)
- [3] D. Sculley, Gary Holt, Daniel Golovin, Eugene Davydov, Todd Phillips, Dietmar Ebner, Vinay Chaudhary, Michael Young, Jean-François Crespo, Dan Dennison: “Hidden Technical Debt in Machine Learning Systems”, (2015), <https://proceedings.neurips.cc/paper/2015/file/86df7dcfd896fcacf2674f757a2463eba-Paper.pdf>
- [4] ヤマハ発動機株式会社:「新中期経営計画 2022-2024 年」, <https://global.yamaha-motor.com/jp/ir/management/mtp/pdf/2022/2022medium-plan.pdf>

■著者



藤井 北斗

Hokuto Fujii

IT 本部

デジタル戦略部



佐々木 誠

Makoto Sasaki

IT 本部

デジタル戦略部



宮本 悠矢

Yuya Miyamoto

IT 本部

デジタル戦略部



鈴木 博順

Hironobu Suzuki

IT 本部

デジタル戦略部

# モーター熱流体解析の精度向上に貢献する モデル化手法の紹介

Modeling methods that contribute to improvements in accuracy of CFD analysis on electric motor

山内 拓也 石川 さとみ 猪上 美佳 沖 秀樹

## Abstract

Yamaha Motor continues to work on development in electric mobility as this form of movement becomes widespread worldwide. In the development of electric mobility, heat remains as a very important issue. While electric components are heat-sensitive and therefore need to be designed accordingly, they are also required to be compact and cost-effective, which is a contradictory to the requirement. For this development, the company is conducting a desk study using commercially available Computational Fluid Dynamics (CFD) tools. This paper introduces the outline, issues, and modeling methods, and their validity confirmation of CFD tools for electric motors.

## 1 はじめに

電動モビリティの世界的な普及が進む中、当社でもその開発が進められている。電動モビリティ開発において、熱は非常に重要な課題である。電動コンポーネントは熱に弱く、適切に設計される必要がある一方で、熱の背反となるコンパクト化や低コスト化が求められている。開発にあたり、当社では市販熱流体解析(CFD: Computational Fluid Dynamics)ツールを用いた机上検討を実施している。本稿ではモーターのCFDの概要、課題、モデル化手法とその妥当性確認について紹介する。

## 2 背景

近年、環境保全対応のため世界的に電動モビリティの普及が進んでおり、二輪メーカーでもバイクの電動化開発が本格化している。

当社では、「ヤマハ発動機グループ環境計画2050」として環境長期目標を掲げている。その中でカーボンニュートラル社会の実現に向けた技術戦略として、モーターサイクルのパワートレイン構成比目標を2050年でBEV(Battery EV)90.0%と置いている。

電動化の多くの課題の内、重要な項目の一つが熱課題である。電動モビリティのメインコンポーネントは、モーター、バッテリー、MCU (Motor Control Unit) であるが、それぞれ熱課題を抱えている。モーターは、コイル被膜の絶縁破壊による故障や、磁石の減磁による出力低下が発生する可能性がある。バッテリーは他のコンポーネントより熱に弱く、熱のマネジメントが厳しい。MCUも最大動作温度を超えると、断線等による故障を起こしうる。以上のように、電動モビリティのコンポーネントは熱に弱く、熱を考慮した設計をする必要がある。

一方で、電動コンポーネントはレイアウトやコスト要件を満たすため、熱の背反となるコンパクト化や低コスト化が求められる。例えば、自然空冷モーターの出力を変えずにサイズを小さくしようとすると、発熱密度が大きくなる一方で、放熱面積が減るため温度が上昇する。上限温度を超えないような設計が必要であるが、超えてしまう場合は、より上限温度の高い部品の選択や、より冷却性能の高い冷却方式(強制空冷→水冷→油冷)を選択する。その場合、サイズやコストが増してしまう。単純に冷却性能を上げるだけでなく、サイズやコストを両立した設計が求められている。

これらのコンポーネントを開発するにあたり、試作前に机上の検討を実施している。当社では市販の熱流体解析(CFD: Computational Fluid Dynamics)ツールを用いて、これら熱課題の机上検討を実施している。本稿ではモーターのCFDに絞り、モデル化手法について概要および妥当性確認について紹介する。

## 3 モーター熱流体解析の概要

### 3-1. モーター熱流体解析の目的と手段

モーター熱流体解析の目的は主に以下の2点が挙げられる。

- ・ 試作前の温度成立性の確認と対策
- ・ 試作後の実機検証で発生した課題に対する現象解明と対策

熱流体解析は、試作前の温度予測から試作後の現象把握・理解まで、製品開発において幅広く活躍している。

解析方法と結果処理方法は以下のとおりである。

- ・ コイルなどの損失が発生する部品の発熱条件の設定、空気／水／油などの冷媒温度の設定、放熱回路設定
- ・ 热が懸念される部品の平均温度の取得、温度の図化(図1)

- 熱や流れなどを熱流束、流速ベクトルなどで図化  
実機評価では部品温度は分かるものの、なぜその温度になったのかがわからないことが多い。CFDにより熱や流れを可視化することで、現象を理解し対策方針の立案をすることができる。

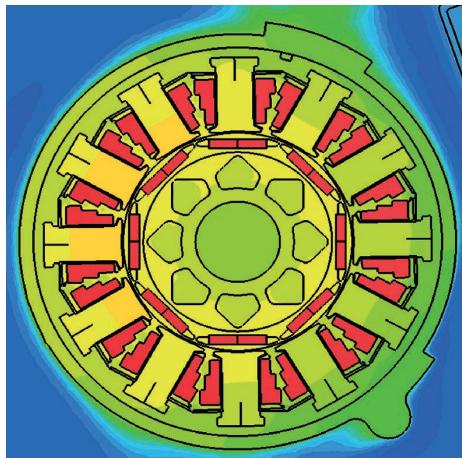


図1 モーター断面の温度分布の例

### 3-2. モーター熱流体解析の課題

当社ではエンジン等の製品開発時、熱流体解析を適用しており、そこで培ってきた技術がある。一方、モーターならではの課題がありその技術構築を進めている。ここからはその課題について説明する。

エンジンは燃焼室で発生した熱が金属の塊のヘッドシリンダーおよびボディーシリンダーを通り冷媒(空気／水／油など)に流れしていく。一方、モーターは主にコイルで発生した熱がボルト、積層鋼板、ケースと多くの部品を通って冷媒に流れる。エンジンは構造体における入熱から放熱までの熱経路が比較的単純であるが、モーターは多くの部品を通して熱経路が複雑であることがわかる。

モーターには積層鋼板と呼ばれる鉄板(電磁鋼板)の積層材がある(図2)。積層される電磁鋼板の間には空気や接着剤があり、鉄単体よりも熱が通りづらくなる。電磁鋼板の積層をそのまま再現することは形状再現性および計算コストの点で困難であり、このモデル化が課題である。

また、モーターは多くの部品を通して放熱されるが、必ず部品と部品の間には空隙が発生し、熱が通りづらくなる(図3)。この空隙をそのまま再現することは積層鋼板と同様、困難である。

これらの現象を考慮せず解析をすると、解析の精度が悪くなり、実機温度および現象の予測が正確にできなくなる。これらを考慮したモデル化手法を構築した。次章より記す。

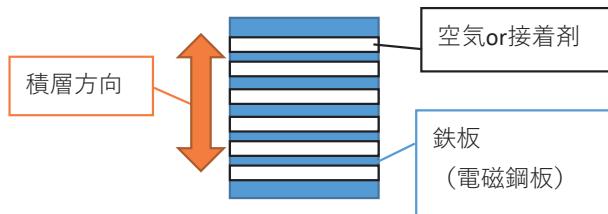


図2 積層鋼板の積層イメージ図

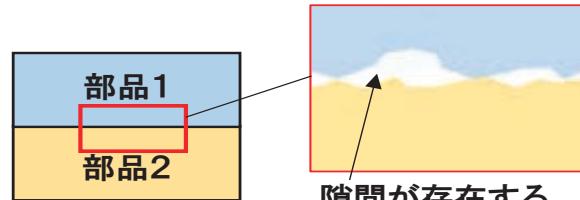


図3 部品接触部のイメージ図

## 4 モーターモデル化手法および妥当性確認

### 4-1. 積層鋼板のモデル化

#### 4-1-1. モデル化概要

積層鋼板は図2のように鉄板が何層にも積み重なっている部品である。そのため、積層方向には必ず空気や接着剤が入り、部品全体の熱伝導率は電磁鋼板そのものの熱伝導率より小さくなる。今回、空気や接着剤を含めた積層鋼板を一つのブロックとして扱い、空気や接着剤分を考慮した熱伝導率(=等価熱伝導率)を適用するモデル化を行った。等価熱伝導率の算出方法について説明する。

積層方向は直列に熱抵抗が存在するため、熱抵抗の直列則が成り立つ。直列則から以下の等価熱伝導率の式を導き出せる。

$$\lambda_{eq} = \frac{t_{all}}{\frac{t_f}{\lambda_f} + \frac{t_a}{\lambda_a}} \quad \dots (1)$$

$\lambda_{eq}$ :等価熱伝導率  
 $t_{all}$ :積層鋼板の総厚み  
 $t_f$ :電磁鋼板の総厚み  
 $\lambda_f$ :電磁鋼板の熱伝導率  
 $t_a$ :空気層の総厚み  
 $\lambda_a$ :空気の熱伝導率

この計算式の妥当性確認のため、実験と比較した結果を次節で示す。面内方向については、熱抵抗の並列則より算出でき、電磁鋼板の熱伝導率とほぼ同等の値となる。

#### 4-1-2. 妥当性確認

積層鋼板の試験片を図4のように断熱材で囲み、上から熱を与え、上下の温度差を熱電対により測定する実験を行った。上下の温度差および、積層厚さ、断面積、投入熱量により、実験の熱伝導率を算出し、事前に求めておいた式(1)の結果と比較した(図5)。

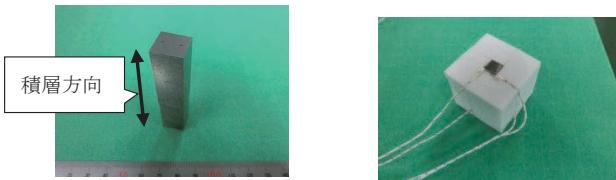


図4 試験状況(左:断熱材貼り付け前、右:断熱材貼り付け後)

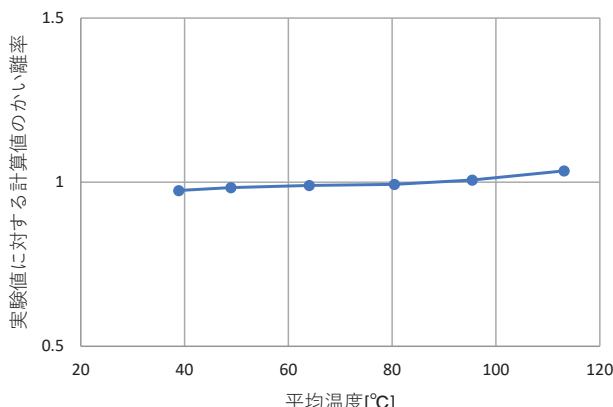


図5 热伝導率の実験値に対する計算値の各平均温度でのかい離率

図5は熱伝導率の実験値に対する計算値のかい離率である。横軸の平均温度は実験の上下温度の平均であり、計算式ではこの温度における空気の熱伝導率を用いている。実験値と計算値が各温度で非常に良く合っており、計算式の妥当性が確認できた。

#### 4-2. ケースと積層鋼板の接触部のモデル化

##### 4-2-1. モデル化概要

前章で説明したように、部品間には必ず空隙が発生し、熱が通りづらくなる。この部品間の熱の通りづらさは接触熱抵抗と呼ばれる指標で表される。ここでは、モーターケースと積層鋼板の接触熱抵抗のモデル化の例を示す。

一般的に用いられている接触熱コンダクタンス<sup>※</sup>を表す式である橋の式<sup>[1]</sup>を以下に示す。

$$K = \frac{1.7 \times 10^5}{\frac{\delta_1 + \delta_0}{\lambda_1} + \frac{\delta_2 + \delta_0}{\lambda_2}} \cdot \frac{0.6P}{H} + \frac{10^6 \lambda_f}{\delta_1 + \delta_2} \quad \cdots (2)$$

$K$ :接触熱コンダクタンス [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$\delta_{1,2}$ :各部品面粗さの最大高さ [μm]

$\delta_0$ :接触相当長さ (=23 [μm])

$\lambda_{1,2}$ :固体熱伝導率 [W/(m·K)]

$\lambda_f$ :流体熱伝導率 [W/(m·K)]

$P$ :接触圧力 [MPa]

$H$ :軟らかい方のビッカース硬度 [kg/mm<sup>2</sup>]

この式は部品の粗さや接触圧力などは考慮されているが、部品のうねりやそりなどは考慮されていない。この式の妥当性を確認するため、実験とCFDを実施し比較した。

※接触熱コンダクタンス:接触熱抵抗の逆数を面積で割った値であり、単位面積当たりの熱の通りやすさを示している。

##### 4-2-2. 妥当性確認

積層鋼板がはめられたケースに対し、周囲に熱量を与えるためのヒーターと断熱材で囲み、ケースと積層鋼板の温度差を測定する実験を行った(図6)。同時に、この実験を模擬したCFDを実施した(図7)。CFDでは、ケースと積層鋼板の接触部に接触熱抵抗を入れない場合(接触熱抵抗なし)、式(2)で算出した接触熱コンダクタンスを与えた場合(計算値)、ケースと積層鋼板の温度差が実験とおおよそ同じになるように同定した場合(同定値)の3ケース実施した。

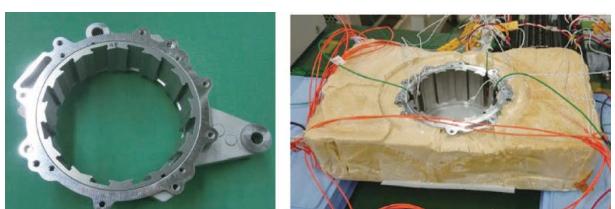


図6 試験状況(左:断熱材貼り付け前、右:断熱材貼り付け後)

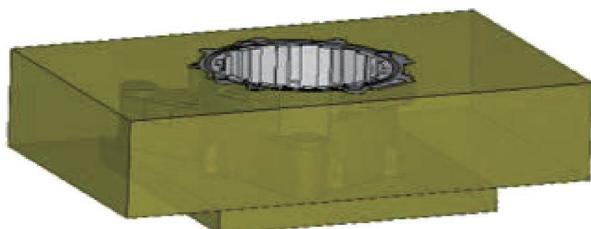


図7 CFD モデル

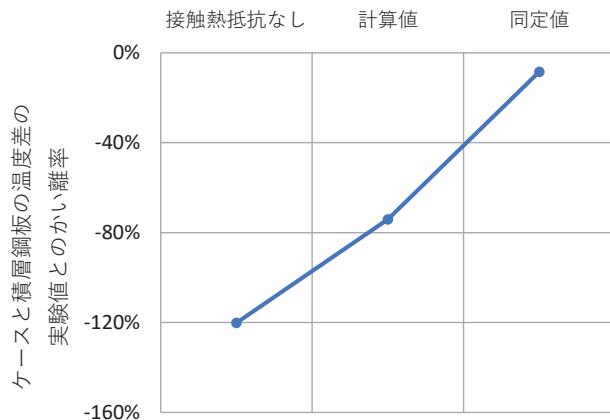


図8 ケースと積層鋼板の温度差の実験値に対するCFD値のかい離率

図8はケースと積層鋼板の温度差の実験値に対するCFD値のかい離率を示している。接觸熱抵抗なしに対し、計算値は実験値に近づいているが、実験値および同定値と比べかい離が大きいことが分かる。原因としては、式(2)のうねり等が考慮されていない点、ケースとのはめあい面である積層鋼板の積層面が図9のように段差になっており、接触面積が減少している点の2点が考えられる。式(2)の値を用いてCFDを行う場合、これらを考慮した補正が必要であり、図9の接触状況を基にした補正方法を現在検討中である。

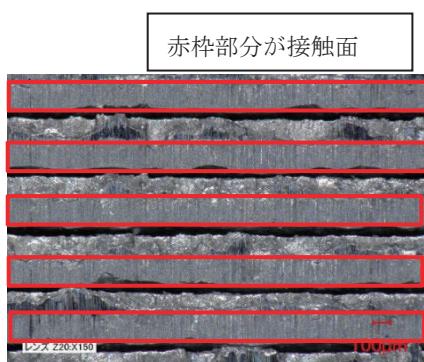


図9 積層鋼板の積層面の拡大画像

#### 4-3. モーター全体解析における寄与度確認

ここまででは、部品単体レベルであったが、モーター全体の解析にて、今回検討したモデル化を適用することでどれだけ精度が向上したかを確認した。

モーター全体での実験とそれを模擬したCFDを実施し比較した。今回はモーターの開発において主に熱の懸念となるコイル温度を比較した。CFDに関しては、表1のように積層鋼板のモデル化およびケースと積層鋼板接触部のモデル化について仕様をふった。

表1 CFD仕様

	CFD仕様				
	case1	case2	case3	case4	
積層鋼板のモデル化	積層未考慮	積層考慮 (計算値)			
ケースと積層鋼板接触部のモデル化	接觸熱抵抗なし	計算値	同定値		

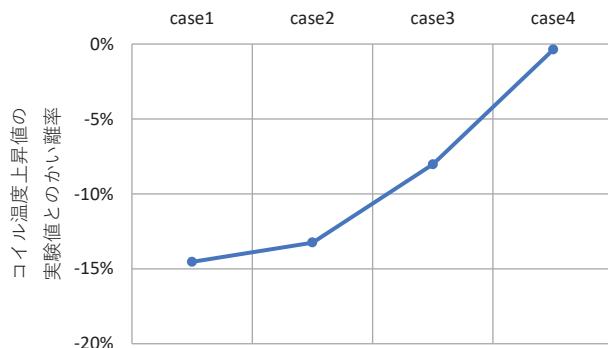


図10 コイル温度上昇値の実験値に対するCFD値のかい離率

図10はコイル温度上昇値の実験値に対するCFD値のかい離率を示している。各項目を見直すことでき実験値とのかい離は小さくなっている。case4の積層鋼板の等価熱伝導率の計算値とケースと積層鋼板接触部の接觸熱抵抗の同定値を用いることで、実験値にかなり近い値を得ることができた。また、case2からcase4に向けて実験値に大きく近づいていることから、ケースと積層鋼板接触部の接觸熱抵抗を正確な値に設定することが、温度予測精度の向上において重要な点であることが分かった。

## 5 おわりに

当社で構築しているモーター熱流体解析のモデル化手法について紹介した。

今回紹介した積層材のモデル化および接觸部のモデル化の見直しにより温度予測精度が大幅に向上した。

電動モビリティの開発が加速し、開発の中で求められる要求レベルが上がる中で、開発に役立つ解析手法を今後も構築していく。

## ■参考文献

- [1] 橋 藤雄:日本機械学会誌, 55-397, 102-107(1952)

■著者



山内 拓也  
Takuya Yamauchi

技術・研究本部  
技術開発統括部  
先進プロダクト開発部



石川 さとみ  
Satomi Ishikawa

技術・研究本部  
NV・技術戦略統括部  
新事業推進部



猪上 美佳  
Mika Inoue

技術・研究本部  
技術開発統括部  
先進プロダクト開発部



沖 秀樹  
Hideki Oki

技術・研究本部  
AM 開発統括部  
AM 第2技術部

# スマートファクトリー技術を用いた 設備の新予知保全

New predictive facility maintenance using smart factory technology

熊田 知也

## 要旨

モーターサイクル(以下、MC)を中心とした製造現場はスループット最大化を目指し、製造リードタイム短縮に取り組んでいる。直近の課題は、生産計画を阻害する突発的な設備故障を最小化することであり、特に長時間故障による製品供給停止リスク対策は最優先課題となっている。

一方で保全現場は、管理コストの点で故障の事象を把握することが困難になっている。その主な理由は、1ライン数十台の生産設備に保全管理用センサー追加の費用が必要で、費用対効果の面で導入優先順位が下がってしまうからである。

一方で昨今のスマートファクトリー技術(以下、SF技術)は、半導体の低価格化による廉価ストレージや画像解析などの出現で、工場エンジニアにとって使いやすく身近なものとなり、安価にソリューションを自前開発することを可能とした。これにより、センシング技術導入高コストの課題を解決することが期待されている。

こういったSF技術を従来のセンシング技術と組み合わせることで保全の課題を解決することについて検証した結果、十分な成果が実証されたため、本稿では「SF技術を用いた新たな予知保全の取り組み」について事例を紹介する。

## Abstract

Yamaha Motor continues to work toward shortening manufacturing lead times aiming to maximize the throughput at our manufacturing facilities - especially for motorcycles (hereinafter referred to as MC's). However, the immediate challenge is to minimize sudden equipment failures that hinder production plans. In particular, countermeasures against the risk of product supply stoppages due to long-term failures have become a top priority.

Meanwhile, on the maintenance side, it is becoming difficult to ascertain incidents due to management costs. The main reason for this is that it requires an additional cost to install sensors to dozens of pieces of production equipment for every line for maintenance and management purposes, which tends to be given lower priority due to the low cost-effectiveness.

However, with more affordable data storage options and image analysis capabilities thanks to the price reduction of semiconductors, smart factory technology ("SF technology") has become easier to use and more accessible for factory engineers in recent years, making it easier to develop low-budget solutions on their own. This is expected to help solve the high-cost issue with the implementation of sensing technology.

As a result of verifying that these SF technologies can be combined with conventional sensing technologies to solve maintenance issues, as sufficient results have been demonstrated, this paper introduces examples of a "new approach to predictive maintenance initiatives using SF technology."

## 1 はじめに

MCを中心とした製造工程は、鋳造から始まり、加工、塗装、組み立て工程など様々な設備が用いられており、長時間故障のリスク対応が課題となっている。

長時間故障の主な理由は、1つの不具合事象が様々な部位に転移し重症化することで、修理から確認に至るまでの総合的な処置が増えるためである。例えば、小さな亀裂から破断したときの被害の高額化、突貫補修のための工数確保、設備の調整ロス、製品品質の確認時間ロスなどがあり、これらのロスは一度に重複して発生するため、製造現場のスループットに大きく

影響を与えている。

今回の取り組みでは、SF技術で重症化前の不具合事象をとらえ、速やかに保全部門へ知らせ、対策を完了することを目指し、様々なセンシングデータの可視化と分析で保全アクションのスピードアップを検証することにした。活動対象は、エンジン製造工程のなかでも比較的長時間故障の多いアルミ加工職場のマシニングセンターを対象に進めることとした。

## 2 新しいデータ取得の必要性

故障データの従来の活用方法は、故障現象と件数データか

ら故障傾向をとらえる方法である。保全部門はこれを重点化管理に活用している。例えば1年間の故障データを設備ごとに層別することで設備の故障しやすさを明確にして、ある設備が生産能力を著しく低下させている場合には保全を手厚くするといった事例が挙げられる。しかしながらこの手法は、1つの原因から発生する複数の現象をとらえ管理対象とするため、管理工数が膨大となる側面を持っている。また、データが閾値から外れた状態のときにはすでに重症化てしまっていることから予防に至らないケースが多くある。これにより予防には重症化前の現象を定量化し、原因データと紐づけて取得することが有効と考えた。

以上から今回はセンシングデータ取得と、劣化具合(現象)と関係性の高い原因系のデータを自動取得しながら、保全職場に知らせる仕組みを検討することにした。

メリットは重症化前の現象データと原因データを紐づけて取得できるようになることで、今までわからなかった故障原因の関係性解明や、根本原因を見極めることができ再発防止にも活用できる。

その際闇雲にデータを取得してコストが増加することを防ぐため、過去のトラブルや成功知見から得られた対策項目を優先的にデータ取得していくこととする。分析は統計的視点で整理することで目的を明確化できると考え、現象のデータを目的変数、原因のデータを説明変数と位置付けて行う。

### 3 事例：加工マシニングセンター リニアガイド長時間故障

#### 3-1. 故障現象

前述した内容を検証するために加工マシニングセンターの重点部品リニアガイド故障の生産ロスについて、現象と原因を洗い出すことにした。調査した結果、保全費用は部品費が1設備あたり150万円で、復旧時間は1,440分(ライン停止3日間)かかることが判明した。また不具合の初期段階でガタが発生し、製品の精度不良につながり、調整作業ロスも発生している。

次に故障現象を観察することにした。その結果、故障品すべてのエンドプレートが外側に変形しており、リニアガイド内側から何らかの力が加わってガタや動作不良につながっていることがわかった。さらにリニアガイドの動作原理を調査すると、内部循環しているボールを覆う潤滑油が正常に作用すればエンドプレートには大きな力が加わらないことが確認できた。さらに故障部品の分解調査をすると、エンドプレート付近でボールが内部循環されずに止まっていることも確認できた(図1参考)。



図1 リニアガイド重症化現象

#### 3-2. 故障に至る仮説

リニアガイド動作中に加工用の水溶性クーラントと細かなアルミ切粉が摺動隙間から内部へ入り込み、潤滑油が汚れたり、洗い流されたりする。これによりボールのころがり抵抗が上昇したことで動きが鈍り、リニアガイド本体が移動する力との反力をプレートを押し出したと考えられる。

長時間故障を防ぐための現状の対策は図2の仮説フローより潤滑油とエンドプレートの目視点検である。

この仮説をもとに予知予防の保全を実現するためには、原因となる潤滑油の状態データ(説明変数)と被害を最小限にするためのエンドプレート変形データ(目的変数)のそれぞれを定量化して紐づけし、リアルタイム閾値監視することが必要であると考えた。さらに、これらのデータを保全マンの良否判断基準と照合し、人判断のバラつきを無くすために、判断閾値の定量化が必要となる。故障が重症化せずに復旧できる状態で保全部門がすぐにアクションできれば、長時間故障、管理工数を削減できる。この仮説検証の取り組みについて次章以降で述べる。

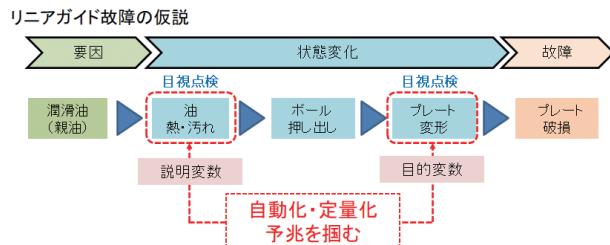


図2 リニアガイド故障メカニズム(仮説)

### 4 解決手段の検討

#### 4-1. 画像解析による外観・官能検査の定量化

##### (油の汚染度定量化)

仮説検証の対象を加工マシニングセンターに設定し、既存設備(50台)への監視展開方法の検討を実施した。最初に加工機のリニアガイドに供給されている潤滑油の状態データの定量化に着手した。

従来、潤滑油の一般的な汚染度評価は2つあり、1つ目はセンシング技術を利用し高精度で高速処理が可能なコンタミ用

センサーなどを利用する方法、2つ目は現物とサンプルとの比較を人が官能検査する方法である。

前者のセンシングは、高い精度で数値出力が得られるメリットがある。一方で明確な閾値がないと、根拠が無いゆえに個人差による判断のバラつきが出て管理・初動が難しくなる。また、精密分析用のため部品代が高額で、横展開スピードの制約となる。さらに既存設備の潤滑油タンクは一般品で構成されていることから、センサー機能を取り付けるには大がかりな工事がともなってしまい、コストが高騰しROI(Return On Investment)が成立しないことが分かった。

同様に後者の官能検査による手法を3つの視点(①SF技術で置き換えられるか、②明確な閾値が引けるか、③低コストが実現できるか)で検討した。従来の潤滑油状態確認は、人による目視によって行われ、油量と色相の良否判断をタンクの点検窓から実施している。サンプル比較は点検対象の状態をダイレクトに認知・判断することで良否判定が容易なメリットがある。課題は、いかに高い精度で測定し判断のバラつきを少なくするかである。課題解決手法として我々は画像解析に着目し、撮影画像の色相を数値化するテストを行った。その結果、撮影画像の中から油部分だけ切り出すことで色相数値を安定して出力できることが検証できた。また画像のトリミングを工夫することで反射光などのノイズを除去でき、閾値を明確に設定することが可能となる。

カメラの選定については、設置レイアウト、照明を工夫することで、普及価格帯のカメラによる撮影画像で安定した解析を廉価に実現した。また画像処理は3万円程度の廉価PCをネットワーク上に配置し、処理のタイムスケジュールを工夫することで、システムパッケージとしても大幅なコストダウンが可能となった(外作比 約1/10)。

設備改造費に関しても、タンクの点検窓にカメラを設置するのみで大きな改造は不要である。以上より、手の内化したSF技術によって設備不具合検出と効率的な横展開の両面を進めることが可能と判断した。

次に画像処理による具体的な検査手法を検討することにした。まず実際の油の良否判定について、画像処理技術でどこまで定量化できるかを検証することにした。当社加工工場の加工機の作動油と潤滑油は大半がセミクローズの循環回路で使われ、また加工用切削油の約9割以上が水溶性であることから、水分の侵入によって劣化がおきると考えられている。そして油に水分が浸入すると白濁などの濁り現象が発生することも分かっている(図3)。

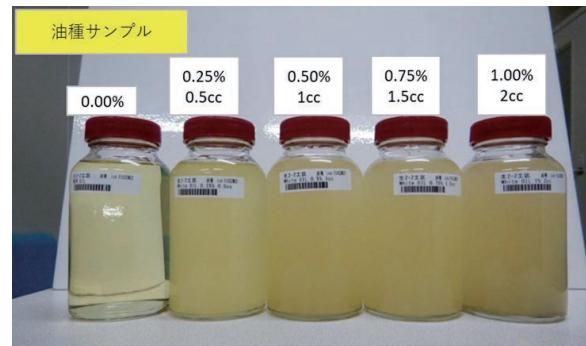


図3 油の白濁現象

油劣化の基礎データを取得するため、油中の水分含有量0%から1.0%の油サンプルをつくり目視で確認した。その結果、含有量と同様に色相が変化し濁りが目視でも認識できた。また、この濁りの代用特性として輝度値を選択し調査したところ、水分含有量との相関があることが分かった。さらにRGBカラーモデルで解析するとグリーンが強く反応していることがわかったため、グリーン色相の輝度値をみるとことで、およそその水分含有量のレベリングができると判断した。

水分含有量の測定範囲は、油圧ポンプのシャフトの破損を重症化と定義し、その予兆として現れるキャビテーション現象がとらえられる範囲にした。キャビテーションは過去の知見から水分含有量1%で起きることが分かっている。よって正常値を0%から上限1.0%と定め測定範囲と決めた。その試験サンプル数種類を測定した結果、0.5%から1%の範囲では輝度値が線形に近い形で現れた(図4)。

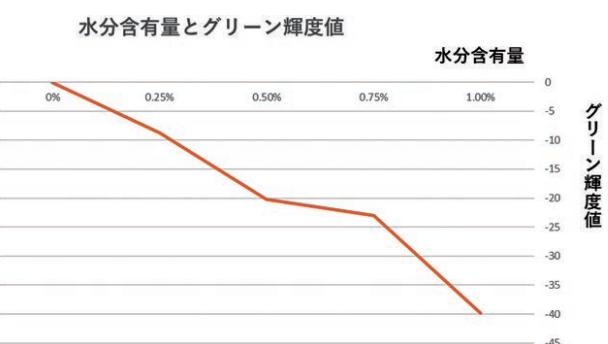


図4 水分を含んだ油輝度値推移(縦軸:グリーン輝度値)

これらのことから仮に0.75%の時点でお知らせを可能にすれば、油の異常を予防することは十分可能であると判断した。フィールドテストによって、センサーと比較しても遜色ない結果が得られた。

油の画像検査をすることで従来の油汚染度点検とポンプのキャビテーション点検(異常音の点検)の工数も削減できることが検証できた。

#### 4-2. 破損・変形の定量化(エンドプレート)

次にリニアガイドの不具合状態を把握する代用特性となるプレートの変形を定量化する手法を検討する。従来のセンシング手法は、設備内狭所への取り付けが困難などの課題があり安定的なデータ取得ができなかった。一方で経験のある人による点検の場合は、エンドプレートが浮いている状態など、一目で即座に異常と判断することができる。さらにカメラの設置の制約も少なく、安価に取り付けが可能であったため、カメラによる撮影画像を解析し不具合を検知する方法を検討することにした。

具体的な手法は、廉価なマイコンに接続されたカメラが内部プログラムによってリニアガイドを上方から自動撮影し、画像解析から形状変化の特徴を監視することでエンドプレートの変形、位置ズレを数値化することとした。

画像解析の方法は、撮影されたリニアガイドの大きさと画素数から計算する。写真の中には解析対象外のものも映り込んでいるため、画像からレールとブロックの境目の位置を正確に識別する前処理方法を始めに検討した。

形状や輪郭、特徴を捉えるための画像解析の一般的手段は二値化処理である。この処理は、白と黒の2色に変換し輪郭をとらえることができる。今回のリニアガイドの構成部品であるブロックとレールの境目を毎回二値化すればその変化からエンドプレートの変形を定量化することができると考えた。

二値化処理を進めるにあたり色相の閾値を決めることが課題となった。具体的には閾値に重要な要素は輝度値であったため複数の画像を解析した結果、撮影条件によって大きな誤差が生じていた。これは工場環境、季節や時間帯での明るさのバラつきが、撮影したリニアガイドの色相に影響を及ぼしているということが原因であった。加えて、この輝度値のバラつきは160～200の範囲であることも検証できた(図5)。



図5 リニアガイド撮影サンプル

この基礎データをもとに、レールとブロックの二値化処理において最も光の反射影響が少ない輝度値を調査し、180を最適な設定値として設定した。

以上より、撮影写真を輝度値180に予備補正する前処理プログラムをつくり、その後二値化するフローを採用した。

撮影画像の輝度値が安定したところで、実戦形式で加工中サイクルでの写真撮影、二値化処理を試みた結果、設備内部での反射光が影響して、不定期に計測誤差を生じてしまう現象が観測された。この現象は不規則な発生のため、除去するのは困難である。従って、新たに不要な光の映り込みを除去する手法を考え、二値化処理の領域を処理する手法を取り入れた。領域処理の手法は面積の大きさや幅、高さに応じた画像を選択し処理する方法である(図6)。

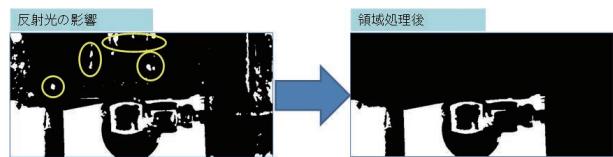


図6 画像二値化と領域処理

このような前処理フローを開発することで検出したい境界を安定的に検出することに成功し、画像のみで境界のズレ量の計測が可能になった。

また、検査結果の説明性、視認性を向上させる工夫として、元の撮影画像に処理結果の線を加え画像処理の位置を明確にした(図7)。

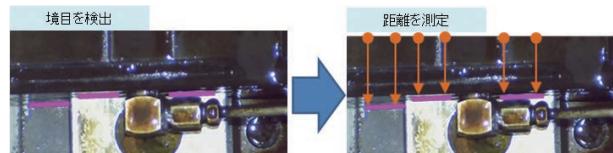


図7 画像からの位置測定

## 5 新保全方式

### 5-1. 目的変数と説明変数の監視

今回の分析の目的は保全のアクションを早めることであり、故障状況のデータを目的変数、原因のデータを説明変数と位置付けて手法開発を進めた。前述のリニアガイドの事例を例にとると、4.1で述べた油の吐出量と汚染度を説明変数と考え、4.2で述べたエンドプレートの変形は目的変数と考える。

従来の保全の分析方法は、油の定期交換が正常に行われていることを前提に、リニアガイドの破損をデータ化していたため、人のバラつきや外乱の影響が分からず迷宮化することがしばしばあった。これに対し常に説明変数を監視し、目的変数と紐づけることで真の原因とそのバラつきがわかり、次の対応を決めることができる(図8)。また、画像による事象のわかりやすさだけでなく、定量化できたことで統計的な重回帰分析などに

活用できるようになる。これによりプロセスが可視化され管理レベルが上がることで、重症化する前に手が打てるごとや、データの監視をサイクル化することで、設備状態への影響度を監視し、生産を止めることなく保全活動に繋げることができると考えた。



図8 故障の目的変数と説明変数と関連図

## 5-2. 保全計画

従来の保全計画は、担当者の経験や感覚に頼った内容で計画立案され、余裕を持たせた計画になっていた。これに対し今回は演算処理装置をネットワーク上に置くことで、事実に基づいた結果を保全部門が認知でき、根拠の高い保全計画の立案が可能になる。

この内容を保全部門の事務所で監視できるようすることで、最適な保全サイクルの実現が可能となる。

また、今回の画像処理アルゴリズムの構築にはノード型プログラムを採用しており、プログラムの可読性も高く現場に実装しやすくなっている。このノード型プログラムのおかげで、設備の設置環境にあった様々なチューニング作業がGUI(Graphical User Interface)環境で調整が容易にでき、誰でも高度なプログラミング知識不要で習得が可能となる(図9)。

## 6 まとめ

今回の取り組みでは、一般的に外部委託すると高額となる展開コストの制約を手の内化したSF技術により解決できた。これにより人にしかできない作業に対する価値が見直され、そのなかで最も重要な保全作業の予知・復元にリソースを集中できるようになった。

今回画像処理を採用したことでの設備異常の予兆の見極めが容易になり、確認作業や追加点検作業が減り、保全管理工数の削減も実現できた。

さらに保全部門の従来のプロセスに対し、多様なデータを可視化することで事実に基づいた行動に変えることができ、納得したアクションをともなうPDCA(Plan-Do-Check-Act)サイクルのスピードアップが実現した。そして、保全の管理改善と同時に意識改革ができたことは大きな収穫と考える。

### ■著者



熊田 知也

Tomoya Kumada

生産技術本部

設備技術部

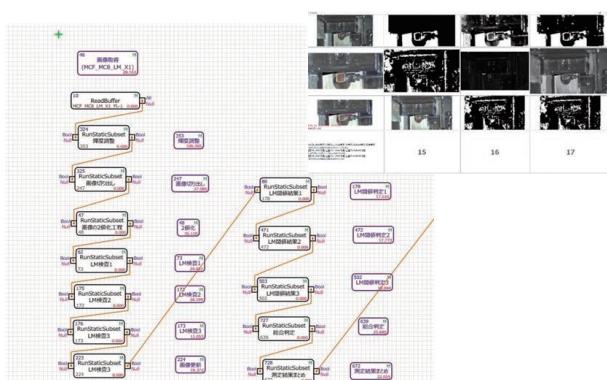


図9 ノード型プログラムと画像処理補正の流れ

# Development of Resin Coated Piston suitable for Monolithic Cylinders made of Hypereutectic Al-Si Alloy

Keita Watanabe Hirotaka Kurita

当論文は、JSAE 20229010/SAE 2022-32-0010として、SETC2022 (Small Powertrains and Energy Systems Technology Conference)にて発表されたものです。

Reprinted with permission Copyright © 2022 SAE Japan and Copyright © 2022 SAE INTERNATIONAL  
(Further use or distribution is not permitted without permission from SAE.)

## 要旨

DiASil® シリンダに適合すべく、より高い耐久性を有する樹脂コートピストンを開発した。樹脂材料は従来よりも低温で架橋が促進されるよう改良され、ピストンの過時効を抑制しつつ、摩擦摩耗特性を改善した。またピストンスカート上に深い条痕形状を与えることで、シリンダとの焼付きを大幅に遅延させた。最後に、焼付きへの影響因子と深条痕の樹脂コート印刷性について考察した。

## Abstract

This study focuses on improving durability of the resin coated piston developed especially for the monolithic cylinder made of a hypereutectic Al-Si alloy, so-called DiASil®. The newly developed resin was designed to be cured at a relatively low temperature considering over-aging of a piston and confirmed that it exhibited a lower friction coefficient compared to an existing resin coating. Furthermore, pistons of which skirts had various depth and pitch of grooves filled with the resin coating were offered to evaluate wear and seizure characteristics. The results showed deeper grooves on piston skirts were remarkably effective to delay a seizure. All the seizures were triggered when the ratio of Al substrate exposed to the sliding surface reached up to 60-80%, which implied it can be the empirical criteria for a seizure. Therefore, it can be considered the seizure does not occur as long as adequate resin coating remained in the grooves. Finally, influential factors for the seizure and printability of deep grooves were discussed.

## 1

## INTRODUCTION

In recent years, growing environmental concerns have encouraged the automotive industry to develop an engine with superior fuel economy. Reducing friction losses is recognized one of effective approaches to save energy. Especially, the friction loss derived from sliding resistance between a piston equipped with piston rings and a cylinder bore has attracted great attention since it is considered 45% of friction losses among all the engine components is attributed to the piston assembly<sup>[1]</sup>. By covering piston skirts with a resin material including solid lubricants, the friction loss between the piston and the cylinder can be reduced, so the resin coating technology has been widely used in the automotive sector.

A monolithic cylinder, so-called DiASil® (hereafter DiASil), is made of a hypereutectic Al-Si alloy so that primary Si particles with high hardness can appear on the cylinder bore surface<sup>[2]</sup>. Those particles play a key role to improve resistance against wear and seizure without a cast iron sleeve<sup>[3]</sup>. Owing to the sleeveless design, it can realize excellent heat dissipation and lightweight. On the other hands, DiASil cylinder has made it difficult to utilize a resin coated piston because conventional resin coatings can be easily worn out in short term by sliding against the bore surface exposing hard Si particles. Dissipation of the resin coating incurs not only deterioration of fuel efficiency but also a risk of the seizure between the piston skirt and the cylinder bore at the worst case. Therefore, hard Fe plating instead of resin coating have

been used on the piston skirt mating with DiASil cylinder so far.

From this kind of backgrounds, the authors developed a resin coated piston suitable for DiASil cylinder in the previous work<sup>[4]</sup>. The piston skirts were coated with a polyamide imide resin including newly blended solid lubricants and hard fillers to achieve a good balance between low friction and high anti-wear property. Additionally, uniform coating thickness up to 20μm was enabled in a single screen-printing process so as to extend the coating lifetime. However, higher durability of the resin coated piston is still required because the sliding condition between the piston skirt and the cylinder bore has been increasingly becoming more severe due to recent engine features such as a high compression ratio and a low viscosity oil. Thus, this study is aimed to improve durability of the resin coated piston furthermore by means of novel approaches focusing on cross-linked structures in the resin material and a geometry of the piston skirt surface.

## 2 EXPERIMENTAL

### 2-1. Cross-linked structure firmness of new resin

The coating material developed in the previous report<sup>[4]</sup> was mainly composed of solid lubricants, hard fillers, polyamide imide as a binder and N-methyl-2-pyrrolidone as a solvent, which is hereafter referred to as “existing material”. Polyamide imide is one of super engineering plastics and well known as a preferable coating material for the piston skirt. Although it is recommended to be cured at 230°C or above, curing at a lower temperature is likely to be carried out in a practical process since higher temperature over 200°C may cause undesirable over-aging of the piston alloy. Curing at lower temperature results in incomplete cross-linked structures of polyamide imide, which will prevent it from fully demonstrating the potential. To clear way for this problem, a new resin has been modified to be cured completely at a temperature lower than that in the piston aging process. This new material with modified resin is hereafter called as “modified material”.

Firstly, a test to evaluate firmness of the cross-linked structures in polyamide imide was conducted. Pistons having the diameter of 52.4mm and the height of 31mm were prepared and all of them were weighted before coating. This weight is referred to as  $W_1$ . The existing and modified material was screen-printed on the piston skirts respectively followed by curing at 190°C, 200°C or 210°C for 30 minutes in an electrical oven. The typical appearance after curing is shown in Figure 1. Each piston was again weighted here, and this weight is referred to as  $W_2$  representing the weight of the piston with the coating. Subsequently, the pistons were immersed in N-methyl-2-pyrrolidone, which is the solvent for these materials, at ambient temperature for 2 hours followed by heating at 180°C for 60 minutes to dry up the solvent completely. Incomplete cross-linked structures are expected to dissolve out through these processes, resulting a weight loss of the coating. Thus, third weight measurement was carried out after this treatment, and it is referred to as  $W_3$ . The percentage of the resin which did not dissolve during the immersion,  $R_{rem}$ , is calculated by Equation (1). This value is considered as an indicator of the firmness of the cross-linked structures. Each test was conducted 3 times.

$$R_{rem} = \left( 1 - \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \right) \times 100 [\%] \quad (1)$$

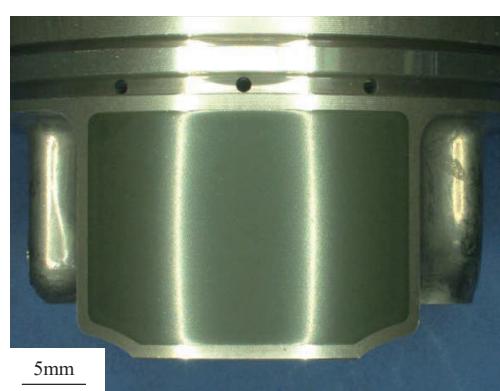
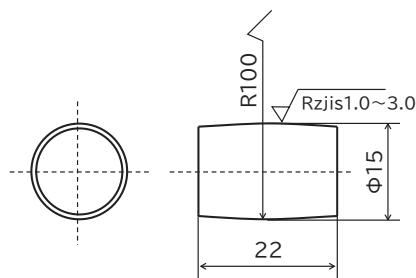


Fig. 1 Appearance of test piston

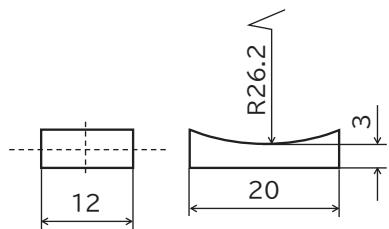
### 2-2. Frictional characteristic of new resin

Secondly, frictional characteristics were evaluated by using SRV tester from Optimol Instruments Prüftechnik GmbH. Barrel-shaped test specimens as shown in Figure

2 (a) were prepared from a continuous cast bar used for a forged piston production. This is Al-12wt%Si-4Cu-1Mg alloy including small amount of other alloying elements and given T7 heat treatment. These test specimens were spray-coated with either existing or modified material followed by curing at 200°C for 30 minutes. The coating thicknesses were measured by an eddy current thickness meter, which ensured those of all the test specimens were approximately 15µm. Test specimens whose geometry is described in Figure 2 (b) were also prepared from an actual DiASil cylinder block made of Al-17wt%Si-4.5Cu-0.5Mg alloy including small amount of other alloying elements and given T5 heat treatment. As can be seen from Figure 3, the curved surface remained in a state of the actual cylinder bore where a cross-hatched pattern was induced by a honing process as shown in Figure 4.

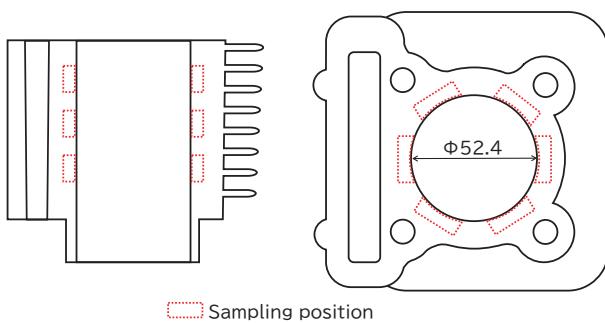


**(a) Barrel-shaped test specimen**

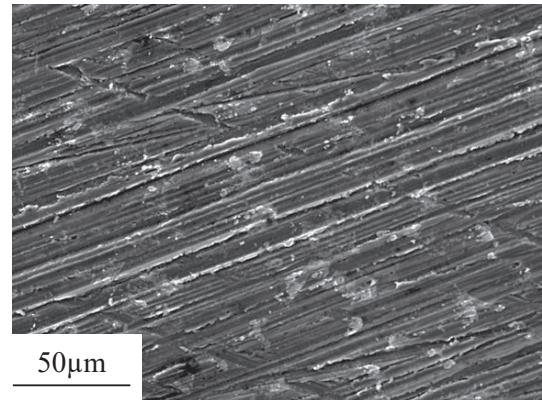


**(b) Cylinder test specimen**

**Fig. 2 Geometry of test specimen for SRV test**

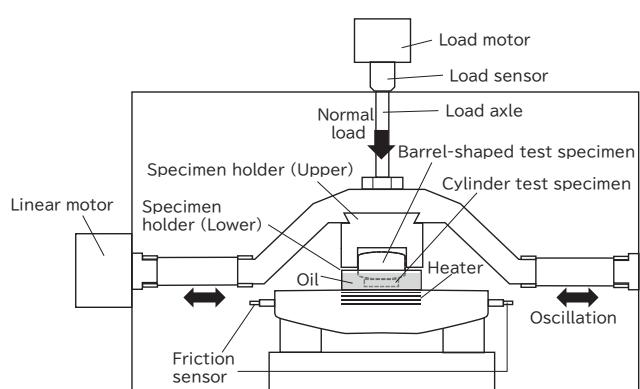


**Fig. 3 Sampling position of cylinder test specimen**

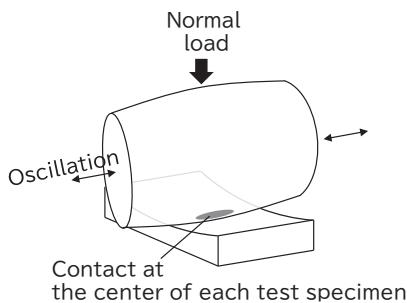


**Fig. 4 Morphology of DiASil cylinder bore**

Figure 5 shows a schematic illustration of SRV tester. The barrel-shaped test specimen and the cylinder test specimen were installed onto the upper and lower specimen holders respectively which were designed to make each test specimen contact at the center of them as described in Figure 6. A normal load was applied through a loading system consisting of a servo motor and a ball screw shown as "load motor" in Figure 5. A horizontal reciprocating motion was provided by a linear motor. The lower specimen holder was filled with oil enough to entirely immerse the contact area between each test specimen. The setting temperature was adjusted so that the contact area could be held at 200°C. During the test, the normal load, horizontal load and friction coefficient were monitored by the equipped sensors. Detailed test conditions are summarized in Table 1. Each test was conducted 3 times.



**Fig. 5 Schematic illustration of SRV test**



**Fig. 6 Contact area between test specimens**

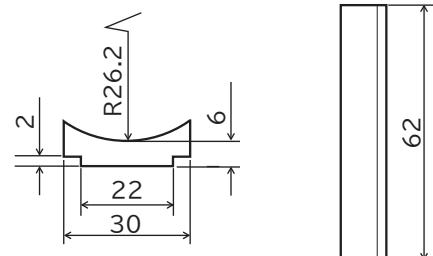
**Table 1 Detailed condition of SRV test**

Normal load	30N
Frequency	10Hz
Stroke	1mm
Oil	SAE 10W-40
Lubrication condition	Immersion
Test duration	1800s

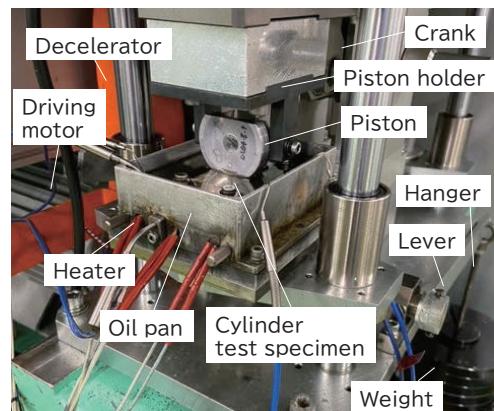
### 2-3. Wear and seizure characteristic of piston skirt with various surface geometry

Actual pistons having various surface geometries were prepared for this test. The surface geometry in detail is described in the next section. The skirts of the piston were machined according to several conditions before coating. Subsequently, the pistons were screen-printed with the existing material followed by curing at 200°C for 30 minutes. The printing parameters were adjusted so that the grooves on the piston skirts could be filled with the coating material adequately. DiASil cylinder mentioned above was also used for this test and cut into a geometry shown in Figure 7. The curved surface still remained in a honed state as well as the test specimen used in SRV test. A reciprocating slide tester as shown in Figure 8 was used to evaluate wear and seizure characteristics of the pistons with various surface geometries. The piston was attached to the piston holder through the horizontally placed pin. It can rotate around and slide along the pin so that the piston can have self-centering mechanism along with the curvature of the cylinder test specimen. The cylinder test specimen was fixed in the pan in which cartridge heaters were inserted and oil was pooled adequately enough to entirely immerse the sliding interface. The piston holder can be reciprocated by rotation of the crank connected to the

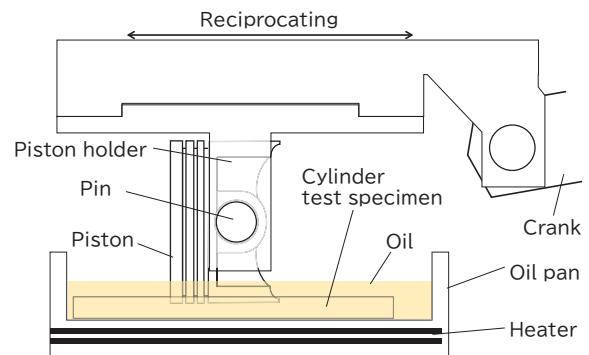
driving motor through the decelerator. The cylinder test specimen was lifted up and pressed against the piston skirt by putting weights on the hanger connected to the pan through the link mechanism. A side view of the reciprocating slide tester is schematically illustrated in Figure 9. The test was stopped at certain intervals to observe a state of the piston skirt surface by an optical microscope and SEM, and then continued until a seizure occurred. The timing of the seizure was detected by an abnormal behavior of the tester such as increasing noise and/or visible oil turbidity (blackening). The detailed test conditions are shown in Table 2.



**Fig. 7 Geometry of cylinder test specimen**



**Fig. 8 Reciprocating slide tester**



**Fig. 9 Schematic illustration of side view**

Table 2 Detailed condition of reciprocating slide test

Normal load	100kgf
Crank rotation speed	217rpm
Stroke	20mm
Oil	ISO VG10
Oil temperature	140°C
Lubricant condition	Immersion

## 2-4. Definition of surface geometry

A geometry of the piston skirt surface is defined by a curvature of a tip of a turning tool ( $R$ ) and a pitch of a lathe turning ( $f$ ). The tip of the turning tool is shown in Figure 10. Figure 11 shows a description of a turning process for a piston skirt. The relationship among the surface geometry,  $R$  and  $f$  is shown in Figure 12. The theoretical surface geometry is determined by following equations.

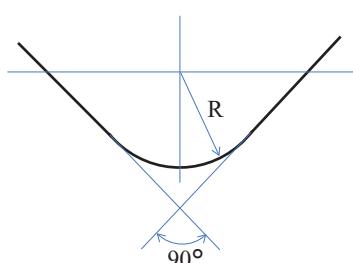


Fig.10 Tip shape of turning tool

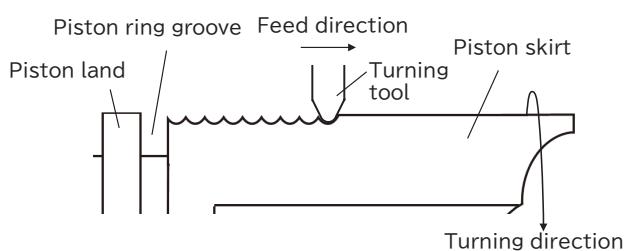
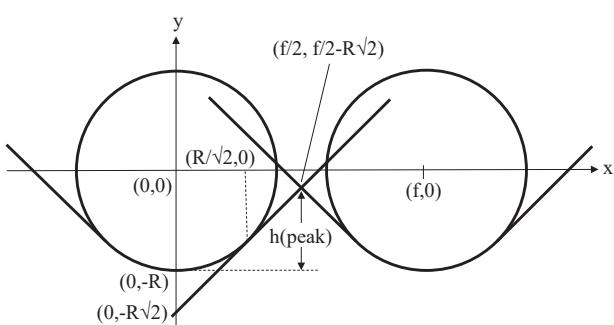


Fig. 11 Description of turning process


 Fig. 12 Surface geometry as function of  $R$  and  $f$ 

In the case of  $R / \sqrt{2} \leq f / 2$ ,

$$h(\text{peak}) = f / 2 + (1 - \sqrt{2})R \quad (2)$$

In the range of  $0 \leq x \leq R / \sqrt{2}$ ,

$$y = -\sqrt{(R^2 - x^2)} \quad (3)$$

$$h = R - \sqrt{(R^2 - x^2)} \quad (4)$$

In the range of  $R / \sqrt{2} \leq x \leq f / 2$ ,

$$y = x - \sqrt{2}R \quad (5)$$

$$h = x + (1 - \sqrt{2})R \quad (6)$$

In both ranges,

$$t_p = (f / 2 - x) / (f / 2) \quad (7)$$

In the case of  $0 \leq f / 2 \leq R / \sqrt{2}$ ,

$$h(\text{peak}) = f / 2 + (1 - \sqrt{2})R \quad (8)$$

$$y = -\sqrt{(R^2 - x^2)} \quad (9)$$

$$h = R - \sqrt{(R^2 - x^2)} \quad (10)$$

$$t_p = (f / 2 - x) / (f / 2) \quad (11)$$

Here,

$h(\text{peak})$ : peak height of the geometry

$h$ : height of the geometry

$t_p$ : bearing ratio of Al substrate

A bearing ratio of the Al substrate,  $t_p$ , indicates how much percentage the Al substrate accounts for at a certain height as illustrated in Figure 13. Thus, it can be also described by Equation (12).

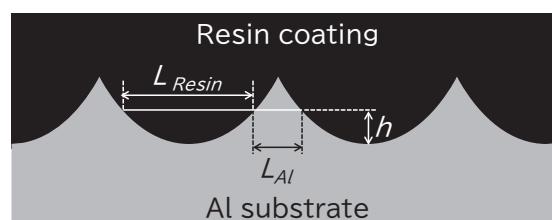


Fig. 13 Parameter description for bearing ratio

$$t_p = L_{Al} / (L_{Al} + L_{Resin}) \quad (12)$$

In this paper, the several surface geometries on the piston skirt were prepared with changing the values of  $R$  and  $f$  as shown in Table 3. Figure 14 shows theoretical geometries of various specifications.

Table 3 Parameter for each surface geometry

	R / mm	f / mm
Rz2Sm150	1.50	0.15
Rz12Sm100	0.10	0.10
Rz18Sm120	0.10	0.12
Rz18Sm260	0.46	0.26
Rz25Sm140	0.10	0.14

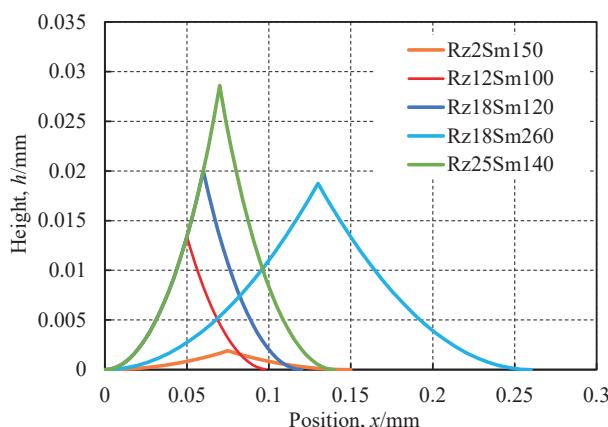


Fig. 14 Theoretical surface geometry

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 3-1. Characteristic of developed coating

The percentages of undissolved resin,  $R_{rem}$ , based on Equation (1) are presented in Figure 15. Each bar chart shows the average value of the 3 measurement results.  $R_{rem}$  of the existing material increased as the curing temperature raises. However, there is a significant divergence from complete firmness even cured at 210°C. The modified material had the higher value compared to the existing material under any curing conditions and it reached 100% by curing at 200°C and 210°C. This result suggests the modified material is easily encouraged to form the strong cross-linked structures even at a relatively low temperature.

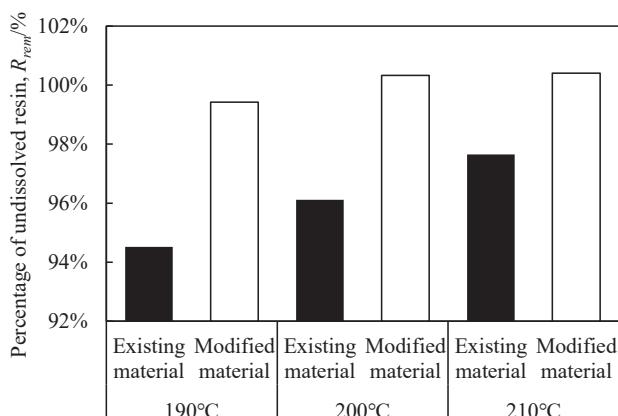
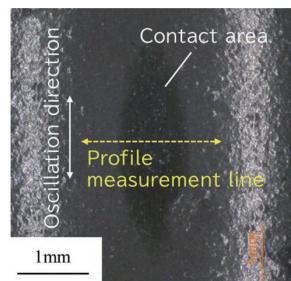
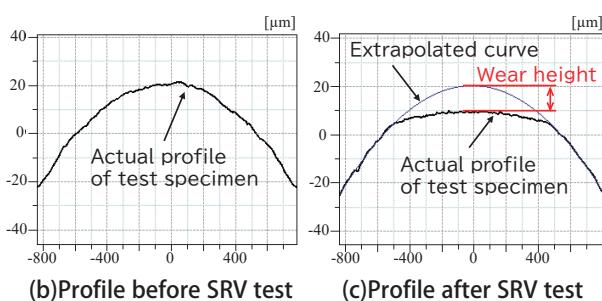


Fig. 15 Percentage of undissolved resin

Figure 16 shows a typical appearance of the barrel-shaped test specimen after SRV test and profiles before and after the test measured by a contact profilometer. The wear height,  $h_{wear}$ , was defined as a gap between a profile before the test and the one after the test. For measurement of wear height, a curve extrapolated from a profile of non-contact area was used instead of an actually measured profile as an initial shape of the test specimen since it was challenging to completely match the measurement points before and after the test. The average wear heights of each material are shown in Figure 17. The value of modified material was around 25% lower than that of the existing material. The change in the friction coefficient,  $\mu$ , during the test is shown in Figure 18. The friction coefficient of the modified material seems to be more stable than that of the existing material. A polyamide imide takes on a role of holding the additives such as solid lubricants and hard fillers. The modified polyamide imide may prevent these additives from dropping out easily and enable these additives to fully exert their functions during sliding. From these results, it can be considered the increase of the strong cross-linked structure in the resin coating could improve not only wear resistance but also friction coefficient stability.



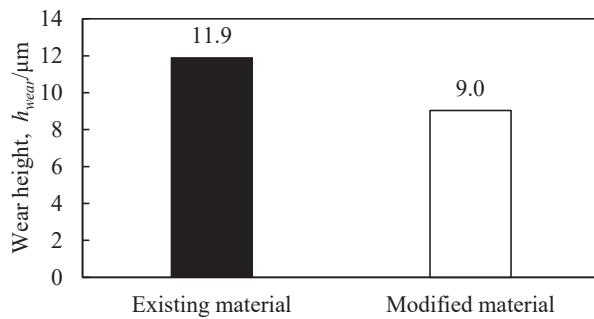
(a) Appearance after SRV test



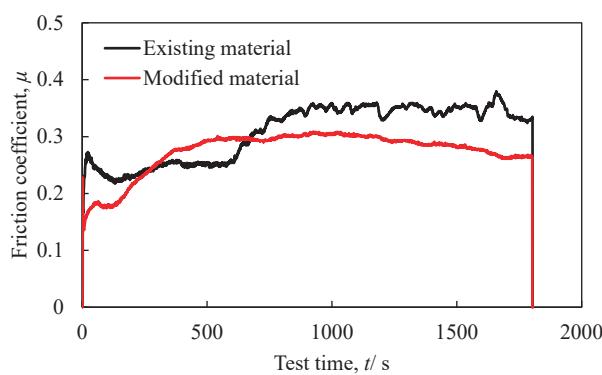
(b) Profile before SRV test

(c) Profile after SRV test

**Fig. 16 Typical appearance and profile of barrel-shaped test specimen and definition of wear height**



**Fig. 17 Wear height after SRV test**



**Fig. 18 Friction coefficient during SRV test**

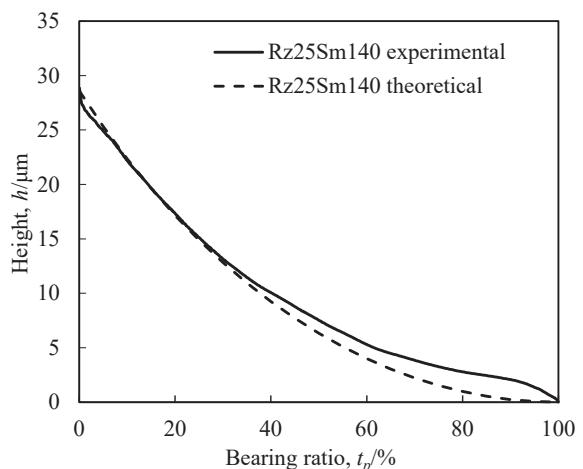
### 3-2. Comparison of piston surface geometry between theoretical and experimental result

The surface roughness parameters,  $Rz_{jis}$  and  $Sm$ , of the piston skirts after machined (before coating) under the

conditions listed in Table 3 were measured at the center of the skirt along the piston height direction as presented in Table 4. The representative of actually measured bearing curves is described with theoretical one derived from Equation (2)-(11) in Figure 19. It is found the experimentally measured curve shows a good agreement with the theoretical curve.

**Table 4 Measurement result of surface roughness**

	Experimental result	
	$Rz_{jis}$ / $\mu\text{m}$	$Sm$ / $\mu\text{m}$
Rz2Sm150	1.5	120.6
Rz12Sm100	11.9	100.1
Rz18Sm120	19.1	120.4
Rz18Sm260	19.1	260.1
Rz25Sm140	25.2	140.2

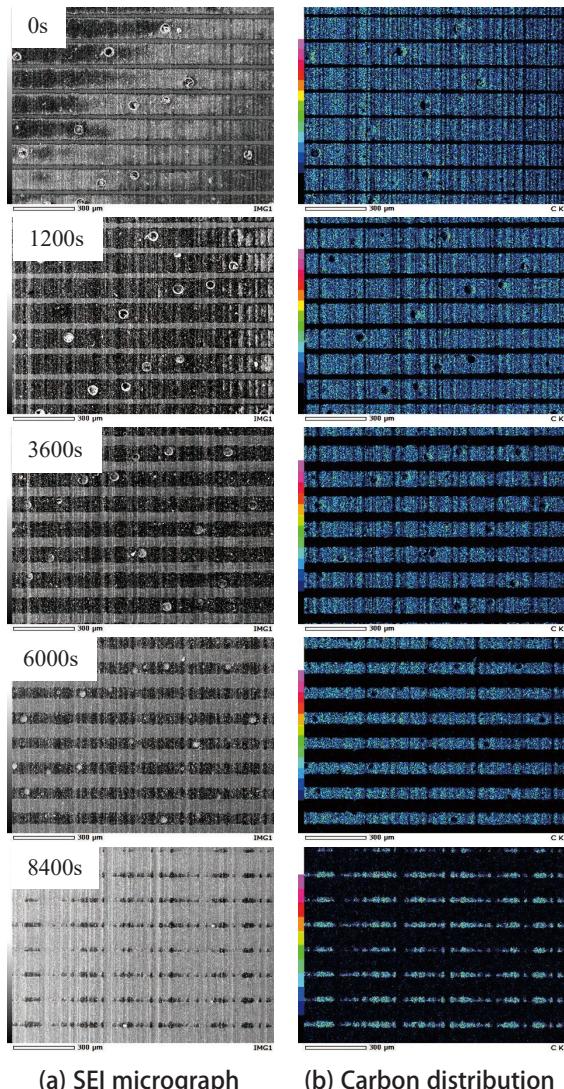


**Fig. 19 Comparison between theoretical and experimental bearing curve**

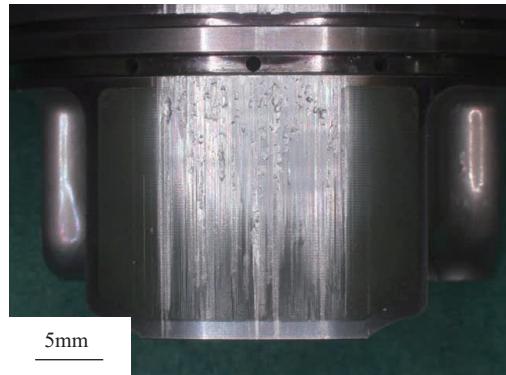
### 3-3. Effect of piston skirt surface geometry on wear and seizure property

The effect of the piston skirt geometry on the wear and seizure property was investigated using the reciprocating slide tester. A typical morphological transition of the skirt surface during the test is shown in Figure 20 obtained from Rz18Sm120 specimen. The pictures in left side are secondary electron image micrographs and the right ones present carbon distribution analyzed by an energy dispersive X-ray spectroscopy. Comparing these pairs, it can be seen that there is a striped pattern consisting of the Al substrate and the resin coating. Prior to this evaluation, each piston skirt surface was initially run in

until the Al substrate was slightly exposed to the sliding surface. Therefore, the Al substrate could be preliminarily observed at the beginning of the test (0 second). In addition, this pretreatment served to smoothen and conform the surface roughness among the various surface specifications. As the wear of the piston skirt surface proceeded, the area of the Al substrate gradually spread in the sliding direction while that of the resin coating complementarily diminished, finally leading a seizure at 9900 seconds as shown Figure 21. It is worth noting that the seizure did not take place until 9900 seconds even though the Al substrate was already exposed to the sliding interface in the early stages. Similar phenomena were found in the tests of the other skirt surface geometries.



**Fig. 20 Typical morphology transition of skirt surface**



**Fig. 21 Appearance of seizure at 9900 seconds**

According to Equation (12), the bearing ratios of the exposed Al substrate of each piston skirt surface were measured by an image analysis of the SEI micrographs, and the value was used as an indicator of the wear of the piston skirt geometry. That is to say, the bearing ratio of the Al substrate reaching 100% indicates the grooves accommodating resin coating have been worn out and the surface has consisted of the only Al substrate. The relationships between the bearing ratio of the Al substrate of each piston skirt geometry and the test time are shown in Figure 22. As mentioned above, each piston skirt surface was run in until the Al substrate was slightly exposed to the sliding surface in advance. Therefore, the each bearing ratio of the Al substrate had different values at the beginning of the test (0 second). As can be seen from Figure 22, there seems to be proportional relationships between the bearing ratio of the Al substrate and the test time in every case. Additionally, the slopes of those, meaning an exposure rate of the Al substrate, seemingly become smaller with increasing the skirt roughness. The seizure occurrence moments of each piston are shown in Figure 22 as color-coded dotted lines. Thus, intersections of the solid lines with the dotted lines indicate estimated bearing ratios of the Al substrate when the seizure occurred as plotted by the asterisks in the graph. From this result, it is clear the deeper grooves on the piston skirts can play an effective role to delay the seizure. The additional point to be noted in this graph is that all the seizures were triggered when the bearing ratio of the Al substrate reached up to 60-80% as described by horizontal red lines, implying the bearing ratio of the Al substrate can be the empirical criteria for the seizure.

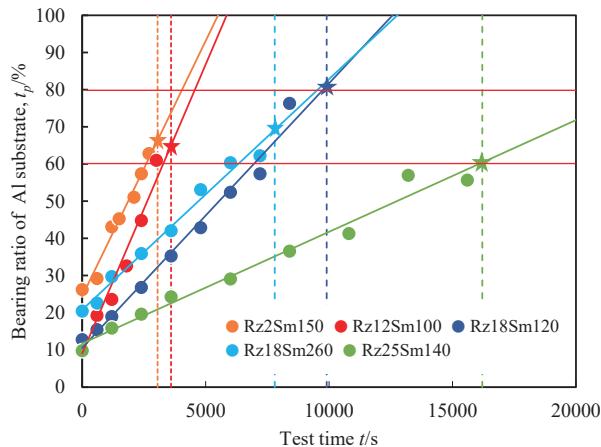


Fig. 22 Bearing ratio of Al substrate as function of test time

### 3-4. Influential factor for seizure

Somi *et al.* investigated seizure resistance of binary Al-Si alloys and found wear types transited from mild wear to seizure with increasing a load<sup>[5]</sup>, which implies a stress can be one of the influential factors for the seizure. Thus, the stress distribution was calculated by a contact analysis software, TED/CPA version 854 made by TribоЛogics Corporation. Physical properties used for the calculation are listed in Table 5. A mating material is Al having flat surface. Nominal pressure between the surfaces was 100MPa.

Table 5 Physical properties used for analysis

	Al substrate	Resin
Elastic modulus, E/Gpa	77.8	4.0
Poisson's ratio	0.37	0.43

A typical calculation result is shown in Figure 23. Stress concentrations are observed at the edges of the Al substrate contact surface. On the other hand, the stress on the resin portion is much lower than that on the Al portion. In order to investigate the change in the stress on the Al and resin portions with increasing the bearing ratio of Al substrate, the highest values as the stress working on Al and the lowest values as the stress working on resin are picked up from the calculation results, then plotted these values against the bearing ratio of the Al substrate as shown in Figure 24. Considering the origin of the seizure, maximum pressure induced to

the Al substrate should be noted rather than that on the resin coating since the seizure will occur from a metal-to-metal contact. Then, it is found the maximum pressure on the Al substrate becomes smaller as the bearing ratio of the Al substrate increases. Therefore, the hypothesis of the stress-induced seizure cannot explain the phenomena observed in this study.

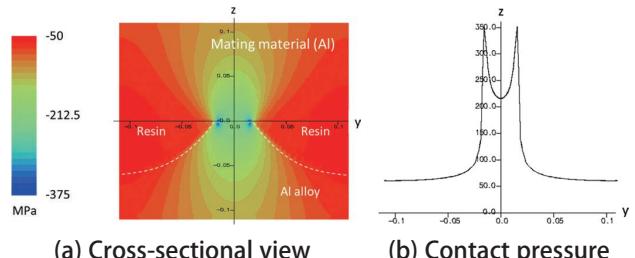


Fig. 23 Contact pressure distribution

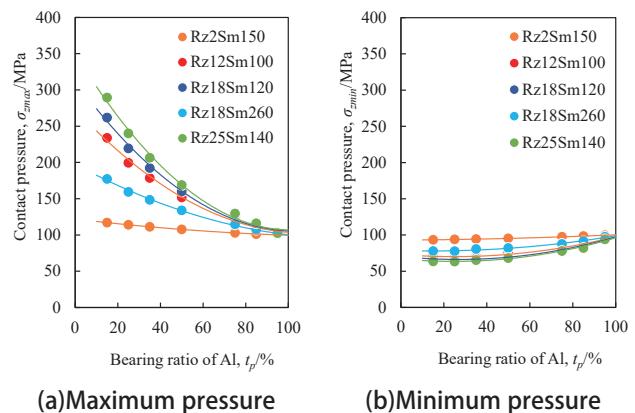
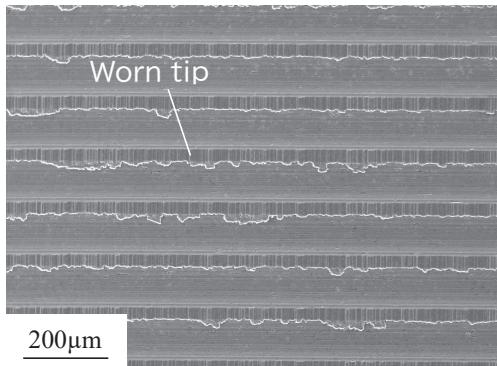


Fig. 24 Change in contact pressure with increasing bearing ratio of Al

It was implied above that the bearing ratio of the Al substrate could be the empirical criteria for the seizure, which indicates the coating remained in grooves may play a key role to prevent the seizure. To verify an effect of it on the seizure, a non-coated piston with Rz18Sm100 was additionally tested. The load during running in was lowered to one-tenth of the previous test, namely 10kgf, so that the seizure could not be triggered. After confirming by SEM observation that the tips of the grooves were slightly worn and flattened as shown in Figure 25, a main test was conducted under the conditions in Table 2. As the result, a seizure was observed within only 120 seconds after the main test started as shown in Figure 26, which demonstrably

proved the coating in the grooves could serve to prevent the seizure.



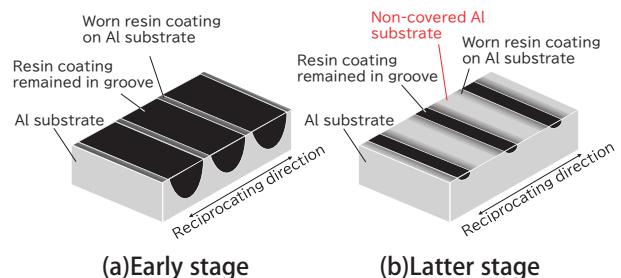
**Fig. 25 Morphology of skirt surface after running in**



**Fig. 26 Appearance of seizure at 120 seconds**

A conceivable mechanism of the seizure prevention by the resin coating in the grooves is schematically described in Figure 27. As can be seen in this figure, the worn resin coating is sure to pass over the surface of the adjacent Al substrate since the piston was reciprocated in the direction perpendicular to the grooves. The resin coating transferred to the Al substrate could cover the exposed Al substrate and deter the metal-to-metal contact, resulting in the prevention of the seizure. In the early stage of the Al substrate exposure, deep grooves could keep the adequate resin coating enough to protect the adjacent Al substrate entirely. However, amount of the resin coating stored in the grooves would gradually decrease with the progress of the wear in the latter stage. In addition, the Al substrate to be protected would increase contrarily. Thus, the seizure could finally happen from a part of the Al substrate not covered with the resin coating. Further investigations and considerations are still

required to verify this hypothetical mechanism. For example, surface composition analyses of the piston and the cylinder test specimen during the test would enable us to confirm whether the worn and transferred resin coating actually covers the Al substrate.



**Fig. 27 Conceivable mechanism of seizure prevention by resin coating in groove**

### 3-5. Printability of deep groove

As mentioned above, the seizure can be delayed with the deeper grooves on the piston skirts. However, it is expected deeper grooves would show larger roughness even after coating, which is one of concerns about an increase in the friction loss as reported in the previous studies<sup>[6][7]</sup> especially at the early stage of an engine operation. Thus, the roughness after coating with the different surface geometries was evaluated. The pistons were screen-printed under the condition individually optimized for each geometry. Through this process, grooves of each geometry were covered and filled with the resin coating material. The roughness,  $R_{zjs}$ , on the piston skirt covered with the resin coating was measured at the center of the skirt along the piston height direction. After coating, all the pistons except the one with Rz2Sm150 showed smaller roughness than as-machined state owing to the leveling effect as shown in Figure 28. In case of Rz12Sm100 and Rz18Sm120, the roughness after coating were comparable to that of Rz2Sm150. On the other hand, substantially large roughness still remained in case of the pistons with Rz18Sm260 and Rz25Sm140. It had been confirmed the roughness could be further reduced by using a multiple screen-printing technique, but it will also lead an increase in the process flow resulting in a cost increase. Thus, in practical use, it is necessary to choose a suitable geometry with considering required durability, surface roughness and cost.

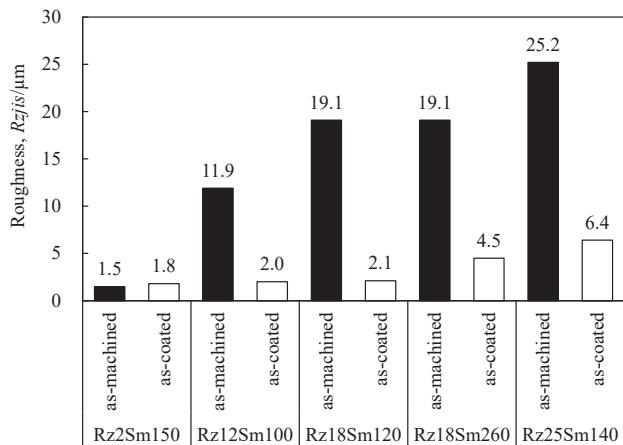


Fig. 28 Roughness before/after coating

**4****CONCLUSION**

In this research, the effects of the modified resin coating and the deep grooves on durability of the resin coated piston were investigated, and which has led following conclusions.

- (1) The polyamide imide was modified so that it can be cured completely at a relatively low temperature. As the result, frictional characteristics were improved compared to the existing coating.
- (2) It was found the deeper grooves on the piston skirts can play an effective role to delay the seizure.
- (3) Seizures were triggered when the ratio of the Al substrate exposed to the sliding surface reached up to 60-80%, which implies the coating remained in grooves may play a key role to prevent the seizure.
- (4) Roughness on the piston skirt was reduced after the coating process owing to the leveling effect. The deeper grooves tended to remain relatively large roughness even after coating.

**ACKNOWLEDGEMENT**

The authors would like to acknowledge Dr. Kunihiko Kakoi of TriboLogics Corporation for his dedicated cooperation for the contact analysis.

**REFERENCES**

- [1] K. Holmberg, P. Andersson and A. Erdemir, "Global energy consumption due to friction in passenger cars," *Tribology International* 47, (2012), 221-234.
- [2] H. Kurita, H. Yamagata, H. Arai and T. Nakamura, "Hypereutectic Al-20%Si alloy engine block using high-pressure die-casting," *SAE Technical Paper* 2004-01-1028, (2004).
- [3] T. Uhara and H. Kurita, "The Effect of Surface Morphology of Cylinder Bore Surface on Anti-Scuffing Property made by High Pressure Die-Casting Process using Hyper-Eutectic Al-Si Alloy," *SAE Int. J. Mater. Manf.* 7(1), (2014). doi:10.4271/2013-32-9046
- [4] K. Watanabe, T. Sato, T. Aoki, F. Ito *et al.*, "Development of Piston Resin Coating suitable for DiASil Cylinders," *Yamaha Motor Technical Review*, (2018), 76-81.
- [5] A. Somi Reddy, B. N. Pramila Bai, K. S. S. Murthy and S. K. Biswas, "Wear and seizure of binary Al-Si alloys," *Wear* 171, (1994), 115-127.
- [6] M. Takiguchi, T. Takimoto, E. Asakawa, K. Nakayama *et al.*, "A Study of Friction Force Reduction on Piston Skirt (Effect of Width, Roughness and Resin Coating)," *Transaction of the JSME* 63(611), (1997), 327-332.
- [7] M. Sasaki, N. Takahashi, T. Sato and S. Sue, "Development of Low Friction Solid Film Lubricant for Piston (1) Development of Double Layer Solid Film Lubricant," *2010 JSAE Spring Convention Proceeding*, (2010), 7-10.

**■著者**

渡邊 慧太  
Keita Watanabe  
生産技術本部  
材料技術部



栗田 洋敬  
Hirotaka Kurita  
生産技術本部  
材料技術部

# Stiffness optimization process using topology optimization techniques and lattice structures

Hiroyuki Nagamoto Koji Kobayashi Hideyuki Fujita

当論文は、JSAE 20229078/SAE 2022-32-0078として、SETC2022 (Small Powertrains and Energy Systems Technology Conference)にて発表されたものです。

Reprinted with permission Copyright © 2022 SAE Japan and Copyright © 2022 SAE INTERNATIONAL  
(Further use or distribution is not permitted without permission from SAE.)

## 要旨

モーターサイクルに限らず、あらゆる製品において軽量化は大変重要な課題となっている。一般的に軽量化は製品の要求機能を考慮しつつ、材料や構造、形状などを最適なものにすることで達成され、形状については「トポロジー最適化」という技術の活用が盛んに行われている。一方、製造工法の観点では積層造形技術(3D プリント)の発展によって、ラティスと呼ばれる軽量構造の造形が近年可能になりつつある。本論文では両技術を組み合わせることで、より剛性の高い構造を設計することが可能であることを示した上で、最適化技術を活用し、剛性と軽量化を両立させた二輪車のエンジンカバー形状を検討した内容を紹介する。

## ABSTRACT

In recent years, topology optimization technology has been widely applied as a means of achieving weight reduction. On the other hand, the development of additive manufacturing technology (3D printing) is making it possible to manufacture structures called lattices. In this paper, we show that it is possible to create even stiffer structures by combining both technologies, and we develop a design process that includes optimization calculations.

## 1 INTRODUCTION

Weight reduction is a particularly important issue not only for motorcycles, but for any product. In general, weight reduction is achieved by optimizing the materials, structure, shape, etc., while considering the required functions of the product, and in recent years, the technology of "topology optimization"<sup>[1]</sup> has been actively utilized for structure and shape.

Topology optimization is a method for calculating the optimal shape under given load boundary conditions and constraints. Without geometrical constraints, the solution is characterized by complex and organic shapes, and additive manufacturing is often chosen as a method to form such complex shapes. One of the features of additive manufacturing is the ability to create microstructures called lattice structures. Lattice structures are expected to have various functional benefits such as strength, stiffness, heat, and vibration,

and are also effective in terms of weight reduction. For structure-related topology optimization, a mathematical method called the SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization method)<sup>[2]</sup> is widely used. In this method, the material density of the elements is a design variable, of which most commercial software implementations employ.

In this report, the process, and the effect of integrating the above topology optimization and lattice structure design techniques are shown with specific case studies. At first, assuming the problem of a simple double-ended fixed beam subjected to an equally distributed load on its top surface, the stiffness of the beam under normal topology optimization is compared with the stiffness of the beam when the lattice structure is applied. Then, we applied some of the process to an engine cover to investigate a geometry that would provide both greater stiffness and weight reduction.

## 2 OPTIMIZATION OF A BEAM

To start things simply, let us assume the problem where we apply evenly distributed loads to a double-ended iron beam (Figure 1). Physical properties and load boundary conditions were as shown in Table 1.

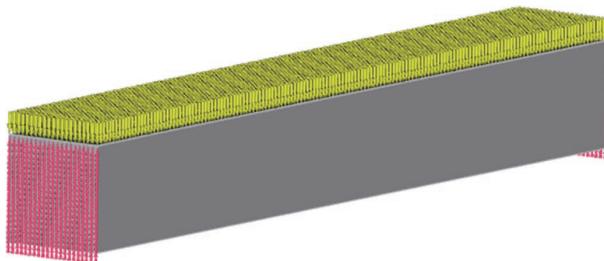


Fig. 1 Double-ended fixed beam

Table 1 Physical properties and load boundary conditions

Dimensions	$10 \times 10 \times 80$ mm
Young Modulus	205 GPa
Poisson Ratio	0.3
Boundary Condition	Both ends are completely fixed
Load Condition	Evenly distributed load on the upper surface $1600$ N( $2 \times 10^6$ Pa)

### 2-1. Topology optimization of a double-ended beam

First, the topology is optimized based on the SIMP method. The shape is output with the relative density threshold set to  $\rho = 0.5$  and then smoothed using the smoothing function of the design tool. The resulting volume of the part is  $3990$  mm $^3$ . The optimization-related conditions and results are shown in Figure 2 and Table 2.

Figure 3 shows a conceptual diagram of the shear force and bending moment of a beam under equally distributed loading with both ends fixed. The bending moment diagram of the beam has a parabolic shape, with larger values near the fixed ends and in the center of the beam. To minimize strain energy, the second moment of the cross section must be increased in areas of high bending moment, so members are placed to the edge of the design domain near the fixed end and in the central upper and lower face areas, while the center of the beam space can be thinned out. The shape shown in Figure 2 obtained by topology optimization and the second

moment of area shown in Figure 4 generally reflect the above and are structurally appropriate from a mechanical point of view.

Next, we confirm the stiffness performance of the topology optimized shape using static analysis. We set up the simulation using the same loading and boundary conditions as in the topology optimization step. The maximum displacement in the loading direction is  $2.204 \times 10^{-2}$  mm. Figure 5 shows a displacement contour plot in the load direction. The stiffness performance of a functionally graded lattice structure will be examined and compared in the next section with respect to the above results.

Table 2 Optimization conditions and results

Objective	Minimize strain energy (Maximize stiffness)
Constraint	Volume ratio 50% or less
Extraction Density Threshold	0.5
Volume	3990 mm $^3$

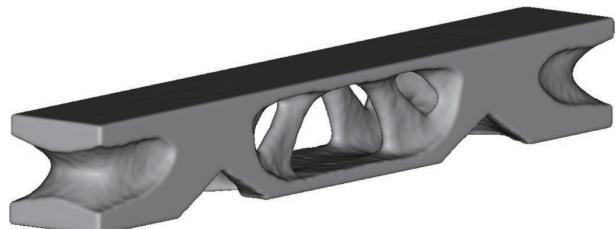


Fig. 2 Topology optimized beam

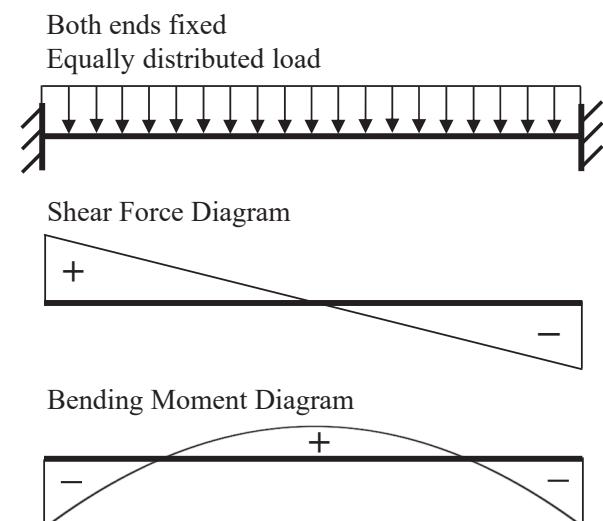


Fig. 3 Conceptual diagram of the beam

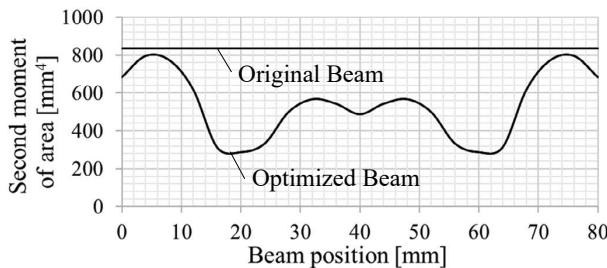


Fig. 4 Second moment of area around neutral axis

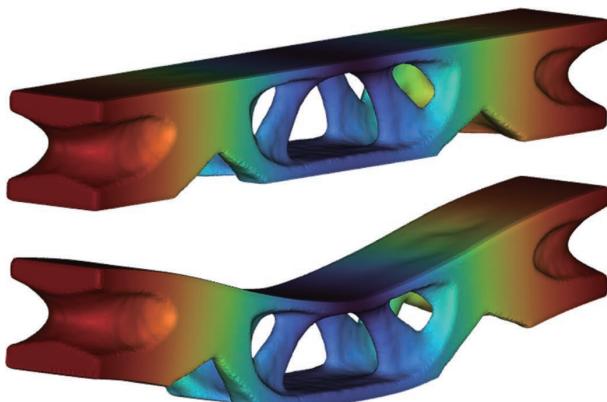


Fig. 5 Displacement contour plot of topology-optimized beam in load direction (deformation magnification factor 0 × and 300 ×)

## 2-2. Functionally graded lattice structure

In examining the lattice structure, we adopted a “shell and infill” approach. The structure consists of an outer shell and an inner lattice structure. This configuration is bio-inspired and resembles the bone structure to improve the stiffness.

An example structure is shown in the figure below. Figure 6 shows a point cloud map of intermediate density using the SIMP method, and Figure 7 shows a cross-sectional structure of shell and infill. Here, the topology optimization threshold of intermediate density was set to 0.4, and the outer shell thickness to  $t = 0.6$  mm. We used a gyroid lattice with a cell size equal to 3 mm for the internal lattice structure. The intermediate density distribution of the topology optimization controls the thickness of the gyroids and is set to gradually change from 0.25 to 1.57 mm — thicker at sections with higher loading. The final volume was almost identical to the volume of the shape obtained from pure topology optimization.

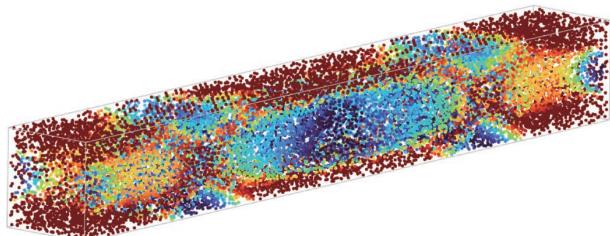


Fig. 6 Point cloud map of intermediate density

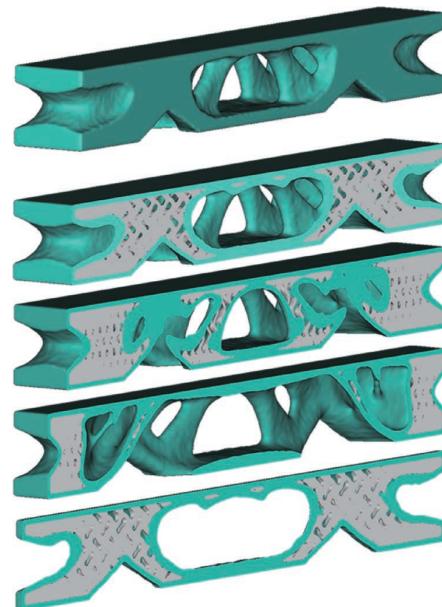


Fig. 7 Cross-sectional structure of shell and infill

Then we perform an analysis to confirm the part's stiffness performance. The maximum displacement in the load direction was  $2.100 \times 10^{-2}$  mm (Figure 8). If we compare the displacement of the functionally graded lattice structure with the shape obtained by the pure topology optimization example of the previous section ( $2.204 \times 10^{-2}$  mm), we see that the stiffness is improved by about 5%.

Note that the external shape of the shell and infill structure shown in Figure 7 is not the same as the external shape of the beam in Figure 2, but is about 6% larger in volume and about 5% larger in average second moment of area (however, both shapes satisfy the constraint of  $10 \times 10 \times 80$  mm for the overall beam dimensions, which is the design domain). This is because the intermediate density threshold for extracting the external shape from the topology optimization results is intentionally set smaller.

The reason the external shape can be made larger keeping the same total mass is that the optimal intermediate density distribution can be faithfully generated in the actual shape by using a lattice structure for the interior. Due to the superior reproducibility of the intermediate density distribution obtained by optimization into the actual shape, the specific stiffness can be expected to be higher than that of a solid structure.

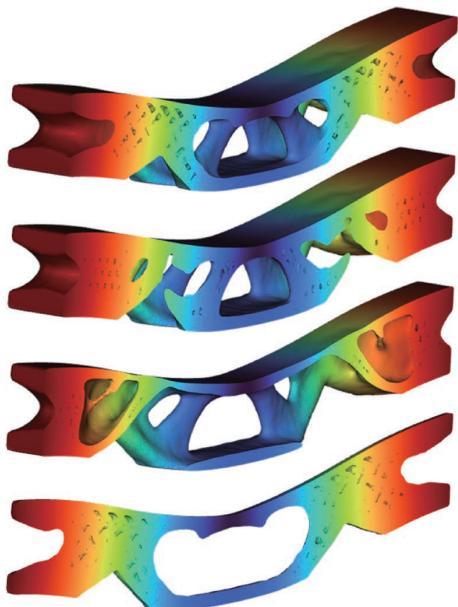


Fig. 8 Displacement contour plot of functionally graded lattice structure cross-section

interfere with other members was reexamined, and the optimal arrangement of members to maximize stiffness was then determined by topology optimization. The design domain shape for optimization is shown in Figure 10, and the density distribution obtained by the calculation is shown in Figure 11.

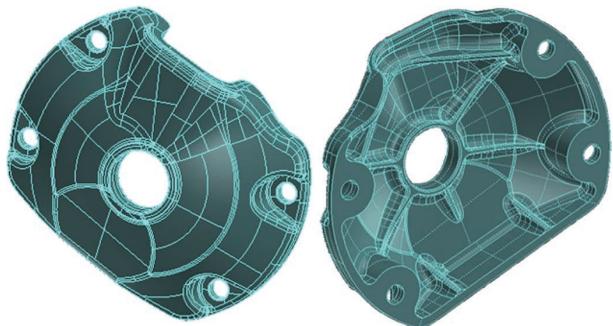


Fig. 9 Original engine cover shape

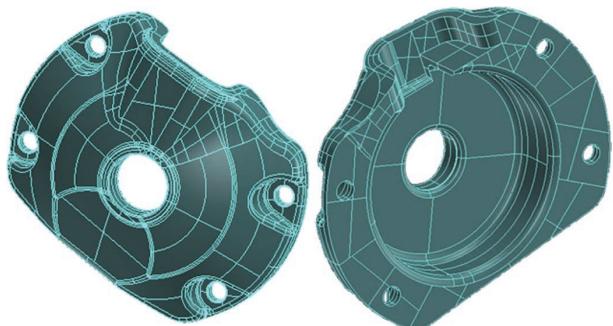


Fig. 10 Modified design domain for optimization

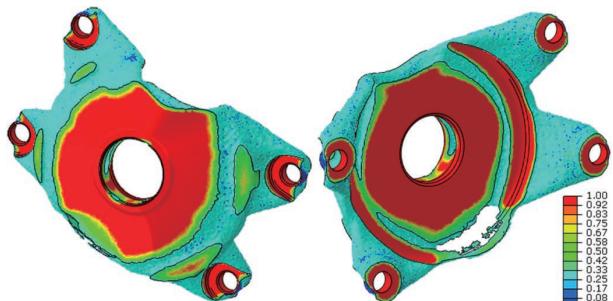


Fig. 11 Density distribution contours by topology optimization

### 3 CASE STUDY OF OPTIMIZATION PROCESS APPLICATION

The following is a case study of weight reduction of a motorcycle engine cover using some of the optimization processes described above. The function of the cover is to minimize damage to the engine itself when the motorcycle falls over. Conventionally, it is difficult to reduce the weight of these parts as they tend to be heavy. In this case study, weight reduction was the first priority, and we examined how much weight could be reduced while allowing for a reduction in rigidity of up to 5%. The original cover shape is shown in Figure 9. In order to maximize the benefits of the shell and infill structure, the shape of the design area that did not

Here, the static analysis conditions and optimization conditions are shown in Table 3. In this model, the inner surface of the bolt holes of the cover was completely fixed and the center of the cover was subjected to the forces that would be applied by the road surface during a fall (Figure 12).

Table 3 Static Analysis Conditions

Young Modulus	75 GPa
Poisson Ratio	0.33
Boundary Condition	Inner surfaces of the bolt holes are completely fixed
Load Condition	4880 N at the reference point outside the center of the cover
Constraint Condition	Coupling restraint between the reference point and part of the outer surface of the cover

Table 4 Optimization conditions

Objective	Minimize strain energy (Maximize stiffness)
Constraint	Volume ratio 70% or less
Extraction Density Threshold	0.3

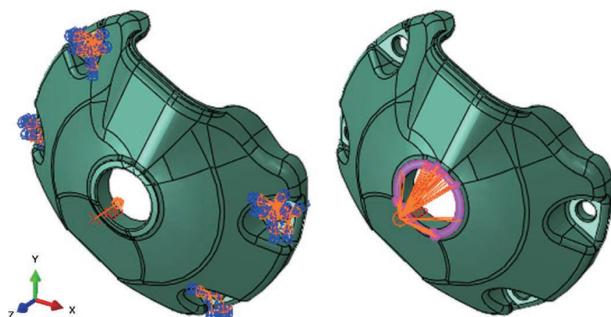


Fig. 12 Static Analysis Model

The next step is to divide the design domain into an outer shell domain and an infill domain. In this step, we modified the shape of the top of the cover, which is known empirically to have less frequent contact with the road surface. Although we intentionally left the lower cover shape, which is in frequent contact with the road surface, there was concern about weight increase if the infill area was also made to follow the shape of the lower cover. Therefore, for the infill area, we considered a shape with a density between 0.4 and 0.9 in the optimization calculation results as a guide, and for the outer shell, we created a shape with the minimum wall thickness that can be stably formed by additive manufacturing. Figure 13 shows the outer shell and infill areas.

Then, a beam-based lattice was placed in the infill area, and the spacing of the beams was adjusted according to the intermediate density distribution obtained from the

topology optimization. The final cover shape appearance created is shown in Figure 14, and the lattice structure specifications are shown in Table 5. The load point displacements and volume of the original and final cover shapes are also shown in Table 6. The lattice pattern selected is called Voronoi<sup>[3]</sup>, which is a method of space division in which the beams are randomly oriented by randomly placing the control points (site points). Since isotropic mechanical properties are expected, Voronoi is easy to handle when multiple loading directions are assumed.

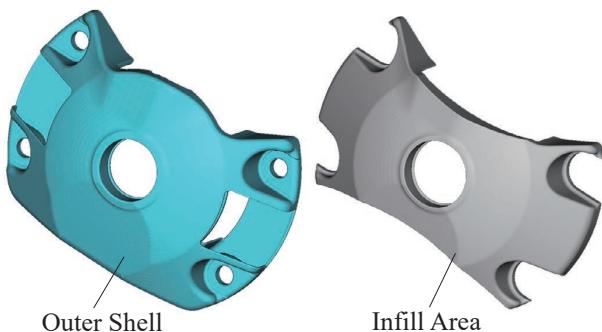


Fig. 13 Outer shell and infill shape



Fig. 14 Final shape including lattice structure

Table 5 Specifications of the lattice structure

Outer shell thickness	0.8 mm
Lattice Pattern	Voronoi
Lattice Cell Size	3.25~5.35 mm(Graded)
Strut Diameter	1.2 mm

Table 6 Weight and load point displacement

Specification	Load Point Displacement [mm]	Volume [mm <sup>3</sup> ]
Original Shape	0.147	29938
Final Shape	0.153	24977

Based on the displacement of the load point shown in Table 6, 16% weight reduction was achieved despite 4% reduction in stiffness. In terms of specific stiffness, it was 15% better than the original geometry.

As mentioned above, it was necessary to consider requirements other than stiffness with respect to the external shape (leaving areas of high contact frequency), so performance comparisons with simple topology optimization results were not performed. However, if the external shape is the same, it is expected that incorporating a lattice structure will provide higher specific stiffness, as in the beam example.

In this case study, the stiffness maximization calculation was performed during the topology optimization phase, but it may be possible to realize a structure with high tensile stiffness and low bending stiffness, for example, by setting displacement constraints. In addition to stiffness, it may be possible to achieve the desired properties in various physical fields, such as thermo-fluid, vibration, and acoustics, by devising a macroscopic structure in addition to the properties of the material itself. This concept is also called metamaterials, and further technological development is expected in the future.

## SUMMARY

In this paper, we first show that the topology optimization results for a simple double-ended fixed beam are appropriate from the structural mechanics point of view. Then, by adopting a shell-and-infill structure and reflecting the optimization results (intermediate density distribution) in the lattice of the infill region, it is shown that the stiffness can be increased compared to a simple topology optimization. In addition, it was found that the shell and infill regions need to be set appropriately based on the optimization results, since the application of this method to a specific part may involve multiple requirements other than stiffness. In the proposed shell and infill structure, various parameters are assumed, including outer shell

thickness, lattice pattern, lattice beam thickness, plate thickness, cell size, and its inclination range. The selection and optimization of these parameters, as well as the search for the optimal structure design process for other physical domains, is the next challenge.

## ACKNOWLEDGMENTS

We would like to express our deep appreciation and gratitude for nTopology, Dassault Systèmes and JAMPT who provided support in carrying out this challenge.

## REFERENCES

- [1] Bendsoe, MP., Kikuchi, N.: Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 71, No. 2, pp. 197-224, 1988.
- [2] Bendsoe, MP.: Optimal shape design as a material distribution problem, Structural Optimization, Vol. 1, pp. 193-202, 1989.
- [3] Lei, H., Li, J., Xu, Z., Wang, Q.: Parametric Design of Voronoi-based lattice porous structures, Materials and Design, Vol. 191, pp. 1-10, 2020.

## ■著者



永本 洋之  
Hiroyuki Nagamoto  
技術・研究本部  
技術開発統括部  
先進プロダクト開発部



小林 光司  
Koji Kobayashi  
技術・研究本部  
技術開発統括部  
プロジェクト推進部



藤田 英之  
Hideyuki Fujita  
技術・研究本部  
技術開発統括部  
先進プロダクト開発部

### ヤマハ発動機 技報企画委員会

委 員 荒木 治	ヤマハモーターエンジニアリング(株) コーポレートデザイン部
池谷 友弥	クリエイティブ本部 プロダクトデザイン部
石塚 健次	ソリューション事業本部 ロボティクス事業部 技術統括部 FA 商品開発部
伊藤 正二	技術・研究本部 AM 開発統括部 第1技術部
大石 善功	PF 車両ユニット PF 車両開発統括部 PF 企画推進部
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 技術戦略部
近藤 巧	PF 車両ユニット PF 車両開発統括部 PF 企画推進部
沢渕 敦志	パワートレインユニット プロダクト開発統括部 第2PT 設計部
曾根 和也	ヤマハモーター・エレクトロニクス(株) 事業統括部 製品技術部
土居 航介	生産技術本部 材料技術部
野澤 伸治郎	ランドモビリティ事業本部 SPV 事業部 第1開発部
原 以起	マリン事業本部 開発統括部 先行開発部
平野 雅彦	ソリューション事業本部 UMS 事業推進部 開発部
村松 恭行	技術・研究本部 NV・技術戦略統括部 技術戦略部

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
	池谷 友弥	クリエイティブ本部 プロダクトデザイン部
	村松 恭行	技術・研究本部 NV・技術戦略統括部 技術戦略部
	久米 裕子	技術・研究本部 NV・技術戦略統括部 技術戦略部

### ヤマハ発動機 技報 第57号

YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW 2022 No.57

印 刷 2022年11月30日  
発 行 2022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 技術戦略部)  
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