

特 集

安全ビジョン
「人機官能×人機安全」を支える技術

人機
官能  人機
安全
Jin-Ki Kanno Jin-Ki Anzen



**YAMAHA MOTOR
TECHNICAL REVIEW**

2023 No.58
ヤマハ発動機 技報



特集テーマ

安全ビジョン「人機官能×人機安全」を支える技術

Jin-Ki Kanno Jin-Ki Anzen

ヤマハ発動機は、「人機官能」という独自の開発思想を持っています。これは、「人」と「機械」を高い次元で一体化させることにより、「人」の悦び・興奮をつくりだす技術です。「人機安全」とは、「人」と「機械」が相乗作用で高度な安全を実現するという考え方です。「人機官能×人機安全」とは、「技術」「技量」「つながる」を軸にした安全をもとに、ユーザーが楽しみながらその能力を高められることで得られる喜びや感動を提供し、お客様と共に「事故のない社会」を目指すというヤマハ発動機独自の考え方を表現したもので、今号では、安全ビジョン「人機官能×人機安全」を支える技術についてご紹介します。

巻頭言

- ヤマハらしい安全という価値の提供と社会的責任の遂行 5
広瀬 聰

特集 安全ビジョン「人機官能×人機安全」を支える技術

- The Multirole Fighter of the Motorcycle with Advanced Technologies "TRACER9 GT+" 9
笠井 聰 水野 良太 水谷 韶明 村田 真章 田島 充
- Robust Control Strategy for Robotic Motorcycle Without Falling Down at Low-Speed Driving 14
土屋 光生 原 進 木村 哲也 鶴見 尚

製品紹介

- 欧州向け e-Bike 「Booster easy」および「Booster」の開発 24
原 素行 Maurizio Ghezzi Cristiano Proserpio Roberto Redaelli Marco Ferrario
- あつらいいな、から生まれた電動アシスト自転車「PAS」バッテリー対応 USB アダプター「moriba」 28
夏目 良介 堀内 まり
- 操船システム「Helm Master EX」バウスラスター連携 32
内藤 克俊 田形 彰大
- 船外機「F450A」の開発 36
黒木 陽平
- 新フラッグシップエンジン搭載「FX-HO」の開発 40
逸見 恒彦 諸田 高一郎 清水 聰 松浦 聰史 河井 健二朗 鈴木 正吉 板橋 順馬
- スポーツボート「255 FSH SPORT H」への「Helm Master EX」搭載 45
三浦 宏信 高川 翔
- 「F200」船外機用ブラケット内蔵ステアリングユニット 50
高木 秀明 野村 晃平 松永 卓真
- 2024年モデル ROV 「YXZ1000R SS/MT」 55
磯田 敬 新堀 雅秀 鈴木 知美 福嶋 健司 大畠 忍 平田 剛
- US 向けリン酸鉄リチウムイオンバッテリーパック搭載ゴルフカーの製品紹介 60
石川 暢也
- 農業向け自動飛行機能を搭載した無人ヘリコプター「FAZER R AP」 64
神田 大 松原 良寿 平城 大典 鈴木 健介 木下 勝之 三宅 隆文 春田 祐吾 伊藤 友秀 伊藤 葉介 菅野 遼太郎

技術紹介

傾斜補助灯と色温度可変機能を備えた小型ヘッドライトの開発 許 芳毓 謝 金育 陳 彦甫 陳 奕志 陳 奕成	70
セルロースナノファイバー射出成形材料のカバー部品への適用 益子 徹也 井上 かおり 高橋 宏明 藤井 豊彦 大石 武司	74
フラッグシップモデル「PW-XM」の軽量化技術マグネシウムハウジング開発 宇佐美 智丈 松原 圭祐 水落 新 小原 裕司	78
「PAS」磁歪式トルクセンサの Fe-Ni 合金めっき工程における廃棄物削減工法の開発 大西 弘道	83
搭載精度15μm を実現するための実装研究と技術開発 鈴木 康弘	88
プロジェクトアッセンブリーシステムによる電動船外機組立工程の構築 影山 浩明 浦川 和也	93
EV/2WD（多軸制御車）「BiBeey」の開発 石田 佳未 星屋 真一	97

技術論文

鋼／アルミ合金異種材接着における接合部疲労強度に対する被着体材料および板厚の影響調査 山本 耕平	101
マルチボディダイナミクスモデルによる集中剛性を含む二輪車運動方程式の再現 寺山 敬 山口 翔大 北川 洋 矢部 昇	108
フォトグラメトリを用いた農作物の体積推定手法の提案 小野坂 捨 内海 智仁 峰野 博史	112
アルミニウム合金板のプレス成形シミュレーション 加藤 直幸	121
Development of Lightweight Oil Catch Tank Produced by Laser Powder Bed Fusion 渡邊 慧太 栗田 洋敬 岩崎 進也 三井 理功 長尾 隆史 田代 繼治 市村 誠 加納 佳明 楠井 潤	127
Chemical Kinetic Analysis with Two-Zone Model on Spark Knock Suppression Effects with Hydrogen Addition at Low and High Engine Speeds 後藤 隼 小橋 好充 上野 義人 柴田 元 小川 英之 山本 稔	140



FEATURE

Our initiatives to assist safety with Technologies to achieve our Jin-Ki Kanno × Jin-Ki Anzen Safety Vision

Jin-Ki Kanno is Yamaha Motor's exclusive development ideal. Technology born from Jin-Ki Kanno seeks to deliver users the seductive exhilaration felt when they truly become one with their machine. Jin-Ki Anzen is the Company's belief that having people and machines work together in complementary ways can make more sophisticated safety skills and technologies possible.

Centering our safety efforts on Technologies, User Skills, and Connectivity, the Jin-Ki Kanno × Jin-Ki Anzen Safety Vision expresses Yamaha Motor's unique approach to create a world free of accidents together with our customers, in which users can experience the joy and Kando* that comes from progressing their own skills and abilities while having fun at the same time.

In this issue, we will introduce the technologies that support our Safety Vision "Jin-Ki Kanno × Jin-Ki Anzen".

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

Foreword

Providing the value of safety with the unique style of Yamaha and fulfilling our social responsibility	5
Satoshi Hirose	

FEATURE Our initiatives to assist safety with Technologies to achieve our Jin-Ki Kanno × Jin-Ki Anzen Safety Vision

The Multirole Fighter of the Motorcycle with Advanced Technologies "TRACER9 GT+"	9
Satoshi Kasai Ryota Mizuno Takaaki Mizutani Masaaki Murata Mitsuru Tajima	
Robust Control Strategy for Robotic Motorcycle Without Falling Down at Low-Speed Driving	14
Mitsuo Tsuchiya Susumu Hara Tetsuya Kimura Nao Tsurumi	

New Products

Development of European Market destined e-Bike "Booster easy" and "Booster"	24
Motoyuki Hara Maurizio Ghezzi Cristiano Proserpio Roberto Redaelli Marco Ferrario	
USB adapter "moriba" for "PAS" electrically assisted bicycle batteries, born from thinking about what would be nice to have	28
Ryosuke Natsume Mari Horiuchi	
"Helm Master EX" with Integrated Bow Thruster	32
Katsutoshi Naito Akihiro Tagata	
Development of the "F450A" Outboard Motor	36
Yohei Kuroki	
Development of "FX-HO" Equipped with the New Flagship Engine	40
Yasuhiko Henmi Koichiro Morota Satoshi Shimizu Satoshi Matsuura Kenjiro Kawai Masakichi Suzuki Ryuma Itabashi	
Yamaha adds "Helm Master EX" on "255 FSH SPORT H" Sports Boats	45
Hironobu Miura Sho Takagawa	
Bracket-internal Steering Unit for "F200" Outboard Motor	50
Hideaki Takagi Kohei Nomura Takuma Matsunaga	
2024 model ROV, "XYZ1000R SS/MT"	55
Takashi Isoda Masahide Shinburi Tomomi Suzuki Kenji Fukushima Shinobu Ohata Gou Hirata	
Product introduction of golf cars equipped with lithium-ion iron phosphate battery packs for the US market	60
Nobuya Ishikawa	
"FAZER R AP" Unmanned Helicopter with Automatic Flight Function for Agricultural Applications	64
Dai Kanda Yoshihisa Matsubara Daisuke Hirajo Kensuke Suzuki Katsuyuki Kinoshita Takafumi Miyake Yugo Haruta Tomohide Ito Yosuke Ito Ryotaro Sugano	

New Technologies

Development of compact headlights with cornering and variable color temperature functions	70
Hsu Fang-Yu Hsieh Chin-Yu Chen Yen-Fu Chen Yi-Chih Chen Yi-Cheng	
Application of Cellulose Nanofiber Injection Molding Material to Cover Parts	74
Tetsuya Mashiko Kaori Inoue Hiroaki Takahashi Toyohiko Fujii Takeshi Oishi	
Lightweight technology for the flagship model "PW-XM" Development of magnesium housings	78
Tomohiro Usami Keisuke Matsubara Shin Mizuochi Yuji Kohara	
Development of a Waste Reduction Method for the Fe-Ni Alloy Plating Process of "PAS"	
Magnetostrictive Torque Sensors	83
Hiromichi Onishi	
Application research and technological development to achieve mounting accuracy of 15µm	88
Yasuhiro Suzuki	
Construction of Electric Outboard Motor Assembly Process using a Projection Assembly System	93
Hiroaki Kageyama Kazuya Urakawa	
EV/2WD (Axis Control Vehicle) "BiBeey"	97
Yoshimi Ishida Shinichi Hoshiya	

Technical Papers

Investigation of the Effects of Adherend Material and Thickness on the Fatigue Strength of Adhesive Bonded Joints with Dissimilar Materials (Steel/Aluminum Alloy)	101
Kouhei Yamamoto	
Reproducing the motorcycle equation of motion with lumped stiffness on multi-body dynamics model	108
Takashi Terayama Shota Yamaguchi Hiroshi Kitagawa Noboru Yabe	
A Proposal for a Crop Volume Estimation Methods Using Photogrammetry	112
Natsu Onozaka Tomoyoshi Utsumi Hiroshi Mineno	
Simulation of Press Forming of Aluminum Alloy Sheets	121
Naoyuki Katou	
Development of Lightweight Oil Catch Tank Produced by Laser Powder Bed Fusion	127
Keita Watanabe Hirotaka Kurita Shinya Iwasaki Riku Mitsui Takashi Nagao	
Tsuguharu Tashiro Makoto Ichimura Yoshiaki Kano Jun Kusui	
Chemical Kinetic Analysis with Two-Zone Model on Spark Knock Suppression Effects with Hydrogen Addition at Low and High Engine Speeds	140
Jun Goto Yoshimitsu Kobashi Yoshito Ueno Gen Shibata Hideyuki Ogawa Minoru Yamamoto	

卷頭言

ヤマハらしい安全という価値の提供と社会的責任の遂行

Providing the value of safety with the unique style of Yamaha and fulfilling our social responsibility

広瀬 聰

The number of our customers involved in fatal accidents worldwide is estimated to be 18,000 per year (as the actual number is not available, calculated as a percentage of sales from the 222,000 motorcycle fatalities/year)^{*1}), which is almost the same as the cumulative number of Ukrainian soldiers and citizens killed in the Russian-Ukrainian conflict (by the end of 2022).

The graph below shows the number of road fatalities in 34 countries around the world. In the two to three decades since 1990, the number of fatalities involving four-wheeled vehicles has decreased by half, while the number of fatalities involving two-wheeled vehicles has increased.



In 2020, the Stockholm Declaration of 2020 pledged to halve road traffic deaths by 2030. In addition, the Japan Automobile Manufacturers Association (JAMA) announced in its Road Map 2030^{*2} released at the end of November 2021 stating that it aims to halve the number of fatalities in accidents by 2030 and to achieve zero fatalities in accidents by 2050 through both technology and mechanisms.

With this issue being one of the most important social areas to be addressed, the Company has been promoting activities to reduce traffic accidents. In November last year, Yamaha Motor announced to the public its Safety Vision, which it has been working on since 2020.

What the Vision study members focused on was “safety with the unique style of Yamaha” and “safety centered on people”.

The Company’s vision is to build safety and sense of security not only with machines but also with customers, in other words, the riders, without compromising (1) the fun of riding mobility and (2) the kando^{*3} gained by enhancing the ability to control the vehicle.

Centering our safety efforts on Technologies, User Skills, and Connectivity, the Jin-Ki Kanno × Jin-Ki Anzen Safety Vision expresses Yamaha Motor’s unique approach to create a world free of accidents together with our customers, in which users can experience the joy and Kando that comes from progressing their own skills and abilities while having fun at the same time.



The three pillars of Yamaha Motor's activities to achieve this vision are Technology, Skills, and Connectivity. In terms of Technology, the aim is to integrate riders and machines which the Company has valued since its foundation. Through this initiative, in addition to the development concept of Jin-Ki Kanno that creates pleasure and excitement for riders, the Company will develop and introduce technologies that assist the rider's cognition and judgment by informing them of surrounding vehicles, traffic control conditions, and potential risk prediction results, as well as technologies that assist the rider to steer and check the surrounding conditions to maintain a stable vehicle state even under instantaneous environmental changes. In the event of an accident, rider protection devices and automatic accident reporting assist in mitigating the damage.

In terms of Skills, the Company will develop activities to encourage even more customers to take advantage of the Yamaha Riding Academy, which has already produced positive results. Furthermore, in emerging countries, users and society as a whole have a low awareness of safety issues, such as low helmet wearing rates and accidents caused by drink driving. For these regions, in addition to the Yamaha Riding Academy, the Company will also enhance micro-learning content so that riders can more easily participate in on-demand safe driving classes at any time.

In Connectivity, the Company will significantly improve the connectivity between riders and mobility, collecting data on driving and operating status of the vehicle, and further aim to provide safety-related feedback to both riders and machines.

I believe that many people might think realizing a society without accidents is impossible, including the aspect of its cost. We still have more than 25 years until 2050. NTT's portable telephone was launched in 1985, and the commercial Internet service started in 1988. Now, almost everyone everywhere around the world is using this service. It may not be too long before all vehicles are equipped with a two-way communication method that recognize danger through communication with vehicles and pedestrians.

To realize an accident-free society, Yamaha Motor will provide greater value of safety by developing solutions with the unique style of Yamaha, while actively collaborating with industry and government agencies. The Company appreciates your support and cooperation.

*1 The number of motorcyclists killed in accidents worldwide 222,357 multiplied by a Yamaha Motor sales volume ratio of 4,380,000 units/52,910,000 units to global motorcycle sales volume (2019 results).

*2 Motorcycle Industry Policy Road Map 2030: Japan Automobile Manufacturers Association, Inc. website (dedicated page for Motorcycle Industry Policy Road Map 2030)
<https://www.bikeloveforum.jp/roadmap/>

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

事故で亡くなられる当社のお客さまの数は世界中で推定18,000人／年(実数はつかめないため二輪車死者数222,000人／年から販売比率で算出^{※1})とみられ、この数はロシアーウクライナ紛争で亡くなられたウクライナ兵士と市民の死者数累計(2022年末まで)とほぼ同数になります。

下のグラフは世界34か国の交通事故死者数の推移を示したものになります。1990年からの2~30年で四輪車での死者数は半減している一方、二輪車での死者数は増加しています。



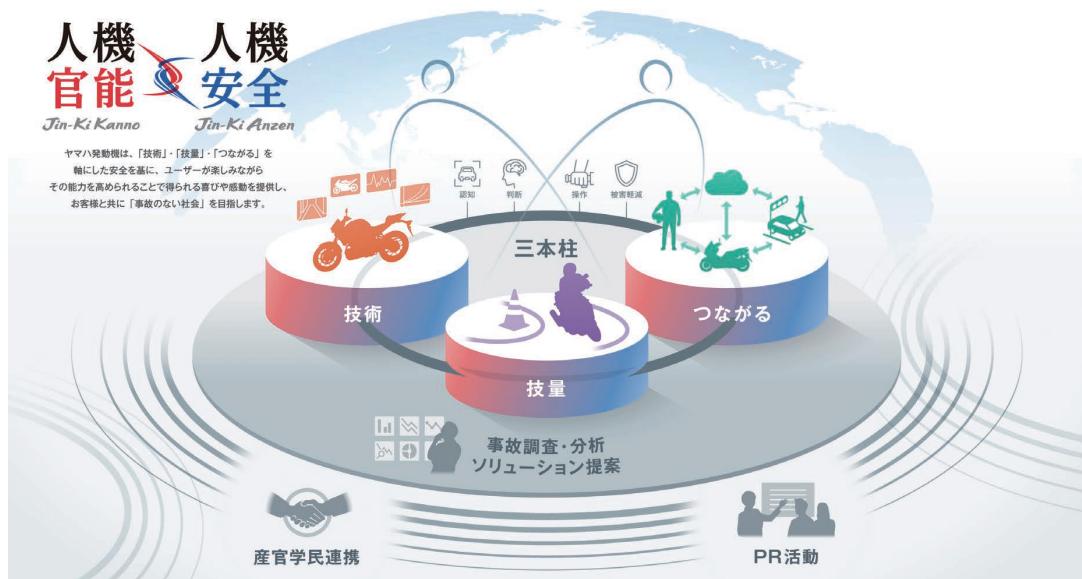
2020年、ストックホルム閣僚級会議にて2030年までに交通事故死者半減という目標が宣言されました。また、日本自動車工業会においても2021年11月末に発表した二輪車産業政策ロードマップ2030^{※2}の中で2030年事故死者数半減および技術・仕組みの両面から2050年事故死者数ゼロを目指すと発表されました。

当社としても交通事故の削減を解決すべき重要な社会課題の一つとして活動を推進し、2020年より検討を重ねてまいりました安全ビジョンについて、昨年11月に对外公表を行いました。

ビジョン検討メンバーがこだわったのは“ヤマハらしい”安全、“人中心の安全”です。

①モビリティに乗る楽しさ ②操る能力を高めることで得られる感動 を損なうことなく、かつ安全・安心を機械だけでなくお客様、すなわちライダーと共に築き上げたいという思いをビジョンに乗せました。

ビジョンは「人機官能×人機安全」。「技術」「技量」「つながる」を軸にした安全支援をもとに、ユーザーが楽しみながらその能力を高められることで得られる喜びや感動を提供し、お客様と共に「事故のない社会」を目指すという、当社独自の思いを表現しました。



このビジョンを達成するための活動の3本柱は、「技術」「技量」「つながる」です。

「技術」では、当社が創業時より大切にしてきた、「人」と「機械」を高次元で一体化させることにより、「人」の悦び・興奮を創りだす「人機官能」の開発思想に加え、周辺車両や交通規制状況、さらには潜在リスク予測結果などをライダーに伝えることで、認知・判断をアシストする技術、また瞬時の環境変化においても安定した車体挙動を保てるように、操作をアシストし周囲の状況確認の手助けを行う技術を開発、実装していきます。さらに万一の際は、乗員保護装置や事故自動通報で、被害軽減をアシストします。

「技量」では、これまで成果を上げているヤマハライディングアカデミーをさらに多くのお客さまに活用していくだけるよう活動を展開します。加えて、新興国においては、ヘルメットの着用率の低さ、飲酒運転が原因の事故も多い等、ユーザーや社会全体の安全に対する意識が低い状況にあります。こういった地域に向けては、ヤマハライディングアカデミーに加え、いつでも手軽にオンデマンドで安全運転教室に参加できるように、マイクロラーニング・コンテンツも充実させていきます。

「つながる」では、ライダーとモビリティとのつながりを圧倒的に増やして、運転状況や稼働状況のデータ収集を行い、「人・機」への安全に関するフィードバックを強化していきます。

事故のない社会の実現は、現時点ではそのコストも含めて無理と思われる方も多いと思います。2050年までまだ25年以上あります。NTT のポータブル電話機が発売されたのが1985年、商用のインターネットがスタートしたのが1988年。今では世界中のどこでもほぼ全員が活用しています。車両や歩行者との間の通信により危険を認知する双方向の通信が全車両に搭載されることもそれほど先の話ではないかもしれません。

事故のない社会の実現に向けて、ヤマハらしいソリューションの展開は目前で、一方で業界や政府機関との協業も積極的に進めながら安全という価値を提供してまいります。

皆さんのご支援、ご協力を願っています。

※1 世界の二輪事故死者数222,357人に世界二輪販売台数に対する当社の販売台数比4,380,000台／52,910,000台を掛けた数値(2019年実績)

※2 二輪車産業政策ロードマップ2030:一般社団法人日本自動車工業会サイト(二輪車産業政策ロードマップ2030特設ページ)
<https://www.bikeloveforum.jp/roadmap/>

■著者



廣瀬 聰
Satoshi Hirose
執行役員

The Multirole Fighter of the Motorcycle with Advanced Technologies "TRACER9 GT+"

笠井 聰 水野 良太 水谷 卓明 村田 真章 田島 充



Abstract

In November 2022, YAMAHA released the safety vision "Jin-ki Kanno × Jin-ki Anzen," and declared the three pillars of "Technology," "Skills," and "Connectivity" designed to further promote its work with customers on building an "accident-free society." This article focuses on the "technology" pillar, and introduces the "TRACER9 GT+", a model which well represents the safety vision, by exploring its product concept, key features, and technical aspects.

1 はじめに

当社は、2022年11月に安全ビジョン“人機官能×人機安全”を公表し、“技術”“技量”“つながる”的3本の柱でお客さまとともに“事故のない社会”を目指すことを宣言した。本稿では、その3本柱の1つである“技術”にフォーカスし、“人機官能×人機安全”を具現化したモデル「TRACER9 GT+」の商品コンセプト、商品の特徴、技術トピックスについて紹介する。

2 開発の狙い

今回開発した「TRACER9 GT+」は、“The Multirole Fighter of the Motorcycle with Advanced Technologies”を商品コンセプトに掲げ、2021年にフルモデルチェンジを行い市場投入した「TRACER9 GT」の持つスポーツ性とツーリング性を、さらに高い次元に引き上げ、多用途性をより向上させることを

目指したモデルである。

そのために、多くの先進技術の導入や各種アップデートを行い、シリーズ最上位グレードとして、またスポーツツーリングカテゴリのフラッグシップとして開発を行った。

3 開発の取り組み

前述の開発の狙いを達成するために、ミリ波レーダを用いたアダプティブラーズコントロール(以下 ACC)やレーダ連携ユニファイドブレーキシステム等の運転支援機能を開発し搭載した。それら機能を直感的に操作できるハンドルスイッチやメータ表示等も合わせて開発した。

加えて、各種運転支援機能と連携して電子制御サスペンションの制御も行い、乗車フィーリングや車両姿勢の安定性の向上に寄与し、長距離ツーリング時における疲労軽減効果を得られるようにした。

また、7.0インチフルカラーTFTメータを採用することで、ACCの作動状況や車両状態の把握を容易にしている。スマートフォンと車両間の通信専用デバイス「コミュニケーションコントロールユニット」も搭載することで、最新のコネクティビティ機能を

実装した。各種コンポーネントのアップデートも行い、シリーズ最上位グレードとして多くの機能と上質さを加えたフラグシップに相応しいモデルとした(図1)。



図1 フィーチャマップ

3-1. 運転支援機能

3-1-1. アダプティブクルーズコントロール

本モデルに搭載したACCは、車両前方に搭載した“ミリ波レーダ”で先行車を認識する(図2)。先行車の発見や離脱、車間時間変化を認識すると、設定した車速の範囲内で加圧機能付きハイドリックユニットやエンジンコントロールユニット、YCC-T(ヤマハ電子制御スロットル)を介して自動的に加速や減速を行うことができる。

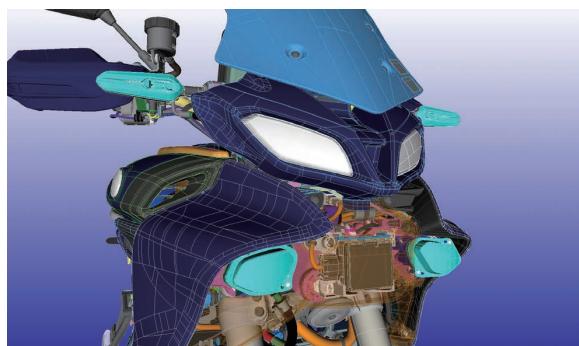


図2 ミリ波レーダ



図3 ACC

今回の開発では、クローズド環境にて周辺交通を想定した様々な評価を繰り返した上で、海外での一般路テストや警察庁発行の「自動走行システムに関する公道実証実験のためのガイドライン」、国交省発行の「保安基準：自動運行装置」などにのっとった範囲での日本国内での公道実証実験を繰り返し、先行車認識の正確性向上と、誤認識時でも車両挙動が十分にライダーコントロール下となるような作り込みを行った。同時に、ライダ

の感覚に合わせた先行車発見後のスムーズな減速度の立ち上がりや、交通の流れで気持ち良く加速できるように車速ごとに加速フィーリングを調整するなど、ACC 使用時に自然なフィーリングとなるよう綿密な作り込みを行った(図3)。

また、先行車の急な減速や割り込みなどによりシステムで許可されている最大減速度では衝突する可能性があると検知した場合には、ライダに操作を促す表示(Take Over Request)や、先行車を追い越す際の車線変更時に、追い越し側のフラッシュを操作すると加速をアシストする機能(Overtake Assist)、ACCによる自動加減速制御中においても違和感無く、バンク角に応じてカーブ中の加速を抑制する機能(Curve Acceleration Limiter)やカーブ中の速度を抑制する機能(Curve Speed Controller)など、様々なシチュエーションで快適に使える工夫を織込んだ。

さらに、ACCでの走行中にシステムによる加減速状態を意識せず自由にギヤを選べるよう、クイックシフタを「MT-10」と同様の第3世代に進化させた。これにより“加速中のシフトダウン”および“減速中のシフトアップ”にも対応でき、随時適切なギヤの選択が可能となった。

加えて、従来から「TRACER9 GT」に搭載している電子制御サスペンション「KADS」には、ACCの制御に連携して適切に前後サスペンションの減衰力を調整するロジックを追加した。ACCでの巡航時はより車両姿勢をフラットに保ち、減速シチュエーションでは通常のブレーキ操作時よりもさらにノーズダイブを抑制することで安定した減速感を実現した。

このように、ACCを搭載するにあたり周辺コンポーネントに対し、協調制御を行えるようアップデートを施しACC走行の快適性を高めることで各コンポーネントの価値向上も図った。

3-1-2. レーダ連携ユニファイドブレーキシステム

本モデルには、従来搭載されていたコーナリングに対応したブレーキ制御に加え、二輪において世界初採用となるレーダ連携ユニファイドブレーキシステムを開発し搭載した(図4)。本機能は、ミリ波レーダが検知した情報を用いてブレーキ力をアシストする機能である。先行車との車間が一定のレベルを超えて接近、もしくは接近しそうになった場合、ライダのブレーキ入力量をアシストして前後ブレーキ配分を調整し、高い減速度と安定性を容易に発生することを目的としている。ライダのブレーキ入力がある場合のみに作動し、ライダがブレーキ操作をやめると本機能は解除される。

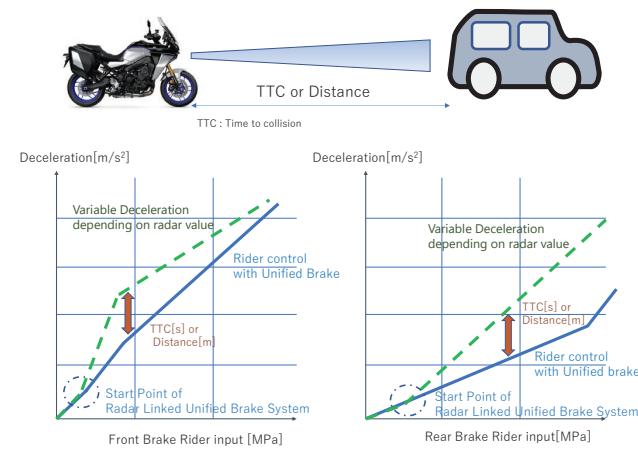


図4 レーダ連携ユニファイドブレーキシステム

ライダがフロントもしくはリアブレーキを操作した際に、ライダ入力系統とは異なる側のブレーキ力をハイドロリンクユニットの加圧機能を用いてアシストする。そのアシスト量は、ライダの入力量に加え、先行車との距離やTTC(衝突予測時間)、車両姿勢、車両速度等を考慮し決定される。

また、アシストが働きライダのブレーキ操作よりも大きな減速度が発生する場合は、電子制御サスペンション「KADS」と連携し前後サスペンションの減衰力を最適化する(図5)。車両のノーズダイブを抑制し車両の安定性に寄与する。



図5 サスペンション制御

3-2. 質感の向上とツアラー性能

3-2-1. Human Machine Interface

フラッシュやホーン、ACCといった車両の機能、および車両設定やスマートフォンリンク機能を操作するハンドルスイッチは、操作のしやすさと情報のわかりやすさを優先した配置とし、直感的な切り替えと選択を可能にした。また、内部にイルミネーションライトを装備することによって、夜間の視認性も向上させた。

メータは7.0インチフルカラー TFT メータを採用した(図6)。ACCの採用に伴い、その作動や設定状態が把握しやすいデザインに仕上げた。



図6 7.0インチフルカラーTFTメータ

また、車両本体にはスマートフォンと車両間の通信専用デバイス「コミュニケーションコントロールユニット」を搭載した。スマートフォン上で「MyRide - Link」App を立ち上げ、USB/Wi-Fi/Bluetooth を介して接続することにより、様々な機能をメータとハンドルスイッチで操作可能となる(図7)。



図7 ハンドルスイッチ

走行モードの切り替えは、従来はエンジン出力特性の切り替えを行う D-MODE・トラクションコントロール・スライドコントロール・リフトコントロールの介入度、電子制御サスペンションの減衰力といった各種制御を個別に設定する仕組みであったが、今回は名称を新たに SPORT/STREET/RAIN/CUSTOM の 4パターンに変更した。それに伴い、各種制御の介入度や減衰力は、選択したパターンに紐づいて自動的に変化するシステムに変更し、シンプルな操作の実現と分かりやすさを向上させた。CUSTOM モードでは、各種制御の介入度や減衰力を好みの値にプリセットしておくことができる。

3-2-2. シート

レザーフィニッシュを採用したシート(図8)。また、シートパッド(クッション材)を見直すことによって、ACCとともに長距離・長時間ツーリングにおける快適性に寄与した。フラッグシップモデルに見合った質感の向上も図った。



図8 シート

3-2-3. フラッグシップモデルとしての細部へのこだわり

各種ブレーキコンポーネントは、フラッグシップモデルに見合ったアップデートを行った(図9)。

また、ブレーキマスター・シリンダーのリザーバータンクは、レバーやハンドルカラーに合わせダーカクリアタイプに変更した。

リアブレーキペダルとリアブレーキディスクは、作動フィーリングの向上と操作性向上と合わせて、質感の向上を狙った。



図9 ブレーキコンポーネントアップデート

カラーバリエーションは、ヤマハブランドの磨き抜かれたハイテックなスポーツの世界観を訴求する「ブルーイッシュホワイトメタリック2(シルバー)」と、スポーツツーリングカテゴリのフラッグシップとしてふさわしい、洗練された質感や品格を訴求する「パステルダークグレー(グレー)」を用意した(図10)。様々な経験を積み重ねてきたベテランライダの所有欲を満たし、旅先での豊かな時間を提供する。



ブルーイッシュホワイトメタリック2(シルバー)



パステルダークグレー(グレー)

■著者



笠井 聰

Satoshi Kasai

PF 車両ユニット

PF 車両開発統括部

車両実験部



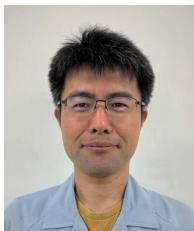
水野 良太

Ryota Mizuno

PF 車両ユニット

PF 車両開発統括部

車両実験部



水谷 卓明

Takaaki Mizutani

PF 車両ユニット

電子技術統括部

システム開発部



村田 真章

Masaaki Murata

PF 車両ユニット

電子技術統括部

システム開発部



田島 充

Mitsuru Tajima

PF 車両ユニット

電子技術統括部

システム開発部

図10 カラーバリエーション

4

おわりに

「TRACER9 GT+」は、運転支援機能や各種フィーチャを数多く搭載したモデルではあるが、それら機能は、開発ライダの感性を重視し、幾度となくセッティングを繰り返し、できるだけ違和感なく、自然なフィーリングや操作感を目指した作り込みを実施している。これは、当社の開発思想として脈々と受け継がれてきた“人機官能”の思想を反映しており、本モデルに乗ることで得られる悦びや興奮、そして感动体験を多くのお客さまに体感していただけると確信している。

Robust Control Strategy for Robotic Motorcycle Without Falling Down at Low-Speed Driving

Mitsuo Tsuchiya Susumu Hara Tetsuya Kimura Nao Tsurumi

本稿は、公益社団法人 日本自動車技術会 International Journal of Automotive Engineering 13巻(4) 頁:188-195 2022年11月に掲載された論文を同会の許可を得て転載したものです。本論文の著作権は公益社団法人 日本自動車技術会に属し、無断複製・転載を禁じます。

要旨

本稿では、自動二輪車の静止状態や低速走行中の安定性向上に関するロバスト制御について論じる。著者らは車両の重心位置を変更できる新しい回転軸を組み込んだロボットバイクを開発し、一般的なPID制御器と単純な最適レギュレータを使用した制御の実証について報告した。さらに、マルチボディダイナミクス手法を用いてロボットバイクの数学モデルも導出し、そのモデルに最適レギュレータを適用した。しかし、実用化に向けた頑健な制御戦略に基づく実証実験はまだ行われていない。そこで本研究では実際の使用環境におけるロバスト性を実現するため、スライディングモードコントローラ(SMC)を適用した実用的な手法を提案する。それは、マイナーPID制御ループとSMCを含む新しい数学モデルと周波数成形最適レギュレータによって設計された超平面を組み合わせた制御システム設計である。最後に、実際のロボットバイクを用いた実験によりその有効性を検証する。

Abstract

This study discusses robust control problems related to the fall of two-wheel motor vehicles during parking or low-speed driving. The robotic motorcycle includes a new rotary axis that can vary the position of the total center of gravity. Some authors have already reported preliminary control demonstrations using a typical PID controller and simple LQR. Moreover, the mathematical model of a robotic motorcycle derived using multibody dynamics methods and its optimal regulator simulation were developed. However, an experimental investigation of a robust control strategy for practical implementation has not yet been conducted. Therefore, this study proposes a practical method based on applying a sliding mode controller (SMC) to improve robust stability in a real usage environment. Here, we introduce the control system design combining a novel mathematical model, including a minor PID control loop and the SMC, with its hyperplane designed by the frequency-shaped optimal regulator. Finally, its effectiveness is verified by experiments using an actual robotic motorcycle.

1

INTRODUCTION

The automation of motorcycles from a vehicle and infrastructure perspective is essential. However, the term “vehicle” mainly refers to four-wheeled automobiles, and two-wheeled motorcycles are rarely the research focus. While many drivers enjoy driving a motorcycle itself, it is also a crucial mobility element in several countries, where riders use it for commuting and physical distribution because motorcycles are lighter and more compact than cars. Nevertheless, although they self-stabilize after gaining a certain speed, they are essentially unstable as an inverted pendulum while stationary or

during low-speed driving, which is a primary problem. Moreover, the rider must support considerable loads. Therefore, instability-related problems may become even more evident as the average age of motorcyclists increases, potentially slowing the development of a future mobile society centered on the autonomous driving of these systems.

In this regard, motorcycles must automatically self-stabilize in the parking state and during low-speed driving to counteract the weakness mentioned above. To achieve similar purposes, Ouchi et al. proposed a stabilization mechanism equipped with a gyro^[1], and

Satoh et al. developed a mechanism that stabilizes the vehicle by moving a counterweight in a direction orthogonal to its traveling direction^[2]. A study conducted by Saguchi et al. on a stabilization control method using steering is also well known^[3]. However, the method of Ouchi et al. often requires installing a relatively large and heavy gyro at a specific position to obtain a satisfactory result. Furthermore, the method of Satoh et al. widen the motorcycle; thus, losing the motorcycle the advantage of driving through narrow paths. In addition, riders have also pointed out that it is uncomfortable not to be able to lean motorcycles on curves. In contrast, the approach of Saguchi et al. is only practical while driving and cannot be applied while parked. The Honda Riding Assist developed by Araki et al. adopted a negative trail length and used steering to control the center of gravity in the stationary state^[4]. However, driving in the intended direction is challenging during extremely low-speed driving.

In 2017, the authors' company announced a robotic motorcycle equipped with an Active Mass Center Control System (AMCES) axis. This robotic motorcycle adds a rotation axis to increase the degree of freedom of the vehicle and allows self-balancing in an upright position by actively moving its entire mass center^[5]. Unlike other systems, the robotic motorcycle does not require large or heavy additional mechanisms and can remain stable, even in the stationary state. The demonstration of its capacity to drive at low speed and stabilize on its own was highly praised at the Tokyo Motor Show 2017 and other trade fairs. However, the control method during the demonstration was not based on a thoroughly examined mathematical model. Instead, the stabilization was achieved through the application of a proportional-integral-derivative (PID) control and an optimal linear quadratic regulator (LQR) tuned by trial and error^[5]. From the safety improvement perspective, motorcycles must become more reliable through more accurate and transparent modeling with a control system design method that better suits this problem, rather than a simple application of PID and LQR controls. With this objective in mind, Hara et al. attempted to model a

robotic motorcycle using a multibody dynamic system, which systematically modeled a complex, actual robotic motorcycle. The authors also demonstrated through numerical simulation that this motorcycle could be controlled satisfactorily by applying an optimal regulator based on the developed model^[6]. Nevertheless, the effectiveness of this model and its robustness to withstand actual conditions have not been verified empirically, and it has not been compared with the trial-and-error-based PID control of previous demonstrations.

Based on the above scenario, attempts have been performed to show experimentally that the robustness and stability of the robotic motorcycle can be improved and that it can serve as a vehicle to drive in actual traffic environments. However, previous studies have only implemented numerical simulations relying on a close-to-ideal problem setting^[7]. Moreover, ideal conditions do not necessarily apply when running in actual environments, and the road surface affects motorcycle driving. Therefore, to achieve robust self-stabilization in actual environments, this study mainly focused on self-stabilization during a stationary state or during low-speed driving. In this regard, we introduced a sliding mode controller (SMC) with a frequency shaper. And its effectiveness was experimentally demonstrated. The SMC considered the effect of structured and unstructured uncertainties and disturbances.

The structure of this paper is as follows. Section 2 describes the robotic motorcycle. In Section 3, previously presented modeling methods are discussed. In addition, the modeling of the control system, including the minimum PID control required for stabilization, is introduced. In Section 4, a practical control system design method that considers the proposed robust stabilization is described. The effectiveness of the proposed control system design method is demonstrated in Section 5 by analyzing the results of a numerical simulation and self-stabilization experiment during low-speed driving of an actual robotic motorcycle. Finally, in Section 6, the conclusions and further aspects are summarized.

2 THE ROBOTIC MOTORCYCLE WITHOUT FALLING DOWN

The robotic motorcycle (Fig. 1) is an experimental electric motorcycle^[5]. The most characteristic item is its rotating AMCES axis (Fig. 2). It runs through the center of the vehicle to control its center of gravity. The AMCES electronically controls and stabilizes the chassis of two-wheeled motorcycles. An optimal attitude can be maintained by controlling the chassis itself. The attitude of the machine is controlled by rotating parts of the counterweights, such as the battery, swing arm, and rear wheel around the AMCES axis. The AMCES axis also connects the red part (Q1) and blue part (Q2) in Fig. 2. During rotation, the counterweight parts move either right or left, enabling the machine to balance and remain upright. The intersection point of the AMCES axis and ground coincides with the grounding point of the rear wheel. Therefore, the grounding point of the rear wheel is always fixed even if the AMCES axis is rotated. The inner frame unit rotates around the AMCES axis. A schematic of this characteristic is shown in Fig. 2.



Fig. 1 The robotic motorcycle with a rotating shaft

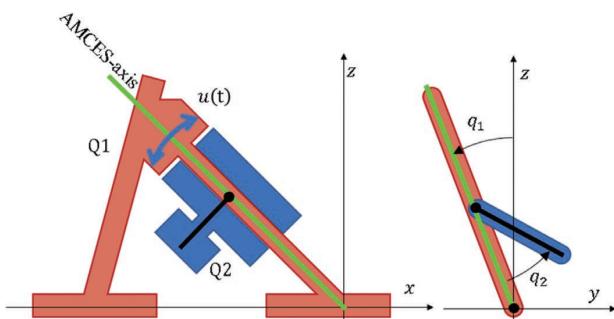


Fig. 2 Schematic figure of AMCES-axis

3 MATHEMATICAL MODELING

The mathematical modeling of the robotic motorcycle has already been investigated using multiple methodologies^{[6][7]}. The most important part of modeling is the AMCES axis. Therefore, the equation of motion for the robotic motorcycle was derived by introducing the following simplification to the system: The system is divided into two bodies (Fig. 2): a front-wheel and a rear-wheel parts. The AMCES shaft connects the bodies similar to a revolute joint. From the rear view of the main body, this mechanism can be regarded as a double pendulum. In addition, the system is considered a type of acrobot because only the connection portion of the body is actuated^[8].

After introducing the absolute coordinate system, the system is assumed to lie on flat ground. The x-axis is defined as the axis connecting the grounding points of the two tires. The z-axis is defined as being normal to the x-axis in the anti-gravity direction. The y-axis is defined as normal to the other axes based on the definition of the right-hand coordinate system. Here, the system differs from a typical acrobot because the directions of the x-axis and the AMCES axis are not similar. Therefore, the equation of motion cannot be simply described on a two-dimensional plane, and a particular modeling strategy is required. The front-wheel part of the motorcycle is defined as Q1, and the rear part is defined as Q2. Let q_1 be the slant angle of Q1 in the stationary state, and q_2 be the angle between Q1 and Q2 due to the rotation of the AMCES axis.

Two modeling methods were adopted in previous studies to obtain a linear approximated model of the robotic motorcycle. One method relies on Lagrange's equation of motion^[7]. This is a well-known modeling method based on Lagrangian mechanics^[9]. The second method relies on multibody dynamics^{[6][10][11]}. The results of the two methods are the same. The details can be found in previous papers^{[6][7]}. The approximated model is determined as follows:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_m x(t) + b_m u(t), \\ x(t) &= [q_1(t) \quad \dot{q}_1(t) \quad q_2(t) \quad \dot{q}_2(t)]^T, \end{aligned} \quad (1)$$

where $q_1(t)$ and $q_2(t)$ are the angles in Fig. 2, and $u(t)$ is the control input. More importantly, the safety of the experiments should be guaranteed. Thus, the robotic motorcycle requires a minor feedback loop to stabilize it in the control and the waiting modes. Its feedback gain vector \mathbf{k}_m was selected via trial and error by stabilizing the vehicle during the waiting mode. In this regard, the single-input linearized controlled object model, including minor feedback control, is defined as follows:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_p(t) &= \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p(t) + \mathbf{b}_p u(t), \\ \mathbf{x}_p(t) &= [q_1(t) \quad \dot{q}_1(t) \quad q_2(t) \quad \dot{q}_2(t)]^T,\end{aligned}\quad (2)$$

where $\mathbf{A}_p = \mathbf{A}_m - \mathbf{b}_m \mathbf{k}_m$ and $\mathbf{b}_p = \mathbf{b}_m$. Hereafter, the system in Eqs. (2) is referred to as the controlled object model. To identify the elements in \mathbf{A}_p and \mathbf{b}_p , the ARX model is applied to a real motorcycle under the M-sequence APRBS signal disturbance torque for $u(t) = u_d(t)$, as shown in Fig. 2. The details of the identification results can be found in our previous study^[12].

4 CONTROL SYSTEM DESIGN

4.1. Frequency-shaped LQ control hyperplane design for the controlled object model including the minor feedback

In contrast to previously published studies^{[5]-[7]}, the objective of this study is to achieve robust self-stabilization of a real robotic motorcycle in actual environments. In such a situation, the effects of uncertainties and disturbances cannot be ignored. As previously pointed out^[12], a real robotic motorcycle includes unstructured uncertainties such as high-order dynamics. The effect of high-order dynamics is reduced in this study by adopting a frequency-shaped optimal regulator (frequency-shaped LQ regulator, FSLQ) to reduce the control input signal in the high-frequency range^[13]. If low-speed driving is also considered, the influence of structured uncertainties, such as mass variations, must be handled more aggressively. To reduce the effect of both uncertainties simultaneously, this study adopts SMC using the FSLQ-control-based hyperplane design^[14]. SMC effectively reduce the effects of structural uncertainties, such as parameter variations and disturbances, such as Coulomb friction (the disturbances

that meet the matching condition). Moreover, we discuss an appropriate SMC design method for this control problem.

For the FSLQ regulator design, the second-order Butterworth low-pass characteristic with a cutoff frequency of 5 Hz on the control input is applied. Its dynamic characteristics are determined using the following state equation:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_f(t) &= \mathbf{A}_f \mathbf{x}_f(t) + \mathbf{b}_f u_a(t), \quad u_f(t) = \mathbf{c}_f \mathbf{x}_f(t) \\ \mathbf{A}_f &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_f^2 & -2\zeta_f \omega_f \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_f = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_f^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix},\end{aligned}\quad (3)$$

where ω_f and ζ_f are the cutoff frequency (5 Hz) and damping ratio ($1/\sqrt{2}$: Butterworth type), respectively. Subsequently, the feedback control system obtained using the LQ control feedback gain vector $\mathbf{k}_a = [\mathbf{k}_p \quad \mathbf{k}_f]$ for the augmented system is expressed as follows:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_a(t) &= \mathbf{A}_a \mathbf{x}_a(t) + \mathbf{b}_a u_a(t), \\ u_a(t) &= -\mathbf{k}_p \mathbf{x}_p(t) - \mathbf{k}_f \mathbf{x}_f(t) = -\mathbf{k}_a \mathbf{x}_a(t) \\ \mathbf{x}_a(t) &= \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p(t) \\ \mathbf{x}_f(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_p & \mathbf{b}_p \mathbf{c}_f \\ 0 & \mathbf{A}_f \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_a = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{b}_f \end{bmatrix}.\end{aligned}\quad (4)$$

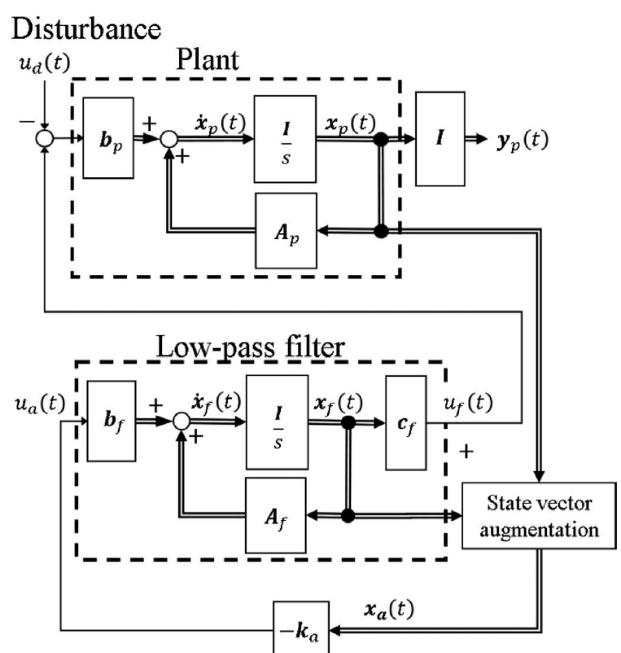


Fig. 3 Block diagram of the FSLQ control system

The block diagram of the FSLQ regulator is shown in Fig. 3. The hyperplane distance $\sigma(t)$ for SMC in this study was designed using Eqs. (4), as follows:

$$\sigma(t) = s_a \mathbf{x}_a(t), \quad (5)$$

where s_a is a linear operator and is set to the optimal feedback gain vector \mathbf{k}_a of the LQ control solution of the augmented system in Eqs. (4) and the appropriate weighting matrices \mathbf{Q}_a and \mathbf{r}_a . This procedure is similar to the hyperplane design method based on using the system zeros^[15].

4.2. Sliding mode control design

The SMC system design relied on a two-step design^[15]. The first step was the equivalent linear system design of the switching hyperplane. As the reference^[15], the eigenvalues of the equivalent linear system:

$$\dot{\mathbf{x}}_a(t) = \left\{ \mathbf{A}_a - \mathbf{b}_a (\mathbf{s}_a \mathbf{b}_a)^{-1} \mathbf{s}_a \mathbf{A}_a \right\} \mathbf{x}_a(t), \quad (6)$$

consists of five stable poles and one origin pole. The augmented system can be written as follows:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_a &= [s_1 \ s_2], \\ \mathbf{s}_1 &= s_2 \mathbf{k}_{ppm}, \\ \dot{\mathbf{x}}_1(t) &= (\mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{k}_{ppm}) \mathbf{x}_1(t), \\ \mathbf{x}_1(t) &= [q_1(t) \ \dot{q}_1(t) \ q_2(t) \ \dot{q}_2(t) \ x_f(t)]^T, \\ \mathbf{A}_{11} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_p & \mathbf{b}_p \\ 0^{1 \times 4} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} 0^{4 \times 1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_1 = \begin{bmatrix} 0^{4 \times 1} \\ 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{A}_{21} &= \begin{bmatrix} 0^{1 \times 4} & -\omega_f^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{22} = \begin{bmatrix} -2\zeta_f \omega_f \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_2 = \begin{bmatrix} \omega_f^2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

The hyperplane normal vector \mathbf{s}_a can be determined using \mathbf{k}_{ppm} provided that $\mathbf{x}_1(t)$ can be stabilized with s_2 as an arbitrary value other than zero. In this study, the equivalent control input $u_l(t)$ is derived from Eq. (8) for a constant hyperplane distance ($\sigma(t) = \text{const.}$) to obtain Eqs. (9), which corresponds to Eq. (6).

$$\dot{\sigma}(t) = s_a \dot{\mathbf{x}}_a(t) = s_a (\mathbf{A}_a \mathbf{x}_a(t) + \mathbf{b}_a u_a(t)) = 0. \quad (8)$$

$$\begin{aligned} u_l(t) &= -\mathbf{k}_a \mathbf{x}_a(t), \\ \mathbf{k}_a &= (\mathbf{s}_a \mathbf{b}_a)^{-1} \mathbf{s}_a \mathbf{A}_a. \end{aligned} \quad (9)$$

Equation (8) corresponds to the popular equivalent

control input in Eqs. (10) when the hyperplane distance is set to zero ($\sigma(t) \rightarrow 0$)^[15]. The control design using Eq. (8) generalizes the constraint of the state on the hyperplane and increases the design degrees of freedom.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_1(t) &= (\mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{k}_{ppm}) \mathbf{x}_1(t), \\ \mathbf{k}_{ppm} &= (\mathbf{s}_2 \mathbf{b}_2)^{-1} \left[(\mathbf{s}_1 \mathbf{A}_{11} + \mathbf{s}_2 \mathbf{A}_{21}) - (\mathbf{s}_1 \mathbf{A}_{12} + \mathbf{s}_2 \mathbf{A}_{22}) \mathbf{s}_2^{-1} \mathbf{s}_1 \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

The second step is a nonlinear control design to restrain the state of the switching hyperplane. A smoothing function is considered to obtain the following equation for the constrained control input (nonlinear feedback control input) $u_n(t)$ in the hyperplane^[15]:

$$u_n(t) = -\alpha \frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)| + \varepsilon}, \quad (11)$$

where α and ε respectively represent the sliding mode control gain α [Nm], and the mitigation coefficient ε is introduced to suppress chattering. Moreover, $\sigma(t)$ based on Eq. (5) is the inner product of the hyperplane normal vector \mathbf{s}_a and expanded state variable $\mathbf{x}_a(t)$. Setting the sliding mode control gain α and the mitigation coefficient to suppress chattering ε enable the design of the nonlinear control input $u_n(t)$.

Figure 4 shows a block diagram summarizing the entire control system based on the proposed two-step design.

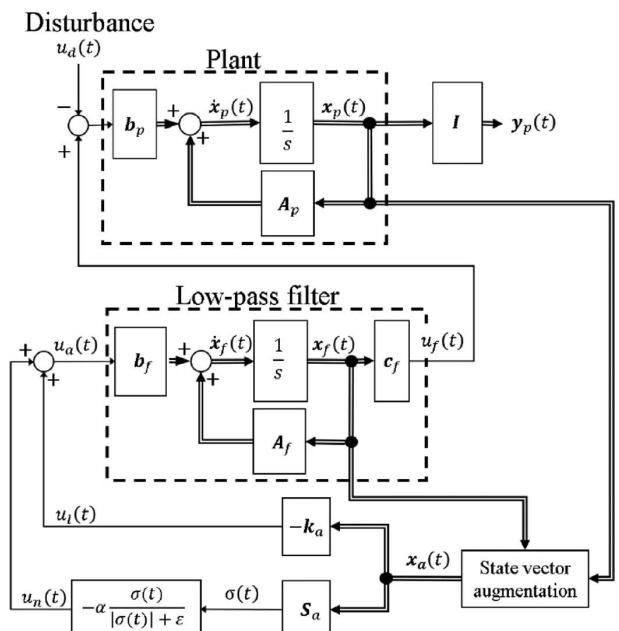


Fig. 4 Block diagram of the robust control system

The most important factor in FSLQ control is the fall prevention of the vehicle. Therefore, the weights were set only to the vehicle roll angle and its derivative. Even if the weights of the elements related to the AMCES angle and the frequency shaper element are set to 0, the purpose of the control, such as fall prevention and residual mode suppression, works well. The weight to the control input is set to 1, specifically, $\mathbf{Q}_a = \text{diag}[1 \times 10^4 \ 1 \times 10^3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, $r_a = 1$.

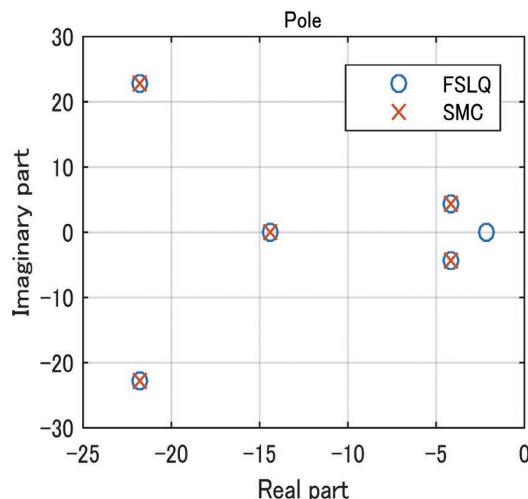


Fig. 5 FSLQ closed-loop poles and hyperplane design poles

For the hyperplane design of the SMC, we applied a pole placement design using five poles (Fig. 5) with the origin pole removed from the poles, including the feedback of the FSLQ control. s_2, k_{ppm} and $|s_a|$ in Eqs. (7) are 1, $[-1.3 \times 10^5 \ -2.7 \times 10^4 \ 2.4 \times 10^4 \ 3.1 \times 10^3 \ 4.8 \times 10^1]$ and 1.35×10^5 , respectively where $|s_a|$ is the hyper plane normal vector length. The equivalent control input $u_i(t)$ was used in Eqs. (9). The sliding mode control gain α of the nonlinear control input $u_n(t)$ was set to 500 Nm, approximately twice the maximum torque of the actuator at 298 Nm. The mitigation coefficient ε was set to 5.0×10^4 by trial and error, representing 37% of $|s_a|$. In this paper, we assumed the roll angle range and disturbance roll torque range in which the vehicle can avoid overturning. Accordingly, α and ε are adjusted so that the nonlinear control input becomes the maximum value of the actuator at the limited boundary. Large mitigation coefficient is also intended to suppress unmodeled higher-order vibration modes.

5

SIMULATIONS AND EXPERIMENTS

All simulations and experiments were performed using the same parameters. The sampling and control periods were set to 1.0 ms.

The simulation and experiment results were evaluated by applying two types of disturbances. Figure 6 shows an experiment simulating the left-right shift of the center of gravity of the rider. The disturbance was a bump disturbance where a maximum of 150 Nm was loaded on the AMCES shaft in 0.5 s and unloaded in 0.5 s, and $u_d(t) = 150 \cos^2(\pi t / 2)$.



Fig. 6 Experiment applying a disturbance to the AMCES shaft

Figure 7 shows an experiment simulating the effect of a crosswind with a wind speed of 6 m/s. A 5 kg weight was placed at the end of the handle. Hereafter, the experiment in Fig. 6 is referred to as disturbance(a), and the experiment in Fig. 7 is referred to as disturbance(b).



Fig. 7 Experiment applying a weight to the handle end

5.1. Simulations

Figure 8 shows the results for disturbance(a). The disturbance torque (black dashed line) to the AMCES axis was applied counterclockwise for 2 s after starting the experiment and clockwise 7 s later. With only minor loop control (blue one-dot chain line), there was no plant control input $u_f(t)$. The maximum roll angle is 2.50° , and the roll angle does not completely converge to the origin in 4 s. With FSLQ control (blue dashed line), the maximum plant control input is 71 Nm (47% compensation), the maximum roll angle is 1.45° (42% improvement), and the roll angle completely converges in 4 s. With SMC (solid red line), the maximum plant control input is 128 Nm (86% compensation), the maximum roll angle is 0.65° (74% improvement), and the roll angle completely converges within 4 s.

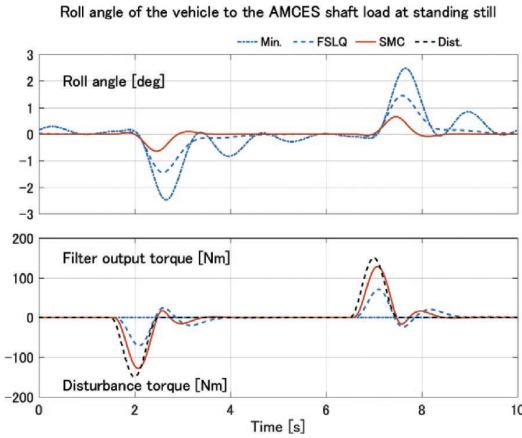


Fig. 8 Simulation of applying a bump disturbance to the AMCES shaft in the stationary state

Figure 9 shows the results of the disturbance(b). A 5 kg weight was placed at the end of the handle and stabilized with only minor loop control, and each control was started after 5 s. With FSLQ control, the improvement in the rolling angle is 0.21° (12.6% improvement). With the SMC, the improvement is 0.97° (58.5% improvement). In addition, SMC is 4.6 times better than the FSLQ control.

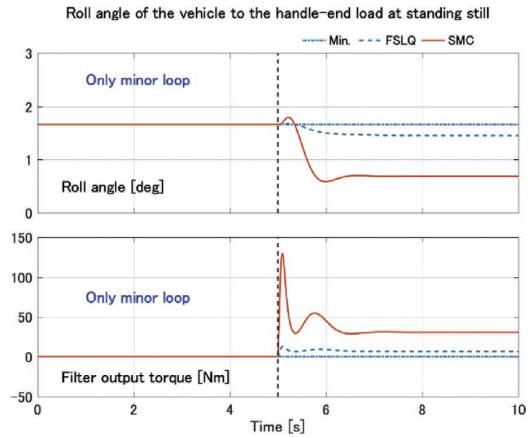


Fig. 9 Simulation of load at end of handle in the stationary state

Figure 10 shows the time transition of the state in SMC using a scatter diagram. The rolling angle and AMCES rotation angle (blue line), hyperplane (black dashed line), and hyperplane distance $\sigma(t)$ (red dashed line) are plotted. For the hyperplane, zeros were assigned to state variables other than the rolling angle and AMCES rotation angle. The state was controlled to approach the hyperplane immediately after starting the control and then to the origin.

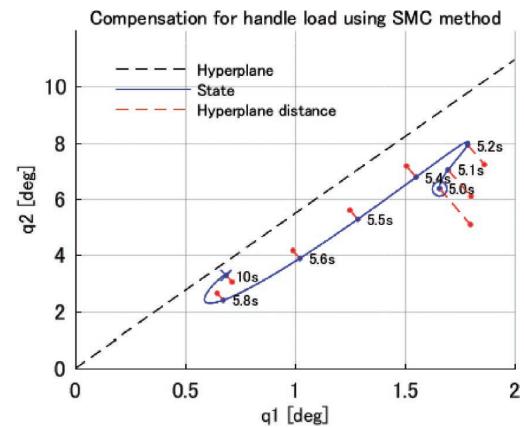


Fig. 10 Time transition of vehicle attitude with the handle-end load in SMC

Figure 11 details Fig. 10 and plots the roll angle, AMCES angle, frequency shaping control input, hyperplane distance, equivalent control input and nonlinear control input. At the start of control, the nonlinear control input acts more dominantly than the equivalent control input and the AMCES angle increases. After that, the vehicle roll angle decreases as the AMCES angle increases. The SMC compensates for the load on the handle end with a nonlinear control input that constrains the state variables to the hyperplane.

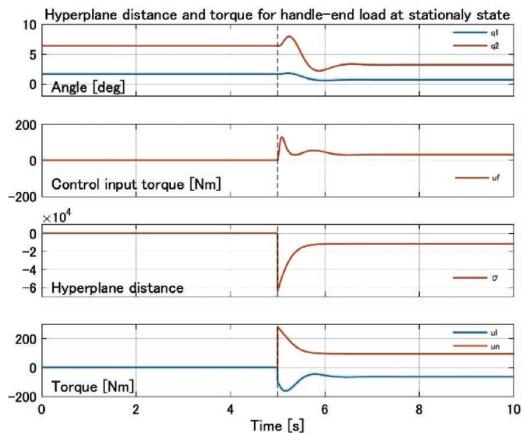


Fig. 11 Time series response in SMC to the handle-end load at stationary state: roll angle, AMCES angle, frequency shaping control input, hyperplane distance, equivalent control input and nonlinear control input

5.2. Experiments

In the stationary state, disturbance(a) and disturbance(b) were experimented. However, in the low-speed driving condition, only disturbance(a) was experimented.

5.2.1. Experiments on a vehicle stationary state

Figure 12 shows the experimental results for disturbance(a) in the stationary state. With only minor loop control, the maximum rolling angle is 2.2° , and the rolling angle does not converge to the origin in 4 s. In contrast, with FSLQ control, the maximum rolling angle is 1.1° (50% improvement), and the rolling angle converges to the origin in 4 s. With SMC, the maximum rolling angle is 0.6° (73% improvement), and the rolling angle converges to the origin in 4 s. For all controls, the simulation and experimental results shown in Fig. 7 were correlated.

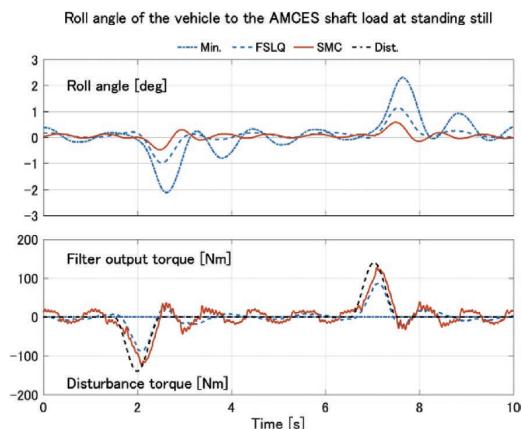


Fig. 12 Experiment involving applying a bump disturbance to the AMCES shaft at stationary state

Figure 13 shows the experimental results for disturbance(b) in the stationary state. With FSLQ control, almost no control input was required when the control was started, and the rolling angle hardly improved. With SMC, a control torque of 150 Nm was input at the start of the control, and the rolling angle improved by 50% in 1 s. Similar to the previous experiments, for all controls, the simulation and experimental results shown in Fig. 8 were correlated.

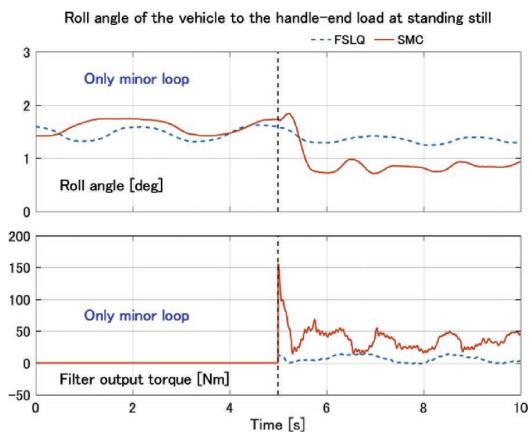


Fig. 13 Experiment involving applying a disturbance to the handle-end load at stationary state

5.2.2. Experiments on a vehicle low-speed driving

Figure 14 shows the experimental results for disturbance(a) during low speed straight driving at 0.5 km/h. With only a minor loop control, the maximum rolling angle was 2.9° , which was 32% lower than that of 2.2° in the stationary state. In addition, the convergence of the rolling angle owing to the disturbance was worse in low-speed driving than in the stationary state. This is because the AMCES structure and the driving force push the vehicle sideways. With the FSLQ control, the maximum rolling angle was 1.2° (58% improvement), but the rolling angle did not converge to the origin. With the SMC, the maximum rolling angle was 0.8° (72% improvement), and the rolling angle converged to the origin. The SMC estimated the disturbance more accurately than the FSLQ control, and the timing to start the compensation was earlier. The superiority of SMC over FSLQ control during low-speed driving tends to be the same as that in the stationary state.

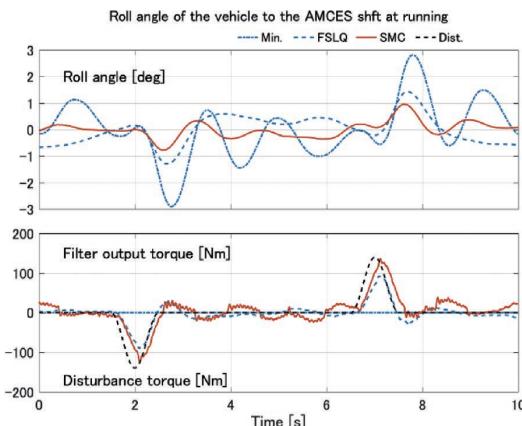


Fig. 14 Experiment results for bump disturbance applied during straight line low-speed driving

Figure 15 shows the time transition of the SMC during low-speed driving. As shown in the block diagram in Fig. 4, the sum $u_a(t)$ of the equivalent control input $u_l(t)$ and the nonlinear control input $u_n(t)$ is the input of the frequency shaper. The frequency shaper removes the high-frequency control input and becomes the plant control input $u_f(t)$. The $u_f(t)$ responded well to the applied torque disturbance $u_d(t)$, and $u_f(t)$ was highly correlated with $u_n(t)$. When the state began to be peeled off from the hyperplane by the applied disturbance torque, the compensation by the nonlinear control input $u_n(t)$ had already started, and the nonlinear control input $u_n(t)$ almost compensated the applied disturbance torque $u_d(t)$.

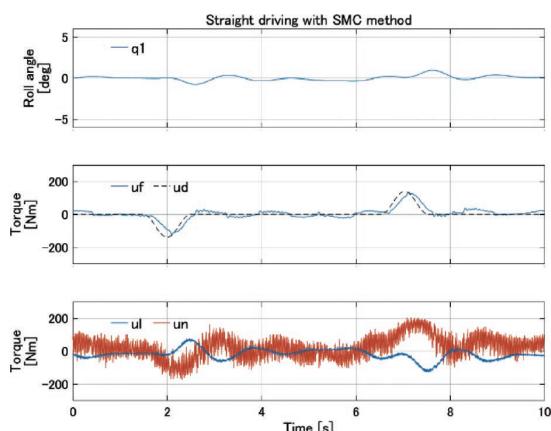


Fig. 15 Experiment results for bump disturbance applied during driving at a speed of 0.5 km/h

In addition to straight-line driving, only SMC permitted drive stably in a turning examination at a steering angle

of 30° (turning radius of 3 m) at a speed of 0.5 km/h. And the control input for bump disturbance of SMC was the same as in a straight-line driving^[16].

6 CONCLUSION

This paper introduced the robust control problem for a motorcycle without falling to a new mobility system. Improving motorcycles in a stationary state or during low-speed driving is a non-negligible factor for future mobile societies. Moreover, how to ensure low-speed driving stability using the robotic motorcycle was discussed. This motorcycle is equipped with a new axis of rotation named AMCES and can change the position of the total center of gravity. We developed a system model that included stabilizing the PID control, as previously demonstrated. In addition, a sliding mode controller (SMC) with a frequency-shaped optimal regulator (FSLQ) was developed to suppress the effects of structural and nonstructural uncertainties. The effectiveness of the developed approach was verified by a low-speed driving experiment using a real robotic motorcycle.

In the future study, the nonlinearity of the controlled object may be an important subject. When the vehicle stands up from the kickstand state, the AMCES axis rotates 50° . Centrifugal force due to vehicle speed cannot be ignored when turning. If the roll angle can be properly controlled, the performance of the vehicle dynamics will be improved even at low-speed driving.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Mr. Eiichirou TSUJII for his valuable contributions to the robotic motorcycle project.

REFERENCES

- [1] Ouchi, S., Kodani, N., Hirata, H., Takahashi, K. and Chida, Y., Self-sustaining driving control of two-wheeled vehicle by using gyro-actuator, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (in Japanese), Vol. 81, No. 832 (2015), 15-00207.

- [2] Satoh, H. and Namerikawa, T., Modeling and robust attitude control of stationary self-sustaining two-wheeled vehicle, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part C, Vol. 72, No. 719 (2006), pp. 2130-2136 (in Japanese).
- [3] Saguchi, T., Yoshida, K. and Takahashi, M., Stable running control of autonomous bicycle robot, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part C, Vol. 73, No. 731 (2007), pp. 2036-2041 (in Japanese).
- [4] Araki, M., Akimoto, K. and Takenaka, T., Study of riding assist control enabling self-standing in stationary state, SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, Vol. 3, No. 1 (2019), pp. 47-56.
- [5] Tsujii, E., Tsuchiya, M., Terayama, T. and Tsurumi, N., Study on self-standing motorcycle control mechanism, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 50, No. 4 (2019), pp. 1049-1054 (in Japanese).
- [6] Hara, S., Nakagami, K., Miyata, K., Tsuchiya, M. and Tsujii, E., Dynamics and control of self-standable motorcycle, Proceedings of the ASME 2019 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, (2019), DETC2019-97154.
- [7] Hara, S., Nakagami, K., Miyata, K., Tsuchiya, M. and Tsujii, E., Robust control system design for self-standable motorcycle, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 14, No. 3 (2020), JAMDSM0030.
- [8] Spong, M. W., The swing up control problem for the Acrobot, IEEE Control Systems, Vol. 15, No. 1 (1995), pp. 49-55.
- [9] Taylor, J. R., Classical Mechanics (2005), University Science Books.
- [10] The Japan Society of Mechanical Engineers ed., Multibody Dynamics (1) -Fundamental Theory- (2006), Corona Publishing (in Japanese).
- [11] The Japan Society of Mechanical Engineers ed., Multibody Dynamics (2) -Numerical Analysis and Applications- (2007), Corona Publishing (in Japanese).
- [12] Tsuchiya, M., Hara, S., Nakagami, K., Tsurumi, N. and Kimura, T., Optimal control experiment of self-Standable motorcycle MOTOROID, Proceedings of the SICE Annual Conference 2020, (2020), pp. 1324-1328.
- [13] Kida, T., Ikeda, M. and Yamaguchi, I., Optimal regulator with low-pass property and its application to LSS control, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 25, No. 4 (1989), pp. 448-454 (in Japanese).
- [14] Ito, T. and Nonami, K., Sliding mode control with frequency shaping to suppress spillover, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, Vol. 63, No. 611 (1997), pp. 2308-2314 (in Japanese).
- [15] Nonami, K., Nishimura, H. and Hirata, M., Control Systems Design by MATLAB (1998), Tokyo Denki University Press, pp. 163-201 (in Japanese).
- [16] Hara, S., Tsuchiya, M. and Kimura, T., Robust control of automatic low-speed driving motorcycle "MOTOROID", Proceedings of the 2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (2021), pp.724-725.

■著者



土屋 光生

Mitsuo Tsuchiya

技術・研究本部
技術開発統括部
制御システム開発部



原 進

Susumu Hara

名古屋大学
大学院工学研究科
航空宇宙工学専攻 教授



木村 哲也

Tetsuya Kimura

技術・研究本部
NV・技術戦略統括部
技術戦略部
※執筆時



鶴見 尚

Nao Tsurumi

技術・研究本部
技術開発統括部
制御システム開発部

欧洲向け e-Bike 「Booster easy」および「Booster」の開発

Development of European Market destined e-Bike "Booster easy" and "Booster"

原 素行 Maurizio Ghezzi Cristiano Proserpio Roberto Redaelli Marco Ferrario



Booster easy (Pedelec バージョン)



Booster (Speed-pepedelec バージョン)

Abstract

The e-Bike market is a growing area that is expanding globally. The Company has been selling drive units to e-Bike manufacturers in Europe with regards to the global e-Bike market. By newly introducing e-Bikes of our own brand (complete vehicles) into the global market, together with the drive unit sales business, we aim to grow our business beyond the market growth rate. The newly developed "Booster easy" and "Booster" models are part of our global e-bike lineup, covering the European commuter motorcycle category in the volume zone. The aim of the development was to provide new value in the unique style of Yamaha in the commuter e-Bike category through the models fun to ride and the sophisticated design. In addition, we have selected Fantic Motor S.P.A.(FM), which has close ties with the Company in Europe, as our development partner. By using FM's existing models as a base, this collaboration has enabled the development to be completed in a short period of time.

1 はじめに

e-Bike 市場は世界的に拡大している成長領域である。当社はこれまでグローバルの e-Bike 市場では、ドライブユニットを欧州他の自転車メーカーに販売してきた。新たに自社ブランドの e-Bike(完成車)をグローバルに導入することで、ドライブユニット販売ビジネスと合わせて、市場成長率を超える当社の事業成長を目指している。今回開発した「Booster easy」および「Booster」は当社の e-Bike のグローバルラインアップの中で、ボリューム帯の欧州コミューター領域をカバーするモデルである。操る楽しみと洗練されたデザインにより、コミューター領域でやまっらしい新しい価値を提供することを目的に開発を行った。また、欧州で当社と関係の深い Fantic Motor S.P.A. 社(以下 FM 社)を開発パートナーとし、FM 社の既存モデルをベースとすることで短期間での開発を実現している。

2 開発の狙い

今回開発した「Booster easy」および「Booster」は "Re-fined new commuter" を商品コンセプトに掲げ、以下の5項目を狙いとして開発を行った。

- (1) FM 社「ISSIMO」の車体をできる限り共用し、「ISSIMO」の良さを引き継ぐ。
- (2) 当社製の新ドライブユニット「PW series S2」を採用し、スムースで快適な乗車感を実現する。
- (3) 一般的な e-Bike である Pedelec モデルに加えて、WVTA (Whole Vehicle Type Approval) L1e-B カテゴリーの Speed-pepedelec モデルをバリエーションとして開発する。
 - ・「Booster easy」は、Pedelec バージョンで最高アシスト速度が 25km/h である。
 - ・「Booster」は、Speed-pepedelec バージョンで最高アシスト速度が 45km/h である。

(4) 外観を一新するとともにワイヤおよびハーネスをヘッドチューブにインテグレートすることで、ヤマハユニークデザインを実現する。

(5) アクセサリーのフロントおよびリヤバスケットが装着可能な構造とすることで、コミューターとしての汎用性を高める。本モデルのフィーチャーマップを図1に示す。



図1 フィーチャーマップ

3 開発スキーム

本モデルでは開発効率を高めるために、開発および製造をベースモデルの開発・製造者である FM 社に委託することとした。当社の開発主体は日本本社が担うこととしたが、FM 社への開発窓口は当社のイタリアの開発拠点である Yamaha Motor Research & Development Europe S.r.l.(以下 YMRE)が担当することで、タイムリーでスムースなコミュニケーションを実現した。商品企画を担うのは当社のオランダの販売会社である Yamaha Motor Europe N.V. (YMENV) であり、日本／イタリア／オランダを股に掛けるグローバル体制で開発を行った。

4 車体

4-1. アルミダイキャストフレーム

トラス形状をモチーフとして取り入れたU字型フレームとし、図2に示すようにフロント／リヤ右側／リヤ左側の3分割することで、強度／剛性／重量とアルミダイキャストの成形性の両立を実現している。

剛性が高く、4.5kgと軽量なフレームは、Speed-pedelec の高速走行での高い走行安定性を実現している。

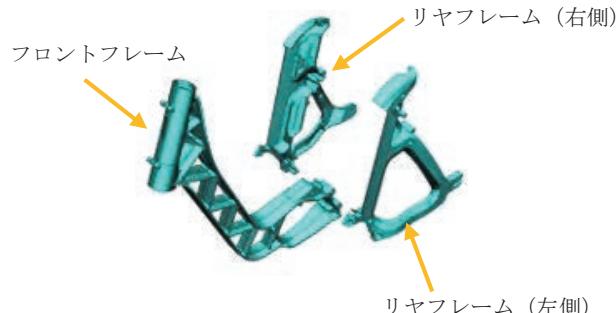


図2 アルミダイキャストフレームの分割構造

4-2. ファットタイヤおよびフロントフォークによる乗り心地の良さの実現

高剛性フレームに衝撃吸収性の良い20×4.00インチサイズのファットタイヤを前後に装着し、トラベル量80mmでプリロード調整機構付きの油圧式フロントフォークを組み合わせることで、欧洲特有のベルジャン路での快適な乗り心地を実現している。

4-3. すっきりとしたハンドル回りワイヤおよびハーネス

ブレーキホース、シフトワイヤ等のワイヤおよびハーネスをヘッドカバーおよびヘッドチューブ内に中通しすることで、図3に示すようにフロント回りのすっきりした外観を実現している。



図3 すっきりとしたワイヤおよびハーネスの通し

4-4. アクセサリー開発

スタイリングデザインにマッチしたフロントバスケット、リヤバスケットおよびフロントフレームサイドカバーを専用アクセサリーとして設定することで、汎用性およびデザイン性を高めている。また、図4に示す豊富なアクセサリーを準備することで商品の魅力を一層高めている。



図4 アクセサリー一覧図

4-5. 欧州法規対応

今回はフェーズ1としてベルギー／フランス／ドイツ／イタリア／リヒテンシュタイン／ルクセンブルク／オランダ／スペイン／スイス／イギリスの欧州10ヶ国に導入した。Pedelec バージョンは欧州機械指令の整合規格である EN15194に適合した。リフレクターおよびヘッドライトは導入10ヶ国の各々の交通法規定で要件が定められており、その要件に適合する仕様の部品を選定した。Speed-pedelec は FM 社と協働して WVTA L1e-B の型式認証を取得した。

5 ドライブユニット

5-1. 「PW series S2」ドライブユニット

当社製で新開発の「PW series S2」を「Booster easy」に、WVTA L1e-B 対応の「PW series S2 45」を「Booster」に採用

した。「PW series S2」は当社製の“Less is more”をコンセプトとする小型・軽量に優れた高トルクのドライブユニットである。当社のドライブユニット販売ビジネスでは、都市部でのコミューターからレジャーでのトレッキングまで多用途に世界中で使用されている。外観図を図5に示す。

<特徴>

- トルク一重量レシオに優れたクラス最軽量に分類されるドライブユニットで最大トルク75Nm、重量2.85kgを実現している。
- スポーツ走行全般からトレール走行まで対応するオートマチックサポートモードを搭載しており、走行モードを走行中に切り替える必要がないため、シフトやブレーキ操作に集中して運転を楽しむことができる。



図5 「PW series S2」ドライブユニット

5-2. Speed-pedelec 性能開発

44T のフロントスプロケットおよび16T のリヤスプロケットに Enviolo 社の無段変速ユニットである「Enviolo trekking」を組み合わせるとともにアシスト比を最適化することで、コミューターとして無理のない中回転域のケイデンスで最高速度を実現している。

5-3. バッテリー

型投資削減のため、FM 社「ISSIMO」のバッテリーを共用することとした。当社製のドライブユニット「PW series S2」と組み合わせるために当社製の充電器を使用するとともにバッテリーマネジメントシステムを新作した。

6 スタイリングデザイン

一目でヤマハと分かるユニークなデザインを目指して、車体の特徴であるトラス型アルミフレーム、ファットタイヤを活用して、当社のエンジン車のスクーターである「Booster」とリレーションを感じられるスタイリングデザインを実現している。レンダリングスケッチを図6に示す。



図6 レンダリングスケッチ

カラーイングはシアンをコミュニケーションカラーとし、シアンとダークグレーの2タイプを準備した。カラーリングスケッチを図7に示す。

■著者



原 素行

Motoyuki Hara
ランドモビリティ事業本部
SPV事業部
第2開発部



Maurizio Ghezzi

YMRE¹⁾
Engineering div.



Cristiano Proserpio

YMRE¹⁾
Engineering div.



Roberto Redaelli

YMRE¹⁾
Design div.



Marco Ferrario

YMRE¹⁾
Design div.

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

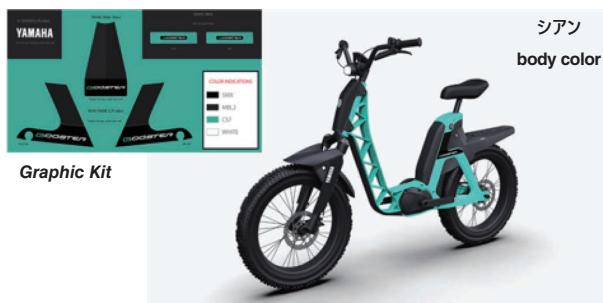


図7 カラーリングスケッチ

7 おわりに

本モデルは商品としても開発スキームにおいてもヤマハらしいが詰まった魅力的なモデルである。

- ・ 一目でヤマハと分かるスタイリングデザイン
- ・ スムースで快適な走行性能
- ・ グローバルスキームでのモデル開発

本モデルが欧州のコミューター領域で広く受け入れられ、当社のグローバル e-Bike 市場でのプレゼンスの拡大に貢献することを確信している。

あつたらしいな、から生まれた 電動アシスト自転車「PAS」バッテリー対応 USB アダプター「moriba」

USB adapter "moriba" for "PAS" electrically assisted bicycle batteries,
born from thinking about what would be nice to have

夏目 良介 堀内まり



Abstract

Yamaha Motor Electronics Co., Ltd. (hereinafter referred to as "the Company"), headquartered in Mori-machi, Shuchi-gun, Shizuoka Prefecture, has been responsible for the manufacture of drive units for the "PAS" electrically assisted bicycle for 30 years since its initial sales launch. From April 2022, the Enshu Morimachi Station on the Tenryu Hamanako Railway has been referred to as "Morimachi, home of PAS," in an effort to contribute to the local community and achieve greater recognition of Yamaha Motor products through "PAS". The Company's first original brand product moriba is also an item that bears this belief as a "PAS"-related accessory.

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)は静岡県周智郡森町に本社を構え、電動アシスト自転車「PAS」の販売開始当初より30年間に渡りドライブユニットの製造を担っている。2022年4月より天竜浜名湖鉄道遠州森町駅の愛称名を「PAS のふるさと森町」として取得し、「PAS」を通して地域社会への貢献とヤマハ発動機製品の認知向上の実現を目指す取り組みを行っている。自社初のオリジナルブランド商品「moriba(もりば)」も「PAS」関連アクセサリーとしてこの思いを背負ったアイテムである。

2 開発の背景・狙い

「moriba」の企画背景には、近年の災害激甚化による防災意識への高まりがある。2022年9月、内閣府が行った防災に関する世論調査にて、災害時の被害を少なくするため重点をおくべき

対応について、国や自治体などによる『公助』が9.3%にとどまったのに対し、"自分の身は自分で守る『自助』に重点をおくべき"とする人が28.5%と大きく上回る結果となっている。『自助』の観点から欠かせないのが"非常用電源"の存在である。

「PAS」のバッテリーを非常用電源として活用できないか?人々の暮らしに安心を与える存在となることを目指し、「moriba」の企画開発が始まった。同時に、当社にとって完全自社開発品の立ち上げは、創業以来初であり、製販技が一体となり開発販売を実現した。

本稿では「moriba」の企画・開発概要を紹介する。

3 開発の取り組み

3-1. 市場調査

試作品1(表1・図1)を作成し、製品実現性は見えたが、販売実現性検証のためには、1次データを得て検証する必要があった。消費者の選定ポイントや競合との差別化要素、ターゲット

あつたらいいな、から生まれた電動アシスト自転車「PAS」バッテリー対応 USBアダプター「moriba」
**USB adapter "moriba" for "PAS" electrically assisted bicycle batteries,
born from thinking about what would be nice to have**

層の属性や嗜好性を明らかにし、それらを把握した上で、“コンセプト(防災用に加え、レジャーでの使用をどのくらい想定するべきか)”、“仕様”を決定するため、外部調査機関を通し、
1. オンラインアンケートによる定量調査 2. グループインタビューによる定性調査を行った(調査対象は、試作品1に対しては正点を加えた試作品2(表2・図2)である)。

3-1-1. 試作品

表1 試作品1(企画、実現性検証用)

目的	企画、実現性検証用
筐体	3D プリンタで製作
基板	汎用品の組合せで製作
サイズ	130mm × 126mm × 96mm
重量	623g
機能	USB タイプ A × 4、シガーソケット × 1
評価	サイズ・重量の見直し、 バッテリーと筐体の結合の実現 (バッテリーを装着した状態で移動できる)



図1 試作品1外観

表2 試作品2(市場調査用)

目的	市場調査用
筐体	簡易型で製作
基板	汎用品の組合せで製作
サイズ	110mm × 100mm × 70mm
重量	300g
機能	USB タイプ A × 2、シガーソケット × 1

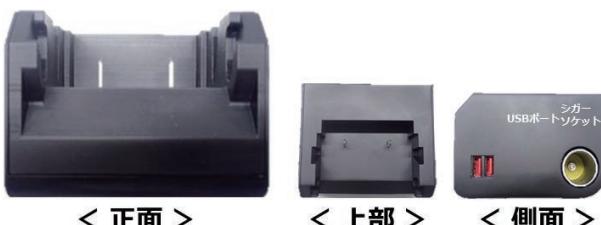


図2 試作品2外観

3-1-2. 定量調査(アンケート調査)

**「あつたらいいな」から生まれたバッテリーアダプタ
“くらし”を豊かに “あんしん”を身近に
たった+1アイテムで、遊びも防災もばっちり！**

<正面>

<上部>

<側面>

電動アシスト自転車バッテリー専用アダプター

USBポート シガーソケット

バッテリー 用アダプター

<結合機能>

<広がる利用シーン> 例：スマートフォン充電、防災の使用

部外部 利用者の範囲
ヤマハモーターエコノミクス

サイズ	110mm×100mm×7mm
重さ	300g
USB数	AIR × 2
シガーソケット	DC24V
バッテリー	シガーソケット
接続端子	有
装着方法	縦型装着
急速充電	急速充電専用 2時間充電可能 充電池専用充電器 (専用ACアダプター) (専用USB充電器)

図3 コンセプト資料

表3 定量調査条件

調査期間	2021年11月30日～12月8日
調査対象	1,652人
調査方法	オンラインアンケート

3-1-2-1. 新製品の受容性

メインターゲットと想定される電動アシスト自転車ユーザーは約6割が購入意向を示す結果となった。魅力点としては、防災や遊びの両方で使える、複数充電 / 急速充電できることの機能や、電動アシスト自転車用バッテリーを取り付けるだけで使用できる目新しさ、ポータブル電源と比較しての手頃な価格が評価された。目新しさがある一方で、製品自体の認知度が低い(このような機能を持つ製品の存在を知らない)ことも明らかになつた。

3-1-2-2. 購入意向者プロファイル

どのようなシーンでの使用を想定するかの問い合わせに対しては、“防災グッズ”的回答が最も多く、日常での使用よりも、非常時の使用を想定されることが分かった。

購入意向者の傾向は、“価格”に加え、“バッテリー容量”“安全性”“充電時間”を購入時重視しており、“防水性”“デザイン”“シガーソケット”に対する関心は低い傾向が見られた。

3-1-3. 定性調査(グループインタビュー)

表4 定性調査条件

調査期間	2022年1月13日
調査対象	70,000人へのスクリーニング調査を実施し 電動アシスト自転車ユーザーかつ USB アダプター購入意向有ユーザーを選定 男性グループ5名 女性グループ5名
調査方法	グループインタビュー

定量調査(表3)で得られた結果をより具体的に深掘りし、検証するため、1. コンセプト表現(魅力に感じる点)2. 利用シーン(非日常(防災)、日常どちらのニーズが強いか)3. 最適スペックの検討として実際にモック品を手に取っていただいた印象、シガーソケット要否、安全性評価視点の定性調査(表4)をした。結果、保有するバッテリーを「PAS」の動力以外に利用できるコンセプトに対して前向きな反応が見られ、サイズ感や重量についても受容性が見られた。利用シーンは、多くの意見をいただいたが、やはり“防災グッズ”として利用したい意見が多数であった。企画開発の段階で争点となっていた“接続規格=シガーソケット要否”については認知度にばらつきが見られ、利用の幅も含め不明点に挙げる参加者が多く、商品の理解度を阻害する懸念が見られた。

3-1-4. 商品コンセプト・仕様の決定

市場調査において、“持っていると『おまもり』のような存在になる”との声を頂き、いざという時のおま“もり”、“もり”まち、“ば”って一用アダプターから、「moriba(もりば)」をネーミングし、コンセプトは“防災”に特化する方向性が固まった。

最終仕様(表5)は、需要度の低さ、利用シーンや利用可能者が限定的になると、USB でのスマホ充電が最重要ニーズとしての認識の高さの結果が得られたことにより、シガーソケットを削除し、USB アダプター2口とした。これにより、小型化・軽量化も実現可能となった。バッテリーを装着した状態での安定性に修正を加えること(筐体形状の見直し)、また、防災製品としての付加価値を高め、競合との差別化を図るために、LED ライトを機能として追加することに決定した。

表5 最終仕様(主要諸元)

サイズ	100mm × 120mm × 580mm
重量	200g
装着方向	縦
結合機能	有
機能	USB タイプ A × 2
最大定格出力	DC5V 1.5A
防水性	非防水(IPX3生活防水実力値)

3-2. 製品開発

3-2-1. 新商品の超短期開発

市場のニーズに1秒でも早く応えるため、プロジェクト方針決定から半年で生産開始を実現する目標が設定された。過去経験のない短期開発を実現させるため、上流段階から設計・生産技術・品質保証・調達部門で連携を取り、開発を進めた。

課題となったのは、調達性課題をクリアできる電子部品の選定である。生産開始まで入手できる部品という制約の中で回路設計を行った。電流保護用 IC(USB 端子出力の過電流、または USB 端子出力が短絡した場合、電流を制限し USB アダプター回路および充電デバイス(スマホ等)が破損することを防止するために必須)については生産開始まで入手可能な IC の選定が難航し、複数回に渡り、回路設計の見直しを行い、プロジェクトチーム内の連携のもと、入手可能な IC での設計を実現した。

3-2-2. デザイン

商品コンセプトである『おまもり』となるような温かさをデザイン・ロゴでも統一感を持たせた。設計者による機能優先の形状は無機質になりすぎてしまう懸念があったが、設計部門以外の自社社員によるデザインを採用し、“チームでの自社開発”にこだわり、実現させた。

3-2-3. 品質保証

USB アダプターを国内で販売する場合、規格・認証取得は不要だが、「moriba」は防災をコンセプトに持つ製品ということもあり、簡単には壊れない耐久性が求められる。具体的な目標値と信頼性評価条件は、使われ方検証・QFD(品質機能展開)を実施して設定した。

バッテリー同様、感電の危険を回避するため、水気のある場所での使用は禁止し、ラベルおよび取扱説明書で注意喚起している。

3-3. 防災製品等推奨品マークの取得

顧客が防災関連製品を購入する際重視する“安心感・安全性”で選びやすくするため、“一般社団法人防災安全協会”が災害時に役立つ防災製品に対して推奨する防災製品等推奨品マークを取得した。本認証は防災安全協会により、防災分野において有益な活用が可能で防災安全協会により定められた安全性、機能性、利便性に寄与する製品として認証された際に付与される。これらを証明するエビデンスを用意し、プレゼンを実施し、災害時、電動アシスト自転車を有効活用できる有用な製品であると認められ、“合格”に至った。これにより、災害時に役に立つ製品であることが、より明確に顧客に伝えられるようになった。

4 おわりに

災害に対する不安、災害対策への意識が高まるとともに、電動アシスト自転車の市場規模も年々拡大している。市場での使われ方も、個人ユーザーのみならず、シェアサイクルや企業、自治体での保有など、より多くの人にとって身近になってきている。2017年3月総務省「災害時における情報通信の在り方」に関する調査では、熊本地震(2016年)の避難所における携帯電話等の充電状況において、半数以上の方がスマホの充電を必要としていたにもかかわらず、満足にできない、もしくは全くできない環境下であったことが分かる結果となっている。「moriba」は、個人ユーザーの備えとしてだけでなく、企業や自治体が保有することで、災害発生時の仮設充電スペースを作ることを可能にし、社会インフラとしての貢献の可能性も持っている。より多くの人々に安心を与え、暮らしを豊かにするアイテムとなっていくことを願っている。

■著者



夏目 良介
Ryosuke Natsume
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



堀内まり
Mari Horiuchi
ヤマハモーター
エレクトロニクス株式会社
機能統括部
経営企画部

操船システム「Helm Master EX」バウスラスター連携

“Helm Master EX” with Integrated Bow Thruster

内藤 克俊 田形 彰大



出典:2023 Yamaha Helm Master® EX with Integrated Bow Thruster – YouTube^[1]

Abstract

The “Helm Master EX”^[2] has some features that have helped it gain popularity since its release: (1) sideways control with a joystick, which allows even a novice operator to easily berth/launch, (2) dynamic positioning, a convenient feature while fishing, which holds the boat's location and/or heading according to the situation, and (3) Autopilot, which automatically follows a set path. However, there are some issues such as not being able to reach the expected level of performance under certain environmental conditions. This is due to the fact that, as with any boats, not only the bow is susceptible to being caught by the wind, but it is also difficult to control the bow with an outboard attached to the stern. The bow thruster is a motor attached to the bow, which has long been used predominantly to facilitate berthing/launching by controlling the bow using a dedicated control panel. Traditionally, the most common thruster type has been one that is controlled by toggling between “stop” and “fully open.” There has been an issue with these on-off type thrusters - i.e. they can only be used for a short length of time (a few minutes) due to large amperage causing voltage drops, and overheating. In addition, the majority of those thrusters are controlled by analog signals, and because it is difficult to control them externally, they have not been integrated with other systems such as for assisting boat operators. However, some thrusters which have been commercialized in recent years are a proportional (variable speed) type and controlled by CAN (controller area network) signals. Therefore, they can be used for a longer length of time and controlled by a source outside the bow thruster manufacturer's system. Against this background, we saw the possibility of integrating these new types of thrusters with the “Helm Master EX” to raise the levels of its existing features, and set out to develop a bow thruster integration feature.

1 はじめに

「Helm Master EX」^[2]は初心者でも容易に離着岸できるジョイスティックによる横移動や、釣りがしやすいうように状況に応じて位置または方位、あるいはその両方を保持する定点保持機能、

設定した経路に対して自動で追従してくれるオートパイロットを搭載しており、販売開始以来好評を得ている。しかしボートの特性上船首が風に流されやすいため、船尾に取り付けられる船外機で船首をコントロールするのは難しいため、環境条件によっては期待した性能が発揮できないなど課題を抱えている。

バウスラスターは船首に取り付けられたモータで、専用のコントロールパネルで船首を制御して主に離着岸を容易にするために昔から用いられてきた。従来はON/OFFタイプと呼ばれる停止か全開かの2択で制御するスラスターが主流で、大電流による電圧低下やオーバーヒートにより数分程度の短時間しか使用できないことが課題であった。また、アナログ信号による制御が主流であり、外部からのコントロールが困難なため操船アシストなどの他のシステムとの連携には使われてこなかった。しかししながら近年プロポーショナル(回転可変)タイプかつCAN(Controller Area Network)信号で制御するタイプが登場し、長時間の運転やバウスラスタメーカーのシステム外からのコントロールが可能となり、「Helm Master EX」と組み合わせることで「Helm Master EX」が保有する機能のレベルアップができると考え、バウスラスター連携機能の開発を行った。

2 開発の狙い

前述のように「Helm Master EX」の課題を補うためにバウスラスター連携を行うこととしたが、既存「Helm Master EX」ユーザが新規システムに変更しないで済むように容易にアップグレード可能とした。またスラスターの機能を最大限活用できるように、ジョイスティック、定点保持、オートパイロットなど多彩な機能と統合を行い、性能UPとインターフェースの統合により、初心者でもスラスターを意識せずに自動で制御を行うようにした。また従来3rd Party上のシステムからしか確認できなかつたスラスター用バッテリーの電圧やフェールなどのスラスター関連の情報を「Helm Master EX」でも表示できるようにすることにより安心して使えるシステムとした。

3 商品の特徴

3-1. 簡単にスラスター連携をアドオン

既存「Helm Master EX」ユーザがシステムを大幅に変更することなく簡単にバウスラスター連携を追加できるように、「Helm Master EX」とスラスターシステムを繋ぎ制御するスラスタードライバとシステム間を接続するハーネスのみでアップグレードできるようにした(図1)。

対象の「Helm Master EX」のグレードはオートパイロットキットもしくはジョイスティックキットである。前者はオートパイロットの機能で進行方向を保持する機能のHeading holdのみであるが、後者はジョイスティック操船時、定点保持時にもバウスラスター連携が機能する。



図1 「Helm Master EX」と VETUS 社システムの接続

3-2. スラスターによる機能向上

「Helm Master EX」とスラスターの連携による効果を下記に示す。

3-2-1. ジョイスティック機能

「Helm Master EX」にてジョイスティック1本により船を前後、左右に移動させたり回頭させたりすることができるジョイスティックシステムを提供してきた。

しかし、より風や潮流下での操船を容易にするため、横移動や回頭時のさらなる性能向上が望まれている。本システムでは、船外機と合わせ、スラスターを駆動させることにより、横移動時に船外機により発生するモーメントを打ち消すとともに横移動推力を向上、また回頭時の推力向上を実現した(図2、表1)。

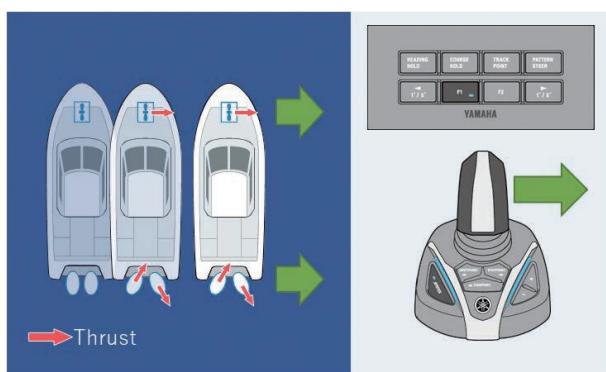
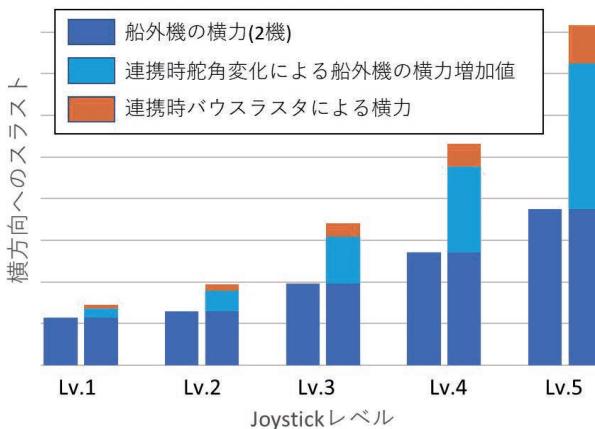


図2 スラスター連携時の横移動イメージ

表1 スラスター連携による横移動性向上



3-2-2. 定点保持機能

定点保持では位置もしくは方位、その両方を保持してくれる機能となる。従来船外機艇では船首が風下に流れやすく、船外機は船尾に取り付けられる構造上、船首をコントロールするのが難しい。これに対しスラスタを用いて方位調整を行うことにより、船首方位の振れを小さくするとともに、回頭時に発生するロールの低減や、前進もしくは後進方向への推力発生がなくなることで、位置保持精度、保針性能の向上を実現した(図3、4)。

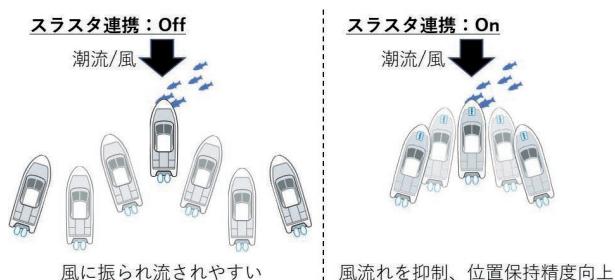


図3 FishPoint (Bow) 動作イメージ

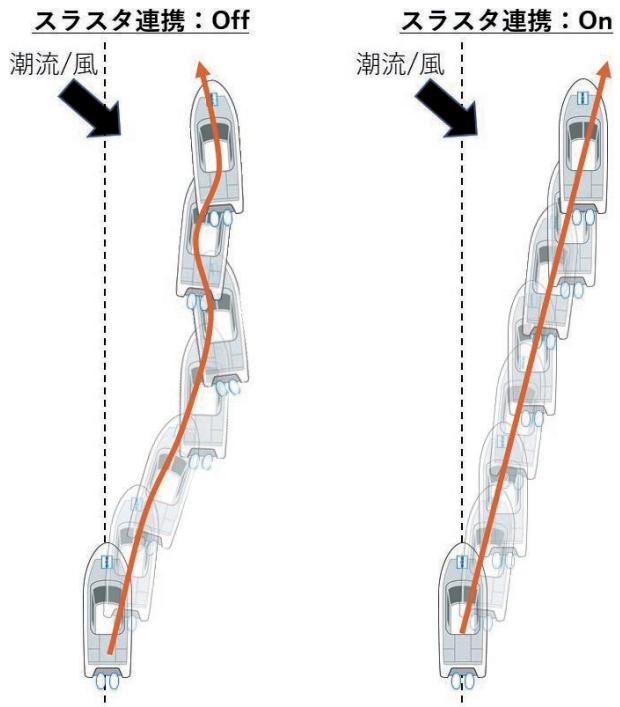


図5 方位保持動作イメージ

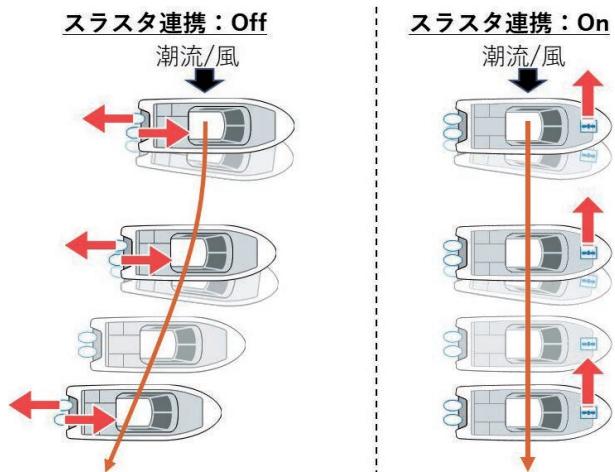


図4 DriftPoint 動作イメージ

3-2-3. オートパイロット機能

オートパイロットは自動で舵角を制御して針路などを保持してくれる機能である。操舵によりボートがどういった動きをするかは風や潮流など様々な要素により変わってくるが、低速航行時は舵部分に受ける流圧が小さく、舵効きが悪くなることが知られている^[3]。一方でスラスタは低速航行時には効果を發揮するが、速度が上がるにつれ性能が低下してしまうことが知られている。

本システムにおいては、速度に合わせ舵とスラスターを組み合わせて制御することにより、保針性を向上するとともに無駄舵やスラスター負荷の低減を実現した(図5)。

3-3. 3rd Party 製スラスタの採用

バウスラスタ連携で使用するスラスタはヤマハ製ではなく市場に流通しているVETUS社製の「BowPro」シリーズを使用することとした^[4](図6)。理由としては、①ヤマハはバウスラスタを商品ラインナップに持っていない中でVETUS社はすでに他社ディーゼルエンジンとバウスラスタ連携の実績があり早期市場が実現できること、②VETUS社製のバウスラスタは耐久性、オーバーヒート耐性が高く「Helm Master EX」との連携においても信頼性が高いこと、③市場にすでに流通しているバウスラスタを使用することによりボートビルダー、ディーラーでの入手性、ボートへの取り付け方法を変更せずに済むことの3つがある。



図6 VETUS 社「Bow Pro」シリーズのスラスタとコントローラ

3-4. 安心して使用してもらうために

スラスターは接岸や離岸の際に使用するが、「Helm Master EX」と組み合わせて動作させることにより、従来に比べ使用頻度が増えることが考えられる。

スラスターの長時間使用は、スラスターのバッテリー電圧低下やオーバーヒートを引き起こすこともあり、ユーザが安心して快適に使用できるシステムを実現するためには、走行中に意図せぬ動作にならざるを得ない。

そこで、船外機の情報表示が可能なディスプレイ（「CL5」およびMFD（マルチファンクションディスプレイ）インターフェース）にてスラスターの電圧情報などを表示することで状態を確認しやすくするとともに、スラスターの警告発生時は、連携状態から連携無し状態へ制御を切り替えることで、艇体への挙動影響を抑えることとした（図7、8）。

また様々な機器との連携が求められる一方でシステムが複雑となり、市場でのトラブル発生時の要因特定は年々困難になってきている。スラスターと連携を行うにあたり、自社システムと他社システムで警告表示方法を切替えることにより、問題個所の特定をより容易に行うことができるようとした。

ダーやディーラー向け発表会で、非常に高い評価を頂いており、欧州以外からもスラスターとの連携について興味関心の声が届いている。

今後もスラスターとの連携に限らず、「Helm Master EX」をさらに進化させながら新しい価値を提供できるように開発を進めていく所存である。

■参考文献

- [1] 2023 Yamaha Helm Master® EX with Integrated Bow Thruster – YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=_Zq4yVQQ8M (アクセス日:2023/06/14)
- [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] スロー走行とは. <https://www.yamaha-motor.co.jp/marine/life/technique/drive/slow-running.html> (アクセス日:2023/05/26)
- [4] Press Release – Yamaha-VETUS Partnership. <https://vetus.com/news/press-release-yamaha-vetus-partnership/> (アクセス日:2023/05/26)

■著者



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



田形 彰大
Akihiro Tagata
マリン事業本部
開発統括部
システム開発部



図7 HelmMaster システム警告表示



図8 スラスター警告表示

4 おわりに

「Helm Master EX」では2020年の販売開始より、継続的な機能追加を行ってきた。「Helm Master EX」と他社の制御機器との連携としては第一弾となるが、欧州で行われたボートビル

船外機「F450A」の開発

Development of the "F450A" Outboard Motor

黒木 陽平



Abstract

The main market for large outboard motors is North America. In recent years, the trend towards larger boats and outboard motors with higher horsepower has been particularly significant. Previously, most large offshore boats (boats that sail the open seas) over 40ft. were powered by inboard motors; however, the introduction of high horsepower outboard motors has led to a rapid shift to outboard motors for these larger vessel types. This trend has increased the demand for larger boats to be powered by outboard motors, and there is a demand for outboard motors with even higher horsepower. In 2007, the largest size of boats equipped with outboard motors was around 36ft, but now it is over 65ft, with companies announcing the development of larger boats approaching 70ft, with no sign of stopping. To meet these market demands, Yamaha Motor introduced the "F425A" in 2018, which was well received in the market. However, there was a strong demand for outboard motors with even higher horsepower, and the "F450A" was developed to meet this demand.

In this development, the new boat not only has higher horsepower, but also a large-capacity power generation system to supply sufficient power to various navigational devices and on-board equipment, which has increased with the size of the boat. In addition, the unit is designed to give users an even higher quality boarding experience by providing merchantability as a new flagship model through measures to enhance the value of the "HelmMasterEX" integrated ship handling system, a new exterior design that creates a sense of luxury, and improved quietness that directly affects the user's five senses.

1 はじめに

大型船外機の主要市場は北米であるが、特に近年は搭載艇の大型化と搭載船外機の大馬力化の流れが著しい。以前は40ftを超えるような大型オフショア艇(外洋航行するボート)の

動力は船内機がほぼすべてであったが、大馬力船外機の導入によってこれら大型ボートも船外機化が急激に進んでいる。この流れにより、さらに大型のボートも船外機化の要望が高まり、船外機のさらなる大馬力化が求められている。この潮流は加速感を増しており、2007年には36ft程度が船外機搭載艇の最大

サイズであったが現在では65ftを超える、さらに70ftに迫る大型艇の開発もアナウンスされており、依然として止まる気配を感じない。

このような市場要望に応えるためにヤマハ発動機では2018年に「F425A」を投入し、市場で好評を博した。しかし、より大馬力の船外機を求める声は根強く、これに応えるために「F450A」を開発することとなった。

今回の開発ではただ大馬力化するだけではなく、ボートの大容量化に伴い増加した種々の航海機器や船内装備へ十分な電力を供給するための大容量発電システムを採用した。また、統合操船システム「HelmMasterEX」の価値を高めるための対応や、高級感を演出する新たな外観デザイン、ユーザーの五感に直結する静粛性向上などにより、新フラッグシップモデルにふさわしい商品性を実現し、ユーザーにさらなる上質なボーティング体験を与えることを目指した製品である。

2 開発の狙い

本モデルでは、新フラッグシップモデルとして現行「F425A」との明確な違いを打ち出すべく、主に下記6項目を織り込むことで商品性向上を狙った。

- ・ 排気システムを一新することによる出力向上
- ・ 高まるボート電力需要に対応する大容量発電システム採用による充電量向上
- ・ “聞いて分かる”大幅な静粛性の向上
- ・ ユーザーの利便性を向上させる操作システムの採用(表1)
- ・ 最小限の重量増加による現行「F425A」搭載艇への影響回避
- ・ 新フラッグシップモデルを意識させるデザイン(図1)



図1 F450A

3 商品の特徴

開発の狙いでも述べたように、本モデルはハイパワーで好評を博している現行「F425A」の良さを最大限に生かしつつも、明確な違いを打ち出せる製品を目指して製品仕様を決定し、開発を行った。また、現行他モデルに採用された先進機能を余すことなく取り入れることで、最新のフラッグシップモデルとしてお客様に納得してもらえる仕様としている。

表1 F425AとF450Aの主要諸元比較

モデル名	F425A	F450A
エンジン形式	4ストロークV型8気筒 DOHC	
排気量	5,559cm ³	
ボア×ストローク	96mm × 98mm	
圧縮比	12.2:1	12.3:1
重量(25")	442kg	447kg
ギヤ比	1.79(25/14)	
燃料	無鉛プレミアムガソリン	
ステアリング方式	フル電動内蔵ステアリング	
高効率排気構造	—	○
トータルチルト	—	○
内蔵プロペラライト	—	○
大容量発電システム	一部地域のみ	全仕向地
3Dグラフィック	一部グラフィック	全グラフィック
内部配線	—	○
吸気サイレンサー	—	○
シフト音低減制御	—	○

3-1. パワーユニット

本エンジンは、「F425A」のパワーユニットをベースに基本諸元を変更することなく高出力化を実現するために、新設計のヘッドシリンダーおよび排気構造を採用している。

ヘッドシリンダーにおいては、体積効率向上のために高流量吸気ポートへ変更した。さらに排気バルブ径拡大、ポート形状最適化、通路拡大による抵抗低減によって燃焼室内残留ガスを低減させている。

排気構造では、徹底した排気干渉抑制を狙って排気プランチ長を最適化した新設計の排気管を採用した(図2)。これはモノ作りの面からも大きな挑戦となる複雑構造となっており、社内初の3Dプリンタ中子を用いた量産モデルとなった。

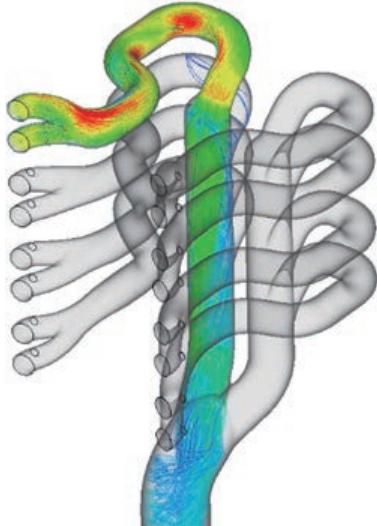


図2 「F450A」排気構造

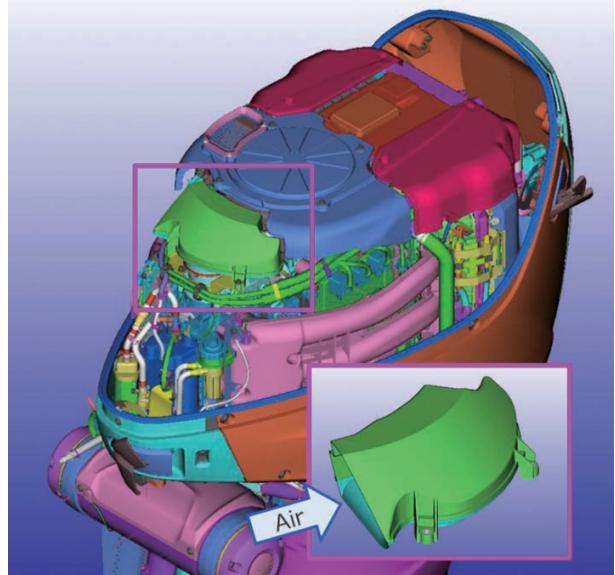


図3 「F450A」のサイレンサー

3-2. 静肅性向上

静肅性向上のために、まずはベースモデルである「F425A」を徹底的に調査し、寄与率の大きい部品・経路の明確化を行った。この結果より、高速航行時の騒音で最も寄与率の大きい吸気騒音を低減させるため、容積型サイレンサー(図3)を採用した。サイレンサーは容積が大きく吸入口が小さいほど消音効果が高くなるが、それに比例してエンジンが空気を吸い込む際の吸気抵抗も大きくなるため出力面では不利となる。本モデルのサイレンサー設計では解析と実機検証のループを回すことでの最適形状を追求し、出力向上と静肅性改善という背反関係にある2要素の両立を実現した。

また、航走時以外のシーンでの静肅性を向上させるためにシフトノイズ低減にも取り組んだ。船外機では全開運転を多用する商品特性から、全開運転時の駆動力伝達ロスが無いドッククラッチという金属の爪と爪がダイレクトに噛み合う構造(図4)を採用している。このため、シフト時に金属の爪と爪が噛みあつた瞬間に金属音(シフトノイズ)が発生する。出力が大きいほど噛み合った瞬間の衝撃も大きくなるため、大型船外機になるほどシフトノイズも大きくなる。この衝撃を小さくするために、シフト時のエンジン回転数をできるだけ抑えるような新しい制御を開発し、シフトノイズを大きく低減することに成功した。この効果は特に、統合操船システム「HelmMasterEX」を装備した多機掛け艇におけるジョイスティックでの操船時に顕著に發揮される。

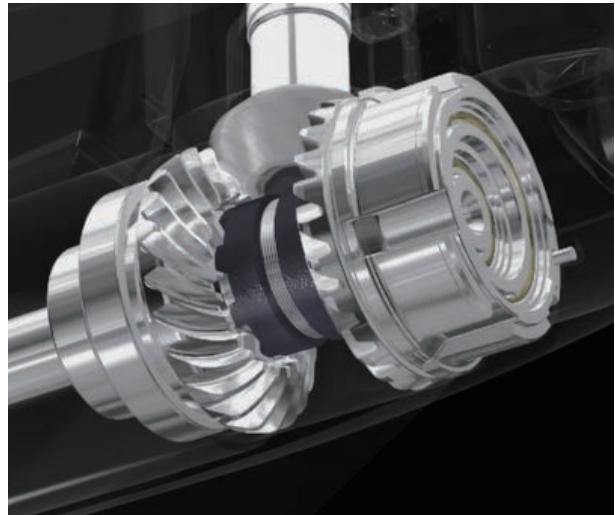


図4 ドッククラッチ構造

3-3. 新たな外観デザイン

そもそも船外機は様々なデザインのボートに搭載されるため、あまり船外機単体で目立つような外観は避ける必要があり、幅広く受け入れながらも特徴的であるという難しいデザインが求められる製品である。また、本開発ではベースモデルが存在することから船外機そのもののサイズや構造は決まっており、大幅な造形変更はせずに「F425A」の外観をうまく踏襲するという前提条件もあった。

「F450A」では、リアパネルにヤマハの象徴である音叉やYの字をモチーフにしたさりげなくもヤマハをアピールする造形を加えた(図5)。さらに全てのロゴを立体グラフィック化することで新フラッグシップモデルとして主張できるデザインとなっている。

さらに細部にこだわり、これまで船外機では外観に位置するにもかかわらず外観対象として顧みられることのなかった水洗ホースやパワートリム & チルト配線を内部配線化して見えない構造にし、「F425A」の一部既存部品の材質を変更して表面性状を改善した。側面のYAMAHAロゴをより美しく見せるために、表面の曲面形状を最適化して新作するなど、目立たない部分にまで手を抜かずこだわり抜くことで、シンプルでありながらも高級感あふれる外観を実現している。



図5 音叉とYの字モチーフのリアパネル

■著者



黒木 陽平

Yohei Kuroki

マリン事業本部

開発統括部

先行開発部

4 おわりに

「F450A」はヤマハ発動機の大型船外機としては現時点で我々がもつ全ての技術を結集させた一つの集大成である。しかし同時に、今後の開発機種にとっては通過点でしかない。常にお客様に選ばれるヤマハ船外機であり続けるためにも、このモデルの完成に安堵して足を緩めることなく前に進み続けることが必要である。

今後もマリン事業のビジョンにあるように、世界中の人々の豊かなマリンライフに貢献できるよう、選ばれ続ける優れた製品を数多く市場に送り出していきたい。

新フラッグシップエンジン搭載「FX-HO」の開発

Development of "FX-HO" Equipped with the New Flagship Engine

逸見 恭彦 諸田 高一郎 清水 聰 松浦 聰史 河井 健二朗 鈴木 正吉 板橋 鷗馬



Abstract

Yamaha Motor Co., Ltd. (hereinafter referred to as "the Company") has developed the PWC (Personal Water Craft) (Figure 1) and the SB (Sport Boat) (Figure 2) equipped with waterjet propulsion systems and has launched these products into the market. Two types of basic engine platforms (hereinafter referred to as "PF") are combined with four types of hull PFs for PWC's and SB's, through variation development such as supercharging and catalyst mounting to develop products that meet a variety of needs. This time, the high-output PF engine was fully remodeled for the first time in 15 years. This paper introduces the initiatives in the development of PWC's representative model "FX HO".

1 はじめに

ヤマハ発動機(株)(以下当社)では、ウォータージェット推進機を備えるPWC(Personal Water Craft)(図1)とSB(Sport Boat)(図2)を開発しお客様に提供している。

エンジンは2種類のプラットフォーム(以下PF)を過給、触媒搭載などのバリエーション開発を行い、PWC、SBそれぞれ4種類の艇体PFに組み合わせ、様々なニーズに合わせた商品展開を行っている。

今回15年ぶりに高出力PFエンジンのフルモデルチェンジを行った。本稿ではPWCの代表モデル「FX HO」を取り上げ開発の取り組みを紹介する。



図1 Personal Water Craft



図2 Sport Boat

2 開発の狙い

開発の狙いは以下二つを設定した。

1. 軽量、コンパクト、高出力、高信頼性の現行エンジンを正常進化させ、商品競争力を強化し、今後の基軸となる素性の良いエンジンを開発する。
2. 合わせて艇体(ジェットポンプ・制御)の開発により新エンジン投入のインパクト最大化を狙う。

狙いを達成するための、エンジン、艇体の開発内容について説明する。

3 エンジン開発内容

1. 高出力(性能開発):次世代エンジンPFとして、業界最大排気量の4気筒現行1.8Lをベースに、さらに1.9Lへ排気量をUPするとともに、吸気と排気と燃焼室形状の見直しでPWC用自然吸気エンジンではNo.1となる146kwを達成した。
2. 軽量、コンパクト:PWCにおいてエンジン重量とエンジン

- 全長は運動性能に大きく影響する。原動機周りの新規設計により各部に軽量化設計を採用し、エンジン総重量で3kgの軽量化を実現した。
3. ヒートバランス最適化：性能向上による熱負荷増加に対応するため冷却システムを改良し、エンジンのヒートバランスを最適化した。
 4. エンジン外観：新エンジンであることを象徴的に表現するために新しいエンジンカバーを開発した。

図3にエンジン諸元を、図4に外観図を、図5にエンジン性能を比較した図を示す。

	Current Model	New Model
Engine Type		L4
Bore	86mm	88mm
Stroke	78mm	78mm
Engine Displacement	1,812cm ³	1,898cm ³
Maximum Power	125kw/7600rpm	146kw/7600rpm
Maximum Torque	159.3Nm/6852rpm	185Nm/7353rpm
Engine Weight Dry	107kg	104kg

図3 エンジン諸元

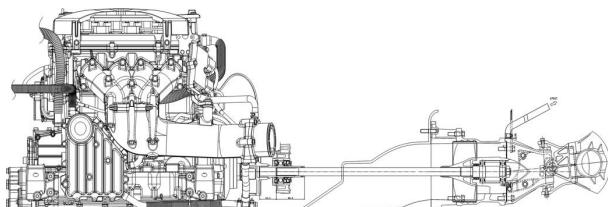


図4 機関外観図

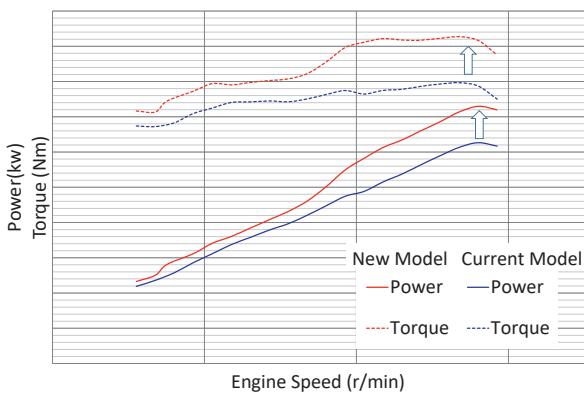


図5 エンジン性能曲線

3-1. 性能開発

現行エンジンからの馬力アップを達成するために吸気系・ヘッドシリンダ・動弁系・排気系の改良を実施した。性能シミュレーション GT-Power と実機の脈動解析を活用して効率的に

開発を行った。

吸気系はスロットルバルブと吸気通路の大径化で通気抵抗を低減しつつ、吸気ポート管長・径・サージタンク容積の各パラメータを最適化することで脈動効果を使って大幅な馬力アップを達成した。

ヘッドシリンダでは吸気ポート形状の改良と燃焼室形状の変更でバルブ周辺の空間を広げて吸気効率を向上させた。

排気系は排気干渉の低減と、慣性効果の向上を狙って集合形状を見直した。従来の4-1集合から4-3-1集合に変更し、干渉を抑えつつ管長を長くすることでコンパクトな排気系を維持したまま性能向上させた。

図6に現行モデルと新型モデルの排気形状の比較を示す。

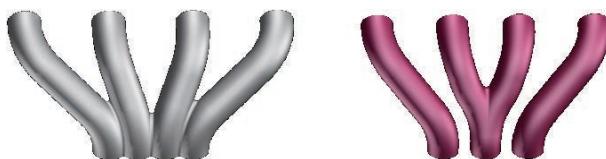


図6 排気系の改良(左:現行モデル、右:新型モデル)

これらのアイテムに合わせたバルブタイミングの調整も含めると、排気量アップ以外の改良により性能向上分の7割近くを占めている(図7)。

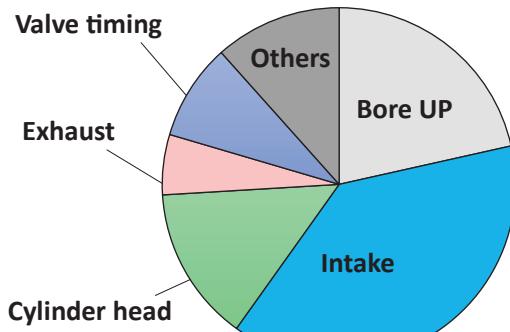


図7 性能開発アイテムと寄与割合

3-2. 軽量_コンパクト

高出力を狙うため、ボアアップおよびストロークアップの検討を行った。性能、エンジンサイズ、重量、コスト、設備等の最適バランスを考慮し、ボアを2mmアップさせ、排気量を1,898cm³に拡大した。

ライナは強度が25%高い材料を使用することにより薄肉化を可能にし、エンジン全長を変えることなく、さらに740g/台の軽量化を実現した。

ピストンはボアアップしたにもかかわらず、ランド裏の肉抜き等によって、6%の軽量化を実現した。

図8にクランク廻りの断面を示す。

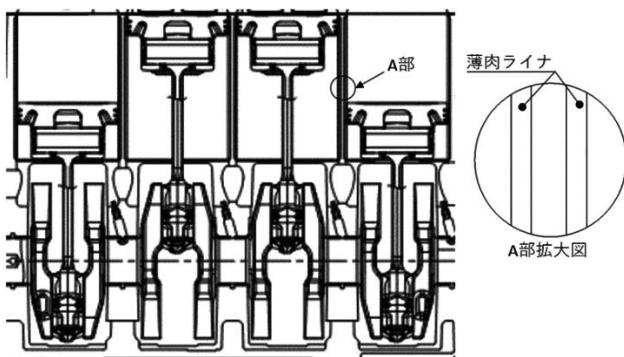


図8 クランク廻り断面

3-3. 冷却システム

性能向上による熱負荷増加に対応するため冷却システムを改良した。冷却システムの基本構造は海水や淡水など外部から直接冷却水を取り入れる構造を取っている。部品構成がシンプルである一方、冷却水温度が一定ではないため温度コントロールに工夫が求められる。

現行エンジンはヘッドシリンダとシリンダブロックを並列に冷却しているため、本来コントロールが必要なシリンダブロックの温度も冷却水温度に左右されてしまう課題があった。

新エンジンではヘッドシリンダに先行して全水量が流れるように直列な冷却経路に変更した(図9)。さらに、サーモスタットの設置箇所をヘッドシリンダからシリンダブロックにすることでシリンダブロックを過冷却しない構造に変更し、安定した温度コントロールを実現した。

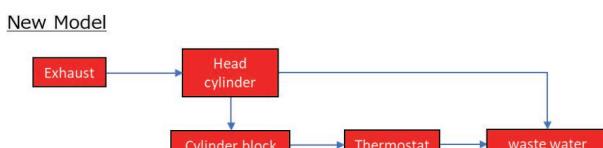
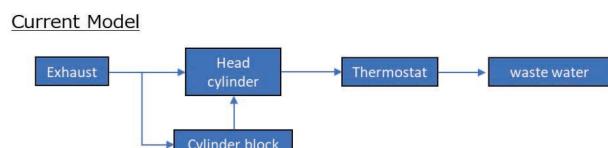


図9 冷却水経路

また、燃焼室に関しては燃焼室の肉厚の変更と排気ポート間が冷却されるように形状変更することで、最大で21%の温度低減を達成し、高出力化に対応した(図10)。

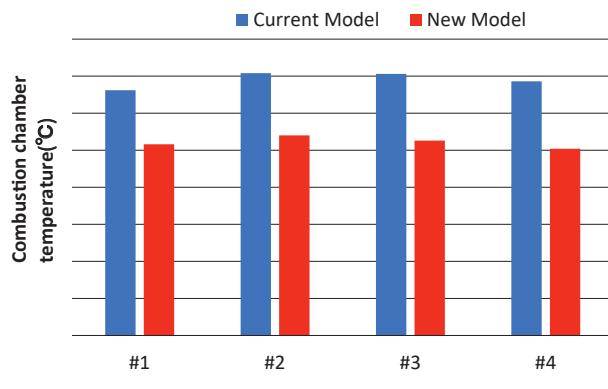


図10 燃焼室温度 新旧比較

3-4. エンジン外観

“Crossbar Concept”的デザインコンセプトを基に、力強さのみならず、先進性、環境への配慮も感じさせるエンジンカバーを開発した(図11)。

カバーは2つの部品で構成され、カバー1はクリーンで新鮮を感じさせるホワイトとし、新たに高輝度着色材料を開発した。カバー2は、当社のCO₂削減、環境負荷低減に対する取り組みを具体化する一環として、量産部品では世界で初めて木材を原料とするCNF(Cellulose Nano Fiber)をPPに添加した材料を開発し採用した。



図11 エンジンカバー

4 艇体開発内容

二つ目の開発の狙いである、新エンジン投入のインパクト最大化を狙い、艇体は以下3つを重点化し取り組んだ。

1. 大排気量から期待される加速性能の向上
2. 快適性を向上させるための騒音低減
3. エコモード等商品性を向上させるドライブコントロールの進化

4-1. 加速性能の向上

エンジンの出力アップを最終的に製品としてどのように生かすのかはジェットポンプの味付けによって変わってくる。本モデルでは業界最大排気量から期待される力強いトルク感を表現するために、最高速度を上げることよりも加速に焦点をあて、インペラを新設計し性能を向上させた。図12に加速性能の旧モデルとの比較を示す。

雑誌などで頻繁に比較されるアイドリングから50km/hまでの到達時間を25%向上させた。

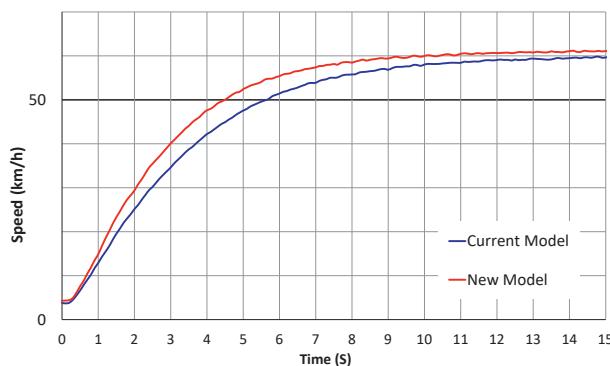


図12 加速性能新旧比較

4-2. 騒音の低減

静肅性は乗船時の快適性を決める要素の1つである。PWCにおいて乗ることそのものを楽しむ用途から、ツーリングやフィッシングなど使われ方の多様化もあり静肅性向上の要求が高まっている。

事前の騒音寄与率調査により、運転手耳元への騒音は300Hz以下の排気音が支配的だと分かった。新FXでは300Hz以下の音圧を下げ、かつエンジン出力に影響を及ぼさない排気系の開発を行った。

音響解析を用いて音響モード、減衰レベルを確認しながら排気系の構造最適化を行った。新排気系の主な変更点はキャッチタンク容積拡大、ウォーターロック構造変更、レゾネーター追加である。これにより300Hz以下の大幅な減衰増加を達成した(図13)。

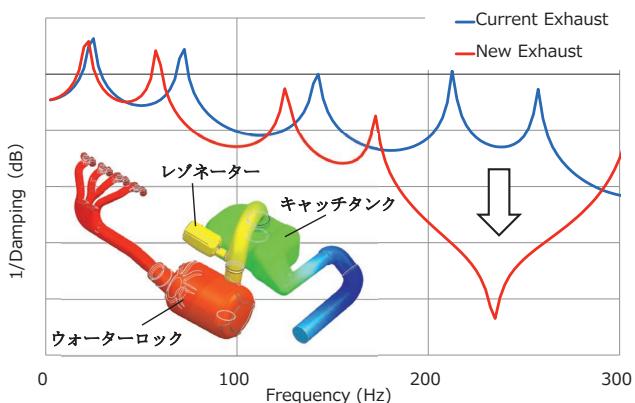


図13 排気系音響解析による新旧比較

図14は新エンジンを搭載した艇の新旧排気系の騒音レベル比較結果である。新排気系は現行排気系に比べて大幅な騒音低減を実現した。

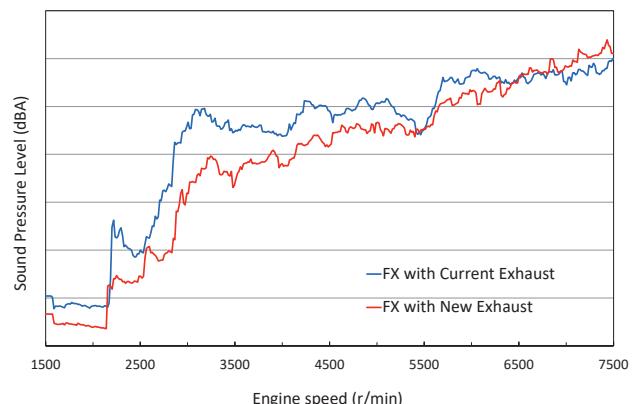


図14 乗船者耳元騒音 新旧比較

4-3. 進化したドライブコントロールモードの開発

新エンジンの搭載と合わせて、従来から当社の得意とする艇体制御をさらに進化させて、よりお客様が使いやすい新たなモード選択型ドライブコントロールを開発した。

新しいモード選択型ドライブコントロールでは、従来個別に設定する必要のあった速度・加速と艇体ピッチ角を制御するトリム機能をワンタッチで切替することが可能となった。

選択できるモードはEconomy/Performance/Comfort/Towの4種でありお客様の使用するシチュエーションに合わせて最適に設定された運転パターンを提供する。

今回新たに長距離クルージングなど、低燃費を望むお客様のためにEconomyモードを開発した。Economyモードを選択すると、急激な燃料消費を抑える加速制御、燃費の良い速度でコンスタントに航走できる速度制御、さらに速度域に応じて最も船体抵抗の小さい艇体ピッチ角に保つ姿勢制御の3つを

自動で調整する。

各モード時には図15で示すように表示色も変えて、選択している機能を分かりやすく伝える工夫も行った。



図15 各モード時のホーム画面

■著者



逸見 恭彦

Yasuhiko Henmi

マリン事業本部

開発統括部

艇体開発部



諸田 高一郎

Koichiro Morota

マリン事業本部

開発統括部

エンジン開発部



清水 聰

Satoshi Shimizu

マリン事業本部

開発統括部

エンジン開発部



松浦 聰史

Satoshi Matsuura

マリン事業本部

開発統括部

エンジン開発部



河井 健二朗

Kenjiro Kawai

マリン事業本部

開発統括部

エンジン開発部



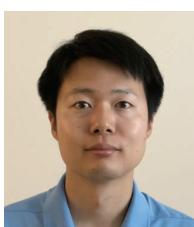
鈴木 正吉

Masakichi Suzuki

マリン事業本部

開発統括部

艇体開発部



板橋 嶼馬

Ryuma Itabashi

YJBM⁽¹⁾

1)YJBM: Yamaha Jet Boat Manufacturing U.S.A., Inc.

5 おわりに

当社では発動機という社名が示す通り、様々な形式のエンジンが様々な商材で使われており、それは会社を支える貴重な財産となっている。

本開発が正式にスタートするまでには、今後何年にも渡って使い続けるエンジンのベースはどのようなものであるべきか数年に渡り模索を行った。最終的にPWC、SBの専用エンジンである旧PFをベースに進化させることが最適であると結論付けた。

開発を終え振り返るにその選択は間違いではなく、今後厳しくなっていく環境規制下におけるベースとなり、将来を支える基軸エンジンができたと自負している。

スポーツボート「255 FSH SPORT H」への 「Helm Master EX」搭載

Yamaha adds "Helm Master EX" on "255 FSH SPORT H" Sports Boats

三浦 宏信 高川 翔



Abstract

Yamaha Motor Co., Ltd. (hereinafter, The Company) offers the sports boat category (SB) equipped with water jet propulsion systems, which generate propulsion by sucking water from beneath the boat and pumping it out backward. SB is classified into two sub-categories: the Family Fun (FF) models (Figure 1) which is a runabout boat that provides a space for families to relax on a wake board or similar craft out at sea, and the Family Sport Hybrid (FSH) models (Figure 2) which is a center console boat designed mainly for fishing use. For FF models, the "275SDX"^{[1][2]} announced in 2023 is equipped with the steering assistance system "DRiVE X". The "DRiVE X" is a new system that makes it easier to leave and arrive at the dock by placing buttons for using various functions around the steering wheel for intuitive operation, enabling the operator to steer the boat without removing both hands from the steering wheel (Figure 3). This advanced steering assist system was rolled out to FSH models as well, to make the SB more of a premium brand and to expand the market size. This paper introduces the "Helm Master EX"^[3] ("HM EX"), which is equipped in the 25ft FSH model "255 FSH SPORT H".

1 はじめに

ヤマハ発動機株式会社(以下、当社)は船底から水を吸い込み後方に噴き出すことで推進力を得る、ウォータージェット推進機を備えたスポーツボート(以下、SB)を提供している。

SBには家族でWake Boardなどの引き物や海上でリラック

スできる空間を提供するランナバウト艇のFamily Fun(以下、FF)モデル(図1)と、より釣り用途を意識したセンターコンソール艇のFamily Sport Hybrid(以下、FSH)モデル(図2)の2種類のカテゴリーに分類される。



図1 Family Fun モデル



図2 Family Sport Hybrid モデル

FF モデルは2023年に発表された「275SDX」^{[1][2]}に操船アシストシステム「DRIVE X」を搭載した。

「DRIVE X」とは直感的操作を実現させるためにステアリング周りに各機能を起動させるボタンを配置し、ステアリングから両手を離さず操船を行うことを可能とすることで離着岸を容易にさせる新しいシステムであった(図3)。



図3 DRIVE X ステアリング

この高度な操船アシストシステムを FSH モデルにも展開し、SB のプレミアム化と市場規模の拡大を図った。

本稿では、その25ft FSH モデル「255 FSH SPORT H」に搭載する「Helm Master EX」^[3](以下、「HM EX」)について紹介する。

2 開発の狙い

FF モデルと FSH モデルでは操船席周りのテイストが異なり、それぞれに適したデザインを採用している。また、操船ポジションにも違いがある。FSH は外洋など、比較的波のある環境で使用することが想定されるため立ち姿勢である。一方 FF は湖などでの使用がメインであるため椅子に座った姿勢で操船する。

よって、それぞれの使い勝手、デザインに適した仕様が求められ(図4、5)単純に FSH モデルに「DRIVE X」を移植するわけにはいかなかった。



図4 FSH モデル



図5 FF モデル

このため「255 FSH SPORT H」には、すでに当社の船外機で開発され、多くの船外機センター・コンソール艇に搭載されている「HM EX」の JOYSTICK(図6)を採用し、FSH モデルの用途に合わせた操船システム開発を行い、「HM EX」の搭載実現を狙った。



図6 「HM EX」の JOYSTICK

3 仕様と技術の特徴

3-1. 「HM EX」機能

「HM EX」の機能について紹介する。船外機艇すでに採用されている「HM EX」の制御システムをベースに前進／後進、横移動、旋回を実現した。「HM EX」の機能(図7)について、「HM EX」に搭載されている JOYSTICK MODE のボタンを押すことでモードを遷移することができる。

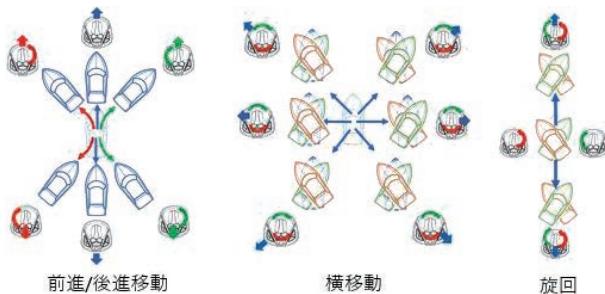


図7 「HM EX」の機能

前進／後進は JOYSTICK レバーを前／後方向に倒すことで倒した角度に対応してエンジン回転数が上がり、JOYSTICK レバーを倒した状態で捻ることで前／後進の（状態を維持した）まま船の方位を変更することができる。

横移動は JOYSTICK レバーを左／右に倒すことで倒した方向に船を平行に横移動することができる。また、横移動中に JOYSTICK レバーを斜め前方に倒すことで斜め移動となり、JOYSTICK レバーを捻ることで横移動しながら船の方位を変更することができる。

JOYSTICK レバーを真横に倒している状態で船が横移動中に旋回もしくは斜め前進／後進方向に移動してしまう時は、JOYSTICK MODE のボタンを長押しすることで JOYSTICK MODE での横移動時のキャリブレーションを行い真横に移動するように調整することができる。

旋回は JOYSTICK レバーを中央位置で捻ることで機能が有効となり、捻った方向に対して旋回を行う。また、JOYSTICK レバーを捻った状態で前後左右に倒すことで船を旋回させながら JOYSTICK レバーを倒した方向に移動が可能である。

潮流や風の影響を受ける時などは土ボタンを押すことで推力が5段階まで調整可能となり、想定される条件下でも潮流や風に押し戻されない推力を実現することができている。

基本となるシステムは「DRIVE X」をベースとしながら、「DRIVE X」のステアリングスイッチの替わりに「HM EX」の JOYSTICK を MCU（操船アシストコントロールユニット）と接続する構成となっている（図8）。

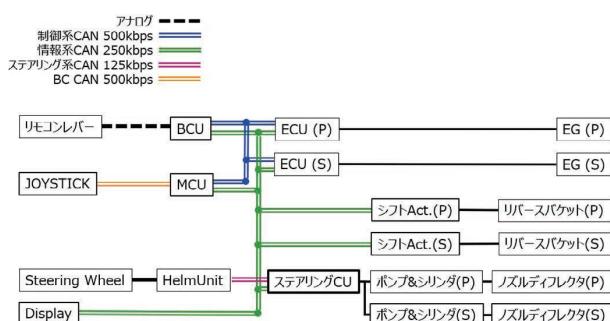


図8 システム構成図

3-2. 「HM EX」開発

船外機の「HM EX」を SB に横展開する上で、SB のエンジン、ジェットポンプの特徴に合わせた制御適合を行った。SB のスロットル開度の特性上、JOYSTICK レバーの操作に比例してエンジン回転数を上げた場合、船が動き始める速度が速いため、JOYSTICK レバーの倒し始めのスロットル開度指令を調整し JOYSTICK レバーを倒した量に対し徐々にエンジン回転数が

上がるよう設定した。

推進器を2基搭載している船の横移動を行うためには、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に向か、2基の合計推力を真横に向ける必要がある（図9）。

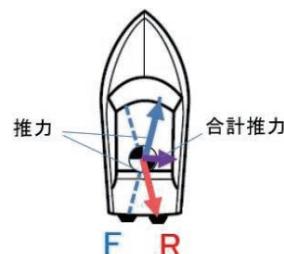


図9 横移動原理

そのため、2基のエンジン配置は横移動性能に大きく影響する。船のレイアウト上、2基のエンジン間隔を大きく確保できないため、潮流や風の影響下でも横移動速度を確保するためにエンジン回転数を上げることで調整を行った。その結果、「275SDX」同等の横移動速度を確保した（図10）。

Lateral Movement Speed

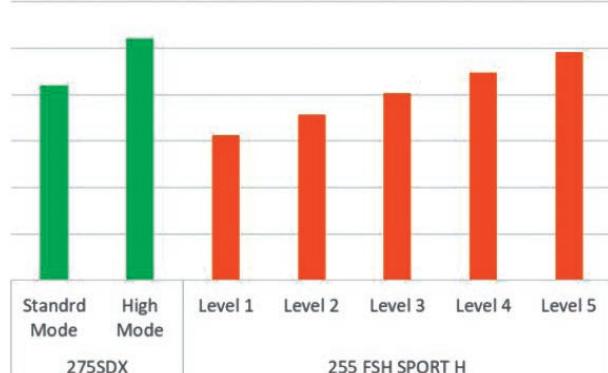


図10 横移動速度比較

「255 FSH SPORT H」の船の特性上、旋回性が良く、横移動開始時から合計推力が重心に対して真横になる舵角で推力を発生させると船が旋回しながら横移動してしまう。そこで、横移動開始時のジェットポンプの舵角を適正角度より浅い角度で開始し徐々に広げるように調整を行うことで横移動開始時に旋回することなく横移動を可能にした。また、横移動中の旋回操作時、左右の旋回速度が同等の速度となるように舵角の制御量を調整し横移動中の旋回操作性を向上させた。

斜め前方向に移動するためには後進側の推力を下げるか前進方向の推力を上げる方法がある。後進方向の推力を下げる方法は横移動の推力を下げてしまうため、後進方向の推力を

最大推力で固定し前進側の推力を調整することで斜め前後方向への移動を可能にした。

船を前進／後進している状態から斜め方向に JOYSTICK レバーを倒し横移動状態に遷移した場合、遷移してすぐにエンジン回転数が最大エンジン回転数になってしまふため船の挙動がユーザーの感覚と異なってしまう。そのため、前進／後進移動から横移動モードに遷移した場合のみ、一度エンジン回転数を下げた後、ゆっくりエンジン回転数が上がるようになる(図11)ことで JOYSTICK レバー操作時に起きた急激な挙動の変化を抑え安心感を残しつつ直感的な操作感を提供することを可能とした。

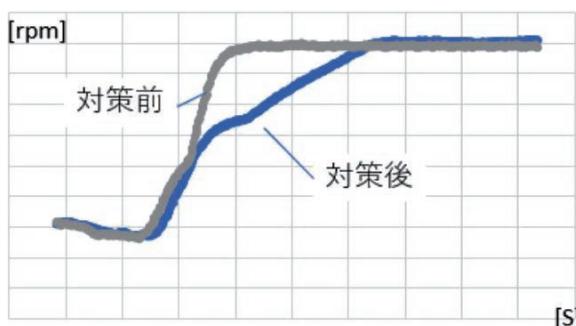


図11 エンジン回転数比較

3-3. ディスプレイ

7インチの液晶ディスプレイ上に、「HM EX」動作中の船の動きが一目で分かる Pop-up tips を採用した。

ディスプレイ上に表示される基本動作は「DRIVE X」を踏襲しつつ、JOYSTICK の各操作モードに対応する Pop-up tips を表示する改良を施し、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12)。



図12 ディスプレイ

3-4. 操船性能

リバース回転数を高い状態で調整可能としたことで「275SDX」と同等の横移動性能を実現させ、離着岸をより容易にさせることを可能とした(図13)。

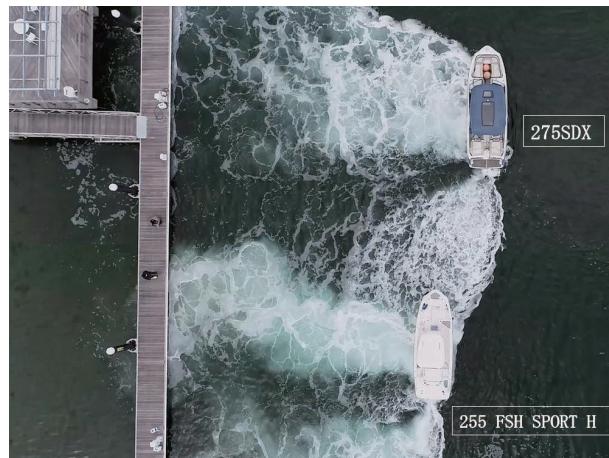


図13 横移動

上述した制御適合より、低速領域での前進／後進の回頭性も向上し、離着岸を含めた低速操船時の操作性をより容易にさせ「275SDX」と同等以上の低速操船(蛇行の軌跡)を可能とした(図14、15)。



図14 前進スラローム



図15 後進スラローム

4 おわりに

「HM EX」の搭載により SB FSH モデルのさらなるプレミアム化と市場規模拡大に貢献することを確信している。

さらにこれらは当社のマリン版 CASE 戦略^[4]の一環の技術

であり、引き続きシステムの進化と改良に取り組み提供価値を高め、お客様に選び続けられる商品を提供していきたい。

■参考文献

- [1] ヤマハ発動機製品サイト(275DX-マリン製品) <https://www.yamaha-motor.co.jp/marine/lineup/boat/275sdx/>
- [2] 村山卓弥, 竹若誠人, 沼田裕貴 : フラッグシップスポーツボート「275SDX」の開発, ヤマハ発動機技報, No. 57(2022) https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/product/pdf/browse/57ss04.pdf
- [3] ヤマハ発動機製品サイト(船外機-マリン製品) <https://www.yamaha-motor.co.jp/marine/lineup/outboard/>
- [4] ヤマハ発動機企業サイト(2022年マリン事業説明会資料) https://global.yamaha-motor.com/jp/ir/library/report/pdf/2022/Presentation_Jp.pdf

■著者



三浦 宏信
Hironobu Miura
マリン事業本部
開発統括部
艇体開発部

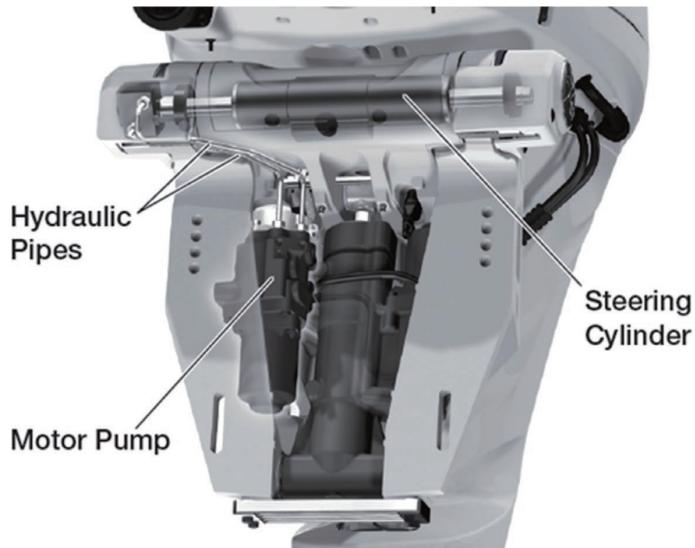


高川 翔
Sho Takagawa
マリン事業本部
開発統括部
艇体開発部

「F200」船外機用ブラケット内蔵ステアリングユニット

Bracket-internal Steering Unit for "F200" Outboard Motor

高木 秀明 野村 晃平 松永 卓真



Abstract

Yamaha Motor Hydraulic Systems Japan, Inc. (YHSJ) develops and manufactures electro-hydraulic products such as power tilt and trim (PTT) for outboard motors for Yamaha Motor (YMC) as well as hydraulic products such as shock absorbers for four-wheel and two-wheel vehicles. YHSJ also offers a wide range of products, including electro-hydraulic products that can contribute to the mechanization of agriculture to customers. In 2014, we introduced the product of the platform PTT for the "F115" outboard motor^[1]. PTT is a component part consisting of a motor pump unit and a cylinder. In the marine market, needs are diversifying as the market size expands, and expectations are growing for simple and inexpensive products that allow boats to be steered comfortably and easily through integrated control.

This paper introduces a bracket-internal steering unit developed by applying PTT technology to meet the above market needs.

1 はじめに

ヤマハモーターハイドロlickシステム株式会社(以下、YHSJ)は、ヤマハ発動機(以下、YMC)向け船外機用パワーチルト&トリム(以下、PTT)に代表される電動油圧製品、四輪・二輪のショックアブソーバなどの油圧製品を開発製造している。また、農業の機械化に貢献できる電動油圧製品など、幅広い商品をお客さまへ提供している。

2014年には船外機「F115」用プラットフォーム PTT の製品紹介をした^[1]。PTT はモータポンプユニットとシリンダで構成されたコンポーネント部品である。

マリン市場では、市場規模の拡大とともにニーズの多様化が進み、シンプルで安価な製品から船を統合制御により快適に簡単に操船できる製品への期待が高まっている。

本稿では、上記市場ニーズに応えるべく PTT 技術を応用して開発したブラケット内蔵ステアリングユニットについて紹介する。

2 開発の狙い

本モデルの開発コンセプト “150/200馬力に普及できる内蔵SBW(ステアバイワイヤ)船外機” を実現するため、YMC と YHSJ の共同開発でステアリングシステムを新設計することとし、システムサプライヤーとして以下の4項目を開発の狙いとして定めた。

- ・価格競争力を持つ内蔵 SBW を開発する
- ・リギング性／省スペース性を実現するため、軽量・コンパクトなブラケット内蔵ステアリングユニットを開発する

- SBW／手動油圧ステアリングシステム、どちらのシステムにも対応できるユニットを開発する
- PTT技術を応用し、信頼性の高いステアリングユニットをいち早くお客様に提供する

3 商品の特徴

3-1. ブラケット内蔵ステアリングシステム

既存の300馬力帯以上の大型船外機で採用している電動 SBW システムでは、モータを含むアクチュエータと SCU(ステアリングコントロールユニット)を一体化して船外機のブラケット内に収めている。

対して、本システムでは従来3本シリンダタイプとしていた PTT を新設計により200馬力帯で初めてシングル PTT 化することで、生み出したスペースにステアリング用モータポンプをレイアウト可能にした。また SCU も新設計、別体としてカウル内に収めることで、旧モデル(6DV)に対して高さを変えずセットバックのみで SBW 化を実現している(図1)。

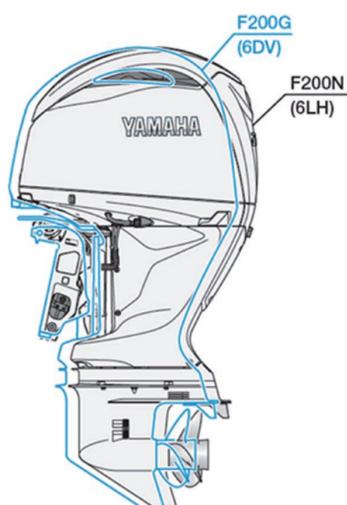


図1 F200船外機 外形比較

新規開発したSCUにおいては、既存の四輪EPS(エレクトリックパワーステアリング)用コントローラと基本設計を同一にしつつ、他モデル、他商材への展開が可能な汎用性を持たせることで信頼性確保と数量効果によるコスト低減を実現している。

また、エンジンECU(エレクトロニックコントロールユニット)や既存の各船側コントローラ(電子ヘルム、リモコンECU、BCU(ボートコントロールユニット))、と相互通信が行えるようになることで、ヤマハ独自の次世代ボート制御システム「HELM MASTER EX」※の各機能を使用可能とし、独自のフェールセーフ機能も実現している。ステアリングシステム全体図を図2に示す。

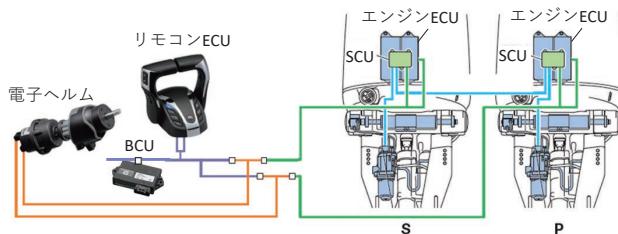


図2 ステアリングシステム全体図

さらに、ヤマハ船外機としては初めてステアリング制御も自社開発を行い、油圧を介さない上位の電動 SBW モデル同等のステアリング応答性を達成した。これら一連の制御開発にあたってはオートコーディング手法を活用することで、開発効率向上と制御モデルの可視化に貢献している。

ステアリングのリンク構造は、電動油圧 SBW 仕様と手動油圧仕様でリンク比を変えることでそれぞれ最適な転舵トルクと転舵速度を出せる設計とした。

SBW モデルでは隣接する2つのリンク軸部に舵角センサを配置し、互いの差を制御値として使用することでノイズや温度ドリフトによる影響を排する構造とした。

手動油圧モデルではリンク部にボルトオンでタイバーを接続できる構造とすることで、2機掛けを可能としている(図3)。

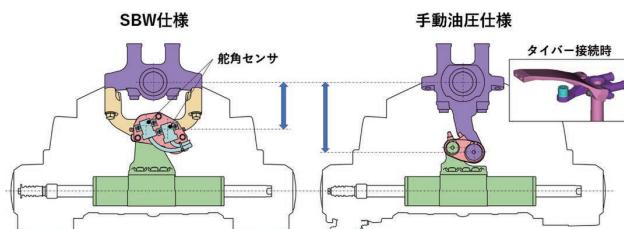


図3 リンク仕様

ステアリングの性能目標値を設定するにあたっては、既存の200馬力船外機で様々な航走パターンにおける必要な転舵トルクと転舵速度を SCU の制限電流値内で実現できることと置き、これを達成している(図4)。

また、低温時でも電流制限を満足することや市場での入手性を考慮してオイル選定を行い、Shell テラス S2V15を推奨オイルとして設定した。

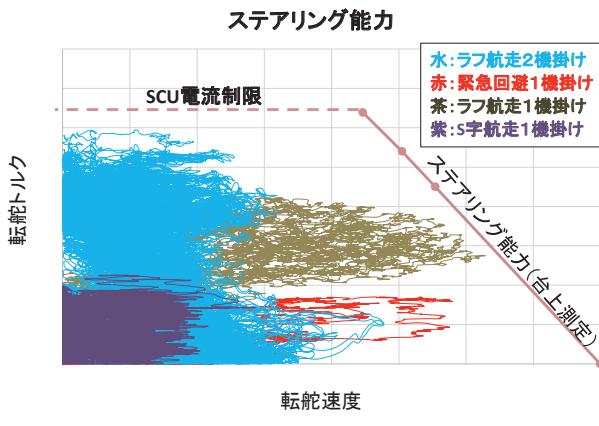


図4 ステアリング能力

※ ヘルムマスターEX - マリン製品 | ヤマハ発動機
<https://www.yamaha-motor.co.jp/marine/lineup/outboard/helmmasterex/>

3-2. 油圧ステアリングシリンダ

油圧ステアリングシリンダは、船側の手動ステアリングポンプからくる油圧ホースと接続することで手動油圧ステアリングシステム(図5-1)として、SCUとモーターポンプを接続することで電動油圧SBWシステム(図5-2)として機能する。

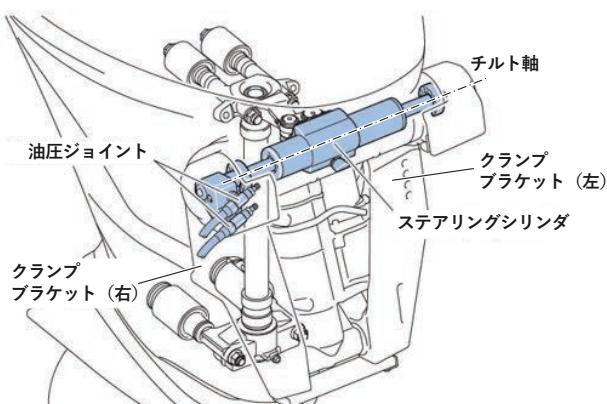


図5-1 手動油圧ステアリングシステム

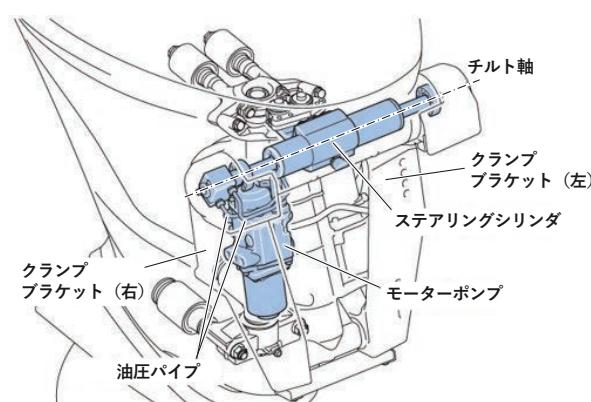


図5-2 電動油圧 SBW システム

下記にステアリングシリンダに織り込んだ新技術について説明する。

- ・船外機の高さを変えないようチルト軸にレイアウトした(図5-1、図5-2)。
- ・ロッド内を複簡化し、ロッドとパイプの隙間、パイプ内のオイル通路とすることで、油圧ポートを片側のジョイントに集約した(図6)。
- ・シリンダとジョイントの相対回転を可能にすることでチルトアップや転舵時にホースが動かなくなり船尾スペースを広く確保した(図6)。
- ・スルーロッド化により、転舵力／転舵速度の左右差をなくし、自然な操作感を実現した(図6)。
- ・シリンダ上部に溜まるエアを狙って吸う機能を持つプレートを設定することで、転舵するだけで自動的にエアが抜ける構造とした(図6)。
- ・ピストンシールを新設計することで、従来のシールに対して最大で50%のフリクション低減を実現した(図7)。

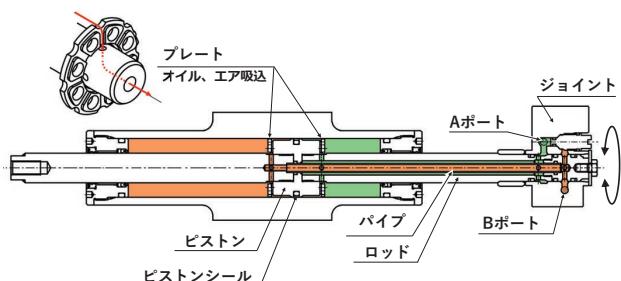


図6 ステアリングシリンダ構造

往復作動中の摩擦特性

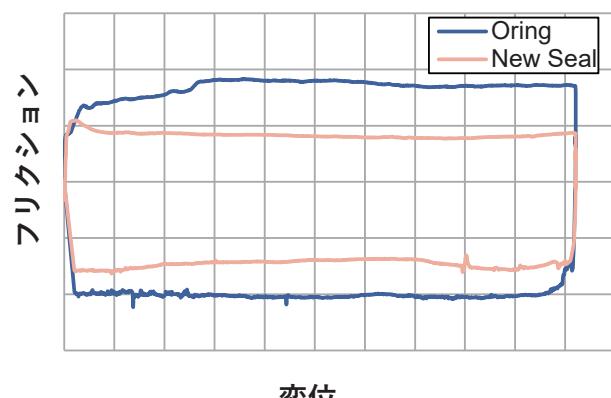


図7 往復作動中のフリクション特性

3-3. 電動油圧ステアリングモータポンプ

電動油圧ステアリングモータポンプは、油圧ステアリングシリンダにパイプとジョイントを介し接続することで作動を可能とする(図8)。

下記に電動油圧ステアリングモータポンプに織り込んだ新技術について説明する。

- ・電流制限と低温作動性を満足するために圧力損失を低減する必要があり、低粘度オイル Shell テラス S2V15 を採用したが、背反として内部リークにより高圧化が難しくなるという課題がある。そこで、内部リーク低減と抵抗低減を高次元で実現するポンプ精度とした。
- ・メンテナンス性を考慮し、オイルタンクを最上部に配置し、材質にはオイル量の視認を可能とする半透明樹脂を採用した(図8)。
- ・モータ過熱保護は、PTT のバイメタルスイッチによるメカニカルな保護からソフトサーマル保護に変更し、安定性とコストダウンを両立した(図8)。
- ・モータ、ポンプ等(図8)の構成部品は既存品を流用し、ものづくりを共通化することでコストダウンを実現した。
- ・他商材、他モデルへの展開を意識し、汎用性を持たせるため、二点締結構造とした(図8)。

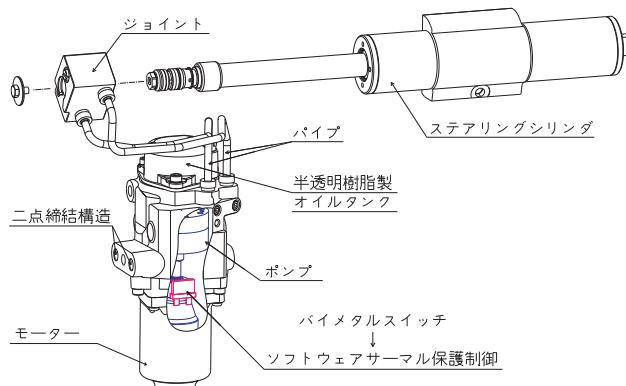


図8 電動油圧ステアリングモータポンプ接続図

3-4. 静謐性

ステアリングは、エンジン音が小さい着岸離岸時の使用やオートパイロットなど人が意図せず動作するシーンが多いため、PTT に対して作動音が目立ちやすい。そのため、以下のような作動音低減に対する取り組み(図9)を行った。

- ・ポンプとハウジングへのノックピン追加による芯合わせ
- ・ポンプ閉じ込み溝形状変更による閉じ込み圧低減
- ・モータとポンプのカップリングを樹脂化することによる接触音低減

・ギヤポンプの歯数を20→12歯に変更し、かみ合い周波数を下げることによる聴感改善

・モータ内のウェーブワッシャを追加し回転子を与圧することでガタを無くし低周波音低減(図10)

しかし、上記項目の採用にあたっては、構造の中でどの要素が効いているのか暗中模索からのスタートであった。

また、音圧や周波数を数値の上で低減しても狙い通り官能評価で評点が良くならない場合があった。目指すべき音、作動音メカニズムは今後の課題として設定し、静音技術を向上し強みと言えるよう要素開発を進めていく。

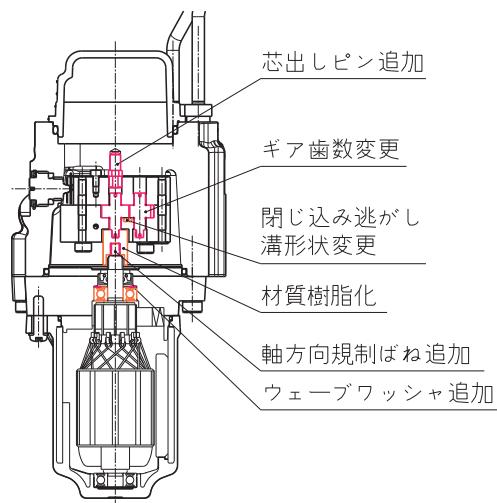


図9 作動音低減対応

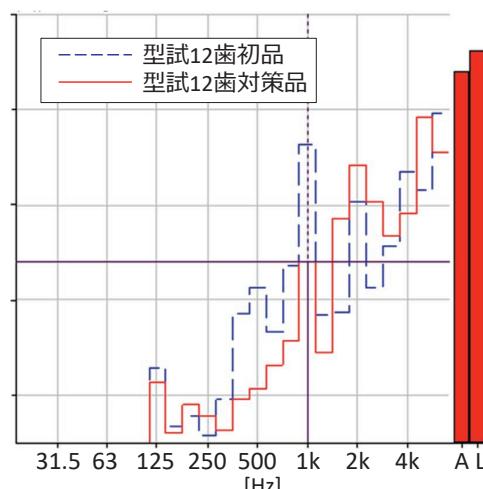


図10 静音化効果確認

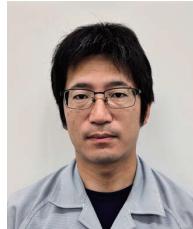
3-5. 信頼性

- 信頼性に対する取り組みを下記に説明する。
- PTT のシリンダ製法では鋳造を使用することが多い。
鋳造では鋳巣が内在する可能性があり、鋳造方案の工夫や検査にて実害ないレベルに管理している。今回のステアリングシリンダでは、異形アルミ押出成形を採用したことにより、鋳巣による漏れの可能性を排除し、強度の向上も実現した。
 - モータポンプユニットが異常停止した場合でも、マニュアルバルブを開閉することで船外機を手動転舵で帰港可能とするフェールセーフを設定した。
 - 筐体ごとにシリアルナンバーを与え、個々のユニットと船外機をトレーサビリティ管理システムに連動させることで、トレースバック、トレースフォワードを可能とした。

■著者



高木 秀明
Hideaki Takagi
ヤマハモーター・ハイドロリック
システム株式会社
技術戦略部



野村 晃平
Kohei Nomura
マリン事業本部
開発統括部
システム開発部



松永 卓真
Takuma Matsunaga
ヤマハモーター・ハイドロリック
システム株式会社
開発部

4 おわりに

手動油圧ステアリングと電動油圧 SBW を同一ブラケット内で作り分けることができるシステムは業界初であり、この構造によって機能や価格帯ごとの多様なニーズに柔軟に応えることが可能となった。

本開発においては、油圧ステアリングシリンダ、電動油圧モータポンプ、シングル PTT といった YHSJ 製油圧部品と、BRKT クランプやスイベル、SCU などの YMC 船外機部品の新規同時開発が必要であった。これまで経験がない分野で、かつ技術的・日程的にも非常に難度の高い開発であったが、単なる会社対会社の協業関係を超えて助け合い、互いの開発領域にも積極的に関与し合う融合関係を築けたからこそ、成し遂げることができたと感じている。

本ブラケット内蔵ステアリングユニットは、ヤマハ発動機ライバーの中で2023年技術開発賞を受賞することができた。これは“新しい価値への挑戦”に対する取り組みへの評価と捉えている。

今後もお客様の期待を超え、感動を提供できる製品を YHSJ、YMC 一体となって継続して開発していく予定である。

■参考文献

- [1] 浦野 真樹:「船外機用 PTT(F115用)プラットフォームモデル」、ヤマハ発動機技報 2014-12 No. 50

2024年モデル ROV「YXZ1000R SS/MT」

2024 model ROV, "YXZ1000R SS/MT"

磯田 敬 新堀 雅秀 鈴木 知美 福嶋 健司 大畑 忍 平田 剛



Abstract

Principally in North America, the ROV (Recreational Off-Highway Vehicle) market enjoys high demand with its wide range of uses from agricultural and dairy farming work to recreational uses such as hunting and trail driving, as well as for sport driving. Demand is expected to further increase in the future. To help cover the wide range of uses, Yamaha Motor has developed and launched the "VIKING", "WOLVERINE", and "YXZ" series of models since 2013. The drivability of the pure sport "YXZ1000R MT" model (equipped with a sequential manual five-speed transmission) was further enhanced in the "YXZ1000R SS" with the addition of the YCC-S (Yamaha Chip Controlled Shift) system. Yamaha Motor has pursued the evolution of this model to make it more friendly for a wide range of customers in the sport category. While CVT vehicles are the majority in the ROV market, we developed the new "YXZ1000R SS" as a 2024 model with the concept of "Making everyone feel the Direct Connection of sport riding".

1 はじめに

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

ピュアスポーツモデルである「YXZ1000R MT(シーケン

シャルマニュアル5速トランスミッション)」は、ヤマハ電子制御シフト(Yamaha Chip Controlled Shift、以下YCC-S)採用の「YXZ1000R SS」で操作性が向上し、スポーツ領域で幅広いお客様に使っていただくモデルとして進化してきた(ヤマハ発動機技報No.54「2019モデル ROV YXZ1000R SS/MT」参照)。

市場では Majority である CVT 車の高性能化が進む中、「YXZ」の DNA である Direct Connect を維持しながら、さらに様々なフィールドで、幅広いお客様にピュアスポーツモデルを楽しんで頂けるように、2024モデルとして「YXZ1000R SS」を開発した。

2 開発の狙い

"Make everyone feel the Direct Connection of sport riding."をコンセプトとし、これを達成するために下記3項目を開発の狙いに定めた。

1. より過酷な悪路を走破するための低速走行性能向上
2. ピュアスポーツキャラクターを維持しつつ、様々な技量のドライバーが「YXZ」を操るための利便性と快適性の向上
3. アクセサリの拡張性を上げるために発電容量の大幅アップ

3 開発の取り組み

前述の狙いを達成するための主な取り組みとして下記3項目を行った。

1. 6速トランスミッションの新規開発
2. 自動変速制御の追加と発進制御の改善
3. 三相位相制御ジェネレータの開発

3-1. トランスミッション

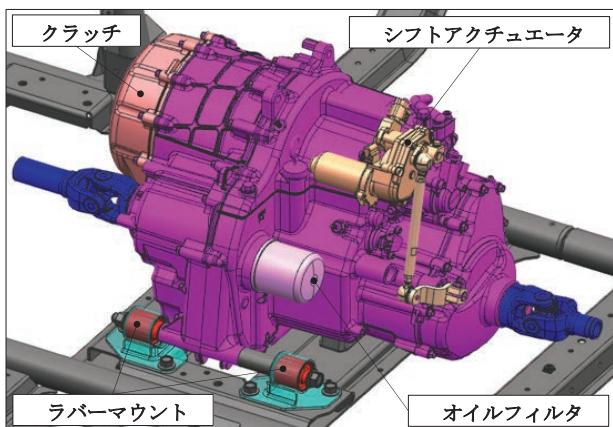


図1 新トランスミッション外観

3-1-1. 6速トランスミッション

スポーツ走行性能を維持しつつ、極低速の駆動力が向上する前進6速+後退の7段変速トランスミッションを新規開発した(図1)。

新たに現行より41%低い減速比の1速ギヤを追加して、障害物の乗り越えやすさや泥濘路などの高負荷路面での走破性を向上させた。これにより極低速走行時の半クラッチ使用頻度が減少し、クラッチの信頼性が向上した。

また、スポーツ走行性能維持のため、新設した1速に合わせ2速から6速の減速比を変更することで、パワーバンドを外さず高速まで加速することを可能とした(図2)。

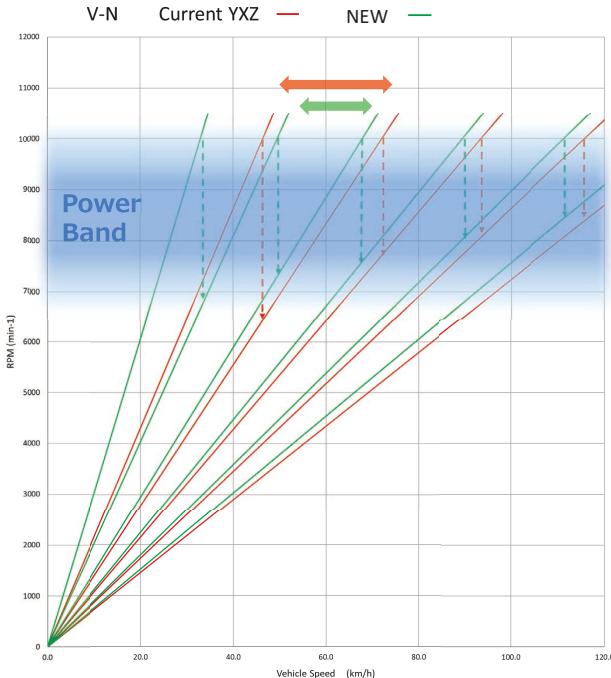


図2 Gear Ratio/RPM-Velocity chart

3-1-2. 信頼性向上

・クラッチ

クラッチ信頼性向上のため、オイルポンプの吐出量増量とメイン軸の給油孔増設を行い、冷却油量を増やしました。また、ボス、クラッチハウジング、クラッチの形状を変更し、供給したオイルにボス、クラッチ(プレート、クラッチ)の熱を伝えやすくさせて放熱性を高めた(図3)。

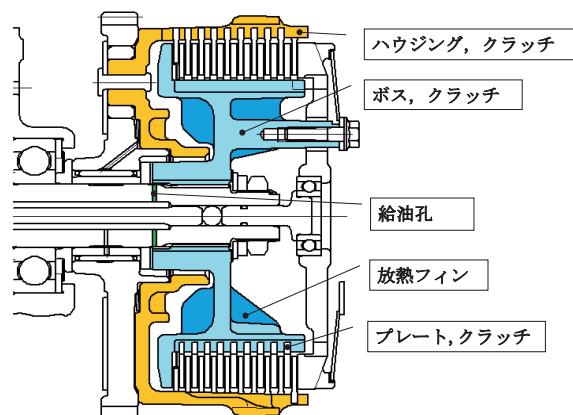


図3 クラッチ変更点

・トランスミッション

レシオカバレッジ拡大と伝達トルク増加に対応した軸大径化により遊動ギヤ内周の周速が上がり、焼付きに対する余裕が減ってしまう。そこで、トランスミッション専用のオイルフィルタを設置して清浄なオイルを摺動部に供給し、トランスミッションの信頼性を向上させた。

3-1-3. 変速音・振動の低減

トランスミッションの固定方法は従来のリジッドマウント方式に替わり SS(Sport Shift)仕様にラバーマウント方式を採用した。これは新採用となる自動变速制御の使用時、変速音が乗員の意図しない作動音となり、不快に感じやすくなることに配慮したものである。そこで円筒ブッシュを使用した浮動固定構造とすることで変速の作動音や振動の低減を達成した。

なお MT(Manual Transmission)仕様は変速フィーリングを重視しリジットマウント方式を継承している。

SS/MT 仕様で異なる固定方式を共通の車体フレームに搭載可能な部品構成とした。

3-2. 自動变速制御



図4 ROV の走行環境

3-2-1. 導入背景

MT 車は、ドライバー自ら変速することでエンジン出力を自由にコントロールしながら運転することが楽しみ方の一つである。

しかし、オフロードに不慣れなビギナーにとっては、目まぐるしく変化する走行状況下でその時々に適したギヤを選択することは難しい場合もあり、エンジンのパフォーマンスを引き出すことができなければ「YXZ」の魅力を十分に味わうことができない。

そこで、ビギナーでも「YXZ」を操る楽しさを簡単に体験できることを狙いとして、システムが適切な変速タイミングを演算して自動で変速を実行する“自動变速制御”を導入した。また、中級者や上級者に対しては、ドライバーの運転負荷を軽減し、ハンドル操作やアクセル操作などにより集中できることで運転全體のパフォーマンスが向上することを狙いとしている。

3-2-2. オフロードに対応した自動变速制御

ROV の走行シーンには砂丘や岩山のような走行抵抗が高い環境があり、駆動力が不足すると車両がスタックする恐れが

ある(図4)。そのような環境で安心して走行するためには、十分な駆動力を応答良く出力できるようにギヤを選択することが特に重要である。

そこで、駆動力と車両加速度から走行抵抗を推定して最適なギヤを選択するロジックを導入し、ROV の主な市場である米国のフィールドでセッティングすることで、あらゆる環境で安心してスムーズに運転できる走行性能を実現した。

3-2-3. AT(Automatic Transmission) モード

ドライバーのマインドや走行環境に対して適したエンジンパフォーマンスを実現するため、変速タイミングの異なる2つの自動变速モード“AUTO”“SPORT AUTO”と手動变速モード“SS(Sport Shift)”を選択できる機能を搭載した(図5)。



図5 AT モードの切替スイッチ

“SPORT AUTO”は、加減速を頻繁に行うスポーツライディングや砂丘や岩山などの走行抵抗の大きい場所での使用を想定している。スロットル操作に対するエンジンの応答を良くするために高いエンジン回転をキープし、エンジンのパワーバンド附近を積極的に使用する変速タイミングとした。

“AUTO”は、オープンエリアでのクルージングのような快適性が求められるシーンを想定している。巡航時のエンジンのノイズを低減するため、エンジン回転を抑える変速タイミングとした。

“SS”はドライバーのパドルシフト操作のみで変速する手動变速モードである。ハイレベルなスポーツライディング等において自分で変速タイミングをコントロールしたい上級者の使用を想定している。

3-3. YCC-S 発進制御の改善



図6 ROV の走行環境

3-3-1. 極低速のコントロール性向上

ROV の走行シーンの一つであるロックセクション(図6)などでは、大きな障害物を乗り越える際、エンジンがアイドル回転以下になってしまふと、エンスト退避のためクラッチを切断せざるを得ない。この時、急激にクラッチを切断すると車両がギクシャクし、コントロールしづらい現象が起こる。

このギクシャク挙動を改善するため、極低速での1速ギヤ時では、一旦半クラッチ状態に遷移する状態を設け、クラッチの回転数差を一定以下に抑える新たな制御を追加した。その結果、クラッチの滑りを抑制しつつ、半クラッチを続けることでドライバーのアクセル操作に対して、タイヤの駆動力を細やかにコントロールすることができ、かつクラッチ切断によるギクシャク挙動を削減できた(図7)。

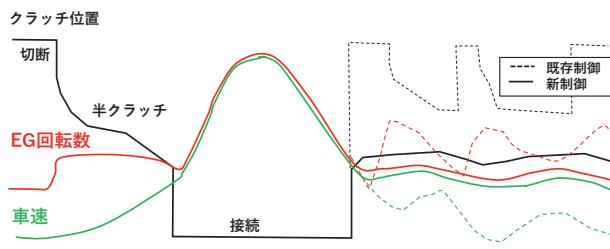


図7 極低速時のクラッチ制御

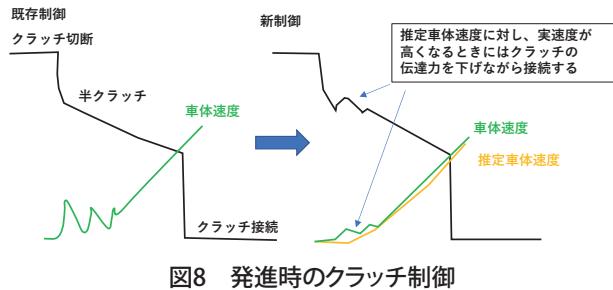
3-3-2. 発進時の乗り心地改善

新トランスミッションの1速の減速比は現行より41%大きくしており、発進直後の駆動力の立ち上がりがより顕著で唐突感を感じる。

この現象は、エンジンで発生したトルクによりタイヤまでの駆動系の伝達部品に捻じれが生じ、振動して発生する。このため、エンジントルク、駆動系のバネ、ダンパー、車体の加速度の関係について詳細にデータ解析とシミュレーションを行った。その結果から、実際の車両速度が想定速度以上の場合、クラッチを

仮想的にダンパー要素と見立ててトルクをコントロールすることで車体振動を減衰させた。

制御の効果として、図8のように車体速度の変動を抑えることができ、発進時の乗り心地を改善することができた。



3-4. 三相位相制御ジェネレータ

ルーフ上に設置する LED ライトバー や装飾用のホップライトといった多くの電力を必要とするアクセサリの追加需要が増加しており(図9)、その電力需要に応えるため、高効率・高出力タイプの発電システムを新規開発した。

従来の短絡式発電システムでは発熱が多く、発電量を増加させると AC ジェネレータとレクチファイアレギュレータが冷却不足に陥るため、500W を超える高出力化が困難であった。

本モデルでは ROV では初となる位相制御を採用することで外部ジェネレータを追加することなく1kW 出力を達成した(図10)。

位相制御は AC ジェネレータ出力の通電位相をシフトすることで発電量の増減を制御するため、AC ジェネレータをサイズ UP することなく発電量増加が可能であり、短絡式に比べて AC ジェネレータが低発熱となる特徴がある。

その結果、従来機に対し発熱を抑えつつ約2倍の発電量を達成し、過酷な環境下においても安定した出力を可能とした。



図9 ROV の夜間使用例

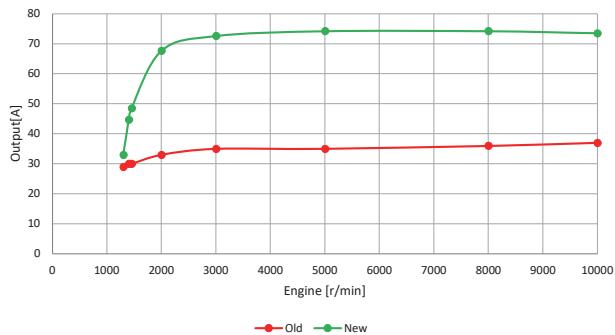


図10 三相位相制御による発電容量

4 おわりに

北米では、COVID-19以降、家族でレジャーを楽しむ Outdoor 需要が旺盛で、快適な居住空間のための車両の大型化と、扱いやすい CVT 車に過給機を搭載した性能競争が激化している。

一方、Direct Connect Feeling を感じることのできるピュアスポーツの「YXZ」は唯一無二の存在であり、本モデルにより一人でも多くのお客様に意のままに操る楽しさ、人機一体感を感じていただきたい。

■著者



磯田 敬
Takashi Isoda
PF 車両ユニット
PF 車両開発統括部
OV 開発部



新堀 雅秀
Masahide Shinbori
PF 車両ユニット
PF 車両開発統括部
OV 開発部



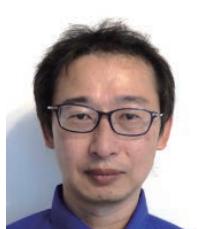
鈴木 知美
Tomomi Suzuki
パワートレインユニット
プロダクト開発統括部
第2PT 設計部



福嶋 健司
Kenji Fukushima
PF 車両ユニット
電子技術統括部
システム開発部



大畠 忍
Shinobu Ohata
PF 車両ユニット
電子技術統括部
電子技術企画部



平田 剛
Gou Hirata
マリン事業本部
開発統括部
システム開発部

US向けリン酸鉄リチウムイオンバッテリー搭載ゴルフカーの製品紹介

Product introduction of golf cars equipped with lithium-ion iron phosphate battery packs for the US market

石川 暢也



Abstract

In North America, the largest market for the LLV (Low Speed & Light Vehicle) business, the company launched the "Drive2 QuieTech EFI", a quiet vehicle that uses an engine as a power source but is as quiet as an electric vehicle (EL model). With this model, YAMAHA succeeded in differentiating itself from its competitors and firmly established its position as the No. 1 gasoline engine vehicle (GAS model).

On the other hand, in addition to the high percentage of EL models in the golf car market, due to changes in the external environment, it is expected that the market will become more electrified in the future, and the introduction of a competitive EL model has been a long-standing issue.

Vehicles equipped with lithium-ion batteries from other companies have been introduced in advance, and as a countermeasure, the 2021 model has adopted an AGM (Absorbed Glass Mat) lead battery that does not require refilling. However, the market demand for lithium-ion batteries is strong and is based on the model concept "The Lithium from YAMAHA", the 2022 model introduced the "Drive2 PowerTech AC Lithium," the industry's first lithium-ion iron phosphate battery.

This paper introduces this development model.

1

はじめに

LLV (Low speed & Light Vehicle) 事業の最大市場である北米において、エンジンを動力源としながらも、電動車 (EL モデル) に負けない静肅性を実現した静音車両「Drive2 QuieTech EFI」を市場導入した。このモデルにより YAMAHA は他社との

差別化を図ることに成功し、ガソリンエンジン車 (GAS モデル) No. 1 の座を確固たるものにしている。

その一方でゴルフカー市場では元々 EL モデルの比率が高いことに加え、外部環境変化により、今後より一層市場の電動化が進むことが想定され、競争力のある EL モデルの導入が長年の課題となっていた。

他社リチウムイオン電池搭載車が先行導入されており、その対抗として、2021年度モデルで補液不要の AGM (Absorbed Glass Mat) 鉛バッテリを採用した。しかしながらリチウムイオン電池搭載への市場要望は強く、モデルコンセプト “The Lithium from YAMAHA.” のもと、2022年モデルにて業界初となるリン酸鉄リチウムイオン電池を採用した「Drive2 PowerTech AC Lithium」を市場投入した。本稿では、本開発モデルについて紹介する。

2 開発の狙い

北米でのリチウムイオン電池搭載モデルの投入が最後発となる当社にとって、他社に対する差別化と早期市場投入が至上命題であった。そのため下記3項目を狙いとし、プロジェクトを推進した。

1) リン酸鉄リチウムイオン電池の採用

以下①～③の達成

①リン酸鉄リチウムイオン(以下 LFP)電池採用による高い熱安定性の実現、②登坂性能の向上、③航続距離の増加

2) 既存コンポーネント流用でのシステム構築

Motor Control Unit(以下 MCU)、充電器は既存品を使用しながら、システムフェールセーフを確立

3) 回生電力の吸収

充電が完了した早朝ラウンドでの、安心感のある降坂走行の実現

3 開発の概要

3-1. LFP 電池の採用

リチウムイオン電池を採用することでの一般的な価値として、長期製品保証、メンテナンスフリーによる取り扱いの容易さがあげられる。それに加え、他社優位性を獲得するため、前述の①～③を狙って開発を行った。

日本国内向けゴルフカーも含め、自動車用リチウムイオン電池の主流は NMC (ニッケル・マンガン・コバルト) 電池であった。LFP は NMC に比べ低コストで、エネルギー密度が低い。そのため部品体積は少し大きくなるものの、熱安定性が高く熱暴走しにくい性質を持っている。

本プロジェクトでは走行に必要な電流とシステム電圧から、105Ah セル(図1)の8直列モジュール(図2)を2つ使ったバッテリパックを開発し、車両性能と熱安定性の両立を行った。



図1 角形 LFP セル

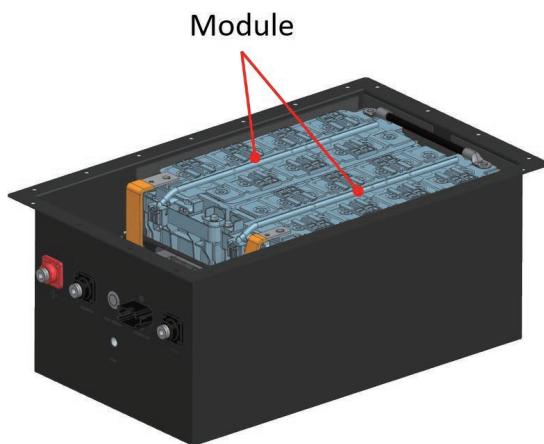


図2 パック内部モジュール

NMC と比較すれば質量は大きくなるが、従来の液式鉛(FLA)バッテリと比較すれば 110kg 程の軽量化となり、登坂性能も向上している。10度登坂時の車速は図3のようになり、より軽快なストレスのないドライブフィーリングを実現している。

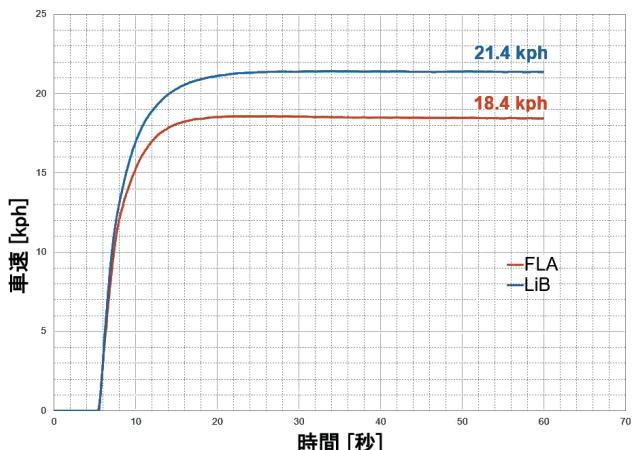


図3 10度登坂性能比較

車体重量軽減は当然、燃費にも好影響を与える。FLA モデルと比較し、電費は24%向上、航続距離は約2倍に伸びすことができた(図4、図5)。競合他社よりも容量のあるバッテリとなったことで、個人ユースである PTV(Personal Transportation Vehicle)市場でも優位性を確保した。

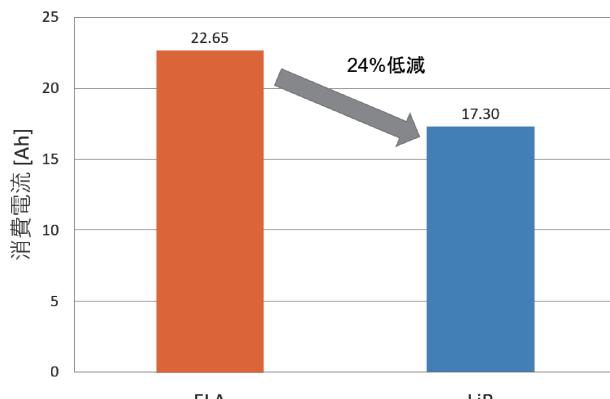


図4 電費比較

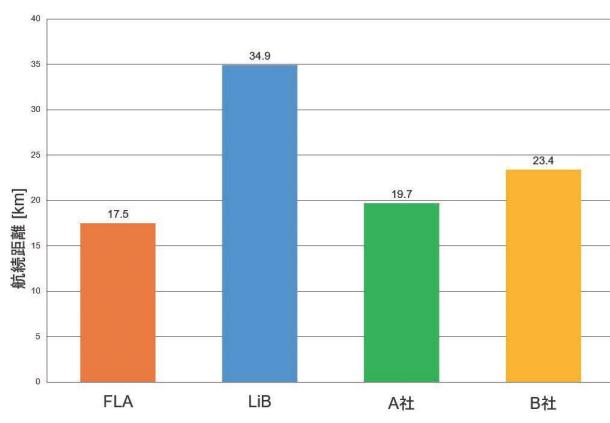


図5 航続性比較

3-2. 既存コンポーネントを流用したシステム構築

リチウム電池モデルの早期市場投入のため、バッテリケースやモジュールデザイン、充電器などのコンポーネントはできるだけ既存品を流用し、開発と型リードタイムを短縮できるようシステム構築を行った。

LFP の特徴として、SOC(State of Charge)に対してフラットな電圧特性がある。走行特性に対してはどのバッテリ SOC 容量でも大凡同等のモータ出力が取れる反面、電圧によるフェルセーフ設計ができないため、Battery Management System(以下 BMS)の情報を各コンポーネントに共有する必要があった。既存充電器のプラグピン数の中で、コミュニケーション可能な独自の通信方式を行い、BMS の情報を MCU と充電器に伝えられるようにした。この方式を用いて BMS が出力可能な状態であることを MCU に、充電可能であることを充電器にそれ

ぞれ伝えている。この通信シグナルの状態を双方向で監視するウォッチドッグとして機能させることで、安定した車両運用が可能なシステムを構築した。

また、バッテリ内部のバスバー・リレーなどといった、バッテリパックサプライヤの構成部品についても、ヤマハ基準の振動・熱条件に合ったものを共同で選定、または変更し高い信頼性をもったコンポーネントに磨き上げることができた。

3-3. 回生電力の吸収

一部のゴルフコースでは、クラブハウスとカート庫が隣接し、ドライビングレンジが坂の下に設置されている場合がある。その日最初に車両を使用する場合には、バッテリが満充電の状態で降坂走行することとなる。その場合、降坂時に回生ブレーキによる電力吸収が行えず、車速を制御するためにフットブレーキを用いる必要がある。

充電時に回生電力分のマージンを確保して充電を終了させることができればよいが、先述したように、LFP は SOC に対してフラットな電圧特性であるため、電圧による充電終了判断が難しく、狙った SOC で安定して充電を終了することができない。また、SOC の精度を高めるためには、SOC 100%まで充電する必要がある。

そこで図6のような巻線型抵抗器を用いて充電後に一定容量を放電し、走行前に回生電力を吸収できる空き容量をバッテリに設けることで、充電完了後の朝一番の状態においても、回生ブレーキでの車速制御による安心感のある降坂走行を可能にした。

このアイディアは元々 FLA の時からあったものだが、FLA はバッテリの特性上受入性が悪いため、回生電力分を確保するためにはバッテリの容量の多くを放電せざることになり、車両走行航続性への影響が大きく、実現できなかった。本モデルで充電受入性の高いリチウム電池を採用したことで、SOC を3%放電するだけで、図7のように5度～20度の降坂で5倍以上の距離を、回生ブレーキを使用しながら走行することが可能となった。このことによりゴルフプレイヤーはいつでも同じ感覚で車両を操ることができるようになり、より快適にラウンドすることができるようになった。



図6 巷線型抵抗器

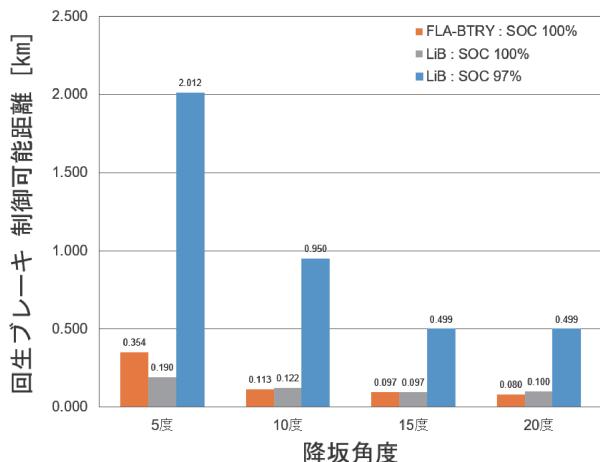


図7 回生ブレーキ制御可能距離

4 おわりに

リチウム電池パックを搭載した「Drive2 PowerTech AC Lithium」は、業界初となるLFP電池を採用したゴルフカーとして、メンテナンスフリー化の実現と、ゴルフプレイヤーや個人ユースPTVにおいてこれまで以上に快適かつ、安心に使用できる車両を提供している。

このモデルの開発当時、私は北米駐在中であり、COVID-19の影響も受け、本プロジェクトには技術面以外の多くの課題があった。物流も安定しない中、北米倉庫で部品ストックを適切に行うことで、部品を安定供給することができた。業務ではテレワークを有効活用し、オンラインでの工場監査を実施、日米開発拠点とヤマハ発動機を含むメーカー関連部署と協働することで、高い商品性を持つ車両の早期市場投入を実現できた。

今後も技術進化を重ね、ゴルフカー・PTVは元より、新領域モビリティ、公道低速モビリティなど新たな商品開発を行い、お客様さまに満足を与えるよう尽力していく。

■著者



石川暢也
Nobuya Ishikawa
ヤマハモーター
パワー・プロダクツ(株)
開発統括部
制御開発部
システム開発課

農業向け自動飛行機能を搭載した無人ヘリコプター「FAZER R AP」

“FAZER R AP” Unmanned Helicopter with Automatic Flight Function for Agricultural Applications

神田 大 松原 良寿 平城 大典 鈴木 健介 木下 勝之
三宅 隆文 春田 祐吾 伊藤 友秀 伊藤 葉介 菅野 遼太郎



Abstract

Yamaha Motor launched the “R-50”, the world’s first unmanned helicopter equipped with a two-stroke engine for spraying agricultural chemicals in 1987. Since then, various features have been added and the model has undergone a series of modifications. The current “FAZER R” model with its four cycle engine was launched in 2017.

One of the major challenges in Japanese agriculture is the decline in the farming population due to the nature of heavy workloads and the aging of many farmers. Since sales began, Yamaha Motor’s unmanned helicopters have contributed to solving these issues by providing efficiency in spraying operations.

The “FAZER R AP” model with automatic flight function was developed to provide a more efficient spraying functionality for the smart agriculture that will develop in the future and for rice paddies and fields, which are becoming larger in size. This paper will provide the overview of the development of this model.

1 はじめに

ヤマハ発動機では1987年に世界初となる2サイクルエンジンを搭載した農薬散布用無人ヘリコプター「R-50」の販売を開始した。その後、様々な機能の追加やモデルチェンジを繰り返し、2017年より現在の4サイクルエンジン搭載機「FAZER R」を販売している。

日本の農業における大きな課題の一つとして、重労働であることや農業従事者の高齢化などによる農業人口減少が挙げられる。ヤマハ発動機の無人ヘリコプターは、散布作業の効率化を提供することで販売以来問題の解決に寄与してきた。

今後発展していくスマート農業への対応や大規模化が進むほ場(水田・畑)に対してより効率的な散布機能を提供するため、自動飛行機能搭載モデル「FAZER R AP」を開発した。本稿では、その概要について紹介する。

2 開発の狙いと背景

本モデルにおいては3つのユーザーメリットを提供することを念頭において開発を行った。

1つ目として散布効率の向上が挙げられる。従来はオペレータの技量により散布作業に要する時間などの効率は様々であつ

農業向け自動飛行機能を搭載した無人ヘリコプター「FAZER R AP」

"FAZER R AP" Unmanned Helicopter with Automatic Flight Function for Agricultural Applications

た。本モデルの自動飛行機能を活用すればオペレータの技量に左右されず誰もが大規模ほ場を短時間で効率的に安定した品質で農薬散布することができる。将来的には自動飛行による補助者の削減など減少する農業人口への対応に繋がると考えている。

2つ目にオペレータの疲労軽減が挙げられる。自動飛行機能によりオペレータの負荷を軽減できるため、長時間運用における集中力の低下や操縦ミスなど疲労に起因する事故の低減が期待される。

上記メリットのある自動飛行機能だが、高機能になるほど複雑なアプリケーションになりやすく、特に高齢者などからは敬遠されがちである。それを解決するため本モデルでは対話型で進

めていくだけで設定が完了するシンプルモードなど、誰もが使いやすいUI(ユーザーインターフェース)とすることを3つの目 メリットとして重点を置いて開発を行った。

私たちはこれらの商品価値を目指して本開発を進めた。

3 開発の取組み

3-1. 機体

「FAZER R AP」の詳細スペックを表1に示す。本モデルでは新機能の追加に合わせ、機体のハードウェアの刷新を行った。主なトピックを以下に示す(図1)。

表1 スペック

項目	スペック
全長×全幅×全高	3.665mm × 770mm × 1.078mm
メインロータ直径	3.115mm
テールロータ直径	550mm
取扱重量	74.8kg
最大薬剤積載量	液剤32L・粒剤30kg
原動機種類／気筒数配列	水冷・4ストローク・OHV・2バルブ 水平対向2気筒
総排気量／ボア・ストローク	390cm ³ /66.0mm × 57.0mm
最高出力	20.6kW/6000r/min
燃料種類／燃料タンク容量	レギュラーガソリン/5.8L
制御システム	ヤマハ独自システム(YACS III agFMS-II h)
操縦用周波数	73MHz(マニュアル操縦)、2.4GHz(データ通信)
障害物検出システム	24GHz レーダー



図1 フィーチャーマップ

3-1-1. 新工法適応

アンダーカバー(図2)と呼ばれる、機体後方に向いた外装パーツを、主に試作で用いられる工法である粉末成形で量産することを実現した。このアンダーカバー内は、通信機器や高度計測用のレーダーが搭載される。これら電子機器は、海外仕向地ごとの認証適合により形状が異なることから粉末成形の高い形状自由度を最大限生かすことができる。今後も無人ヘリコプターに求められる用途に応じて形状を変更できる工法として活用していく。



図2 アンダーカバー

3-1-2. 電装システムの刷新と環境に配慮した基板開発

本モデルに求められる機能を実現するため、高速な通信システムや高性能プロセッサを採用し、電装システムの全面的な再設計を行った。また、電子基板については、環境負荷物質削減のため鉛が含有されないハンダを採用した。

3-1-3. 機能アップと海外対応の両立

本モデルでは機能向上として様々な高性能通信デバイスを搭載し、機体外部とのやり取りや機体内部での信号処理を常時行っているため、EMS(電磁ノイズ)が発生しやすい。海外展開では EMS 規格が厳しい仕向地もあり、今回の電子基板は、それら規格と機能を両立できるよう、回路設計から部品選定、レイアウト、パターン設計に至るまで最適化を行った。

3-2. GNSS とジャイロセンサの複合航法システム

3-2-1. 自動飛行を可能とする測位の高精度化

既存モデルでは、GNSS(Global Navigation Satellite System)とジャイロ、加速度センサの複合航法システムを採用している。

本モデルでは、より多くの種類の衛星を受信できる GNSS 受信機を採用することで、山や谷といった地形や木々などの障害物がある環境でも安定した位置情報取得を可能とした。

また、自動飛行では高精度な緯度・経度を必要とするため、RTK(Real Time Kinematic)測位によってセンチメートルオーダーの位置情報を利用できるようにした。RTK 測位の手段として基準局 RTK(GNSS 基準局(図3)を設置する方法)とネットワーク RTK(インターネットを通じた補正情報サービスを利用する方法)とを選択できるようにし、ユーザは状況によって使い分けることができる。



図3 GNSS 基準局

3-2-2. 速度情報の冗長化

本モデルでは、画像処理技術を用いて機体の速度を推定する機能(オプティカルフロー)を追加した。この機能により、GNSS 信号が途絶しても機体はその場にとどまることができ、オペレータは落ち着いて GNSS 信号の回復を待つことができる。

3-2-3. YARS (YAMAHA Attitude Reference System) の小型軽量化

姿勢基準システム YARS は、高精度なジャイロセンサと加速度センサから構成されており、安定した姿勢制御を実現できる。本モデルでは、無人ヘリコプターの強い振動環境下においても正しく姿勢演算できる技術を確立し、従来必要としていた免振構造の廃止に成功した。これにより、YARS をコントロールボックス内の基板に統合することで、既存モデルと比較して約800g の軽量化を達成した(図4)。



図4 既存モデルの YARS 設置箇所(左)と本モデル(右)

3-2-4. 機首方位測定の高精度化と冗長化

機首方位情報は、無人ヘリコプターの飛行制御において、直進性に影響を与える要素の一つである。本モデルでは、2つのGNSSアンテナを用いて算出した高精度な方位情報を追加した。これは、高压線付近などの強磁界が発生する環境においても安定的に方位情報を算出できる。この利点を活かし、従来から用いている磁気方位センサと相補的に使用することで、飛行制御の正確性とロバスト性を向上させた(図5)。



図5 2つのGNSSアンテナ(上)と磁気方位センサ(下)

3-3. 制御

3-3-1. 手動飛行機能

- ・NM(ノーマル)モード

既存モデルの速度情報を用いた制御モードのCC(クルーズコントロール)モードは散布に特化した制御モードであり、送信機の舵を離しても一定速度で飛行し続けることが可能である。本モデルではCCモードに加え、直感的な操作が可能なNMモードを追加した。NMモードは、操舵量が機体速度と連動しているモードであり、速度コントロールが容易で、舵を離せばその場で停止するため、初心者オペレータはより安心感を持って操縦できる。また、昨今の電動ドローンに近い操縦が可能であり、ドローンユーザーも違和感なく操縦できるモードとなっている。

- ・リモートエンジンスタート

オペレータが送信機の操作のみでエンジン始動ができるリモートエンジンスタートを追加した。これまで機体の横に立つて始動していたエンジンを、機体から離れたまま始動できるため、作業時間の短縮とオペレータの利便性の向上を実現した。

3-3-2. 自動飛行機能

- ・離陸から着陸まで自動で完結

本モデルでは、「ほ場内のどこにどのようなルートで散布するかの情報(散布ルート)」をあらかじめ機体に指示しておくことで、

1. 異常

2. 散布開始位置まで移動した後、ルートに従って散布
3. 散布終了地点から着陸地点へ移動
4. 着陸

といった散布飛行全体を、自動で実施できるように開発した。これにより、手動操縦によって機体を飛行させる際の負荷の大部分からオペレータを開放できる。

- ・散布中断後の再スタート

散布飛行時は、燃料や散布薬剤の残量が少なくなったり人や車が接近してきたりといった様々な要因で、散布作業を中断する必要がある。

本モデルでは、このような不意な中断をした場合でも中断した位置から再スタートできるように機能を開発した。特に、機体の電源を一度OFFにしても記録が消えないよう正在しているため、周囲の状況の変化により柔軟に対応しつつ、最後まで散布を実施することができる。

- ・オペレータの負担軽減

本モデルには、障害物センサや対地高度センサを搭載している。これらを使い、自動飛行中に障害物を検知した場合や地面との距離が近くなりすぎた場合に、自動飛行を中断して止まる機能を開発した。

オペレータの目だけでなく、センサの目も使った周囲監視により、既存モデルよりもより負担の少ない運用を可能としている。

- ・常にオペレータ側にある主導権

自動飛行している最中でも、オペレータは送信機によっていつでも手動操縦に切り替えることができるようになった。そのため、直ちにオペレータが直接操縦をしなければならない事態が発生したとしても、すぐに切り替えて操縦できる。これにより、スマートな散布飛行をオペレータが主体的に管理できる。

3-4. agFMS-IIh

agFMS-IIh (agriculture Flight Management System) は農業用途に特化させた散布エリアおよび散布ルート作成・自動飛行管理機能を統合したアプリケーションソフトウェアである(図6)。多様なユーザに対応するため、シンプルモードとプロフェッショナルモードの2つのUIを導入した。

農業向け自動飛行機能を搭載した無人ヘリコプター「FAZER R AP」
“FAZER R AP” Unmanned Helicopter with Automatic Flight Function for Agricultural Applications



図6 agFMS-IIh 画面

シンプルモードは対話形式になっており、画面の指示に従うことでの場の測量から散布まで実施することが可能となる(図7)。



図7 シンプルモード画面

プロフェッショナルモードは、目的の作業に対して最小限の操作で行えるように1つの画面(画面上部)に全ての要素を組み込んだ(図8)。また、多様な現場ニーズに応えるために、複数の散布エリアの合成などシンプルモードにはない高度な機能を搭載した。



図8 プロフェッショナルモード画面

agFMS の主な機能として以下3つを挙げる。

・散布エリア作成

基準局 RTK またはネットワーク RTK を用いて直接ほ場を測量する方法とデジタル地図画面上で行う方法の二種類を用意した。測量後の散布エリアの編集も可能としており、毎年変わるほ場にも対応できる。

・散布ルート作成

散布幅、散布速度などを設定することで散布ルートを自動生成する機能を実装した。さらに、複数の散布エリアを合成し1つ

の散布ルートとする機能も搭載している。これらにより事前に詳細な散布計画を作成することが可能となり、散布当日の作業時間を短縮することができる。

・自動飛行時の操作と機体情報の表示

飛行時には機体と画面の両方を確認する必要があるため、画面を注視せずとも必要な情報を一目で得られるような画面構成とした。

4 散布装置

自動フライト機能を効果的に活用できるように、自動散布中に散布する薬剤がなくなるとフライトが停止し、薬剤補給後に同じ位置から再スタートできるシステムとなっている。これに対応するため、自動散布用の散布装置には、タンク内の薬剤がなくなったことを検出するためのフロート式センサを搭載している。本センサは粘度の高い農薬などでも固着しないよう、専用で開発した。本センサの搭載により、ポンプの空回しによる故障抑止を実現した。

また、タンクの脱着によるエア噛みを防止するためのエアベントを設け、薬剤補給時の作業をスムーズに行えるようにした(図9)。



図9 削切れ検知ユニットとエアベント

5 おわりに

「FAZER R AP」は“散布の効率化”、“オペレータの疲労軽減”、“複雑な操作を容易に実行できる誰もが使いやすいUI”の3つの価値が提供できる商品となっている。本モデルが多くの農業従事者に届き、農業を通じて皆様の生活を豊かにすることを期待する。またこれからも無人航空機の自動化・自律化を進め、新たな価値を持った商品を市場へ展開していくことが私たちの責務と捉え商品開発を進めていく。

■著者



田 大
Dai Kanda
ソリューション事業本部
UMS 事業推進部
開発部



原 良寿
Yoshihisa Matsubara
ソリューション事業本部
UMS 事業推進部
開発部



城 大典
Daisuke Hirago
ソリューション事業本部
UMS 事業推進部
開発部



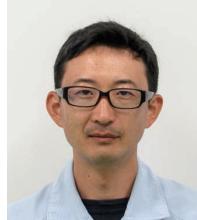
木 健介
Kensuke Suzuki
ソリューション事業本部
UMS 事業推進部
開発部



木 下 勝之
Katsuyuki Kinoshita
ソリューション事業本部
UMS 事業推進部
開発部



三 宅 隆文
Takafumi Miyake
ソリューション事業本部
UMS 事業推進部
開発部



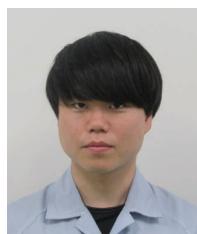
春 田 祐吾
Yugo Haruta
ソリューション事業本部
UMS 事業推進部
開発部



伊 藤 友秀
Tomohide Ito
ソリューション事業本部
UMS 事業推進部
開発部



伊 藤 葉介
Yosuke Ito
ソリューション事業本部
UMS 事業推進部
開発部



菅 野 遼太郎
Ryotaro Sugano
ソリューション事業本部
UMS 事業推進部
開発部

傾斜補助灯と色温度可変機能を備えた 小型ヘッドライトの開発

Development of compact headlights with cornering and variable color temperature functions

許芳毓 謝金育 陳彦甫 陳奕志 陳奕成

Abstract

In recent years, motorcycle headlights are on a trend to become more compact and more multi-functional while having a unique design. Market research also shows that many consumers use additional auxiliary lights to illuminate dark blind spots on the periphery of the illuminated area when cornering, and those who prefer warmer colors on wet roads are changing the lens color from clear to yellow. The headlight module presented in this paper does not only have high- and low-beams, but also features tilting auxiliary lights and variable color temperature low-beams as additional functions. This module was developed to provide additional functions and a unique design while achieving the compact light body size demanded by consumers.

1 はじめに

近年、二輪車用ヘッドライトはより小型で多機能かつ独特なデザインが進化のトレンドにある。市場調査の結果、コーナリング時の照射範囲の周縁部の暗いエリア“ブラインドスポット”を照らす目的で補助灯を追加している消費者や、濡れた路面で暖色系ライトを好む消費者がレンズ色を透明から黄色に変更している例も多数あることも分かった。本稿で紹介するヘッドラントモジュールは、ハイ／ロービームだけでなく、傾斜補助灯と可変色温度ロービームを付加機能として有している。消費者が求める小型な灯体サイズを実現しながら付加機能と独特なデザインを提供することを目的に開発した。

2 開発背景

対向車の眩しさ防止のために設定されている水平ラインより上の暗い範囲は、夜間のコーナリング時に傾斜角度に応じて車両進行方向周縁部に暗いエリアを形成する(図1)。また、雨天や濃霧、濡れた路面の走行時、白色LED光の“散乱”と呼ばれる物理特性により透過性と照明効率が低下し、晴天時とは異なる視界となる(図2)。従来はヘッドライトとは別の傾斜補助灯を追加することで周縁部を補助的に照射し、ヘッドライト好みの色調に変えることで濡れた路面等を走行する際の精神的負担を低減させていた。

一方、従来のヘッドライトに傾斜補助灯やフォグランプを一体化すると灯体が大型化し、意匠性を阻害するとともに高コストとなり商品の魅力向上を阻害する要因となっていた。そこで、新たな複合光学レンズと組み合わせることで傾斜補助灯と色温度可変機能をヘッドライト内部に統合し、意匠性の向上や低コスト化を両立するヘッドライトを開発した。

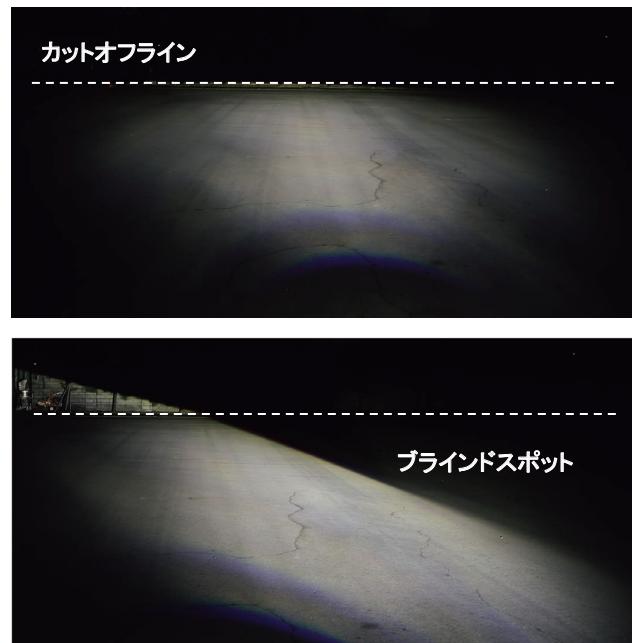


図1 コーナリング時の暗いエリア“ブラインドスポット”

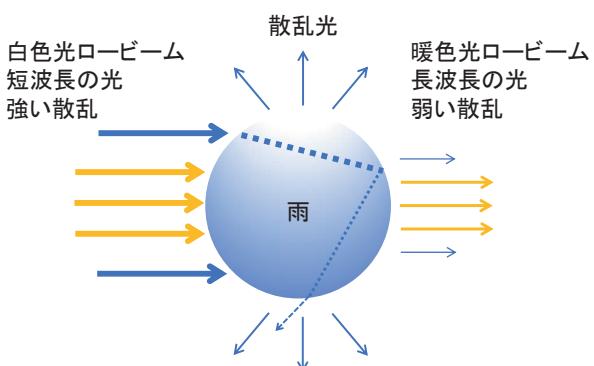


図2 雨や霧の散乱

3 灯体の小型化

3-1. 光学構成

ハイ／ロービーム機能を統合したバイファンクションヘッドライトを参考に、プロジェクター式ヘッドライトの光学構造を採用した。反射面構造では灯体容積が大きくなる課題があり、小型化を達成するために今回は全反射レンズを採用した(図3)。

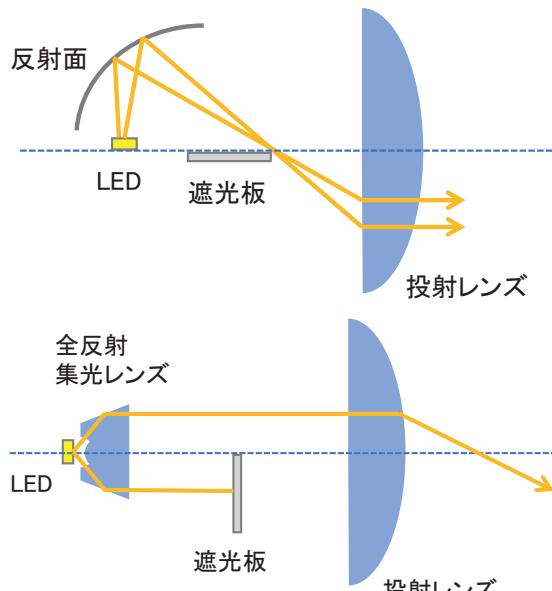


図3 プロジェクター式ヘッドライトの光学構造

3-2. 機能統合

次に掲げる4つの機能を小型灯体モジュールに統合した。

1. 白色光ロービーム
2. 白色光ハイビーム
3. 暖色光ロービーム
4. 傾斜補助灯

必要な光量の確保と放熱性能を両立できるように、灯体内に1～4のLED素子を配置し、2組のバイファンクションランプモジュールを1つの灯体内に収めた。

ランプモジュールはアウターレンズにより上下に分割する構造とした(図4)。

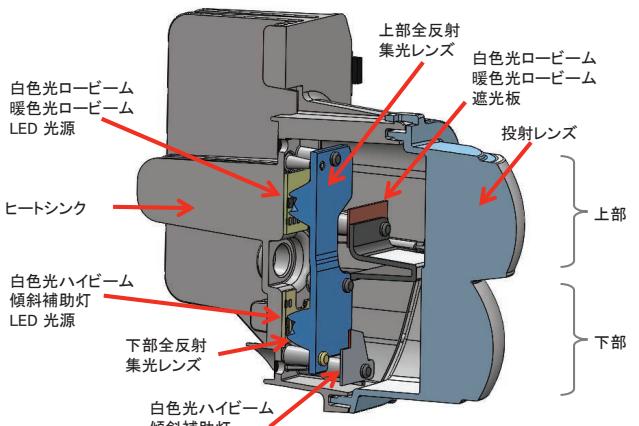


図4 ランプモジュール断面構造

上部ランプモジュールの集光レンズのうち、中央部は白色光ロービームの配光制御に、左右は色温度可変機能に割り当てた(図5)。白色光ロービームの波長は、雨天などの悪天候時の“散乱”現象の影響を受ける。この時、光の波長が短いほど散乱がより強くなるため、色温度可変機能で波長が長い暖色ロービームに換えることにより散乱現象を抑制し、悪天候時の精神的な負担軽減につながる場合もある。色温度可変ロービームは、ハンドル右側に配置した切替スイッチにより、ライダーが白色光か暖色光を選択できる(図6、7)。

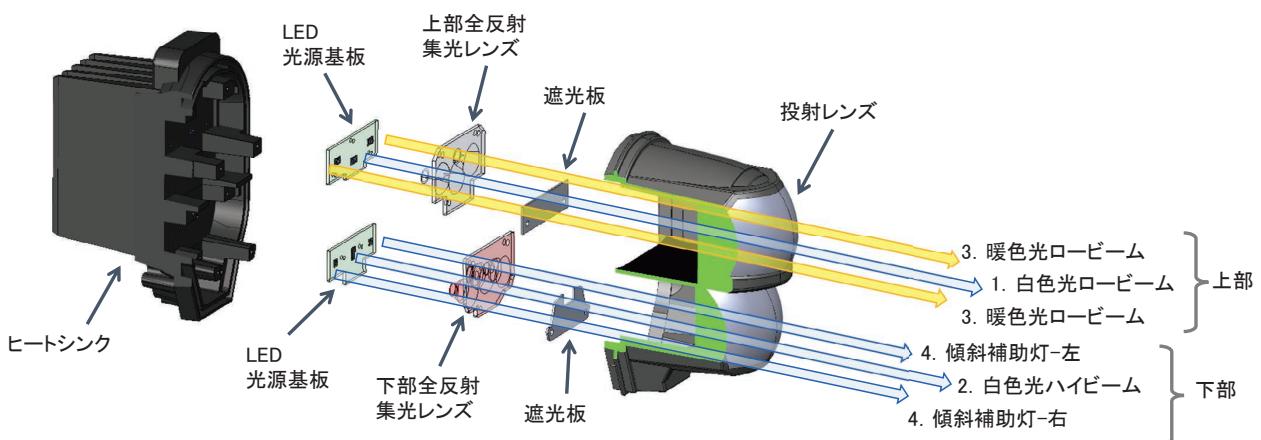


図5 ランプモジュール光学組合構成図



白色光 ロービーム

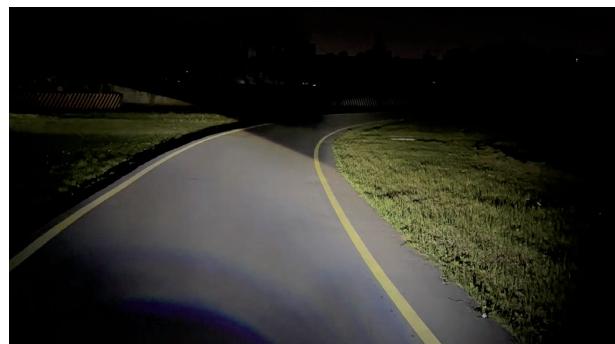


補助灯－非点灯時



暖色光 ロービーム

図6 可変色温度ロービームの点灯状態



補助灯－点灯時

図8 傾斜補助灯の機能作動状態



図7 可変色温度 ロービームの切替スイッチ

下部ランプ モジュールの集光レンズのうち、中央部はハイビームの配光制御に、左右は傾斜補助灯の配光制御に割り当てた(図5)。傾斜角検知ユニットが車両の傾斜角度を検出し、傾斜補助灯が車両角度に応じて自動駆動することで周縁部の“ブラインドスポット”を照らしコーナリング走行時の視界を補助する(図8)。

3-3. 多機能 LED 集成発熱障害検証

灯火器の小型化開発における懸念として熱害が挙げられるため、今回は熱解析シミュレーションを活用した。ハイビームと暖色光ロービームの同時点灯に傾斜補助灯の作動が加わる点灯パターンを最も厳しい条件として検証を実施し、下部集光レンズ(Collecting lens)とLED 素子の最も近い箇所において熱害が懸念されることを事前検出できた。その結果をもとに駆動電流と放熱フィンの設定を最適化し熱害の未然防止につなげた(図9)。

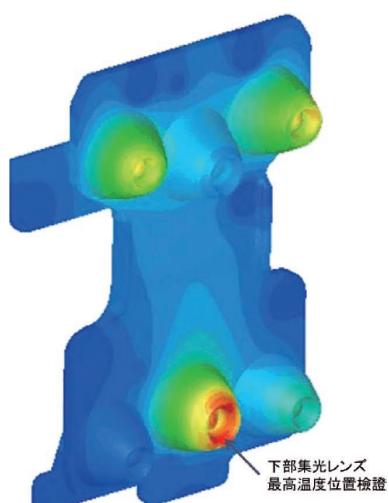


図9 集光レンズ組合せ熱解析シミュレーション－最高温度位置

4 駆動制御ユニットの小型化

灯体を小型化するために、白色光、暖色光、傾斜角補助灯の駆動ドライバを灯体から別体化した。またさらに傾斜角検知機能も加えて、複数機能を1つのユニットに統合した。図10に内部構成図を、図11に外形図をそれぞれ示す。

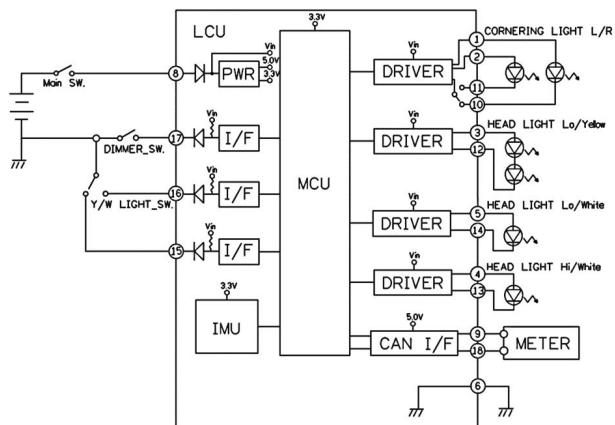


図10 駆動制御ユニット ブロック図

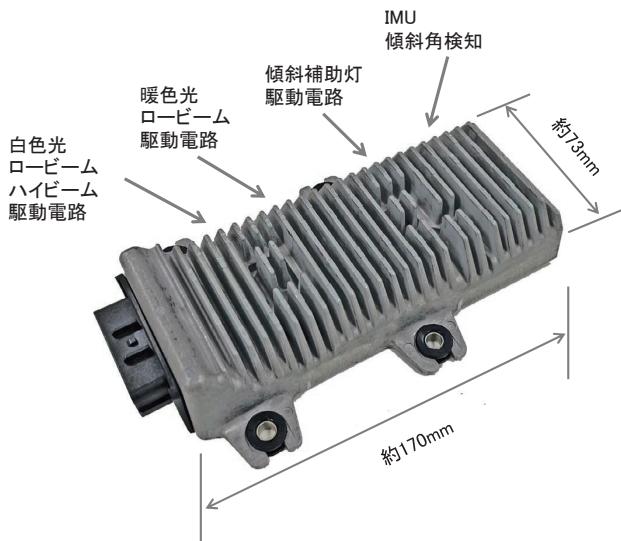


図11 駆動制御ユニット 外形図

5 開発成果

今回新開発した小型多機能ヘッドライトを台湾向け「AUGUR 155」(図12)に搭載し市場投入した。この小型ヘッドライトには、「Y-LLA(YAMAHA Lean Light Assist)」と、ヤマハ製品としては世界初となる新機構「Y-AU(Adjustable Color Temperature Unit)」を採用した。これは単にヘッドライトの機能向上だけでなく、ライダーの精神的負担の軽減といった魅力価値を提供し、ユニークかつ魅力的な車両とすることに貢献した。



図12 「AUGUR 155」

6 おわりに

今回、消費者のニーズをもとにヘッドライトの開発方針を決定した。加えて新たな光学構造により小型かつ多機能で魅力的な形状を実現することに成功した。今回新開発したヘッドライトを通じて消費者に期待を超える価値を提供し“感動”を与えたと感じている。「Y-LLA」や「Y-AU」を搭載したヘッドライトモジュールをより多くの機種に採用できるよう灯火器開発を継続していく。

■著者



許芳毓

Hsu Fang-Yu

YMRT^①

先行開発室



謝金育

Hsieh Chin-Yu

YMRT^①

研發本部

研發三部



陳彦甫

Chen Yen-Fu

YMRT^①

研發本部

研發三部



陳奕志

Chen Yi-Chih

YMRT^①

研發本部

研發三部



陳奕成

Chen Yi-Cheng

YRMT^①

研發本部

研發三部

①) YMRT: Yamaha Motor R&D Taiwan Co., Ltd.

セルロースナノファイバー射出成形材料の カバー部品への適用

Application of Cellulose Nanofiber Injection Molding Material to Cover Parts

益子 徹也 井上 かおり 高橋 宏明 藤井 豊彦 大石 武司

Abstract

Currently, environmental pollution caused by the problem of marine micro and waste plastics is an issue that needs to be solved on a global scale. In the Yamaha Motor Group Environmental Plan 2050^[1], Yamaha Motor has set the goals the Company aims to achieve by 2050 in the areas of climate change, resource recycling, and biodiversity. Cover products such as exteriors parts are made of resin materials derived from petroleum and the recyclability has been an issue, especially for composite resin containing glass fiber or talc for strength reinforcement. The authors have focused on cellulose nanofibers (hereafter CNF), a plant-derived component, to address the issues of petroleum-based plastics, and began collaborating with pulp and paper manufacturer Nippon Paper Industries Co., Ltd (hereinafter Nippon Paper Industries) since 2015. Continued development led to its adoption for the 1,900 cm³ engine cover of the WV(Water Vehicle) in 2023. This is the world's first CNF adoption^[2] as a transportation equipment manufacturer, and this paper introduces this initiative accordingly.

1 はじめに

現在、海洋マイクロプラスチック問題や廃プラスチックの問題による環境汚染が地球規模で解決すべき課題となっている。『ヤマハ発動機グループ環境計画2050^[1]』においても、“気候変動”“資源循環”“生物多様性”を重点取り組み分野として2050年までに目指す姿を設定している。

外装などのカバー製品は石油由来である樹脂材料を適用しており、特に強度補強のためにガラス繊維やタルクが入った複合樹脂についてはリサイクル性が課題となっていた。筆者らは、2015年から石油由来のプラスチックの課題について植物由来成分であるセルロースナノファイバー(以下CNF)に着目し、パルプ製紙メーカーである日本製紙株式会社(以下日本製紙社)と協業を開始した。開発を継続することで2023年に WV(Water Vehicle)の1,900cm³エンジンカバーに採用された。これは輸送機メーカーとして世界初のCNF採用^[2]であり、本稿ではこの取り組みについて紹介する。

2 セルロースナノファイバーとは

木材は、セルロース・ヘミセルロース・リグニンから構成されており、鉄筋コンクリートに例えるとセルロースとヘミセルロースが鉄筋となりリグニンがコンクリートの役割を果たしている。この木材を処理方法によって異なる幅数 nm～数百 nmに解纖することで高性能な性質が得られることが分かったため、食品用途だけでなく工業用途に期待されている。以下にCNFの特徴を示す^[3]。

- ・ 植物であるため成長過程で光合成によりCO₂を吸収する。
- ・ 鋼鉄の1/5の軽さで、その5倍の強度を有している。
(繊維単体にて)
- ・ 熱膨張係数はガラスの1/50
- ・ 可視光波長(400～800nm)に比べ十分に細いため可視光の散乱を生じない。

WVのエンジンカバーはポリプロピレン樹脂(以下PP)をベースに鉱物のタルクを混ぜた複合材を使用しており、強度および剛性を必要とする部品である。今後の横展開も視野に入れて本取り組みでは汎用材であるベース材のPPで開発を進めることにした。原材料は食品用途などでセルロースナノファイバーの製造実績のある日本製紙社に協力いただき、ペレットとして提供いただいた(図1)。



図1 セルロースナノファイバー強化樹脂
「Cellenpia Plas®(セレンピアプラス)」

3 取り組み内容

3-1. 開発目標

WVは、船外機同様に海水と熱による過酷な環境下で使用されることから必要な要求機能を確保することを前提とし開発目標を以下に定めた。

1. 現行材料と同等の材料物性であること
2. 必要な材料強度と目標コストの達成
3. 現行部品と同等形状の成形性が確保できること
4. 100%リサイクル使用での5回繰り返し成形にて強度低下10%以内であること
5. 従来のエンジンカバーを刷新し、軽量感、素材感を表現できること

3-2. 材料特性

ISOダンベル試験片金型、短冊試験片金型を用いて射出成形機(川口機械80ton油圧機)にて、成形した。

比重(JISK7110)、引張試験(JISK7161)、曲げ試験(JISK7171)、シャルピー衝撃試験(JISK7111、ノッチ入り)を行った。

開発材と現行材を比較した結果を図2に示す。

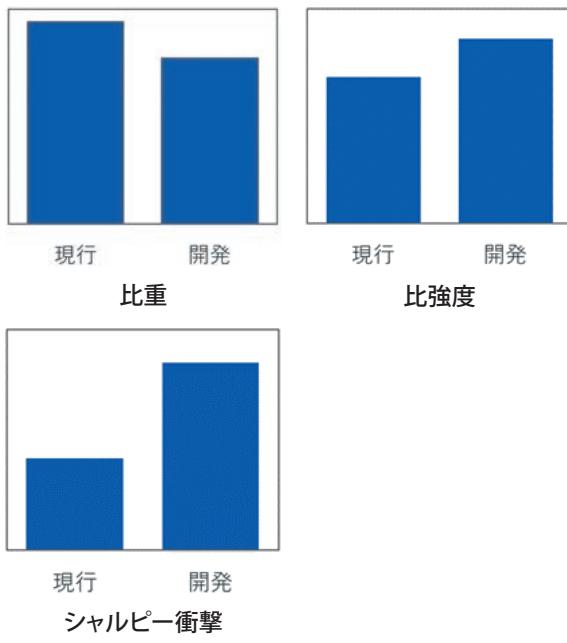


図2 現行材との比較

CNFはタルクよりも比重が低いため開発材の比重を低くすことができ、比強度にて現行材に対し25%向上、アイゾット衝撃値は2倍となり、現行以上の物性を得ることができた。

3-3. 成形性

開発材の成形性に関しては、スパイラルフロー型(図3)での流動長調査を行った。その結果通常の成形条件範囲内の調整で同様の流動長(図4)を得ることができた。よって成形上問題無いことを確認できた。



図3 スパイラルフロー型



図4 流動長成形比較

次に開発材の吸湿による成形性の影響を調べた。

150×120mm(板厚3mm)の金型を使用しホッパーへ投入前のペレット乾燥条件を変えて、射出成形後の外観を目視評価で調べた。

観察結果を表1に示す。通常の乾燥工程では表面に銀色の筋状のシルバーストリークが発生してしまう。乾燥条件が不十分であったと考え、乾燥温度や時間を適正に設定することでシルバーストリークを抑えることができた。

表1 乾燥条件によるシルバー発生有無

乾燥一般	水分率管理
シルバー発生	シルバー無し

3-4. リサイクル性

リサイクル材料の成型の際に通常はバージン材に混ぜて使用するが、材料の性状を確認するため、粉碎機(シュトルツSX-340)にてISO物性試験用成形品を粉碎し、100%リサイクル材で、成型を5回繰り返し、曲げ強度を確認した。結果、バージン材に対し曲げ強さの低下を10%以内に抑えることできた(図5)。

今後、バージン材と同等の強度を得るためにには、さらなる材料開発が必要である。

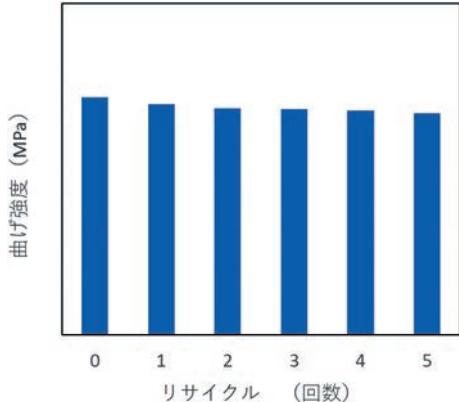


図5 曲げ強度に及ぼすリサイクル性

3-5. 製品設計とデザイン

スケッチ段階よりデザイン選定に関わったことから、早期にCMFG(カラー、マテリアル、フィニッシュ、グラフィック)開発や2分割部品構想、設計製造要件も取り入れ、デザインと設計意図双方に沿った外観に仕上げることが可能となった。

デザインは、従来の全体を覆ってエンジンを隠すエンジンカバーから脱却し、よりE/G(エンジン)を積極的かつ魅力的に見せる構成を考え、ストラットタワーバーをイメージしたクロスバー構成を訴求している(図6)。



図6 設計構想

・環境を意識した素材

軽量に見せながらも、上に乗るクロスバーを要所でしっかりと支えられる形状(ヘキサゴンシェイプ)で構成したベース(図6 COVER,1)の部分にCNFを業界で初めて採用し、環境対応視点からのアプローチを試みた。

・軽量化

従来モデルからエンジンカバーのデザイン刷新と材料変更をすることで、軽量化にも寄与している。

・セルロースナノファイバーの刻印(図7)

拭き取りの際のウエスの引っかかりや、また手で触った際に

平滑に感じるようにして、文字を凹み形状で彫り込むことで、メンテナンス性に配慮しつつもその存在をアピールするようにしている。



図7 刻印

・繊維(ファイバー)をイメージしたテクスチャー

エンジンヘッドカバーには比較的粗い梨地シボが施されており、その上に乗る部品として全体のカラーでは馴染ませながらも素材感での差異やコントラストを出すように意識した。ファイバー感を押し出すために、部品全体がファイバーの凝集によって構成されたようなイメージを想起させることを狙い、テクスチャーを厳選した。

・着色樹脂との組み合わせ(図8)

燃費の向上や新しいエンジンのイメージを想起させるように、クロス部分のベースカラーにはホワイトを採用した。さらに新規性を醸し出すよう偏光ブルーを織り交ぜた表現とした。ベースのヘキサゴンシェイプ部とはカラーをしっかりと分けてXを強調することで、これまでのエンジンカバーとは異なる新しさを押し出している。



図8 採用部品(クロスバー)

図9に搭載したモデルを示す。

環境材を採用することでなるべく早く社会貢献を行うことを目指し、必要材料物性、目標コストを満足し、重量含めて許容できる環境材料開発ができたことから、新規開発の1,900cm³エンジンからの搭載とした。



図9 搭載モデル「FX Cruiser HO」

■著者



益子 徹也
Tetsuya Mashiko
マリン事業本部
開発統括部
艇体開発部



井上 かおり
Kaori Inoue
マリン事業本部
開発統括部
艇体開発部



高橋 宏明
Hiroaki Takahashi
生産技術本部
生産技術部



藤井 豊彦
Toyohiko Fujii
生産技術本部
生産技術部



大石 武司
Takeshi Oishi
生産技術本部
材料技術部

4 おわりに

環境適応材料の開発としてCNFに着目して開発を進めてきた。工業用途への適用が少ない中、汎用材料であるPPにCNFを添加することで材料物性と成形性を従来材と同等にするための開発を継続してきた。新型WVの1,900cm³エンジンのエンジンカバーの部品開発では、環境性と意匠性の両立が可能となり、新たな価値も提供することができたと考えている。

今後、材料開発と生産性の開発を継続することで他商材への展開を目指していく。

■参考文献

- [1] ヤマハ発動機グループ環境計画2050
- [2] 2022年11月16日広報発表 当社および日本製紙社調べによる
- [3] 2010年12月13日 セルロースナノファイバーの製造と利用 京都大学生存圏研究所 矢野浩之

フラッグシップモデル「PW-XM」の軽量化技術 マグネシウムハウジング開発

Lightweight technology for the flagship model "PW-XM"
Development of magnesium housings

宇佐美 智丈 松原 圭祐 水落 新 小原 裕司

Abstract

In November 1993, the world's first electrically power assisted bicycle, "Yamaha PAS" was released in Japan. Today, 30 years on from the release, in addition to engaging in the development and manufacturing of vehicles as finished products such as the "PAS" and "YPJ" series, the company also has a B-to-B business of supplying components to bicycle manufacturers - i.e. "power assist systems" - consisting of a drive unit, battery, and display (which are considered a central part of an electrically power assisted bicycle). Yamaha's OEM supply to bicycle manufacturers outside Japan began in 2013. In recent years, electrically power assisted bicycles have seen their international market expanding. They have been popularized as sports-type electrically power assisted bicycles ("eBikes") especially in Western countries, where bicycles have traditionally been a common means of transportation. The sales of eBikes in Europe are expected reach 17 million units a year by 2030^[1]. Not only more and more bicycle brands have been entering the eBikes market, but the number of companies developing and supplying drive units is also increasing. This heightens the need for further improving and differentiating our products. Against this background, we have developed a drive unit with industry-leading torque and weight properties.

1 はじめに

1993年11月、世界で初めてとなる電動アシスト自転車の「YAMAHA PAS」を日本で発売した。発売から30年経った現在、当社では「PAS」や「YPJ」シリーズといった完成車としての開発、製造以外にも、電動アシスト自転車の心臓部ともされるドライブユニット、バッテリ、ディスプレイで構成された“Power Assist System”自体をコンポーネントとして自転車メーカーへ販売するBtoBビジネスも手掛けている。海外自転車メーカーに向けてのOEM供給は2013年から開始した。

昨今、電動アシスト自転車は、特に自転車文化の盛んな欧米諸国でeBikeと呼ばれるスポーツタイプの電動アシスト自転車として普及し、海外市場での広がりを見せている。欧州では、2030年までにeBikeの販売台数が年間1700万台に達すると予想されている^[1]。

eBikeを取り扱う自転車ブランドの増加だけでなく、ドライブユニットを開発、販売する企業の参入も増加しており、さらなる商品性の向上と差別化が求められている。

こうした背景から、業界トップクラスのトルクと重量を誇るドライブユニットの開発を行った。

2 開発の目的と狙い

「PW-XM」は2021年に発売したeBike用ドライブユニットである「PW-X3」の上位互換であり、性能は落とさず、さらなる軽量化を図ったモデルである(図1)。



図1 マグネシウム合金を採用した「PW-XM」

ドライブユニットの軽量化競争は年々激しさを増し、近年はグラム単位レベルになり、トルク密度の高さが商品価値の一つになっている(図2)。

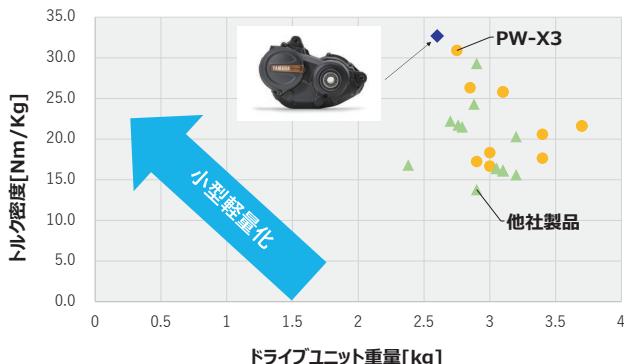


図2 ドライブユニット 重量／トルク密度マッピング

他社では実用金属の中で最軽量とされるマグネシウム合金(以降、Mg合金)をいち早く、筐体の材料として取り入れ、製品としてすでに市場投入している。

当社でも軽量化を実現するための手段として、本材料を筐体に採用することを検討した。

当社では、モーターサイクルのスーパースポーツモデルにマグネシウム合金ダイカスト(以降、MgDC)ホイールを量産化しており、モーターサイクルで培った鋳造技術、加工技術のノウハウがあった。

製品としての軽量化ニーズと自社保有のシーズが一致したこと、内製化での開発を実現するに至った。

3 開発課題

3-1. 構造・レイアウト

冒頭に触れた通り、本製品は「PW-X3」の上位互換という位置付けであるため、「PW-X3」をベースとする開発コンセプトであった。そのため、「PW-X3」採用車両との搭載互換性を維持することが求められた。搭載互換性とは、ドライブユニットとフレームの取り付け面のみを指すのではなく、フレームで覆われる部分の外観形状まで同じにすることを指す。

Mg合金は従来のアルミ合金に対して、比重が約30%小さくなる反面、材料強度、ヤング率は約40%低下、熱伝導性も約30%低下することが知られている。また、腐食しやすい金属でもあることから、これまで以上に耐食性に気を配る必要があり、単純な材料置換だけではこれまでの性能、品質を維持することができない。よって、これらの背反をいかに解決していくかが開発のポイントであった。

技術課題は概ね、①強度・剛性②放熱性③耐食性の3つに分類される。

【強度・剛性】

ヤング率が約40%低下するため、剛性を同一にするために

は1.6倍の断面係数になるように設計する必要がある。

断面係数を1.6倍にするためには、板厚を1.3倍にするか形状を1.2倍拡大する方法があるが、どちらも軽量化という開発目標に反する内容である。

そのため、機能的に必要な形状、空間を見直しつつ、構造解析を用いながら最適設計を行った。これにより重量増加を抑えつつ、従来同等の品質を達成することができた(図3)。

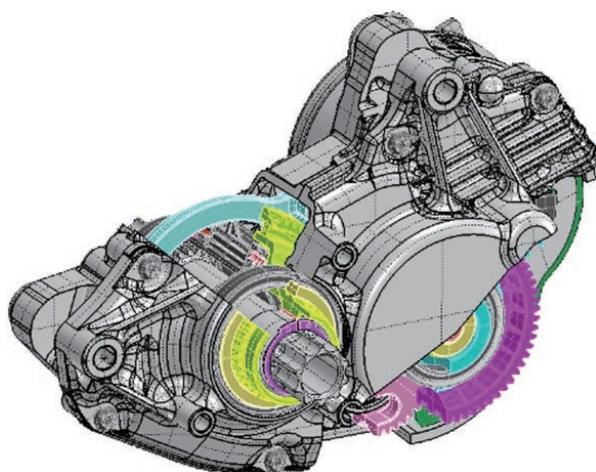


図3 ドライブユニット内部のカット断面

【放熱性】

連続走行可能時間を決定づける性能、指標で乗り物として重要な要素である。

開発当初は発熱による製品保護機能が早期に働き、開発目標を達成しない結果となった。そのため、モーターやコントローラ基板上の素子からの発熱を効率よく逃がすため、モーターを覆う筐体の表面積の拡大および放熱フィンを追加した。

【耐食性】

水分などの電解質を介した状態で異種金属との電位差により発生する“電食”を抑えるための構造を新たに検討した。後述する塗装工程の作り込みと新開発のシール構造を併用することで、Mg合金と水分が物理的に接触しない構造を採用し、品質の安定化に成功した。

3-2. 鑄造

MgDCではアルミニウム合金ダイカスト(以降、AlDC)に比べて、その合金の性質から湯じわ、湯境といった不良が発生しやすく、それらを起点とした割れ不良が発生する。また、従来モデルの材料であるADC12に比べて熱間割れに対する感受性が強く、割れやひびが発生しやすい合金もある。本製品においてもこれらの現象に対する対策が重要となった^[2]。

MgDCにおける割れは前述の特性から次のような場所で発

生しやすい。

1. 板厚変動量の大きい場所
 2. 凝固時に応力が集中する場所
 3. 充填に不利な湯じわ、湯境の発生しやすい場所
- 追加されたフィン形状などは上記1.～3.すべてに該当する要素である。

【1に該当する部位】

急激な板厚変動により隣接する部位で凝固時間の差が生じる。その際、境目において材料強度を超える応力が発生し、割れが発生する。この現象については通常板厚を緩やかに徐々することで回避する。本部品でもリブの合流部などに採用することで割れ防止を図った。

【2に該当する部位】

凝固時の条件、形状的要因など複数の要素により発生するため、事前検証が難しい。本製品においては試作品の出来映えを蛍光浸透探傷検査により評価し、発生部位に対して過去のモーターサイクル部品の事例を参考にリブを設置した^[3]。

【3に該当する部位】

湯じわ、湯境が発生する部位に、高い応力が生じる場合、割れへと進展する可能性がある。これらは何れも解析によって予測が可能である。解析の事前準備として、当社の AIDCにおいて作り込まれた技術理論値を基に、関連する特性値を MgDC へ置き換え、MgDC に対応した P-Q2線図を作成し鋳造条件の選定を行った。MgDC で必要な理論充填時間を満たすよう方案設計、条件設定を行い、流動解析により検証することで弱点部位の洗い出し、対策を行った。鋳造条件および方案での対策が困難な部位に関しては、応力解析の結果を参考し、流動危険部位かつ高応力部位に対して2同様にリブを設置することで補強を行った(図4)。

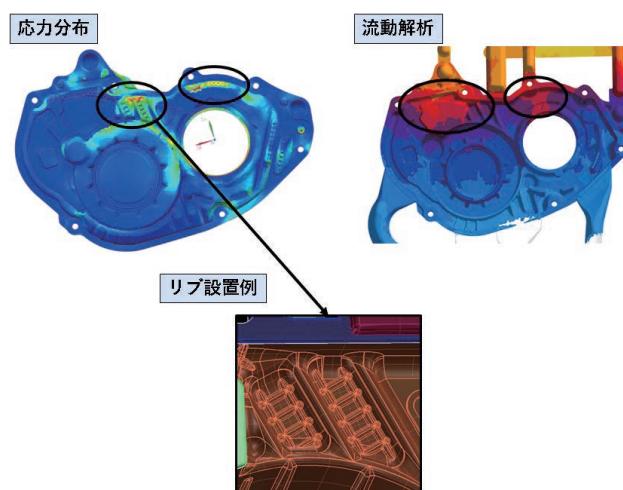


図4 製造および設計上の弱点部位検証

3-3. 加工

マイクロメートル単位の寸法・幾何精度を付与する精密機械加工工程のうちに化成被膜処理や塗装などの工程を通過すると、様々な要因により寸法・幾何形状が変化することが一般的に知られている。

Mg 合金を採用した「PW-XM」は製品内部へ化成被膜処理を施すことによって素地の露出を避け、耐食性を確保する必要があるため、寸法精度確保に対してリスクがあった。

そのため、数ある工程・要因ごとの寸法精度への影響を評価しつつ製品開発を進めた。

化成被膜処理の前処理に当たるエッチング工程にて顕著な寸法変化が見られたため、同工程の処理条件の管理幅を狭めることで寸法変化を抑えるとともに、これらの影響を考慮した中間管理公差を機械加工工程に設定することで要求品質を満たす管理規格を設けた。これにより、モーターサイクルのクランクケースなどと同等もしくは部位によってはそれよりも高い精度を実現する機械加工工程の構築が必要となった(図5)。

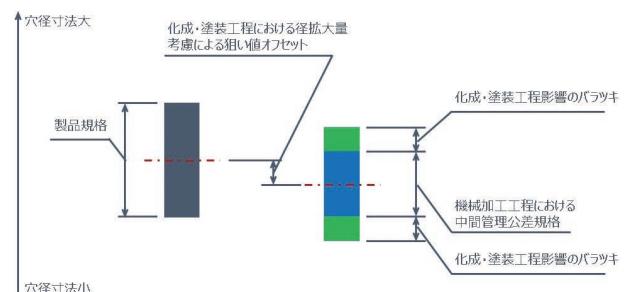


図5 後工程影響を考慮した中間管理公差設定イメージ

全般として物質は温度が高くなれば膨張し、低くなれば収縮するが、精密加工においてこの熱による膨張・収縮が製品の精度に影響する。

加えて Mg 合金は Al 合金に比べて温度が1°C変化したときの膨張・収縮量が大きくなるため機械加工工程における周囲環境・工作機械・ワークピースの温度を管理する必要があった。

他 Mg 合金製の部品を生産してきた機械加工ラインでは精度確保が困難と判断したため、「PW-XM」向けに専用機械加工ラインを設置した。

この製造ラインには切削液を一定温度に保つ装置、熱変位を補正する工作機械などのハードウェアの導入に加えて従来よりも高頻度のワークピース測定とフィードバックなどの管理・運用方法の変更により、要求される寸法・幾何精度を実現するに至った。

3-4. 塗装

表面処理の開発では、凹凸の差が大きく間隔も狭い複雑形状を持つドライブユニットの

1. 外観の出来映えと耐食性を確保すること
2. 異種金属接触腐食への対応

を「化成処理+静電塗装」で達成することを目指した。

【1. 外観品質と耐食性】

幾つかの条件設定で作製した試作品で品質保証部門とのレベル合わせを実施し目標レベルを設定した。意匠上からスケ・タレ・ワキが懸念される部分、機能上から塗装不可範囲の設定もありという制約の中で幾度となく塗装条件、マスキング方法を変えながら都度、外観上の品質と塗装膜厚の出来映えを確認し作り込んでいった。塗装面の耐食性については、現行量産中の素材を使用した事前評価では、目標値に届かなかつたが、下塗りを改良することで目標を達成することができた(図6)。

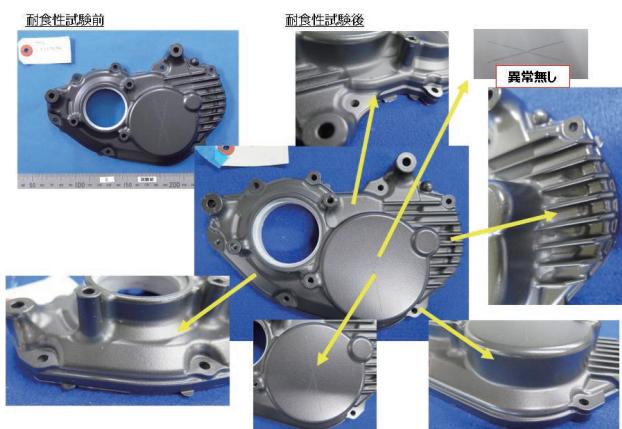


図6 耐食性試験結果

【2. 異種金属接触腐食への対応】

異種金属接触による腐食は、ボルト締結部とベアリングを覆っているシール嵌合孔に発生した。

水が溜まりづらい形状への変更と相手側のボルト、シール構造の見直しを開発側で進めた。並行して塗装側では、条件を数水準設定した試作トライと耐食性評価、塗膜厚さの測定を繰り返し行った。その結果、ある膜厚以上の下塗り層を確保することができれば、腐食を抑制できることがわかったため、最低膜厚値を決定した。

安定的に膜厚が確保できる下塗り塗装の手順を見直したことで懸念部の耐食性をクリアすることができた(図7)。



図7 腐食懸念箇所の膜厚分析

今回、表面処理工程を新たな協働相手と進めたことで、生産部門が主体となり品質保証体制を構築し、量産供給も万全な体制で開始することができた。

4 おわりに

「PW-XM」は当社最軽量のドライブユニットに仕上げることができた。ベースモデルがあったとはいえ、電動アシスト自転車特有の短期間での開発を達成できたことは、開発部門だけでなく、調達、製造、材料技術などのヤマハ発動機グループ内の様々な関係部門が一丸となって取り組んできた結果である。

今後も、電動アシスト自転車としてのさらなる提供価値の創造と市場競争力のある魅力ある商品開発を目指すとともに、脱炭素社会の実現に向け、カーボンニュートラルなライフスタイルを社会に提案していきたい。

■参考文献

- [1] Get Ready for the Cycling Boom - Experts Predict 30 million Bicycle Sales by 2030 | ECF
- [2] 小河原 和夫:超薄肉マグネシウム合金ダイカスト—その生産技術と不良対策 カロス出版
- [3] 塚本 健二, 小倉 純一, 稲村 隆義, 下位 誠:マグネシウム真空ダイカスト鋳造ホイールの開発(2017)

■著者



宇佐美 智丈

Tomohiro Usami

ランドモビリティ事業本部

SPV事業部

第1開発部



松原 圭祐

Keisuke Matsubara

生産本部

製造技術統括部

PT アルミ技術部



水落 新

Shin Mizuochi

生産本部

製造技術統括部

PT アルミ技術部



小原 裕司

Yuji Kohara

生産技術本部

材料技術部

「PAS」磁歪式トルクセンサのFe-Ni合金めつき工程における廃棄物削減工法の開発

Development of a Waste Reduction Method for the Fe-Ni Alloy Plating Process of "PAS" Magnetostrictive Torque Sensors

大西 弘道

Abstract

The power assisted electric bicycle "PAS" is named after the initials of the Power Assist System, and was launched by Yamaha Motor in 1993 as the world's first bicycle that assists the user in response to human power input. The market for power assisted electric bicycles with extremely low CO₂ emissions has been expanding in recent years due to growing interest in the Sustainable Development Goals, and further environmental considerations are required in the manufacturing process.

Yamaha Motor Electronics Co., Ltd.(hereinafter "the Company") develops and manufactures drive units that sense and generate drive power for the "PAS", and is taking various measures to reduce environmental impact, including power-saving and resource conservation in the manufacturing process. This study introduces the Company's resource conservation efforts in the Fe-Ni alloy plating process for magnetostrictive torque sensors that detect pedal force.

1 はじめに

電動アシスト自転車「PAS」は Power Assist System の頭文字が由来となっており、1993年にヤマハ発動機から世界で初めて人の力に応じてアシストしてくれる自転車として販売された。近年 SDGsへの関心の高まりから CO₂排出量が極めて少ない電動アシスト自転車の市場は拡大しており、製造プロセスにおいてはより一層の環境配慮が求められる。

ヤマハモーターエレクトロニクス株式会社(以下、当社)では「PAS」のセンシングと駆動力発生を担うドライブユニットの開発および製造を手掛けており、製造プロセスの省エネ・省資源化など環境負荷低減のため様々な取り組みを行っている。本稿ではペダル踏力を検出する磁歪式トルクセンサのFe-Ni合金めつきプロセスにおける当社の省資源化の取り組みについて紹介する。

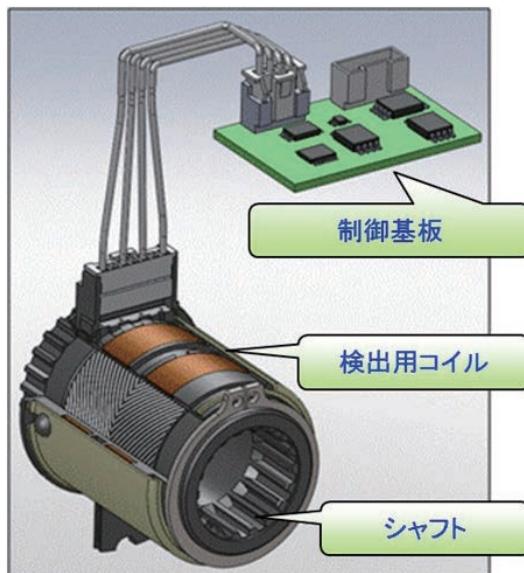


図1 トルクセンサの構成

2 磁歪式トルクセンサの構造

「磁歪式トルクセンサ」は磁歪効果を持つシャフト、検出用コイルと、電気信号を增幅かつノイズを除去する基板から成る。シャフトの表面には磁歪効果を高めるため Fe-Ni 合金の磁歪膜をシャフト軸に対し 45°、-45° の角度で成膜している(図1、図2)。磁歪膜にはそれぞれに検出コイルが付帯しており、このときコイルのインピーダンス Z およびインダクタンス L は①式と②式で表される。



図2 シャフトと磁歪膜

磁歪膜にはペダル踏力に応じてそれぞれ引張、圧縮の応力が作用し、透磁率 μ はそれぞれ増大・減少する(逆磁歪効果)。透磁率の変化にともないインダクタンスおよびインピーダンスが増減するため、磁歪式トルクセンサでは各コイルのインピーダンスの差動を測定することでペダル踏力に比例するセンサ出力電圧を得ている。

$$Z = R + j\omega L \quad \dots(1)$$

$$L = \frac{\mu S n^2}{l} \quad \dots(2)$$

Z:コイルのインピーダンス R:コイルの直流抵抗

ω :角周波数 L:インダクタンス

μ :磁性膜の透磁率 S:磁歪膜の断面積

n:コイル巻線数 l:磁路長

シャフト表面の磁歪膜にはFe-Ni合金を採用している。Fe-Ni合金は高透磁率、低保磁力という優れた軟磁気特性と高い磁歪定数を持ち高感度のセンサを実現している。電解めっきにより成膜し熱処理することで基材と強固な接合が得られ、低コストと高信頼性を兼ね備える^[1]。

3 現状の課題分析と開発の狙い

Fe-Ni合金めっきの特徴としては、めっき液に使用される有機化合物によりFe-Ni以外の元素が磁歪膜内に共析し皮膜物性およびセンサ性能に影響を与えることが挙げられる。共析元素は結晶の微細化などセンサの磁気特性に有利に働く部分もあるが、有機化合物が分解されめっき液に蓄積することにより徐々に磁歪膜の物性が変化することが経験的に知られてきた。分解した有機化合物は一般的にめっき処理で用いられる活性炭濾過などでは除去しきれず、一定の処理台数に達するとめっき液を廃却・建浴しなおす必要があるため廃棄物量が課題となっている。

Fe-Ni合金めっきに用いられる有機化合物としては液中で酸化した鉄イオンを還元する還元剤と、皮膜内に圧縮応力を付与する応力緩和剤が挙げられる。これらを用いためっき皮膜には炭素と硫黄が共析することが知られているが、めっき処理に伴う有機化合物の分解と共に析する炭素・硫黄量の変化について扱った文献は少ない。そこで磁歪式トルクセンサのめっき処理台数と、めっき皮膜に共析する炭素・硫黄量の関係を調査することとした。分析には燃焼-赤外線吸収法を用い、得られた結果を図3のグラフに示す。めっき処理台数の増加にともない皮膜内に共析する炭素と硫黄が増加することが確認された。

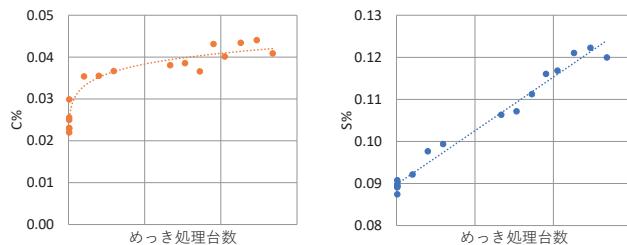


図3 めっき処理台数に対する磁歪膜の
炭素共析量(左)と硫黄共析量(右)

このうち還元剤を用いない浴では炭素が増加しないことが実験的に確認されたため、皮膜内炭素が増加する原因が還元剤とその分解物であり、皮膜内炭素の増加がセンサ性能に影響を与えていると著者は考えている。同様に応力緩和剤を添加しない浴では皮膜内硫黄の増加が見られなかったため、応力緩和剤とその分解蓄積物が皮膜内硫黄量とセンサ性能に影響を与えると考えられる。

本開発では還元剤と応力緩和剤の分解蓄積をそれぞれ対策することにより皮膜組成の変動とセンサ性能の変化を抑え、めっき液の廃棄を少なくすることを目標とした。

4 還元剤

4-1. 還元剤の役割

Fe-Ni合金めっきを含む鉄系合金めっきにおいては、電解や空気酸化によりめっき液中の Fe^{2+} が酸化され Fe^{3+} となり、陰極電流効率が落ちる、皮膜が脆くなる等の問題が生じる^[2]。磁歪式トルクセンサにおいてはFe-Ni合金比の変化によるセンサ性能の変化がいち早く顕在化する。そのため還元剤として有機化合物を用いて Fe^{3+} を Fe^{2+} に還元する対策が一般的にされている。

4-2. 還元剤の対策

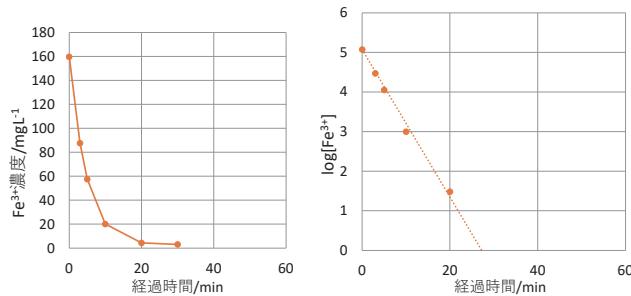
還元剤を用いない方法としては弱電解処理による還元が挙げられるが、 Fe^{3+} 発生速度に対し著しく還元効率が悪く設備の大型化が避けられない。

そこで還元剤の分解物として有機化合物が蓄積しないよう、無機物を還元剤として用いることを検討した。候補としては皮膜成分である鉄かニッケルが挙げられるが、Fe-Ni合金めっきでは Fe^{2+} 量に敏感に反応し合金比が変化する。そのため金属ニッケルの粉末を用いて③式の反応による還元を試みた。



めっき液1Lにニッケル粉末5gを投入し攪拌した際の Fe^{3+}

濃度の変化を図4のグラフに示す。 Fe^{3+} は経過時間に対し指数関数的に減少し、縦軸に対数を取ると概ね直線のグラフとなる。これを式に表すと④式の通りとなる。還元速度は④式を微分することにより求まり、⑤式となる。還元速度は Fe^{3+} 濃度とグラフ傾きである反応速度定数 k に比例することが確認できる。

図4 めっき液中の Fe^{3+} 濃度推移

$$\begin{aligned}\log[\text{Fe}^{3+}]_t &= -kt + \log[\text{Fe}^{3+}]_0 \\ [\text{Fe}^{3+}]_t &= [\text{Fe}^{3+}]_0 e^{-kt}\end{aligned}\quad \dots(4)$$

$$\begin{aligned}(\text{Fe}^{3+} \text{還元速度}) &= \frac{d}{dt} [\text{Fe}^{3+}]_t \\ &= \frac{d}{dt} [\text{Fe}^{3+}]_0 e^{-kt} \\ &= -k [\text{Fe}^{3+}]_0 e^{-kt} \\ &= -k [\text{Fe}^{3+}]_t\end{aligned}\quad \dots(5)$$

t:時間 k:反応速度定数

$[\text{Fe}^{3+}]_t$:時間 t のときの Fe^{3+} 濃度

$[\text{Fe}^{3+}]_0$: Fe^{3+} の初期濃度

使用する粉末量の調整や、粉末でなくペレット等の粒を使用する等して表面積を変化させると、k の値が表面積に比例することが確認できた(図5)。表面積は SEM(走査型電子顕微鏡)、光学顕微鏡を用いて各試料の粒径を計測し、平均粒径からおよその表面積を算出した。

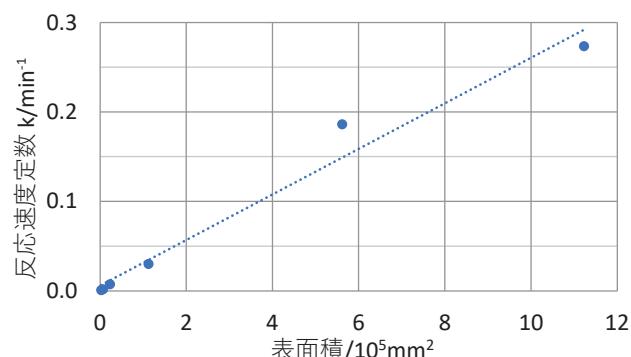


図5 ニッケル表面積と反応速度定数 k の関係

比表面積(重量当たりの表面積)はペレット等と比較し粒径の小さい粉末の方が圧倒的に大きく、少量・短時間で Fe^{3+} を還元できる。そのため還元装置自体は小型化が可能であるが、還元装置以外にも高度な過装置が必要となり、金属粉末の取扱安全性にも課題がある。そこで比表面積の大きい粒状の多孔質ニッケルを用いることで還元速度の確保と設備小型化の両立を試みた。結果としては、予想に反して粒径から算出した表面積と k 値の関係が図5と同等になり、還元速度は速くならなかった。試験前後の試料表面 SEM 像を図6に示す。初期状態では試料表面に微細な凹凸があるが、めっき液から引き揚げた試料表面は凹凸が消失していることが確認できる。溶解により表面の凹凸が消失し表面積が小さくなつたことが還元速度が速くならない原因であると考えられる。

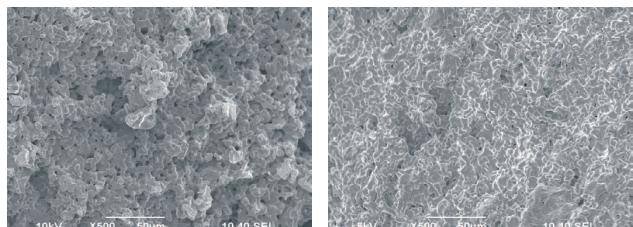


図6 多孔質ニッケル 使用前(左)と使用後(右)

そこで、溶解しても表面積が変わらないメッシュ状の連続気孔を持つ多孔質ニッケルを検討しセルメット®(住友電気工業)を選定した。使用したセルメットは $3750\text{m}^2/\text{m}^3$ という大きな比表面積を持ち、良好な還元速度を示した(図7、図8)。セルメットはニッケル水素電池の電極としても使用される材料であり、純度が高く比較的安価に入手できる。形状は多孔質のシート状であり任意の形状に加工して使用できる利点がある。事前にラボスケールの試験で Fe^{3+} の発生速度とセルメットの単位量当たりの反応速度定数さえ把握しておけば必要なセルメット量は⑤式より求まり、液量に応じた最適な規模の設備設計が可能である。

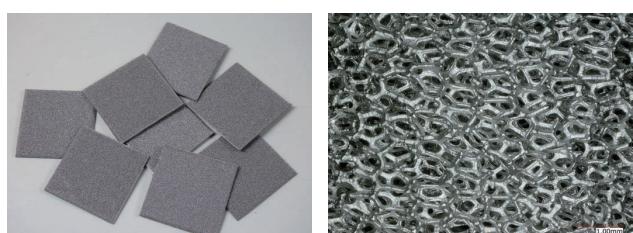
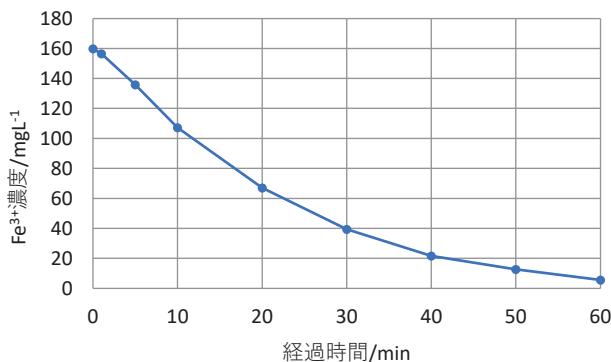


図7 セルメット外観(左)と拡大図(右)

図8 セルメット使用時のFe³⁺濃度推移

還元剤として有機化合物を使用した浴と、セルメットを使用した浴から析出しためっき皮膜中炭素量を分析した結果を図9のグラフに示す。セルメットを使用した浴では従来と異なり皮膜中の炭素量の増加は見られなかった。

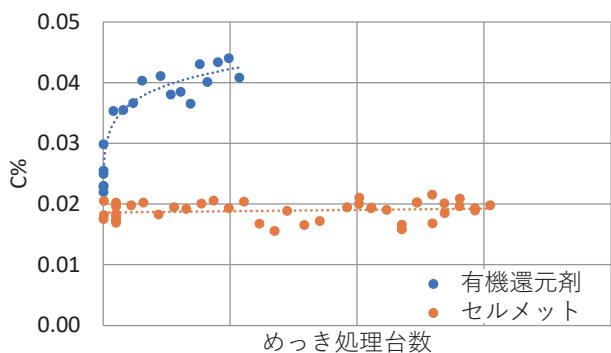


図9 皮膜内炭素增加の対策効果

5 応力緩和剤

5-1. 応力緩和剤の役割

応力緩和剤とは芳香族スルホン酸類や芳香族スルホンイミド類などの硫黄化合物のことであり、電解ニッケルめっきでも添加剤として広く用いられる^[3]。これらの硫黄化合物はめっき処理にともない陰極表面で分解され、めっき皮膜中に硫黄原子が共析することで皮膜に圧縮応力を付与する。さらにめっき皮膜の表面を平滑にする、結晶を微細化する、熱処理によって結晶粒界に偏析する等、複雑な挙動で皮膜物性とセンサ性能に影響を及ぼす。めっき皮膜に取り込まれなかった分解物はめっき液中に蓄積することとなる。

一方、陰極表面で硫黄原子が皮膜に取り込まれる反応以外にも陽極表面での電気分解やめっき槽のヒーター高温部等で分解が進み、めっき液中には複数種類の硫黄化合物が共存する状態となる。分解物の多くはLC/MS(液体クロマトグラ

フィー質量分析法)によって検出が可能であり、単一の応力緩和剤が十種類以上の硫黄化合物に分解される様子が確認できる。各物質の挙動は明らかでないが、応力緩和剤がよりめっき皮膜内に取り込まれやすい構造に変化することでめっき皮膜内の硫黄量が増加すると筆者は考えている。

5-2. 応力緩和剤の対策

Fe-Ni合金めっきでは成膜過程で皮膜内に引張応力が生じ、応力緩和剤を添加しない浴ではクラック(亀裂)が発生する。筆者らは応力緩和剤を用いずクラックを防止できる浴を検討したが、引張応力による信頼性への懸念を払拭しきれず実用化には至っていない。そのため陰極反応以外での応力緩和剤の分解を抑制することで皮膜内硫黄量の増加を緩やかにしめっき液の寿命を引き延ばす方法を検討した。

応力緩和剤は陰極反応以外に陽極で分解される場合がある。近年陽極のメンテナンス性等の観点から不溶性陽極の適用が報告されており^{[4][5][6]}当社でも採用している。不溶性陽極の場合、めっき処理にともない陽極表面で水の電気分解、添加剤の酸化分解、Fe²⁺の酸化によるFe³⁺の発生等が起こる。陽極材として可溶性陽極を用いた場合、陽極表面での反応がほぼ100%陽極の溶解反応となるため添加剤の分解は抑制できる。可溶性陽極を用いた場合でも陽極電流密度が高くなると添加剤が分解されるため、可能な範囲で陽極表面積は広く取った方が良い。さらに可溶性陽極の場合、不溶性陽極よりも低い電圧で処理ができるため消費電力の低減にもなる。

また応力緩和剤を含む添加剤の一部は建浴直後から分解が進み、熱により分解が促進されることが知られている。Fe-Ni合金めっきはヒーターで加温し浴温度50°C程度で処理されるが、使用するヒーターによってはヒーター表面温度が100°Cを超える添加剤の分解が促進される。具体的には石英ヒーター等の直管形状であれば表面積が小さいため表面温度が高くなり、テフロンヒーター等のリング形状であれば表面積が大きいため表面温度は浴温よりわずかに高い程度になる。浴の攪拌によってもヒーター表面温度は変化するが、当社ではヒーター表面温度を浴温より15°C高い程度に抑えてめっき処理を行うようしている。Fe-Ni合金めっきに限らず、添加剤を含有するめっき浴は熱による添加剤分解の恐れがあるため表面積の大きいヒーターを用いることが望ましい。

めっき液中の応力緩和剤の濃度低下推移を図10に、皮膜内硫黄增加推移を図11に示す。条件1は不溶性陽極と直管型の石英ヒーター、条件2は可溶性陽極とリング型のテフロンヒーターを用いている。不溶性陽極はTi基材にPtをコーティングしたもの、可溶性陽極はHandy-S(住友金属鉱山)を使用した。

めっき処理はめっき液1Lあたり1.9Ah相当の電気量で電解しているが、可溶性陽極を使用した場合の皮膜内硫黄量は電解量よりも経過時間と相関が強いためグラフ横軸には経過日数を置いた。図10の条件1は実際には濃度変化しないよう随時応力緩和剤を補給しているため、補給しなかった場合の濃度を分析値と補給量から算出している。条件2は応力緩和剤の補給をしなかったため実測値である。条件1と比較し、条件2の応力緩和剤分解速度は約91%低下し、皮膜内の硫黄增加速度は約72%抑制されていることが確認できた。

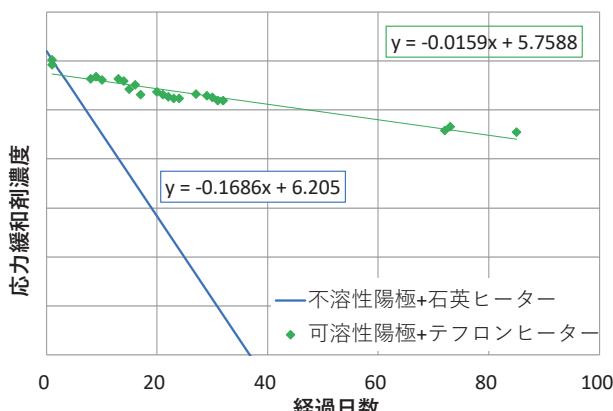


図10 めっき液中の応力緩和剤濃度推移

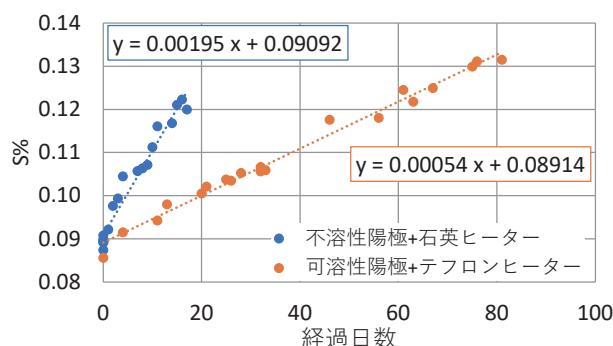


図11 皮膜内硫黄量増加の対策効果

6 おわりに

今回、「PAS」磁歪式トルクセンサのFe-Ni合金めっき工程における省資源化を検討し下記の結果を得た。

1. 磁歪式トルクセンサのめっき処理量の増加に伴うFe-Ni合金磁歪膜内に共析する炭素、硫黄量の増加を明らかにした。
2. 有機還元剤に代わり多孔質ニッケルを用いた Fe^{3+} の還元を行うことにより、めっき液劣化に伴う磁歪膜の炭素共析量の変化をゼロにした。

3. 陽極およびヒーター表面での応力緩和剤分解を抑制することにより、めっき液劣化に伴う磁歪膜の硫黄共析量の変化を72%削減した。

センサ性能の詳細は伏せるが、皮膜組成の変動を抑制することにより皮膜物性およびセンサ性能の変化が抑制できることが裏付けられている。これによりめっき液を長期間使用することが可能となり、廃液削減による省資源化を達成することができた。さらには原材料費の低減、センサ性能の向上にも有効な技術であると考える。

最後に、当社をはじめとし製造業界では製品に表面処理を必要とする場面が多くあり、カーボンニュートラルに代表されるSDGsに対応するため様々な取り組みが行われている。今回紹介しためっき工程における省資源化の知見はトルクセンサのみならず、広範な領域で適用が可能な技術であると考える。本誌に寄稿することにより製造業全体のSDGs達成に資することができれば幸いである。

■参考文献

- [1] 小林秀之ら;PAS用磁歪式トルクセンサのめっきシャフト量産技術開発(ヤマハ発動機技報第53号, 2017)
- [2] 青谷薫;合金めっきIX-Fe合金めっき p. 274(日本プレーティング協会, 2010)
- [3] 電気鍍金研究会;現代めっき教本 p. 67(日刊工業新聞社, 2011)
- [4] 岸富也;表面処理プロセスにおける不溶性アノード(表面技術42巻8号, 1991)
- [5] 梶野正樹ら;アルミニウム合金への高速・耐摩耗Feめっき(豊田中央研究所R&Dレビュー Vol. 33 No. 4, 1998)
- [6] 石田幸平ら;Fe-W合金めっきにおけるFe(III)の影響とイオン交換膜-複数陽極システムを用いた連続めっき(表面技術67巻9号, 2016)

■著者



大西 弘道
Hiromichi Onishi
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

搭載精度15μmを実現するための実装研究と技術開発

Application research and technological development to achieve mounting accuracy of 15μm

鈴木 康弘

Abstract

In recent years, as smartphones and communication devices have become more sophisticated, electronic component packages such as communication modules that are inserted into these products have continued to become more compact. To achieve miniaturization, small electronic components must be densely arranged within the limited space on an electronic board. As a result, advanced mounting technologies, such as the mounting of extremely small components of 0.25 mm × 0.125 mm size called 0201 chips and narrow adjacent mounting with extremely narrow adjacent pitch between components (Figure 1) are required of surface mounters (hereinafter referred to as "mounters") manufactured and marketed by Yamaha Motor Co., Ltd. (hereinafter referred to as "the Company"). In particular, the demand for mounting accuracy (the maximum amount of deviation from the target mounting position) has been increasing year by year. To meet this demand, the Company has promoted the development of mounter's mounting accuracy and has continued to meet these expectations (Figure 2). This paper introduces some of the mounting research processes and mounting accuracy improvement technologies that we have been working on in recent years.

1 はじめに

近年、スマートフォン・通信デバイスの高性能化に伴い、それらの製品に組み込まれる通信モジュールなどの電子部品パッケージは小型化の一途をたどっている。小型化を実現するためには、電子基板の限られたスペースに小型電子部品を高密度に配置する必要がある。

そのため、「ヤマハ発動機株式会社(以下当社)」が製造・販売している表面実装機(以下マウンター)には0201チップと呼ばれる0.25mm × 0.125mm サイズの極小部品搭載、部品間の隣接ピッチが極めて狭い狭隣接搭載など、高度な実装技術が求められている(図1)。

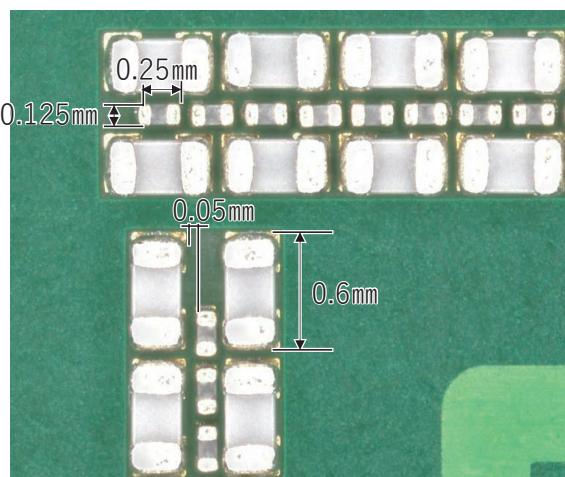


図1 0603・0201狭隣接搭載

特に搭載精度(目標搭載位置に対する最大ずれ量)に対する要求は年々高まっており、その要求に応えるため、当社ではマウンターの搭載精度開発を推進し、期待に応え続けてきた(図2)。

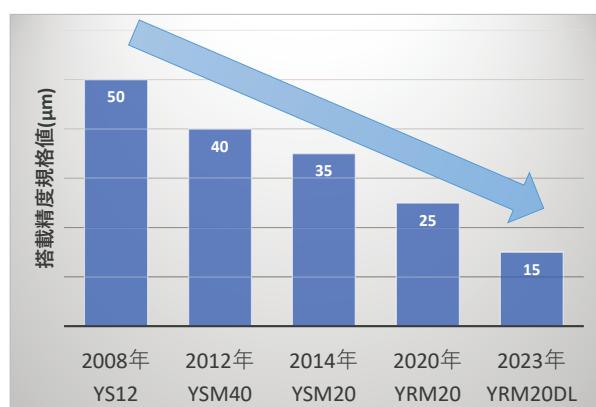


図2 当社マウンターのモデルリリース年と搭載精度規格

本稿では、近年取り組んだ高精度搭載を実現する実装研究プロセスと搭載精度向上技術の一部を紹介する。

2 マウンターの仕組み

当社で開発されているマウンターの代表的な構成を図3に示す。マウンターはフィーダーと呼ばれる部品供給装置から電子部品を吸着し、部品認識カメラで電子部品の位置を認識する。そして電子基板上に設けられたマークを基板認識カメラで

認識することによって基板の位置を特定して、電子部品を基板上の所定の位置に搭載する。

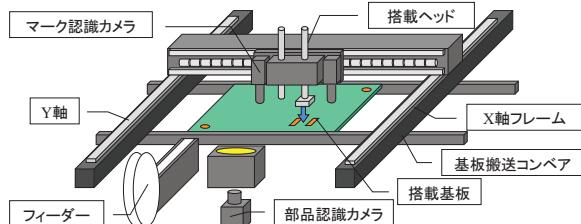


図3 マウンター構成図

「YRMシリーズ」と呼ばれる最新シリーズでは2020年リリースモデルで $25\mu\text{m}$ の搭載精度を達成した。しかしながらさらなる高精度化の要求があり、フラッグシップモデル「YRM20DL」では $25\mu\text{m}$ に対して40%アップの搭載精度 $15\mu\text{m}$ に挑戦した。これを実現するためには、体系的な実装研究が必要であった。

3 搭載精度向上研究プロセス

基板上の決められた位置に部品を正確に搭載することを阻む要因は多岐にわたり、その影響度も様々である。さらなる搭載精度向上のために、まず、あらゆる精度劣化要因を抽出し、その寄与度を明らかにすることから始めた。

搭載動作に関わる要素を抽出すると70項目以上になり、それぞれの要素が搭載精度に与える影響を評価する必要があった。しかし、限られた期間ですべての要素に対して精度への影響を調査することは難しい。そこで重回帰分析という手法を用いて精度劣化要因を抽出することにした。これは、目的変数を搭載精度 $dX \cdot dY$ 、説明変数を各要素として、少ない試行回数で効率的に精度劣化要因を抽出することができる分析手法である。

その結果、搭載精度と相関のある16要素を特定できた(図4)。特定したそれぞれの要素に対しその原因と対策を検討し、効果があるものから採用することで、今までできなかった高速・高精度搭載を実現することができた。

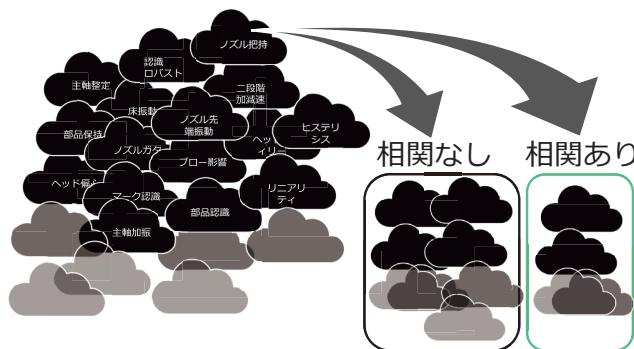


図4 要因抽出イメージ

今回は16要素の中で最も複数の要素に絡み、根源的な原因であった残留振動と、次点の原因であった熱変化の対策を紹介する。

4 振動対策

まず、何がどの程度揺れているかを特定するため、部品搭載動作時の振動を測定した。振動が搭載に及ぼす影響を正確に把握するには、搭載する部品を持つノズル先端と、部品が搭載される基板の両方の振動を測定する必要がある。そこで、振動の振幅を測定するレーザー測長機を治具基板に取り付け、その治具基板をコンベアに固定することで基板に対するヘッドの変位を観測した(図5)。

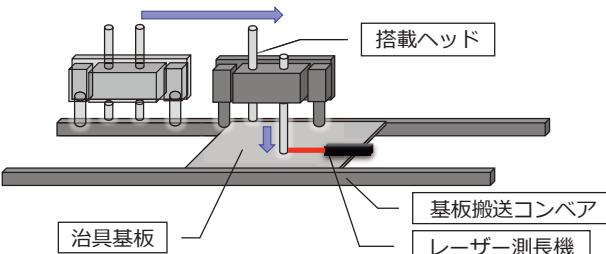


図5 ノズル先端振動測定 概略図

レーザー測長機で取得した周波数をFFT解析し固有振動数と照らし合わせることで、揺れている搭載精度に影響する部位をXビーム・コンベアなど数か所に特定した(図6)。

Y方向移動時のノズル先端スペクトル

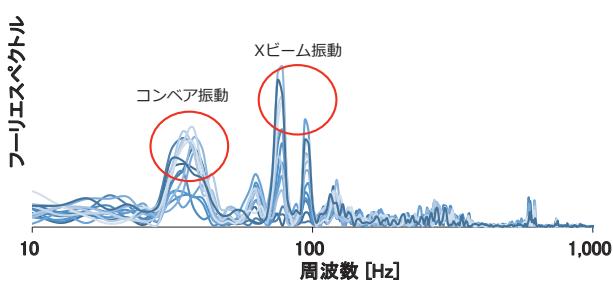


図6 スペクトルグラフ

この中で最も振幅の大きいコンベアに対しては、高剛性コンベアと基板固定ユニットを新設計し、従来比約2倍の耐振動性能を確保できた。

Xビーム振動は、Xビームそれ自体が可動部であるため、振動を減らすためには動作速度を落とすことが一般的である。

かしながら、搭載速度を落とせば生産性が下がり、商品価値が下がってしまう。そこで当社のコア技術であるサーボ技術のひとつである制振制御技術を採用することにした。

制振制御とは、ターゲットとする周波数に対して振動を抑制する技術である。今回、搭載精度に影響を及ぼす振動の発生源を特定し、適用周波数を限定したことにより採用が可能となった。これにより精度劣化を抑え、高精度搭載に大きく貢献することができた(図7)。

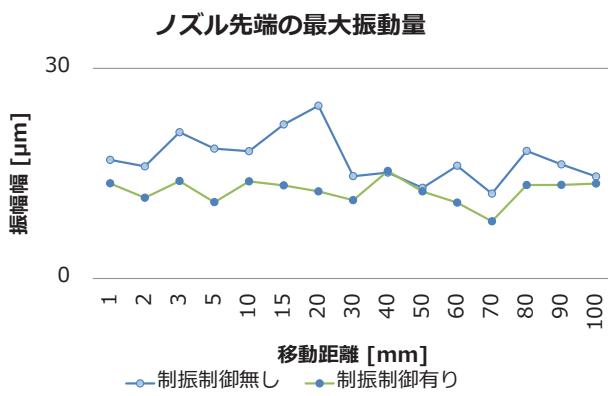


図7 制振制御有無とノズル先端振幅幅

当社では、マウンターに特化したモーター制御技術を自社で磨き上げてきた。そのためモーターメーカーに頼ることなくPDCAサイクルを素早く回し最適解を得ることができた。当社の強みを如何なく發揮し得られた成果であった。

5 熱対策

5-1. 概要と効果

マウンターは長時間部品実装動作をするロボットであり、構成する各部材は稼働状況により激しい温度変化にさらされる。X軸Y軸の熱伸縮による搭載精度へ及ぼす影響を軽減するため、当社ではマウンターのベースにリファレンスマーカーを設け、実装動作中に定期的に熱変化を補正するシステムを採用している(図8)。

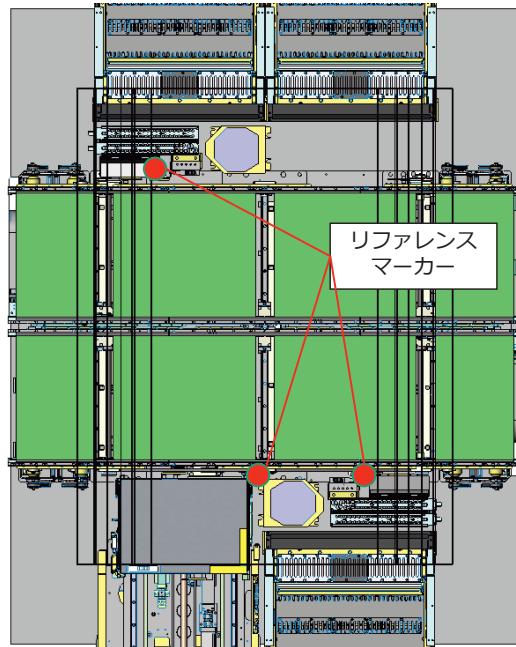


図8 リファレンスマーカー配置図

しかしこのシステムでは軸の熱伸縮による平行成分のずれは補正できるが、ヘッドユニットの傾きによるずれは補正できず、近年の高精度搭載ではこの影響が課題となっていた。

ところで、当社のマウンターにはマーク認識カメラを2つ有している(図9)。ヘッドユニットの両端にマーク認識カメラを設けることで、マーク認識するための移動距離が短くなり、タクトが短縮され生産性向上につながる。

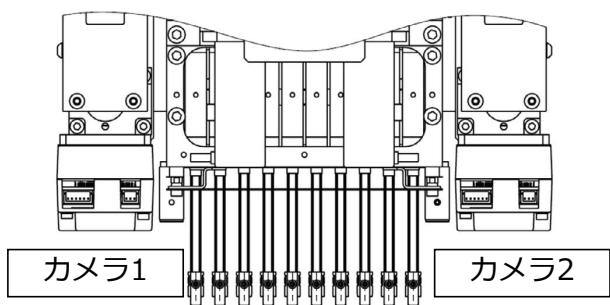


図9 ヘッドユニットとマーク認識カメラ

この機構を利用し、それぞれのカメラでリファレンスマーカーを定期認識することで熱によって変化したヘッドユニットの傾きをリアルタイムで推定し各搭載位置で補正する独自のアルゴリズムを開発した。その結果熱による搭載精度劣化を最大30%抑えることに成功した(図10)。

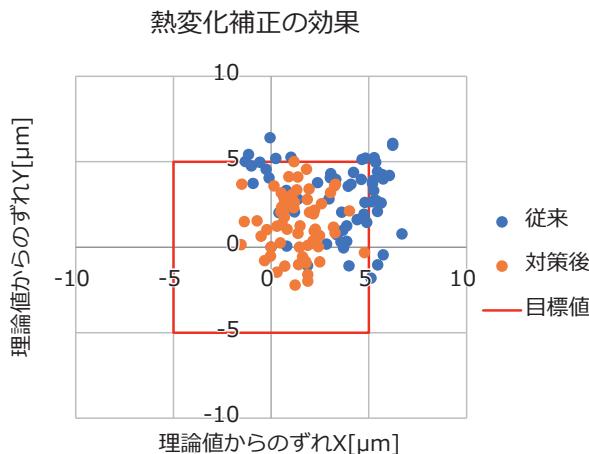


図10 対策前後の熱変化によるずれ量比較

また、この補正アルゴリズムでは、想定していなかったマーク認識カメラとヘッドユニット間のX方向の熱伸縮による影響を軽減する効果もあった。

5-2. 補正アルゴリズムの詳細

5-1で紹介した熱補正アルゴリズムについて、その詳細を以下に示す。

- (1) カメラ1で複数のリファレンスマーカーを認識し、認識結果から搭載ヘッドが搭載座標XYにあるときのカメラ1の位置の補正量を算出する(図11)
- (2) カメラ2でも(1)と同様に搭載座標におけるカメラ2の位置の補正量を算出する(図11)

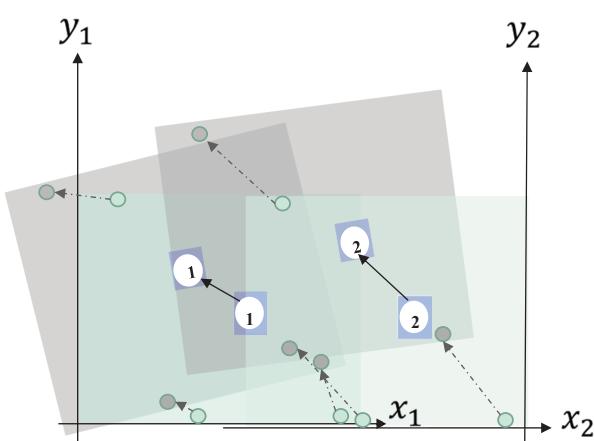


図11 カメラ1、カメラ2のリファレンスマーカーによる補正量を算出するイメージ図

- (3) (1)(2)で算出したカメラ1とカメラ2それぞれの補正量から、搭載ヘッドが搭載座標XYにあるときの搭載ヘッドの位置の補正量を算出し補正值として適用する(図12)

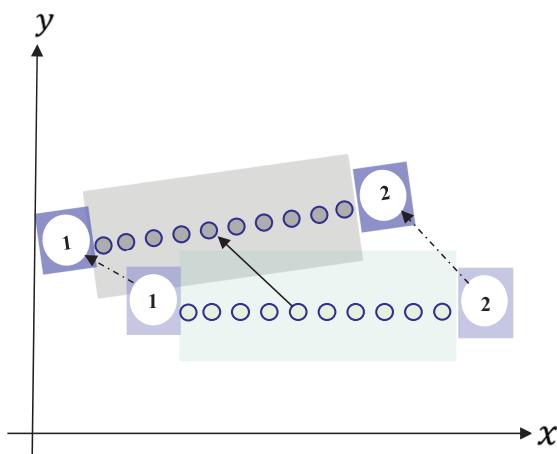


図12 2つのカメラの補正量から搭載ヘッドの補正量を算出するイメージ図

6 搭載精度検証

当社マウンターの歴代モデルで、同条件における搭載精度を比較した(図13)。求められている搭載精度を確実に実現してきたことが分かる。

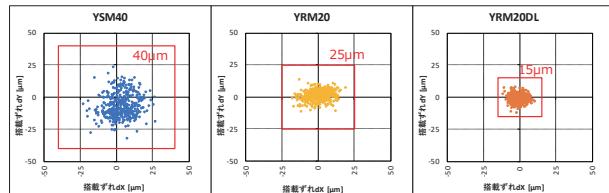


図13 当社モデルによる搭載精度比較

今まで述べてきたように、搭載精度を向上させるためには、様々な特性を理解し、それに応じた対処が必要になる。今回紹介した方策に加え、様々な精度劣化要素をそれぞれ小さくする地道な努力の積み重ねによって達成したことを強調しておきたい。

7 おわりに

自動車業界では CASE (Connected, Autonomous/Automated, Shared, Electric) の時代を迎え、電子制御が担う領域の拡大が進んでいる。また、ますます加速する IoT (Internet of Things) 社会ではさらなるデバイスの省電力化、高性能化が要求されている。

特に、スペースの効率的な活用が求められる小型でコンパクトな電子製品において、高い実装技術は重要な要素となっている。なぜなら、正確に搭載する実装技術が高密度な回路設計を

可能にし、限られたスペースで最大限の性能を提供することにつながるのみならず、高速実装技術を併せ持つことで、生産性を向上させ、製造コストを削減する効果をも生み出すことができるからである。

当社は、エレクトロニクス市場の発展に伴い進化する電子制御技術に適応していくことで、実装機メーカーとしての存在感を高め、様々な電子製品の製造を支える重要な役割を担っていきたい。

■著者



鈴木 康弘

Yasuhiro Suzuki

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

SMT 商品開発部

■映像ライブラリー

YRM20DL 紹介動画

[https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/
technical/library/mov/58gs06.html](https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/library/mov/58gs06.html)



プロジェクトアッセンブリーシステムによる電動船外機組立工程の構築

Construction of Electric Outboard Motor Assembly Process using a Projection Assembly System

影山 浩明 浦川 和也

当論文は、日本プラントメンテナンス協会(JIPM)の2022年度 TPM 優秀論文賞を受賞した内容に基づくものです。

Abstract

Yamaha Motor (hereinafter “the Company”), in its marine business, has launched a marine version of its CASE strategy, which utilizes cutting-edge technology to transform customers’ marine life into an even safer and more comfortable experience. Electric as a key element, is about the provision of comfort, and aims to appeal to the customer by providing the quietness of the electric propulsion unit using the system. The “HARMO”, developed as the basis of this system, was produced as a limited model of only 200 units, as it was a predecessor model working towards electrification and autonomous driving. The challenge in this limited production was to achieve a process setup that is not dependent on work proficiency and ensures stable quality with minimal investment (Figure 1). This paper describes the process of setting up the “HARMO” assembly process, which achieved both reduction in investment and ensuring all pass products by using the projection assembly system to solve this issue.

1 はじめに

ヤマハ発動機(以下、当社)はマリン事業において、最先端の技術を駆使しお客さまのマリンライフをさらに安心・快適な経験に変えるマリン版 CASE 戦略を打ち出している。その一角を担う Electric は快適の提供であり、電動推進器ユニットの静寂性をシステムで提供することで快適性の顧客提供価値を訴求する。このシステムのベースとして開発された「HARMO」は、電動化と自動運転に向けた将来への先行モデルのため、生涯生産台数200台の少量限定生産となった。この限定生産での課題は、作業習熟に依存せず、安定した品質確保が可能な工程設定を最小投資で実現することである(図1)。ここでは本課題解決に向け、プロジェクトアッセンブリーシステムを活用することで、投資抑制と全数良品確保の両立が可能となった「HARMO」組立工程設定の過程を述べる。

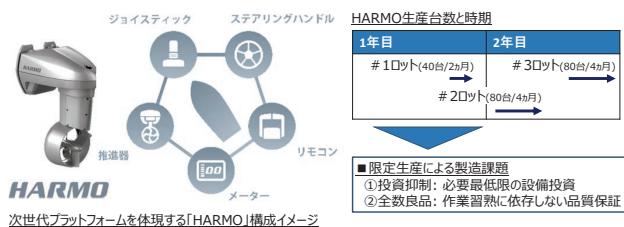


図1 HARMO 商品概要と製造課題

2 現状分析(生産方式の選定と課題)

まず初めに「HARMO」の生産方式の選定を実施した。当社袋井南工場(静岡県袋井市)の主な生産方式は量産向けの“ライン生産方式”であるが、日製1台の生産能力しか必要としないことから、多品種少量生産向きの“セル生産方式”を採用した。しかし、袋井南工場において従来から“セル生産方式”を採用している工程は、十数点の少量部品の組立を行うサブ組立工程のみであった。そのため、多品種の単純な組立作業に見合った工程として、作業台に簡易的な治工具が設置された工程を標準としている。また、ポカヨケ(作業ミスを防止する仕組みや装置)においても組み立て部品点数に適した注意式を主に使用しており、投資と品質のバランスを両立させている。一方「HARMO」組立工程においては一人で数百点の部品を扱うことから、工程設定の条件として規制式のポカヨケと作業実績管理は必須であり、現行工程設定の流用では安定した生産性と品質の確保に課題が残る(図2)。そこで、上記課題の対応として市販でパッケージ化されているプロジェクトアッセンブリーシステムを活用することで「HARMO」セル生産工程の実現を目指した。

プロジェクトアッセンブリーシステムによる電動船外機組立工程の構築

Construction of Electric Outboard Motor Assembly Process using a Projection Assembly System

	袋井南工場 組立工程の実状		HARMO組立工程
	ライン生産方式	セル生産方式	
概要	少品種多量生産向き	多品種少量生産向き	
採用工程	主要組立工程 例) エンジン ASSY組立	前サブ組立工程 例) カーボランク ASSY組立	HARMO組立工程へ採用
作業内容	部品 十数点/1人組立	部品 十数点/1人組立	部品 数百点/1人組立
品質管理	主に 規制式ポカヨケ (組立コンベ連携)	主に 注意式ポカヨケ	規制式ポカヨケ 必須 (作業台連携)
工程管理	生産性: 作業実績管理有 品質: 品質履歴一部管理	生産性: 作業実績管理無 品質: 品質履歴管理無	生産性: 作業実績管理必須 品質: 品質履歴管理必須

ギャップ = 課題

**図2 袋井南工場
組立工程の実状とHARMO工程設定条件**



図3 プロジェクションアッセンブリーシステムの基本仕様

3 プロジェクションアッセンブリー システムの標準機能

「HARMO」セル生産工程の課題“作業習熟に依存せず、安定した品質確保が可能な工程設定”の実現に活用する、プロジェクションアッセンブリーシステムの標準機能について説明する。本システムは大きく分けて3つの機能を有する(図3)。

1つ目は、プロジェクターによる作業ナビゲーションである。作業台に設置されたプロジェクターにより指示された棚から部品を取り出すことや、作業台に表示される作業指示書を見ながら組立作業を実施することができる。

2つ目は、USBカメラと作業手順のプログラミングによるポカヨケである。作業台の上部左右にUSBカメラを設置し、作業者による部品取り出し位置をカメラが認識することで正しく作業していることを確認する。また、作業手順や取るべき部品を誤った場合はアラートが表示され、正しい工程に戻ることができる。プログラミングされた手順に従って作業を実施し、作業完了信号を入力しないと次の手順へ移行することができない。これにより正しい手順通りに作業を行うことができる。

3つ目は、作業履歴のデジタル化である。作業手順ごとに作業結果(OK/NG)と信号取得日時、作業ログを履歴としてPCへ保存することができる。加えて、作業プログラム稼働中の作業画面の保存も可能であり、品質問題の解決や生産性改善のためのアイディア抽出の効率化に活用できる。

4 目標

「HARMO」組立工程において、全数良品確保を実現する工程設定の具体的な目標を以下に設定した。

1. 作業ナビゲーションの活用による記憶に依存しない作業指示の設定
2. 作業手順のポカヨケによるヒューマンエラー防止対策の織込み
3. 生産実績のデジタル化による品質&製造履歴の保管と活用

5 「HARMO」組立工程の構築

5-1. 目標1: 作業ナビゲーションの活用による記憶に依存しない作業指示の設定

袋井南工場の標準的な作業指示はA4サイズの紙に印刷された作業指示書に複数行の作業要素が記載されたものであり、情報量が多いがゆえに活用するにも十分なスキルが必要であり、どこまで作業完了しているのかもよく注意を払う必要があった。一人当たりの作業量が少ない従来の組立工程では、指示書の内容を記憶して作業することが基本となるため、現状の指示書で役割を満足していると考える。しかし、一人当たりの作業量が膨大な「HARMO」組立工程においては記憶を頼りとした作業では成立せず、作業指示書としては不十分である。そこで、作業要素を現状の指示書よりもさらに細分化し、作業要素ごとに指示書を作成することとした。そして、指示書一枚ごとに作業完了信号を入力しなければ、次の作業指示が表示されない作業ナビゲーションの仕様とすることで、明確な作業指示を与え、かつ、作業飛ばしを防止する仕組みを構築した(図4)。

プロジェクトアッセンブリーシステムによる電動船外機組立工程の構築

Construction of Electric Outboard Motor Assembly Process using a Projection Assembly System



図4 作業指示書の仕様

5-2. 目標2: 作業手順のポカヨケによるヒューマンエラー防止対策の織込み

袋井南工場の従来のセル生産工程は、一台の作業台で多品種の組立作業を行うため、全ての製品に対して作業手順の規制式ポカヨケを設定することが困難であった。今回はプロジェクトアッセンブリーシステムの基本機能を応用し、指示された作業が確実に実行されているかを判別する仕組みを構築したため、その主な仕様を以下に述べる。

5-2-1. 作業手順ポカヨケの仕組み

プロジェクトアッセンブリーシステムの仕様上の制約として、作業エリアの幅を1,500mm以内に収める必要がある。この制約を考慮した上で「HARMO」の製品構造を加味し、作業手順・姿勢が最適となるように組立工程を大きく6工程へ分割した。次に、分割した6工程では各々使用する部品や作業手順が異なることから、工程ごとに部品棚の入れ替えが可能な作業台の仕様とし、1工程に対し1つの部品棚を使用する工程設定とした。そして、各部品棚に對象工程のQRコードを設置し、QRコードを読み込むことで各工程の作業ナビゲーションが開始される仕様とした(図5)。

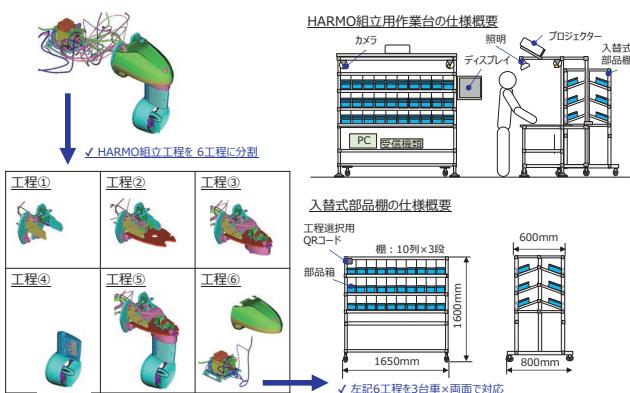


図5 HARMO 組立作業台の仕様

5-2-2. 部品取り出しポカヨケの仕組み

使用部品の間違いや欠品については、標準機能として備わっている“部品取り出し位置をカメラで認識するシステム”で保証することができるが、部品が正しい位置へ仕立てられていることが前提となる。そこで、既存の部品現品表QRコードをトリガーとし、部品の仕立て位置を指示し、仕立てた位置をカメラが認識して作業が完了する部品仕立てプログラムを作成した。このプログラムを仕立てが必要な全ての部品に適用することで、部品取り出しポカヨケの仕組みを構築した。

5-2-3. 作業手順ポカヨケと外部機器の連携

上記で述べた部品取り出しに加え、完了ボタンと外部機器からの信号の3つを作業ナビゲーションの完了信号に設定し、いずれかの入力がないと次の作業へ移行できない仕様とした。工夫した点は、組立作業で高い割合を占めるネジ締結には、ブリセットレンチと高精度電動ドライバーのみを使用し締付トルクの精度を保証するとともに、全ての締結ツールから締結完了信号を取得できる仕様としたことである(図6)。

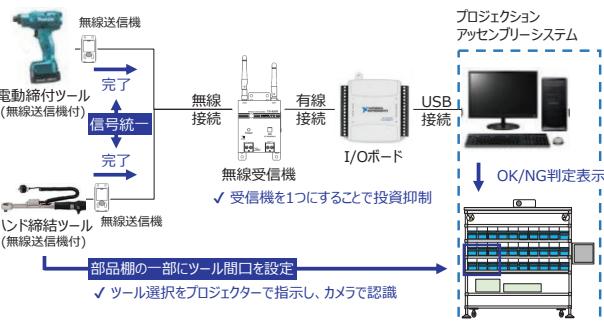


図6 締結ツール接続の仕様

5-3. 目標3: 生産実績のデジタル化による品質 & 製造履歴の保管と活用

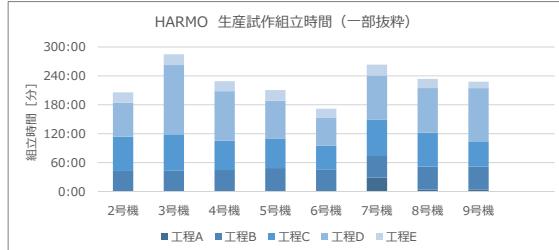
製造履歴管理として、製品一台一台に対して作業ログを紐付けて保存することが重要となる。そこで、生産計画を基に発行される製品の“号機シリアルNo.”の情報を読み込み、号機情報と作業動画、作業順序ごとの実績ログ(OK/NG)を記録する仕様とした。この履歴活用事例として、生産試作で発生したナット緩みの問題に対し、問題が発生した号機の組立状態(ネジ部のグリス塗布や締結)について作業ログと動画を確認し、正常な組立作業ができていたことが早期に確認でき、問題の原因特定をより迅速に行うことが可能となった。

また、生産性の管理面では、作業着手と完了実績より各工程の作業時間を把握することができるのに加え、作業要素ごとの細かい作業時間も取得することが可能なため、大小様々な粒

度による作業時間の分析が可能となった。従来の作業分析は作業風景を動画で記録し、その動画を用いて作業要素ごとの作業時間を測定することに多大な時間を要していたことから、生産性改善のアイディア抽出の効率化が期待できる(図7)。

に信頼性の高いモノづくりの現場へと進化させることで、マリン版 CASE 戦略を実現し、お客様のマリンライフをさらに安心・快適な経験に変えることへ貢献していきたい。

■著者



影山 浩明
Hiroaki Kageyama
マリン事業本部
製造統括部
マリンエンジン製造部



浦川 和也
Kazuya Uraoka
ヤマハ熊本プロダクツ株式会社
技術部

	組立時間 [分]									改善の 着眼点↓		
	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	7号機	8号機	9号機	MIN	MAX	MAX-MIN	
工程A	0:15	0:27	0:14	0:31	0:12	28:47	3:54	3:46	0:12	28:47	28:35	バラつき 少ない
工程B	42:24	42:34	44:18	48:09	44:52	44:55	47:50	47:40	42:24	48:09	5:45	
工程C	71:16	75:42	60:50	60:37	50:12	75:38	70:32	52:43	50:12	75:42	25:30	
工程D	70:10	143:51	102:56	79:20	57:23	91:27	92:24	110:28	57:23	143:51	86:28	バラつき 多い
工程E	21:41	22:24	20:38	21:53	19:05	22:41	19:11	13:17	13:17	22:41	9:24	

図7 事例)「HARMO」生産試作の作業実績

6 結果

結果として、全数良品確保と投資抑制(成り行き比△60%)を両立した「HARMO」組立工程を実現し、2021年9月に「HARMO」の生産を開始している(図8)。



図8 実際に導入したプロジェクトアッセンブリー システムを用いた組立工程

7 おわりに

今回のプロジェクトアッセンブリーシステムの導入により、従来からセル生産工程で課題となっていた品質保証と生産実績管理の強化が実現できることを見出した。この取組みは、現在マリンエンジン製造部門が重点課題に設定しているスマートファクトリーの実現に向けた第一ステップである、製造工程の可視化へと繋がる。また、作業支援という観点においては近年課題となっている生産職場作業者の高齢化に対する製造工程のダイバーシティー対応(多様化)に応用ができると考えており、次の展開とする。そして、この継続した活動の成果としてさら

EV/2WD（多軸制御車）「BiBeey」の開発

EV/2WD (Axis Control Vehicle) "BiBeey"

石田 佳未 星屋 真一



Abstract

In recent years, it has become popular for electric mobility vehicles, particularly four-wheeled types to be equipped with multiple drive motors. This enables simultaneous control of multiple purposes, such as driving, power generation, and regenerative braking, allowing higher value to be provided. Furthermore, compared to conventional ICE (Internal Combustion Engine) drive vehicles, multi-axis models are more compact.

In response to this trend, Yamaha Motor Engineering Co., Ltd. (hereinafter, the Company) has developed a control technology that allows multiple motors to communicate with each other, with the Company developing the concept electric mobility vehicle "BiBeey" incorporating this technology, as the advanced theme.

In this paper, the Company will introduce the development of the multi-axis control technology which is the core technology of the "BiBeey", as well as the initiatives working towards the creation of the concept mobility.

1 はじめに

昨今の四輪車を中心とした電動モビリティでは、駆動用モータの複数搭載が一般的となってきた。駆動・発電・回生制動など、多目的の同時制御ができ、より高い価値提供が可能となるためである。また、従来の内燃機関 (ICE: Internal Combustion Engine) 駆動の車両に対し、コンパクトに実現可能なことも理由の一つと言える。

この現状をふまえ、ヤマハモーターエンジニアリング株式会社(以下当社)では複数モータを通信連動させる制御技術を実現し、さらに、その技術を織り込んだコンセプト電動モビリティ「BiBeey(ビビー)」を自社先行テーマとして独自開発した。

本稿では、「BiBeey」の中核技術となる多軸制御技術の開発と、コンセプトモビリティ化までの取り組みを紹介する。

本技術獲得にあたり、モデルベース開発(MBD: Model Based Development/Design)を実践し、車両運動の事前検証を可能とする開発環境を整備した。また、プラントモデル構築にあたっては、前後輪に搭載したモータを一つの統合コントローラ (VCU: Vehicle Control Unit) によって制御する開発用車両“多軸制御車”(図1)を試作し、必要パラメータの取得や実機検証に用いた。



図1 多軸制御車

2 多軸制御技術の開発

当社では、複数モータの通信連動により、トルク配分をコントロールする制御技術のことを、“多軸制御技術”と呼んでいる。

2-1. 運動プラントモデル構築

最初に、影響因子の少ない直線運動予測モデルから構築した。課題となつたのはタイヤのモデル化である。一般的にタイヤを単体としてモデル化するには、多くの計測と膨大な時間を要する。そのため、直線運動に最も影響を与える因子に着目し、実機計測(図2)によって取得した $\mu\text{-}\lambda$ 特性(μ :摩擦係数、 λ :スリップ率)を車両モデルに代入することで、プラントモデルを構築した。



図2 実機による $\mu\text{-}\lambda$ 特性計測試験

2-2. トラクションの運動モデル化

車両の発進・加速時に、駆動トルクがタイヤと路面間の摩擦力を上回るとタイヤがスリップする。今回の多軸制御車では、前後輪それぞれのモータの回転数変化量を検知し、変化量が大きい、つまりスリップしてトルクダウンしたモータからもう一方のモータへトルクを配分する制御を組み込むことでトラクションコントロールシステム(TCS)を実現している(図3)。この制御ロジックもモデル化し、プラントモデルと合成したTCSのMILS環境(MILS: Model in the Loop Simulation)の中で、スリップが収束するまでの前後車輪挙動シミュレーションを可能としている(図4)。

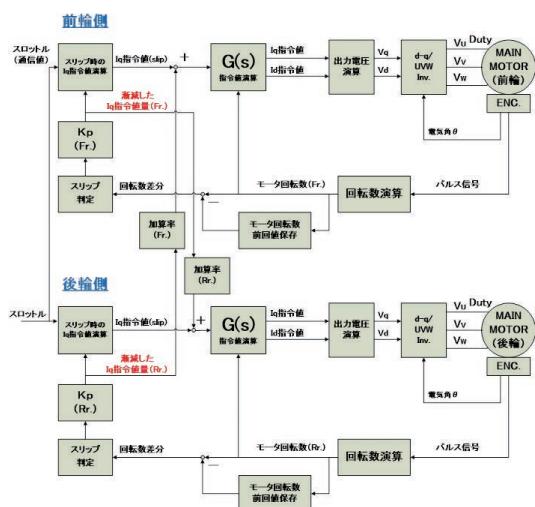


図3 TCS 制御ブロック線図

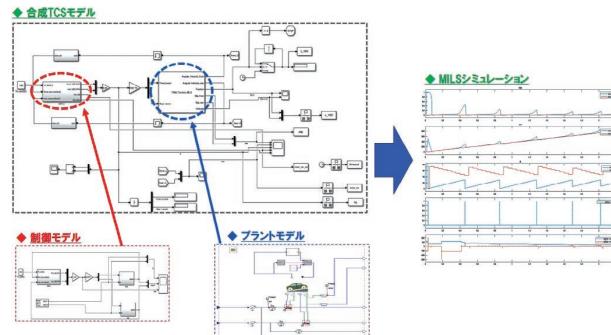


図4 MILS

2-3. 開発のフロントローディング

MBDによる事前検証を行うことで、これまでのライダー感覚をフィードバックして目標にアジャストする開発アプローチのみに頼るのではなく、狙いの車両挙動を見越した制御パラメータセッティングを行うアプローチが可能となる。これにより、モータ回生制動によるABS(Anti-lock Brake System)の機能検証も実現し、前後輪の駆動配分により変化するコーナリング操縦性、フィーリング差異を生むスタビリティアクタ因子の導出とパラメータ化にもトライしている。

3 魅せる化

次に、前述の開発で獲得した技術を魅力品質として具現化し、当社の技術を広告宣伝するためのコンセプトモビリティ「BiBeey」を開発した。当社では、このように技術をお客さまの目に分かりやすく、かつ魅力的なコンセプトモビリティ化することを“魅せる化”と呼んでいる。

3-1. 企画

多軸制御技術の価値を分かりやすく表現するために、前後二輪駆動の走破力を誰でも気軽に体験できるモビリティコンセプトとして“新しいトレッキング体験”とした。走行に高い技術が求められるオフロード車両を二輪駆動化することで、扱いやすく親しみやすいものとする。小さく足つきの良い車格とし、従来の小型ICEオフロード車よりも軽量とすることで、オフロード初心者やこれまで二輪車に興味のなかったお客様も“乗ってみたい、これなら乗れる”と思えるものとする狙いがある。

3-2. デザイン

魅力的に映り、広く認知されるよう“一目惚れするかわいさ”をキーワードとし、キャラクター性を重視した当社オリジナルデザインとしている。自然と調和・共存しながらオフロードを駆けるイメージを連想させるモチーフとして“みつばち”を採用した(図5)。

なお、名称はみつばちの英名 Bee と社名の頭文字 “Y” を合わせた Beey、そして一目惚れの“ビビっと来る！”イメージを表現するため、頭に Bi を加え「BiBeey」とした。

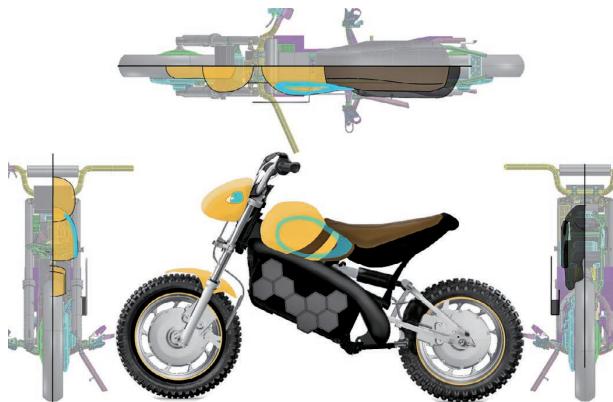


図5 デザインスケッチ

3-3. 設計

通常のデジタルエンジニアリングに加え、MBD および当社オリジナルのバーチャル検証システムを用いることで、企画デザインから具現化までを半年という短い期間で実現した。図6 にフィーチャーマップを示す。



図6 フィーチャー

3-3-1. 車体設計

小型 ICE 車両をベース車として電動化し、エンジンや燃料タンクのスペースにバッテリやコントローラ類を搭載している。ベース車は基本フレームとエンジンで強度信頼性を担保する構造であるが、電動化により強度部材の一部であるエンジンがなくなるため、バッテリ保持機能をもつサブフレームを強度部材として追加することでベース車同等の強度信頼性を確保している。

高い走破性を実現し、登坂や段差乗り越しも優れた車両とするため、インホイールモータに内蔵されている遊星ギヤの減速比を最適化している。

外装パーツ意匠面造形は、一般的にクレイモデル造形の後に3D モデル化するが、本開発においては、意匠面造形から構

造面の設計まですべてを3D モデルで完結させ、そのままラピッドプロトタイピングによる試作で短期開発を実現している。

3-3-2. 制御設計

前述の多軸制御車で構築した MBD 検証環境を使った登坂や段差乗り越しのシミュレーションを実機試作前に実施し(図7)、前後輪の駆動力配分の適合を実施することで、試作機の完成度を高めることを可能とした。



図7 段差乗り越しシミュレーション 実機との比較

なお、シミュレーションから VCU への実装をスムーズに行うため、車両全体の制御アルゴリズムは Simulink® モデルで構築した。

(Simulink は、MathWorks, Inc. の商標および登録商標)

3-3-3. IoT 機能

“みつばち”的ように群れて遊ぶイメージを具現化するために、スマートフォン通信と車-車間通信の機能を搭載している。2台の「BiBeey」にて位置情報を共有し、スマートフォン画面内に相手車両の居場所を表示することで、騒音の少ない電動モビリティが見通しの悪い森林を走行するシーンにおいても他車の存在を視覚的に感じることができる。また、前後輪モータの出力状況、車速・バッテリ残量の表示や車両走行ログの取得などの機能も備えている(図8)。

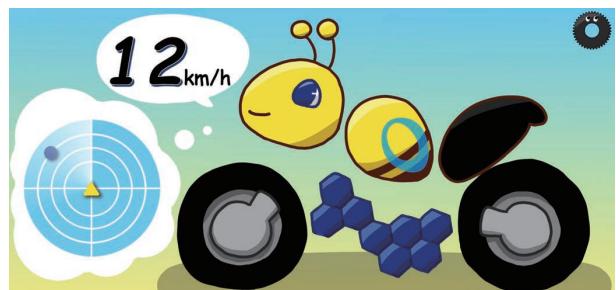


図8 車-車間通信中のスマートフォンアプリ画面

3-4. 実走評価、試乗会

キャンプ場などのアクティビティを想定し、トレッキング性能の評価を行った。フラットダートでの操縦安定性や加減速特性、TCSによる登坂、段差乗り越し性能、砂地発進のしやすなどを評価することでオフロード初心者でも安心して森林トレッキングを楽しむことができる車両となっている(図9)。

また、社内外の多くの方にも試乗していただき、電動化技術や多軸制御技術で実現できる価値を共有することができたことは“魅せる化”的成果と言える。

■著者



石田 佳未
Yoshimi Ishida
ヤマハモーター・エンジニアリング(株)
先行技術開発部



星屋 真一
Shinichi Hoshiya
ヤマハモーター・エンジニアリング(株)
先行技術開発部



図9 オフロードでの走行

4 おわりに

「BiBeey」は、当社の電動モビリティ開発力の広告塔としてこれまで4回にわたり展示会へ出展してきた。また、メディアによるweb記事への掲載も通じ、多軸制御の実現価値と当社の技術を広くお客様に知っていただくことができた。次なるステップとして、8つのモータ(駆動4+操舵4)を連動制御する技術にも挑戦しており、同技術を搭載したコンセプトモビリティ「Natchey(ナッチ)」も出展している(図10)。

今後も我々は、多軸制御技術のような新しいモビリティのための技術開発に取り組み、当社のVISIONである“技術で人を笑顔に”を体現していく。



図10 8軸制御コンセプトモビリティ「Natchey」

鋼／アルミ合金異種材接着における接合部疲労強度に対する被着体材料および板厚の影響調査

Investigation of the Effects of Adherend Material and Thickness on the Fatigue Strength of Adhesive Bonded Joints with Dissimilar Materials (Steel/Aluminum Alloy)

山本 耕平

本報は、公益社団法人 自動車技術会 2023年自動車技術会 春季大会 学術講演会予稿集に掲載された論文を同会の許可を得て転載したものです。本論文の著作権は公益社団法人 自動車技術会に属し、無断複製・転載を禁じます。

要旨

接着接合は異種材料の接合に適しており、その疲労強度の把握は重要な課題である。本報では、鋼材とアルミ合金板を被着体とした異種材接着接合部の静的強度および疲労特性を調査する。また、試験結果と数値解析結果を比較し、現象を分析の上で数値解析により得られた指標による整理を試みた。

Abstract

Adhesive bonding is suitable for dissimilar materials joining, and understanding its fatigue strength is an important topic. In this paper, static strength and fatigue properties of adhesive bonded joints with dissimilar materials using steel plate and aluminum alloy plate are investigated. After comparing test results and numerical analysis results and analyzing phenomena, attempts are conducted to clarify phenomena by using numerical analysis parameters.

1 まえがき

近年、カーボンニュートラルへの取組みが加速しており、走行時の CO₂排出量削減の一手段として、車両軽量化の重要性が高まっている。車体においては、軽量材料を適材適所に使用するマルチマテリアル化が進んでおり、材料の溶融および塑性変形を必要としない接着接合は、マルチマテリアル化に適した接合技術である。これまで、(公社)自動車技術会 疲労信頼性部門委員会の接合構造疲労評価ワーキンググループでは、接着接合の疲労特性は接着層の主応力と主応力角度で整理できることを示すとともに^{[1][2]}、箱型試験片や、実構造を模擬する簡易試験片を用いた新しい評価手法の提案^{[3][4]}、接着接合に特有な経時劣化現象を調査してきた^{[5]-[8]}。近年では、被着体としてアルミ合金板を対象として調査した^{[9]-[12]}。さらに、鋼板とアルミ合金板の異材組合せでの疲労特性の調査を進めている^{[13][14]}。

本報では、前報^[14]で提案されたラップシェア試験片を用いて、被着体が鋼板とアルミ合金板の異種材組合せにおける疲労特性を調査する。破壊形態を分析するとともに、数値解析によって得られた接着層応力および応力拡大係数により疲労試験結果を整理し、これまで検討された被着体材料が単一の場合と比較し、考察する。

2 実験方法

2-1. 供試材

被着体は590MPa級冷延鋼板(以下590材)およびT4処理された6000系アルミ合金板(以下6022材)である。接着剤は、既報^{[9]-[13]}で用いた表1に示す機械的特性を有するエポキシ系構造用接着剤を使用した。

表1 Mechanical properties of adhesive

Young Modulus [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
4.5	34	2

2-2. 試験方法

前述の被着体ならびに接着剤を用いて、接着範囲からの被着体の突き出し量が5 mmのラップシェア試験片(以下、Type A)と突き出し量が0 mmのラップシェア試験片(以下、Type B)を作製した。試験片の形状および寸法を図1に示す。被着体の材質と板厚の組み合わせ、接着層の厚さを表2に示す。

Type Aは、同種材を接着した試験片3仕様を作製した。6022材t2.3同士を接着した試験片(以下、Type A-23A23)と590材t1.6同士を接着した試験片(以下、Type A-S16S16)は、曲げ剛性が等価となる仕様である。6022材t1.6同士を接

鋼／アルミ合金異種材接着における接合部疲労強度に対する被着体材料および板厚の影響調査

Investigation of the Effects of Adherend Material and Thickness on the Fatigue Strength of Adhesive Bonded Joints with Dissimilar Materials (Steel/Aluminum Alloy)

着した試験片(以下、Type A-A16A16)は、前述の2仕様よりも曲げ剛性を低くした仕様である。

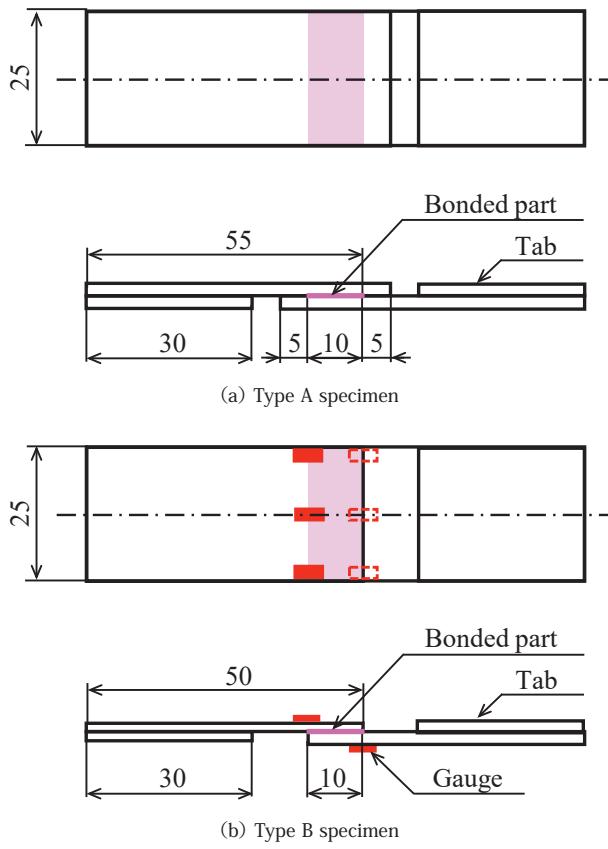


図1 Specimen configuration

表2 Thickness of adherends and adhesive in specimens

Type	Series	Adherend material and thickness [mm]		Adhesive thickness [mm]
		Upper plate	Lower plate	
Type A	A23A23	6022 t=2.3	6022 t=2.3	0.15
	S16S16	590 t=1.6	590 t=1.6	
	A16A16	6022 t=1.6	6022 t=1.6	
Type B	A23S16	6022 t=2.3	590 t=1.6	0.23
	A16S16	6022 t=1.6	590 t=1.6	
	A23A23	6022 t=2.3	6022 t=2.3	

Type B は、異種材を接着した試験片2仕様と、同種材を接着した試験片1仕様を作製した。6022材 t2.3と590材 t1.6を接着した試験片(以下、Type B-A23S16)は、被着体の曲げ剛性が等価となる仕様である。6022材 t1.6と590材 t1.6を接着した試験片(以下、Type B-A16S16)は、Type B-A23S16に対して6022材の板厚を薄くして、曲げ剛性を低下させた仕様である。6022材 t2.3同士を接着した試験片(以下、Type B-A23A23)

は、Type B-A23S16に対して曲げ剛性が等価となる仕様である。

疲労試験には油圧サーボ式強度試験機(858 Mini Bionix、MTS 製)を用いた。応力比(試験力比)は $R=0.1$ 、周波数は $f=10\text{Hz}$ 、打切り回数は 10^7 回とした。試験環境は実験室環境(室温: $23 \pm 3^\circ\text{C}$ 、相対湿度: $50 \pm 5\%$)とした。

疲労試験機への試験片の取り付けは、異種材組み合わせの試験片の場合は590材を試験機の下方側に、6022材を上方側に取り付けた。

3 実験結果

3-1. 疲労試験

疲労試験の結果を図2に示す。縦軸は最大試験力、横軸は破断までの繰返し数である。

曲げ剛性を等価にした試験片4仕様 Type A-A23A23(○)、Type A-S16S16(○)、Type B-A23S16(●)、Type B-A23A23(●)の破断寿命はほぼ同等であった。

異種材を接着した試験片 Type B-A23S16とType B-A16S16(▲)を比較すると、破断までの繰返し数が約 10^5 回の試験片においては破断寿命に差があるが、 4×10^5 回を超える試験片の破断寿命はほぼ同等であった。

疲労試験を行った試験片の中で最も曲げ剛性が低い Type A-A16A16(□)は、破断寿命が低い結果となった。

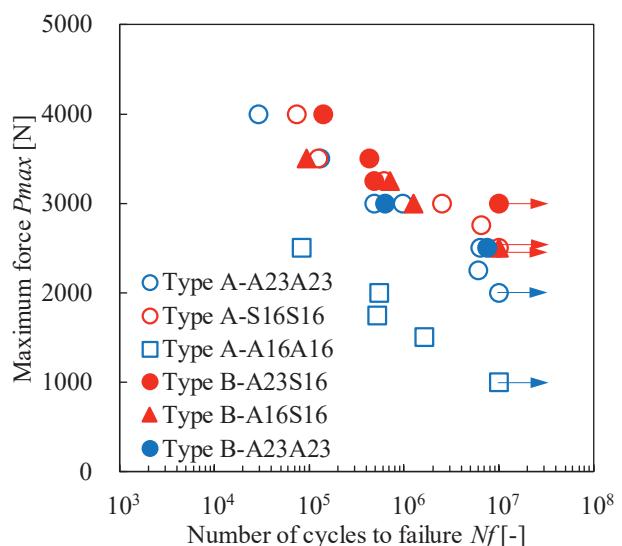


図2 Fatigue test result

3-2. 観察結果および考察

疲労試験後の Type B 試験片の外観を図3に、接着層の破断面の写真を図4に示す。

鋼／アルミ合金異種材接着における接合部疲労強度に対する被着体材料および板厚の影響調査
**Investigation of the Effects of Adherend Material and Thickness on the Fatigue Strength
 of Adhesive Bonded Joints with Dissimilar Materials (Steel/Aluminum Alloy)**

異種材を接着したType B-A23S16は、590材の接着範囲全域に接着剤が残存しているが、6022材の接着範囲には広範囲に金属光沢が見られる。この金属光沢面を拡大観察すると、薄く接着剤が残存していることから、薄層凝集破壊が生じていたと考えられる。接着層端部には、帯状に接着剤が残存しており、破断面には既報^[10]と同様な鱗状模様が確認された。接着層中央の接着剤残存部の破断面は、ブロック状のラフ模様を呈しており、前報^[14]の静的試験を実施した試験片の破断面と同じ様相であることから、接着層中央が最終破断部であると考えられる。

Type B-A16S16の破断面の様相は、Type B-A23S16と同様である。

6022材同士を接着したType B-A23A23は、上板、下板ともに広範囲に金属光沢が見られる。金属光沢面には薄く接着剤が残存しており、薄層凝集破壊が生じていたと考えられる。

図4(a)のBで囲んだ接着層端部の拡大写真を図5に示す。図中の高さ約0.3mm、幅0.1と0.3mmの帯状の接着剤残存部は、前報^[14]に示されている接着層のはみ出しがある。接着層の破断面は、この帶状部と被着体の接点から発生している。

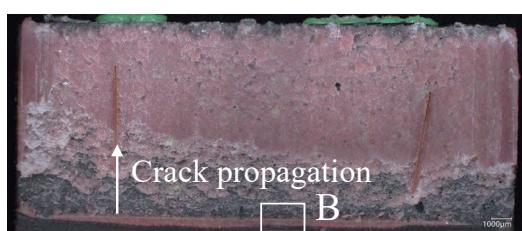
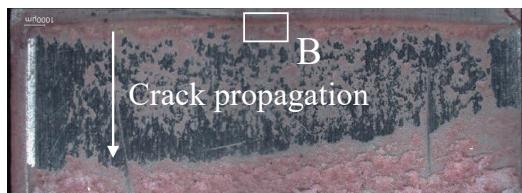
図6に疲労き裂進展の模式図を示す。き裂はType A、Type Bともに接着層で発生していた。前述の帶状はみ出しが存在するType B試験片は、図6(a)に示すように、応力集中部となる帶状部と被着体の接点を起点として、逆側の被着体に向けてき裂が進展し、その後、被着体の界面近傍を接着層中央に向けて進展したと考えられる。

下板側に帶状はみ出しがないType B-A16S16シリーズの一試験片($P_{max}=3500N, N_f=94577$)は、接着層端部の応力集中部が異なるために、図6(b)に示すように、破壊の起点はType Aと同じ位置となっていた。

Type A試験片は、既報^[10]と同じく、被着体との界面近傍を起点として接着層中央に向けてき裂が進展したと考えられる。



図3 Type B pecimens after fatigue tests



(a) Type B-A23S16($P_{max}=3250N, N_f=486399$)



Upper plate(6022 aluminum)

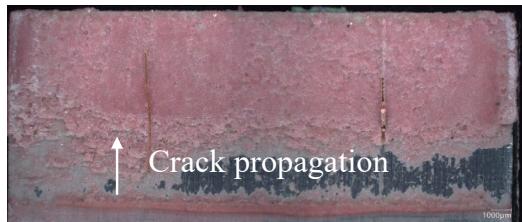


Lower plate(590 steel)

(b) Type B-A16S16($P_{max}=3250N, N_f=701547$)



Upper plate(6022 aluminum)



Lower plate(590 steel)

(c) Type B-A23A23($P_{max}=3000N, N_f=624193$)

図4 Fracture surface of type B

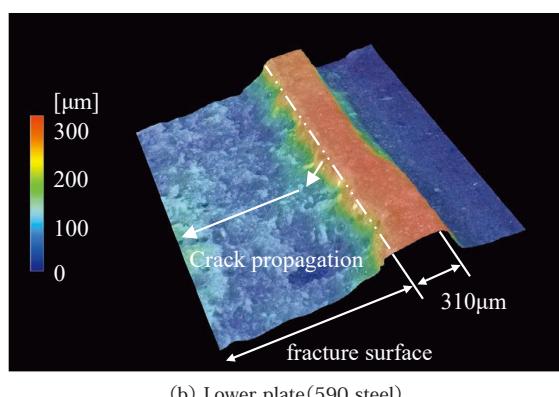
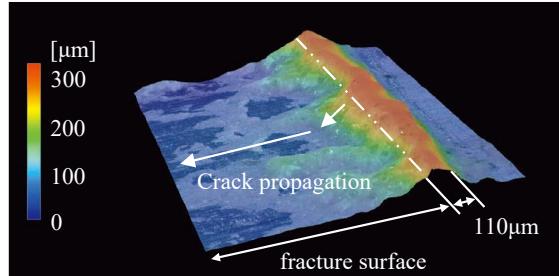


図5 Magnified image of the region B in 図4(a)

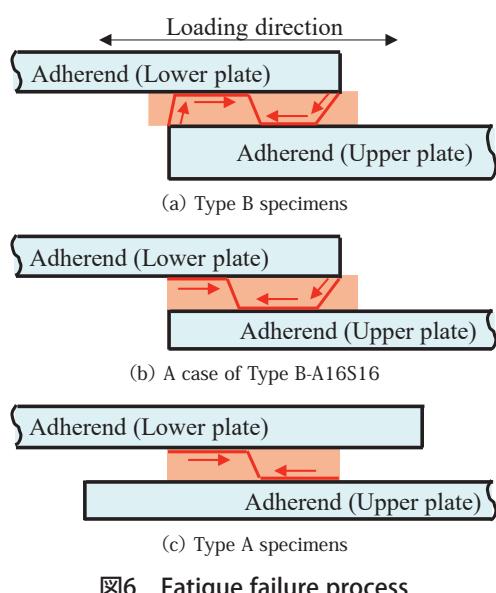


図6 Fatigue failure process

付けられたひずみゲージは、膜要素を多点拘束を用いて被着体に接続してモデル化し、被着体のひずみの再現性を確認した上で、解析を実施している。

Type B 試験片の負荷荷重と接着層ひずみの関係を図8に示す。図より、Type B-A23S16とType B-A23A23は、負荷荷重が3500N以下の範囲においておおむね弾性挙動を示していることから、図2より 10^5 回を超える範囲において、次節の接着層端部応力と応力拡大係数による疲労試験結果の整理が可能だと考えられる。

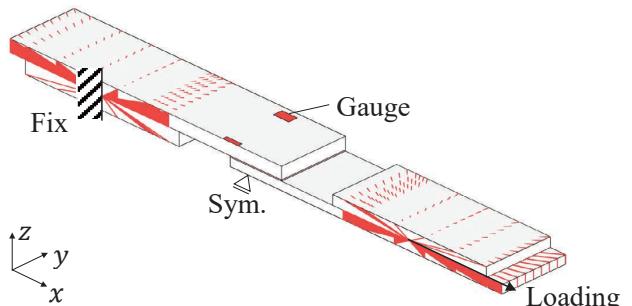


図7 FE model

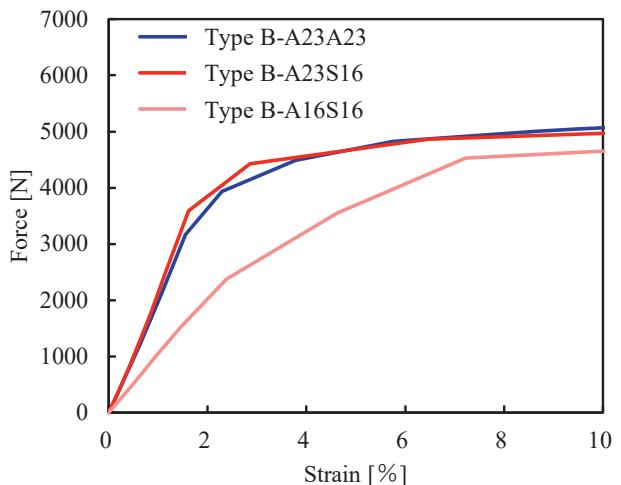


図8 Relationship between loading force and adhesive strain

4-2. 接着層端部応力による整理

既報^[9]のFEM解析を用いた検討では、ラップシェア試験片の接着層端部の主応力角度は、被着体の剛性および板厚によらず概ね一定となることが確認されている。既報^[11]では、最大主応力を用いて疲労試験結果を整理しており、被着体の材質が同じであれば、板厚の異なる試験片でも同等の応力-寿命関係となることが確認されている。そこで、図9、図10に示す2次元FEモデルの接着層端部要素の最大主応力を計算し、疲労試験結果を整理した結果を図11に示す。Type B 試験片の最

4 数値解析

4-1. 非線形解析

本節では、材料非線形性を考慮した有限要素解析を実施し、接着層への影響を確認する。

Type B-A23S16の非線形解析モデルを図7に示す。試験片のチャック部を剛体要素で拘束し、試験機に取り付けた状態での下方側を完全固定、上方側に荷重を負荷した。試験片に貼り

大主応力は、表3に示すように接着層のはみ出し有無による差は小さいため、接着層のはみ出し量を試験片の平均値0.3mmとした2次元モデルの計算結果を使用して、疲労試験結果を整理している。

6022材 t2.3同士を接着した Type A-A23A23と Type B-A23A23は、同等の応力－寿命関係となった。6022材 t1.6同士を接着した Type A-A16A16は、Type A-A23A23と Type B-A23A23と比較して、時間強度に差が見られる。

590材と6022材の異種材を接着した Type B-A23S16と Type B-A16S16は、破断までの繰返し数が 4×10^5 回を超える試験片の破断寿命はほぼ同等であったが、主応力で整理すると一本の線図にまとまらない。

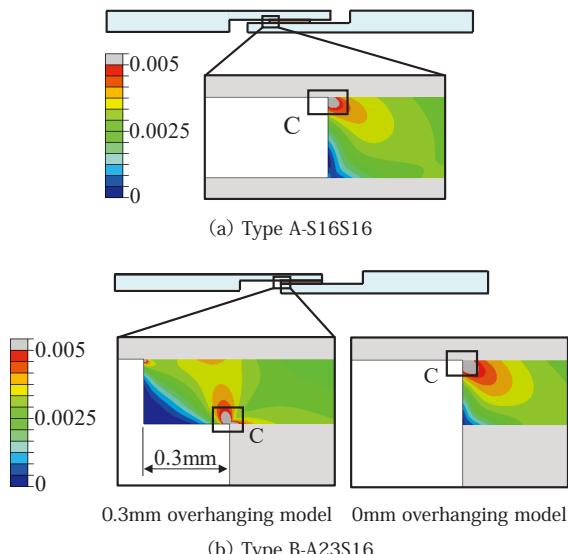


図9 Equivalent strain distribution in adhesive

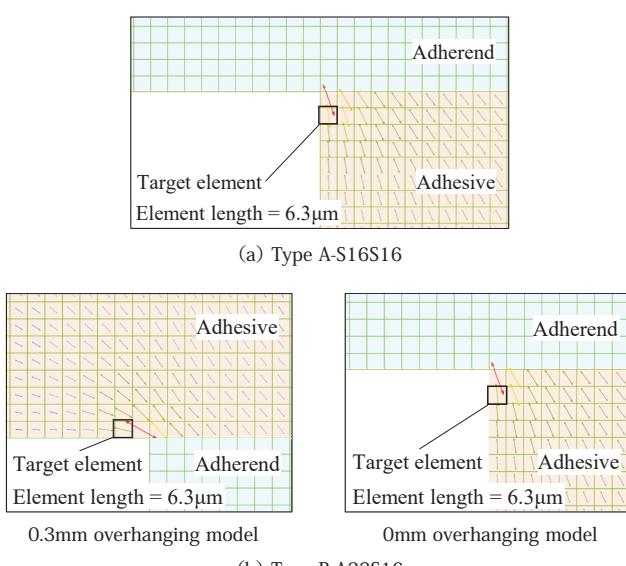


図10 Principal stress of the region C in 図9

表3 Principal stress of target element under 1000N load

Type	Series	Adhesive overhang [mm]	Principal stress [MPa]
Type B	A23S16	0.3	51
		0	49
Type B	A16S16	0.3	63
		0	59
Type B	A23A23	0.3	66
		0	60

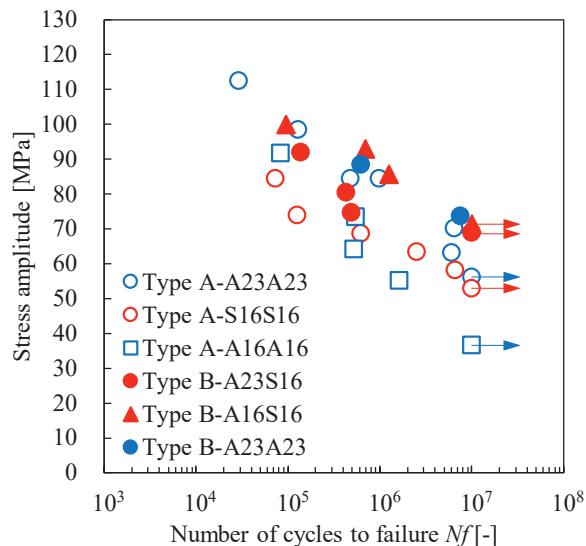


図11 Relationship between fatigue life and major stress at adhesive

4-3. 応力拡大係数による整理

接合部の疲労強度は破壊力学パラメータを用いて整理できると期待される^{[15][16]}。既報^[11]では、接着層端部に微小な初期き裂を導入したFEモデルを用いて応力拡大係数を計算し、疲労寿命と応力拡大係数範囲の関係を整理している。その結果、被着体の材質が同じであれば、板厚の異なる試験片でも一本の線図にまとめることが確認されている。そこで、図12に示す接着層内に初期き裂を導入した2次元FEモデルを用いて応力拡大係数を計算し、疲労試験結果を整理した。き裂先端近傍は2次の四辺形特異要素を用いて同心円状にモデル化し、計算には汎用有限要素ソルバAbaqusを使用した。疲労寿命と応力拡大係数範囲の関係を図13に示す。Type B試験片の応力拡大係数は、表4に示すように接着層のはみ出し有無による値の差は小さいため、はみ出し量を試験片の平均値0.3mmとしたFEモデルの計算結果を使用した。

6022材同士を接着した試験片は、前節の接着層端部応力での整理結果と同様に、曲げ剛性が等価であるType A-

A23A23とType B-A23A23は同等の応力—寿命関係に整理できたが、曲げ剛性を低くしたType B-A16A16は時間強度が低くなり、一本の線図にまとまらない。

590材と6022材の異種材を接着したType B-A23S16とType B-A16S16は、前節の接着層端部応力による整理結果と同様に、破断までの繰返し数が 4×10^5 回を超える試験片の破断寿命はほぼ同等であったが、応力拡大係数で整理すると一本の線図にまとまらない。

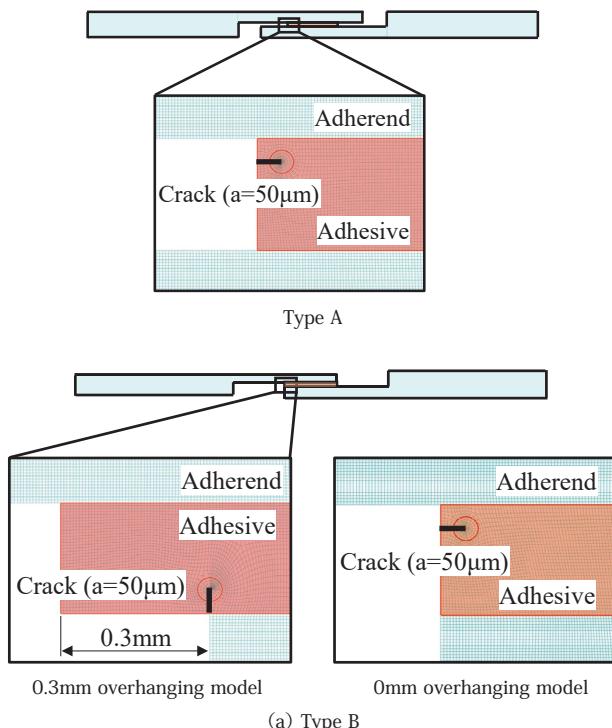


図12 Crack-tip model with crack-length 0.05mm

表4 Stress intensity factor under 1000N load

Type	Series	Adhesive overhang [mm]	Stress intensity factor [MPa·mm ^{1/2}]
Type B	A23S16	0.3	6.64
		0	6.97
	A16S16	0.3	8.22
		0	8.14
	A23A23	0.3	8.63
		0	8.01

接着層端部応力と応力拡大係数を用いて、疲労試験結果の整理を試みたが、被着体の材質が同じでも曲げ剛性が異なる試験片は、一本の線図にまとまらなかった。原因として、被着体剛性の界面強度への影響や、被着体の曲げ変形時の非線形性の影響などが考えられる。

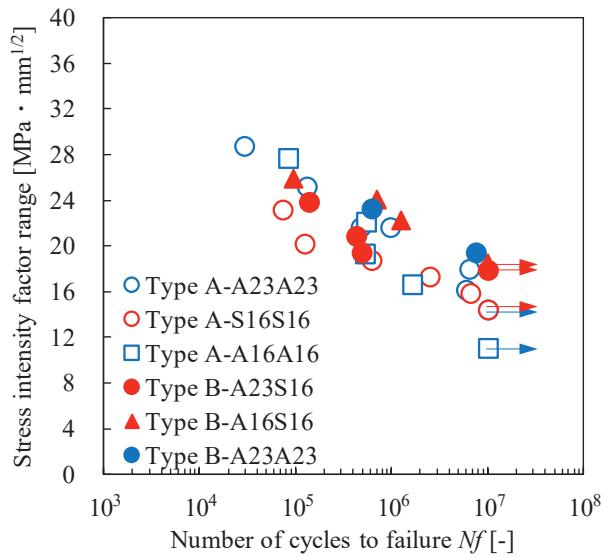


図13 Relationship between fatigue life and the stress intensity factor range

5 まとめ

本報では、鋼板とアルミ合金板の同種材接着に加えて、異種材接着の疲労特性を調査した。また、試験結果と数値解析結果を比較し、整理を試みた。以下に得られた知見を示す。

- (1) 今回使用した被着体の材質と板厚の組み合わせにおいて、曲げ剛性を等価にした試験片は、ほぼ同等の破断寿命となった。
- (2) 異種材を接着したType B-A23S16とType B-A16S16は、破断までの繰り返し数が 4×10^5 回を超える試験片の破断寿命は、ほぼ同等であった。
- (3) 接着層端部応力もしくは応力拡大係数を用いて、疲労試験結果をおおむね整理できた。ただし、今回評価した仕様の中で曲げ剛性を低くしたType A-A16A16とType B-A16S16は、被着体の材質が同じ仕様と一本の線図にまとまらなかった。

■謝辞

本研究は(公社)自動車技術会疲労信頼性部門委員会の活動として行われ、各委員・メンバーの方々の貴重なご助言やご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

■参考文献

- [1] 梅村俊文ほか：構造用接着における接合疲労強度—継手種類による強度調査結果一，自動車技術会シンポジウム講演論文集, No. 01-08, p. 47-51 (2008)
- [2] 覚前正博ほか：構造用接着における接合疲労強度—車体

鋼／アルミ合金異種材接着における接合部疲労強度に対する被着体材料および板厚の影響調査
**Investigation of the Effects of Adherend Material and Thickness on the Fatigue Strength
of Adhesive Bonded Joints with Dissimilar Materials (Steel/Aluminum Alloy)**

構造への適用に向けた応力解析－、自動車技術会シンポジウム講演論文集, No. 01-08, p. 52-57(2008)

[3] 花井洋志ほか：構造用接着における接合強度調査と応力解析、自動車技術会シンポジウム講演論文集, No. 07-10, p. 45-50(2010)

[4] 進祐一郎ほか：車体構造における接着接合部の疲労強度およびその影響調査、自動車技術会シンポジウム講演論文集, No. 08-15, p14-19(2015)

[5] 山本研一ほか：構造用接着の吸水劣化現象の調査、自動車技術会シンポジウム講演論文集, No. 07-10, p58-63(2010)

[6] 小林敏雄ほか：車体における接着接合部の経年劣化による影響調査、自動車技術会学術講演会前刷集, No. 76-14, p. 21-24(2014)

[7] 清水誠吾ほか：接着接合部疲労強度に対する経年劣化の影響調査、自動車技術会学術講演会講演予稿集, 20175320 (2017)

[8] 樋江井守ほか：接着接合部疲労強度に対する経年劣化の影響調査、自動車技術会シンポジウム講演論文集, No. 7-17, p. 47-55(2017)

[9] 清水寛文ほか：接着接合強度に対する被着体および接着層の影響調査(第1報)－接着層応力分布の解析による考察－、自動車技術会学術講演会予稿集, 20215258(2021)

[10] 小熊博幸ほか：接着接合強度に対する被着体および接着層の影響調査(第2報)－静的強度と疲労強度の実験による考察－、自動車技術会学術講演会予稿集, 20215259(2021)

[11] 河村拓昌ほか：接着接合強度に対する被着体および接着層の影響調査(第3報)－数値解析を用いた疲労試験結果の分析－、自動車技術会学術講演会予稿集, 20215260(2021)

[12] 異明彦ほか：接着接合における疲労破壊メカニズムの考察、自動車技術会シンポジウムテキスト, 20214954(2021)

[13] 川邊直雄ほか：Fe/Al 異材接着における被着体剛性の影響、自動車技術会シンポジウムテキスト, 20214955(2021)

[14] 島崎敦至ほか：接着接合試験片疲労強度に対する接着端部形状の影響調査、自動車技術会シンポジウムテキスト(2023)
(投稿中)

[15] 結城良治ほか：スポット溶接継手の疲労強度の破壊力学的解析・評価、機械学会論文集 A 編, Vol. 51, No. 467, p. 1772-1779(1945)

[16] 結城良治ほか：接着継手の疲労強度の界面破壊力学による評価、材料, Vol. 41, No 467(1992)

■著者



山本 耕平
Kouhei Yamamoto

技術・研究本部
技術開発統括部
先進プロダクト開発部

マルチボディダイナミクスモデルによる集中剛性を含む二輪車運動方程式の再現

Reproducing the motorcycle equation of motion with lumped stiffness on multi-body dynamics model

寺山 敬 山口 翔大 北川 洋 矢部 昇

本報は、公益社団法人 自動車技術会 2023年自動車技術会 春季大会 学術講演会予稿集に掲載された論文を同会の許可を得て転載したものです。本論文の著作権は公益社団法人 自動車技術会に属し、無断複製・転載を禁じます。

要旨

二輪自動車の直進安定性解析で用いられる10自由度モデルと呼ばれる運動方程式を、マルチボディダイナミクスを用いて再構築した。二輪自動車の直進安定性は古くから研究されており、基本的な運動方程式は、Sharp 氏によって4自由度モデルとして開発された。今回、再構築に用いた運動方程式は、青木氏らによりフレーム剛性が考慮され、10自由度モデルとして開発されたものである。運動方程式をマルチボディダイナミクスによって再構築した理由は、コンピュータ技術の発達により、今後のモデル拡張が期待できるためである。再構築したモデルと運動方程式の計算結果を比較したところ、ウィーブモードとウォブルモードの固有値が一致しないことが分かった。運動方程式におけるフレームの横方向の曲げは、「横力のつり合い」で式化されている。しかし、その式の中では「曲げ点における横力」が表現されていないことが判明した。そこで、両者を等価にするため運動方程式を「横力」から「曲げ点周りのモーメント」のつり合い式に変更した。この変更により、マルチボディダイナミクスモデルと運動方程式モデルは良好な一致を示した。

Abstract

Motorcycle equations of motion have long been researched and used as analysis methods for the straight line stability characteristics of motorcycles. However, it has been difficult to add degrees of freedom due to mathematical difficulties. Therefore, taking into consideration the additional study of new degrees of freedom, a multi-body model was constructed to obtain the same results as equations of motion.

1

まえがき

二輪自動車の車両運動に関する研究は古くから行われ、1970年、SHARP^[1]による4自由度モデルの運動方程式により、直進安定性に影響のある振動モードである Weave モード、Wobble モードが数値解析できることが報告された。さらに1998年には青木らによりフレーム剛性を含む10自由度モデルが開発され^[2]、直進安定性へのフレーム剛性の影響が報告された。二輪車の運動方程式は少ない計算コストと代表的な諸元のみで二輪車の基本的な振動特性を検討できるため、現在でも開発や研究の対象となっている^{[3][4]}。ところが、運動方程式の自由度を拡張しようとすると、数学的な知識の習得等の労力を要する。

一方、コンピュータが発達し、マルチボディダイナミクスモデルでも二輪自動車の車両運動が計算できるようになってきた^[5]。マルチボディダイナミクスモデルは、有限要素法モデルを縮退した弾性体要素や、非線形要素も用いることができ、ライダー

の自由度やその他の自由度の拡張等も比較的簡単に行えるため、今後さらに活用しようと考えている。しかしながら、精度を求めるときと並ぶべき諸元に限りがなく、必要な諸元データの取得に膨大な時間を要してしまう。

そこで本研究では、これまでの二輪車の車両運動技術を有効活用しながら自由度を拡張させることのできるマルチボディダイナミクスモデルのベースモデルを作成することとした。ベースとなるモデルとしては、二輪車両運動モデルとしてシンプルかつ必要な要素を備えていると考えられる10自由度モデルの運動方程式^[2]を参考とした。また、運動方程式で、今回作成したマルチボディダイナミクスモデルと等価な計算結果を得るために、運動方程式の一部を変更しなければならないことがわかった。

今回作成したマルチボディダイナミクスモデルと、10自由度モデルの運動方程式の変更内容について報告する。

2 集中剛性を含む二輪車の運動方程式

本研究で参考とした二輪車の10自由度モデルは、SHARPの4自由度モデル^[1]と同様に、ステアリングの回転、車体横変位、車体ヨーおよび車体ロールの4自由度も持っている。さらに、図1に示すようにフレームはフロントフォーク、メインフレーム、リアスイングアームより構成されており、それぞれのねじれ及び横曲げの自由度を、集中剛性要素で表現している。つまり、SHARPの4自由度モデル^[1]に加えて合計6自由度のフレーム剛性が考慮されている。

参考文献^[2]では二輪車の直進安定におけるフレーム剛性の影響について、実機検証結果とともに報告されている。

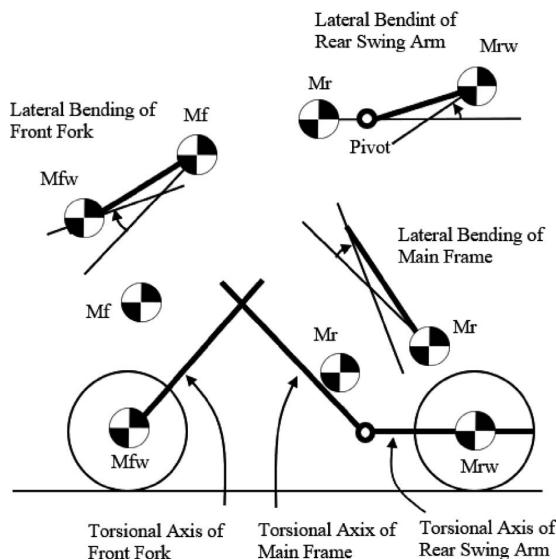


図1 Geometry of 10DoF Equations Model
「青木章、他；フレーム剛性が二輪車の直進安定性に及ぼす影響の解析 日本機械学会論文集(C編)64巻625号(1998-9)論文 No. 97-1799」参考

3 マルチボディダイナミクスモデルの作成

マルチボディダイナミクスモデルの作成において10自由度モデルの運動方程式を再現するため、参考文献^[2]の運動方程式の説明を参考に、以下の要素が同等となるよう作成した(図2)。

- ・ 剛体ボディの質量、重心位置、慣性テンソル
- ・ 剛体ボディ間の自由度
- ・ タイヤ力:運動方程式のタイヤ力の式を力要素としてモデル化
- ・ ねじり剛性:ねじれ軸上の回転バネ要素
- ・ 横曲げ剛性:曲げ点(たわみ変換係数の逆数の位置)の横曲げ方向の回転バネ要素

- ・ エンジンのフライホイールの極慣性モーメント:ピボット位置の回転体要素として等価換算
- ・ 空力のかかる点:重心位置、およびホイールベース中心また、10自由度モデルの運動方程式、マルチボディダイナミクスモデルとともに車両諸元はXS1100(1978年発売)を使用した。

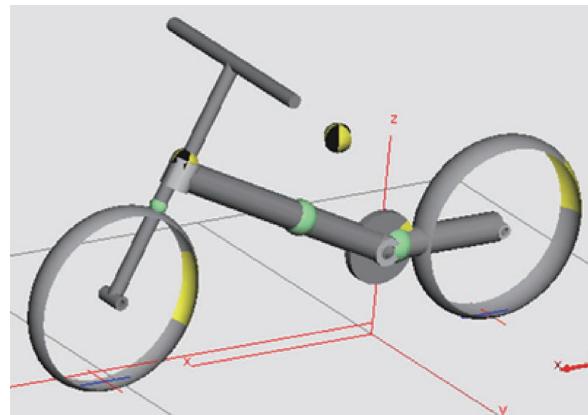


図2 Multi-body Dynamics Model

4 比較結果と運動方程式の変更

4-1. 計算結果の比較

作成したマルチボディダイナミクスモデルが10自由度モデルの運動方程式と等価なモデルとなったか確認するため、車速ごとに固有値計算を実施し、WeaveモードおよびWobbleモードについて固有値の比較を実施した。図3に示す。

Weaveモードについては高速側で乖離が大きくなり、Wobbleモードについては全車速で大きな乖離が発生した。この結果から同じ現象を等価に計算しているモデルとは言えない判断し、原因を調査した。その結果を次節で示す。

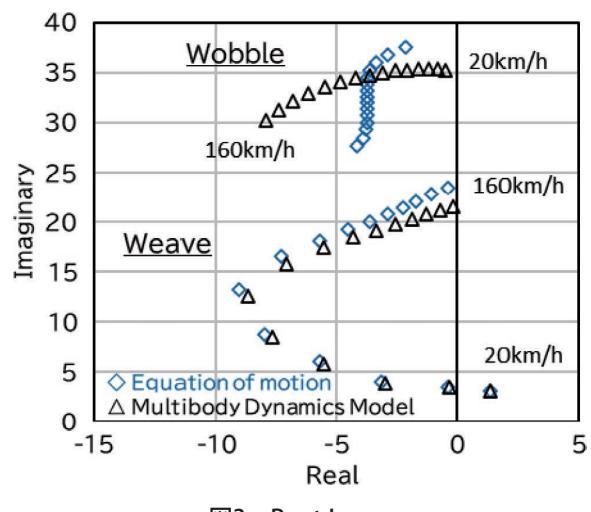


図3 Root Locus

4-2. 固有値結果乖離の原因調査

固有値結果の乖離原因を調査するため運動方程式およびマルチボディダイナミクスモデルを再確認したところ、フレーム剛性による横曲げ構造の表現について両者に違いがあることが判明した。2章のとおりマルチボディダイナミクスモデルでは曲げ点で折れ曲がる構造である。一方、10自由度運動方程式では横曲げについて「横力のつり合い式」として定式化しているが、マルチボディダイナミクスモデルと同じ横曲げ構造のつり合い式とするには「曲げ点にかかる横力」の項が不足していることがわかった。イメージを図4に示す。

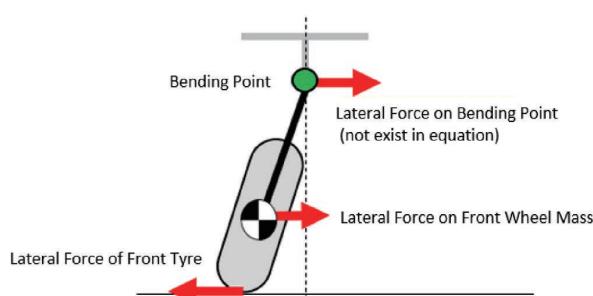


図4 Equilibrium of Lateral Force on Front Fork

上記が固有値結果の乖離原因と考えられるが、本報告ではマルチボディダイナミクスモデルと同じ横曲げの表現になるように運動方程式を変更することで、両者を等価なモデルとすることにした。

変更点はフォーク、メインフレーム、リアスイングアームの横曲げの式について「横力のつり合い式」から「モーメントのつり合い式」への変更である。つまり、「モーメントとのつり合い式」とするために、「横力のつり合い式」の力の各項に、曲げ点までの腕の長さを乗じてモーメントとした。また、曲げ点まわりのモーメントとすることで、曲げ点にかかる横力は無視できている。イメージを図5に示す。

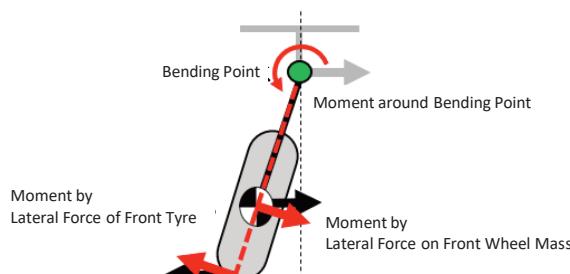


図5 Equilibrium of Moment around Front Fork Bending Point

4-3. 10自由度モデルの運動方程式変更後の比較結果

運動方程式変更後のマルチボディダイナミクスモデルとの固有値結果の比較を図6に示す。図に示すように各固有値は概ね一致した。

平均乖離量はWeaveモードでReal -4.4%、Imaginary -0.13%、wobbleモードでReal -2.9%、Imaginary 0.71%であった。

量産開発での利用を想定した場合には、影響がないとし、等価なモデルができたと判断した。

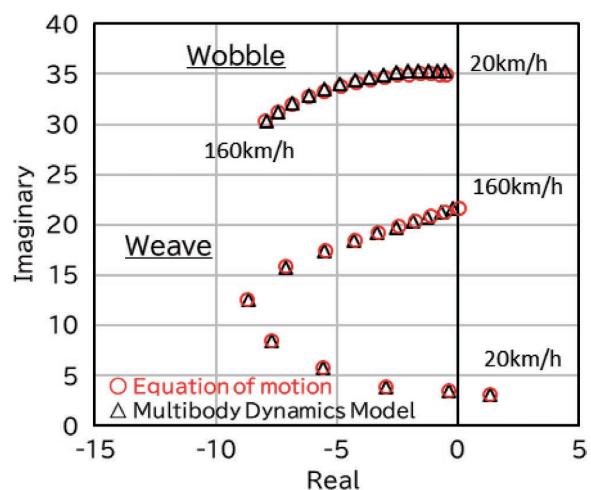


図6 Root Locus

5 まとめ

本報告では、二輪自動車の車両運動解析におけるベースモデルとして活用するため、二輪自動車の10自由度モデルの運動方程式を再現したマルチボディダイナミクスモデルを作成した。また、10自由度モデルの運動方程式の一部の変更した上で、両モデルの振動特性で比較することで整合をとることができた。

両モデルの活用方法として、代表的かつ少ない二輪自動車の諸元での検討や、大規模なパラメータスタディについては計算コストの低い運動方程式の使用が適しており、新たに自由度を考慮して検討する場合はマルチボディダイナミクスモデルの使用が適していると考えている。また、運動方程式の自由度を変更する必要がある場合、マルチボディモデルと再び整合をとることで運動方程式の、あるいは両者の検算としても利用をすることができる。

6 おわりに

今回二輪自動車の基本的な運動特性である直進安定性を評価するモデルについて報告したが、二輪車の車両運動は、操縦性も含めてまだ未解明な部分が多い。そのため、今回作成したモデルやその他の手法を取り入れながら、効率的に検証、研究を進め、当社の開発思想である人機官能の追求、および安全で楽しい魅力ある乗り物をつくることに貢献していきたい。

■参考文献

- [1] Sharp. R.S:THE STABILITY AND CONTROL OF MOTOR-CYCLES, JOURNAL MECHANICAL ENGINEERING SCIENCE Vol 13 No 5 1971 316-329
- [2] 青木章, 西見智雄, 岡山巧, 片山硬:フレーム剛性が二輪車の直進安定性に及ぼす影響の解析, 日本機械学会論文集(C編)64巻625号(1998-9)論文 No. 97-1799
- [3] 片山硬, 吉野貴彦:二輪車の後フレーム剛性モデルの定式化, 自動車技術会秋季学術講演会 2022
- [4] 片山硬, 田本洋高, 吉野貴彦, 高橋昭:二輪車の直進安定性解析手法の定式化, 自動車技術会論文集 52(2), 299-304, 2021
- [5] 内藤重男, 北川洋, 大富部寿一:車両の弾性変形を考慮した二輪車の安定性解析モデル, 自動車技術会学術講演前刷集 108(1), 1-4, 2001

■著者



寺山 敬
Takashi Terayama
技術・研究本部
デジタル開発統括部
MBSE 推進部



山口 翔大
Shota Yamaguchi
技術・研究本部
デジタル開発統括部
MBSE 推進部



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



矢部 昇
Noboru Yabe
技術・研究本部
デジタル開発統括部
MBSE 推進部

フォトグラメトリを用いた農作物の 体積推定手法の提案

A Proposal for a Crop Volume Estimation Methods Using Photogrammetry

小野坂 捩 内海 智仁 峰野 博史

本稿は、一般社団法人情報処理学会 第36回コンシューマ・デバイス&システム研究発表会で発表、2022年度の優秀発表賞を受賞したもので、情報処理学会論文誌：コンシューマ・デバイス&システム Vol.13, No 3(CDS40)に掲載予定であり、著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。

要旨

近年、農業分野において3Dデータの活用が注目を集めている。中でも2D画像のみから3D点群の構築が可能なフォトグラメトリは非接触かつ非破壊で対象物の測定が可能な点や、レーザー測量と比較してモデルの生成が早く、導入コストが安価であるといった長所を持つ。フォトグラメトリによって構築される3D点群は2Dにはない立体的な情報を持つことから、収量予測を目的とした農作物の体積推定などへの活用が期待されている。ただし、境界の曖昧さが原因で、点群から直接体積を推定することが難しいといった課題がある。また、農作物の果実部分のみの体積を計量したい場合、3D点群用の物体検出モデルやセグメンテーションモデルは2D画像用の学習モデルに比べ未成熟であることから、構築された3D点群から果実部分のみを自動で取り出すことは難しい。本研究では、ワインブドウ園場の動画データから園場画像を切り出し、フォトグラメトリを用いて構築した3D点群に対して、alpha-shapeを用いて表面形状を復元し高精度な体積推定できることを示す。更に、2D画像用のセマンティックセグメンテーションモデルを用いて、園場画像から体積を推定したい房部分のみのマスク画像を作成し、フォトグラメトリで点群を構築する際の入力に加えることで、園場画像から房部分のみの3D点群を構築し体積を推定する手法を提案する。

Abstract

In recent years, the use of 3D data in agriculture has attracted much attention. Photogrammetry, which can construct 3D point clouds from 2D images alone, has the advantages of non-contact and non-destructive measurement of objects, faster model generation, and lower implementation costs compared to laser scanning. The 3D point cloud constructed by photogrammetry has three-dimensional information that is not available in 2D and is expected to be used for crop volume estimation for yield prediction. However, there are issues such as the difficulty of estimating volumes directly from point clouds due to the boundaries being vague in the images. In addition, in the case of weighing the volume of only the fruit portion of a crop, it is difficult to automatically extract only the fruit portion from the constructed 3D point cloud. This is because the object detection and segmentation models for 3D point clouds are in the early stages of development, compared to the learning models for 2D images. This study shows that an alpha-shape can be used to recover the surface shape of a 3D point cloud constructed using photogrammetry from a video image of a vineyard and to estimate the volume of the field with high accuracy. Furthermore, this study proposes a method of estimating the volume by constructing a 3D point cloud for a fruit cluster from the field image. This method uses a semantic segmentation model for 2D images, creating a mask image of only the fruit cluster which the volume will be estimated from the field image, and adding it into the input when constructing the point cloud during the photogrammetry.

1 はじめに

近年、農業分野において3Dデータの活用が注目を集めている。2D画像間の対応関係をソフトウェア解析することで3D点群データを構築するフォトグラメトリ(SfM/MVS)は、非接触

かつ非破壊で対象物の測定が可能な点や、レーザー測量と比較してモデルの生成が早く、導入コストも安価であるといった長所を持つ。

フォトグラメトリによって構築される3D点群は2D画像にはない立体的な情報を持つことから、農業分野でも収量予測等

を目的として、農作物の体積推定など様々な形での活用が期待されている^{[1][2]}。ただし、拡大すると分かるが3D点群の境界は曖昧であるため、3D点群から直接体積を推定することは困難である。また、VoteNet^[3]のように3D点群からの物体検出モデルの研究開発が注目されているが、2D画像からの物体検出モデルと比べまだまだ発展途上であり、対象とする物体も屋外の人や車、あるいは屋内の家具といった一般物体を対象としており、植物の3D点群データを対象とした研究は見当たらない。また、3D点群からの物体検出モデルは、直方体のバウンディングボックスでの検出を想定しているため、検出された物体の体積を推定するためには3D点群でセグメンテーションされたデータセットが必要となる。ただし、前述のとおり3D点群は境界が曖昧なため、3D点群から対象物体をセグメンテーションする作業は、2D画像の場合に比べて困難で労力を要する。そのため、3D点群から体積を推定したい部分（例えば、農作物の果実部分）のみを正確に抽出する技術の研究開発が望まれている。

本研究では、農業用無人走行車両（Unmanned ground vehicle, UGV）を用いて圃場で撮影される栽培データを対象とし、フォトグラメトリによって構築された3D点群から農産物の果実部分の体積を高精度に推定することを目的とする。まずはワインブドウ圃場で撮影された収穫時期の動画に対し、3D点群を構築し房部分の体積を推定する手法について検討する。

以降、本稿の構成を示す。第2章では関連技術について述べ、第3章で提案手法について説明する。第4章では、机上の収穫済みワインブドウを様々な角度から撮影した画像でフォトグラメトリを行って構築した3D点群に対し、alpha-shapeを用いた体積推定の精度に関する基礎実験についてまとめる。第5章では、実圃場のワインブドウ画像に対し、房部分をアノテーションして学習させたセグメンテーションモデルを用いて生成させたマスク画像を適用し、ブドウの房部分のみの3D点群を構築した結果について説明する。最後に第6章で本稿をまとめる。

2 関連技術

2-1. フォトグラメトリ

広義のフォトグラメトリは、2D画像を用いた測量全般を指すことが多いが、本稿では狭義のSfM（Structure from Motion）とMVS（Multi-View Stereo）^[4]によるものを指すこととする。SfMでは、対象物を様々な角度から撮影した各画像から特徴点を抽出し、その特徴点を基に、カメラの位置と姿勢推定（アライメント）を行い、3次元空間上に特徴点をマッピングする。特徴点の3D点群は疎な点群であるため、より詳細な表面を表現する3D点群を得るために、MVSによって密な点群を獲得する。

フォトグラメトリによって得られる点群は、LiDARなどで得られる点群とは異なり、2D画像のみから3D点群を構築するため基本的にはスケール情報を持たない。ただし、GPS情報を併用するなどの手法でスケール情報を組み込むことが可能である。

2-2. 低解像度カメラを用いた植物の3D点群構築

Santos, T.T.ら^[2]は、低解像度なカメラであっても被写体に接近して撮影するという単純な手法で高精度に3D点群を構築可能であることを示した。また、フォトグラメトリによって構築したトウモロコシの3D点群を用いて、地平面からの高さと葉長を、真値との誤差1%未満の精度で推定できることを示した。また、スケール情報を得るにあたり、点群構築対象の植物と一緒にスケールが分かるもの（テープメジャー）も撮影し点群化することで、スケール情報を獲得するという方法をとった。本研究においてもこれを参考に、ブドウと一緒に定規を撮影し、定規ごと点群化することでスケール情報付きの点群を得ることとした。

2-3. 凸包を用いたブドウの体積推定

Mónica H^[5]らは、フォトグラメトリを用いて構築されたブドウの房の3D点群へ凸包(convex hull)を適用することで、非可視部分を含めた表面形状の再現を試みている。3D点群から手作業で構築したCADモデルに対して凸包を適用した場合と性能比較した結果、点群から直接凸包を適用した手法は、体積、重量の真値との決定係数が約0.77、粒数については約0.79と、CADモデルを構築する半手動的手法に比べ相対的に高い決定係数であったと述べている。つまり、3D点群に対し凸包を用いて構築された3D形状から、比較的高精度かつ最小限の労力でブドウの房の体積、重量、粒数を推定できる可能性が示された。

2-4. 関連技術のまとめ

前述のように植物の高さや葉の長さといった情報は、3D点群データから直接算出することが可能であるのに対し、3D点群の境界の曖昧さなどが原因で、体積については点群から直接推定することは困難である。そのため先行研究では、3D点群に対し凸包を適用することでブドウ房の体積を算出可能としている。しかし、凸包はアルゴリズムの特性上、窪みのある形状に対してはその窪みを埋めるような形で表面形状を構築するため、房の形状によっては実際の体積の値よりも大きい値が算出されるという課題がある。そこで、有限の点群の形状に付随する単純で区分線形な曲線の一群を求めるalpha-shapeを用いれば、より正確な体積の算出が可能になると見える。さらに、フォトグラメトリで3D点群を構築する際に、2D画像用のセマンティックセグメンテーションモデルによって生成されたマスク画

像を入力として加えることで、現時点では発展途上で性能の低い3D点群用の物体検出モデルやセグメンテーションモデルを使わなくとも、特定部分のみの画像群から対象物の3D点群を構築できると考える。

3 提案手法

3-1. 概要

提案手法は大きく二つの手順からなる。第一ステップでは、ブドウの房のみの3D点群データから体積を推定する体積推定モデルを構築する。この体積推定モデルを構築するために、収穫されたブドウの房の3D点群データと体積を高精度に算出する3Dモデルの作成が必要である。収穫された個々のブドウを判別できるよう異なる番号のタグを付け、それぞれ順番に机上に置いて様々な角度からフォトグラメトリ用の画像を生成する動画を撮影する。その際、ブドウの横に定規を置くことで、スケール情報を点群に付与できるようにしておく(図1)。



図1 ブドウ房撮影画像の例

また、体積推定だけでなく重量推定や粒数推定も可能なように、収穫されたブドウの房の撮影が終った後、一房毎に重量を計測するだけでなく、全ての粒を取って一房毎の粒数も記録しておく。フォトグラメトリによって生成されたスケール情報付きの3D点群に対して、alpha-shapeで表面形状を構築し高精度な3Dモデルを生成する。この3Dモデルを用いて体積の算出を行って目的変数とし、フォトグラメトリで生成された3D点群データを入力とした学習を行うことで、体積推定モデルを構築する。

第二ステップでは、圃場動画から切り出されたワインブドウ圃場画像に対し、ブドウの房部分のみの3D点群データを生成する。ここで、ブドウの房部分のみの3D点群データの生成には、別途2D画像で房部分を抽出できるよう学習させたセマンティックセグメンテーションモデルを使用し、ブドウの房部分のみを

抽出するマスク画像として用いる。こうして生成されたブドウの房部分のみの様々な角度の2D画像を用いてフォトグラメトリすることで、ブドウの房部分のみの3D点群データを生成する。

3-2. 高精度な体積データの作成

第一ステップでは、ブドウの房のみの3D点群データから体積を推定する体積推定モデルを構築する。収穫された個々のブドウを判別できるよう異なる番号のタグを付け、定規を横において、それぞれ順番に机上に置いて様々な角度からフォトグラメトリ用の画像を生成する動画を撮影する。フォトグラメトリによって生成されたスケール情報付きの3D点群に対して、alpha-shapeで表面形状を構築し高精度な3Dモデルを生成する。

図2に、alpha-shapeの概要を示す^[6]。alpha-shapeは凸包の概念を一般化したものであり、H. Edelsbrunner^[7]らによる直感的な説明を参考にすると、3D点群からのalpha-shapeの構築は、3次元空間上に存在する複数の「点」を含む形状の不明な「物体」を「球」で切り取るイメージに例えられる。各点に対し、接触することなく到達可能な物体の全ての部分（内部を含む）を切りとった結果、最終的に残る物体の形状がalpha-shapeとなる。ここで、点群によって形成される物体を切り取る「球」の半径をalpha半径と呼び、alpha半径の値を変更することで、点群の表面形状を再現する際の精細さを調整できる。なお、alpha半径の値を無限大にすることで構築される表面形状が、前出の凸包となる。以降、凸包と明確に区別しやすくするために、本稿ではalpha半径の値が無限大でないもののみをalpha-shapeと表記することとする。Gardiner, J.D.^[8]らは、alpha-shapeの体積が元のデータセットの体積と一致するために必要なalpha半径の最小化が、形状の「複雑さ」を測る指標として採用できることを示している。このことから、窪みの多い複雑な形状の房であってもalpha半径を小さくすることで高精度に体積を推定することが可能と考える。

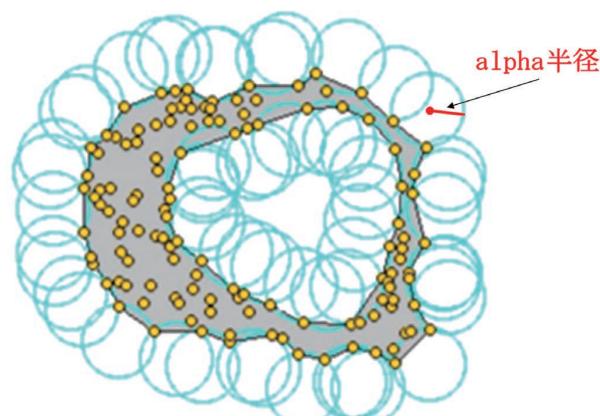


図2 alpha-shape の概要(出典:CGAL^[6])

ここで、alpha-shape で点群に対して表面形状を構築する場合、凸包と異なって表面に穴が開いてしまうことがある。穴が開いた場合、alpha-shape の中身は空洞となってしまうため、実際の体積よりも極端に小さい体積が算出されてしまう。より大きな alpha 半径を設定することで、表面の穴を塞ぐことができるが、alpha 半径の値を大きくすればするほど構築される表面形状は徐々に凸包に近づいていき精細さが失われる。そのため、この課題を解決するために、本研究では alpha 半径の値を変化させたときの体積の変化量に閾値を設定することとする。例えば、alpha 半径の値を少しずつ大きくしていくと、穴がふさがった場合、ふさがった瞬間に alpha-shape の内部に生じていた空洞が無くなるため、急激に体積が上昇する。つまり、体積の変動量に対する閾値を経験則によって設定することで、閾値を超える体積の変化が現れたときの体積を推測値として採用することとした。

3-3. ブドウの房部分のみのマスク画像の生成

第二ステップでは、実圃場を撮影した画像からブドウの房部分のみの3D 点群データを生成する。このブドウの房部分のみの3D 点群データを生成するために、別途2D 画像で房部分を抽出できるよう学習させたセマンティックセグメンテーションモデルを使用し、房部分のみを抽出するマスク画像として用いる。実圃場において各ワインブドウの房は非常に密集していたり、形状も多様であったりするため、各房を個別に検出することは難しい。また、実際にブドウの収量を計測する際はブドウ一房一房といった単位では無く、畠全体という単位で計量を行うことが多い。そのため、実用性も考慮し、各房を個別に識別するインスタンスセグメンテーションではなく、個々の境界までは判断せずにブドウの房をまとめて検出するセマンティックセグメンテーションを採用することとした。

図3に、ワインブドウ圃場で撮影された動画から切り出された圃場画像(a)と、ブドウの房部分のみアノテーションしたマスク画像(b)を示す。このマスク画像を生成できるよう既存のセマンティックセグメンテーション用の学習済みモデルをファインチューニングしてマスク画像生成モデルを構築する。



(a) 元画像



(b) アノテーションしたマスク画像

図3 元画像(上)とアノテーションしたマスク画像(下)

4 基礎実験：机上のブドウ画像での検証

4-1. 概要

本提案手法の第一ステップでは、ブドウの房のみの3D 点群データから高精度に体積を算出することが重要となる。凸包を用いて3D モデルを生成する手法は、ブドウのような複雑な形状で窪みのある形状に弱いため、alpha-shape によって表面形状を構築し高精度な体積の算出ができる事を確認する。また、ブドウの房を撮影した2D 画像から房部分の面積の算出を行い、凸包や alpha-shape を用いて形成される3D モデルを用いて重量や粒数を推定する手法が、2D 画像を用いて推定する手法に対してどの程度の優位性を持つのか定量的に比較する。

表1に、本基礎実験で使用した27房のワインブドウの房動画データの概要を示す。収穫された個々のブドウを判別できるよう異なる番号のタグを付け、それぞれ順番に机上に置いて様々な角度からフォトグラメトリ用の画像を生成する動画を撮影した。フォトグラメトリでは、一般に各画像間で一定程度のオーバーラップ率が確保されていると3D 点群データの構築に成功しやすいとされている。そのため、様々な角度で撮影した動画から、約60～80%のオーバーラップ率を確保した画像を抽出した。フォトグラメトリには、高精度な3D 点群構築が可能であった RealityCapture を採用することとした。

表1 ワインブドウの房動画データ

撮影対象	収穫したワインブドウ(品種:シャルドネ)の房
房数	27
撮影場所	机上
機材	iPhone 11
画像サイズ(ピクセル)	幅:1080 高さ:1920
ファイル形式	MOV(学習時:JPG)

ここで抽出された画像には、ブドウの房以外に各房を識別するためのタグとスケール情報を付与するための定規も含まれているため、房以外の不要な3D点群も生成されてしまう。そのため、これらの不要な3D点群を除去するにあたり、pythonの3D点群処理用ライブラリである open3d^[9] を用いて平面セグメンテーションを行った。これは RANdom Sample Consensus (RANSAC)アルゴリズムを用いたセグメンテーションであり、試行錯誤の末、引数 ransac_n の値を3、num_iterations の値 (RANSAC のサンプリング処理と評価処理の繰り返し回数) を500に設定した。また、房の下部分が平面判定によって除去されないように、distance_threshold(平面のインライアとして判定するための距離の閾値) の値を0.0017に設定した。ここで、除去しきれなかった不要な点については手動で除去を行った。

フォトグラメトリでは、画像中に写っていない部分には3D点群が構築されないため、ブドウの房と机が接触している部分には3D点群が構築されない。alpha-shape の場合、穴が開いている部分が大きくえぐられ、実際の体積の値より小さい値になることがある。そのため、平面の点群を用意することで、手動で机と接觸している部分の穴をふさぐこととした。

以上の手順で生成したブドウ房の3D点群に対し、MATLABを用いて凸包とalpha-shapeを適用し3Dモデルを構築した。ここで、alpha-shapeは、表面の穴がふさがるまでalpha半径の値を0.0001ずつ上昇させ急激な体積の値の変化があった時の体積を推測値とした。

また、凸包、alpha-shapeといった3Dモデルの性能比較用に、真上からブドウを撮影した画像と、机と平行に真横から撮影した画像の合計2パターンの角度で撮影された2D画像で算出される面積を用いることとした。ここで、画像へのスケール情報の付与、面積算出には、画像処理ソフトの ImageJ を用いた。

一方、凸包、alpha-shapeを適用した3Dモデルの体積比較に関して、今回収穫したワインブドウはそのまま醸造に使用するとのことで、ワインブドウを水に沈めて正確な体積を計測することはワインの品質低下に繋がり不可ということであった。そのため、体積の真値を得ることはできなかったが、体積と強い正

の相関があることが明らかとなっているブドウの重量と粒数で性能比較を行うこととした。体積および面積の推測値と、実測のブドウ重量と粒数の相関係数、決定係数をもとに精度を検証した。

4-2. 実験結果

図4に、フォトグラメトリによって構築された3D点群の例を示す。図中の白色の三角形は、カメラの撮影位置と角度のアライメント結果である。すべての房について問題なく3D点群を構築することができた。

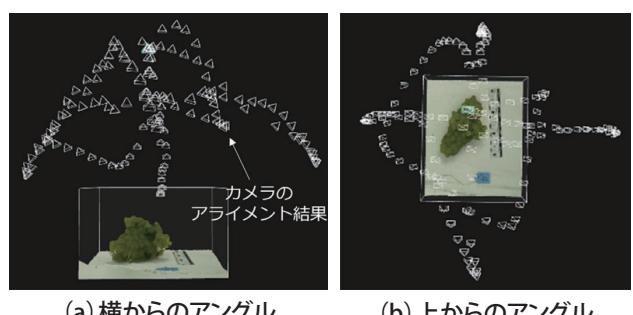


図4 点群とカメラのアライメント結果

図5にalpha半径の値を0.0001ずつ上昇させたときのalpha-shapeの体積と見た目の変化を示す。急激な体積変化が確認されたとき(グラフ内の赤点)、表面の穴が塞がることが確認できた。また、急激な値の変化があった後もalpha半径の値を上昇させ続けると、alpha-shapeの形状が徐々に凸包に近づいていき、実際のブドウの体積から乖離していくこと、今回用いた27房分のブドウ全てで同様の結果となることが確認できた。

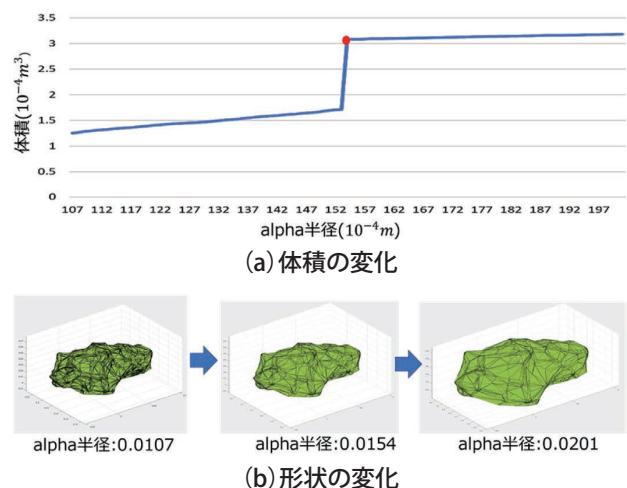


図5 alpha半径の変化の影響(体積、形状)

表2に、各房の重量、粒数、真上からの面積、真横からの面積、凸包の体積、alpha-shape の体積、間の相関行列を示す。特に alpha-shape の体積は、重量と粒数のいずれに対しても従来手法である凸包よりも高い相関0.981と0.916を示した。また、真上からの面積は、重量と粒数に対し、alpha-shape には及ばないものの0.961と0.902を示し、いずれも凸包の0.952と0.888を上回る高い値を示した。一方、真横からの面積は、それぞれ0.865と0.827となり、撮影角度の違いに相関が大きく下がる結果となった。実圃場においては、ブドウの房は様々な向きで実っており、さらに葉などの障害物に隠れていることもあるため、ある側面の2D 画像から重量や粒数を常に高精度に推定するのは難しいことが分かった。

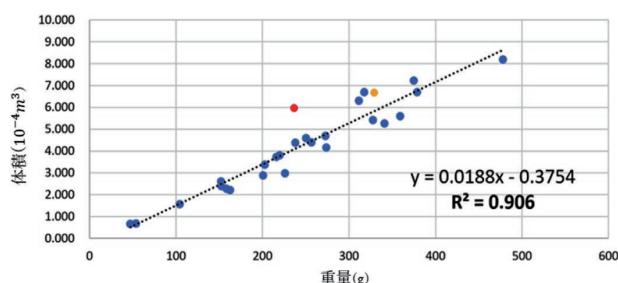
これらの結果から、面積といった2D 画像ではなく、凸包や alpha-shape といった3D モデルを活用したほうが、より安定して高精度で体積や重量、粒数といった推定が可能である見通しを得た。

4-3. 詳細分析

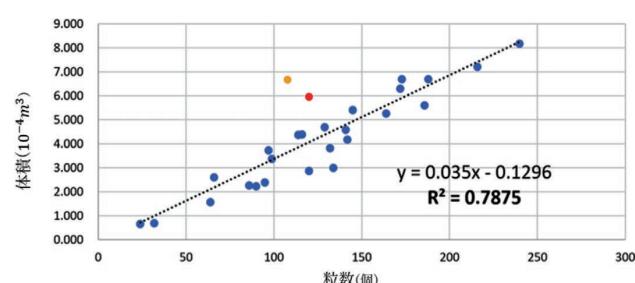
図6に、凸包ならびに alpha-shape で得られた27房のブドウ房体積に対するそれぞれの重量と粒数の散布図と近似直線の決定係数を示す。図中の(c)、(d)に示されるように、ブドウ房の体積は重量や粒数と線形関係があり、特に alpha-shape の体積は重量に対し決定係数0.963、粒数に対し決定係数0.838と、凸包の体積よりも高い決定係数を示すことが分かる。

表2 相関行列

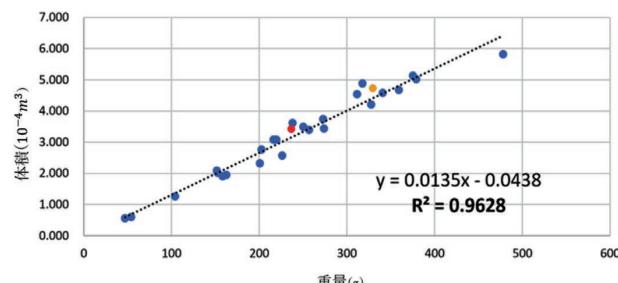
	重量	粒数	上面積	横面積	凸包	alpha-shape
重量	1					
粒数	0.938	1				
上面積	0.961	0.902	1			
横面積	0.865	0.827	0.887	1		
凸包	0.952	0.888	0.977	0.888	1	
alpha-shape	0.981	0.916	0.978	0.868	0.979	1



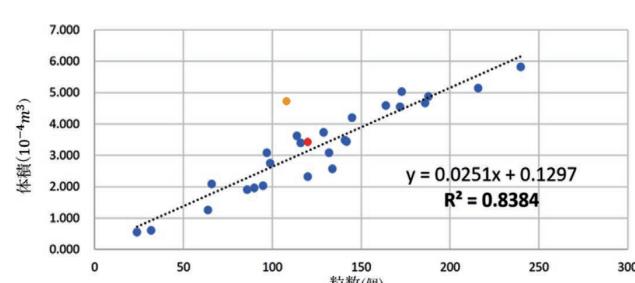
(a) 凸包と重量



(b) 凸包と粒数



(c) alpha-shape と重量



(d) alpha-shape と粒数

図6 重量、粒数と凸包、alpha-shape の散布図と決定係数

ここで図中に赤色の点として表記した ID36 のブドウ房に着目する。図6(a)、(b) に示されるように、凸包の体積と重量ならびに粒数の散布図では、近似直線から離れた位置にプロットされているのに対し、図6(c)、(d) に示される alpha-shape の体積と重量ならびに粒数の散布図では、近似直線の近くにプロットされている。図7 に、ID36 のブドウ房の画像と、凸包ならびに alpha-shape で構築されたブドウ房の 3D モデルを示す。撮影画像から、このブドウ房は二股に分かれた形状をしていることが分かる。このような形状のブドウ房の 3D 点群に対して、alpha-shape は二股の形状を適切に構築できていたのに対し、凸包は二股を埋めるような形で表面形状を構築しており、実際の体積より大きな値を算出していた。つまり、複雑で窪みの大きい形状のワインブドウの房の場合、凸包では正確な値の算出が困難であった。

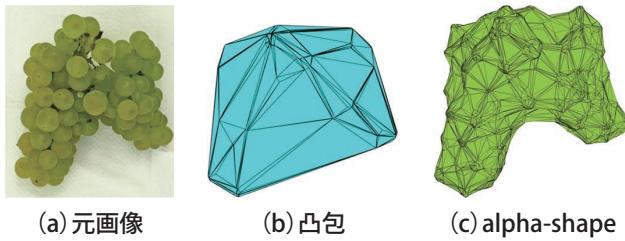


図7 ID36のブドウ房と構築された3D モデル

次に、図6 中で黄色の点で表記した ID58 のブドウ房に着目する。図6(a)、(c) に示されるように、凸包の体積と重量ならびに alpha-shape の体積と重量の散布図では、近似直線から大きく離れた位置にプロットされていない。一方、(b)、(d) に示されるように、粒数の散布図では近似直線から大きく離れた位置にプロットされている。

このようなことの生じる要因について考察する。粒数とは別に粒径という指標がある。粒径の算出方法は様々あるが、今回ブドウの房からランダムに選んだ 6 粒を直線状に並べた直径の和で算出することとした。オレンジ色の点で示した ID58 のブドウ房から得られた粒径は、12.6cm であった。全 27 房の平均粒径は 13.05cm であったため、ID58 のブドウ房における粒径は、平均より 1cm 程小さい値であった。ID58 のブドウ房の重量はほぼ真値と同じで、粒数が真値よりかなり大きかったため、感覚的には粒径が大きかったのだろうと想像できるが結果は逆であった。ID58 のブドウ房の粒数が、凸包でも alpha-shape の体積からも正確に予測できない要因として、ブドウ房における果実部分以外の穂軸や支梗などが、他の房に比べて大きく重かった可能性が考えられる。

一方、重量や粒数の推定に、粒径が与える影響はそれほど大きくないということも明らかとなった。今回、詳細な計量を行った 27 房分のブドウ房の重量ならびに粒数と粒径との相関係数

を調べたところ、それぞれ 0.121、0.052 とほぼ相関が無いことが分かった。つまり、より正確な収量予測を実現するには、穂軸及び支梗の大きさも考慮した方がよく、凸包も alpha-shape の体積のいずれにおいても穂軸や支梗の大きさまでは考慮できていないため今後の課題となる。もし今後、穂軸や支梗の大きさが分かるようになれば粒径も推測可能になる。粒径はワインブドウの品質計測の際に利用されるため、粒径の推定が可能となれば更なる実用性の向上が期待できる。

5 園場のブドウ画像を用いた検証

5-1. アノテーション画像を用いた3D 点群構築

収穫された状態のブドウではなく、実園場において木に生っている状態のワインブドウ房の体積を算出することを目標に、セマンティックセグメンテーションでブドウ房部分のマスク画像を生成すれば、ブドウ房部分のみの 3D 点群を構築できることを確認する。

図8 に、本検証に用いる動画データを撮影した環境の概要を示す。図8においてカートは図の奥方向に進み、カート後部にそれぞれ異なる角度に取り付けられた 3 台の GoPro Hero9 でワインブドウ（品種：シャルドネ）の群落の動画を撮影した。図8において side はカートの進行方向に対し直角、front は side に比べややカートの進行方向に傾いた向き、up は群落を見上げるような方向を向いている。表3 に、収集された動画データの概要を示す。

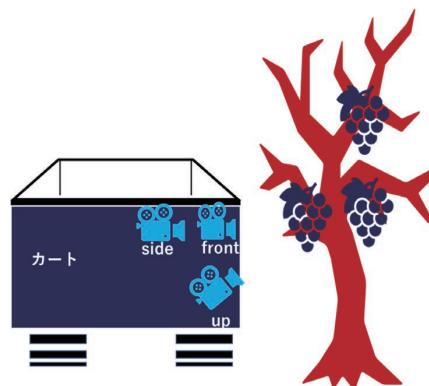


図8 カメラアングル

表3 実園場の動画データ

撮影対象	ワインブドウ（品種：シャルドネ）の群落
機材	GoPro Hero9
画像サイズ（ピクセル）	幅:5120 高さ:2880
撮影角度	front, side, up
ファイル形式	MP4（学習時: JPG）

撮影した動画を、おおよそ画像間で80%以上のオーバーラップ率が確保される画像に変換する。変換された各画像に対し、撮像内の全てのブドウ房に対するアノテーションを行う。アノテーション結果のjsonファイルから、図3(b)に示すようなマスク画像を生成し、フォトグラメトリの際に元画像とともに入力として用いた。マスク画像を用いた際の点群の精度を検証するために、以下A、B、Cに示す3つの入力パターンで3D点群の構築を試した。

- A) マスク画像なし: 角度 front の画像 10枚
- B) マスク画像あり: 角度 front の画像 10枚
- C) マスク画像あり: 角度 front & side の画像 20枚

図9に、A、B、C の各入力パターンで構築された3D点群の画像を示す。マスク画像なしで、角度 front の画像10枚を用いて3D点群を構築した入力パターンAの場合、実際のブドウの木に近い立体的で奥行のある3D点群が構築された。一方、入力パターンBの場合、平面的で厚みのない3D点群が構築された。マスク画像を用いたことで、カメラのアライメントや疎な点群の描画などに使用する特徴点が減少してしまったことが要因と考える。入力パターンCのように、異なる角度の画像も加えて3D点群を構築したところ、厚みのある3D点群が構築できることを確認した。つまり、マスク画像を用いて3D点群を構築する場合、より適切な座標の点群を生成するには、マスクなしの場合よりも多様かつ多数の画像が必要であるといえる。

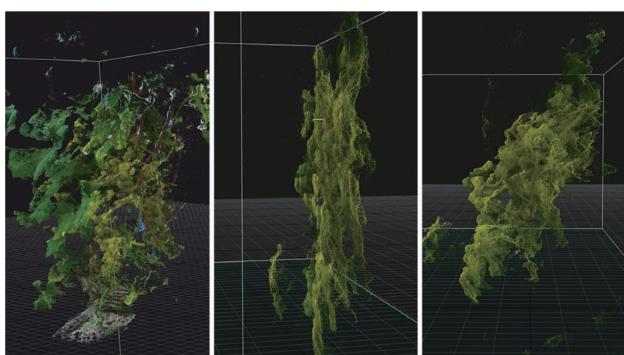


図9 点群構築結果(左から順に入力が A、B、C の場合)

5-2. セマンティックセグメンテーションを用いた3D点群構築

アノテーション画像からではなく、アノテーション画像で学習したセマンティックセグメンテーションモデルの構築によって未学習の実圃場画像からブドウ房のマスク画像を生成し、ブドウ房のみの3D点群を構築可能か検証する。まず、幅5120、高さ2880ピクセルの元画像およびマスク画像を8等分し、幅1280、高さ1440ピクセルの画像に変換して256×256にリサイズし

た。元画像とマスク画像を8分割した画像488枚を、学習用368枚と検証用40枚、テスト用80枚に分け、これらをセマンティックセグメンテーションモデル構築のためのデータセットとした。

画像データベースとして一般的な ImageNet で学習済みのバックボーンを持つセグメンテーションモデル^[10]でファインチューニングを行い、エンコーダとアーキテクチャの組み合わせを変更しながら、どの組み合わせが最も高精度にブドウ房のセマンティックセグメンテーションを行えるか検証した。精度の評価指標には、mIoU を用いた。

表4に、エンコーダとアーキテクチャの組み合わせと mIoU の結果を示す。これらの結果から、エンコーダに EfficientNetB4、アーキテクチャに DeepLabV3+を採用したセマンティックセグメンテーションモデルが最も高い性能を示した。

表4 セグメンテーションモデルの比較

エンコーダ	アーキテクチャ	mIoU
ResNet34	UNet	0.713
ResNet101	UNet	0.699
ResNet152	UNet	0.687
VGG19	UNet	0.748
ResNet34	DeepLabV3+	0.870
EfficientNetB2	DeepLabV3+	0.872
EfficientNetB4	DeepLabV3+	0.882

このセマンティックセグメンテーションモデルを用いて、実圃場でブドウの木を片側から撮影した画像からマスク画像の生成を行った。図10に、本セマンティックセグメンテーションモデルによって生成されたマスク画像から構築した3D点群の例を示す。概ねブドウ房の3D点群が適切に構築されていることが確認できたが、赤い丸で囲んだ部分のように、枝や葉などによるオクルージョンが多い部分では、マスク画像の精度が落ちることもあり、房以外の不要な3D点群が生成されていた。

房以外の不要な3D点群が生成される課題の解決策として、セマンティックセグメンテーションモデル構築に用いる学習用データセットの枚数を増やすだけでなく、入力時のリサイズ時に可能な限り解像度が落ちないよう工夫するといった手法が考えられる。また、現時点では発展途上である3D点群用のセグメンテーションモデルの性能が向上すれば、それを適用するといった手法も考えられる。



(a) 元画像



(b) 3D 点群

図10 マスク画像を用いた3D 点群構築結果

6 おわりに

本研究では、ワインブドウの3D 点群から表面形状を再現する際に、従来手法の凸包ではなく alpha-shape を用いることで高精度な表面形状の再現ができ、正確な体積を算出できることを示した。また、2D 画像用のセマンティックセグメンテーションモデルを用いて、ブドウ房部分のマスク画像を生成し、マスク画像をフォトグラメトリで点群構築する際の入力として加えることで、圃場画像からブドウの房部分のみの3D 点群を構築する手法を検証した。

今後は、一部に不要部分が残ってしまった実圃場におけるブドウ房の3D 点群に対し、3D 点群用の物体検出モデルもしくはセグメンテーションモデルを適用することで、ブドウ房部分のみの3D 点群の構築性能の向上を図れるか検証する。また、実圃場を撮影した画像から生成した房部分の点群に対し、alpha-shape を用いて表面形状を構築し、机上条件との精度の差についても検証したい。今回用いた手法には、ブドウ房に特化した処理は含まれていないため、他の農作物に対する3D 点群構築の性能評価など汎用性についての検討も進めていく。

■謝辞

本研究の一部は、JST 創発的研究支援事業(JPMJFR201B)の支援を受けたものである。また、データセットの収集にご協力いただいた中伊豆ワイナリー社の皆様に感謝の意を表す。

■参考文献

- [1] 藤原 峻, 保田 浩, 斎藤 正博ほか: 高精度測位システムを

搭載した Unmanned Aerial Vehicle(UAV)によるイネ稈長推定法の検討, 育種学研究, Vol. 24, No. 1, pp. 12-21(2022)

[2] Santos, T.T. and Rodrigues, G.G.: Flexible three-dimensional modeling of plants using low-resolution cameras and visual odometry, Machine Vision and Applications, Vol. 27, pp. 695-707(2015)

[3] Qi, C.R., Litany, O., He, K., et al.: Deep Hough Voting for 3D Object Detection in Point Clouds, Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision(ICCV), pp. 9277-9286(2019)

[4] 布施考志:解説:Structure from Motion(SfM) 第二回 SfMと多視点ステレオ, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 5, No. 4, pp. 259-262(2016)

[5] Mónica, H.H., Diego, H.A., Pablo, R.G., et al.: Vineyard yield estimation by automatic 3D bunch modelling in field conditions, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 110, pp. 17-26(2015)

[6] Kai, T.F., Loriot, S. and Yvinec, M.: CGAL 5. 5. 1-3D Alpha Shapes User Manual, available from <https://doc.cgal.org/latest/Alpha_shapes_3/index.html> (accesed 2022-10-26)

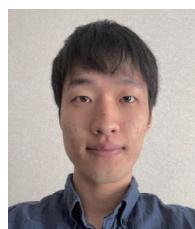
[7] Edelsbrunner, H., Mücke, E.P.: Three-dimensional alpha shapes, ACM Trans. Graph., 13(1), pp 43-72(1994)

[8] Gardiner, J.D., Behnson, J. and Brassey, C.A.: Alpha-shapes: determining 3D shape complexity across morphologically diverse structures, BMC Evolutionary Biology, Vol. 18, No. 184(2018)

[9] Open3D, available from <<http://www.open3d.org/>> (accessed 2022-10-26)

[10] Lakubovskii, P.: segmentation_models.pytorch, GitHub (online), available from <<http://www.squeakland.org/community/biography/alanbio.html>> (accessed 2022-12-20)

■著者



小野坂 振
Natsu Onozaka
静岡大学情報学部
(現名古屋大学大学院情報学研究科)



内海 智仁
Tomoyoshi Utsumi
技術・研究本部
NV・技術戦略統括部新事業推進部



峰野 博史
Hiroshi Mineno
静岡大学学術院情報領域／
グリーン科学技術研究所

要旨

車体軽量化や高意匠化とともに、開発期間の短縮が求められ、プレス成形性を事前に予測するシミュレーション技術の重要性が高まっている。塑性加工の一つであるプレス成形は、板状の材料を金型(パンチとダイス)で挟み込むことにより、形を変えたり打ち抜いたりする成形法で、自動車の車体部品の製造では欠かすことのできない技術である。モーターサイクルでもプレス成形によって製造されている部品があり、要求される製品機能により様々な材質や板厚が用いられる。本稿ではアルミニウム合金板の弾塑性変形挙動および塑性異方性を忠実に再現することにより成形シミュレーションの精度向上を目指した取り組みを紹介する。

Abstract

Simulation technology to predict press formability is becoming increasingly important as shorter development period, as well as vehicle weight reduction and higher design quality are required. Press forming, one of the plastic forming processes, is a forming method that reshapes or punches out plate materials by placing them between dies (punches and dies), and is an important technology in the manufacturing of automobile body parts. Motorcycles also have parts that are manufactured by press forming, and various materials and thicknesses are used depending on the required product function. This paper introduces the Company's efforts to improve the accuracy of forming simulations by faithfully reproducing the elasto-plastic deformation behavior and plastic anisotropy of aluminum alloy sheets.

1 はじめに

車体軽量化を目的に自動車のクロージャパネルにも採用が進んでいる5000系/6000系アルミニウム合金板は、軟鋼板とほぼ同程度の強度を有するものの、伸びは2/3程度、深絞り成形の指標とされる r 値は1/2以下、ヤング率は1/3程度であるため、割れ、しわ、形状凍結性(スプリングバック)などの問題が発生しやすく、軟鋼板に比べて成形自由度は大きく劣る。そのため、有限要素法(FEM)を用いたシミュレーションによる成形不具合の予測とその結果に基づいた適切なプレス工程設計が求められる。

モーターサイクルの燃料タンクは燃料を密閉保持するという機能部品であると同時に重要な意匠部品でもあることから、通常はプレス成形性に優れる軟鋼板が用いられるが、高い走行性能が求められる一部の機種では車体軽量化に寄与するアルミニウム合金板が採用されている(図1)。プランクカットされた板材から形状を造り出す工程は「絞り成形」と呼ばれている。「絞る」とは範囲や量を小さくするような場合に用いられるが、プレス加工における絞り成形とは、周方向に材料を縮ませながら中心方向へ引き込ませることで立体形状を造り出す技術である。薄板材は面内方向に圧縮を受けると座屈現象であるしわが発生するため、適度な張力を与える必要があるが、このバランスを適切に保つことができない製品形状や成形方案の場合、

張力が不足すると側壁部分にしわが発生し、過剰な場合には頂点部分が材料を引き込むための荷重を支えきれず局所的なひずみ集中や板厚減少を起こし破断してしまう。



図1 アルミニウム合金製燃料タンク

プレス成形性を予測するシミュレーション技術は、1990年代半ばから実部品へ適用されてきたが^[1]、鋼板に比べて延性の低いアルミニウム合金を用いて意匠性、機能、製造要件を高いレベルで成立させた魅力的な製品を生み出していくためには、シミュレーション技術の高精度化が必要であると考えた。本稿

の2節では異方性降伏関数と大ひずみ繰返し塑性変形(特にバウシンガー効果の表現)を中心とした材料モデリングについて解説し、その後3節ではその適用事例、精度検証について述べる。

2 材料モデリング

2-1. 材料構成則

板材と金型との接触状態や摩擦特性、計算に使用する有限要素タイプなど、成形シミュレーションの精度に影響を与える因子はいくつか挙げられるが^[2]、成形不具合を精度よく予測するためには、板材の弾塑性変形挙動をできるだけ忠実に表現できる材料モデルが必要となる。

プレス成形シミュレーションの材料モデルは、①降伏条件、②流れ則、③加工硬化則の3つの関係で構成されている。降伏条件とは材料が2軸(または3軸)の組合せ応力を受けているときに弹性限度に達して塑性変形を開始するときの条件則である。流れ則とは現在の応力に対して次の瞬間に生じる塑性ひずみ増分方向を規定し、加工硬化則は塑性変形の進行に伴う变形抵抗の増加を表現する構成則である。

2-2. 異方性降伏関数と関連流れ則

図2に示したように、コイル圧延方向にX軸、幅方向にY軸、板厚方向にZ軸となるような直交座標系を取ると、材料の立方体要素に作用する応力は、各面に垂直に作用する垂直応力3成分と、各面に平行なせん断応力3成分の計6つの独立な成分となるが、これらを組み合わせたものが材料に固有な値Cに達すると材料は降伏し、達していない状態は弹性状態と考える。

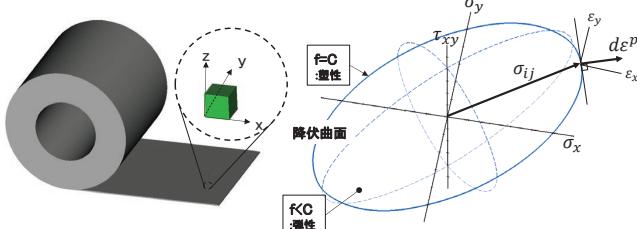


図2 多軸応力下の降伏条件

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}) = C \quad \text{塑性状態}$$

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}) < C \quad \text{弹性状態}$$

ここで $f = C$ は降伏関数と呼ばれるが、薄板材料を扱うプレス成形の場合には板厚方向の応力成分は十分に小さく実用上無視できるため、考慮すべき応力は $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ の3成分となる。

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ を各軸とした応力空間で $f = C$ を表現すると楕円球形状の閉曲面(降伏曲面)となり、応力がこの内部にある状態は弹性状態、閉曲面まで到達すると材料は降伏し塑性変形を開始すると考える。

また、ある応力 σ_{ij} が作用し降伏曲面に達して材料が降伏したとすると、その次の瞬間に発生する塑性ひずみの増分方向 $d\epsilon^p$ は、その応力点において降伏曲面の外向き法線方向と一致するとした関連流れ則が一般的に用いられている。このため、降伏曲面のモデル化は弾塑性の判別だけでなく、塑性ひずみ増分方向を決定する役割も担うため重要である。

この降伏曲面形状を実験的に取得する方法も研究、提案がされている(図3)^{[3][4]}。従来から行われている単軸引張試験により図中の黒色塗りつぶし印で示した応力点と、r値と呼ばれる塑性ひずみ比から各点の法線ベクトル方向が求まり、二軸引張試験や液圧バルジ試験、さらに平面ひずみ引張試験などを組み合わせることにより赤色塗りつぶし印で示した応力点を取得することができる。実際に1000系、5000系、6000系アルミニウム板材、および軟鋼板で取得した等塑性仕事面を図4に示す^{[14][15]}。マーカーは実験取得した応力点、破線は等方性材料に関する von Mises の降伏条件による降伏曲面形状を示しているが、いずれの材料もそれとは一致せず、またアルミニウム板材の中でも降伏曲面形状は異なっていることが分かる。これは金属板材を製造する際の圧延加工により形成される集合組織などに起因し、板材の方向によっても降伏応力や変形特性が異なることから異方性と呼ばれている。

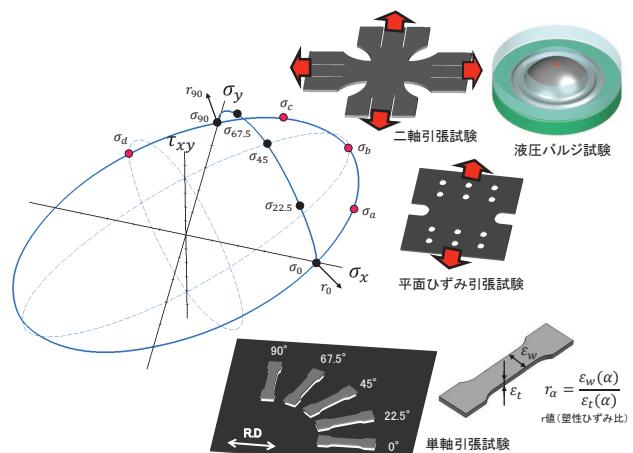


図3 単軸および二軸応力状態を再現する材料試験法

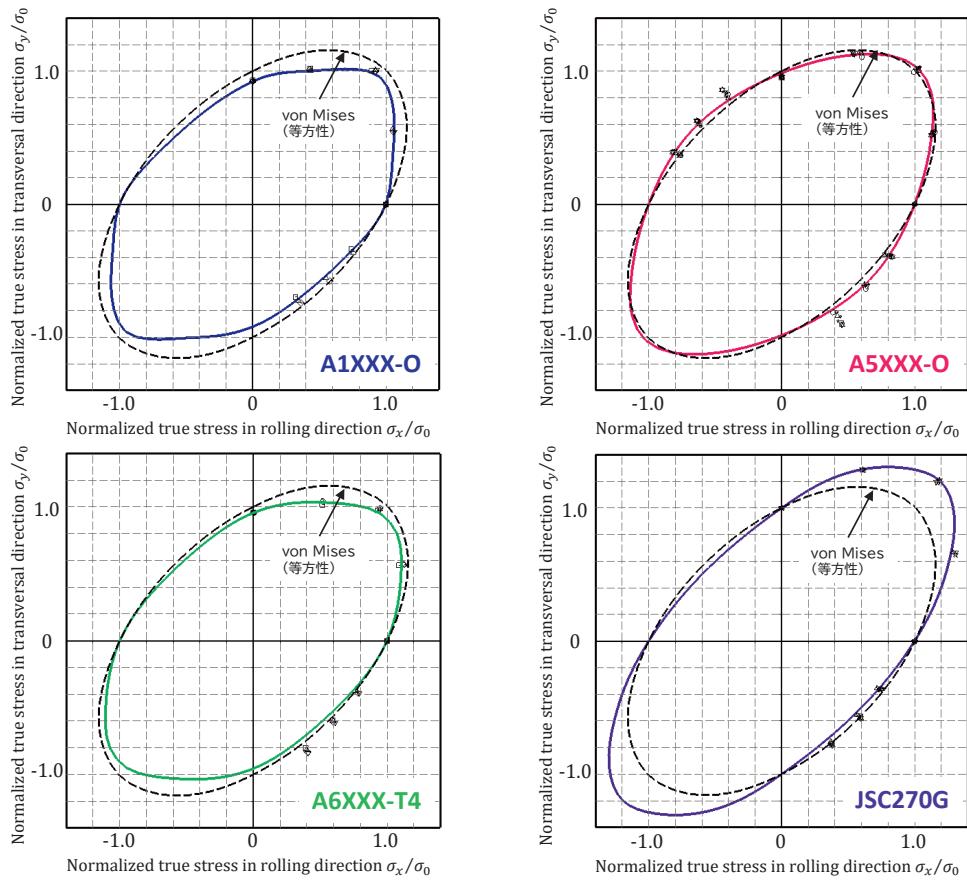


図4 各種板材の等塑性仕面

材料により異なる降伏曲面形状を、成形シミュレーションでは異方性降伏関数を用いてモデル化する。異方性降伏関数については様々なものが提案^{[5][6][7]}されており、最も基本的で現在でもよく使われているものは1948年に発表された Hill の2次降伏関数^[8]である。一方、2013年には Yoshida らにより6次多項式型の異方性降伏関数^[9]が提案されている。それぞれの平面応力表現は以下のようになる。

Hill48

$$\phi = (G + H)\sigma_x^2 + (H + F)\sigma_y^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + 2N\tau_{xy}^2 = \sigma_0^2$$

F, G, H, N: 異方性パラメータ

Yoshida 6-poly

$$\begin{aligned} \phi = & C_1\sigma_x^6 - 3C_2\sigma_x^5\sigma_y + 6C_3\sigma_x^4\sigma_y^2 - 7C_4\sigma_x^3\sigma_y^3 + 6C_5\sigma_x^2\sigma_y^4 - 3C_6\sigma_x\sigma_y^5 + C_7\sigma_y^6 \\ & + 9(C_8\sigma_x^4 - 2C_9\sigma_x^3\sigma_y + 3C_{10}\sigma_x^2\sigma_y^2 - 2C_{11}\sigma_x\sigma_y^3 + C_{12}\sigma_y^4)\tau_{xy}^2 \\ & + 27(C_{13}\sigma_x^2 - C_{14}\sigma_x\sigma_y + C_{15}\sigma_y^2)\tau_{xy}^4 + 27C_{16}\tau_{xy}^6 = \sigma_0^6 \end{aligned}$$

$C_1 \cdots, C_{16}$: 異方性パラメータ

いずれも前半部分が垂直応力項、後半部分がせん断応力との連成項となっているが、垂直応力項のみを比較しても Hill48 は3個の異方性パラメータを持つ2次式であるのに対して、Yoshida

6-poly は7個の異方性パラメータを持つ6次式となっており、表現自由度の高いモデルである。それぞれの降伏関数によりモデル化した5000系アルミニウム合金板の降伏曲面形状を図5に示す^{[14][15]}。Hill48は圧延方向の降伏応力とr値、および圧延直交方向のr値しか再現できていないが、Yoshida 6-poly では二軸応力の実験点も含め全体を精度よく再現している。

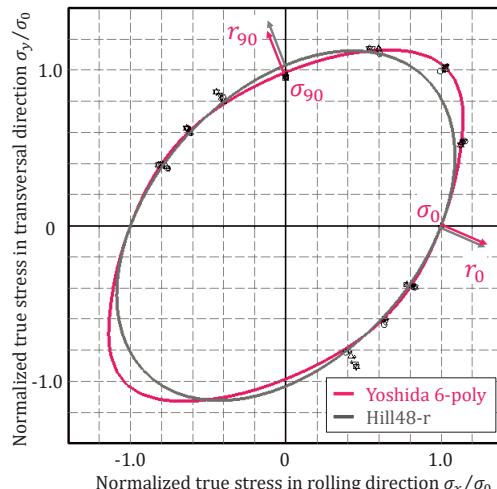


図5 5000系アルミ合金板材の降伏曲面モデル化

2-3. 大ひずみ域の異方性発展

図6に示す応力一ひずみ線図において ε_{p1} から ε_{p2} まで塑性ひずみが増大すると、矢印で示すように材料は加工硬化する。この加工硬化を降伏曲面で表現すると、塑性ひずみの増大とともに弾性領域が拡大し、降伏曲面は外側へ膨張することになる。異方性が変化しないことを前提とすると、降伏曲面は相似形状を保ちながら膨張することになるが、実際には多くの材料で塑性ひずみの進展とともに異方性は変化し、降伏曲面は形状を変化させながら膨張することが知られている。

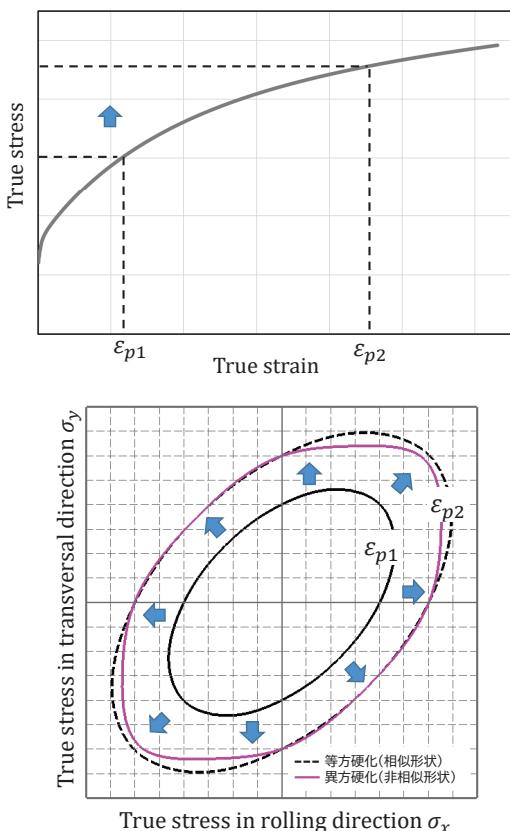


図6 加工硬化の表現

この異方性の発展についても以下に示す手法によりモデル化を行っている^[10]。

$$\phi(\sigma, \varepsilon_p) = \mu(\bar{\varepsilon}_p)\phi_1(\sigma) + (1 - \mu(\bar{\varepsilon}_p))\phi_2(\sigma)$$

$$\mu(\bar{\varepsilon}_p) = 1 - \left[\frac{\bar{\varepsilon}_p - \bar{\varepsilon}_{p1}}{\bar{\varepsilon}_{p2} - \bar{\varepsilon}_{p1}} \right]^p$$

塑性ひずみが比較的小さいときの異方性を表現する降伏関数 $\phi_1(\sigma)$ と、大ひずみ域の異方性を表現する降伏関数 $\phi_2(\sigma)$ を定義し、それらを相当塑性ひずみ($\bar{\varepsilon}_p$)依存の内挿関数 $\mu(\bar{\varepsilon}_p)$ で補間することにより、塑性ひずみの進展とともに降伏曲面形状が変化していく異方硬化挙動を表現している。なお、式中の指数 p は $\bar{\varepsilon}_{p1} \leq \bar{\varepsilon}_p \leq \bar{\varepsilon}_{p2}$ における内挿パラメータである。

2-4. 大ひずみ繰り返し塑性モデル (Yoshida-Uemori model)

板材に引張応力を与えた後に除荷し、圧縮応力を与えて再降伏させたときの弾塑性挙動は図7のようになる。応力反転後の再降伏は極めて早い段階で起こり、加工硬化率が急激に変化する遷移的バウシンガー効果を経て加工硬化が一時休止したような挙動が見られ、バウシンガー効果がないと仮定した場合よりも小さな流动応力で塑性変形が進行する。また、除荷時の応力一ひずみの線形近似勾配(見かけヤング率)は塑性ひずみに依存して低下する。Yoshidaらの提案した非線形移動硬化則モデル(Yoshida-Uemori model)^{[11][12][13]}を適用することで、アルミニウム合金についてもこれらの弾塑性挙動を表現することができている(図8)。

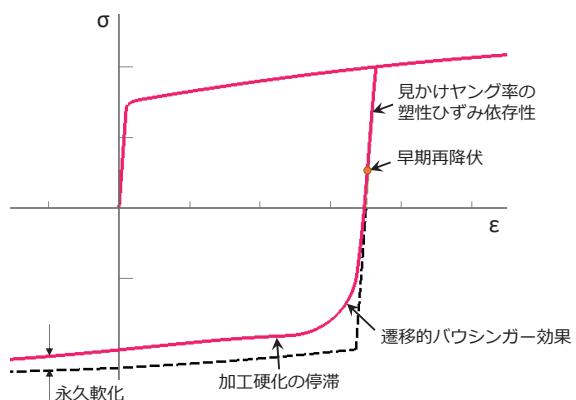


図7 応力反転における応力一ひずみ挙動

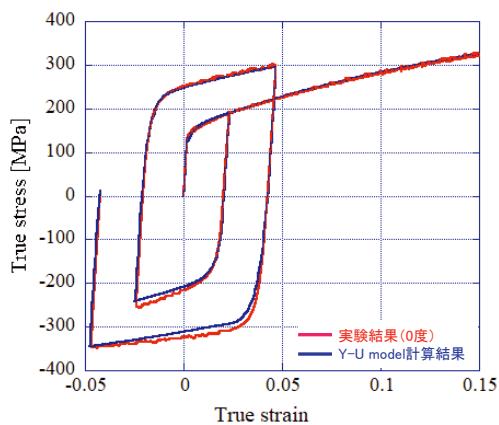


図8 Y-U model 計算結果と実験結果の比較
(5000系アルミニウム合金)

3 精度検証

3-1. 検証に用いたモデル

検証に用いたアルミニウム合金板の機械的特性を表1に示す。液圧バルジ、テーパカップ絞り、S-Rail の各成形を行い、実

パネルとシミュレーション結果を比較した。シミュレーションには有限要素解析ソフトウェア JSTAMP/NV(ソルバーは LS-DYNA の動的陽解法)を使用し、前節で述べた材料特性をすべて表現することのできる材料モデルを開発し適用した。

表1 アルミニウム合金板材の材料特性

	公称板厚 [mm]	ヤング率 E [Gpa]	降伏強さ YS [MPa]	引張強さ TS [MPa]	伸び EL [%]	r 値
A5XXX-O	1.2	72	135	280	30	0.70
A6XXX-T4			140	240	28	0.58

3-2. 液圧バルジ成形による検証結果(6000系アルミニウム合金)

液圧バルジ成形とは、図9に示すようにリング状に材料を拘束した状態で下側から液圧を付加して膨出させる成形法である。膨出成形される頂点部分は、液圧の上昇とともにほぼ等二軸引張応力状態で変形が進んでいく。図10は横軸に負荷液圧、縦軸に頂点部の板厚減少率をプロットした結果のグラフである。従来の単軸引張特性だけでなく、二軸引張の流动応力を正確にモデル化することで精度の良いシミュレーション結果が得られている。



図9 液圧バルジ成形

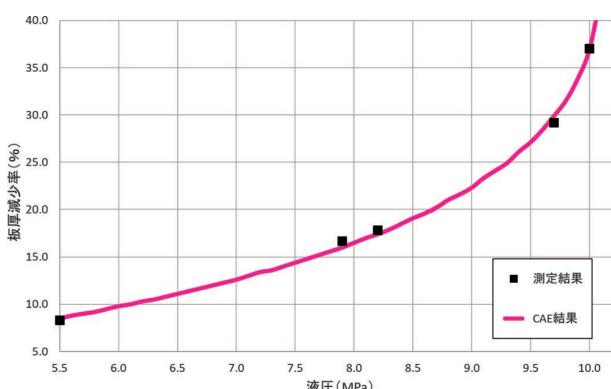
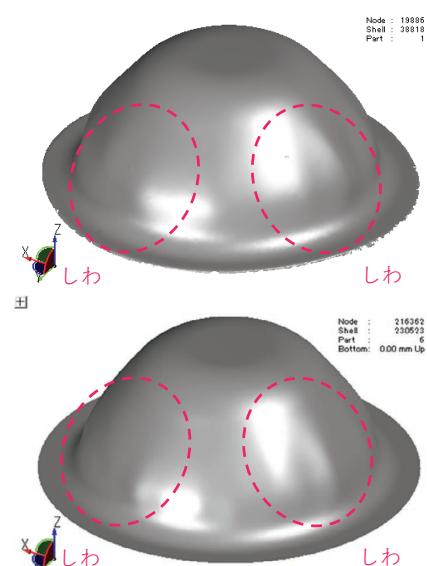


図10 液圧バルジ成形頂点部の板厚減少率

3-3. テーパカップ絞り成形による検証結果(6000系アルミニウム合金)

一定のしわ押さえ力のもとプランク径を変化させてテーパカップ形状の深絞り成形を行った。プランク径が比較的小さい場合にはボデーしわが発生し、プランク径の拡大に伴いしわは改善されていくが、さらに拡大するとパンチ肩部で過度な板厚減少が生じて破断する。ボデーしわが発生した条件のパネル形状とともに、パンチ肩部で破断した条件において中心を通り圧延方向に平行な断面に沿って板厚減少率を計測し、シミュレーションと比較した結果を図11、12に示す。グラフの横軸は中心からの断面位置、縦軸は板厚減少率を示している。深絞り成形では部位により様々な応力状態となるが、適用した材料モデルではプランク径の僅かな変化によってしわ、割れが発生してしまうアルミニウム合金板の成形性が精度よく再現されている。



上段:測定結果／下段:CAE結果

図11 テーパカップ絞り成形(プランク径φ250)

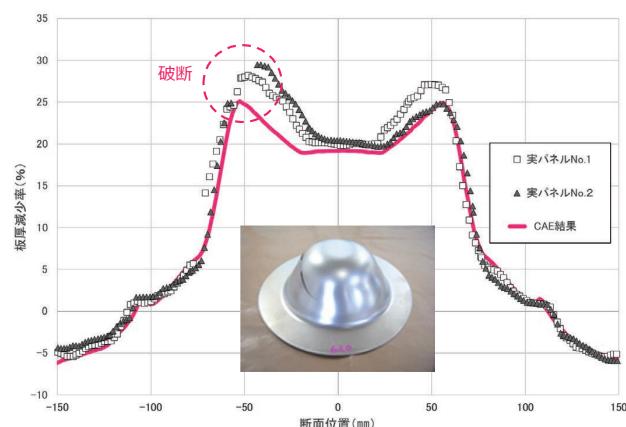


図12 テーパカップ絞り成形(プランク径φ273)

3-4. S-Rail 成形によるスプリングバック検証結果(5000系アルミニウム合金)

板材成形シミュレーションの国際会議 NUMISHEET'96においてベンチマークモデルとして採用されたS-Rail形状を参考に金型を製作し、離型後のパネル形状を非接触測定機により測定することで、実成形パネルとシミュレーション結果のスプリングバック変形を比較評価した(図13)。成形下死点において曲げR部には板外側に引張、板内側に圧縮の応力が生じており、離型時にはこれらが弾性回復することによって角度変化が起こる。縦壁部においてはフランジ部から流入する材料がダイ肩Rで曲げ変形、縦壁部で曲げ戻し変形を受けて形成され、板外側は引張、板内側は圧縮の応力状態となり、離型時にはこれらが弾性回復することによって生じるモーメントが駆動力となって壁反りが発生する。アルミニウム合金においても今回適用した材料モデルでこれらのスプリングバック変形を再現することができている。

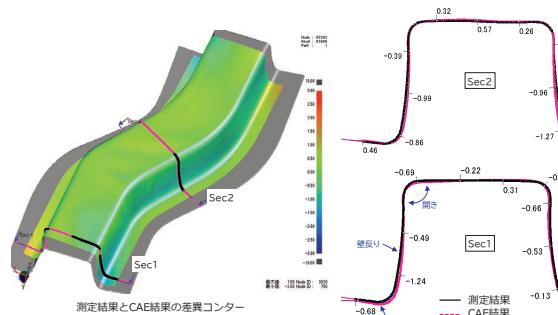


図13 S-Rail 成形によるスプリングバック(5000系アルミニウム合金)

4 おわりに

板材プレス成形を対象にしたシミュレーション技術開発とアルミニウム合金板への適用の取組みについて紹介した。材料の弾塑性挙動の計測やモデル化の手法については、大学などの研究機関における学術成果が応用展開されたものである。ものづくりの現場ではこれらを活用して、車体軽量化、性能向上に加えて、エネルギー・資源の有効活用といった課題にも貢献していくことが期待される。

なお、本稿の内容は(株)CEM研究所 吉田総仁氏(広島大学名誉教授)、(株)JSOL 天石敏郎氏との共同研究によるものであり、(公社)自動車技術会の会誌「自動車技術」、(一財)素形材センターの会誌「素形材」へ寄稿した原稿^{[14][15]}を一部加筆修正したものである。

■参考文献

- [1] 高橋進:塑性と加工, 第57巻, 662号, p.167-168(2016)
- [2] 浜孝之:塑性と加工, 第51巻, 598号, p.1017-1022(2016)
- [3] 桑原利彦ほか:塑性と加工, 第40巻, 457号, p.145-149(1999)
- [4] 小西啓史, 瀧澤英男:第69回塑性加工連合講演会論文集, p.237-238(2018)
- [5] 後藤學:塑性と加工, 第19巻, 208号, p.377-385(1978)
- [6] F. Barlat, J. Lian: International Journal of Plasticity, 5, p.51-66(1989)
- [7] F. Barlat, et al.: International Journal of Plasticity, 19, p.1297-1319(2003)
- [8] R. Hill: Proc. Roy. Soc. A193, p.281-297(1948)
- [9] F. Yoshida, et al.: International Journal of Plasticity, 45, p.119-139(2013)
- [10] F. Yoshida, et al.: International Journal of Plasticity, 75, p.170-188(2015)
- [11] F. Yoshida, et al.: International Journal of Plasticity, 18, p.633-659(2002)
- [12] F. Yoshida, T.Uemori: International Journal of Plasticity, 18, p.661-686(2002)
- [13] F. Yoshida, T.Uemori: International Journal of Mechanical Sciences, 45, p.1687-1702(2003)
- [14] 加藤直幸ほか:自動車技術, 75, p.80-86(2021)
- [15] 加藤直幸ほか:素形材, 64, p.23-28(2023)

■著者



加藤 直幸
Naoyuki Katou
ヤマハモーター
エンジニアリング(株)
生産技術部

Development of Lightweight Oil Catch Tank Produced by Laser Powder Bed Fusion

Keita Watanabe Hirotaka Kurita Shinya Iwasaki Riku Mitsui Takashi Nagao
Tsuguharu Tashiro Makoto Ichimura Yoshiaki Kano Jun Kusui

当論文は、SAE 2023-01-1807/JSAE 20239507として、SETC2023 (Small Powertrains and Energy Systems Technology Conference)にて発表され、優秀論文6選に選出されたものです。

Reprinted with permission Copyright © 2023 SAE INTERNATIONAL and Copyright © 2023 SAE Japan (Further use or distribution is not permitted without permission from SAE)

要旨

3Dプリンターとも呼ばれる三次元積層造形法は、従来工法では実現困難な複雑形状を具現化するだけでなく、多品種少量生産への適正が高く、また開発および生産におけるリードタイム短縮などにも寄与する革新的な工法として注目を集めている。その中でも、金属材料の三次元積層造形法の一種であるレーザーパウダーベッドフュージョン(L-PBF)は、精巧な造形性に加え優れた材料特性を発現することから、航空宇宙産業を中心し実用化が進んでいる。本報では、L-PBF法を活用し、輸送機器に広く用いられているオイルキャッチタンクの軽量化に取り組んだ。積層造形条件の最適化、材料の冶金的および機械的特性の把握、更にはL-PBFの形状自由度を反映した設計により、従来比60%の劇的な軽量化に成功した。

Abstract

Laser powder bed fusion is one of the metal additive manufacturing technologies, so-called 3D printing. It has attracted great attentions due to high geometrical flexibility and remarkable metallurgical characteristics. An oil catch tank has been widely used in automotive industries for filtering oil vapors or carbon sludge from blow-by gas as a conventional usage. A pneumatic valve system mainly adopted to high-performance engines is also a potential application of it because undesirable oil infiltrates into air springs during engine operation, resulting in an excess spring pressure. This work focused on developing a lightweight oil catch tank which can be applied to a pneumatic valve system by taking advantage of additive manufacturing techniques. Al-Mg-Sc alloy powder with high tensile strength as well as high ductility were used under the consideration of specific strength, printability and availability. Test specimens fabricated with optimal printing parameters exhibited mechanical properties comparable to a high-strength wrought material as well as unique metallurgical characteristics due to rapid solidification. The newly developed oil catch tank was designed taking into account material properties acquired in this study and functional requirements of the component. The developed tank had a monolithic structure whereas conventional one consists of multiple parts. Moreover, the wall thickness was minimized from location to location based on the induced stress distribution. These are distinct geometrical features which are very difficult to be created by classical processes. As a result, the novel 3D-printed tank in this work was around 60% lighter than conventional one, and experimentally demonstrated to meet the functional requirements.

1

INTRODUCTION

Oil catch tanks have been widely used in automotive industries to separate gas and other substances such as oil. They basically consist of a vessel, an inlet, an outlet, and a drain as illustrated in Figure 1. Gas including impurities

flows into and out of the vessel through the inlet and the outlet respectively, resulting in separation due to a difference of specific weight. It is typically installed into a ventilation circuit of blow-by gas to filter oil vapors or carbon sludge^[1]. Another is placed in a transmission case of a hybrid vehicle to collect automatic transmission fluid

and distribute it to a motor for cooling^[2]. A pneumatic valve system (PVS) often adopted in high-performance engines is also a potential application of an oil catch tank. The system employs compressed air springs instead of conventional coil springs as shown in Figure 2(a) and play a key role to precisely drive both intake and exhaust valves even in extremely high revolution. During engine operation, lubricant oil surrounding the system gradually infiltrates into the air springs, leading to unwanted increase in pressure. Figure 2(b) shows the conceptual design of a ventilation circuit for a PVS in which compression air is regularly vented out from the springs and flows into the oil catch tank through the gallery installed in the cylinder head. In this case, the oil catch tank is required to withstand high pressure equivalent to or greater than that of the air springs. In addition, the temperature of the tank is expected to reach up to 150°C due to heat generated from the engine because the tank is supposed to be mounted closed to the engine. It also can be said that the lighter, the better for high-performance engines. For these reasons, the oil catch tank compatible to a PVS should achieve both lightness and durability.

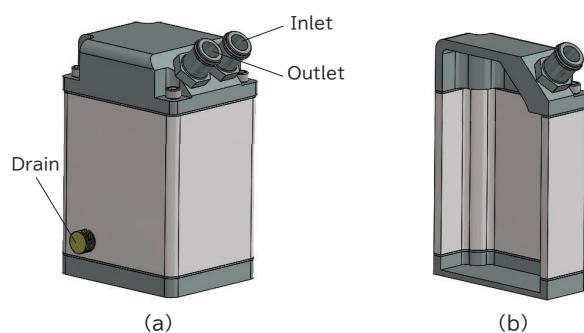


Fig. 1 Schematically illustrated (a) appearance and (b) cross-sectional view of general oil catch tank

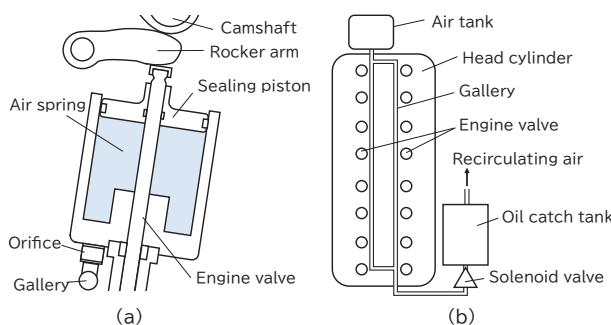


Fig. 2 Schematic illustration of (a) cross-sectional view of PVS and (b) ventilation circuit concept

Additive manufacturing technologies, also called as 3D printing, have been gradually put to practical applications in various industries such as medical, aerospace, aviation and automotive. As explained in more detail later, they are characterized by a layer-by-layer process which can offer high design flexibility. This work aims to develop a lightweight oil catch tank that can be applied to a PVS by means of an additive manufacturing technique.

2 EXPERIMENTAL

2-1. Laser powder bed fusion

Laser powder bed fusion (L-PBF) is one of the most widely used metal additive manufacturing technologies. In a L-PBF process, a thin layer of powder is distributed across a building platform and selectively melted by a high-power laser according to two-dimensionally sliced data of a product, and this sequence is repeated until a three-dimensional structure is completely built. This unique layer-by-layer technique offers design flexibility with a high resolution^{[3][4]}. During the L-PBF process, the laser irradiation spot is very small and moves around so rapidly that the melted material experiences immediate solidification with a high cooling rate. Tang et al. estimated the cooling rate of the L-PBF process is approximately 2×10^6 K/sec in AlSi10Mg alloy^[5], which is extremely faster than conventional casting processes with cooling rate of 100 K/sec at most^[6]. The rapid solidification and high cooling rate serve to create very fine microstructures accompanying with remarkable metallurgical characteristics demonstrated in the various materials^{[7][8][9]}. Nowadays, it has also attracted a lot of interests from the viewpoint of carbon neutrality^[10]. Figure 3 shows a schematic illustration of the L-PBF process and its key parameters. In the L-PBF process, volumetric energy density E_d (J/mm³) calculated by the following equation has been often utilized to explore optimal process parameters^[11].

$$E_d = \frac{P}{v \cdot S \cdot t} \quad (1)$$

where P is the laser power (W), v is the laser scanning speed (mm/sec), S is the hatch spacing (mm) between the adjacent tracks, and t is the powder layer thickness (mm).

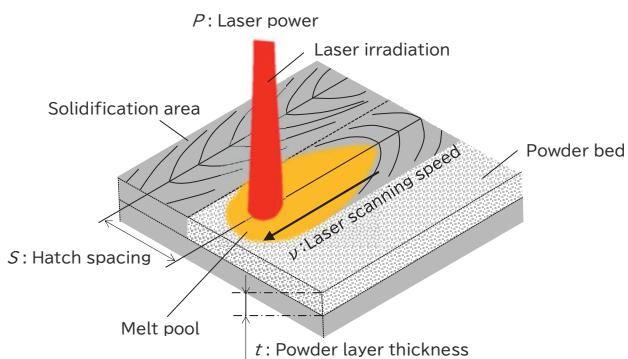


Fig. 3 Schematic illustration of L-PBF process and key parameters

2-2. Al-Mg-Sc alloy

Strength-to-weight ratio is of importance in the material selection for weight reduction. From this perspective, both Al alloys and Ti alloys can be potential materials since they have a great strength-to-weight ratio and are available in the L-PBF technology. However, if a Ti alloy is used, design features such as a wall thickness and a strut are required to be much finer than those in case of Al alloys to achieve the same weight because the density of Ti alloys is around 60% greater than Al alloys. Extremely fine features could make printing more difficult and, in severe cases, lead to a deformation or a collapse. Additionally, Ti alloys often exhibit a martensitic transformation accompanying with a rapid volume change, which could also increase a risk of deformation. For these reasons, one of the high-strength Al alloys available in the L-PBF process, an Al-Mg-Sc alloy was adopted in this work. The effects of Sc addition to conventional casting Al alloys have been widely investigated^{[12][13]}. In the solidification process of Al alloys including Sc, Al₃Sc intermetallic particles preliminarily precipitate in the molten alloy before the α -Al phase forms. Al₃Sc has L1₂ lattice structure, which is a fcc-based structure, and it was reported the lattice misfit between the α -Al matrix and Al₃Sc is considerably small, approximately 1.3%^[14]. Due to the high coherence with the matrix, Al₃Sc can disperse homogeneously with high density and subsequently act as a nucleation site for the α -Al phase to solidify, resulting in a remarkable grain refinement. Furthermore, the homogeneously dispersed Al₃Sc precipitates serve to inhibit dislocations from

moving. Hence, the alloys exert a great precipitation strengthening effect as well as recrystallization suppression up to a certain elevated temperature. Several researchers have investigated Al-Mg-Sc alloys fabricated by the L-PBF process. A.B. Spierings et al. conducted comprehensive studies related to the microstructural features and suggested that Al₃Sc particles contribute grain refinement in the additively manufactured Al-Mg-Sc alloy as well^{[15][16]}. Kimura et al. studied aging behaviors of this alloy and found that the hardness is not likely to be susceptible to the aging condition if the temperature ranges from 300°C to 350°C and holding time is more than 4 hours^[17]. 325°C for 4 hours is proposed as the peak aging condition in their work. Shi et al. evaluated effects of the building platform temperature and the building orientation on the mechanical properties of an Al-Mg-Sc alloy containing small amount of Cu^[18]. It was reported that both affect the as-fabricated mechanical properties, however, all the specimens built with the different condition exhibit almost the same tensile properties after the aging treatment. That is to say, the aging treatment can give this alloy consistent tensile properties.

2-3. Investigation on metallurgical characteristic

Metallurgical characteristics of the Al-Mg-Sc alloy were firstly investigated. Centrifugal-atomized powder whose chemical composition is shown in Table 1 was used. The cumulative distribution of the particle size showed 28.6 μ m for d_{10} , 43.4 μ m for d_{50} and 65.0 μ m for d_{90} . One of the L-PBF printer, LUMEX Avance-25, were employed. Laser power, laser scanning speed, hatch spacing and layer thickness were 340W, 900mm/sec, 0.1mm and 0.04mm respectively. The volumetric energy density E_d is calculated as 94.4J/mm³ based on the equation (1). The above optimal parameters to create a fully dense specimen were established through the preliminary experiment. In the experiment, 35 × 8 × 15mm cuboid specimens were fabricated with varying laser power, laser scanning speed and hatch spacing. The fabricated specimens went through a density measurement by Archimedes method. Figure 4 shows the relationship between the density of the specimen and the volumetric energy density. The density of the specimen increases as

the volumetric energy density increases. At volumetric energy densities above 80J/mm^3 , the specimen densities reach up to around 2.67g/cm^3 which is the theoretical density of the material. The data point in red corresponds to the condition used in this work as the optimal parameters described above. The cross-sectional view of the cuboid specimen printed with the optimal parameters is shown in Figure 5 where no evident defects can be observed.

Table 1 Chemical composition of powder material

	mass%					
Mg	Sc	Zr	Mn	Si	Fe	Al
4.90	0.78	0.29	0.41	0.06	0.17	Bal.

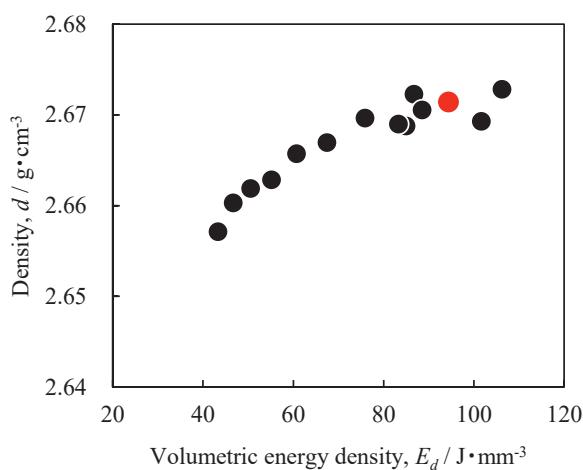


Fig. 4 Relationship between specimen density and volumetric energy density



Fig. 5 Cross-sectional view of specimen fabricated with optimal parameters

Sheet-shaped specimens with the dimension of $23 \times 119 \times 4\text{mm}$ referred to as specimen A, $33 \times 95 \times 4\text{mm}$ referred to as specimen B were produced. Specimen A was fabricated with the orientation where the longitudinal direction was aligned with the stacking direction (Vertical direction). A part of specimen B was produced with the same orientation as specimen A. Additionally, specimen B was built with the orientation at 45° to the building platform as described in Figure 6. The building platform was kept at 40°C during the fabrication. The produced specimens were aged at 325°C for 4 hours followed by air cooling. Surface roughness was evaluated using optical 3D surface profilometer, KEYENCE VR-3000. For the microstructure observation, specimen A was grounded and polished followed by etching in Keller's reagent. Microstructures were analyzed by an optical microscopy, a scanning electron microscope (SEM) and a transmission electron microscope (TEM). Electron backscatter diffractions (EBSD) were obtained with a step size of $0.5\mu\text{m}$ using JEOL JSM-6490A with TSL-OIM device. The specimen surfaces went through ion milling using JEOL SM-09010 before the EBSD analysis. A grain boundary was defined if the misorientation between two points was greater than 15° . Thermo Scientific Talos F200X operated at 200kV was used for TEM observation. A thin foil specimen for TEM observation was prepared using JEOL EM-09100IS ion milling. Bright field (BF) images were captured in scanning transmission electron microscopy (STEM) mode. Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analyses were also conducted. AVK-A Vickers hardness tester was used to evaluate the hardness at ambient temperature on five (5) points for one of test specimen A and the average was calculated. The load and the loading time were 5kgf and 15sec respectively. Specimen A and B were processed into the tensile test coupons and the fatigue test coupons respectively as described in Figure 7. All the surfaces in the tensile test coupons were finished by machining. In case of the fatigue test coupons, only the contour and the holes were machined, which means most of the surface remained in the as-built state. Tensile tests at ambient temperature were carried out using an universal tester, AG-100kN IS with the tensile speed of 0.13mm/min up to

the yield strength, and afterward 2.5mm/min. Tensile tests at 150°C were conducted using an universal testing machine, AG-100kNXplus with the strain rate of 0.42%/min up to the yield strength, and afterward 8.4%/min. Averages of the tensile properties were calculated from 18 measurements. Fatigue properties at 150°C were examined using a bending fatigue tester with the stress ratio (Minimum stress divided maximum stress) of -1 and the frequency of 25Hz.

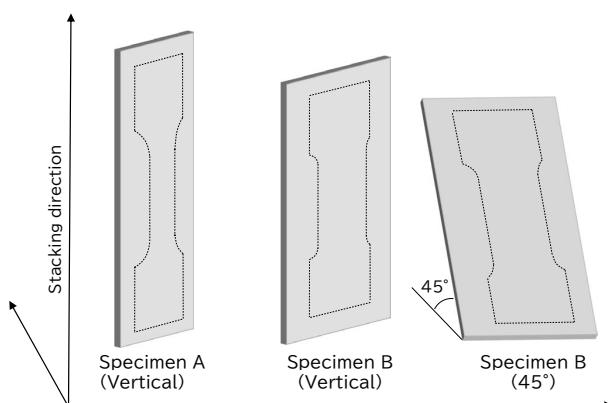


Fig. 6 Schematic drawing of fabricated specimen

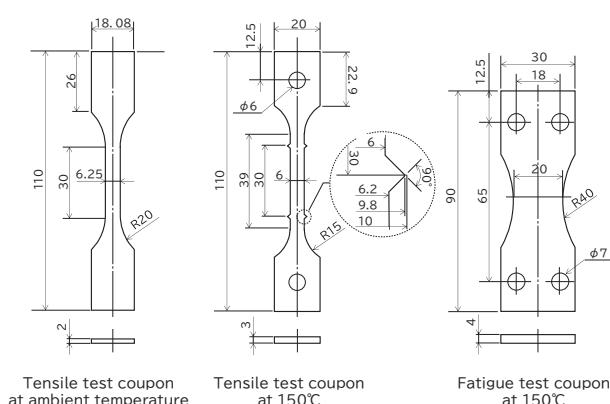


Fig. 7 Test coupon geometry for mechanical property test

3 RESULT AND DISCUSSION

3-1. Microstructural characterization

Figure 8 shows a microstructure along the stacking direction. There are no noticeable defects such as a lack of fusion or a keyhole. The relative density of this specimen evaluated by an image analysis was 99.9%. It can be considered fully dense owing to the optimized printing parameters. The microstructure comprises full of

semi-circular microstructures with the width of around 200μm. The profile of the melt pool track during the laser irradiation is evident. One semi-circular track is overlapping with the adjacent, underneath and upper tracks, which implies the material experienced multiple melting and solidification. In addition, the heat that dissipated from a melt pool to a solidified material could cause an intrinsic heat treatment. It was reported this treatment encourages precipitations in age-hardening alloys including the Al-Mg-Sc alloy^[19].

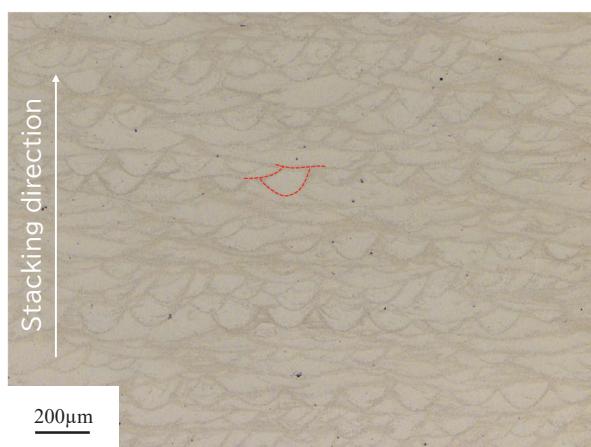


Fig. 8 Optical micrograph (Area enclosed by red dotted line describes single melt pool)

Two regions of different grain sizes are clearly distinguishable in the EBSD analysis results as shown in Figure 9. Very fine equiaxed grains are formed along the melt pool boundaries whereas columnar grains develop from the vicinity of the melt pool boundaries toward the center of the melt pools. The approximate size of the equiaxed grains ranges from 1 to 3μm while that of the columnar grains ranges from 2 to 20μm in the longitudinal direction. It is notable that the observed grains are remarkably finer than those of conventional casting Al alloys whose grain sizes are from several tens to hundreds of micrometers^[20]. The finer grains potentially lead to the greater yield strength according to the Hall-Petch relation. Additionally, Kimura et al reported the Al-Mg-Sc alloy exhibits the greater volume fraction of the fine equiaxed grains than that of AlSi10Mg, a typical Al alloy for L-PBF^[16]. Therefore, these refined grains can be one of the strengthening factors for the Al-Mg-Sc alloy. The two distinct regions also exhibit

difference in the grain orientation. The pole figures in Figure 10 displays the columnar grains have a strong texture of <001> direction along the stacking direction, on the contrary, the fine grains show no tendency of such texture. This indicates grains oriented to <001> direction developed from the bottom to the center of the melt pools during solidification, resulting in the columnar grains.

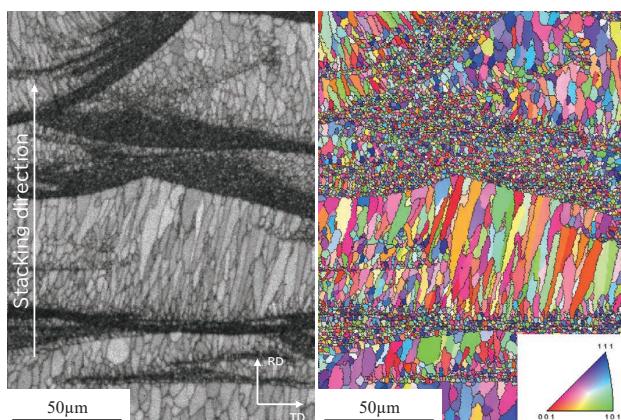


Fig. 9 EBSD inverse pole figure map

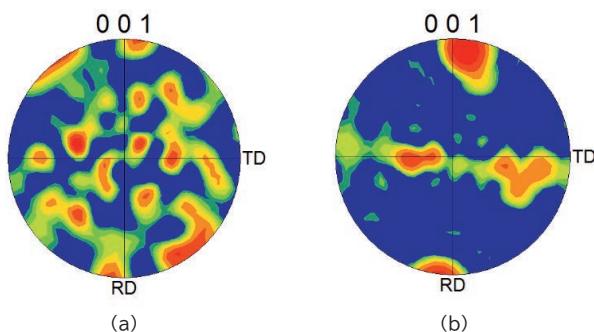


Fig. 10 [001] pole figure of (a) fine grain and (b) columnar grain

EDS mappings of the columnar grain region at low magnification are shown in Figure 11. Fe-Mn rich and Mg-Si rich precipitates are observed within the grain as well as on the grain boundary. The precipitates on the grain boundary appear to be larger than those within the grain itself. Sc is spread throughout but appears to slightly segregate at the grain boundaries. The high magnification mapping in Figure 12 shows an evidence of Sc rich precipitates that are much finer than the other precipitates, with the size of around 5nm. This Sc rich precipitates are considered as Al₃Sc according to the

previous studies^{[14][15][16][17]}. Figure 11 and Figure 12 additionally suggest that Mg still exists as a solute element dissolving into the matrix although a certain amount of Mg is consumed as the precipitates.

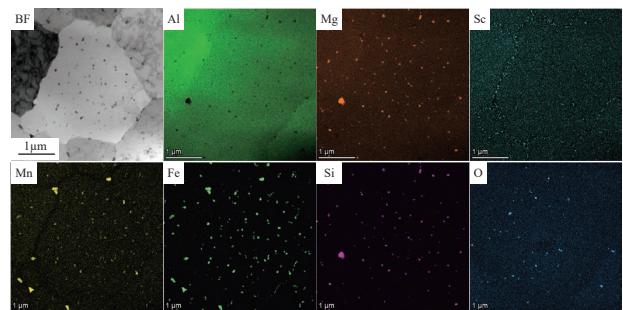


Fig. 11 Low magnification EDS mapping

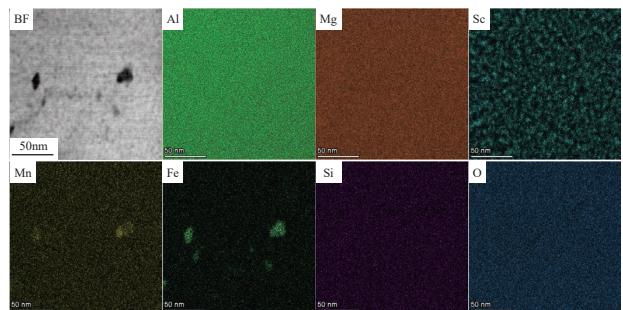


Fig. 12 High magnification EDS mapping

3-2. Mechanical characteristic

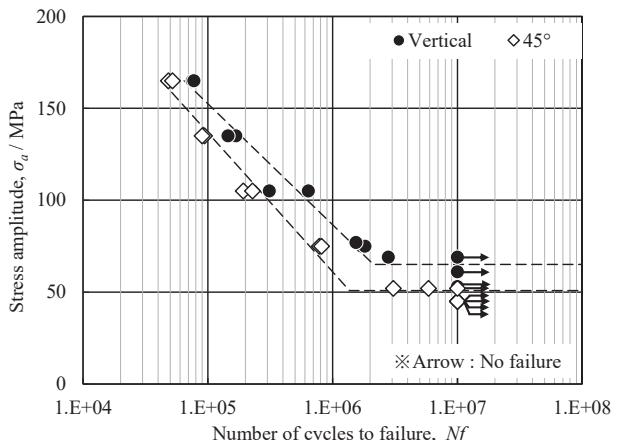
Table 2 represents the hardness and the mechanical properties at ambient temperature and 150°C obtained in this study. The Al-Mg-Sc alloy fabricated through the L-PBF process exhibited mechanical properties superior to wrought A2024-T6 alloy^[21], a typical high-strength Al alloy. Referring to the microstructural features observed in the previous section, this can be attributed to extremely refined grains, precipitation strengthening mainly of Al₃Sc and solid solution strengthening of Mg. In this work, the printing parameters were determined by evaluating density as an indicator through the preliminary experiment. However, further study is required to elucidate the relationship between mechanical properties, microstructure and printing parameters since they are expected to affect each other.

Table 2 Hardness and tensile characteristic

Test temperature: Ambient				
	Hardness (HV5)	UTS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)
Al-Mg-Sc alloy fabricated by L-PBF	Ave.	171.0	526.4	498.5 15.4
	Max.	175	530	504 16.8
	Min.	169	524	488 13.6
Wrought A2024-T6 alloy	—	—	475	395 10

Test temperature: 150°C				
	Hardness (HV5)	UTS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)
Al-Mg-Sc alloy fabricated by L-PBF	Ave.	—	344.1	262.6 40.9
	Max.	—	349	273 48
	Min.	—	340	249 37
Wrought A2024-T6 alloy	—	—	310	250 17

The fatigue properties at 150°C are shown in Figure 13. As mentioned earlier, the specimens with the different building orientations to the building platform, vertical or 45°, were evaluated. The fatigue strength of the specimen with 45° orientation was 51MPa and that with vertical orientation was 65MPa. Before the fatigue test, it was expected that the orientation vertical to the building platform would be weaker than 45° orientation because the stress could act to split off the intrinsic laminated structure derived from the layer-by-layer process in case of the vertically orientated specimen. However, the results obtained were the opposite of the expectation. That may be explained by the effect of surface roughness. It is well known, in the L-PBF process, a downfacing surface tends to exhibit a rougher surface compared to a surface vertical to a building platform due to adhesion of un-melted powders and the staircase effect. The previous studies have proven that rougher surface can deteriorate the fatigue properties of additively manufactured AlSi10Mg alloys^[22]. As a result of surface roughness measurement, the mean roughness Ra of the vertical specimen is 7.8μm whereas that of the downfacing surface in the specimen with 45° orientation is 27.5μm. This difference would have a considerable influence on the fatigue property. Hence, in this study, the fatigue property deterioration can be attributed to the difference in the surface roughness of the material.


Fig. 13 Fatigue strength

3-3. Lightweight design

As the first step in the design process, requirements for the durability and the structure of the component were defined. One of the functional targets was set to be leak-tight and durable at 1.5MPa and 150°C because, as mentioned above, this tank is expected to receive the high-pressure air from a PVS system and be exposed to high temperature up to 150°C. The internal capacity was aimed to be 200cc for the sufficiently continuous use. Structures to be connected to or assembled with peripheral parts such as a mounting arm and a port were also determined. All the requirements for the oil catch tank are listed in Table 3. Subsequently, the design strategy was discussed considering the high design flexibility of the L-PBF process. As a result, it was decided to adopt a monolithic structure without any fastenings and welds whereas conventional tanks consist of multiple components as exemplified in Figure 1. A monolithic structure is expected to lead to a drastic weight reduction because of not only the absence of fasteners but the omission of screw hole or welding also allows for a thinner wall design. Based on the requirements and the design strategy, a conceptual structure was established as described in Figure 14. The design has the monolithic hollow structure with the walls of 0.5mm thick which is obviously difficult, or even impossible to fabricate through classical processes. In turn, a Mises stress distribution on the conceptual design was investigated by the FEM analysis under the conditions listed in Table 4. The result in Figure 15 displays that the stresses over the

minimum yield strength at 150°C obtained in this study, 249MPa, are induced extensively, which indicates that a deformation of the tank potentially takes place during usage. Moreover, this geometry has an issue from viewpoint of the printing process. There are small radii on the corners of the vessel part and the bases of the mounting arms and the ports. The L-PBF process brings a complex thermal history to the material because of the dynamic and high energy input. Thus, some thermal stresses and residual stresses during printing will always occur in any cases and can be amplified by the small radius, leading to a part failure or deformation.

Table 3 Design requirements

Durability	Pressure resistance	Internal pressure of 1.5MPa at 150°C
	Vibration resistance	40G at 150°C
Structure	Inner capacity	200cc
	Quantity of port	5
	Quantity of mounting arm	3

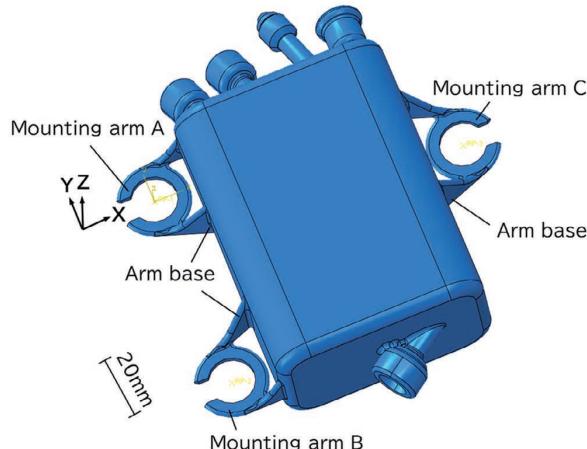


Fig. 14 Conceptual design

Table 4 FEM analysis conditions

Material characteristic	Young's modulus	64.4GPa
	Poisson's ratio	0.33
Boundary condition	Mounting arm A	Completely fixed
	Mounting arm B	Fixed along Y and Z axis
	Mounting arm C	Fixed along X and Z axis
Load	Internal pressure	1.5MPa
	Vibrational acceleration	40G along Z axis

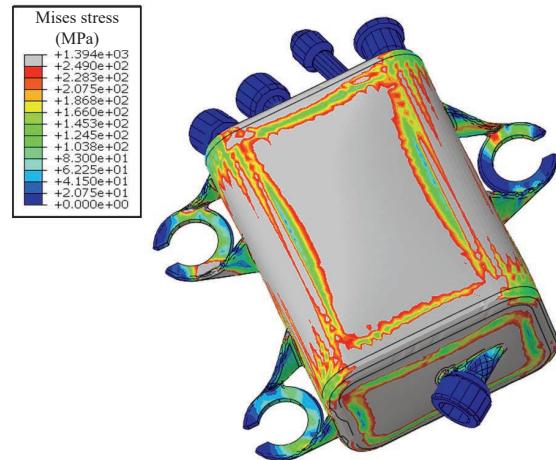


Fig. 15 Mises stress distribution on conceptual design

Hence, the design was modified so that the stresses associated with both the actual usage and the printing process can be lower. As a consequence, the updated design for the tank has become a more rounded outline as described in Figure 16. The rounded shape relieves the high stress at the edges and the sharp corners. It should be noted that the wall thicknesses have been tailored varying from location to location according to the induced stress distribution. Owing to the design flexibility of the L-PBF process, there is no need to make the walls thicker uniformly, instead, appropriate amount of material is supplemented as needed in the area where it is required. The shapes of the ports have been also changed for ease of assembly. The FEM analysis was again carried out and has revealed all the induced stresses are lower than the material yield strength as described in Figure 17. Interestingly, the stresses induced around the mounting arms have also decreased remarkably even though the geometries around them have hardly changed. The following mechanism is considered to reduce the stresses around the mounting arms. Before the design modification, the induced internal pressure causes a large deformation on the vessel part together with the displacement of all the mounting arm bases. Based on the analysis conditions shown in Table 4, despite the displacement of the bases, the mounting arms are not allowed to move freely. This can generate large stresses especially for completely fixed mounting arm A. Thus, reinforcing the vessel part can reduce displacement of the bases, which can consequently decrease the stresses around the mounting arms as well.

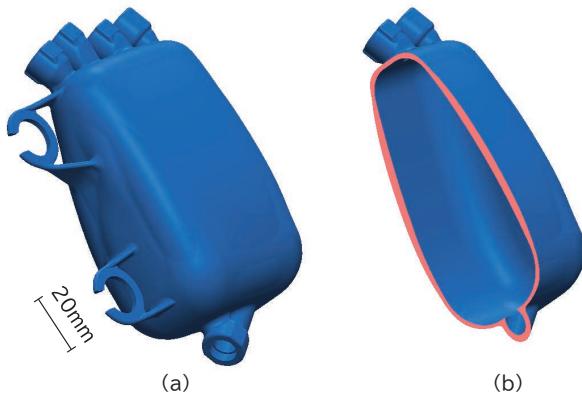


Fig. 16 (a) Appearance and (b) cross-sectional view of redesigned tank

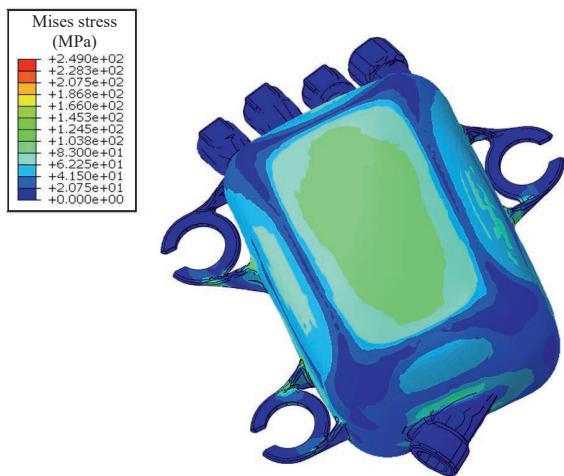


Fig. 17 Mises stress distribution on redesigned tank

The modified Goodman diagram is utilized to validate the reliability from the perspective of fatigue behavior. The minimum tensile strength at 150°C (340MPa), the minimum yield strength at 150°C (249MPa) and the fatigue strength of the 45°-orientated specimen (51MPa) are used to draw the diagram. Relatively high mean principal stresses σ_m and stress amplitudes σ_a on several locations are detected by the FEM analysis as shown in Figure 18. These values are then plotted in the modified Goodman diagram as shown in Figure 19. This diagram shows all the plotted points are below the line given by the modified Goodman relation, which suggests this tank could withstand the prescribed fatigue stress. To evaluate the contribution of the redesign to the weight reduction, the weight of the redesigned tank has been compared to that of a conventionally manufactured tank comprising multiple components. The conventional tanks have an

estimated weight of 295g. On the other hand, the weight of the redesigned tank in this work is calculated to be 110g, which is 63% lighter than a conventionally designed one.

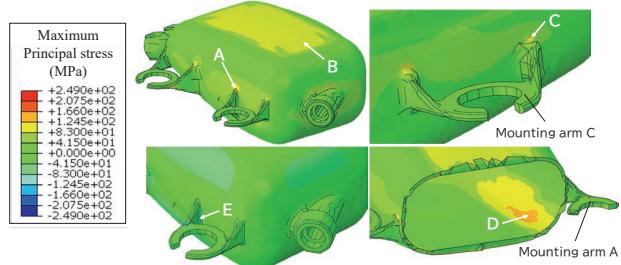


Fig. 18 Principal stress distribution on redesigned tank

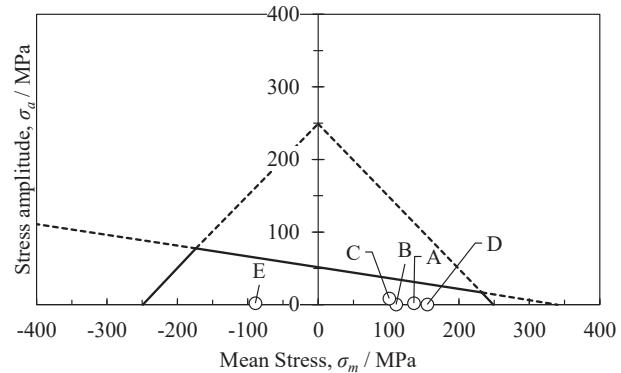


Fig. 19 Modified Goodman diagram with plots of analyzed stress

3-4. Experimental validation of newly designed tank

A fabrication of the redesigned tank was conducted with the same printing parameters as when the test specimens were produced. In fact, the rounded outline in the redesigned tank has a negative effect on the support structure design. The challenge is that, inside the rounded vessel part, there are always downward facing surfaces almost parallel to the building platform regardless of the part orientation. As it is well known, the L-PBF process basically needs support structures underneath the downfacing surfaces having an angle smaller than a critical angle to prevent the surfaces from warping or collapsing during building. However, internal support structures must be avoided since it cannot be removed afterward. Therefore, the printing parameters for the internal surfaces with the angle lower than 45° were slightly modified in order to build with no support

structures. Specifically, they were printed under a lower energy density condition. As a result, the redesigned tank was successfully fabricated as shown in Figure 20. X-ray computed tomography (X-ray CT) was carried out using FF35 CT with the voltage of 150kV and the current of 70 μ A, which can provide images with 70 μ m voxel size. The result shows no visible defects as shown in Figure 21. A piece taken from the vessel part of the fabricated tank was used for a Vickers hardness test and a chemical composition analysis with inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) and spectrophotometry. The averaged hardness was 172.0 HV5, which almost corresponds to that of the test coupon. On the other hand, the composition of the fabricated tank differs from that of powder, particularly for Mg as shown in Table 5. This can be attributed to the high energy input to the powder bed during the laser irradiation. According to the previous studies^{[23][24]}, the FEM analyses have indicated that the melt pool temperature of Al alloys momentarily reaches up to around 2,000°C. Such an extremely high temperature could encourage evaporation of volatile elements including Mg. Kimura et al. also reported Mg depletion in Al-Si-Mg alloy fabricated by the L-PBF process^[25]. Although it is difficult to quantitatively evaluate the influence of the decrease in Mg on the mechanical properties, this phenomenon should be taken into careful consideration because Mg, as a solid solution strengthening and precipitation strengthening element, is a key element to enhance the mechanical properties of Al alloys.



Fig. 20 Appearance of fabricated tank

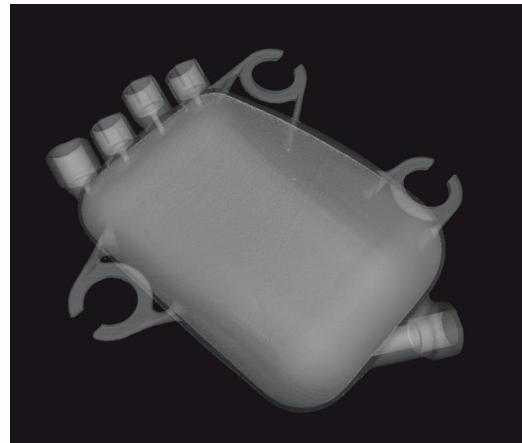


Fig. 21 Transparent image by X-ray CT

Table 5 Chemical composition variation before and after fabrication

	mass%						
	Mg	Sc	Zr	Mn	Si	Fe	Al
Powder	4.90	0.78	0.29	0.41	0.06	0.17	Bal.
Fabricated tank	3.79	0.80	0.27	0.40	0.02	0.16	Bal.
Variation	-1.11	0.02	-0.02	-0.01	-0.04	-0.01	—

The pressure resistance of the redesigned 3D-printed tank was investigated by the method sketched in Figure 22. The tank was filled with perfluoropolyether fluorinated fluid as the pressure medium and placed in a furnace heated to 150°C. 4 of the 5 ports were plugged for sealing and the another was connected to a pressure source through an intensifier. The pressure was increased statically from ambient to 1.5MPa and then held for 4 hours. As a result, the test was completed with no mechanical failure of the tank. After that, the geometry change due to the pressure resistance test was evaluated by an optical CMM (Coordinate Measuring Machine) -scanner, MetraSCAN750 Elite as shown in Figure 23. Only very slight deformation less than 0.15mm was observed, indicating the tank is sufficiently resistant to the prescribed pressure and temperature.

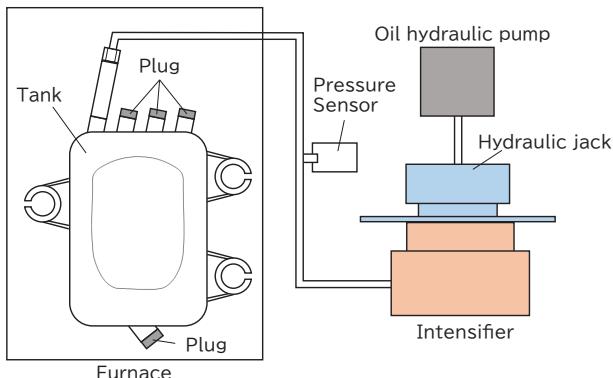


Fig. 22 Schematic diagram of pressure resistance test

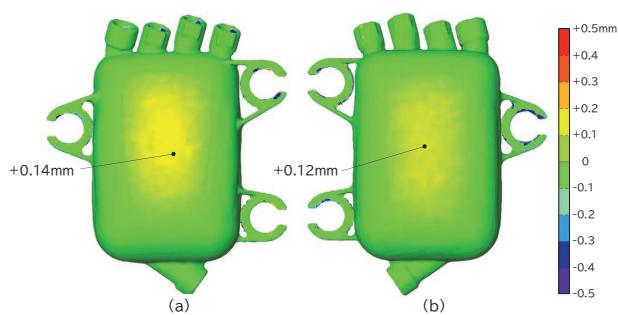


Fig. 23 Deformation of front and back side after pressure resistance test

4

CONCLUSIONS

This work attempted to develop the lightweight oil catch tank for the PVS using the Al-Mg-Sc alloy and the L-PBF technique, and which has led following conclusions.

- (1) The Al-Mg-Sc alloy fabricated by the L-PBF process exhibited the tensile characteristics superior to the wrought high-strength Al alloy, which can be attributed to the distinct metallurgical features such as extremely refined grains, uniformly dispersed fine precipitates.
- (2) The printing parameters were optimized to produce the highly dense part with no evident defects.
- (3) The lightweight design has been created considering the design flexibility of the L-PBF process and the material strength. The design has the monolithic hollow structure with varying the wall thickness from location to location, which cannot be produced by conventional processes.

(4) By further parameter adjustment based on the optimal conditions, the lightweight tank was successfully produced with no internal support structures despite the downward facing surfaces almost parallel to the building platform.

(5) The fabricated tank was demonstrated to have the prescribed pressure resistance.

REFERENCES

- [1] Gregory, Guinther, and Scott, Smith., "Formation of Intake Valve Deposits in Gasoline Direct Injection Engines," SAE Int. J. Fuels Lubr. 9(3), 2016, doi:10.4271/2016-01-2252.
- [2] Shinya, Sano., Takahisa, Yashiro., Keiji, Takizawa., and Tatsuhiko, Mizutani., "Development of New Motor for Compact-Class Hybrid Vehicles," EVS International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Symposium – Abstract, 2016
- [3] Dirk, Herzog., Vanessa, Seyda., Eric, Wycisk., and Claus, Emmelmann., "Additive manufacturing of metals," Acta Materialia 117, 371-392, 2016 doi:10.1016/j.actamat.2016.07.019.
- [4] William, E. Frazier., "Metal Additive Manufacturing: A Review," Journal of Materials Engineering and Performance 23(6), 1917-1928, 2014, doi:10.1007/s11665-014-0958-z.
- [5] Ming, Tang., P. Chris, Pistorius., Sneha, Narra., and Jack, L. Beuth., "Rapid Solidification: Selective Laser Melting of AlSi10Mg," JOM Vol. 68, No. 3, 960-996, 2016, doi:10.1007/s11837-015-1763-3.
- [6] Mitsuru, Adachi. and Shuuzi, Koiwai., "Present State of Metal Additive Manufacturing Promoting Revolution of Manufacturing and Issues for Practical Application," J. JFS Vol. 91, No. 9, 603-611, 2019, doi:10.11279/jfes.91.603.
- [7] Wengang, Zhai., Wei, Zhou., Zhiguang, Zhu. and Sharon Mui Ling, Nai., "Selective Laser Melting of 304L and 316L Stainless Steels: A Comparative Study of Microstructures and Mechanical Properties," steel research int., 93, 2100664, 2022, doi:10.1002/srin.202100664.
- [8] Nesma, T. Aboulkhair., Ian, Maskery., Chris, Tuck., Ian, Ashcroft. et al., "The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment," Materials

- Science & Engineering A667, 139-146, 2016, doi:10.1016/j.msea.2016.04.092.
- [9] Shunyu, Liu. and Yung C., Shin., "Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review," Materials and Design 164, 107552, 2019, doi:10.1016/j.matdes.2018.107552.
- [10] Carla, Gonçalves Machado., Mélanie, Despeisse., Mats, Winroth. and Elias, Hans Dener Ribeiro da Silva., "Additive manufacturing from the sustainability perspective: proposal for a self-assessment tool," Procedia CIRP 81, 482-487, 2019, doi:10.1016/j.procir.2019.03.123.
- [11] Lore, Thijs., Frederik, Verhaeghe., Tom, Craeght., Jan, Van Humbeeck. et al. "A study of the microstructural evolution during selective laser melting," Acta Materialia 58, 3303-3312, 2010, doi:10.1016/j.actamat.2010.02.004.
- [12] A.F, Norman., P.B, Prangnell. and R.S, McEwen., "The solidification behaviour of dilute aluminium-scandium alloys," Acta mater. Vol. 46, No. 16, 5715-5732, 1998.
- [13] V.G, Davydov., T.D, Rostova., V.V, Zakharov., Yu.A, Filatov. et al., "Scientific principles of making an alloying addition of scandium to aluminium alloys," Material Science and Engineering A280, 30-36, 2000.
- [14] Shingo, Iwamura. and Yasuhiro, Miura., "STEM-EDS analysis of the composite Al₃(Sc,Zr) precipitates in an Al-Sc-Zr alloy" Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 56, No. 2, 100-104, 2006.
- [15] A.B, Spierings., K, Dawson., T, Heeling., P.J, Uggowitzer. et al., "Microstructural features of Sc- and Zr-modified Al-Mg alloys processed by selective laser melting," Materials and Design 115, 52-63, 2017, doi:10.1016/j.matdes.2016.11.040.
- [16] A.B, Spierings., K, Dawson., P.J, Uggowitzer. and K, Wegener., "Influence of SLM scan-speed on microstructure, precipitation of Al₃Sc particles and mechanical properties in Sc- and Zr-modified Al-Mg alloys," Material and Design 140, 134-143, 2018, doi:10.1016/j.matdes.2017.11.053.
- [17] Takahiro, Kimura., Takayuki, Nakamoto., Tomoatsu, Ozaki., Kazuki, Sugita. et al., "Microstructures and aging characteristics of Al-Mg-Sc alloy fabricated by selective laser melting," Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 70, No. 10, 467-474, 2020, doi:10.2464/jilm.70.567.
- [18] Yunjia, Shi., Kun, Yang., Shravan, K. Kairy., Frank, Palm. et al., "Effect of platform temperature on the porosity, microstructure and mechanical properties of an Al-Mg-Sc-Zr alloy fabricated by selective laser melting," Material Science & Engineering A 732, 41-52, 2018, doi:10.1016/j.msea.2018.06.049.
- [19] Eric, A. Jägle., Zhendong, Sheng., Liang, Wu., Lin, Lu. et al., "Precipitation Reaction in Age-Hardenable Alloys During Laser Additive Manufacturing," JOM, Vol. 68, No. 3, 943-949, 2016, doi:10.1007/s11837-015-1764-2.
- [20] S, Kumar. and K.A.Q, O'Reilly., "Influence of Al grain structure on Fe bearing intermetallics during DC casting of an Al-Mg-Si alloy," Materials Characterization 120, 311-322, 2016, doi:10.1016/j.matchar.2016.09.017.
- [21] The Aluminum Association., "Aluminum standards and data (2003)."
- [22] Nesma, T. Aboulkhair., Ian, Maskery., Chris, Tuck., Ian, Ashcroft. et al., "Improving the fatigue behavior of a selectively laser aluminium alloy: Influence of heat treatment and surface quality," Materials and Design 104, 174-182, 2016, doi:10.1016/j.matdes.2016.05.041.
- [23] Shiwen, Liu., Junjie, Zhu., Haihong, Zhu., Jie, Yui. et al., "Effect of the track length and track number on the evolution of the molten pool characteristics of SLMed Al alloy: Numerical and experimental study," Optics and Laser Technology 123, 105924, 2020, doi:10.1016/j.optlastec.2019.105924.
- [24] Zhonghua, Li., Bao-Qiang, Li., Peikang, Bai., Bin, Liu. et al., "Research on the Thermal Behaviour of a Selectively Laser Melted Aluminium Alloy: Simulation and Experiment," Materials 11, 1172, 2018, doi:10.3390/ma11071172.
- [25] Takahiro, Kimura., Takayuki, Nakamoto., Tomoatsu, Ozaki., Kazuki, Sugita. et al., "Microstructural formation and characterization mechanism of selective laser melted Al-Si-Mg alloys with increasing magnesium content," Materials Science & Engineering A 754, 786-798, 2019, doi:10.1016/j.msea.2019.02.015.

■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



岩崎 進也
Shinya Iwasaki
生産技術本部
材料技術部



三井 理功
Riku Mitsui
PF 車両開発統括部
SV 開発部

長尾 隆史
Takashi Nagao
日本軽金属株式会社
グループ技術センター

田代 繼治
Tsuguharu Tashiro
日本軽金属株式会社
グループ技術センター

市村 誠
Makoto Ichimura
株式会社松浦機械製作所
技術本部

加納 佳明
Yoshiaki Kano
株式会社松浦機械製作所
技術本部

楠井 潤
Jun Kusui
東洋アルミニウム株式会社
顧問

Chemical Kinetic Analysis with Two-Zone Model on Spark Knock Suppression Effects with Hydrogen Addition at Low and High Engine Speeds

Jun Goto Yoshimitsu Kobashi Yoshito Ueno Gen Shibata
Hideyuki Ogawa Minoru Yamamoto

当論文は、JSAE 20229089/SAE 2022-32-0089として、SETC2022 (Small Powertrains and Energy Systems Technology Conference)にて発表され、High Quality Presentation Award for Technical Paperを得たものです。

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

本研究では、異なる機関回転速度(低速ノックが生ずる2000rpm および高速ノックが生ずる4800rpm)における水素添加時の火花ノック抑制効果について検討を行った。実機実験の結果、水素添加は低速ノックに対しては強い抑制効果が得られる一方で、高速ノックに対しては効果が低下することが明らかとなった。その要因について二領域モデルによる化学動力学解析を行った結果、機関回転速度が2000rpm では未燃領域内において顕著な低温酸化反応が出現する二段の熱発生率となるのに対し、4800rpm では未燃混合気の低温滞留時間短縮に起因して低温酸化反応が出現しない一段の熱発生率となることがわかった。水素添加による火花ノック抑制メカニズムは主に水素の OH 消費にともなう低温酸化反応の抑制であり、低温酸化反応に強く依存した着火形態となる低速ノックに対しては強い抑制効果が得られる一方、これに強く依存しない着火形態となる高速ノックに対しては効果が低下することが明らかとなった。

Abstract

Spark knock suppression with hydrogen addition was investigated at two engine speeds (2000 rpm and 4800 rpm). The experimental results showed that the spark knock is strongly suppressed with increasing hydrogen fraction at 2000 rpm while the effect is much smaller at 4800 rpm. To explain these results, chemical kinetic analyses with a two-zone combustion model were performed. The calculated results showed that the heat release in the end gas zone rises in two stages with a remarkable appearance of low temperature oxidation (LTO) at 2000 rpm, while a single stage heat release without apparent LTO process is presented at 4800 rpm due to the shorter residence time in the low temperature region. The mechanism of the spark knock suppression with hydrogen addition can be explained by inhibition of the LTO reactions and H₂O₂ loop reactions by the OH radical consuming reaction with hydrogen, leading to a reduction in the heat release from hydrocarbon fuel at the initial stage of the ignition process. However, the OH radical is simultaneously produced from H radical with hydrogen addition at the later stage of the ignition process. The reduction in the heat release with hydrogen addition can only be obtained at the initial stage of the ignition process, and the differences in spark knock suppression with hydrogen addition under low and high engine speeds are due to absence or appearance of LTO at the initial stage of the ignition process.

1

INTRODUCTION

In spark ignition engines, a large exhaust loss is one of the primary issues preventing improvements in thermal efficiency. The exhaust loss is dependent on the specific

heat ratio of the in-cylinder gas, the compression ratio, the combustion phase and the combustion period as detailed in Figure 1. Among these factors, the compression ratio and the combustion phase are particularly limited by spark knock.

Spark knock is known as abnormal combustion induced by the self-ignition in the end gas mixture^{[1]-[7]}. Spark knock generally occurs at low engine speeds and tends to be suppressed with increasing engine speed due to the shortened high temperature residence time of the end gas mixture. However, further increase in the engine speed may also cause the spark knock phenomena called "high-speed knock" distinguishing it from "low-speed knock"^[8].

As a way to avoid the spark knock, the utilization of hydrogen as an additive fuel has attracted attention. Hydrogen is known as an alternative fuel produced from renewable energy, and also can be produced on-board via fuel reforming. The reformed exhaust gas recirculation (REGR)^{[9]-[12]} can reform hydrocarbon fuels into hydrogen, carbon monoxide, and methane with a reformer catalyst equipped in the path of the exhaust gas recirculation (EGR). The REGR has the potential to suppress the spark knock with the chemical effects of hydrogen as well as with EGR^{[13]-[19]}. Additionally, as the reforming reactions are endothermic, the exhaust heat can be regenerated to the energy input^[10]. The spark knock suppression with hydrogen addition has been widely investigated in the previous studies^{[20]-[30]}. Naruke et al. showed that the hydrogen addition extended the knock limit at the engine speed of 2000 rpm under lean conditions^[26]. Topinka et al. demonstrated that the required octane number of the primary reference fuel (PRF) to avoid spark knock can be decreased with increasing the hydrogen concentration at 1500 rpm under lean conditions^[27]. Ashida et al. demonstrated that the spark knock resistance improves with reformate hydrogen at an engine speed of 1200 rpm under stoichiometric conditions^[28]. Gerty and Heywood investigated the effect of simulated fuel reformate (a mixture of hydrogen, carbon monoxide, and nitrogen) on the spark timing at the knock limit for a variety of fuels at 1500 rpm under lean conditions and showed that the required combustion retardation to avoid knock can be decreased with reformate addition for PRFs and TRFs^[29]. Shinagawa et al. investigated the effect of hydrogen addition at 1600 rpm under rich conditions and elucidated that the spark knock suppression with hydrogen addition is obtained with the inhibition of fuel

decomposition and hydroxyl radical production^[30].

As described above, there are many reports of the influence of hydrogen addition on knocking characteristics at various conditions. However, most of the investigations were focused on the low-speed knock and the effects on the high-speed knock have not been clarified.

The previous studies have suggested that the phenomenon of the high-speed knock is different from that of the low-speed knock. Spicher et al. showed that the knock intensity at high engine speeds has higher sensitivity to spark ignition advance than at low engine speeds^[31]. Iijima et al. visualized the combustion with spark knock over a wide range of engine speeds and revealed that the combustion proceeds at supersonic speed in the high-speed region, proposing that the phenomenon corresponds to a "developing detonation" extending to the strong knock events^[32]. Goto et al. suggested that the spark knock at high engine speeds has a smaller dependence of the low temperature oxidation (LTO) on the ignition process as the end gas mixture has the shorter residence time in the low temperature region^[33]. However, the detailed mechanism of the difference between low and high-speed knock is still not clearly explained. The ordinary way to avoid the high-speed knock was the fuel enrichment, but due to the upcoming enhanced emission regulations including Real Driving Emissions (RDE)^[34], the fuel enrichment will not be acceptable in the future. Consequently, understanding the phenomenon and establishing new solutions for avoiding high-speed knock will be essential.

The objective of this study is to clarify the effect of hydrogen addition on the high-speed knock as well as on the low-speed knock and to obtain new insight into the difference between low and high-speed knock. The experiments were conducted at the two engine speeds of 2000 rpm and 4800 rpm and the crank angle at the spark knock onset changing with the quantity of hydrogen were assessed. Further, the chemical kinetic analyses with the two-zone model were performed to elucidate the influence of hydrogen addition on the

ignition process of the low and high-speed knock. Note that the motivation of this research is to improve the thermal efficiency with applying REGR. However, to understand the basic effects of hydrogen addition and to distinguish the effects of other reformed gas compositions, hydrogen was directly introduced to the intake pipe without REGR application in the present study.

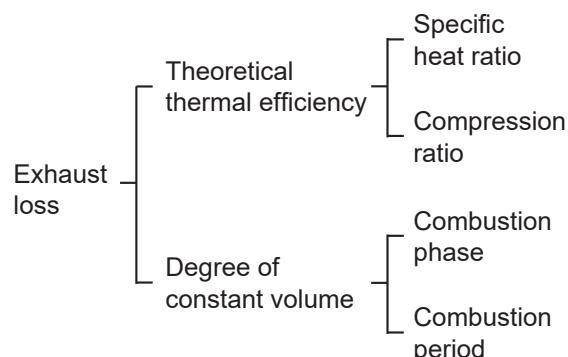


Fig. 1 Parameters related to the exhaust loss

5018A) and was recorded with a crank angle detector (ONO SOKKI, CP-5110A and CA-500A).

2-2. Experimental Conditions

The experimental conditions are detailed in Table 2. The engine operating conditions were set to the nIMEP of 900 kPa, intake temperature of 318 K, and λ of unity (1.0). The primary reference fuel with an octane number of 90, PRF90, a blend of iso-octane and n-heptane at 90:10 by volume, was used as the main fuel. The hydrogen addition fraction in the total lower heating value (LHV) was varied from 0 HV% to 15 HV%.

The onset of spark knock was determined by setting a specified limit to the band-pass filtered in-cylinder pressure profiles of 500 cycles over the frequency range of 9 to 18 kHz. The 50% mass burned crank angle, CA50, at the most advanced spark ignition timing without the occurrence of spark knock was defined as the knock limit.

2 EXPERIMENTAL SETUP

2-1. Engine Specifications and Experimental Procedures

The engine specifications are detailed in Table 1 and a schematic of the experimental system is shown in Figure 2. The experiments were conducted on a single cylinder, four-stroke, water cooled, naturally aspirated spark ignition engine. The main fuel was injected into the intake port and hydrogen was introduced into the intake pipe upstream of the throttle valve. The quantity of hydrogen was controlled with a mass flow controller (ALICAT, MCR-100SLPM-D), and the overall excess air ratio, λ , was maintained by adjusting the injection quantity of the main fuel based on the output of a universal exhaust gas oxygen (UEGO) air-fuel ratio sensor (Tsukasa Sokken, PLR-5) equipped in the exhaust pipe. The intake temperature was controlled with a heater in the intake pipe and the net indicated mean effective pressure, nIMEP, was maintained with a throttle valve. The in-cylinder pressure was measured with a piezoelectric pressure sensor (Kistler, 6053CC). The signal was amplified with a charge amplifier (Kistler,

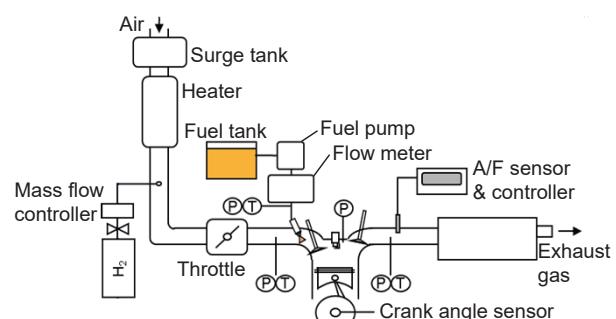


Fig. 2 Experimental arrangement

Table 1 Engine specifications

Number of cylinders [-]	1
Bore [mm] × Stroke [mm]	96 × 96
Displacement volume [cm ³]	695
Compression ratio	12.5:1
Fuel injection system	Port injection

Table 2 Experimental conditions

Engine speed [rpm]	2000, 4800
Net IMEP [kPa]	900
Intake air temperature [K]	318
EGR rate [%]	0
Main fuel	PRF90
H ₂ additive fraction [HV%]	0 - 15
λ [-]	1

The engine speeds at the conditions of low and high-speed knock were determined with preliminary experiments. Figure 3 shows the relationship between the engine speeds and the CA50 at the knock limit. The tested gasoline here was a 50:50 blend of commercially available premium gasoline (research octane number, RON 100) and regular gasoline (RON 90). Increasing the engine speed from 2000 rpm, the spark knock tends to be suppressed and the CA50 at the knock limit temporarily advances below 3600 rpm. However, the further increase in the engine speed from 3600 rpm to 4800 rpm causes the spark knock to show up again and results in the retardation of the CA50 at the knock limit. From this result, the engine speeds were determined at 2000 rpm as the low-speed knock and at 4800 rpm as the high-speed knock.

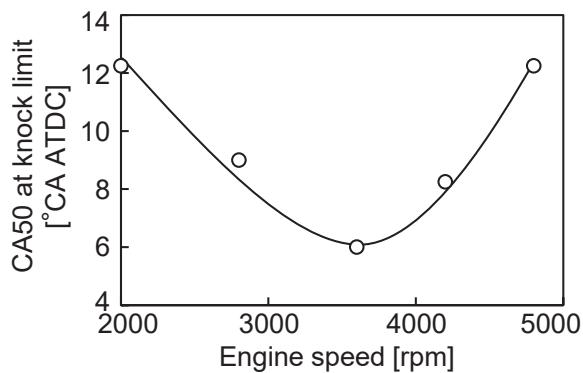


Fig. 3 Relationship between the engine speed and the CA50 at the knock limit

3 EXPERIMENTAL RESULTS

Figure 4 shows the effect of hydrogen addition on CA50 at the knock limit under the engine speeds of 2000 rpm and 4800 rpm. Increasing the hydrogen addition fraction, the CA50 at knock limit advances at both engine speeds. However, the advance of the knock limit is more significant at 2000 rpm than at 4800 rpm. This indicates that hydrogen addition strongly suppresses the low-speed knock, but the effect becomes smaller on the high-speed knock.

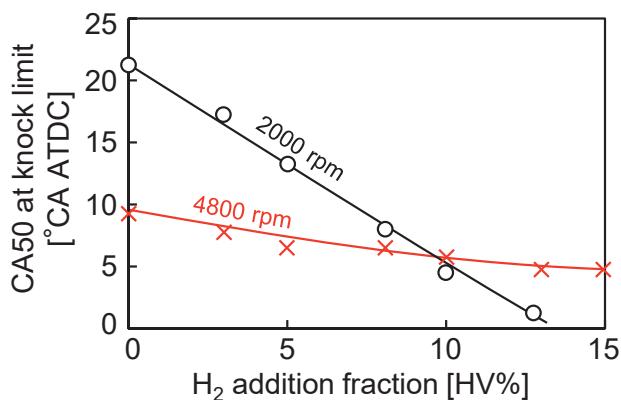


Fig. 4 Effect of hydrogen addition on the CA50 at the knock limit under engine speeds of 2000 rpm and 4800 rpm

A previous study by Goto et al. has investigated the effect of hydrogen addition on the ignition process with the chemical kinetic analyses at the initial temperatures of 700 K as a condition with a remarkable appearance of LTO and 1100 K as a condition skipping the LTO process under constant volume and adiabatic conditions^[33]. The results showed that hydrogen addition inhibits the LTO reactions and increases the ignition delay at low initial temperature, but rather promotes the temperature rise at the high temperature region resulting in no increase in the ignition delay at the condition without the appearance of LTO. This result suggests that the smaller knock suppression effect at higher engine speeds may be due to the smaller dependence of the LTO process on high-speed knock. In the present study, the chemical kinetic analysis with a two-zone combustion model was applied for the further investigation of hydrogen addition effects on low and high-speed knock under actual engine operating conditions including piston compression.

4 CALCULATION METHOD

4-1. Two-zone Combustion Model

In the two-zone combustion model, the combustion chamber is divided into unburned and burned zones as shown in Figure 5. The mass of the mixture moves from the unburned zone to the burned zone in proportion to the heat release rate with the flame propagation. There is a virtual flame surface with no volume between the two zones and the chemical species in the flame surface

moved from the unburned zone instantly reach chemical equilibrium before moving to the burned zone. The chemical reactions depending on the temperature and the pressure proceed in the unburned and burned zones. It is assumed that there is no heat transfer between the two zones and that the pressures in the two zones are equivalent.

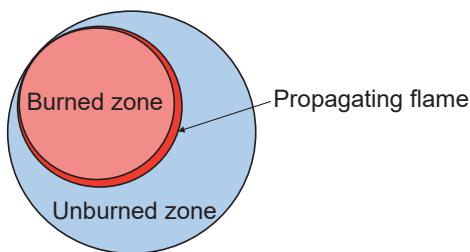


Fig. 5 Schematic of the two-zone combustion model

In this model, MATLAB (Math Works) was used as a platform, and Cantera^[35] was used for the chemical kinetic calculations in the unburned and burned zones as well as for the chemical equilibrium calculations at the flame surface. A reduced reaction mechanism, SIP-Gr2.0 developed by Sakai and Miyoshi^{[36][37]} was applied for the reaction model. The mechanism consists of the sub-mechanisms of a gasoline surrogate fuel (consisting of iso-octane, n-heptane, toluene, methylcyclohexane, and diisobutylene) and the base mechanism with the reactions of chemical species of zero to two carbon atoms, including hydrogen. The governing equations described below are formulated in the form of ordinary differential equations with respect to time, and the simultaneous equations were solved by the ODE solver of MATLAB.

4-1-1. Governing Equations

The governing equations for the unburned and burned zones can be described as follows.

Conservation of energy:

$$dU_u = d \left(m \sum_i^n h_i Y_i - pV \right)_u = \delta Q_{wall,u} - pdV_u - h_u dm_x \quad (1)$$

$$dU_b = d \left(m \sum_i^n h_i Y_i - pV \right)_b = \delta Q_{wall,b} - pdV_b + h_f dm_x \quad (2)$$

Conservation of chemical species:

$$d(m_u Y_{i,u}) = V_u W_{i,u} \dot{\omega}_i - Y_{i,f} dm_x \quad (3)$$

$$d(m_b Y_{i,b}) = V_b W_{i,b} \dot{\omega}_i + Y_{i,f} dm_x \quad (4)$$

Conservation of volume:

$$V = V_u + V_b \quad (5)$$

Equation of state:

$$pdV_u + V_u dp = R_u T_u dm_u + m_u R_u dT_u \quad (6)$$

$$pdV_b + V_b dp = R_b T_b dm_b + m_b R_b dT_b \quad (7)$$

Here, the subscript *u* indicates the unburned zone, *b* the burned zone, and *f* the flame surface. Y_i is the mass fraction of the chemical species *i*, dm_x the mass of the mixture moved from the unburned zone to the burned zone with the combustion, W_i the molecular weight of the chemical species *i*, and $\dot{\omega}_i$ the chemical reaction rate per unit time and unit volume. In equations (6) and (7), the derivative term of the gas constant is not considered, assuming that the change in the gas constant is sufficiently small and can be disregarded.

The first term on the right-hand side of equations (1) and (2) represents the heat transfer obtained from Woschni's equation^[38] as follows:

$$\delta Q_{wall} = h_c A (T - T_{wall}) dt \quad (8)$$

$$h_c = C d^{m-1} p^m w^m T^{0.75-1.62m} \quad (9)$$

$$w = C_1 S_p + C_2 \frac{V_d T_r}{p_r V_r} (p - p_m) \quad (10)$$

Here, h_c is the heat transfer coefficient, T the gas temperature in the combustion chamber, T_{wall} the wall temperature of each part of the combustion chamber, and A the area. In this model, the heat transfers from the piston, the cylinder head, and the cylinder liner have been taken into consideration. The notation w is the representative velocity and corresponds to the average gas velocity in the cylinder. S_p is the average piston speed, and V_d is the displacement volume. T_r , p_r , and V_r are the temperature, pressure, and volume of the working gas at a specific timing, respectively, and the intake valve closing (IVC) timing was applied as the initial condition. The experimental constants C_1 was set at 2.28, and C_2 at zero before the spark ignition and at 3.24×10^{-3} after the spark ignition.

In the present study, the initial conditions described later were obtained by the one-dimensional engine modeling and simulation tool, GT-POWER (Gamma Technologies) and equation (9) was replaced as follows to be equalized with the analysis conditions of GT-POWER.

$$h_c = 3.01426 C_3 d^{-0.2} p^{0.8} w^{0.8} T^{-0.5} \quad (11)$$

A fitting parameter C_3 was set at 1.3, applied from the experimental results of the heat loss over a wide range of engine speeds. The cylinder diameter was used as a representative length d .

4-1-2. Simultaneous Ordinary Differential Equations

The ordinary differential equations of each physical quantity derived from the above governing equations can be described as follows.

Differentiation of pressure:

$$\begin{aligned} dp = & \left(V - \frac{R_b V_b}{c_{p,b}} - \frac{R_u V_u}{c_{p,u}} \right)^{-1} \left[-pdV + \frac{R_b \cdot \delta Q_{wall,b}}{c_{p,b}} + \frac{R_u \cdot \delta Q_{wall,u}}{c_{p,u}} \right. \\ & \left. + \left\{ R_b T_b - R_u T_u + \frac{R_b}{c_{p,b}} \sum_i^n Y_{if} (h_{if} - h_{ib}) \right\} dm_x \right. \\ & \left. - \frac{R_b}{c_{p,b}} V_b \sum h_{ib} W_{ib} \dot{\omega}_b - \frac{R_u}{c_{p,u}} V_u \sum h_{iu} W_{iu} \dot{\omega}_u \right] \end{aligned} \quad (12)$$

Differentiation of temperature:

$$dT_u = \frac{(\delta Q_{wall,u} + V_u dp - V_u \sum h_{iu} W_{iu} \dot{\omega}_u)}{(m_u c_{p,u})} \quad (13)$$

$$dT_b = \left[\delta Q_{wall,b} + V_b dp - V_b \sum h_{ib} W_{ib} \dot{\omega}_b + dm_x \sum Y_{if} (h_{if} - h_{ib}) \right] (m_b c_{p,b})^{-1} \quad (14)$$

Differentiation of volume:

$$dV_u = \frac{RT_u dm_u + m_u RdT_u - Vdp}{p} \quad (15)$$

$$dV_b = dV - dV_u \quad (16)$$

The simultaneous ordinary differential adding the chemical species conservation equations (3) and (4) to the above are solved in this model.

4-1-3. Heat Release Rates

The heat release rate with the flame propagation was

obtained by approximating the composition of two Wiebe functions.

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{d\theta} = & a Q_0 Q_{mult1} \frac{m_1+1}{\theta_{z1}} \left(\frac{\theta}{\theta_{z1}} \right)^{m_1} \exp \left\{ -a \left(\frac{\theta}{\theta_{z1}} \right)^{m_1+1} \right\} \\ & + a Q_0 Q_{mult2} \frac{m_2+1}{\theta_{z2}} \left(\frac{\theta}{\theta_{z2}} \right)^{m_2} \exp \left\{ -a \left(\frac{\theta}{\theta_{z2}} \right)^{m_2+1} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

Here, Q_0 is the total heat release, and θ_z is the combustion period. The notations a and m are constants and were determined from the experimental results under the conditions without hydrogen addition at each engine speed. There is the following relationship between dm_x , the mass transferred from the unburned zone to the burned zone, and $dQ/d\theta$, the heat release rate.

$$\frac{dQ}{d\theta} = LHV \cdot \frac{dm_x}{d\theta} \quad (18)$$

where LHV is the lower heating value.

4-1-4. Validation of the Model

The parameters of the Wiebe function are determined based on the experimental results at the engine speeds of 2000 rpm and 4800 rpm and are detailed in Table 3, and the comparison of heat release rates obtained with the experiments and the approximated Wiebe function at each engine speed are shown in Figure 6. Here, the start of combustion (where the heat release starts) was set at -9°C CA ATDC for 2000 rpm and -19°C CA ATDC for 4800 rpm, and hydrogen was not added at these engine speeds. Although there is a slight difference in the late combustion period, the approximated Wiebe function sufficiently reproduces the experimental results.

Table 3 Parameters of the Wiebe function

Engine speed [rpm]	2000	4800
a		6.9
m_1/m_2	2.2/2.3	2.5/2.0
Q_{mult1}/Q_{mult2}	0.36/0.64	0.85/0.15
θ_{z1}/θ_{z2} (θ_{ztotal})	36.0/33.0 (47.0)	51.0/40.0 (65.0)

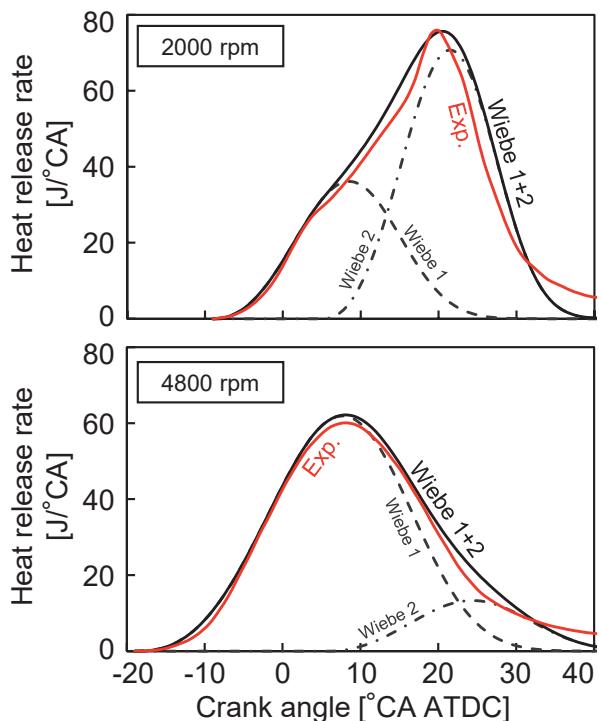


Fig. 6 Plots of the heat release rate obtained by the experiments and the approximated Wiebe function

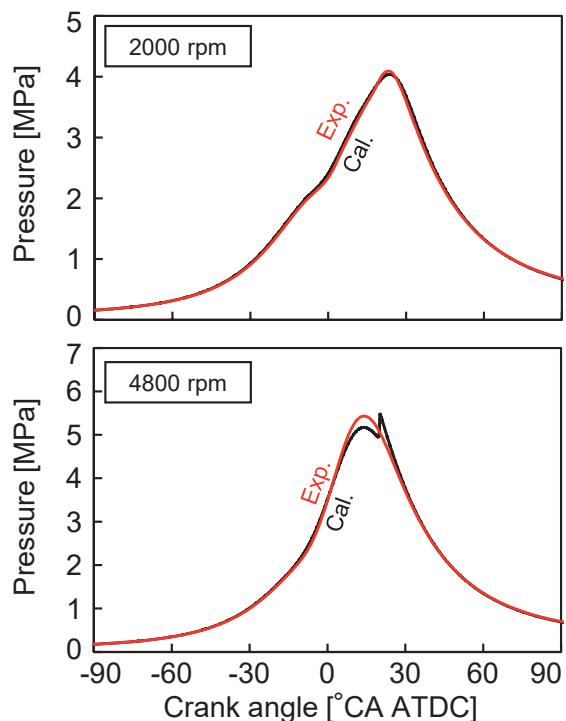


Fig. 7 Plots of the in-cylinder pressure obtained by the experiments and the two-zone combustion model

Figure 7 shows the comparison of in-cylinder pressure obtained by the experiment and the calculation of the two-zone combustion model with the parameters of the Wiebe function shown in Table 3. The calculation results of the two-zone combustion model can well reproduce the experimental results at both engine speeds. Here, the rapid pressure rise in the calculation result at 4800 rpm is caused by the autoignition in the unburned zone. Note that the experimental results are the ensemble average of 500 cycles and there is no pressure oscillation caused by spark knock.

4-2. Calculation Conditions

The calculation conditions are detailed in Table 4. The engine speeds were set at 2000 rpm and 4800 rpm. In addition to PRF90 and real hydrogen, virtual inert-hydrogen with the same thermodynamic properties as the real hydrogen without contributions from any chemical reaction^[39] was applied to distinguish the effects of dilution and chemical reactions of hydrogen addition. The additive fraction of hydrogen or inert-hydrogen was set to 12.8 HV%, and λ to unity with adjustments to the mole fraction of the mixture. As the purpose of this study is to clarify the effect of hydrogen addition on low and high-speed knock from the point of view in chemical kinetics, the same heat release rates, the combustion start timings, and the initial conditions were applied both with and without hydrogen addition at each engine speed to eliminate the effects of differences in the pressure and temperature changes. Note that the difference is sufficiently small for the results not to change whether with or without considering the difference. The values of Table 3 were used for the parameters of the Wiebe functions, and the combustion start timings were determined as the points where the sufficiently large

spark knock occurs under the conditions with hydrogen addition at each engine speed. As the initial conditions, the in-cylinder pressure, the temperature, and the residual gas ratio at the IVC timing were calculated with GT-POWER with the Three Pressure Analysis (TPA) method. The TPA method is a non-predictive analysis to calculate the parameters which are difficult to measure directly such as the above-mentioned initial conditions by applying the measured intake, exhaust, and in-cylinder pressures referenced to the crank angle as the boundary conditions. The initial conditions were calculated after fitting the model with the measured in-cylinder pressure by adjusting the pressure loss and heat transfer parameters at each part of the engine.

Table 4 Calculation conditions

Engine speed [rpm]	2000	4800
Main fuel	PRF90	
Additives	12.8 HV% of H ₂ , inert-H ₂	
λ [-]	1	
Start of combustion [°CA ATDC]	-23	-27

5 CALCULATION RESULTS

5-1. Difference Between Low-speed Knock and High-speed Knock

Figure 8 shows the effects of hydrogen and inert-hydrogen addition on the in-cylinder pressure and the end gas temperature under the engine speeds of (a) 2000 rpm and (b) 4800 rpm calculated with the two-zone combustion model. The spark knock occurs at both engine speeds, and significant pressure and temperature rises can be observed due to the self-ignition in the end gas. With hydrogen addition, the start of spark knock is retarded, and the pressure rise is suppressed due to the reduction of end gas volume at the spark knock timing, showing spark knock suppression effect at both engine speeds. However, the effect at 4800 rpm with the high-speed knock is smaller than at 2000 rpm with the low-speed knock, indicating that the calculation results are qualitatively consistent with the experimental results.

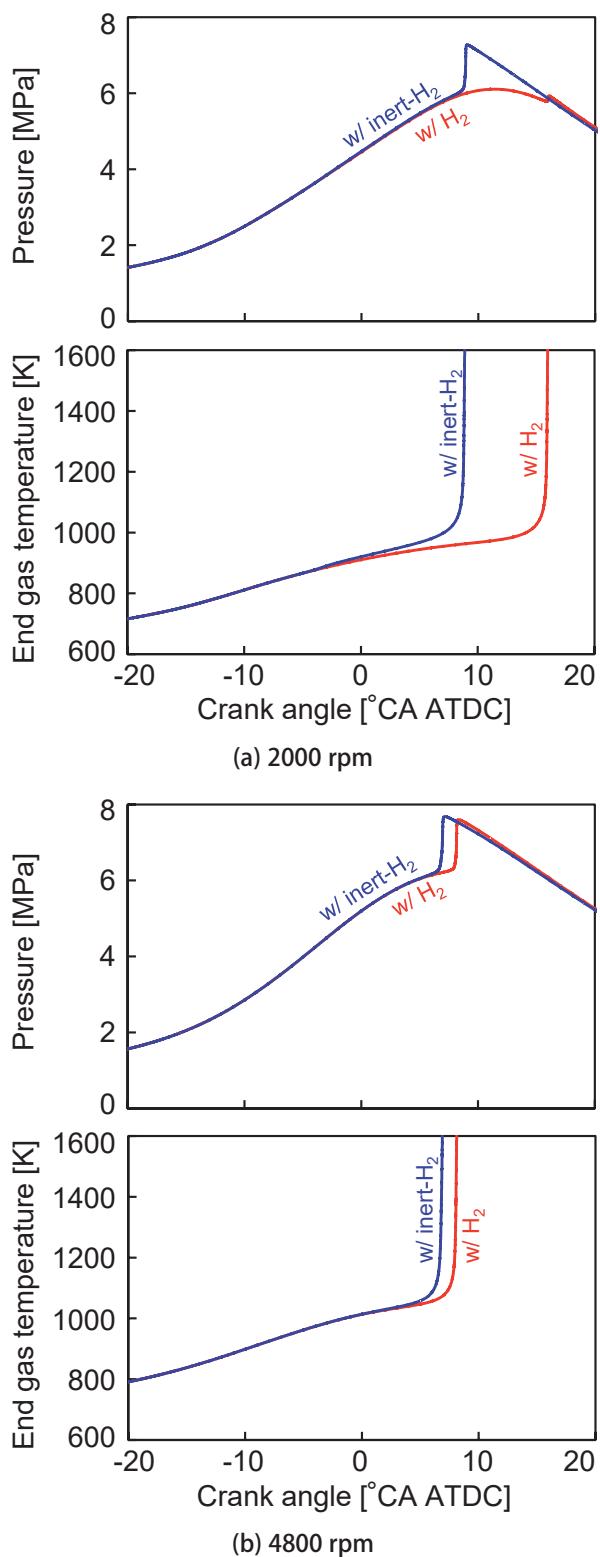


Fig. 8 Effects of hydrogen and inert-hydrogen addition on the in-cylinder pressure and the end gas temperature

Figure 9 shows the effects of hydrogen and inert-hydrogen addition on the heat release rate in the end gas under the engine speeds of (a) 2000 rpm and (b) 4800

rpm calculated with the two-zone combustion model. Under the condition with inert-hydrogen addition at 2000 rpm, a remarkable LTO appears between -5 to 0° CA ATDC, followed by a high temperature oxidation (HTO), and the heat is released in two stages. With hydrogen addition, LTO is suppressed and the appearance of HTO is significantly retarded. However, at 4800 rpm, the heat is released in a single stage without appearance of LTO even under the condition with inert-hydrogen addition, and hydrogen addition only slightly retards the appearance of HTO.

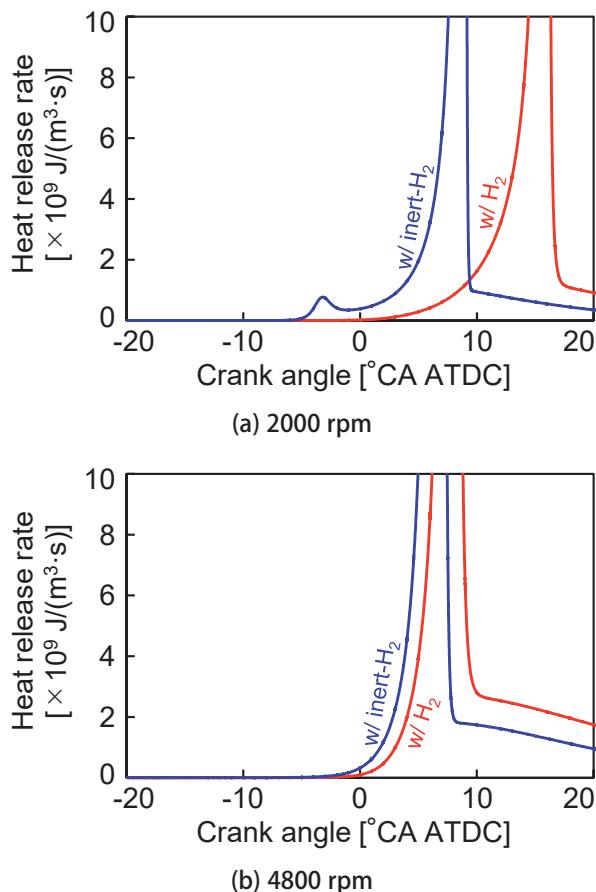


Fig. 9 Effects of hydrogen and inert-hydrogen addition on the heat release rate in the end gas

Figure 10 shows the end gas temperature under the engine speeds of 2000 rpm and 4800 rpm, plotting the time after the IVC in the abscissa. The residence time in the temperature range of 600 to 900 K where LTO appears is longer at the low engine speed than at the high engine speed. This longer residence time at 2000 rpm leads to a larger dependence of LTO on the ignition

process of the low-speed knock than of the high-speed knock at 4800 rpm, explaining the difference of the spark knock suppression effect with hydrogen addition between low and high engine speeds.

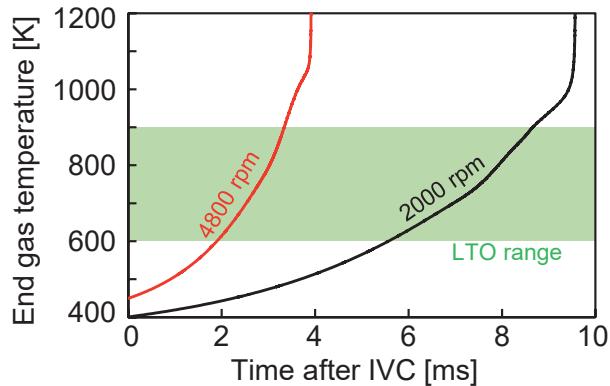
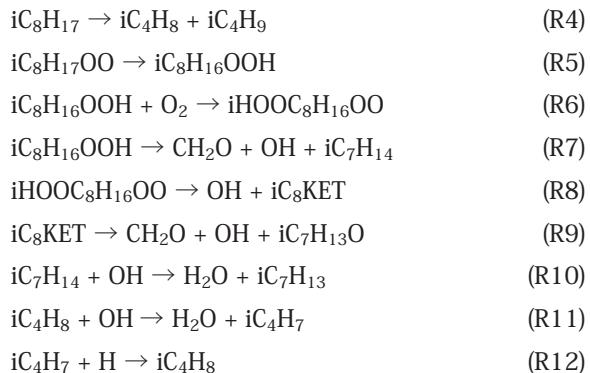


Fig. 10 End gas temperature vs time after IVC (with inert-hydrogen addition)

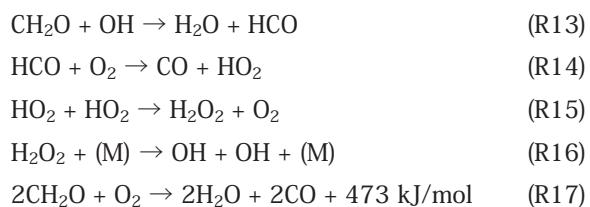
5-2. Effect of Hydrogen Addition on Low-speed Knock

Figure 11 shows the effects of hydrogen and inert-hydrogen addition on the heat release rates of representative elementary reactions in the end gas, and Figure 12 shows the concentrations of OH, iC₈H₁₇, CH₂O, H₂O₂, HO₂, and H with the additions of hydrogen and inert-hydrogen at the engine speed of 2000 rpm, plotting the temperature change with the reaction process in the abscissa. The fuel series is a group of reactions consisting of reactions (R1) to (R12), related to iso-octane, the major component of the main fuel. The oxidation process of iso-octane initiates from producing alkyl radicals by hydrogen abstraction with hydroxyl radicals (OH) (reaction (R1)). Under the low temperature conditions from 600 to 900 K, OH increases via the primary oxygen addition reaction, internal isomerization reaction, and secondary oxygen addition reaction (reactions (R2), (R5), (R6), (R8), and (R9)). The series of these processes is called "RO₂ chemistry"^[40] and activates the reactions in the system. In addition, as the reactions (R1), (R2), and (R8) are exothermic, a heat release occurs as LTO in the above temperature range.





With the progress of the reactions, the main route of OH consumption shifts from reaction (R1) to (R13) due to the decrease in fuel and the increase in formaldehyde (CH_2O). This results in the degeneration of LTO, and the reaction system moves to the thermal ignition preparation period. In this period, the reaction with hydrogen peroxide (H_2O_2) produced from CH_2O via reaction (R13) to (R16) promotes the OH production by the thermal decomposition. The elementary reaction group consisting of reactions (R13) to (R16) is called the “ H_2O_2 loop”^{[41][42]}. The overall reaction of the H_2O_2 loop is exothermic as represented by reaction (R17), and greatly contributes to the heat release until the thermal ignition occurs.



The onset of thermal ignition can be defined as the point where the reaction rate of reaction (R18) exceeds that of reaction (R19)^[43]. Reaction (R18) is a chain branching reaction which activates the reactions in the system increasing the number of radicals. However, the reaction itself is endothermic and does not contribute directly to the temperature rise. On the other hand, reaction (R19) is exothermic and considerably affects the temperature rise during the later stage of the thermal ignition preparation period.



As shown in Figure 11 under the condition with inert-hydrogen addition, LTO appears at 850 to 900 K, followed by the gradually increase in the heat release with the H_2O_2 loop above 900 K. When the temperature reaches above 950 K with further increases, the heat release rate from reaction (R19) increases and the thermal ignition eventually occurs.

With hydrogen addition below 1000 K, the OH concentration is decreased due to the OH consumption by hydrogen as represented by reaction (R20), and due to the suppression of reaction (R1) around the start of iso-octane oxidation, the heat release from the subsequent LTO is reduced. The decrease in OH concentration also leads to the decrease in the CH_2O concentration, resulting in the reduction of the heat released from the H_2O_2 loop. However, the decrease in the OH concentration with hydrogen addition cannot be obtained above 1000 K with the increase in the H, HO_2 , and H_2O_2 concentrations. This is due to the H produced by reaction (R20) eventually produces OH via the HO_2 and H_2O_2 by reactions (R19), (R15), and (R16). Thus, the heat release rate from the fuel series and H_2O_2 loop is less likely to be reduced, and the heat release rate from reaction (R19) increases. In addition, as reaction (R20) is exothermic, the activation of this reaction by hydrogen addition contributes to the temperature rise. The above results suggest that hydrogen addition has a large effect in reducing the heat release rate in the relatively low temperature region at the initial stage of the ignition process with LTO, but it rather promotes the temperature rise in the high temperature region with the progress of the reactions.



Chemical Kinetic Analysis with Two-Zone Model on Spark Knock Suppression Effects with Hydrogen Addition at Low and High Engine Speeds

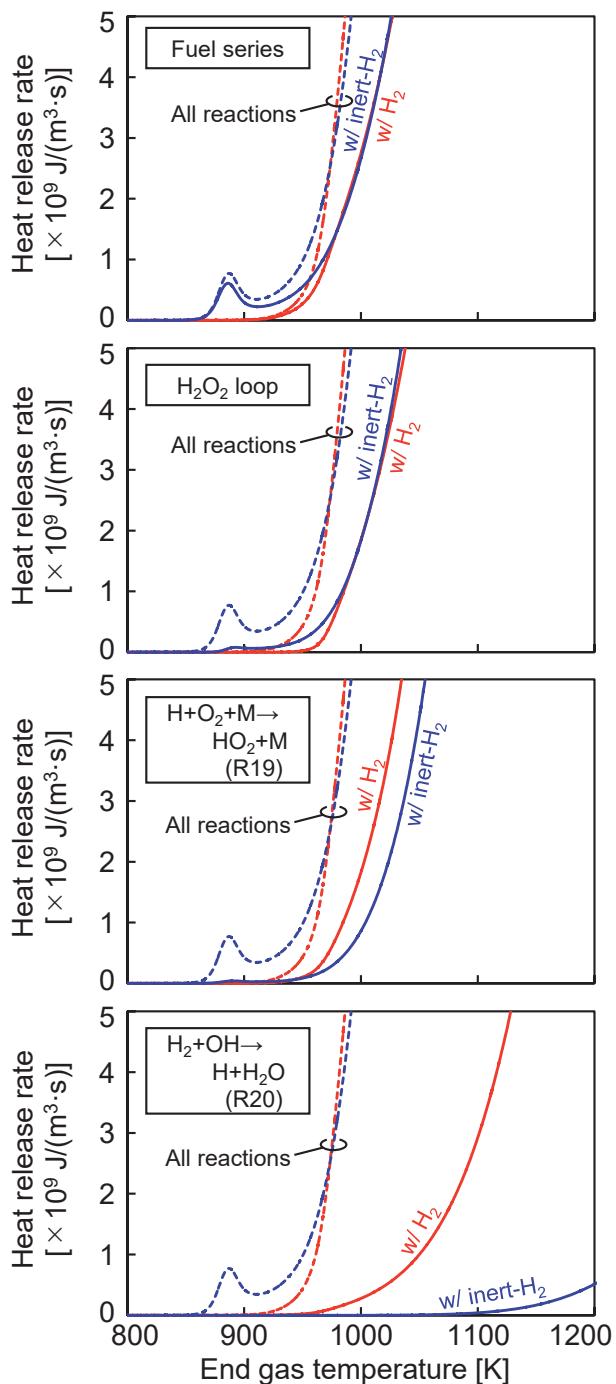


Fig. 11 Effects of hydrogen and inert-hydrogen addition on the heat release rates of representative elementary reactions in the end gas (2000 rpm)

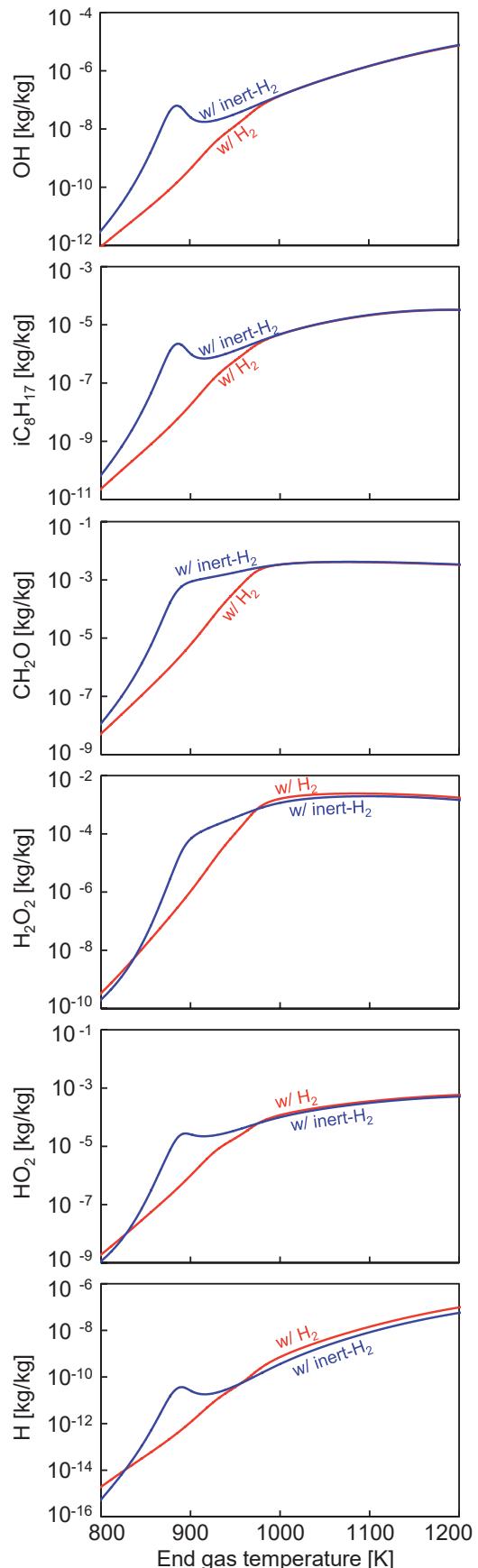


Fig. 12 Effects of hydrogen and inert-hydrogen addition on the concentrations of chemical species (2000 rpm)

5-3. Effect of Hydrogen Addition on High-speed Knock

Figure 13 shows the heat release rates of representative elementary reactions in the end gas, and Figure 14 shows the concentrations of OH, iC₈H₁₇, CH₂O, H₂O₂, HO₂, and H with the additions of hydrogen and inert-hydrogen at the engine speed of 4800 rpm, plotting the temperature change with the reaction process in the abscissa. At 4800 rpm, the temperature rapidly increases before the progress of LTO reactions, resulting in the absence of any significant heat release below 1000 K. Although the start of iso-octane oxidation is reaction (R1) as the low-speed knock, the reactions in the high temperature region which alkyl radical decomposes to olefins and alkyl radicals with a small number of carbon atoms by reactions (R3) and (R4) becomes dominant over the heat release from the fuel series instead of LTO^[44]. The decomposed species continue to the H₂O₂ loop by the subsequent reactions, and the temperature is raised together with reaction (R19) until the thermal ignition occurs.

With hydrogen addition, the OH concentration is decreased with hydrogen due to reaction (R20), leading to the suppression of reaction (R1) and the reduction of heat release from the fuel series and H₂O₂ loop as in the case of low-speed knock. However, since there is no appearance of LTO, the reduction in the heat release from the fuel series is smaller than in the case of low-speed knock. Further, due to the reactions onsetting at higher temperature, the heat release from reactions (R19) and (R20) activated by hydrogen addition increases at almost the same temperature as the fuel series and H₂O₂ loop. The effect of suppressing the temperature rise is cancelled, resulting in the small reduction effect in the overall heat release. The smaller effect of suppressing the high-speed knock with hydrogen addition can be explained by the absence of LTO at the initial stage of the ignition process with a shorter residence time in the low temperature region.

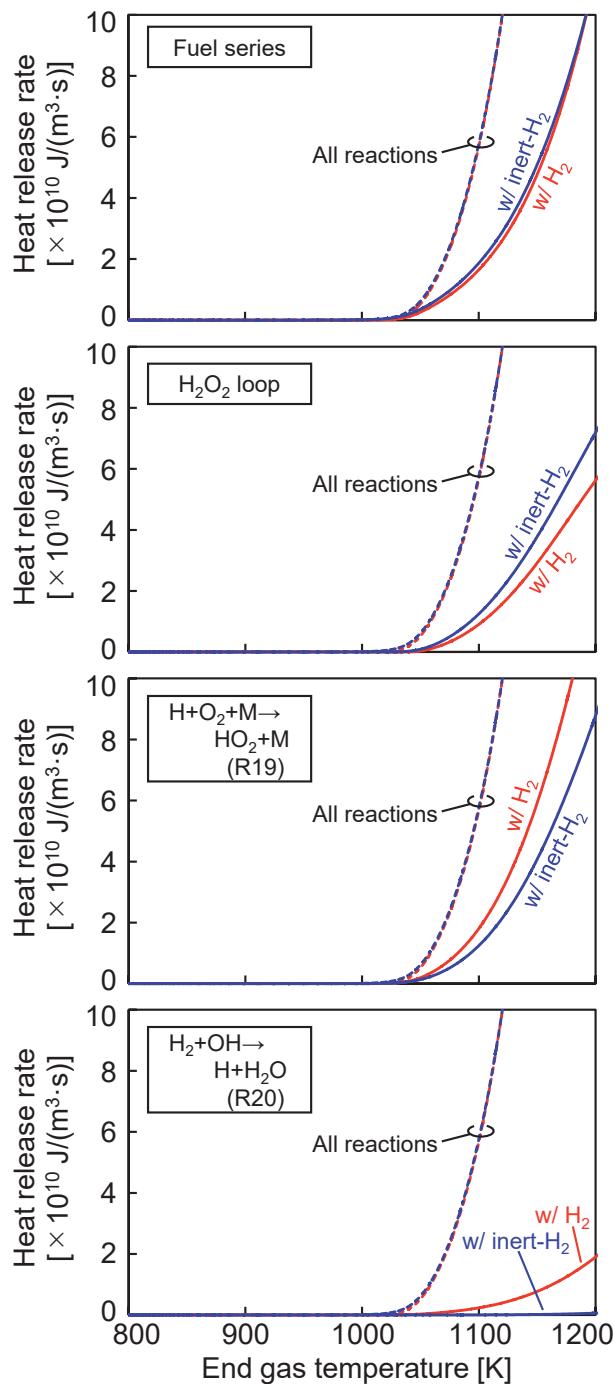


Fig. 13 Effects of hydrogen and inert-hydrogen addition on the heat release rates of representative elementary reactions in the end gas (4800 rpm)

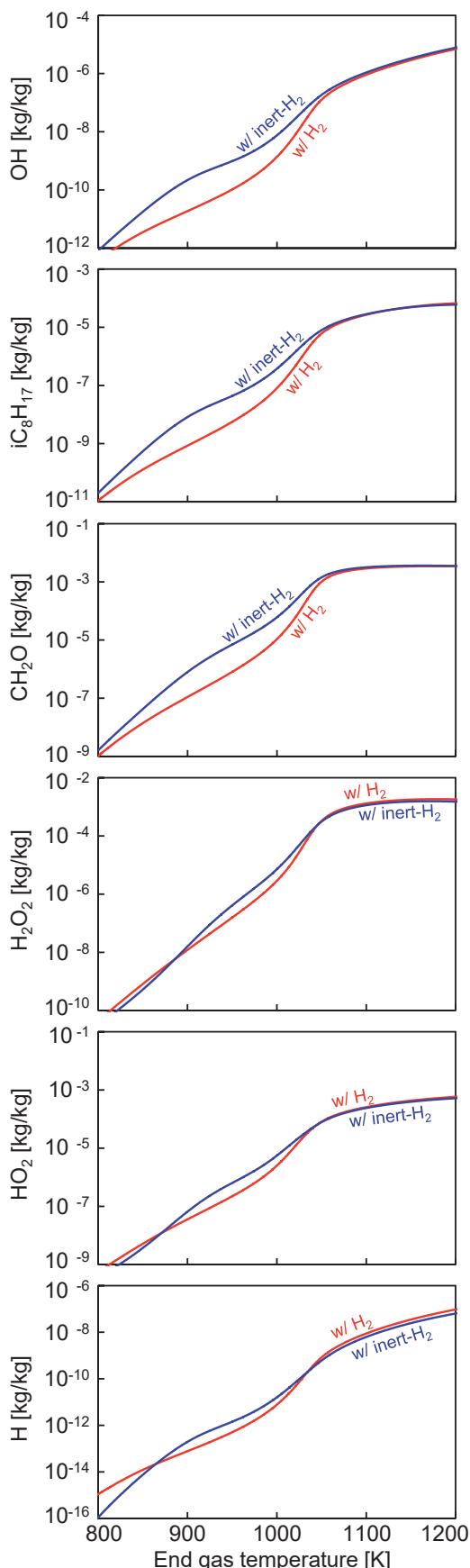


Fig. 14 Effects of hydrogen and inert-hydrogen addition on the concentrations of chemical species (4800 rpm)

6 CONCLUSIONS

In the present study, engine experiments and chemical kinetic analyses with a two-zone combustion model were performed to investigate the spark knock suppression effects of hydrogen addition at low and high engine speeds. The results may be summarized as follows:

1. Hydrogen addition can advance the combustion phase at knock limit at 2000 rpm, showing a large effect on suppressing the low-speed knock. However, the advance of the knock limit becomes smaller at 4800 rpm, and hydrogen addition is not effective for suppressing the high-speed knock.
2. In the calculation with the two-zone combustion model, the similar results as in the experiments were obtained, showing the smaller knock suppression with hydrogen addition at higher engine speeds.
3. At low engine speeds, the heat is released in two stages with a remarkable appearance of LTO, whereas at high engine speeds, the heat is released in a single stage due to the shorter residence time in the LTO temperature range.
4. The mechanism of spark knock suppression with hydrogen addition is the reduction in the heat release at the initial stage of the ignition process due to the OH consumption by hydrogen, and the temperature rise is promoted somewhat with hydrogen at the later stage of the ignition process under high temperatures.
5. The differences in the spark knock suppression with hydrogen addition under low and high engine speeds are due to the absence or presence of LTO at the initial stage of the ignition process.

REFERENCES

- [1] G. Konig, C.G.W. Sheppard: "End-gas autoignition and knock in a spark ignition engine", SAE Paper 902135 (1990)
- [2] U. Spicher, H. Kroger, J. Ganser: "Detection of knocking combustion using simultaneously high-speed schlieren cinematography and multi optical fiber technique", SAE Paper 912312 (1991)

- [3] J. Pan, C.G.W. Sheppard: "A theoretical and experimental study of the modes of end-gas autoignition leading to knock in a S.I. engine", SAE Paper 942060 (1994)
- [4] B. Stiebels, M. Schreiber, A. Sadat Sakak: "Development of a new measurement technique for the investigation of end-gas autoignition and engine knock", SAE Paper 960827 (1996)
- [5] G. Topfer, J. Reissing, H.-J. Weimar, U. Spicher: "Optical Investigation of Knocking Location on S.I.-Engines with Direct-Injection", SAE Paper 2000-01-0252 (2000)
- [6] U. Spicher, H.-P. Kollmeier: "Detection of flame propagation during knocking combustion by optical fiber diagnostics", SAE Paper 861532 (1986)
- [7] J. B. Heywood: "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill (1988)
- [8] Y. Ohta: "INITIATIONS OF ENGINE KNOCK: TRADITIONAL AND MODERN", Flame Structure, Vol. 2, pp. 372-375 (1991)
- [9] S. Allenby, W.-C. Chang, A. Megaritis, M. L. Wysznski: "Hydrogen enrichment: A way to maintain combustion stability in a natural gas fuelled engine with exhaust gas recirculation, the potential of fuel reforming", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 215, Part D, pp. 405-418 (2001)
- [10] S. Nagano, K. Yamazaki, Y. Mandokoro, I. Nakada, H. Yahagi: "Fuel Consumption Improvement by Engine EGR Reforming with Ethanol-Blended Gasoline Steam Reforming", Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 43, No. 2, pp. 325-330, In Japanese (2012)
- [11] K. Ashida, H. Maeda, T. Araki, M. Hoshino, K. Hiraya, M. Yasuoka: "Study of Hydrogen Additive High EGR Combustion for Gasoline Engine with Fuel Reformer", Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 46, No. 4, pp. 743-748, In Japanese (2015)
- [12] K. Hiraya, T. Araki, K. Ashida, A. Teraji: "A study of on-board EGR fuel reformer system on gasoline engine", Internal combustion engine symposium, No. 20196089, In Japanese (2019)
- [13] I. Fukutani, E. Watanabe: "Knock Reduction of Spark-Ignition Engines by EGR", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, No. 52, Issue 474, pp. 991-996, In Japanese (1986)
- [14] B. Grandin, H. E. Angstrom, P. Stalhammar, E. Olofsson: "Knock suppression in a turbocharged SI engine by using cooled EGR", SAE Paper 982476 (1998)
- [15] T. Alger, B. Mangold, C. Roberts, J. Gingrich, "The Interaction of Fuel Anti-Knock Index and Cooled EGR on Engine Performance and Efficiency", SAE Paper 2012-01-1149 (2012)
- [16] J. Bood, C. Brackmann, P. Bengtsson, A. Gogan, F. Mauss, B. Sunden: "Heat Release in the End-Gas Prior to Knock in Lean, Rich, and Stoichiometric Mixtures With and Without EGR", SAE Paper 2002-01-0239 (2002)
- [17] S. Potteau, P. Lutz, S. Leroux, S. Moroz, E. Tomas: "Cooled EGR for a Turbo SI Engine to Reduce Knocking and Fuel Consumption", SAE Paper 2007-01-3978
- [18] D. Parsons, S. Akehurst, C. Brace: "The potential of catalysed exhaust gas recirculation to improve high-load operation in spark ignition engines", International Journal of Engine Research, Vol. 16, Issue 4, pp. 1-14 (2015)
- [19] E. Galloni, G. Fontana, R. Palmaccio: "Effects of exhaust gas recycle in a downsized gasoline engine", Applied Energy, Vo. 105, pp. 99-107 (2013)
- [20] G. Lim, S. Lee, C. Park, Y. Choi, C. Kim: "Effects of compression ratio on performance and emission characteristics of heavy-duty SI engine fuelled with HCNG", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, pp. 4831-4838 (2013)
- [21] S. Wang, C. Ji, B. Zhang, X. Liu: "Lean burn performance of a hydrogen-blended gasoline engine at the wide open throttle condition", Applied Energy, Vol. 136, pp. 43-50 (2014)
- [22] J. Kim, K. M. Chun, S. Song, H.-K. Baek, S. W. Lee: "Hydrogen effects on the combustion stability, performance and emissions of a turbo gasoline direct injection engine in various air/fuel ratios", Applied Energy, Vol. 228, pp. 1353-1361 (2018)
- [23] C. Park, Y. Choi, C. Kim, S. Oh, G. Lim, Y. Moriyoshi: "Performance and exhaust emission characteristics of a spark ignition engine using ethanol and ethanol-reformed gas", Fuel, Vol. 89, pp. 2118-2125 (2010)
- [24] D. K. Marsh, A. K. Voice: "Quantification of knock benefits from reformatte and cooled exhaust gas recirculation using a Livengood-Wu approach with detailed chemical kinetics", International Journal of Engine Research, Vo. 18, Issue 7, pp. 717-731 (2017)
- [25] T. Han, G. Lavoie, M. Wooldridge, A. Boehman: "Effect

- of Syngas(H₂/CO) on SI Engine Knock under Boosted EGR and Lean Conditions", SAE International Journal of Engines, Vol. 10, No. 3 (2017)
- [26] M. Naruke, K. Morie, S. Sakaida, K. Tanaka, M. Konno: "Effects of hydrogen addition on engine performance in a spark ignition engine with a high compression ratio under lean burn conditions", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, pp. 15565-15574 (2019)
- [27] J. A. Topinka, M. D. Gerty, J. B. Heywood, J. C. Keck: "Knock Behavior of a Lean-Burn, H₂ and CO Enhanced, SI Gasoline Engine Concept", SAE Paper 2004-01-0975 (2004)
- [28] K. Ashida, M. Hoshino, H. Maeda, T. Araki, K. Hiraya, M. Yasuoka: "Study of Reformate Hydrogen-Added Combustion in a Gasoline Engine", SAE Paper 2015-01-1952 (2015)
- [29] M. D. Gerty, J. B. Heywood: "An Investigation of Gasoline Engine Knock Limited Performance and the Effects of Hydrogen Enhancement", SAE Paper 2006-01-0228 (2006)
- [30] T. Shinagawa, T. Okumura, S. Furuno, K. Kim: "Effects of Hydrogen Addition to SI Engine on Knock Behavior", SAE Paper 2004-01-1851 (2004)
- [31] U. Spicher, S. Palaveev: "Pre-Ignition and Knocking Combustion in Spark Ignition Engines with Direct Injection", JSME Annual Congress Proceedings (Spring No. 31-10, pp. 1-6 (2010)
- [32] A. Iijima, S. Takahata, H. Kudo, K. Agui, M. Togawa, K. Shimizu et al.: "A Study of the Mechanism Causing Pressure Waves and Knock in an SI Engine under High-Speed and Supercharged Operation", International Journal of Automotive Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 23-30 (2018)
- [33] J. Goto, Y. Kobashi, Y. Matsumura, G. Shibata, H. Ogawa, N. Kuragaki: "Spark Knock Suppression in Spark Ignition Engines with Hydrogen Addition under Low and High Engine Speeds", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, pp. 18169-18181 (2022)
- [34] Delphi Technologies: "Worldwide emissions standards: Passenger cars and light duty vehicles 2020|21", <https://www.delphi.com/sites/default/files/2020-04/DELPHI%20booklet%20emission%20passenger%20cars%202020%20online%20complet.pdf> [accessed 25 April 2022]
- [35] <https://cantera.org/> [accessed 25 April 2022]
- [36] Y. Sakai and A. Miyoshi: "Development of Reduced Chemical Kinetics Mechanism of Gasoline Surrogate Fuel", Internal combustion engine symposium, No. 20178019, In Japanese (2017)
- [37] Y. Sakai, K. Hasegawa, A. Miyoshi: "Development of Reduced Chemical Kinetics Mechanism of Gasoline Surrogate Fuel with Oxygenated Compounds", Internal combustion engine symposium, No. 20183155, In Japanese (2018)
- [38] G. Woschni, J. Fieger: "Experimental investigation of the heat transfer at normal and knocking combustion in spark ignition engines", Motortech.Z., Vol. 43, pp. 63-67 (1982)
- [39] Y. Sakai, S. Ideue, H. Ando, K. Kuwahara: "Effects of Different Ignitability Fuel Addition on the Hydrocarbon Chemical Kinetic Mechanism", Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 41, No. 3, pp. 697-702, In Japanese (2010)
- [40] M. J. Pillimg: "Low-temperature Combustion and Autoignition", Elsevier (1997)
- [41] H. Ando, Y. Sakai, K. Kuwahara: "Universal Rule of Hydrocarbon Oxidation", SAE Paper 2009-01-0948 (2009)
- [42] K. Kuwahara and H. Ando: "Role of Heat Accumulation by Reaction Loop Initiated by H₂O₂ Decomposition for Thermal Ignition", SAE Paper 2007-01-0908 (2007)
- [43] H. Ando and K. Kuwahara: "Difference of Reaction Schemes on Low Initial Temperature Conditions with LTO Reactions and High Initial Temperature Conditions Skipping Them", COMODIA2008 (2008)
- [44] H. Ando, Y. Sakai, M. Syuu, K. Kuwahara: "Reaction Scheme of Various Hydrocarbon Fuels Under the Conditions Not Passing Through Low Temperature Oxidation Process", Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 43, No. 2, pp. 311-317, In Japanese (2012)

DEFINITIONS/ABBREVIATIONS

EGR	exhaust gas recirculation
REGR	reformed exhaust gas recirculation
PRF	primary reference fuel
LTO	low temperature oxidation
HTO	high temperature oxidation
nIMEP	net indicated mean effective pressure
λ	excess air ratio
LHV	lower heating value
CA	crank angle
ATDC	after top dead center
CA50	50% mass burned crank angle
<i>U</i>	internal energy
<i>m</i>	mass
<i>h</i>	specific enthalpy
<i>Y</i>	mass fraction
<i>p</i>	pressure
<i>p_m</i>	motoring pressure
<i>V</i>	Volume
<i>V_d</i>	displacement volume
<i>Q</i>	heat release
<i>Q_{wall}</i>	heat transfer
<i>W</i>	molecular wight
$\dot{\omega}_i$	chemical reaction rate per unit time and unit volume
<i>R</i>	gas constant
<i>T</i>	temperature
<i>T_{wall}</i>	wall temperature
<i>h_c</i>	heat transfer coefficient
<i>A</i>	heat transfer area
<i>d</i>	representative length
<i>w</i>	representative velocity
<i>S_p</i>	average piston speed
<i>C_p</i>	specific heat at constant pressure

Subscripts

<i>i</i>	chemical species index
<i>u</i>	unburned zone
<i>b</i>	burned zone
<i>f</i>	flame surface
<i>r</i>	Representative

■著者



後藤 隼

Jun Goto

技術・研究本部

技術開発統括部

先進プロダクト開発部



小橋 好充

Yoshimitsu Kobashi

岡山大学

学術研究院環境生命

自然科学学域 準教授



上野 義人

Yoshito Ueno

北海道大学

大学院工学院

エネルギー環境システム専攻



柴田 元

Gen Shibata

北海道大学

大学院工学研究院

機械・宇宙航空工学部門 準教授



小川 英之

Hideyuki Ogawa

北海道大学

大学院工学研究院

機械・宇宙航空工学部門 特任教授



山本 稔

Minoru Yamamoto

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 戦略部
岡田 芳郎	ヤマハモーターパワー・プロダクツ(株) 開発統括部 技術戦略部
奥山 高志	マリン事業本部 開発統括部
神田 大	ソリューション事業本部 UMS 事業推進部 開発部
木村 隆	ヤマハモーター・ハイドロリックシステム(株) 開発統括部 技術戦略部
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	ランドモビリティ事業本部 SPV 事業部 第1開発部
土居 航介	生産技術本部 材料技術部
野澤 伸治郎	ランドモビリティ事業本部 SPV 事業部 第1開発部
原 以起	マリン事業本部 開発統括部 先行開発部
村松 恒行	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 ブランドマークティング部
	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 恒行	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58号

YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW 2023 No.58

印 刷 2023年11月30日
発 行 2023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/

※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