

YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW



No.55 2019

ヤマハ発動機 技報

巻頭言

モノ創り技術のブレイクスルー	3
山地 勝仁	

技術紹介

外観塗装色に合わせたプライマーの開発	5
水野 正洋 宗像 弘晃	
ECU 小型化技術	10
神谷 貴春 大津 一生	
電磁誘導ゴルフカー向けステレオビジョン「effi-vision」	15
山崎 章弘	

製品紹介

家族の思い出作りを応援するファミリー向けスクーター「Free Go」の開発	20
大橋 聡 川口 勉 柳原 佑輝 椎名 隆 木下 保宏 曾我 明央	
Refreshing Sporty Compact Scooter RS NEO「LSR125」の開発	25
鍾 少華 洪 百合 葉 青蒼 彭 正志 劉 秋城 陳 原豪 謝 金育	
船外機「F300D」の開発	30
琴野 瑛仁	
フラッグシップスポーツボート「275SD」の開発	34
岡本 順敬 藤野 健一 神津 知之	
和船「W-43AF」	39
児島 慎平 杉本 亮平 相川 徹 丸亀 正文 加藤 祐資 馬淵 大輝	
産業用ドローン YMR-08	44
吉原 正典 松村 大祐 米原 慧紀 大西 慎太郎 春田 祐吾 水野 健太 四宮 隆 神田 大	
インテリジェントファクトリー「止まらない・止めない」高効率 SMT ラインを実現	56
金子 康弘 横山 泰幸	
細胞(塊)ピッキング&イメージングシステム「CELL HANDLER™」	60
熊谷 京彦	
防音型インバータ発電機 EF1800iS (海外向けモデル名 EF2200iS)	65
山村 尚 長澤 佑樹 金子 誠孝 望月 俊治 川村 晃正 大久保 公貴	

技術論文

ショットピーニング残留応力付与によるピストン鍛造金型寿命改善	70
村松 龍馬 榊原 浩 小倉 純一 山村 易見	
アルミ鍛造製コネクティングロッドへの 6000 系材料適用	76
大島 かほり 栗本 幸広 村山 友貴	
ベベル冷間歯形成の ROV デファレンシャル部品への適用	82
仲田 武弘 熊崎 正祥 鈴木 由美子 松下 浩次	
燃料ポンプの摩耗による流量低下とその予測手法	88
安原 純平 原 慎也 鈴木 敏郎 宮崎 洋彰 山本 大介	
クロムモリブデン鋼およびステンレス鋼上に電析したパーマロイめっき膜中に存在する内部応力の外部応力検出感度に及ぼす影響	93
石川 さとみ	
LES 詳細化学反応計算による高回転過給ノッキング解析	98
田中 大二郎 高須 康嗣 大村 亮介	
高速 PIV 計測および初期火炎伝播可視化による低負荷運転時における燃焼サイクル変動の解析	104
保木本 聖 窪山 達也 森吉 泰生 孕石 三太 渡辺 敬弘 飯田 実	

Foreword

Break through on Monozukuri - engineering, manufacturing and marketing Katsuhito Yamaji	3
--	---

New Technologies

Development of Primers to Match Exterior Colorings Masahiro Mizuno Hiroaki Munakata	5
Technology for More Compact ECU Takaharu Kamiya Issei Otsu	10
"effi-vision" Stereo Vision for Electromagnetic Induction Golf Cars Akihiro Yamazaki	15

New Products

Helping Families Make Memories: Development of the Family-Oriented Free Go Scooter Satoshi Ohashi Tsutomu Kawaguchi Yuuki Yanagihara Takashi Shiina Yasuhiro Kinoshita Akihisa Soga	20
Development of the RS NEO LSR125 Refreshing Sporty Compact Scooter Shaohua Chung Paiho Hung Chingtsang Yeh Zhengzhi Peng Chewcherng Liou Yuanhao Chen Chinyu Hsieh	25
Development of the F300D Outboard Motor Akihito Kotonu	30
Development of the flagship sports boat "275SD" Yukitaka Okamoto Kenichi Fujino Tomoyuki Kouzu	34
W-43AF Utility Boat Shimpei Kojima Ryohei Sugimoto Toru Aikawa Masafumi Marugame Yusuke Kato Hiroki Mabuchi	39
YMR-08 Industrial Drone Masanori Yoshihara Daisuke Matsumura Keiki Yonehara Shintaro Ohnishi Yugo Haruta Kenta Mizuno Ryu Shinomiya Dai Kanda	44
Intelligent Factory Realizing high-efficiency SMT lines that will not stop or be stopped Yasuhiro Kaneko Yoshiyuki Yokoyama	56
CELL HANDLER™ Picking and Imaging System for Single Cells and Cell Aggregates Takahiko Kumagai	60
EF1800iS Low-Noise Inverter Generator (Overseas Market Model Name: EF2200iS) Takashi Yamamura Yuki Nagasawa Masataka Kaneko Shunji Mochiduki Kousei Kawamura Yoshitaka Ookubo	65

Technical Papers

Shot Peening Residual Stress Application Leads to Greater Piston Forging Die Life Tatsuma Muramatsu Hiroshi Sakakibara Junichi Ogura Yasumi Yamamura	70
Application of 6000 series aluminum alloy to forged connecting rods Kahori Oshima Yukihiro Kurimoto Yuki Murayama	76
Application of Beveled Cold Gear Forming to ROV Differential Parts Takehiro Nakada Masayoshi Kumazaki Yumiko Suzuki Kohji Matsushita	82
Method of Predicting of Flow Rate Decrease due to Fuel Pump Wear Jumpei Yasuhara Shinya Hara Toshiro Suzuki Hiroaki Miyazaki Daisuke Yamamoto	88
Effects of internal stress found in electro-deposition permalloy plating film on chromium molybdenum steel and stainless steel upon external stress detection sensitivity Satomi Ishikawa	93
High-Speed Supercharging Knocking Analysis by LES Detailed Chemical Reaction Calculation Daijiro Tanaka Kouji Takasu Ryosuke Omura	98
Analyses of cycle-to-cycle variation of combustion at low load condition by using high-speed PIV and direct photographing of early flame propagation Satoshi Hokimoto Tatsuya Kuboyama Yasuo Moriyoshi Santa Haramiishi Takahiro Watanabe Minoru Iida	104

山地 勝仁

Recently, I often see articles highlighting the low rate of labor productivity growth in Japan. Our generation was told to be proud and raised on the strength of the Japanese manufacturing industry. In the field of motorcycles, one of our company's major products, there was a real situation in which Japanese automobiles were growing in the world while European and American manufacturers were declining. However, the composition of the market has shifted dramatically during the period of change, such as changes in social demands, customer values, diversification of needs, and changes in technological fields.

In this environment, Yamaha Motor has the ART for Human Possibilities as its medium- to long-term vision and are promoting business development aimed at realizing a better society and fulfilling life through the company's "Getting closer to Human" and "Expanding Human Possibilities" approach. Along with product development in line with the vision, it is also necessary to consider how Monozukuri -creativity should be supported.

The major environmental changes in the production technology field I have been involved in, include the evolution of digital technologies such as IoT and other solutions. As there are many variables in the production site, it is difficult to quantify the conditions of good products, leaving areas to be leaned on the site, and there were many obstacles to high achieving higher accuracy and functionality. However, stabilization of the process and speed increases by visualizing phenomena due to the evolution of sensing, incorporating digital technology evolution such as analysis and AI based on a large amount of data, and equipment that can perform control corresponding to them. In addition, the environment for improving the efficiency of product creation has been improved by expanding automation. There have been some cases where good quality conditions of scales were obtained from the eyes of big data analysis in the casting process. On the other hand, not only streamlining processes, but also increasing the value provided to customers by manufacturing technology (Monozukuri) is an important technical issue. In the future, we will aim to innovate from craftsmanship to mass production technology by utilizing digital technology even in approaches to creating high-quality products and improving product power that require advanced skills.

Furthermore, as market needs diversify, it is essential to speed up the creation (Monozukuri) of goods. As for the supply chain, variability in demand cannot be avoided. For this reason, a production system that can supply the required amount according to demand from the current lot production system in a timely manner is indispensable. Even in this field, timely collection of market information using IT, inventory management, production planning, and the development of variable production methods that can respond are required. As for the engineering chain, data-based development (MBD) needs to be linked to the manufacturing process. Needless to say, when these initiatives are implemented, data is shared, and related departments work together.

Productivity can be defined as creating value for each person. The double effort to increase value and work efficiency (speed) will directly improve productivity. By making full use of evolving digital technology and achieving breakthroughs in technology (construction methods), supply chains, and engineering chains, not only we will deliver "The unique style of Yamaha" to customers, but also increase productivity, make it easier to work, and create a production process with less environmental impact.

最近、日本の労働生産性の伸び率の低さを指摘する記事を目にすることがよくある。我々世代は、日本の製造業の強さはモノ創り力と聞かされ自負し育ってきた。当社の主要商品である二輪車においても、世界で伸長する日本車と衰退する欧米メーカーという構図が現実发生过っていた。しかし現在、社会要請の変化・お客様の価値観、ニーズの多様化・技術領域の変化など大きな時代の変革期中、市場の構図も大きく変わった状況にある。

このような環境下、当社では中長期ビジョンとしてART for Human Possibilitiesを掲げ、人間に近づき・人間の可能性を拡げ、より良い社会・充実した生活の実現を目指した事業展開を進めている。ビジョンに沿った製品開発とともに、それを支えるモノ創りはどうあるべきかということも併せて考えていく必要がある。

私の携わってきた生産技術領域での大きな環境変化は、IoTやソリューションに代表されるデジタル技術の進化が挙げられる。生産現場では変動要素が多いため、良品条件の定量化が難しくカン・コツなど現場任せとなり、高精度・高機能化の障害となっていた。しかし、センシングの進化による現象の見える化、大量のデータを基にした解析やAI、それらに対応した制御が可能な設備などデジタル技術の進化を現場に取り入れることにより、工程の安定化やスピードアップ、また自動化の拡大など、モノ創りの効率を高める環境が向上した。鑄造プロセスのビッグデータ解析により目から鱗の良品条件が得られた事例も出てきている。一方プロセスの合理化だけでなく、モノ創り技術により顧客提供価値を高めることも重要な技術課題である。今後は、高度なスキルが求められる高品位なモノ創りや商品力向上へのアプローチでも、デジタル技術を活用することにより匠の技から量産技術への革新を狙いたい。

さらに、市場ニーズが多様化する中、モノ創りのスピードアップは必須となってくる。サプライチェーンに関しては、需要の変種変量化は避けて通れない。そのため、現状のロット生産方式から需要に応じた必要量をタイムリーに供給できる生産方式が不可欠となる。この分野でもITを駆使したタイムリーな市場情報収集、在庫管理、生産計画立案を行うとともに、それに対応できる変種変量生産方式の開発が求められる。エンジニアリングチェーンに関しても、データに基づく開発(MBD)を製造プロセスまで連動させる必要がある。これらの取り組みを行うに際、データを共有し関連部門が連動した活動とすることは言うまでもない。

生産性とは人当りの価値創出と定義できる。価値を高め、仕事の効率(スピード)を上げる両輪の取り組みは生産性向上に直結する。進化するデジタル技術を使いこなし、技術(工法)・サプライチェーン・エンジニアリングチェーンのブレイクスルーを果たすことにより、「ヤマハらしさ」をお客様に届けるとともに、生産性を高め・働きやすく・環境負荷の少ない生産プロセスの実現に挑戦して頂きたい。

■著者



山地 勝仁
Katsuhito Yamaji
取締役 常務執行役員



Abstract

In 2018, Yamaha Motor began production of white outboard motors, in addition to the existing gray color. This white color is achieved via the intermediate coating, but heavier application of paint is required compared to the gray color. As a result, the rate of paint rejects and the intermediate coating time increased, leading to decreased productivity. To address this issue, the coating system was revised, changing the previous method of achieving coloring through one intermediate coating to achieving coloring via two coatings: one base coat and one intermediate coat, and using a primer (base coat) close to the intermediate coating color. The revised specification enabled the intermediate coatings to be thinner, reduced paint rejects, and shortened painting time. This report introduces the initiatives taken as part of the revised coating specification.

1 はじめに

ヤマハ発動機では、2018年に既存のグレー色に加え、白色の船外機生産を開始した。この白色は中塗り塗装にて具現化されるが、グレー色と比較した場合、厚く塗り込む必要がある。その結果、塗装不良率および中塗り塗装時間が増加し、生産性の低下を招いた。

その対策として、従来は「中塗り1コートで発色」させていたところを、下地となるプライマー（下塗り塗装）を中塗り塗装色に近づけて「下塗りおよび中塗りの2コートで発色」させる塗装仕様に変更することで、中塗り塗装の薄膜化を図り、塗装不良の低減および塗装時間の短縮に取り組んだ。本稿ではこの取り組みについて紹介する。

2 開発の狙い

2-1. 現状の問題点

今回対象とした塗装ラインでは、凹凸のある複雑な形状をもつ船外機のアルミ部品に溶剤型塗料の吹付塗装をしている。

その塗膜構成は、下塗り塗装[プライマー]、中塗り塗装[ベース]、上塗り塗装[クリア]の3コートから成る。この時、塗装色を決定づける中塗りの膜厚が薄いと下塗りの色が透けて見えるスケ不良を起こす。また、中塗りの膜厚が厚すぎると塗膜が垂れるタレ不良、あるいは塗膜表面が半乾きの状態で溶剤が蒸発し、ぷつぷつと鳥肌状の塗装外観となるワキ不良が起りやすくなる。つまり、中塗りの膜厚が薄すぎても厚すぎても塗装不良が発生する。

今回、船外機の外観色として新たに追加された白塗装の特徴の一つは、光の透過性が高いことである。光の透過性が高くなると、下地の色を覆い隠すのに必要な膜厚(隠蔽膜厚)は厚くなる(図1)。そのため、生産展開した白塗装は、グレー塗装と比較して3倍近い中塗り膜厚が必要となり、スケ・タレ・ワキ不良が発生することのない膜厚管理幅が格段に狭くなった(図2)。

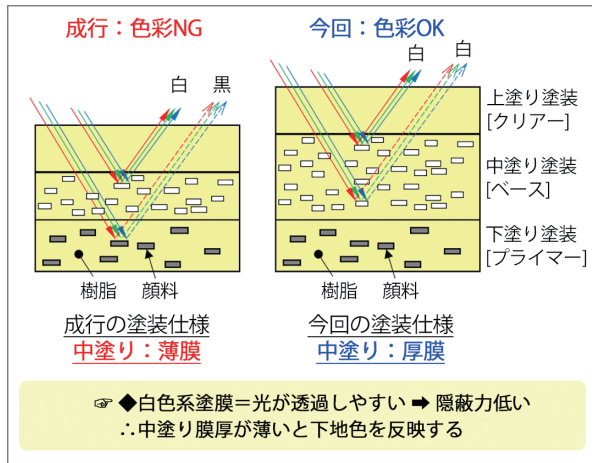


図1 中塗り膜厚による光の透過と発色

- 案3) 隠蔽力の高い中塗り塗料の開発→難易度大
案4) 下塗り塗料開発(下／中塗りの2コートで発色)

この中から今回は、採算性や開発期間の面で優れ、かつメカニズム(図3、図4)に効果が期待できる案4)を採用し、対策を進めることとした。

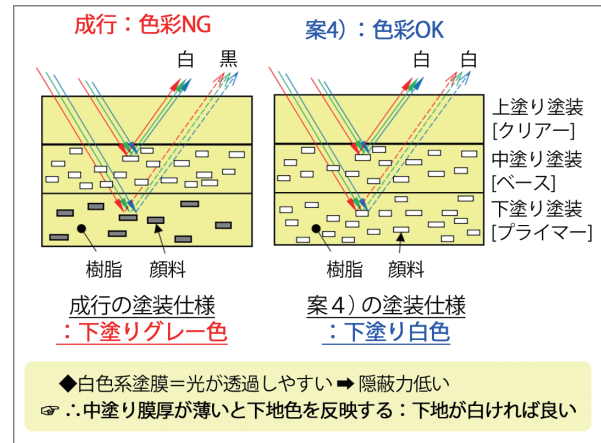


図3 下塗り色による光の透過と発色

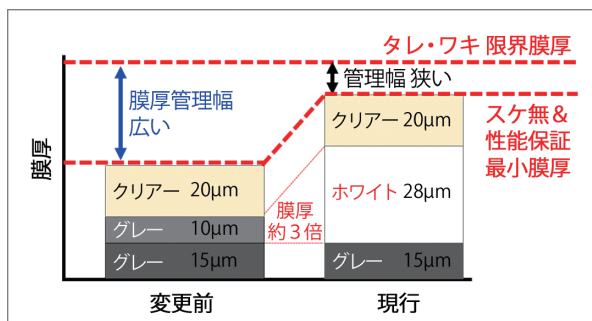


図2 塗装色と膜厚管理幅(1)

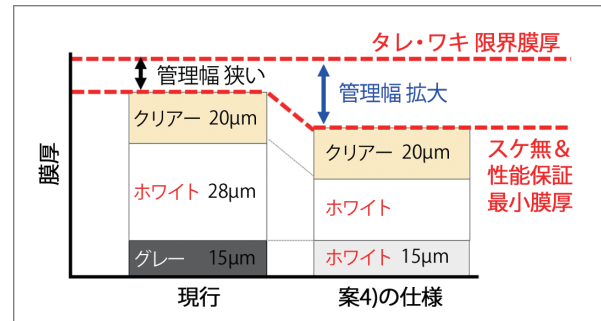


図4 塗装色と膜厚管理幅(2)

その結果、グレー塗装のスケ・タレ・ワキ不良率は0.1%であったのに対して、白塗装では4.9%の頻度で不良が発生した。また、中塗り膜厚が3倍近く必要になったことで、中塗り塗装工程のサイクルタイムが従来の2倍となり、生産性においても大幅な低下を招いた。そこで今回、スケ・タレ・ワキ不良の削減を新たな課題として捉え、改善に取り組むこととし、あわせて中塗り塗装のサイクルタイム短縮も目指した。

2-2. 開発方針

対策手段として、下記の4案を検討した。

案1) 製品形状の凹凸を削減→商品性上困難

案2) 中塗り塗装条件の変更→設備大改造要

※塗装ロボット追加・塗装ブース拡張・コンベア経路変更

2-3. 開発目標

船外機は、海水と熱による過酷な環境下で使用されることから、今回の塗料開発は、下塗りに要求されるスペック(素地との付着性、耐食性等)を確実に確保することを前提条件としながら、中塗り塗装の発色膜厚¹⁾が低減できる色調を短期間で開発することが求められた。そこで、開発目標値を以下のよう定めた。

- 品質：下塗り要求スペックを確保しながら、スケ・タレ・ワキ不良の発生率を0.1%以下に低減
- 生産性：中塗り塗装のサイクルタイムを10%短縮
- 開発期間：船外機F425新規形状ローの生産展開前(2019年7月前)に導入

3 取り組み内容

3-1. 下塗り塗料 開発方針

下塗り塗料の開発は、短期間で下塗り塗膜の要求スペックを確実に確保するため、現行下塗り塗料の調色仕様をベースに対応することとした。

具体的には、図5に示すように塗料成分の変更は行わず、着色顔料として含まれている黒顔料(含有量1%未満)の一部を白系顔料に置き換えることを検討した。

□新規塗料組成：現行比			塗料組成 変更内容
	成分	配合	＞外観色の微調整
樹脂	同一	同一	*1：顔料配合 カーボン1.0%未満 を同量の白系顔料 に置き換える。
顔料	同一	*1による	
溶剤	同一	同一	
添加剤	同一	同一	

図5 下塗り変更の考え方

3-2. 下塗り塗料の組成(色)選定

本案件の対象工程は、塗装ロボットによる自動塗装のみで、人作業による補正工程が存在しない。そのため、良品条件を設定する過程で、塗装ロボットティーチングの作り込みが重要となってくる。

ここで下塗り塗装色は、中塗り塗装の発色膜厚を低減するために中塗り塗装色に近いことが求められる。しかし、前提条件による塗料組成の範囲で白色に近づけると、下塗りも光の透過性が高まり隠蔽力が低下する(透明に近づく)。下塗りの隠蔽力が低下しすぎると、目視による下塗り膜厚の推測が困難となる。その結果、ロボットティーチングの作り込みを行う

中で、下塗り後に焼付乾燥を経て膜厚測定を行う頻度が高くなり、非現実的な作業工数となってしまふ。

そこで下塗り塗装の色は、目視による下塗り膜厚の推測が可能な範囲で、最も中塗り塗装色に近い色を選択した。これは、マンセル記号でいうと中塗りN9色に対して、新規開発した下塗り塗装色はN8色である(図6)。

3-3. 中塗り膜厚の規格下限確認

新規下塗り塗装の隠蔽膜厚は35 μm である。従って、下塗り下限膜厚の15 μm では素地色の影響を受けて中塗り塗装の発色膜厚に影響を与える可能性がある。

そこで、新規塗装仕様の中塗り下限膜厚は、「対象被塗物で最も黒い素材(DCのアルマイト仕様)に、新規下塗りを15 μm 塗装した条件で、既定の色に達する膜厚」と定義した。ここで、既定の色に達したかどうかの判定は、「JIS Z 8781-4による $L^*a^*b^*$ 色空間による色差 ΔE が0.5以下となること」とした。

上述の定義に基づいた中塗り下限膜厚は、新規下塗り塗料を採用することで従来の28 μm から23 μm となり、18%削減することが可能となった(図7)。

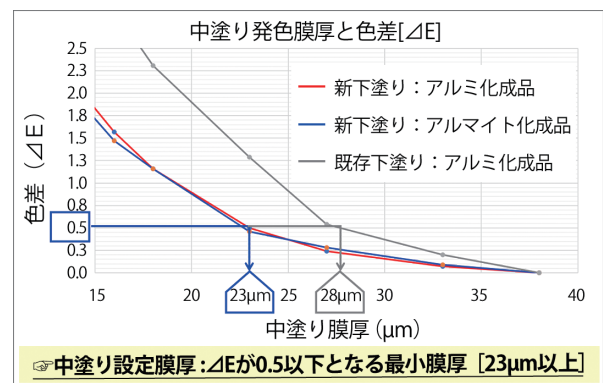


図7 中塗り膜厚と色差

3-4. 塗装条件の設定

対象ラインは10台の塗装ロボットで自動塗装を行っている。このとき、対象部品の全塗装プログラムを再設定し直すことは作り込みに膨大な工数を要する。

ここで現行下塗り塗料と新規下塗り塗料は、同一塗装条件で形成される膜厚、タレ限界膜厚²⁾およびワキ限界膜厚³⁾が同一であることが確認できた。そこで新規下塗り塗装条件は、塗料変更以外は現行生産と同条件とした。

中塗り塗装は、塗装ガンの速度による影響を確認した結果、塗装ガンの速度が1.5倍までであれば、塗着効率と外観品質に大きな影響がないことがわかった(図8)。そこで、新規中塗り塗装条件は、原則として塗装ガンの速度のみを変更するこ

【下塗り塗料色の選定】

下塗り色選定項目 \ 下塗り色	黒 ←			→ 白
	現行	N7	N8	N9
下塗り色vs中塗り色(色差)	×	△	○	◎
下塗り膜厚 視認性	◎	◎	○	×
塗膜性能	○	○	○	○

【マンセル記号と色】

現行 →	N9
中塗り	N8
	N7
アルミ	N6
素地	N5
	N4
現行 →	N3
下塗り	N2
	N1
	N0

膜厚が目視確認できて
最も白い色：N8を選択

図6 新規下塗り塗装色選定

とし、単位時間当たりの吹付塗料の速度は前述の色差判定法により導き出した△18%の下限膜厚での塗装が可能な1.2倍に設定した。

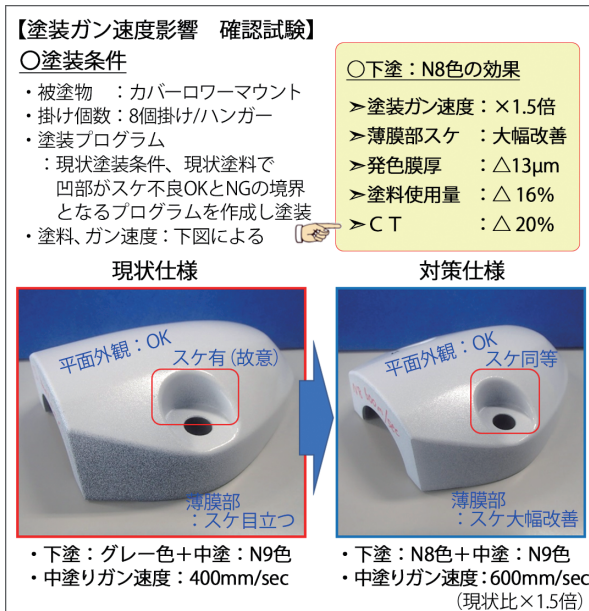


図8 塗装ガン速度の影響試験結果

次に、白塗装対象部品の中で最もサイクルタイムの長いF425用ブラケットクランプ(2ヶ掛け/ハンガー)で上述した塗装条件の妥当性を検証した。その結果、表1に示すとおり概ね目標を達成できる塗装条件であることが確認できた。そこで、生産導入用の新規塗装条件は以下のように定めた。

- ・ 下塗り: 新規下塗り塗料_N8色(他生産同一)
- ・ 中塗り: ガン速度1.2倍に変更(他生産同一)
- ・ 上塗り: 変更無し

表1 塗装条件検証 試験結果

評価項目	下塗り		削減値	試験結果
	現行仕様 グレー色	対策仕様 N8色		
外観(スケ/タレ/ワキ)	無し	無し	—	スケ・タレ・ワキ不良 問題無し
外観(色差) ※基準: $\Delta E \leq 2.0$	$\Delta E: 0.79$	$\Delta E: 0.95$	—	塗装色 問題無し
中塗りサイクルタイム [sec/ハンガー]	57.3	52.3	-5	-8.7%
トータル膜厚 [μm]	100.4	87.8	-13	-13%
中塗り塗料 使用量 [cm ³ /ハンガー]	139.0	123.0	-16	-11.5%

3-5. 塗膜性能確認

塗装条件の設定と並行して、新規塗装仕様の性能を確認した。その結果、表2に示すとおり狙い通りの結果を得ることができた。

表2 塗装性能 試験結果

評価項目	評価結果	判定
船外機塗料規格 (テストピース試験: 対象 34 項目)	全項目、合格	○
現行仕様との性能比較評価 (テストピース試験: 対象 13 項目)	全項目、現行仕様と 同一ポテンシャル	○
航走評価 (実機での運転評価)	全項目、合格	○

3-6. 新規下塗り導入結果と今後の取り組み

新規下塗り仕様は、計画通り2019年4月に生産試作を行い、6月に生産導入した。生産導入後1ヶ月間の結果は、表3に示すように概ね目標を達成している。

表3 生産導入状況(2019.6.10~2019.7.10)

項目	目標	結果	判定
品質 スケ、タレ、ワキ不良率	0.1% (グレー色同等)	0.1%	○
生産性 サイクルタイム 10% 短縮	8.6% 削減	△	
納期	2019年7月前に導入 (F425 ロワー形状変更~)	2019年6月導入	○

ただし、品質目標のスケ・タレ・ワキ不良は季節変動(被塗物温度と塗料の粘度変化)により発生頻度が異なるため、今後も継続して不良率の推移を注視していく。

また、生産性についてはサイクルタイム10%削減の目標に対して1.4%未達成である。今回は、3-4.で述べた塗装条件の設定に基づき、全部品の塗装条件を機械的に設定しているため、部品ごとには改善の余地が残されている。そこで今後は、ガン速度と吐出量条件を中心に、部品ごとに塗装条件を作り込み、残り1.4%のサイクルタイム短縮に取り組んでいく。

4 おわりに

今回の取り組みで、発色膜厚が厚くなる塗膜構成においては、「下塗り+中塗り」の2コート発色仕様が、良品率および生産性の改善に効果があることを実証することができた。近年、船外機のカラーバリエーションも多様化が進んでおり、今後も新色設定の機会が増えることが想定される。その機会においては、今回の取り組みで実証することができた「2コート発色」を取り入れた塗料開発を行い、高良品率かつ高効率を実現する塗装条件設定を目指したい。

また、今回の取り組みでは、下塗り膜厚を15 μmに固定した条件で中塗り塗装条件の作り込みを行った。その結果、18%の薄膜化を実現することができたものの、依然として中塗り工程がサイクルタイムのネック工程であることに変わりはない。これについては、下塗り時間を長くし(塗り込み)、中塗り塗装時間を短縮する「下塗り/中塗りの最適バランス」を検討す

ることで、さらなる生産性向上が可能であると考えている。

今後も継続して塗装条件の改善を図り、より低コストでより高品質な価値の高い塗装商品をお客様に提供できるよう努めていく。

1) 発色膜厚

指定塗装条件で既定の色を発現するのに必要な最小膜厚値を指定条件における発色膜厚という。この時、素地に隠蔽試験紙(JIS K5600-4)を指定した場合は隠蔽膜厚と同義となる。

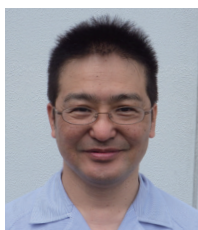
2) タレ限界膜厚

タレ不良の発生しやすさを図る指標の一つ。指定塗装条件にて穴のフチで塗料のタレが発生しない最大の膜厚値。

3) ワキ限界膜厚

ワキ不良の発生しやすさを図る指標の一つ。指定塗装条件でワキが発生しない最大の膜厚値。

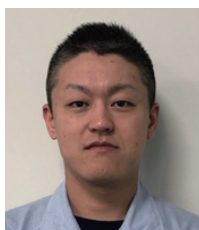
■ 著者



水野 正洋

Masahiro Mizuno

マリン事業本部
マリンエンジン統括部
製造部



宗像 弘晃

Hiroaki Munakata

マリン事業本部
マリンエンジン統括部
製造部

Abstract

With the aim of improving fuel economy as well as improving added value through riding support, many aspects of electronic control technology have been fitted to motorcycles in recent years, leading to units containing the circuit boards expanding in size and number.

Larger and more units lead directly to increases in motorcycle weight. In addition, limited space is available in motorcycles to install control units, and when factoring in the wiring harnesses to connect the control units and the components they manage, installation near the drive components is preferable, requiring smaller units.

Conversely, the electronic components market, led by the consumer products field, is shifting to smaller parts. When the mainstream sizes of electronic components become smaller, reduction in the cost of parts as well as smaller components to suit the more compact circuit boards become possible.

Based on these trends, this report introduces initiatives to evaluate compact electronic component mounting technology and also consideration of making overall unit size smaller.

1 はじめに

近年の車両は、運転支援による付加価値向上、または燃費向上の観点から電子制御技術が数多く取り入れられ、それにととも電子基板を有したユニットは大型化し、搭載数は増加している。ユニットの大型化や搭載数の増加は車両重量の増加に直結する。さらには車体における制御ユニットの設置スペースは限られており、制御ユニットと制御部はワイヤハーネスを介して接続する構造を加味すれば、駆動部の直近に配置できることが望ましく、そのためには、より小型なユニットが求められる。

一方、電子部品においては、民生品が先行し小型部品の採用が進んでおり、市場は小型部品にシフトしていくことになる。電子部品の主流サイズが小型にシフトした際、部品コストの削減および、電子基板の小型化に対して小型部品の採用が有効になる。今回、このような動向を踏まえ、小型電子部品の実装技術の検証とともに、トータルでユニットを小型化する検討を行った。その内容を紹介する。

2 開発の狙い

小型化の検討を行うにあたり、二輪車のECU(Engine Control Unit)をターゲットに選定した。ECUは二輪車の制御ユニットとしてほとんどの車両に搭載されるものであり、小型化による搭載性の向上が望まれる。現行のECUは電子基板をケースおよび樹脂により封止する構造になっている(図1)。樹脂封止により電子基板を水や振動から保護する。小型化を実現するためには、まず電子基板を小型にする必要がある。次

に、電子基板の封止方法を変更し、ユニットサイズ自体の小型化を目指す。基板設計および基板封止方法の変更を検討するうえでベース機種を現行ECUの最小サイズのものとした。ECUとしての機能はそのままに、部品、構造の見直しにより小型化を実現することを目指した。

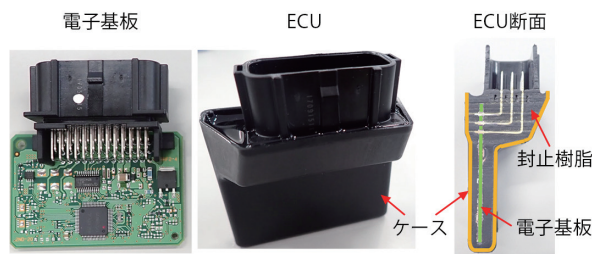


図1 ECUの外観と構造

3 基板小型化の取り組み

3-1. コネクタの表面実装化

ECUに採用されているコネクタは基板穴にはんだ付け端子を挿入してはんだ付けするタイプ(ディップタイプ)の部品であるため、コネクタのはんだ付け面は基板の表裏の両面となる。そこで、コネクタの端子を基板表面のランドにはんだ付けするタイプ(表面実装タイプ)への変更を実施した。これにより、はんだ付け面を表面のみとし、コネクタのはんだ付け面積を37%削減することができた。また、コネクタ変更により空いた裏面に電子部品が実装できるため、基板面積を小さくすることが可能になった(図2)。

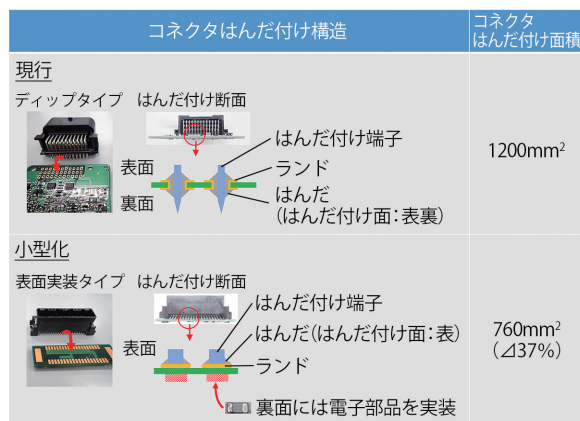


図2 コネクタの変更

3-2. 電子部品の小型化

ECUに採用されているチップ部品の最小サイズは1005 (1.0mm×0.5mm)になる。今回は車載用として流通しているチップ部品の最小サイズである0603 (0.6mm×0.3mm)を採用した。また、CPUはリード(接続端子)が4方向に延びるQFPタイプが主流であるが、パッケージ下に接続端子を隠しているFLGAタイプに変更した(図3)。

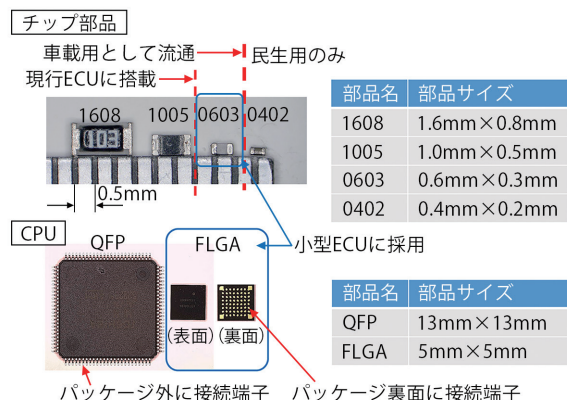


図3 チップ部品およびCPUのサイズ比較

小型化のベースとなるECUには252点の電子部品が搭載されており、そのうち性能が同一で小型化が可能な部品が187点あった。187点の部品の合計面積は約432mm²であったが、小型化により134mm²となり69%の削減をすることができた。(はんだ付け面積も含む)

コネクタと電子部品の置き換えにより基板の面積(片面)は従来品が2400mm²であったところを、1300mm²とすることができ、54%の削減(基板サイズ約1/2)をすることができた(図4)。

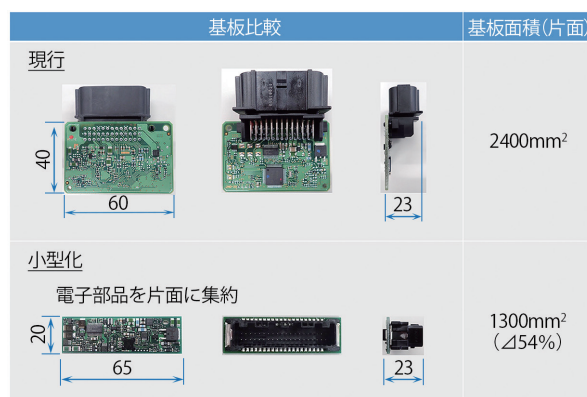


図4 基板サイズ比較

3-3. 小型電子部品のはんだ付け

電子部品を小型化すると、部品サイズに合わせてはんだ付け面積が減るため、はんだ付けが難しくなる。電子部品のはんだ付けは、はんだペーストを用いたはんだ印刷→マウンタ(部品搭載)→リフロー(はんだ溶融)により行う。小型部品のはんだ付けでは、はんだ印刷性と部品搭載精度が影響を受ける。部品搭載精度については、マウンタの性能向上により十分な能力が得られている。はんだの印刷性については、はんだ印刷に使用するメタルマスクの設計と設備の印刷条件により良否が変わる。ここでは、メタルマスクの設計と印刷条件の検証結果について述べる。

メタルマスクとは基板にはんだを印刷するために開口をあけた金属板である。現行、メタルマスクの開口最小サイズは0.65mm×0.45mmである。今回採用した小型チップに対応するメタルマスクの開口サイズは0.35mm×0.35mmとなる。従来比で開口面積が60%小さくなるため、はんだはメタルマスクに容易に充填されず、メタルマスクから抜けにくくなり、十分な量のはんだが印刷されない(図5)。

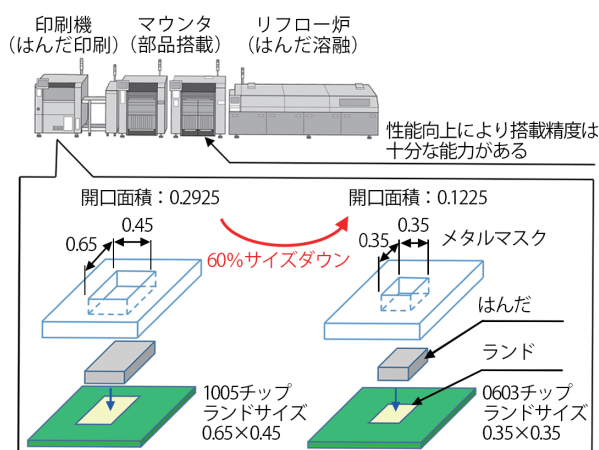


図5 電子部品のはんだ付け工程

まず、はんだがメタルマスクから不足なく抜けるためには、はんだがメタルマスクから抜ける際、メタルマスク側に残ろうとする力(①)よりはんだが基板側に残ろうとする力(②)の方が大きくなければならない(図6)。

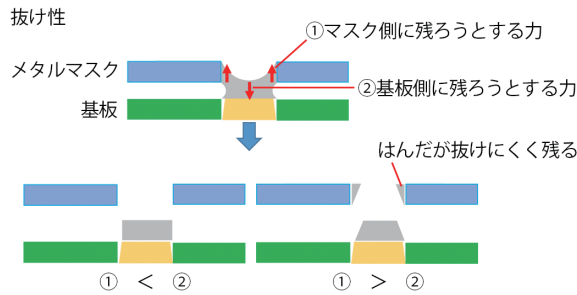


図6 はんだの抜け性

②>①となる2つの力の大小関係は開口面積＝基板に残ろうとする力(②)、開口側面積＝メタルマスクに残ろうとする力(①)の大小関係に置き換えて考えることができる。開口面積と開口側面積の面積比率が②>①に近づくようにすることで、はんだは抜けやすくなる。開口面積はランドサイズによって決まり自由に変わらないため、メタルマスクの板厚を薄くすることで側面積を小さくし、面積比率を現行と同等レベルに改善した(図7)。

部品	現行最小 (1.0mm×0.5mm)	小型チップ (0.6mm×0.3mm)		
メタルマスク 開口寸法	0.65	0.35	0.35	0.35
板厚	0.15	0.15	0.12	0.10
開口側面積	0.330	0.210	0.168	0.140
開口面積	0.2925	0.1225	0.1225	0.1225
開口面積 比率	1.13	1.72	1.38	1.15

図7 メタルマスク開口サイズと開口面積比率の比較

次に、印刷条件についてである。印刷条件はメタルマスクへのはんだの充填に関わるものであり、充填性を高めるため、スキージの角度をねかせ(下方への押込み力が増える)、移動速度を遅くする(開口部への充填時間が増える)条件をテストした(図8)。

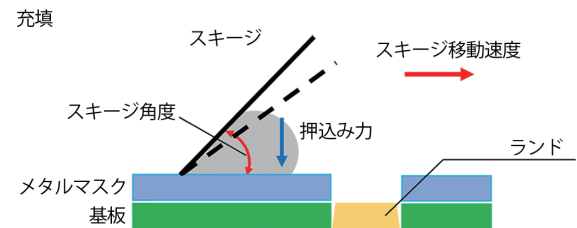


図8 はんだの充填性

検証の結果は図9の通りである。印刷されたはんだの体積比(印刷されたはんだ体積/理論値)で評価しており、数値が100%に近いほど基板へ印刷されたはんだ量が増えており良好な結果となる。メタルマスクの板厚を薄く(面積比率が改善)した効果によりはんだ量は良化した。スキージ角度と移動速度を変更したことで、はんだ量が上限側にシフトした。以上より、小型部品のはんだ印刷においては、0.10 mm厚のメタルマスクを採用し、印刷条件(スキージ角度60→55°、スキージ移動速度20→15mm/sec)を変更することとした。

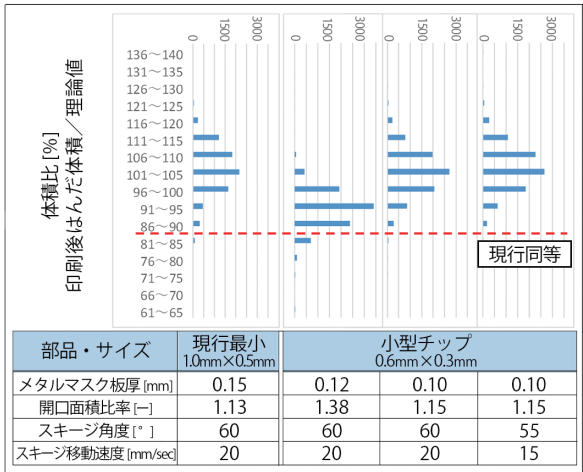


図9 条件違いではんだ体積比バラツキ

4 基板の封止工法変更

現行の基板封止は、ポッティングによるものである。ポッティングでは、樹脂が溢れないようケース・基板間に空間を作ることと、樹脂充填を行うノズルの挿入スペースを設けることが小型化の妨げになる(図10)。



図10 ポッティングによる樹脂封止

一体成型であれば、上記の問題が解決でき、ケースも不要となる。また形状は基板の形をなぞるように成型する等により樹脂量を減らすことで、軽量化やサイズダウンが見込める。

基板をモールドイングする一体成型にはトランスファーモールドとホットメルトモールドがあるが、投資コストの面で

有利であり、低温／低圧で成型可能なホットメルトモールドを選定した。電子部品にダメージを与えずにインサート成型が可能であり、材料の品質向上にともない耐油性、耐熱性、耐環境性も改善されている。

また、ホットメルト成型品は電子基板のはんだ付け部に対するストレスについても有利であると考えた。ヒートサイクル試験を実施すると、はんだ付け部にクラックが発生する場合がある。これは基板を封止している樹脂の熱膨張によりはんだ付け部にストレスがかかることが原因である。現行のケースを用いたポッティングではケースが樹脂の膨張を妨げてしまうため、ケース内部のはんだ付け部にストレスが強く加わる。しかし、ケースのないホットメルト成型では膨張を妨げるものがないため、樹脂が外側に逃げることで、はんだ付け部へのストレスが少ない。特に小型部品は、はんだ付けの面積が小さくなるためクラックが発生しやすくなる。このような場合、固定材で補強してはんだ部へのストレスを緩和する。今回のホットメルト成型品は固定材の有無に関わらず、はんだクラックが発生しない結果となった。ホットメルト成型には、ストレスの緩和効果が期待できる(図11)。

	ケース +ポッティング	ホットメルト モールドディング	トランスファー モールドディング
小型化への 優位性	×	○  ① 基板挿入 ② 樹脂充填 ③ 取出し ノズル挿入スペース不要、 ケースレス、充填空間小	○
材料	ウレタン系	ポリアミド系	エポキシ系
投資コスト	△	○	△
部品への 温度影響 部品耐熱230℃以下	○ (樹脂温度:30~40℃)	○ (樹脂温度:180~230℃)	×
部品への 応力影響 (樹脂充填圧力)	○ (—)	△ (0.3~5MPa)	×
耐ヒート サイクル性	△	○	○
樹脂強度	○	△	○
成型品質	—	△	○

図11 封止工法比較

一体成型により封止面積を必要最低限としたことで、現行品に対し体積は60%、質量は53%減少させることができた(図12)。

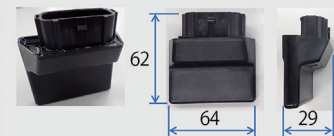
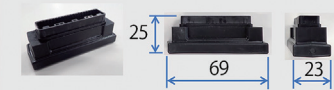
	サイズ比較	体積	質量
現行		64.3cm ³	68g
小型化		25.4cm ³ (△60%)	32g (△53%)

図12 完成品比較

5 工程設計

今回、ユニット自体を小型化するとともに、生産工程の効率化についても製品設計要素とした。

① 部品のはんだ付け

現行品は基板の表裏面に電子部品を配置しており、表面実装工程は片面ずつはんだ付けするので計2回行うことになる。小型化品においてはコネクタ以外の実装部品を片面に集約したことにより、表面実装工程は1回で完了させることができる。

また、コネクタをディップタイプから表面実装タイプに変更したことで、フロー工程が不要となる。コネクタは表面実装工程ではんだ付けが可能であるが、コネクタ1部品のみとなるため、コテはんだ付けロボットにてはんだ付けする。これにより、はんだ付け工程はエネルギー効率、スペース効率共に改善された(図13)。

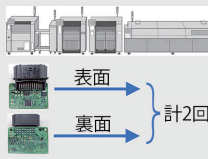
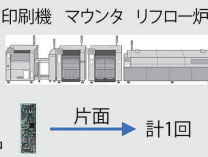
基板構造	表面実装工程(電子部品)	コネクタはんだ付け
現行	印刷機 マウンタ リフロー炉  電子部品 表裏面 表面 裏面 計2回	フロー工程(はんだ槽)  溶融させた はんだへの浸漬 設備サイズ W1140×D1985×H1525
小型化	印刷機 マウンタ リフロー炉  コネクタ 電子部品 のみ 片面 計1回	コテはんだ付けロボット  ロボットによる コテはんだ 設備サイズ W684×D600×H872
エネルギー効率、スペース効率UP		

図13 はんだ付け工程比較

② 封止工程

現行のポッティング工程は樹脂の硬化時間がネックであり、

完成まで3日のリードタイムを要した。今回の取り組みでは一体成型で封止を行うことにより、樹脂の硬化待ちが解消され、リードタイムを1日に短縮することができた(図14)。

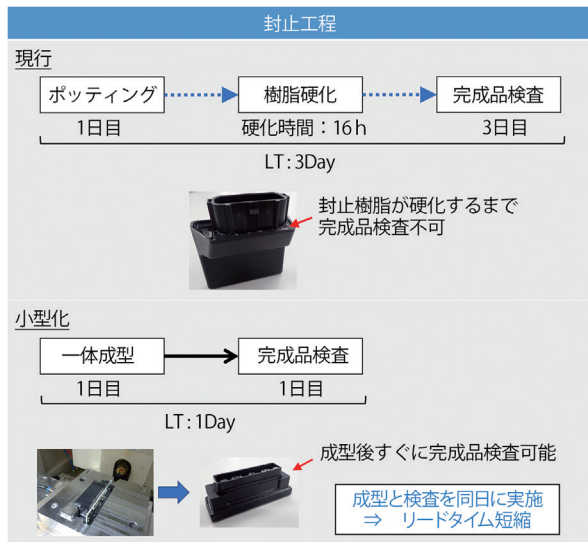


図14 封止工程比較

6 おわりに

開発の狙いであるユニットの最小サイズを目指す取り組みとしては、現行の最小サイズのユニットを体積、質量ともに1/2以下まで小型化することに成功した。また、電子基板の小型化に向けた実装技術、新規の封止技術についてノウハウを蓄積できた。

今回の取り組みにより、ユニットの小型化および生産工程の効率化について、一定の方向性を提案することができたと考えている。一方で、生産工程における品質の安定性と製品コストには課題がある。今後は、製品の信頼性を高めながらコスト削減を目指して、実用化にむけた先行技術開発を続けていきたい。

■ 著者



神谷 貴春
Takaharu Kamiya
ヤマハモーター
エレクトロニクス株式会社
生産統括部
生産技術部



大津 一生
Issei Otsu
ヤマハモーター
エレクトロニクス株式会社
生産統括部
生産技術部

電磁誘導ゴルフカー向けステレオビジョン「effi-vision」

"effi-vision" Stereo Vision for Electromagnetic Induction Golf Cars

山崎 章弘

Abstract

Yamaha Motor has been incorporating automatic driving into products for over 20 years (albeit in limited applications). Electromagnetic induction golf cars, which are capable of automatic driving following induction lines buried in the ground, are now in operation on golf courses throughout Japan since being launched in 1996.

When automatic driving vehicles are faced with impediments such as obstructions and bad weather, electromagnetic induction performs robustly compared to GPS, LiDAR, and cameras. Although initial investment of cost and time for installing induction lines etc. is involved, the electromagnetic induction method is capable of stable operation in locations such as tunnels, where there is no GPS signal, or in conditions such as snow, fog, or poor light, which LiDAR and cameras struggle with. On the other hand, the electromagnetic induction method is not capable of recognizing the surrounding environment. Thus, other methods are required to prevent collisions caused by automatic operation.

In this report, we will introduce the on-road obstacle detection and speed-varying functions of the "effi-vision" collision prevention system based on the stereo vision developed for electromagnetic induction golf cars. Electromagnetic induction golf cars have been equipped with this system since the end of 2018.

1 はじめに

ヤマハ発動機では、限定用途ながら20年以上前から自動走行を具現化している。埋設された誘導線に沿って自動走行可能な電磁誘導ゴルフカーは、1996年の発売以来全国のゴルフ場で運行されている。

電磁誘導方式は、GPS、LiDAR、カメラなどを使用した自動走行手法と比べ、遮蔽や悪天候に対して頑健である。誘導線の設置など導入初期に費用や手間がかかるものの、GPS電波が届かないトンネル内でも使用でき、LiDARやカメラが苦手とする降雪や霧、低照度といった条件下でも安定した走行ができる。一方で電磁誘導方式には、周囲環境を認識する機能がない。自動で衝突を防止するためには、別の手段を用意する必要がある。

本稿では、電磁誘導ゴルフカー向けに開発したステレオビジョンをベースとする衝突防止システム「effi-vision」の走路上障害物検出機能および増減速機能について述べる。このシステムは、2018年末から電磁誘導ゴルフカーに搭載されている(図1)。



図1 effi-vision搭載ゴルフカー

2 背景

ゴルフ場のカートパスは、アップダウンやカーブが多く、木々の間をすりぬけるように進むエリアがある。このような場所では、カートパス周辺の立木やその他の静止物が、カートパスに近接して存在することがあり、前方の立体物を検出するだけのシンプルな障害物センサを使用した衝突防止装置は、そのまま進むと衝突する対象であると判断することがある。この場合、静止物はカートパスの外にあるため衝突しないが、車両は停止する。

このような誤停止が多発すると、目的地への到着が遅くなるだけでなく、乗客にストレスがかかる。これを回避するためには、車両前方の立体物が衝突することのない周辺静止物か、衝突する可能性がある障害物かを正しく判断する必要がある。図2の例は、ゴルフカーを車両正面の立木で止まらないようにしたうえで、曲がった先にいる歩行者で止める必要がある状況を示している。

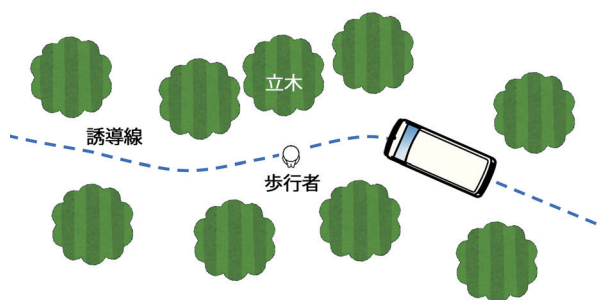


図2 ゴルフ場カートパス

前述の課題の対策案の一つとして、本誌No.48(2012年)で、機械学習(人識別技術)を用いた衝突防止システムの研究内容について紹介した^[1]。人の立ち入りや車両の乗り入れが制限されているゴルフ場では、カートパスに侵入する障害物の種類は限られている。本研究で試作したシステムでは、検出した立体物が人であれば障害物として停車し、人でなければ周辺静止物として通過するが、他の障害物(ゴルフ場をメンテナンスする作業車など)には対応していなかった。また、障害物を正しく検出できたとしても、衝突の可能性までは判断していなかった。

3 effi-vision

このような課題を解決するために開発したのがeffi-visionである。以下にその手法と構成について述べる。

3-1. 走路領域の特定

effi-visionでは障害物の種類に関係なく、車両前方の立体物が、カートパス上にあるかどうかで障害物と周辺静止物を判別している。カートパス上の障害物のみを検出するためには、車両前方の走路領域(この先車両が走行するエリア)を特定する必要がある。しかし、カートパスには明確な境界がなく、車線もない。路面もアスファルトと決まっているわけではないので、リアルタイムの画像処理による走路領域の特定は難しい。また、ゴルフ場には複雑な組み合わせのカーブが多いため、舵角による特定も難しい。

そこで、同じルートを毎回精度良くトレースできる電磁誘導ゴルフカーの特徴を利用して、過去の移動軌跡から、現在の走路領域を特定する手法を開発した。移動軌跡情報を走路マップとして用い、その走路マップと現在の車両位置から画像上の走路領域を特定する。これにより走路上の障害物のみを検出する“走路上障害物検出”が可能になる。外観による走路領域の特定が難しいカートパスにおいて、正しく特定できている例を図3に示す。

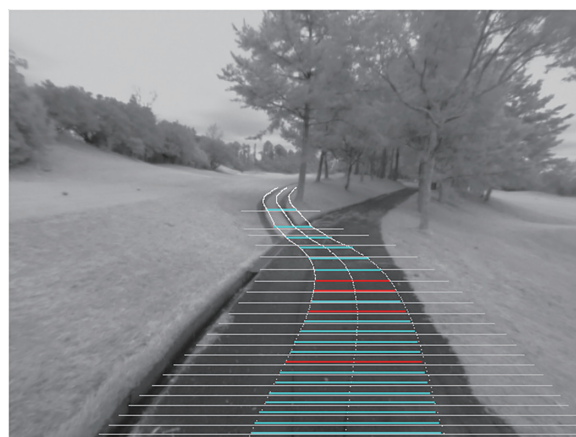


図3 画像上走路領域特定結果

3-2. システム構成

effi-vision(ステレオビジョン)を搭載した電磁誘導ゴルフカーの構成を以下に示す。

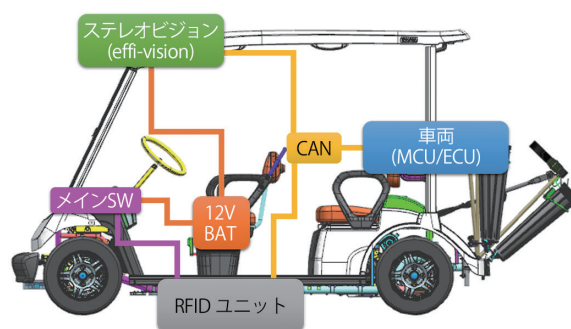


図4 システム構成

車両前方上部に取り付けられたステレオビジョン「effi-vision」は、車両前方を撮影するステレオカメラと画像処理を行う画像処理ボードで構成している。画像処理ボードはSoC FPGA(System On a Chip Field Programmable Gate Array)を搭載しており、ステレオマッチングのような並列化の効果が大きい処理をFPGAで、それ以外をCPUで処理している。

RFID(Radio Frequency Identification)ユニットは、カートパスに埋設したRFIDタグを読み取り、effi-visionは、CAN通信を介してその情報を受信する。タグの主な用途は、走路マップの切り替えである。

走路マップは、タグごとに分割しており(図5)、誘導走行中にタグ上を通過すると、そのタグに紐付けられた次の走路マップに切り替わる。運転者による手動走行から誘導走行に復帰した際にも、タグを通過することによって、走路上障害物検出を再開することができる。



図5 カートパスの走路マップイメージ

車両の位置推定には、車速パルスをもとに計算したオドメトリ(タグからの距離)を用いる。一般に自己位置推定では、精度確保のため高価なセンサやセンサフュージョンを用いることが多いが、このシステムでは以下の理由から追加のセンサを必要としない。

電磁誘導方式は、誘導線に直交する横方向の誤差が少なく、車両は誘導線上にすることが確実で、その位置は距離方向の一次元(オドメトリ)だけで特定することができる。距離方向の誤差は、空気圧の違いなどによるタイヤ径の差やスリップなどによって生じるものの、その累積誤差は、タグ通過時にリセットでき、タグを短い間隔で設置するというシンプルな対策で、累積誤差の増大を予防することもできる。また、走路マップと走行時のタグ間距離の比から、次区間のオドメトリ誤差を予測して補正することも可能である。

3-3. 走路上障害物検出

走路上障害物検出では、車両前方の走路領域を特定して、カートパス上の障害物のみを検出する(図6)。



図6 走路上障害物検出結果

処理の流れを図7に示す。走路マップと現在の車両位置から画像上の走路領域を算出したあと、視差画像から走路領域以外の視差を除去し、立体物を検出する(図8)。

検出結果は、CAN通信を介してゴルフカーに送信し、ゴルフカーは、障害物までの距離に応じて減速・停止する。

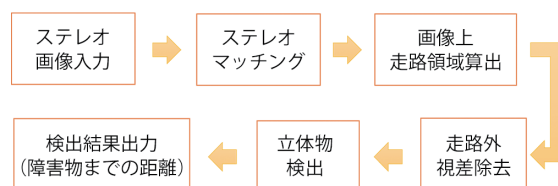


図7 走路上障害物検出処理内容

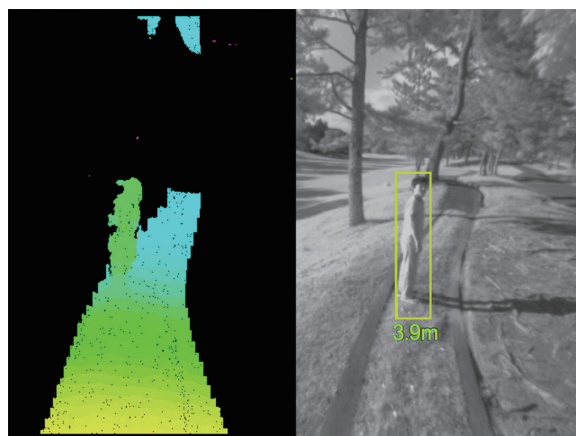


図8 走路領域の視差画像(左)と検出結果(右)

3-4. 走路マップ作成方法

走路マップはあらかじめ作成しておく必要があるが、その作業は、effi-vision導入の際に、一台の電磁誘導ゴルフカーで、画像を収集しながらカートパスを一周すれば完了する。

車種が同じであれば、走路マップを他のゴルフカーにコピーして使用できる(図9)。

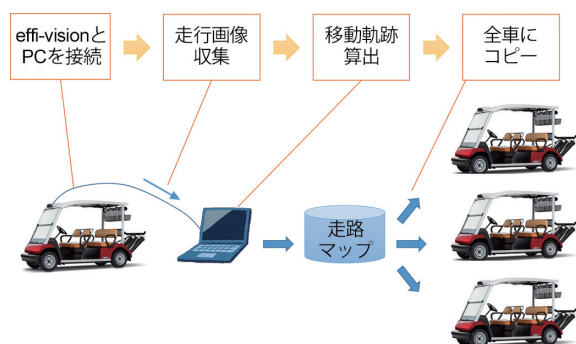


図9 走路マップ作成方法

収集した画像は、PC上でビジュアルオドメトリを用いて処理される。ビジュアルオドメトリは、連続した画像から3次元移動軌跡を推定する画像処理技術である(図10)。

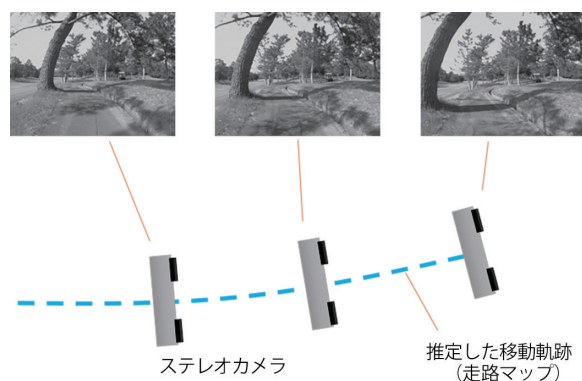


図10 走路マップ作成イメージ

実際の走路マップ作成作業では、画像収集とビジュアルオドメトリを並行して処理するので、画像収集のための走行が完了すれば、程なく走路マップも完成する。

注意点は、周辺環境が静止していることが前提の手法であることで、画角内には移動体がないことが望ましい。人や車両のような実体だけでなく、移動する自車両の影まで走路マップに影響する。なお、人や車両の移動をコントロールしやすいことに加え、撮影日時、天候を選ぶことで影の影響を低減できるゴルフ場は、ビジュアルオドメトリに適した環境といえる。

3-5. 増減速機能

effi-visionではあらかじめ走路マップを用意しているが、そこにはいくつかのメリットがある。走路マップの正否を運用前に確認できるほか、画像上の走路領域特定処理において移動体や悪天候の影響を受けないことや、計算負荷が少ないといったこと等が挙げられる。さらに走路マップは、走路上障害物検出の用途だけでなく、車両の増減速にも利用できる。

電磁誘導ゴルフカーで直線路の车速を上げるためには、カーブ進入前に減速ができる機能を有していることが不可欠だが、従来は自動で減速する方法がなかった。操舵量による減速機能ではカーブ前に減速できず、定点(磁石またはRFIDタグ)で増減速を指示する場合は、別途定点を埋設しなければならない。

effi-visionを搭載した電磁誘導ゴルフカーでは、走路マップを用いて車両前方の走路形状から目標速度を算出することで、カーブおよび下り坂進入前の自動減速が可能になっており、あわせて直線路の高速化も可能である。その結果、従来の乗り心地を損なうことなく、目的地までの到着時間を短縮できた。

4 一般道への応用

effi-visionは、国交省の「中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービス実証実験」^[2]にも電磁誘導車両に搭載して参加している(図11)。



図11 自動運転サービス実証実験用7人乗りカート

この一般道での実証実験では、ゴルフ場とは違う新たな課題が浮上した。対向車などの除外困難な移動体の影響により、実際の走行経路と作成された走路マップとの間にズレが生じることである。この課題には対向車側の領域をマスクすることで対応し、大部分のズレを抑えることができた。一部残ったズレに対してはあらかじめ開発しておいた走路手動修正機能で対応した。

秋田県上小阿仁村では、雪の環境下で評価を実施した(図12)。積雪によるスリップ(オドメトリ誤差)の影響を懸念していたが、数cm程度の積雪では影響は認められなかった。また、今回の評価では、電磁誘導ゴルフカーの走行に積雪はまったく影響しなかったが、レンズカバーへの着雪(図13)によりeffi-visionが障害物を検出できない場面があった。こちらは、今後の降雪地向けの課題となった。



図12 雪道の登坂

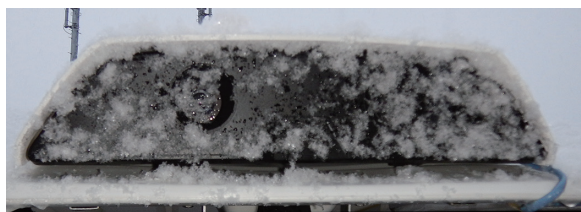


図13 レンズカバーへの着雪

今後の使用フィールドの広がりによる、新たな課題対策や機能開発などの取り組みを通して、effi-visionのさらなるブラッシュアップに努めていきたい。

■参考文献

- [1] 吉田 睦, 山崎 章弘, 人を検出するステレオ画像認識システム, YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW 2012 No.48.
- [2] 国土交通省ホームページ (<https://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/automated-driving-FOT/index.html>)

■著者



山崎 章弘

Akihiro Yamazaki

先進技術本部
研究開発統括部
先進技術研究部

■共同開発先

ヤマハモーターパワープロダクツ株式会社

5 おわりに

電磁誘導ゴルフカー向けに開発した「effi-vision」の障害物検出および増減速機能について紹介した。あらかじめ走路マップを作成して、カートパス上の障害物だけを検出することで、カートパス周辺にある立木などの誤検出と、車両正面になり障害物の未検出を抑制することができた。走路マップは、ビジュアルオドメトリを用いて簡単に作成でき、走行時間短縮にも役立っている。

電磁誘導は古い方式ながら、確実性、環境ロバスト性においてアドバンテージを有している。用途が限定されているとはいえ、意外に柔軟性も高い。例えばカートパスは、一筆書きに限定されると思われがちだが、分岐が可能であるほか、鉄道の線路とは違い誘導線からの離脱もできる。これらは、効率的なルート選択や移動が困難な障害物の回避に使える可能性がある。

家族の思い出作りを応援するファミリー向け スクーター「Free Go」の開発

Helping Families Make Memories: Development of the Family-Oriented Free Go Scooter

大橋 聡 川口 勉 柳原 佑輝 椎名 隆 木下 保宏 曾我 明央



Abstract

Of the approximately 5.8 million motorcycles sold in Indonesia annually, approximately 4.8 million, or 80% of the market, are scooter-type models. Broadly dividing the market into three segments based on price range - basic, standard, and premium - the Free Go was developed to target fathers with younger children aiming to step up from the basic to the standard segment.

This report introduces the development concept of the Free Go, a model which significantly expands the functionality delivered by scooters, and which can be depended on to make the most of valuable family time.

1 はじめに

インドネシアの二輪市場における販売台数は、年間 580 万台で推移しており、そのうちスクーター系の販売台数は年間 480 万台と二輪市場の約 8 割を占めている。市場価格帯によりベーシック、スタンダード、プレミアムと 3 つのセグメントに大別される中、ベーシックからスタンダードセグメントにステップアップを図る子育て世代の男性をターゲットとした「Free Go」を開発した。

本稿では、スクーターに求められる機能を大きく向上させ、家族で過ごす大切な時間を演出する頼れるスクーター「Free Go」の開発概要について紹介する。

2 開発の狙い

今回開発した「Free Go」は、“家族の快適をのせたファミリーコンパクト”をコンセプトに、使い勝手の良い機能と装備でお客様の日常生活を豊かにすることを目指すとともに、インドネシアの街中に溢れるスピードシェイプとは一線を画すヤマハらしい差別化スタイリングにも挑戦した。また、エンジンと車体はスクーターに求められる機能の最大化を目指すと同時に、異なる機能や外観を組み合わせる各国の市場要望に合わせたモデルを迅速に提供していくために、ASEAN 各国の工場で生産可能なプラットフォーム（以下、PF）としての開発を目指した。



図1 フィーチャーマップ

3 開発の取り組み

前述の開発の狙いを達成するため、快適性・利便性を支える機能と装備を積極的に採用した。スタイリングにおいては複数回に及ぶ仮説検証調査に基づくカスタマーインサイトを具現化した。さらに、今後のベース PF となるよう各国の製造要件を考慮した最適設計を行った。

本モデルのフィーチャーマップを図1に示す。

3-1. 快適性・利便性を提供する PF の開発

快適な走りを実現するために既存エンジンを熟成させ、家族で使うための便利な機能を搭載した車体と組み合わせることで、スクーターとしての基本価値を大きく向上させた PF を開発した。

3-1-1. 進化した BLUE CORE エンジン

CVT と FI の最適なセッティングおよび、原動機の最適化による低振動化とドライバビリティにより、スムーズで快適な走りを実現した。また、マフラー膨張室の構造変更、Smart Motor Generator (以下、SMG) の採用等による部品点数 30 部品低減と樹脂ヘッドカバーの採用等により、△ 890g (エンジン単体) の軽量化を達成し、車両の扱いやすさに貢献している。さらに、低コスト FI システムの踏襲、新触媒等のコストダウンにより、低価格で魅力ある商品の実現に大きく貢献した (図2)。



図2 進化したBLUE COREエンジン

3-1-2. 余裕の収納力を持ったシート下ボックス

シート下には、スタンダードセグメントで最大容量となる約 25L のボックスを確保した。家族を迎えにいく際に必要な同乗者用のフルフェイスヘルメットと、急なスコールへの備えとして必需品である合羽が二人分収納できる大きさを目標として開発を行った。フルフェイスヘルメットをシート下ボックスに収納すると、シート高が高くなり乗車時の足つき性が悪化する。そこで「Free Go」では、SMG の搭載によりスターターモーターが不要となったことでできた空間を活かしながら、新設計のエアクリーナーをヘルメットの形を逃がすように配置した。これにより、フルフェイスヘルメットが収納できるボックス深さを確保するとともにシート高を抑え、収納性と足つき性の両立を実現した (図3)。

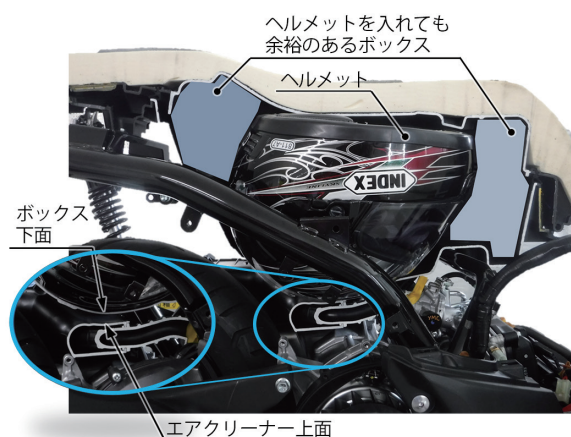


図3 余裕の収納力を持ったシート下ボックス

3-1-3. 燃料タンクのフートボード下移設とフロント給油化

シート下ボックスの容量を最大限確保するため、燃料タンクをシート下からフートボード下へ移設した。移設にともない、給油口は左膝の前のレッグシールド内に配置し、給油時にシートを開ける煩わしさを排除して利便性を向上させた（図4）。

従来のモデルでもシート下ボックスの容量確保の手段としてこの手法は取り入れられてきたが、「Free Go」のタイヤは市場要望で従来のフロント給油モデルよりも外径が大きく、従来の手法で前輪タイヤの軌跡をよけてフロント給油を採用した場合、ライダーの足元が狭く窮屈な車両となる。そこで、今回「Free Go」ではフレームのパイプワークおよび給油口とそれにつながるサブタンクの配置を最適化することで、フロント給油の採用とライダーの足元の居住空間確保の両立を実現した（図5）。

このように、スクーターに求められる機能を向上させながらPFで選択できるタイヤの種類を増やしたことで、組み合わせの自由度による新しいコンセプトの提案や、これまでのモデルとの差別化、多様化する市場要望に対しての柔軟な対応を可能にした。

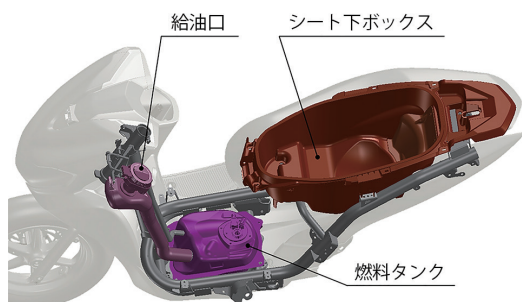


図4 フートボード下燃料タンクとシート下ボックス

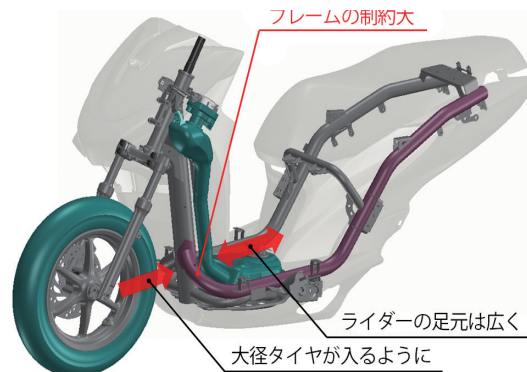


図5 フロント給油と足元の広さを両立したフレーム

3-1-4. 二人乗りでの快適性を提供する新設計シート

新設計のシートで快適な居住性を実現した。前後長720mmの前後のつながりが滑らかで段差の少ないシートとすることで、ライダーとタンデムライダーの乗車位置の自由度を向上させた。グラブバーの高さはタンデムライダーの乗車時にシートよりも上になるように設定し、タンデムライダーの体をしっかりと保持するとともに、握りやすさを向上させるよう、あわせて新設計した（図6）。



図6 二人乗りでの快適性を提供する新設計シート

3-2. 大人の品格を醸し出すスタイリング

ターゲットカスタマーは、「ベーシック領域のスクーターでは機能的に物足りず、プレミアム領域に憧れるものの価格的に断念せざるを得ない、子育て世代ドマンナカの男性」に設定した。デザインコンセプトを起草するにあたり、まず着手したのはターゲットカスタマーとなる男性像を“ペルソナ”として仮定し、彼の人生を振り返り、現在の姿を理解し、未来の理想像を描くことから始めた。「独身時代はスポーティーなかつびモペットで仲間と盛り上がり、結婚し子供を持っからは家族のための移動具としてベーシックスクーターを消費し、可処分所得の向上にともない生活レベルをワンランク上げられる希望に溢れる未来が目にある男性」をユーザーモデルに設定した。

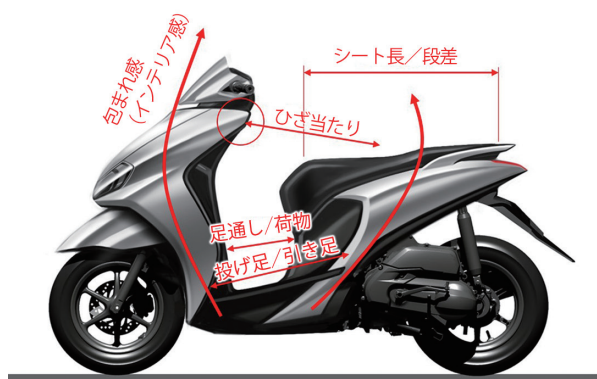


図7 イメージスケッチ検討時のデザイン意図



図8 最終的に決定したデザイン(CG)

そんな子育て世代の男性のカスタマーインサイトに深く潜り込む一方、市場に溢れかえるコモディティー化したダウンフォーススポーティーデザインに飽きがきている現状も調査より明らかになった。デザインが導き出した結論は「欧州文脈のスポーティーデザイン＝大人の品格」と「可視化された使い勝手の良さ」の融合であった。

大衆化されたデザイン群と一線を画す“大人の品格”＝プライドが持てる差別化デザインと、日常生活での使いやすさ・機能性を追求した。「お父さんが選択したスクーターはスゴイ!まさに頼れるお父さん。」家族の中でそんな会話が生まれるようなデザインを目指した(図7、8)。

3-3. 各国に提供できる PF としての開発

共通のエンジンと車体を PF (プラットフォーム) と呼び、それをベースに異なる機能や外観を組み合わせることで開発効率を上げ、各国の市場要望に迅速に対応する PF 戦略において、そのベースとなる PF はどこの国でも生産できることが不可欠な要素である。

本稿では「Free Go」の開発を通じ、PF 戦略のもと開発を行ったフレームの開発事例について紹介する。

3-3-1. 各国製造要件を包括したフレーム溶接継ぎ手

フレームの溶接工程は、フレームをいくつかの部分に分割したサブコンプ工程と、サブコンプをつなぎ合わせフレームを組み上げるコンプリート工程に分けられる。

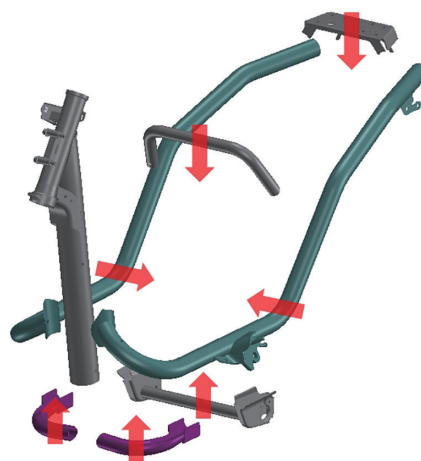


図9 各国製造要件を網羅したフレームサブコンプ分割

サブコンプ工程は工程数・溶接方法・サイクルタイムに自由度があるが、コンプリート工程はその国の設備や生産種類・数量によって異なり、その統一は困難である。そこで、車両の要求特性・機能を満足するフレームをどこの国でもコンプリートできるサブコンプの分割構造を検討し、それらを組み合わせる溶接継ぎ手構造を開発した(図9)。開発構想段階から製造と開発のメンバーが協業して取り組み、サブコンプと継ぎ手構造の検討には工程要件だけでなく、溶接トーチ角度や溶接熱影響、溶接順番にも考慮が必要で、これらの製造要件とフレームの全体剛性・強度の両立のためには何度も構想を練り直し、溶接継ぎ手構造を作り上げた。

3-3-2. 複数要求の最適解を導くフレーム解析手法

既存フレームを踏襲し、利便性向上のための「フロント給油化」と、PF 戦略に沿った「ASEAN 各国で製造可能なフレーム」を両立する開発を行った。既存フレームの操安性・強度や前述した製造課題の情報を最初に収集し、目標を決定して開発を進めた。

フロント給油化により、車両左側のパイプ配置には自由度がなく、車両右側の構造でどのように全体剛性・強度を確保し、製造要件を満足するかが最大の課題であった。従来の全体解析では各種要件の掛け合わせの検証には膨大な時間

が掛かるが、今回は変更箇所だけを切り出すことでモデリング時間を短縮した。その結果、メインパイプと右側ダウンチューブの3つの要素（合流点の高さ・上下角度・前後角度）の寄与率検証を短期間で複数回実施することが可能となり、複数要求の最適解を導いた（図10）。

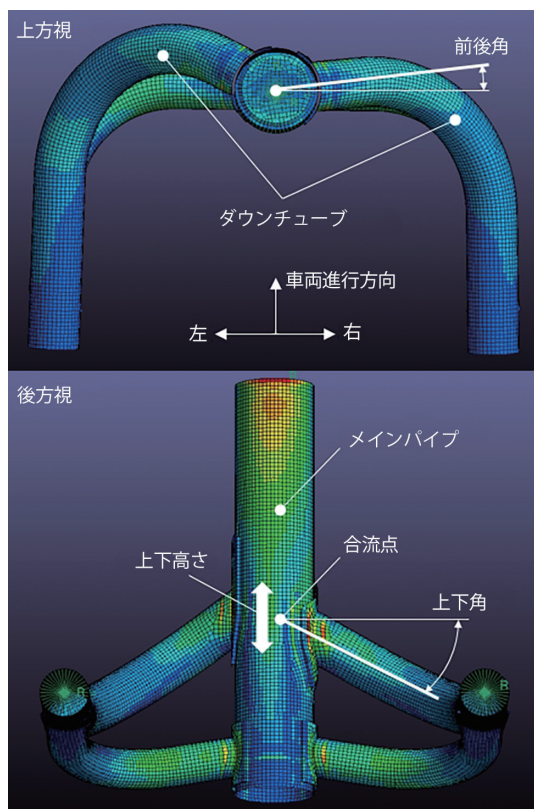


図10 部分切り出し解析モデルと検証要素

今回の開発は技術的に特別な新規性があったわけではないが、開発上流での目標設定と課題抽出、設計手法の工夫を愚直に行うことで、後工程でのやり直しを防止することができた。開発と製造が一体となり ALL YAMAHA で開発した事例といえる。

4 おわりに

本モデルは、スクーターとしての快適性・利便性を最大限に向上させ、手にとっていただいたお客様の生活を豊かにし、日常の思い出を彩るモデルとすることをスローガンとして開発を行った。目標達成に向け一つの技術をていねいに積み上げた結果、購入いただいたお客様から高い評価をいただくことができた。

本モデルが少しでも多くのお客様に届き、家族との思い出作りに役立つことを期待するとともに、今後この PF が市場要望にあわせた外観・機能をまとい、ASEAN 各国に広がることでお客様の生活をより豊かにしていくことを願っている。

■著者



大橋 聡
Satoshi Ohashi
PF車両ユニット
PF車両統括部
SC開発部



川口 勉
Tsutomu Kawaguchi
PF車両ユニット
PF車両統括部
SC開発部



柳原 佑輝
Yuuki Yanagihara
PF車両ユニット
PF車両統括部
SC開発部



椎名 隆
Takashi Shiina
パワートレインユニット
パワートレイン開発統括部
第1PT開発部



木下 保宏
Yasuhiro Kinoshita
デザイン本部
プランニングデザイン部
プランニング1G



曾我 明央
Akihisa Soga
生産本部
製造統括部
PF車体技術部

Refreshing Sporty Compact Scooter RS NEO 「LSR125」の開発

Development of the RS NEO LSR125 Refreshing Sporty Compact Scooter

鍾少華 洪百合 葉青蒼 彭正志 劉秋城 陳原豪 謝金育



Abstract

As it moves into the maturity phase and sees increased awareness about environmental preservation, the Taiwan scooter market is demanding scooters which deliver both performance and fuel efficiency. To suit this market, Yamaha Motor has developed four platforms by vehicle class, being S, M, L, and LL, and is rolling out product groups based on them. The newly developed LSR125 is based on the S platform for the smallest vehicle class, features an air-cooled BLUE CORE 125cm³ engine with Smart Motor Generator, and also includes a new frame design and lighter weight overall. By developing this new model based on the S platform but also incorporating the new, distinctively-Yamaha design DNA evoking the YZF-R-Series, Yamaha Motor has created an entry-level lightweight urban scooter for younger riders providing ease of handling in a cool package. This report showcases the LSR125, which was developed to target sports-oriented customers who demand high cost-performance.

1 はじめに

二輪市場の成熟化に加え、環境保全に対する意識の高まりもみせる台湾市場において、性能と燃費を両立するスクーターが求められている。その市場に向けてヤマハ発動機は、車格別にS、M、L、LLの4つのPF(プラットフォーム)を構築し、商品群を展開している。今回開発した「LSR125」は、その中で一番小さい車格のS-PFに、Smart Motor Generatorを採用した空冷BLUE CORE 125cm³エンジンを搭載し、車両全体の軽量化と新フレーム設計に取り組んだモデルである。本開発では、新S-PFのベースを構築するとともに、ヤマハ独自のYZF-Rシリーズを彷彿とさせる新しいデザインのDNAを織り込むことで、若者のエントリーモデルとしてカッコよさと扱いやすさを兼ね備えた都市部向けの軽量スクーターを実現した。本稿では、ハイコストパフォーマンスを追及するスポーツ志向のお客様をターゲットに開発した「LSR125」を紹介する。

2 開発の狙い

本モデルの開発では、台湾市場における新S-PFとして、Sporty・Fashion・Basicの複数カテゴリーに適用可能なベースPFの構築を目指した。その第1弾となる「LSR125」においては、「Refreshing Sporty Compact Scooter」をコンセプトに、軽量化や実用性の向上などの基本価値の向上に加えて、エントリー層の若者でもわかりやすいスポーティなデザインで差別化することで、カッコよさと気軽さを兼ね備えた日常の相棒となるようなモデルを目指し、下記3点を開発目標に設定した。

- 1) 軽快で扱いやすいコンパクトな車体
- 2) 市街地走行に適した快適性と機動性
- 3) 先進的でスポーティな外観



図1 フィーチャーマップ

3 新S-PFの概要

現在のS-PFでは、Sporty、Basic、Fashion Cool、Fashion Cuteの4つのモデルを展開している。そのため、前述の3つの開発目標を達成しながら、新S-PFでも同様の展開性が確保できるように、予備設計を織り込んだ骨格の最適化を実施した。

本モデルのフィーチャーマップを図1に示す。

3-1. 新S-PFの台湾市場向け構想

まず、現行S-PF 4モデルの共通基本機能と外観の共通条件を抽出し、その内容を包含する骨格(フレーム、足回り、エンジンレイアウト)の最適化を実施した(図2、3)。フレームは、カバー取付構造をまとめることでブラケットを新S-PFシリーズで最大限共用することとした。また、エアクリナーを扁平化して縦方向の空間を確保することで、今後の派生モデルにおけるシートの乗り心地、足付き性、メットインの収納性等の設計自由度を高めた。さらに発進加速に対しては、同一PFで2種類のスロットルを設定することにより価値の差別化を図っている。「LSR125」においては、プログレッシブスロットルを採用することで十分な発進加速度を実現し、街中で意のままに操れる軽快な走りを可能としている。一方で派生モデルでは、ノーマルスロットルを採用することでBLUE CORE エンジンのスムーズな走行特性を活かした快適な乗り心地を提供することができる。

3-2. 進化したBLUE CORE エンジンの搭載

すでに台湾市場に導入されているBLUE COREエンジンをさらに進化させた。新機構のSMGを採用することで、始動がス

ムーズになり静粛性を向上させた。また、始動系をシンプルな構造にしてエンジン幅をコンパクト化することに加えて、ヘッドカバーを樹脂化することで、台湾市場向けの従来モデルに搭載のBLUE COREエンジンよりも600グラムの軽量化を実現した。

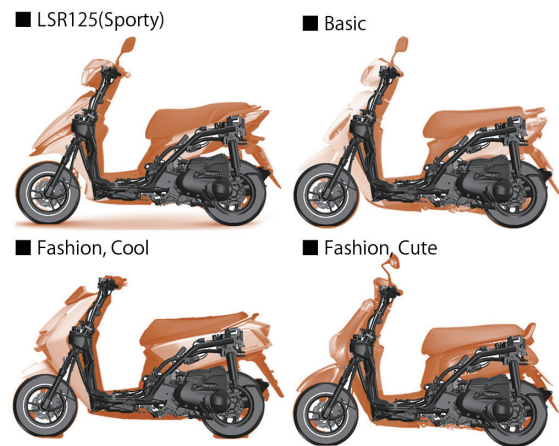


図2 最適化した新S-PF

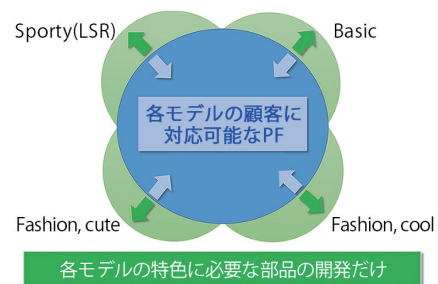


図3 新S-PF構想

3-2-1. エアクリーナーの形状変更(収納スペース確保とエンジン性能の両立)

広い収納スペースの確保と足付き性を両立させるためには、エンジンの高さを極力低くする必要がある。その手段としてエアクリーナーを扁平形状にすることで、シート下ボックスとの干渉部分を従来モデルより27.5mm低くした(図4)。エアクリーナーはエンジン性能への寄与が大きい重要部品であるため、形状検討の際にはシミュレーションにより容積、吸気管レイアウトを最適化した。それにより、従来モデル同等のエンジン性能を確保している。

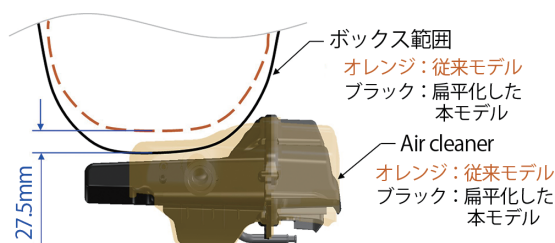


図4 エアクリーナーの扁平化

4 LSR125の特徴

4-1. 初採用のプログレッシブスロットル

台湾は、人口2300万人に対して二輪車登録台数は約1500万台で、運転資格を持たない人を差し引くと一人あたり少なくとも一台以上の二輪車を保有していることになる。その用途の多くは市街地の通勤や通学などで、短距離の個人使用が主である。バイク密度が高い環境(図5)での走行となるため、発進加速は、多くのお客様が重視する項目となっている。



図5 通勤時間の台北橋

このニーズに応えるため、本モデルでは巻き取り径を真円としないプログレッシブスロットルを採用した(図6)。設計においては、市場調査および日常使用条件のデータ収集と分析を行うことで、発進加速時に頻繁に使用するグリップ角度の範囲を導き出し、作り込みを行った。その結果、全域でのスー

ズな加速性能を維持しながら、従来の巻き取り径が一定のノーマルスロットルに対する発進加速の向上(図7)と、中／高速域での優れた操作性を実現した。

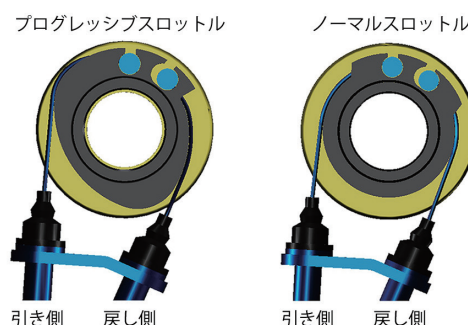


図6 プログレッシブスロットル

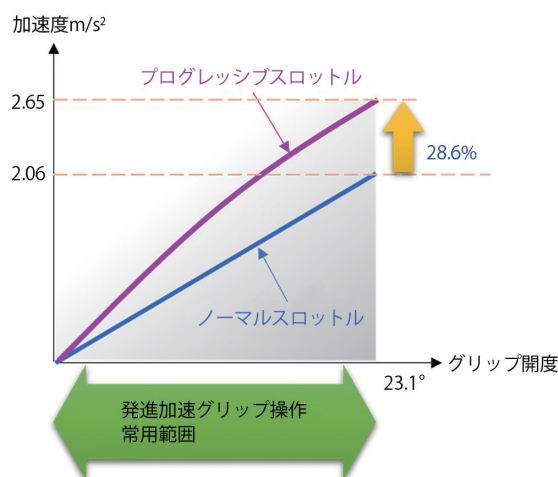


図7 発進加速度向上率

4-2. 扱いやすい軽快でコンパクトな車体

ヘッドカバーの樹脂化や新機構のSMGの採用等により、エンジン質量を台湾市場向けの従来モデルに対して600グラム低減させた。さらに高剛性と軽量化を両立させた新設計フレームを採用することにより、台湾市場の同クラスで最軽量となる装備質量93.0kgを達成し、扱いやすさと軽快な走りを実現した。

4-2-1. 高剛性と軽量化を両立する新S-PF骨格の最適設計

新S-PF派生モデルのスタイリング開発における自由度を高くするため、事前に派生モデルのキャラクターラインおよびスタイリング要件を把握して一括企画することで、次世代の新S-PFモデルを再構築した。

フートボード下に燃料タンクを配置するレイアウトにおいて、フレームの軽量化と操安性を確保するために、フレームは左右非対称とした。剛性解析における各部の変位量分析では、片側サスペンション配置であることから左右剛性に明らかな差異があることが判明したため、左右それぞれの骨格の形状および板厚を最適に設定することで軽量と高剛性を両立させ、ハンドリングの左右バランスを向上させた。

4-2-2. 振動抑制能力の向上

台湾市場への導入において、さらなる振動抑制を検討した。クランクの慣性質量および角度と振動伝達を抑制するエンジン懸架やリヤサスペンションの角度を最適設定し、エンジン挙動の衝撃吸収能力が高いゴムダンパーを採用した。振動抑制能力の向上に加えて、車体を従来よりさらにコンパクトにすることができた。また、フートボードの車体への締結構造をゴムによるフローティング構造として、走行中の振動を低減した。

4-3. デザイン

活潑な若者が毎日気軽に使えるスポーツギアをテーマに、車両の特徴である軽量かつコンパクトさを感じさせつつ、先進的でスポーティなスタイリングとした。

4-3-1. 風の流を感じさせるスタイリングデザイン

停車中でも動きを感じるプロポーションやシャープな面構成により、スポーティさを表現した。またパーツの合わせ構造を利用したフローティングパネル形状や、サイドカバーに設けたエアダクトモチーフにより、前から後ろへの空気の流を感じさせるとともに、空気を纏いながら走る爽快感をイメージさせる軽快で躍動感のあるスタイリングとした(図8)。



図8 スケッチ

4-3-2. YZF-RシリーズのDNA

フロント周りは、ハイパワーLEDによるフラッシャーとLEDポ

ジションランプにより先進的な表情を実現した。パーツの隙間から前方を睨むランプレイアウトは、YZF-R1の持つ鋭い表情をモチーフとした。

テールライトも同様にYZF-Rシリーズの縦形状を継承し、ヤマハとしてのアイデンティティを織り込んだ構成としている。デザインにおいては、光学シミュレーションを利用したレンズカットの屈折原理を応用することで、高額なライトガイドを使用することなくコストを抑えた構造で、先進的な印象のライン発光効果をもたせることができた(図9)。



図9 R DNAを継承するテールライト

4-4. ユーティリティ

日常の相棒として毎日気軽に使っていただくために、ヤマハのスクーターでは初採用となるUSB充電ソケットを搭載した(図10)。走りを楽しみながら、定格5V 2Aの出力でナビゲーションやスマートフォンに電源供給することができる。



図10 USB充電器

5 おわりに

「LSR125」は、2019年2月に生産を開始した。販売開始後まもなく実施した市場調査でのお客様へのヒヤリングの中で、開発目標に設定した「軽量で扱いやすい車体」「快適な走り」

「YZF-RシリーズのDNAを継承したスポーティな外観」について高い評価をいただいております。開発チームの思いが確かに伝わったことを実感している。

新S-PFでは、派生モデルを考慮した親モデルとしての開発は完了し、それぞれのモデルで設定する特色と開発目標が達成できる展開性を確保した。PFの一括企画と設計は、最少の資源投資で最大の効果、すなわち、開発効率の大幅な向上につながる。他のPFに関しても、S-PFと同様にPFの親モデルを正常進化させることで、商品性を維持しながら開発を続けていく。

今後は、この開発経験をグローバルモデル等の海外モデル開発にも生かし、革新的かつ魅力的で信頼できる商品を効率的に提供したいと考えている。

■開発メンバー



■著者



鍾 少華
Shaohua Chung
YMRT
開発統括室



洪 百合
Paiho Hung
YMRT
CREATIVE本部
企画部



葉 青蒼
Chingtsang Yeh
YMRT
CREATIVE本部
DESIGN部



彭 正志
Zhengzhi Peng
YMRT
開発一部
車体開発課



劉 秋城
Chewcherng Liou
YMRT
開発二部
引擎設計課



陳 原豪
Yuanhao Chen
YMRT
開発三部
電子系統開発課



謝 金育
Chinyu Hsieh
YMRT
開発三部
車体電装開発課

船外機「F300D」の開発

Development of the F300D Outboard Motor

琴野 瑛仁



Abstract

As with the automotive and motorcycle businesses, environmental regulations continue to be introduced in the marine industry. Even in emerging nations, where regulations have been looser, the transition from 2-stroke to 4-stroke engines is underway.

In addition, whereas inboard and stern drive motors used to be the mainstream power sources for large commercial boats, outboard motors are becoming more popular thanks to their greater ease of maintenance and liberation of boat interior space. At the same time, boats are becoming larger in order to increase work efficiency and profitability, and requirements for higher-output outboard motors are constantly increasing.

To respond to these market trends and customer requirements, Yamaha Motor has developed its largest-ever output commercial model outboard motor, the 4-stroke, 300-horsepower F300D.

1 はじめに

自動車や二輪車業界と同様に、マリン業界にも環境対応規制の整備が進み、規制の緩かった発展途上地域においても、2ストロークエンジンから4ストロークエンジンへの移行が進んでいる。

また、従来、船内機や船内外機が主流となっていた業務用途の大型船に対しても、メンテナンス性や船内スペース活用に対する優位性等の理由により、船外機の活躍の場が広がっている。同時に、業務効率／収益性アップのために船の大型化も進んでおり、船外機に対しても高出力化の要望が日々強まっている。

そういった市場の変化、お客様の要望に応えるべく、業

務用途をターゲットとしたコマーシャルモデルとしては、ヤマハ史上最大馬力となる、4ストローク300馬力の船外機「F300D」を開発した。

2 開発の狙い

本モデルでは、伝統的な“ヤマハらしさ”を継承し、さらに発展させた、「絶対的な信頼性」を開発の最重要コンセプトとして設定した。船外機が壊れるとお客様の業務停止、利益減少に直結するだけではなく、最悪の場合火災や漂流に至る可能性もある。世界の様々な環境条件においても、“壊れない”という信頼性を絶対的なものとするために、耐久性などの項目に従来よりも厳しい基準を設定して開発を行った。使われる環境に関しても、気温や水温の幅に対応する

だけではなく、水質や燃料の質に対するロバスト性も向上させた。

船外機は全世界の多様な船に取り付けられ、様々な使われ方をしているが、中でもコマーシャルモデルの使われ方は多様性に富む。コーストガードのように、加速性やスピードが求められる軽負荷艇から、大量の荷物や人を運搬する漁業やトランスポートといった重負荷艇まで、幅広い負荷条件下で使用される（図 1、2）。そこで、多様な使用条件下においても、最大限のパフォーマンスを発揮するために、本モデルでは、「低～中回転域のスラスト力の向上」に取り組んだ。



図1 トランスポート艇(中負荷艇)



図2 トランスポート(重負荷艇)

また、エンジンを船の後端に取り付けるという船外機の特性上、航走時の船の姿勢の安定化や操縦性を向上させるために、船外機には常に軽量化が求められる。多様な業務用途のニーズに対して、しっかりと適応するために、「軽量ハイパワー」も重要コンセプトとして設定し開発を行った。

さらに、先進国プレジャーモデルに採用している電子制御式の「Drive By Wire システム」を業務用途エンジンとしては初めて採用し、快適な操船性の提供を狙った。

3 商品の特徴

本モデルの最重要コンセプトとして設定した「絶対的な信頼性」を達成するために、耐久性目標をプレジャーモデル

の2倍以上に設定して開発を進め、最終的には社内耐久評価にて、目標を超える耐久性を達成した。

本モデルでは、プレジャー市場にて実績を積んできたF300Bを開発のベースエンジンとして設定した。F300Bの特長である「軽量ハイパワー」をしっかりと活かすことで、本モデル発売開始までヤマハ最大の業務モデルであったF250Hに対して、50馬力の出力アップにも関わらず、14kgの軽量化を実現した。

表1に主要諸元を、図3に断面図を示す。

表1 主要諸元比較

モデル名	F250H	F300D
出力	183.9 KW / 5,500 rpm	220.6 KW / 5,500 rpm
エンジン形式	4ストローク V6	DOHC with VCT
排気量	3,352 cm ³	4,169 cm ³
圧縮比	9.9	10.3
質量	283 kg	269 kg
発電容量	46 A	70 A
ギヤ比	2.00	1.75
燃料	レギュラガソリン	
シフト方式	メカニカル	Drive By Wire

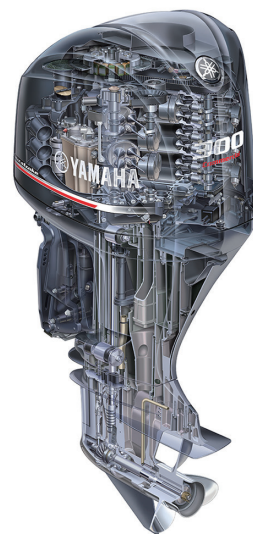


図3 断面図

3-1. 絶対的な信頼性

3-1-1. パワーユニット

ハード面では、耐摩耗性の高いプラズマ溶射シリンダーに加えて、従来よりも耐摩耗性を向上させたオイルリングを採用したことで、長時間使用時のオイル消費の悪化を防ぐことができています。また、排気バルブは、高負荷、高回転条件にて長時間使用されることを想定し、熱負荷耐力の高い材料へ変更した。

ソフト面では、オクタン価の低い燃料を使用することを想定して、燃料噴射や点火時期などの燃焼条件を最適化する

制御を行うことで、異常燃焼によるダメージリスクを低減させた。

3-1-2. ドライブユニット

本モデルの最大の特徴はドライブユニットである（図 4）。信頼性、耐久性を向上させるため、プレジャーモデルの F300B で使用していたギヤケースよりも 1 サイズ大きなギヤケースを採用した（図 5）。それにより、内蔵されているギヤやベアリングなどの重要部品に対して、しっかりと余力を持たせた設計を可能とした。特にギヤについては、最新の設計思想に基づき、歯面中央部の広い面積で負荷を受けることで面圧を下げるとともに、歯厚を確保することで歯元の応力も低減した。また、製造面においても、最新の歯切り設備を採用したことで、歯面のできばえを向上し、大幅な耐久性の向上を達成した。



図4 ドライブユニット

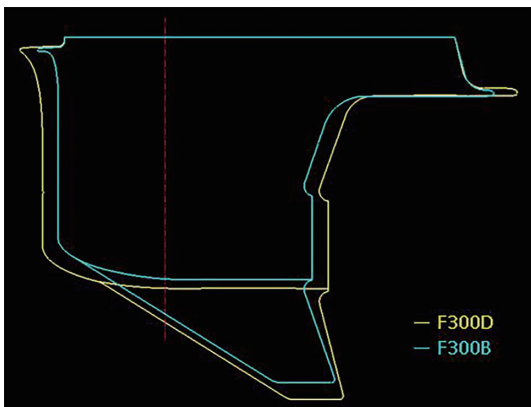


図5 ギヤケース比較

本モデルのドライブユニットには、もう一つ大きな特徴がある。エンジンに対して 1 サイズ大きなギヤケースを組み合わせたことで、ドライブ軸とシフト軸間にピッチのズレが生じた。そこで、そのズレを吸収するため、シフト軸上に、船外機として世界初となるユニバーサルジョイント構造を採用し、軸間ピッチのズレを吸収させた。この技術は、多様化するお客様のニーズに応えるために加速化させているユニット開発において、今後重要な役割を果たすことになると思う。

3-2. 快適性、利便性の向上

荷物や人を多くの載せた重荷条件では、加速や減速時に大きなスラスト力が必要となる。本モデルでは、翼面積の大きい「SALTWATER XL series」プロペラを採用したことによって、低～中回転域のスラストを従来モデルより大きく向上させ、優れた操船性を実現した（図 6）。

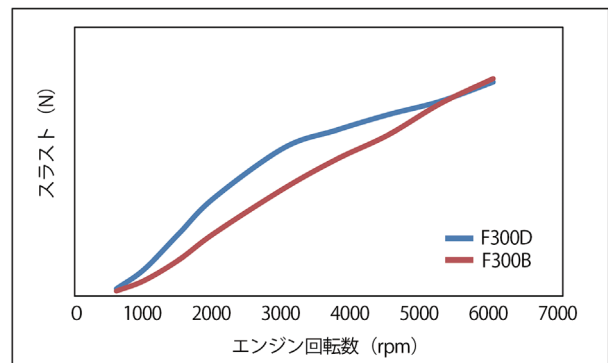


図6 スラスト比較

従来のコマーシャルモデルでは、リモートコントロールボックスから船外機の間をケーブルで機械的に接続して、直接的に操作を行うメカニカルシフト方式が採用されていた。しかし、お客様の使用する船の大型化、多機掛け化によるケーブル抵抗の増加、さらには長期間使用することによるケーブルの劣化などの原因により、リモートコントロールボックスを操作する荷重が高くなるという課題を持っていた。そこで、今回業務モデルとしては初めて、Drive By Wire システムを採用した。Drive By Wire システムは、リモートコントロールボックスと船外機を電氣的に接続し、操作情報を電気信号によって船外機へ伝える。機械的な結合から開放されたことにより、リモートコントロールボックスの操作荷重は大幅に低減した。引っ掛かりや遅れの無い思い通りのシフト操作、かつ繊細なスロットル調整が可能となり、操作性が飛躍的に向上した。

業務用途の船には、位置情報を取得する通信設備や魚探といった航海機器や、漁業に使用するポンプやウィンチなど、様々な電気機器が搭載されており、機器を稼動させるための電力の確保が必要となる。船外機の発電量で賄い切れない場合は、船内スペースに発電機を設置しなければならない場合もあり、船外機に対する高発電量の要望は高い。本モデルは、70Aという高発電能力を保持しており、お客様の使い方の幅を広げることに貢献できると考える。

4 おわりに

業務用途、コマーシャルモデルの中でフラグシップモデルとなるF300Dは、大型4ストロークモデルとしては過去類を見ないほどの「絶対的な信頼性」を達成することができた。お客様の期待を超える品質に仕上がったと確信している。

本モデルの開発を通し、世界中のユーザーの生の声を聞く機会を多数頂戴した。ご協力頂いた皆様には、今一度感謝申し上げたい。“お客様の期待を超える価値”を創造するためには、期待をしっかりと把握し、その期待を上回る必要がある。今後もお客様の声をしっかりと聞いて、お客様に寄り添った製品を生み出せるよう、努力を続けて行く。

■著者



琴野 瑛仁
Akihito Kotono

マリン事業本部
企画統括部
企画戦略部

フラッグシップスポーツボート「275SD」の開発

Development of the flagship sports boat "275SD"

岡本 順敬 藤野 健一 神津 知之



Abstract

Yamaha Motor Co., Ltd. launched its first jet propulsion boats equipped with engine and jet pumps mounted on personal watercraft (PWC) in 1996. After that, the addition of the 4-stroke in conjunction with an extension of the previous PWC, enabled the model to move from a jet boat specialized in running, into the category of a more full-fledged runabout boat (a boat which is more open planned and designed for enjoyment in running and designed for towing various items). The name sports boat is now used, and the lineup has been expanded to 19 ft, 21 ft, and 24 ft, gaining the No. 1 share in each class.

Development of the new model "275SD" in the 27 ft class, higher price / high value-added area, is introduced here in order to increase the business scale by further expanding the lineup, and to establish a presence as a premier brand in the runabout category.

1 はじめに

ヤマハ発動機株式会社(以下、当社)では、パーソナルウォータークラフト(以下、PWC)に搭載していたエンジンとジェットポンプをボートに搭載したジェット推進機ボートを1996年に市場投入した。その後、4ストローク化すると同時にそれまでのPWCの延長として、走りに特化したジェットボートからより本格的なランナバウトボート(居住区がオープンで走りや引き物を楽しむボート)のカテゴリーに参入するためにスポーツボート(以下、SB)と名称も改め、19ft、21ft、24ftとラインアップを拡充し、各クラスでNo.1シェアを獲得している。

さらなるラインアップの拡充により事業規模拡大を図るとともに、ランナバウトカテゴリーにおけるプレミアムブランドとしてのプレゼンスを確固たるものにするために、より高価格／高付加価値領域の27ftクラスに新モデル「275SD」を開発し市場導入した。

2 開発の狙い

SBは船底より吸い込んだ水を噴射することで推力を得るウォータージェット推進ならではの以下の特徴を備え、他社との差別化ができています。

1. コンパクトなエンジンだからこそ成しえる流麗なスタイリングと広々とした居住空間
2. 水へのアクセスが容易で使い勝手の良い船尾空間
3. きびきびとした運動性能
4. 回転物が突出していないことの安心感

この特徴をさらに進化させるさまざまな改良を加えるとともに、モデルコンセプト「Next Premium Family Fun Flagship model」に相応しい新フィーチャーDRIVE®を備えたモデルを開発した。

3 仕様と技術の特徴

3-1. 主要諸元

本モデルの主要諸元を表1に示す。

表1 主要諸元

全長(m)	8.2
全幅(m)	2.7
全高(m)	3.0
乾燥重量(kg)	2479
燃料タンク容量(L)	340.7
種類・気筒数・配列	並列 4 気筒 直接水冷却
総排気量(cm ³)	1,812
エンジン出力(kw)	183.9kw(250ps)/7500rpm×2
ドライブ形式	φ160mm、 シングルステージ軸流ポンプ ステンレス 3 翼インペラ
US 標準価格	\$129,999

3-2. 性能／運動性

従来サイズのSBは比較的波の穏やかな湖、または入り江等で使用されるため、波の影響を大きく考慮する必要はなかったが、艇の大型化にともないオフショアでの航走も想定し、波間航走での凌波性の改善が必要となった。

そこで、船首部のV字船型の見直しを行った。図1に従来モデルの24ftと同条件で波間航走した時に発生するGの回数を比較する。5～9.9G(9.8m/s²)の回数で50%、10G以上で25%低減することができた。

次にジェット推進ボートの特徴である運動性への取り組みについて説明する。競合他社を上回る速力、加速性能を満足させるためにSBでは初となるスーパーチャージャーによる過給エンジンを2機搭載した。開発当初、SB特有の船尾の負圧作用により加速性能が目標値に達しなかったため、対策として加速時に極端に船首が上がらないよう船尾側の揚力を増加させるハル形状の変更を行った。その結果、速力性能、加速性能ともに目標を達成し、フラッグシップモデルにふさわしい性能を確保できた(図2、3)。

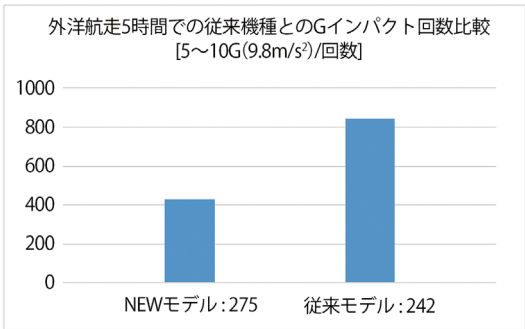


図1 衝撃G回数

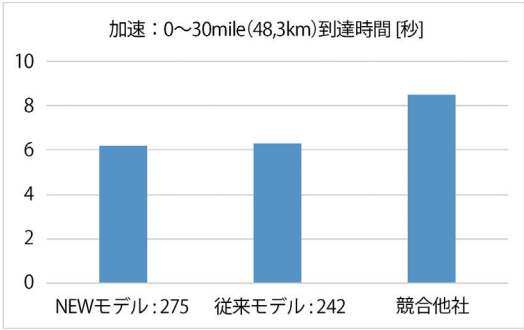


図2 加速性能

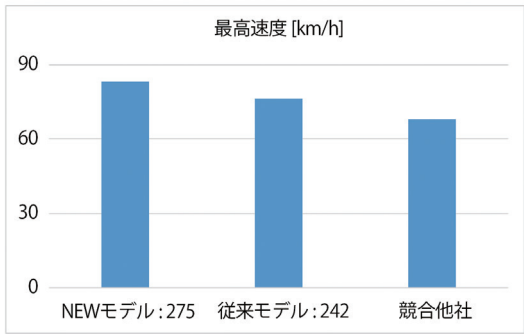


図3 最高速度

3-3. DRIVE開発(パドルシフト&スロットル+EPS)

SBは、ジェット推進の特性上、プロペラ艇と比較して低速の舵効き性が劣り、着岸などが難しいとされてきた。一方、前後進の切り替えが後進用バケットの上げ下げでできるため、プロペラと比べてシフトショックがなくスムーズに切り替えられるという利点もある。そこでPWCですでに採用されていた「RiDETM」をベースに、ステアリングから手を離さずに、エンジン回転数調整とシフト操作を直感的に操作できる機能DRiVEを開発した。DRiVEにより艇体大型化にともなう課題克服に留まらず、着岸のストレスを低減でき、本年のマイアミボートショウで革新的技術に贈られるイノベーションアワードを獲得することができた。

基本となるシステムは、SB用DBW(Drive By Wire)+電子ステアリングと、PWC用RiDEを融合させた構成となっている(図4)。

パドルレバーはステアリングホイールと連動して動くため、ステアリングホイールを持ちながら操作しやすい位置で、またパドルを操作する手の位置が左右入れ替わり、誤操作にならないようにステアリングの回転角度を135度とした。また、従来からのリモコン操作時はクルージングの際のステアリングホイールの微調整の容易さを確保しつつパドル信号線の耐久性への影響を考慮して270度に設定した(図5)。

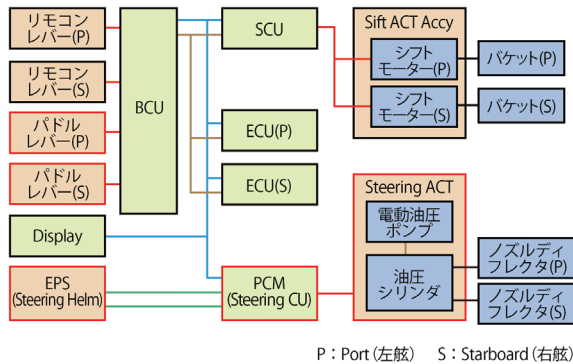


図4 DRiVEシステム構成図



図5 ステアリングホイール回転角

パドルをステアリングホイール連動方式としたため、左右にあるパドルの信号線をステアリング周辺に収納しながら、回転方向への耐久性を確保することが最重点課題であった。四輪のようにエアバックやパッドスイッチ信号を送付するステアリングリールコネクタを用いることは、非防水コネクタ構造を採用することとなり、SBへの搭載は難しい。そこで、ステアリング可動に耐えられるように、ステアリングホイールの根元部に設けた円筒形のケース内をハーネスが特定区間U字上に移動するような構造を採用し、耐久性を確保した。防水性は、パドルセンサとパドル信号線の接続を樹脂モールドとし、ハーネスへの接続は防水コネクタを使用した(図6)。

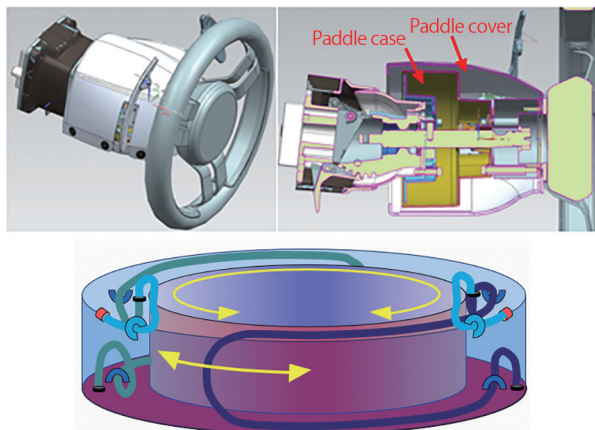


図6 ステアリング部のハーネス可動確保構造

現行のステアリング操作は、ラック&ピニオン機構にてステアリングケーブルを動作させている。ギア比の関係でステアリング操作角度を狭くした場合、ステアリング操作荷重が大きくなる。従来はステアリング操作角度を拡大(540度)し操作荷重低減を図ったが、本モデルでは回転角を270度としたため、操作荷重低減が課題となった。

そこで、リモコンレバーモードとパドルモード時の操作角度切替機能と合わせて、操作荷重低減のために電動油圧パワーステアリングシステム(EPS)を採用した。

DRiVEシステムは27ftでも最上位モデルのみの搭載で販売台数が少なく、できる限りハード部分は最小限の開発とするため、船外機の既存システムを最大限活用した。ソフト開発は、パドル切替時のステアリング可動域変更機能、EPSセッティング機能や故障診断機能を従来の船外機/PWC/SB用の故障診断ツールYDIS(Yamaha Diagnostic System)に集約化し、警告メッセージ表示機能はディスプレイに集約させた。既存システムにて代替したことにより、ユーザーの使いやすさ向上とシステム導入コストの低減を実現できた。

3-4. エンジン発電容量アップ

DRiVEの採用で新たに追加される電装部品の電力消費量が増加するため、発電容量の見直しを行うことが必要となり、エンジン内部に構成されるA.C. MAGNETO GENERATOR (ACG)の開発を行った。発電容量アップには以下の2点を考慮した。

- (1) 着岸時にステアリング操作回数が増える。
- (2) 着岸時はエンジン回転数を上げて推力量を確保する。

この特徴より、要求される発電容量は、中間回転数域での発電量である。この領域の発電量を増やすためには、ACGの大型化が必要だが、同時に発熱量が増えるため発電不良などの問題を引き起こす可能性もある。そのため、本開発ではエンジンの搭載スペースと冷却効率の制約がある中で、ACGの発電容量を最適化し、要求発電出力と信頼性の両立を確保した。

3-5. デザイン

SBのデザインDNAであるファストバックスタイリング(図7)を踏襲しつつ、スポーティーで特徴的なサイドウインドシールドを採用した。タワーには初めてのスカイライト付きのハードトップを採用し一体感のある流麗なサイドビューを実現した(図8)。



図7 ファストバックスタイリング



図8 サイドビュー

また、ダッシュパネルにはスタンドアップタイプの12インチタッチパネル式マルチファンクションディスプレイ(MFD)を配置した。エンジン情報、艇体情報の表示に加え、ナビゲーション、オーディオなどボート全体を一括して操作、管理できる。ステアリングの奥にはDRIVEの重要な操作部であるパドルレバーを配置した。各所に青色LEDを配し先進的でモダンなデザインを実現した(図9)。



図9 ダッシュパネル周り

3-6. 居住、船尾空間

特徴である広々とした居住空間と水へのアクセス性を向上させるためにセンターウォークスルーレイアウトを採用した。

そのために2機掛けのエンジンピッチを600mmから

900mmに広げ船首から船尾まで段差のないウォークスルーとし広い居住空間を提供した(図10)。

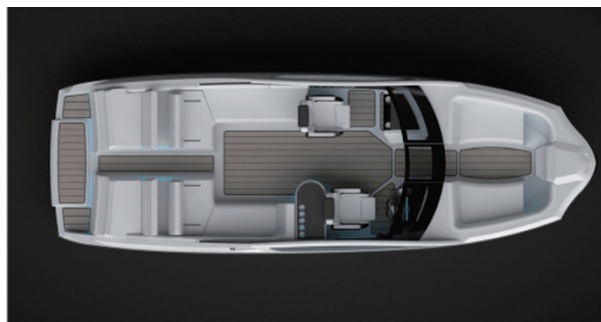


図10 センターウォークスルー

また後方のシートは背もたれを可動式とし、停泊時はベッドとして使用でき、多彩なシートレイアウトを楽しむことができる(図11)。

キャビンスペースにはプレミアムモデルに相応しいフィーチャーとして新たにギャレー(図12)を採用し家族でくつろぐ“時”を演出した。



図11 シートレイアウトの一例



図12 ギャレー

4 おわりに

275SDは単に既存のSBをスケールアップ開発するだけでなく、プレミアムブランドとしての地位を築くために多くの新機能、新機構を織り込み、競合他社を上回る狙い通りの艇に仕上がった。引き続き進化、改良に取り組み、リーディングカンパニーとして今後も新しいことへトライし、常に先進的な機能を開発することでお客様に選ばれ続ける商品を提供していきたい。

■参考文献

[1]ヤマハ発動機ホームページ「RiDE」 <https://www.yamaha-motor.co.jp/marine/lineup/marinejet/ride/>

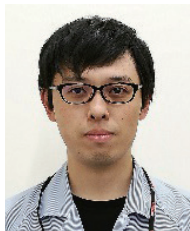
■著者



岡本 順敬
Yukitaka Okamoto
マリン事業本部
ボート統括部
WV開発部



藤野 健一
Kenichi Fujino
マリン事業本部
ボート統括部
WV開発部



神津 知之
Tomoyuki Kouzu
マリン事業本部
マリンエンジン統括部
第1開発部

和船「W-43AF」

W-43AF Utility Boat

児島 慎平 杉本 亮平 相川 徹 丸亀 正文 加藤 祐資 馬淵 大輝



(開発中の状態につき一部生産仕様と異なる)

Abstract

Yamaha Motor's utility boats are multi-purpose commercial craft powered by outboard motors. In addition to fishing, they are used in a wide variety of applications, such as passenger transport, tourism, materials transport, and aquaculture work. Since Yamaha Motor began manufacture of FRP utility boats in 1968, over the following 50-plus years these craft have become a mainstay of marine industries around Japan, forging deep connections with lifestyles and society itself.

The highly popular W-38CF was launched in 2007 as the largest of Yamaha Motor's utility boats, but in recent years, demand has been increasing in key markets such as the Tohoku region and Okinawa for an even larger model. In the Tohoku region, they are used in the farming of aquaculture products such as wakame seaweed, hoya sea squirts and hotate scallops, which were also key fisheries markets to show recovery soon after the 2011 Tohoku earthquake and tsunami disaster. In Okinawa, they are used for tourism such as mother ships for diving and snorkeling, and these markets are showing healthy growth along with the higher numbers of overseas tourists visiting Japan.

To meet the requirements of these markets, Yamaha Motor has developed its largest-ever utility boat, the new flagship W-43AF model.

1

はじめに

ヤマハ和船（以下、和船¹⁾）は、船外機を推進機とする汎用の業務用小型船舶²⁾であり、漁業のみならず、旅客輸送・観光・物資運搬・作業船など様々な用途で使われてきた。1968年のFRP³⁾和船製造開始以降その歴史は50年以上に及び、日本全国の水辺の産業を支える基盤として、我々の暮らしや社会とも深い関わりを持っている。

その最大サイズとして高い人気を誇っているのが2007年

に発売されたW-38CFであるが、近年その主要市場である東北や沖縄から、さらなる大型化のニーズが高まっていた。東北はワカメやホヤ・ホタテの養殖船としての用途であり、震災後もいち早く立ち直りを見せた有力な漁業市場である。沖縄はダイビングやシュノーケリングの母船としての観光用途であるが、こちらはインバウンド需要などにより好調な市場の伸びを見せている。

今回、これらの市場ニーズに応える商品として、ヤマハ史上最大の新たなフラッグシップ和船「W-43AF」を開発するに至った。

- 1) 一般的には日本古来の構造や様式を持つ木造船を和船と呼ぶが、本稿ではヤマハ発動機（株）がヤマハ和船として製造・販売するもののみを指すこととする
2) ここでは日本小型船舶検査機構による検査対象となり得る船舶を指す
3) 繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastics）

2 開発コンセプト

和船は業務艇の中でもシンプルな構成を特徴としており、現地の用途に応じて客先で様々な艤装⁴⁾を施された上で使用されることが前提である。シンプルであるがゆえに船としての素性の良さが商品性に大きく影響し、一旦開発された後は永きに渡って同じ形で供給されるケースが多く、いわば「ロングセラー前提」という難しさのある商品でもある。

4) 艇に漁業機器や航海機器、各種装備や設備、推進装置などの取り付けを行うこと

本艇の想定主要市場は前述の通り東北と沖縄であるが、両地域のニーズは大きく2つに集約される。

- 収容量アップによる業務効率向上
(東北では最大積載重量・沖縄では最大搭載人員数)
- 艇の大型化による安定性や作業性の向上

当社が和船の新規開発を行うのは W-38CF 以来のことであるが、新世代のフラッグシップ和船としてこれらのニーズに応えるため、開発コンセプトを以下のように定めた。

- ① キャパシティの最大化
定員や最大積載量の向上と、それを支える収納容積やフロア面積の拡大
- ② 10 年分の進化
ヤマハ和船として 10 数年振りとなるモデルにふさわしい最新船型⁵⁾や最新スタイリングへのアップデートおよび想定する艤装機器の見直し
- ③ 和船の魅力の継承と熟成
2つの市場においてこれまでヤマハ和船が提供してきた商品性をさらに高めるとともに、それらを1つの艇として成立させる

5) 船体（特に船底）の形状。静止時・航走時ともに性能に大きな影響を及ぼす

3 商品の特徴

3-1. 主要諸元

「W-43AF」の主要諸元を表1に、商品全体像を図1に示す。

ヤマハ和船で最大の広さ（フロア作業エリアの広さは当社既存最大艇「W-38CF」比、約120%）を有するとともに、和船の中で最大の定員と積載量を実現している。

表1 W-43AF主要諸元

W-43AF 主要諸元	
全長	13.18 m
全幅	3.20 m
全深	1.16 m
船体質量	3,021 kg
最大積載量	5,161 kg
定員	50 名 ⁶⁾
総トン数（標準仕様）	4.5 トン
推奨搭載船外機（二機掛け）	F225FETX FL225FETX
航行区域	限定沿海

6) 操船者を含む。艤装状態等による。



図1 商品全体像
(開発中の状態につき一部生産仕様と異なる)

7) OP はオプションを示す。

3-2. 異なる地域ニーズを満たす仕様の実現

ヤマハ和船が東北・沖縄の両市場で選ばれてきた理由の一つに、船としての「浮きなり」、つまり浮かんだ姿における水面との関係性を評価いただけていることが挙げられる。業務艇にはその従事する業務に応じて人間が作業するフロア面と水面との間に、適切な位置関係がある。本艇の場合、両地域でその要求する方向性が異なることが最大の課題であった。

- 東北：最大積載量を重視するため、重荷時でもフロアが高い位置にあり、水面とのクリアランスをキープしていることが求められる
- 沖縄：ダイビングに利用する際、水中へのエントリー性を高めるため、乾舷⁸⁾の低さが求められる

また、水面との位置関係を語るうえでもう一つの重要なパ

ラメータが、「コベリ高さ」である。これはフロアから舷端⁹⁾までの高さを表し、船内作業に従事する人の作業性や安心感に大きく影響する最重要寸法の一つである。図2に示す通りこれらの寸法は互いに関連しているため、綿密な調整が必要であった。

- 8) 舷端から水面までの垂直距離
9) 船縁のこと。フロア外周を囲む壁の天端

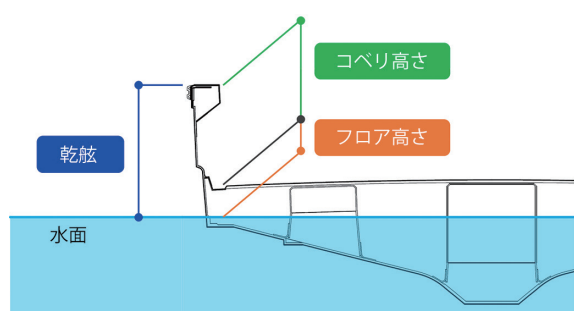


図2 水面との位置関係

W-43AFの開発では、まず両地域で適切なコベリ高さの選定を行った。高さを変えながら実際に体を当てて体感できるモックアップを製作して市場調査に臨むことで、両地域で共通して使い勝手が良い寸法を見出すことができた。さらに、両地域で実際の利用シーンに同行して実地調査を行うことで、それぞれの地域で求められる水面との位置関係を実感するとともに理解することに努めた。

そのうえで、船側の排水口を増設するとともに、長手方向のフロア排水勾配を調整することで（図3-1、3-2）、両地域で使いやすい水面との位置関係を一つの製品仕様に集約することができた。

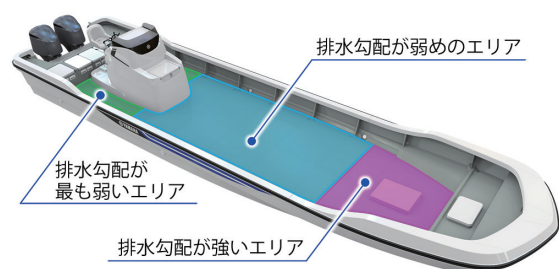


図3-1 フロア勾配の概要
(CGにつき一部生産仕様と異なる)

結果、本艇のサイドビューは当社従来モデルと趣を異にするものとなっている（図4）。当社和船にはすでに各地から高い評価を得ているものも多いが、単に何かを拡大するだけの設計では、本艇の目指す目標は実現できなかった。

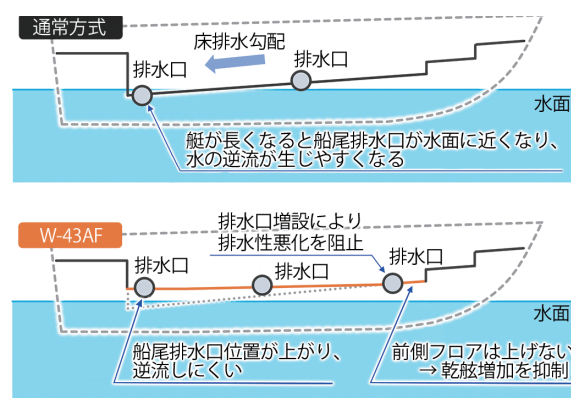


図3-2 フロア勾配に関する模式

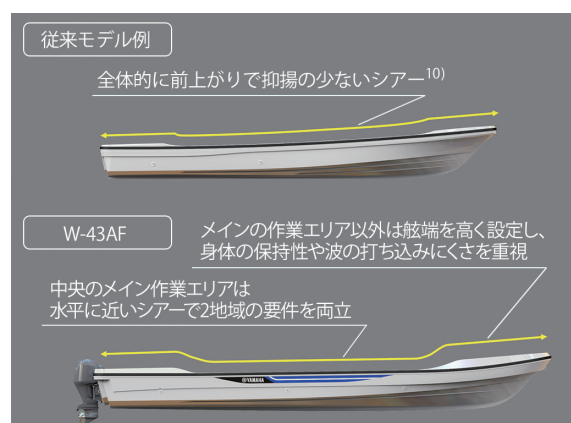


図4 W-43AFと当社従来モデルの例のサイドビュー比較
(CGにつき一部生産仕様と異なる)

10) 舷弧。船を横から眺めた時に船体の上端を連ねる曲線

3-3. 船型

本艇では、以下の二つのポイントを念頭に船型のアップデートを行うことで、ヤマハ和船の進化をお客様に感じていただけるよう開発を進めた。

- ① 荷受け¹¹⁾の向上と浮きなりの適正化
- ② 安定性や凌波性¹²⁾の向上

①については、3-2で述べた浮きなりの適正化に対して、船型面から見直しを図った。業務艇の特徴として、積荷や乗員の多寡によって、重量重心の変動が非常に大きいことが挙げられる。両市場の実地調査に基づき重量重心の振れ幅を推定し、浮心¹³⁾位置の見直しや荷受けの向上を行うことで、両地域のどのような場面でも船体が適正に浮くことに努めた。

11) 積荷などにより船の重量が変化した時の、船の沈み具合や姿勢の変わりづらさ

12) 波浪のある水面を快適に航走できる性能

13) 船体が生む浮力の中心位置

②については、多数の乗員や積荷が片側に寄った時でも不安感を抱かせることがないように横安定性を重視したほか、重荷時の波や飛沫の打ち込み対策として、船首フレア¹⁴⁾に大型水平面を設ける形状をプリテストによって造り込んだ。また、乗り心地に配慮した船首設計や、エアドロー¹⁵⁾耐性を重視した船尾設計など、タフな業務のコンディション下で高い凌波性を発揮できるよう、最新のノウハウを織り込んだ(図 5-1、5-2)。

14) 船首付近の船側面に、波の打ち込み防止などを目的とした造作を設けること。一般的に緩やかな凹の曲率を設ける

15) プロペラが空気を巻き込み、推進力の急激な低下を起こすこと。旋回や急加速、船体上下動により発生しやすい

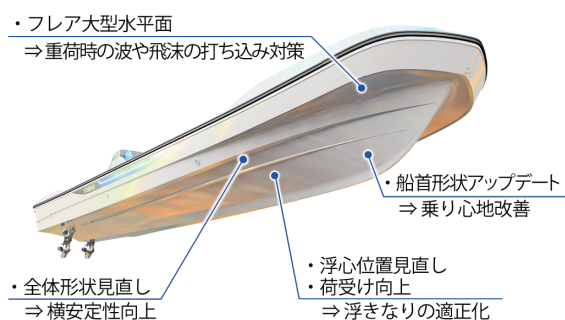


図5-1 船型フィーチャ(1)
(CGにつき一部生産仕様と異なる)

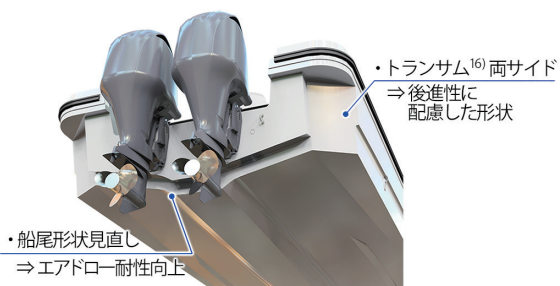


図5-2 船型フィーチャ(2)
(CGにつき一部生産仕様と異なる)

16) 船体後端の立壁のこと。船尾板

3-4. 収納量の向上

特に沖縄市場においては、定員の多さから必要数のライフジャケットをはじめとする荷物の収納には大きなスペースが必要とされる。

本艇ではハッチ増設やステアリングボックス装着時の床下など、従来はデッドスペースとなっていた区画を活用することで、想定する物品の全てが収納可能なスペースを確保することができた(図 6)。

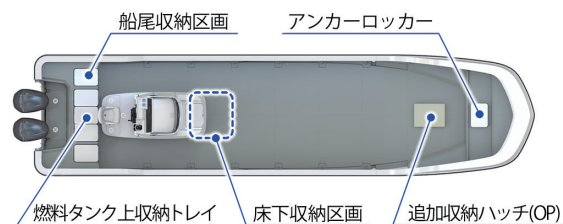


図6 大型収納スペースの配置
(CGにつき一部生産仕様と異なる)

3-5. ステアリングボックス

W-43AF では、主に沖縄の市場をターゲットとしてステアリングボックスを新規設計した。

近年、大型多機能ディスプレイを初めとする航海計器の発展には目覚ましいものがあるため、これらの艙装スペースを拡大した。また、操船者の体格に応じたドライビングポジションの調整ニーズが高いことが市場調査によって判明したため、各機器の位置調整に配慮した設計としている。

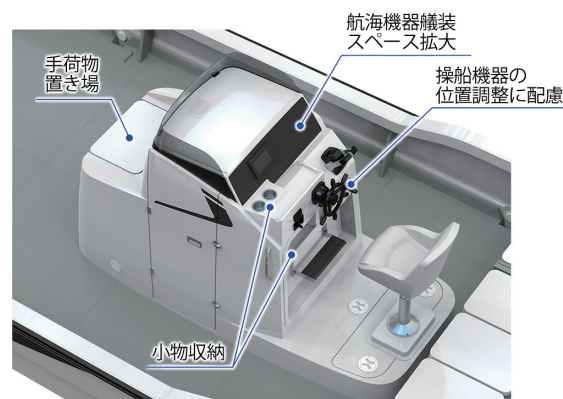


図7 ステアリングボックス
(CGにつき一部生産仕様と異なる)

本艇は、沖縄市場でダイビングやシュノーケリングの母船として使われる。観光で訪れるお客様がスマートフォンなどを持ち込んだ際の手荷物置き場として使えるよう、前方に収納を設けるなどの改善も盛り込んだ。働く人と観光利用する人、双方にとって使いやすいものができると考えている(図 7)。

3-6. スタイリングの取り組み

業務艇におけるスタイリングでは、機能との両立が重要となる。スタイリングに対する市場の保守性を見極めるとともに、モデルライフの長期化に備えて陳腐化しにくいことも重要である。W-43AF の開発では、デザイナーも市場調査に同行し、実際に現地で意見交換を行うことで、これらの課題に対応した。

本艇の特徴である大型フレア平面につながる流麗なキャラクターラインや、船首からの乗降性を高めるスクエアバウ¹⁷⁾は、機能とスタイリングを両立した表現として本艇のアイコンとなった（図8）。

17) 平面形が角型で幅広のバウ（船首）を指す。通常の砲弾型平面形（先細り形状）と比べ、船首フロアの幅やスペースが広く確保できる利点がある。



図8 W-43AFのスタイリングスケッチ



図9 ステアリングボックスのスケッチ

沖縄で使われるステアリングボックスにおいては、レジャーシーンにふさわしいスタイリッシュな造形を実現し、新世代の和船であることを強くアピールしている（図9）。

4 おわりに

和船というカテゴリーは、一見すると単純で、難しい商品と感じられるかもしれない。しかしながらこのシンプルな商品を構成する1本1本の線は、熟考の末に生まれた必然の帰結である。

震災からの復興を目指す東北の豊穡の海や、沖縄の美しい海をはじめとして、日本全国のみならず世界各地の水域で、

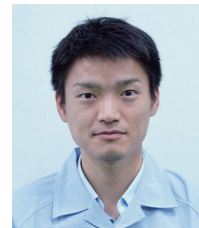
「海・人・社会を結ぶ」プラットフォームとしてW-43AFが活躍することを願う。

そして本艇が、そこで働く人々や船を利用する人々に貢献することは、当社がマリン長期ビジョンで掲げている「海の価値を更に高める事業へ」の飛躍につながると確信している。

■著者



児島 慎平
Shimpei Kojima
マリン事業本部
ボート統括部
ボート開発部



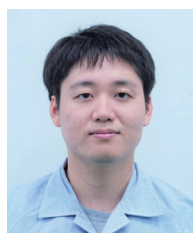
杉本 亮平
Ryohei Sugimoto
マリン事業本部
ボート統括部
ボート開発部



相川 徹
Toru Aikawa
マリン事業本部
ボート統括部
ボート開発部



丸亀 正文
Masafumi Marugame
マリン事業本部
ボート統括部
ボート開発部



加藤 祐資
Yusuke Kato
マリン事業本部
ボート統括部
ボート開発部



馬淵 大輝
Hiroki Mabuchi
マリン事業本部
ボート統括部
ボート開発部

産業用ドローン YMR-08

YMR-08 Industrial Drone

吉原 正典 松村 大祐 米原 慧紀 大西 慎太郎
春田 祐吾 水野 健太 四宮 隆 神田 大

Abstract

Crop spraying utilizing unmanned helicopters has developed principally around rice paddy pest control, now accounting for more than 40% of this work in Japan. However, rice production volume in Japan has been on a long-term downward trend, with traditional large-scale cultivated rice paddies decreasing due to increasingly diversified agriculture and expansion of nearby housing etc. in recent years. At the same time, a wide variety of drones (a general term for UAVs or Unmanned Aerial Vehicles) with three or more rotors are appearing on the market, ranging from compact models (several hundred grams) for photography etc. to large models (5-30 kilograms) for agricultural usage etc. These unmanned aircraft are bringing about what is called the “aerial industrial revolution.” At the very least, still and video photography using drones is becoming a permanent fixture in our lives. Through the convergence in recent years of drone functionality (which has become easily accessible and convenient) and requirements for spraying work in the increasingly-diverse agricultural market (including the ability to cope with small-scale operations, spraying on demand, and high-productivity and expanded usage), drones are anticipated to cause a revolution in agriculture as well, leading to more fulfilling lifestyles for all.

However, agricultural multi-rotor type drones have only been on the market for a few years, and many of them include parts, batteries, etc. more suited for hobby purposes. For the market phase to transition from growth to maturity, it is necessary to offer drones which people find easy to use and deliver performance meeting their expectations. These were the requirements which the development of the YMR-08 drone, SP1-10 liquid spraying accessory unit, and GR1-10 granule spraying accessory unit aimed to satisfy.

1

はじめに

無人ヘリコプタによる散布は、従来から水稻防除を中心に発展してきており、日本での水稻防除の4割以上を担うまでに成長してきた。しかし、日本における米の生産量は減少の傾向を長らく続けており、近年では水稻からの転作による農業の多様化や隣接住宅の増加などにより、従来からの大規模な水稻圃場が変わりつつある。一方、空の産業革命をもたらすと言われているドローン(UAV:Unmanned Aerial Vehicleの

総称)が3枚以上のローターを持つ無人機の形で、撮影用などの小型タイプ(数百グラム)から農業用などの大型タイプ(5～30キログラム)まで多種多様に登場している。少なくともドローンによる撮影映像は、我々の生活に著実に浸透しつつある。この、より身近で簡便になったドローンの性能は、近年多様化が進む農業での散布作業における市場ニーズ(小規模化対応、適時散布、多作・用途拡大など)に合致しており、農業においても革命を起こして我々の生活をより豊かにしてくれることが期待されている。



図1 フィーチャーマップ

表1 主要諸元

機体	
機体名称	YMR-08
最大離陸重量(kg)	24.9 以下
ローター枚数	8
ローター配置	4X+サイド二重反転
フライト時最大全幅 (mm)	2181
フライト時最大全長 (mm)	1923
全高 (mm) ※最大離陸重量目安	669
収納時最小全幅 (mm)	1799
収納時最小全長(mm)	559(フレーム部) 573(スキッド部)
フレーム形式	モノコックシェル
アーム収納形式	ストレート
ローター	
ローター径(inch)	26
ローター形式	ハイブリッドローター
機体電力・バッテリー	
平均消費電力(kW)	2.5
バッテリー定格容量 (Wh)	852
定格電圧 (V)	44.4
サイズ(mm)	L:360 W:149 H:166
バッテリーマネジメントシステム	HBM S-S L1※
※ハイパワーバッテリー用マネジメントシステム	
充電器	
充電時間 (時間)	通常充電: 2.5 急速充電: 1
散布装置	
液剤散布装置	液剤散布装置
液剤散布装置名称	SP1-10
最大タンク容量(L)	10L
吐出方式	ノズル方式(2 個)
散布幅(m)	4
粒剤散布装置	粒剤散布装置
粒剤散布装置名称	GR1-10
最大タンク容量(L)	10L
吐出方式	インペラー式
散布幅(m)	5 [除草剤 (1kg 粒剤) 使用時]

しかしながら、農業用マルチロータータイプのドローンは、まだ登場から数年しか経っておらず、ホビー用途向けの部品、電池等を組み合わせたドローンも多い。成長期から成熟期を迎えるためには、一般のユーザーが使い勝手の良さや期待どおりの能力を実感できるようなドローンを提供する必要があ

る。そのような使命をもってドローン本体YMR-08とその付随アプリケーションである液剤散布装置SP1-10、粒剤散布装置GR1-10を開発した。

2 開発コンセプト

スタート時のコンセプトは「電動ドローンで業務効率・品質 No.1」とした。農業用ドローンで先行している中国製を中心としたドローンは、非常に優れた諸元で仕上げられている機体が多い。本開発では前述の開発コンセプトに沿って、それら先行機を上回る諸元をターゲットに設定した。また、「一般ユーザーが期待通りに使えるということはどういうことか」という問いを幾度となく繰り返し、現場で求められる農業用マルチローターの開発を目指した。加えて、ユーザーのニーズにすばやく対応し、利便性を高めるためには今後の拡張性やユニットの交換容易性の確保が必須であるため、それらを考慮した機体構成、システムの実現も同時に目指した。以上より、以下の4項目を開発主眼とした。

①散布品質

長年の実績がある無人ヘリコプタと同等の散布品質が達成できていること(請負での業務遂行が可能)

②機体サイズ・重量

簡易運用が可能な世界標準最大離陸重量24.9kg 以下(55lb未満)で、1ha散布/フライト(薬剤8リットル搭載～散布作業終了)が可能であるパッケージング諸元であること

③信頼性

農業向けツールとして信頼できることはもちろん、先行機に対

して優れた仕様や信頼性を有すること

④拡張性・利便性

今後の拡張性を加味して、様々なアプリケーションが簡単に接続できる機体やシステム仕様であることに加え、補修時の各部のユニット交換が容易であること

図1にフィーチャーマップを、表1に主要諸元を示す。

3 主要素技術開発概要

本章では、前述の開発主眼を達成するための開発内容を説明する。

3-1. 散布品質

空からの散布は、稲の株元近傍まで農薬を均一に届けることが最大の課題となる。無人ヘリコプタ(約100kg:総重量)のように重量があれば、その重量を浮かすための空気量を使って、広い範囲に比較的大きな風を発生させ、株元まで浸透させることが可能である。しかし、その1/4程度の重量のドローンは手軽さと電動を基本としており、重量を大きく上げることは、効率上不可能となる。限られた空気を散布ノズル部に集中する必要があり、その最適な形を追求した結果YMR-08のレイアウトになった。図2にそのレイアウトを示す。

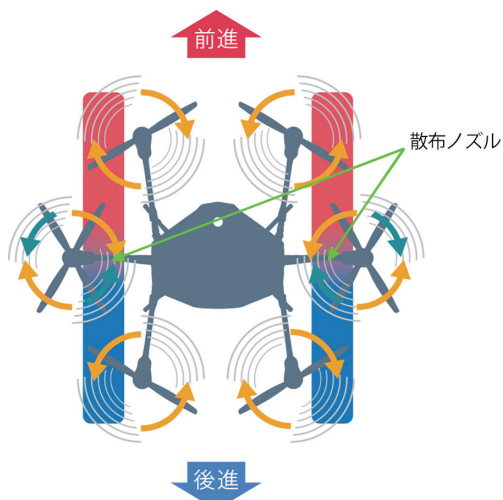
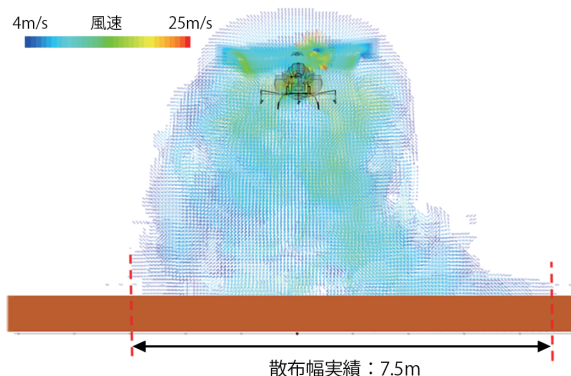


図2 ローターレイアウト

散布ノズル上部に、今回新たに設計した二重反転ローターを採用した。これにより、図3のように局所的に非常に速い流速を作り、機体速度による外乱渦風に負けることなく下方へ加速させ、さらに前後方のローターの連成風により、作物の根本まで均一に薬剤を届けることができる。また、前後飛行でローターの回転方向までの対称性を保ちながら、なるべく広い範囲で幅方向に風を作るレイアウトを採用することで、

無人ヘリコプタ(FAZER) 機体速度20km/h



YMR-08 機体速度15km/h

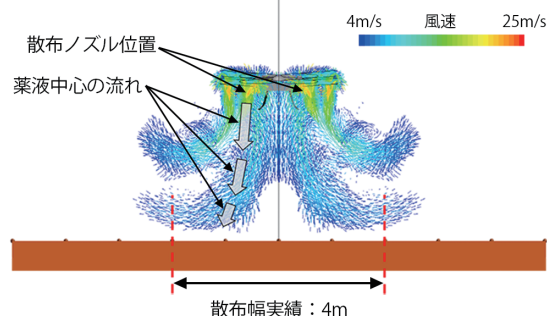


図3 無人ヘリコプタFAZERとYMR-08ダウンウォッシュ比較解析

前後進時どちらでも同じ位置(ノズル付近)のダウンウォッシュ(降下気流)を強くした。ローターの回転方向と機体前進時の速度によって増速された図2に示す赤色の部分で風が強くなり、後進時は青色の部分で強くなる。図3に流動解析結果を示す。現行無人ヘリコプタで実績がある速度20km/h、散布幅7.5mで作ることができる風速を、YMR-08では15km/h、4mの範囲で発生させることができている。

3-2. 機体サイズ・重量

機体サイズおよび重量を検討するうえでは、一人で容易に運搬できることを重視して、サイズは2m程度、運搬時重量(機体重量)は10kg以内に設定した。重量については、フライト時に搭載する薬剤やバッテリーの重量を加えても国際規格を考慮して設定した最大離陸重量24.9kg以下となるように配慮した。仕事効率については、機体全体のサイズが大きければ効率が上がるかというところではなく、ドローンのバッテリーはかなりの大きさが必要となり、その大きな容量を充電する作業自体が電動ドローン運用の最大の負担となっている。機体を効率よく運用でき、1フライトである程度まとまった圃場の散布をしながら、バッテリーのエネルギーも無駄に使わないように最適化した機体サイズ・重量の諸元としている。

3-3. 信頼性

信頼性については、図1および表1と4章以降で詳細な開発内容を要素ごとに示すので参照されたい。

3-4. 拡張性・利便性

拡張性については、今後の農業系アプリケーションの様々な広がり方を考慮しながら、輸送系のベースプラットフォームとして設計した。図1のフィーチャーマップに下部アプリケーションとのハード的な接合部を示す。システム上の接合は4-2.の新電装システムで詳述する。各部のユニットは、図1に示すようにローター、ドライブユニット(モーター)、各アームなど、パーツごとに交換が容易な構造と部品構成になっている。

4 開発技術紹介

4-1. 機体開発

4-1-1. 重量開発の必要性

ドローンのレギュレーションは国によって異なるが、最大離陸重量約25kgを境に信頼性等の性能要求が区切られている国が多いため、本開発では最大離陸重量24.9kg以下をMUSTの目標とした。YMR-08では散布品質の確保のため二重反転ローターを採用しているが、通常のレイアウトに比べて推力効率や重量面ではデメリットとなる。一方で、大径ローターを低回転数で回すのと、小径ローターを高回転数で回すのを比較すると、同じ推力を得るには前者の方が必要なエネルギーの効率が良い。騒音などの観点からも回転するローター先端の速度は小さい方が良く、有効散布幅も広がる効果がある。そのため、YMR-08では他社の同規模の商品よりも大径のローターを採用することで、推力効率の課題に対応した。また、散布品質を確保したうえでの散布効率を検討した結果、目標フライト時間を15分に設定する必要があり、大容量バッ

テリーの搭載が求められた。図4にYMR-08と他社散布マルチローターとの重量配分比較を示す。前述のように散布性能に影響を与える推進ユニットとバッテリーに重量を多く配分するため、それら以外の部品を軽量化にすることが必須であった。次に機体軽量化の手法について記す。

4-1-2. 機体軽量化開発

機体全体の部品構成を検討するにあたり、軽量化を実現するために以下の点を考慮した。

- ・ 部品どうしの締結部は重量増の原因となるため、共通化などにより極力減らす
- ・ 大きな荷重を受ける部分を近くに配置し、補強が必要な部品をまとめる

熱硬化性CFRP一体成形のメインフレームの幅方向をできる限り大きくすることで、大きな推力を受ける左右の二重反転ローターのアームを短くして、メインフレームとの締結部にかかる荷重を抑えた。また、前後ローターのアームとの締結部も二重反転アームとの締結部の近くに配置し、8本のアームとの締結部は全て左右両端に集中させている。これにより、メインフレームにおいて強度を確保する必要がある部分を一部に絞ることができ、また、全体として必要な剛性は、主に両端に上向きの力がかかることによる曲げ剛性とねじり剛性に対するものに絞ることができる。内部にバッテリーを搭載するため、上方に大きな開口が必要で剛性上不利となるが、接合部のない一体構造と開口全周に折り返し形状を設けることで必要な剛性を確保した。また、アーム締結部を左右両端に集中させたことで以下の利点にもつながっている。

- ・ バッテリー交換や薬剤補給をする際のアクセス性向上
- ・ メインフレーム前後に大きな開口を設けたことによるバッテリー冷却性の向上
- ・ メインフレーム後方からの投影面積が大きくなったことによる操縦時の機体姿勢の視認性向上

また、YMR-08では放熱が必要な部分を除いては極力アルミ部品の使用を抑え、代替材料として射出成型が可能な熱可塑性CFRPを積極的に採用した。主に使用した材料は、ポリアミド系のベース樹脂に炭素繊維を30%添加したもので、アーム接合部等の強度や剛性が必要な部品に採用している。本モデルの構造部品の材料別重量比率を図4に示す。樹脂材料の比率は80%に迫り、熱可塑性CFRPだけでもアルミ材料の比率を上回っており、軽量化に大きく貢献している。

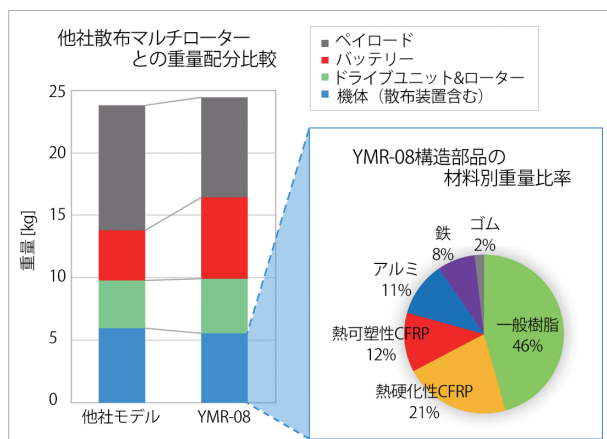


図4 重量配分比較と材質構成比

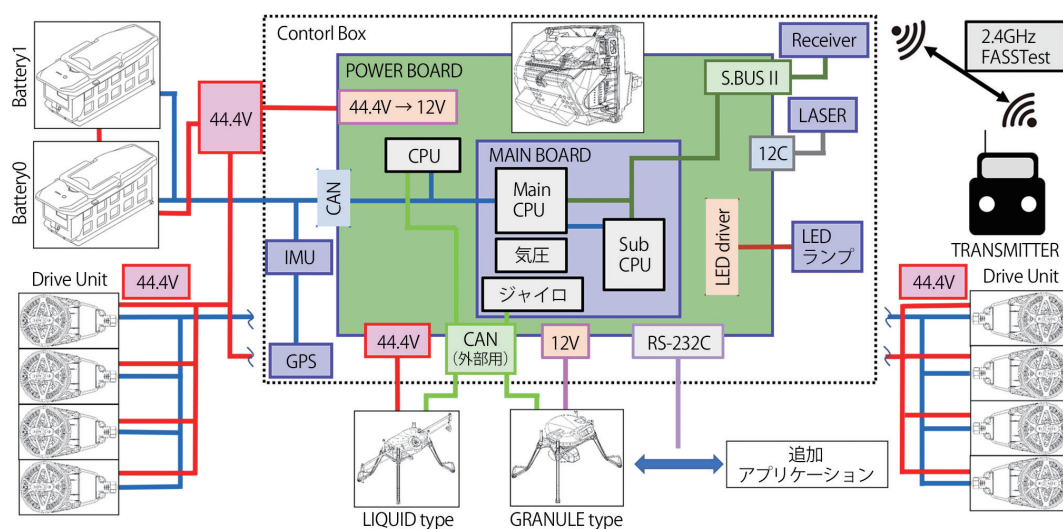


図5 システム(通信、電装ハード)

4-2. 新電装システム

YMR-08のシステムでは主要となるセンサーからの出力や操作スティック情報をメイン、サブの二つのCPUに入力して処理している。これにより万が一メインCPUが故障した場合でも、サブCPUにて機体が暴走しないように冗長性を持たせている。また信頼性については無人ヘリコプタで得られた知見より、実使用に近い項目での信頼性試験を実施することで、より利用状況に沿った信頼性を確保した。図5にシステム構成を示す。

本システムは自動車用通信規格CAN、模型用通信規格S.BUS II 1chで構成される。YMR-08は今後の拡張性を考慮して、汎用インターフェイス(CAN1ch,電源44V,12V)を用意した。汎用インターフェイスは機体のメインシステムとは直接繋がらないように構成することで、外部接続機器の破損等でバスを占拠されても機体の制御には影響しない仕様とした。また、YMR-08では双方向通信とし、機体の状態を送信機にて随時確認できるようにした。これにより機体の状況がリアルタイムで確認できるようになっている。

フライトコントローラーや、慣性計測装置(IMU)、ワーニングランプ等の基板類は全て1つのコントロールボックスに収納した。ケースにはアプリケーション装置用に

- ・ 44V電源/CAN通信
- ・ 12V電源/CAN通信/シリアル通信

の2種類のコネクタを接続でき、取り付ける装置に応じて使用できる。コントロールボックスの蓋に透明の材料を採用し、フレームの後部に配置することで、オペレータからワーニングランプの点灯が確認できるようになっている。IMUへの振動の影響を抑制するため、コントロールボックスは前後のダンパーで支えている(図6)。

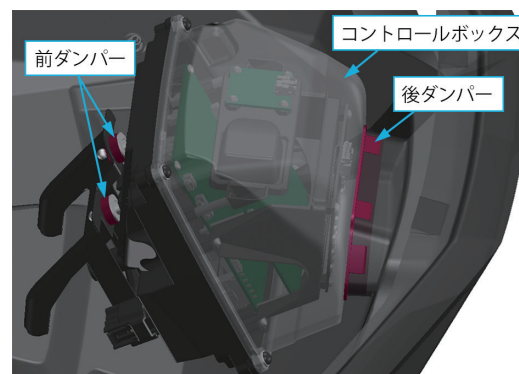


図6 ダンパーマウント

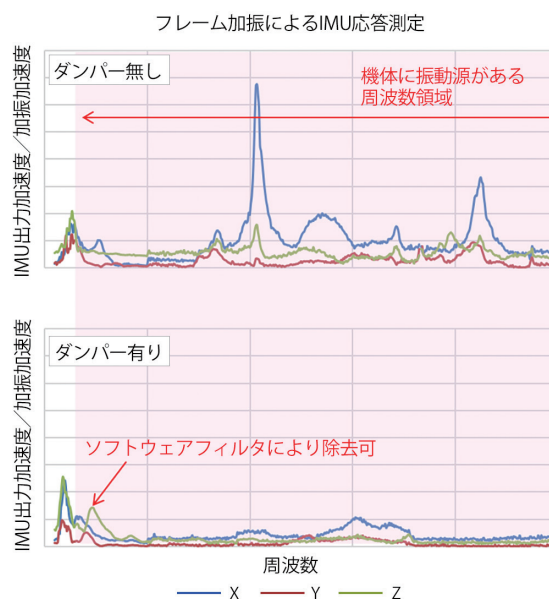


図7 振動伝達特性

機体の主な振動源は8つのローターであり、フライト中はその回転数を個々に変更することにより姿勢を制御しているため、ローターの最小回転数にあたる周波数以上の領域は振動源が存在する領域となる。図7に示すように、振動源のある領域のうち高周波領域に関しては、ダンパーを採用することにより加速度応答が抑えられている。また低周波数側に残っているピークについてはIMUのソフトウェアフィルタにより除去可能で、物理的なダンパーとソフトウェアフィルタにより有害な振動を除去している。

4-3. 新制御システム:YACS-M

(YAMAHA Attitude Control System for Multi)

機体の制御システムは、YMR-08用に新設計した。無人ヘリコプタは、機体自体が大きく、また熟練オペレータが多いこともあり、オペレータの狙い位置から数cm単位でのずれを修正するような小さな舵入力が多い。そのため、無人ヘリコプタの制御システムはそのような小舵にも、機体を操縦する中舵にも、また大舵にもスムーズな機体挙動ができるように「動くこと」に重点を置いた制御性になっている。対してYMR-08は、まだ経験が浅いオペレータから熟練オペレータまで、様々なスキルのオペレータが操縦すると想定されている。したがって、YMR-08の制御システムは、操縦に対しては素直に動き、そしてしっかりと「止まること」に重点を置いた制御性を持たせた。操作モードは、舵入力を速度指令として機体の操縦ができ、スティックを離せばその場で止まる「ノーマルモード」に加え、手放しのまま一定速で直進飛行をしながら散布ができる「クルーズコントロール」、ターン操作自体も不要にして正確に一定間隔で散布できる「ターンアシスト」の3種からオペレータが選択することができる。これによりオペレータの操縦舵を極力減らして、疲労低減と散布精度向上に貢献している。

空散での農薬散布では、推奨する飛行高度がある。高度が低すぎると散布幅が確保できず、農薬が掛かりきらない範囲ができてしまう。逆に高すぎるとダウンウォッシュが活かされず、農薬は作物にかからずドリフト（飛散）してしまう。散布する圃場に傾斜がある場合、推奨している飛行高度を維持することは技量の高いオペレータでも難しい。そこで、YMR-08では「対地高度維持」制御を開発し、新たにモード設定した。この機能により、傾斜や丘陵地でも一定高度で飛行が可能になっている。また、機体高度情報を使用して「着陸アシスト」機能も搭載した。地面との距離によって、適切な下降速度になるように制御（地面に近づくにつれて減速）するため、オペレータは複雑な操縦をしなくても楽に着陸させることができる。

安全機能として、無人ヘリコプタFAZER Rで実績のある、ニューラルネットワーク型の最適判断制御^[1]を採用し、YMR-08に最適になるよう再設計した。各基板どうしが制御情報のほか異常情報も共有し、万が一異常が発生した場合でも最適な処理を選択することで信頼性を高めている。モーター廻りの例を以下に記す。YMR-08が最も稼働する初夏～秋は温度が高く、日差しも強い。機体の安定性を保つための制御をしようとすると、モーターはかなりの周期で加減速を繰り返さなければならないが、上記のような環境下ではモーターの温度が上昇し、最悪の場合は熱による故障を引き起こしてしまう。そこで自己判断によって、故障に至らないようにモーターに対する負荷をコントロールする機能を搭載した。また、もし熱やその他の要因によってモーターが故障した場合には、残りのモーターに推力を分配して姿勢をコントロールすることで、落下による機体の故障を防ぐ制御をおこなう仕様とした。

4-4. ドライブユニット(モーター)

ドライブユニットは、接続端子／ヒートシンクインサート型ケースおよびドライバ基板から構成されている。モーターは軽量化を追及して開放型としているが、農薬付着に対する各 부품の信頼性を高めるため、ベアリングにはセラミックボールを、電磁鋼板には防錆コーティングをそれぞれ採用した。磁気回路は、ローターの振動抑制とトルクアップを狙って36スロット42極の構造とし、ボビン巻による巻数/線径の最適化を行った。また、回転中の空気循環に加えて、内部のフィン構造やケースに内包されたヒートシンク等による熱対策を施すことで、連続出力の維持に貢献している。図8にモーター構造図を示す。空気循環については、上部より空気を吸い込み、外側のコイル部を通して排出するように回転部を設計した。図9にその流体解析結果を示す。

これらによりドライブユニットは、最大2.4Nm/4000rpm、連続出力1.2Nm/2800rpmを460g弱（基板とケーシング込み、モーター単体は260g弱）の重量で達成した。また、開放型アウターローターモーター、防水・放熱・軽量化を同時に達成している。

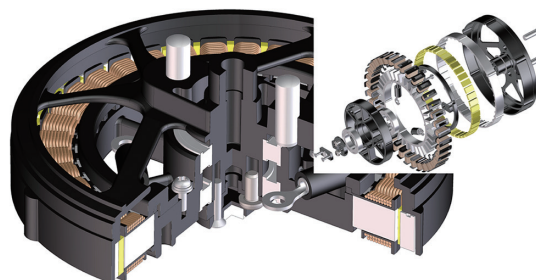


図8 モーター断面

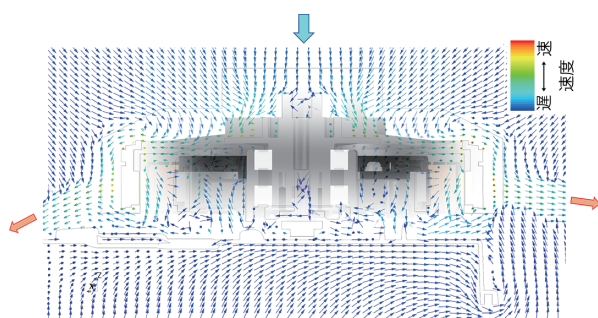


図9 モーター流体解析

4-5. ハイブリッドローター

ローターの空力特性は、モーター・電池の特性と並んで機体のフライト可能時間に直結する重要な設計項目である。本開発では、CFD(数値流体力学解析)を用いてローターサイズ・翼弦長分布・ねじり下げといったローターの設計パラメータの空力特性への影響を確認し、優れた推力効率を持つ翼形状を設計した。YMR-08のホバリング領域においては、同サイズの市場流通品CFRP製ローターと比較して約5%の高効率を達成した。

ローターは高速で回転するため、ドローンの構造の中で最も安全性の確保が必要とされる部分の一つであり、航空法においても大型ドローンのローターは安全性(飛散しにくさ等)にできる限り配慮した構造とすべきである旨が記載されている^[2]。本機体では、CFRP翼の前側に軟質・高靱性樹脂を一体

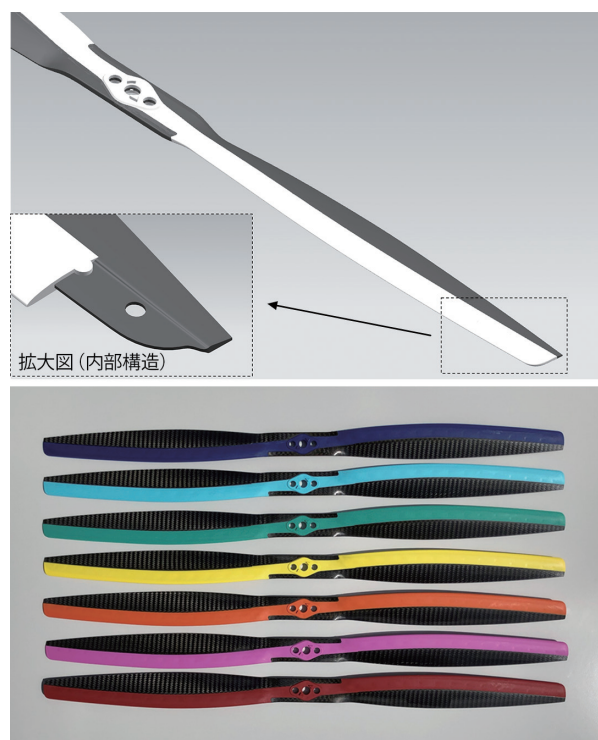


図10 ローター構造およびカラー展開

成形することで、CFRPと樹脂の特性を併せ持つハイブリッド構造のローターを開発した(図10)。高剛性のCFRP部によって翼形の維持に必要な剛性を確保しながら、他の物体と接触した際には軟質・高靱性の前縁部が衝撃を吸収して接触体の損傷レベルを低減する。あわせてローター自身の破損による飛散物の発生率も低減できる。

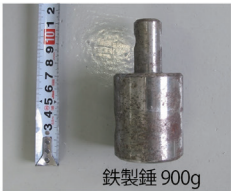
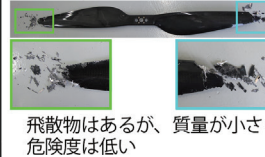
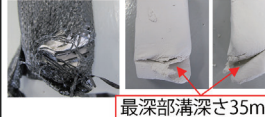
その効果を確認するため、「YMR-08採用のハイブリッドローター」「PA-CF材を射出成形した同形状のローター」「市場流通品CFRP製ローター」を対象に、回転中のローターに試験物体を接触させる試験を実施した。結果は、図11を参照頂きたい。さらに、一般的な(CFRPやカーボン系樹脂のみで構成された)黒色のローターは回転時にとても視認しにくい、ハイブリッドローターの樹脂部は着色可能であるため、回転時もローター面を視認しやすくなっており、安全性向上に貢献している。

4-6. バッテリー

4-6-1. 電池セル

動力源である電池セル(図12)は、軽量かつ高容量であることは容易に想像できるが、ドローン用電池セルには他にも飛行のための要件が必要である。図13にその要件の概要説明グラフを示す。使用を想定した最低残量時でも、最大推力でローターを回せることが必要である。電池セルの放電特性は、ドローンのように大きな電流を放電するとその電圧(限界電圧値)は大きく降下する。ローターが最大限の回転数で回転するために必要な放電電流でも、モーター特性の必要最低電圧を超えていなければならない。これにより想定している搭載物の重量内においては、回転数の維持を保証することができ、強風時でも操作性(風で流されない、最低限の制御性)を失うことはない。さらに、より良い姿勢安定性や高い運動性を確保するためには、各ローターは早い時間で回転数を変化させてローターの推力を上下させ、即座に姿勢を制御しなければならない。そのためには、モーターには過渡的に最大推力よりも大きな電流を流し、大きなトルクでローターの回転数を変化させる必要があり、大きな電流はさらに大きな電圧降下を発生させる。よって、ドローンでは軽量かつ大電池容量(=高い重量エネルギー密度)で高出力特性(=低抵抗特性)に特化した電池セルが必要になる。

信頼して使用するための要件としては、季節を問わず一年を通して動作および安全性を確保する必要がある。先述したように、大きな放電要求と発熱の問題はトレードオフの関係にあり、また正極材/電解液でも電圧・温度性能が変化するた

	ハイブリッドローター YMR-08採用品	PA-CF製射出成型品 (カーボンファイバー含有PA製) ※YMR-08同形状	市場流通品CFRP ※同外径サイズローター (≒YMR推力)
ローター写真 試験前			
試験項目 下記試験片を衝突させる			
飛散テスト	 鉄製錘 900g	 衝突後のローター 先端(=高速)のカーボン部 が塊で飛散	 衝突後のローター 飛散物はあるが、質量が小さく 危険度は低い
衝撃テスト	 紙粘土1/4 土のう袋	 テスト後の試験片 最深部溝深さ 5mm 前縁部樹脂による低引き裂き性	 テスト後の試験片 最深部溝深さ 13mm 最深部溝深さ 35mm

試験内容：最大離陸重量フライト時相当の回転数でローターを回転させ横から表中の試験片を一定の速度で接触させる

図11 各種ローター接触テスト結果

め、どのように成立させるかが大きな課題であった。一般的な模型(RC)系の電池セルでは、正極／負極の構造安全マージンを切り詰めたうえに常温での低抵抗特性に特化した電解液を採用することで対応している。これらの電解液には、低沸点特性を持つ電解液が一般的で、複数年の保存耐性、環境温度耐性に課題があり、安定的に長期信頼性を得ることは困難である。また、高い重量エネルギー密度と低抵抗特性の電池セルは自己放電量のバラツキが大きいという課題が潜在しており、多直多並列での長期使用では電池全体としての管理が必要になる。これらの課題に対応するため、YMR-08では、バッテリーの状態を監視するハイパワーバッテリー用マネジメントシステム(HBMS-LS1)を搭載した。本システムについては4-6-3.で説明する。



図12 電池セル写真

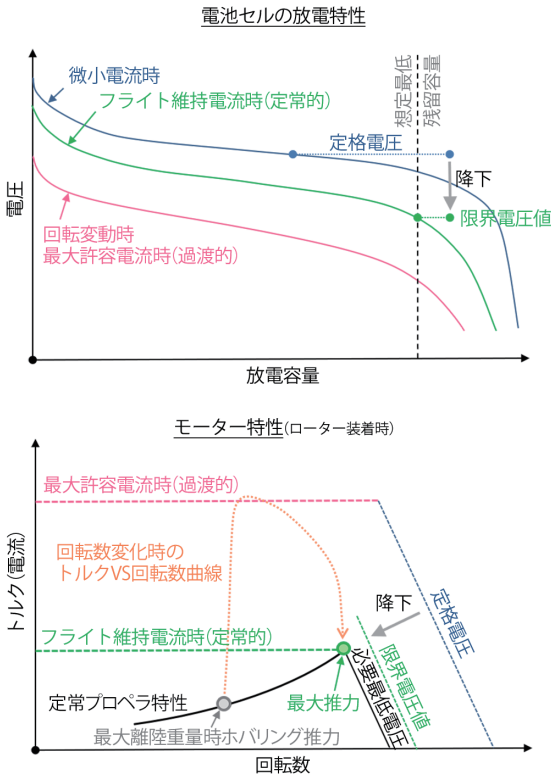


図13 電池セル要求

4-6-2. バッテリーの構成

電池パックはラミネート型リチウムイオン電池(定格 3.7V/4.8Ah)を1並列6直列に配したモジュールを基本として

いる。そのモジュールを4並列で1パック構成とし、電池パックを2直列で機体と接続する。機体接続時には44.4V／19.2Ahとなり、1haの散布作業を十分にこなせるフライト時間／動力性能を確保した。図14に機体装着状態の電池構成図を示す。単位セルの不具合発生に対する信頼性を重視して、以下の3点をレイアウトの基本的な考え方とした。

- ・ 単位セルごとの電圧が監視可能なこと
- ・ 単位セルの容量は大きくならないこと
- ・ 動作中に電力供給が停止しないこと

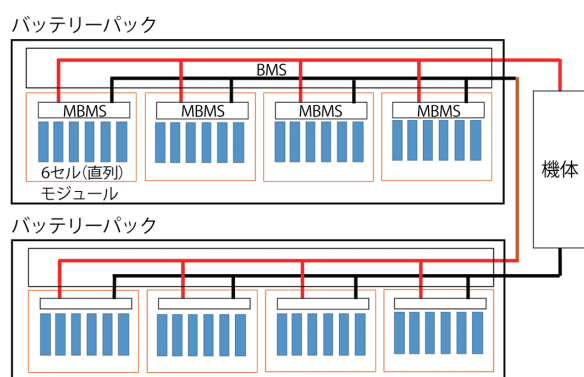


図14 電池構成図

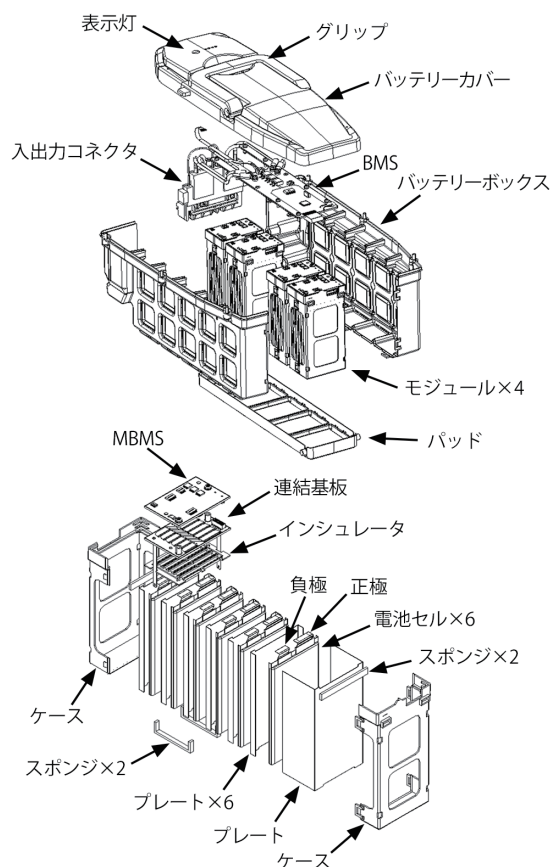


図15 パックおよびモジュール内部の構造

図15はパックおよびモジュール内部の構造図である。モジュールは、振動や衝撃時に図中のインシュレータとケースにより、電池セルタブ（電極）の連結基板とセル本体間で相対的に動かないように固定した。電池セルは、アルミプレートで囲むことでモジュール強度を上げ、外気への放熱性を高めた。また、パックの構成部品は全面で嵌め合わせ構造とすることで強度的な弱点をなくし、軽量で高剛性なケースを実現した。加えて、パック底面に落下衝撃を吸収するための耐衝撃性部品を設けることで、落下によるダメージを減少させ、UN輸送規格38.1（危険物の輸送に関する国際勧告）を満足する仕様とした。なお、機体へのパックの装着はワンタッチ構造になっており、作業の簡素化に貢献している。

4-6-3. ハイパワーバッテリー用マネージメントシステム ：HBMS-LS1

本バッテリーはパック情報を統合し、外部通信を行うBMSと内包される4つのモジュールごとに状態情報を持つMBMS（モジュールBMS）で構成され制御している。安全・環境・使用リスクについて分析し、23ステートによる状態管理を行う。図16はその簡易的なフローである。

機体に対しては放電準備、正常放電および5段階のワーニングステートなどによる状態管理の機能を持ち、信頼性の高い運用をサポートしている。それらのステートへの遷移は使用中の温度・容量警告、低温環境や劣化による内部抵抗増加を加味して制御している。また、フライト中に通信異常が発生した場合でも着陸まで放電を継続する。充電器に対しては予備・通常・急速・保管・リフレッシュ充電モードの充放電動作指示をバッテリー側から行い、使用状況に応じてリフレッシュ充電の促しや残量計の補正等を自動で行う。リフレッシュ充電では、モジュール内外の電圧バランスを調整して容量の最適化を行い、定期的に電池内部のメンテナンスができるよう配慮した。また、サービスツールを用いることで、電池内部の診断結果をユーザーへお知らせする機能を搭載した。

4-7. 液剤散布装置 (SP1-10)

液剤散布装置は、タンクの中に充填された薬液が、ポンプを介して両側先端のノズルから吐出される構成である。機体同様、散布装置も軽量化を狙い、樹脂部品を多用しながら最短経路での吐出が可能な配管レイアウトを実現した。図17に液剤散布装置全体図と配管レイアウトを示す。タンクの吐出口からポンプまでの経路を下り勾配にすることによりエア抜きが必要がなく、また薬液を最後まで使い切ることができる利

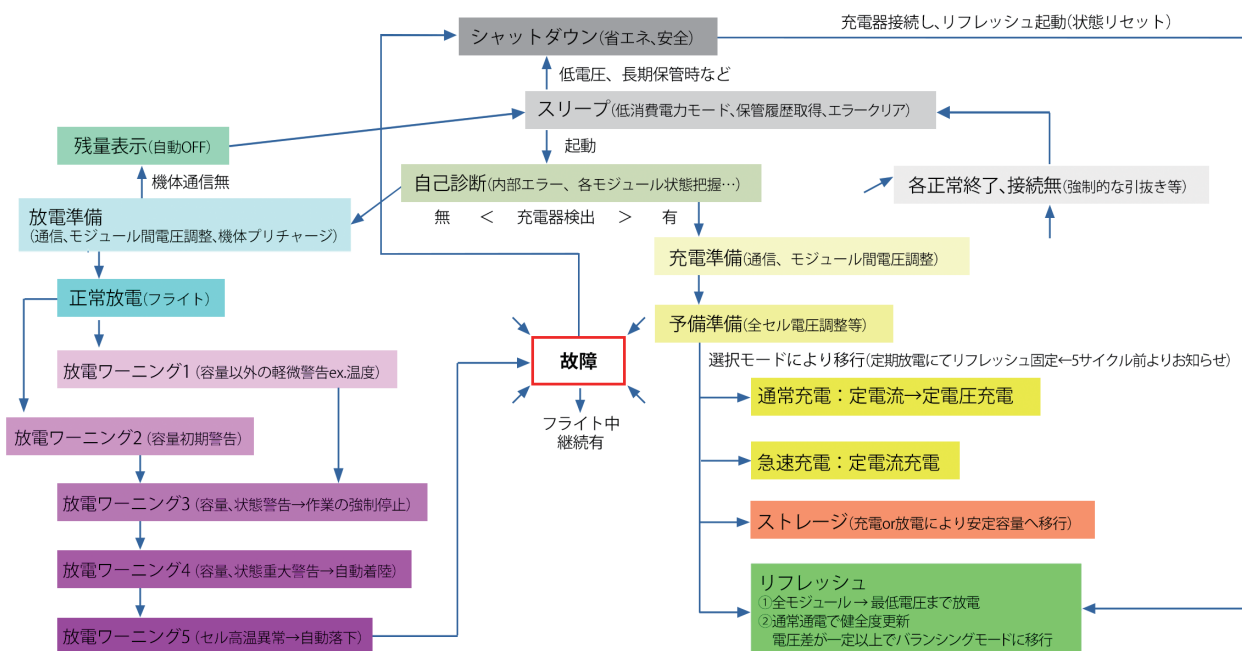


図16 BMSフロー

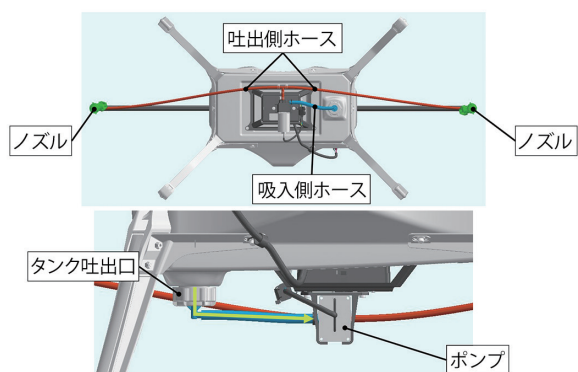


図17 液剤散布装置

便性に優れたレイアウトとなっている。さらに、吐出量についてもドローン特有の低速域(7.5km/h)から高速域(20km/h)までを、ノズル2種で対応できる仕様としたことで利便性に貢献している。

本装置は、上記液剤を散布する機能に加え、機体の降着装置としての機能も有する。部品点数の増加を防ぐため、10Lの容量をもつ液剤タンクにも荷重を支える構造体としての機能をもたせ、タンクにスキッド部品を取り付けるシンプルな構成とした。タンク底部には窪みを設けることで、容量の半分程度の液剤量でもフライト中の姿勢変化により液剤が移動しにくい形状を採用した。これにより、フライト中の重心位置の変化を抑えて、飛行制御への悪影響を防止している。

スキッドは、メインとサポートの2部品で構成し、メインスキッドの材質には、比較的柔軟で靱性と耐摩耗性に優れたポ

リエチレン系、サポートスキッドには剛性に優れた材料を採用した。これにより凹凸のある地面でも4点で接地でき、また、着陸時の衝撃を吸収して他の構造体へのダメージを軽減することができる。図18はそのスキッドの静荷重に対する変位特性のグラフである。スキッド先端が接地してしばらくの変位領域では、凹凸を吸収しながら4点接地を確実にする。さらに大きな変位域では、衝撃を緩和するために定数が変化する特性となっており、着陸速度が速い場合でも大きなエネルギーを吸収することが可能である。メインスキッドには低摩擦係数かつ耐摩耗性に優れた材質を採用することで、作業時の引きずりなどでの扱い性を高めた。また、サポートスキッドは色部品の設定が可能であるため、それにより遠方視認性が向上するだけでなく、形状的にも引っ掛かりを防止し持ち手にもなるなど運用面での機能を有している。

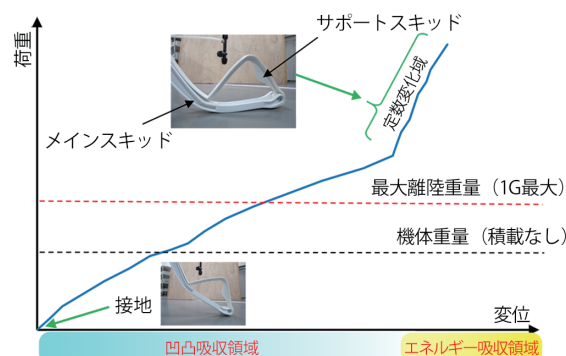


図18 スキッド荷重vs変位特性(実験値)

4-8. 粒剤散布装置 (GR1-10)

他項で説明した部品開発と同様に、粒剤散布装置もほとんどの部品を樹脂化しており、脚部込みで約3kgの重量での構成とした。なお、脚部の基本部品は、液剤散布装置と共通化した。粒剤散布装置GR1-10は、ドローンによる農業分野での使用用途の多様化に合わせ、除草剤の散布だけでなく、多種多様な粒剤に対応できる発展性を持たせた構成とした。以下にその特徴を記す。

基本性能として、粒剤落下の安定化と吐出量の調整が可能なシステムを実現した。図19はその構造図とシステム図である。本装置では、これまでのドローン業界のスタンダードであったシャッター機構は採用せず、モーター回転によりローラーを回すことで粒剤の最下部に積極的に振動を与え、粒剤のトンネル状の空洞化を防ぐ機構を新たに開発した。この機構では、ローラーの回転数を変化させることで粒剤の吐出量を回転数依存の線形特性として制御できるようになっている。フィードバックされた回転数により、負荷によって出力トルクを変化させて指示された回転数を維持する。また、ローラーを交換することで、様々な粒剤に対応可能とした。図20はその代表的なローラー種である。これらのローラーにより、細かい

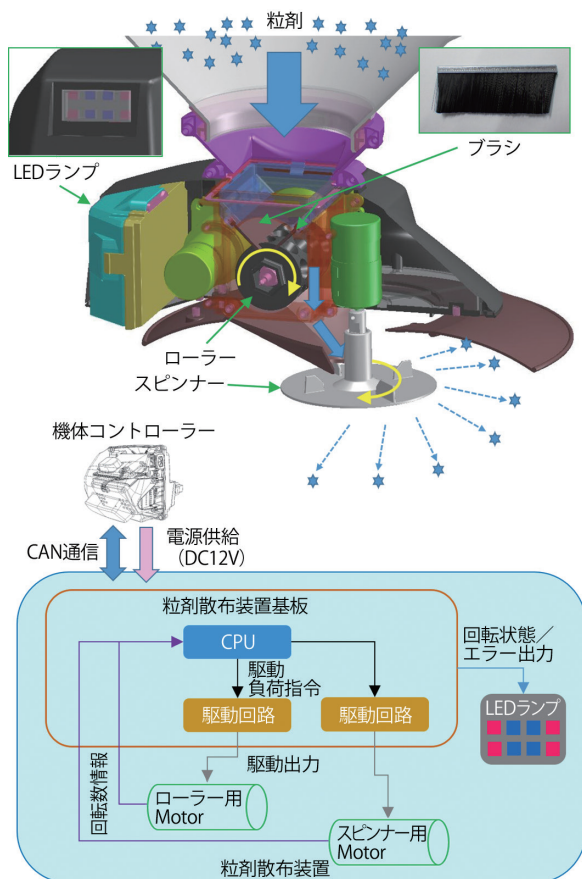


図19 GR1-10構造

タイプから荒いタイプまで多種多様な粒剤に対応することができる。図19に示すスピナーの略中央部に粒剤を落下させ、スピナーの回転による遠心力で拡散、落下させている。散布分散性能については、この時の拡散均一性が重要であり、スピナーのフィンを同一形状とせず、異なる形状を組み合わせる仕様としたことで、一方向にピークを持たない均一分散を実現した。

前述の機能ユニット部分については、ワンタッチで取り外し可能な構成とすることで清掃性を高めるとともに、粒剤の通路を防水構造にして各部品（ローラー、ブラシ）の取り外しと交換が容易な構成とした。また、モニターしている回転数と負荷の情報から、粒剤切れや回転不能などの状態をユーザーにお知らせする機能（図19のLEDランプ）も搭載した。



図20 ローラー種別写真

5 おわりに

小規模圃場と個人使用をターゲットに産業用ドローンYMR-08を開発した。お手本となる製品がなく、未知の状態からのスタートであった。何度も失敗と挫折を経験し、正解を探しながらの開発の道りは厳しいものであったが、メンバーが一丸となって取り組み、「期待通りに使えるということはどういうことか」をユーザーの視点に立って考え抜いた。その結果、無人ヘリコプタに匹敵する高い散布品質を実現することができた。また、材料から形状、機構にいたるまで徹底した軽量化に取り組み、15分の連続飛行が可能な大容量バッテリーと薬剤8Lを搭載しながら最大離陸重量24.9kg以下を達成することができた。

このYMR-08が、労働負担の大きい散布作業を軽減し、より効率的な農業経営や省人化に貢献できれば幸いである。また、ドローン産業が正しく成長、普及し、社会の役に立ち活躍してくれることを切に願っている。今後もその発展と普及に尽力していく所存である。

■謝辞

本開発において、モーター、電池セル、バッテリーシステム関連の仕様開発で共に時間を掛けて検討して頂いた協力各社の皆様、少量にも関わらず惜しげもなく先端材料を供給することに尽力頂いた材料各社の皆様、前例のないモノ作りにも決して諦めず、時間を掛けて生産可能なレベルまで一緒に歩んでくれた製造各社、アセンブリ各社の皆様にこの場を借りて御礼申し上げます。

■参考文献

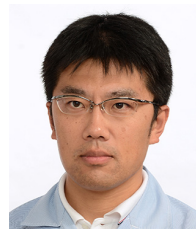
[1]吉原正典、林隼之：産業用無人ヘリコプタ“FAZER”の紹介；ヤマハ発動機技報 2013-12 No.49

[2]国土交通省「無人航空機(ドローン・ラジコン機等)の飛行ルール」(無人航空機の 飛行に 関する 許可 ・承認 の審査要領)<https://www.mlit.go.jp/common/001254115.pdf>

■著者



吉原 正典
Masanori Yoshihara
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



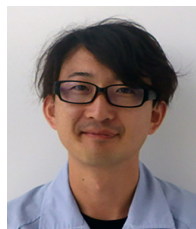
松村 大祐
Daisuke Matsumura
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



米原 慧紀
Keiki Yonehara
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



大西 慎太郎
Shintaro Ohnishi
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



春田 祐吾
Yugo Haruta
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



水野 健太
Kenta Mizuno
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



四宮 隆
Ryu Shinomiya
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



神田 大
Dai Kanda
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部

■映像ライブラリー

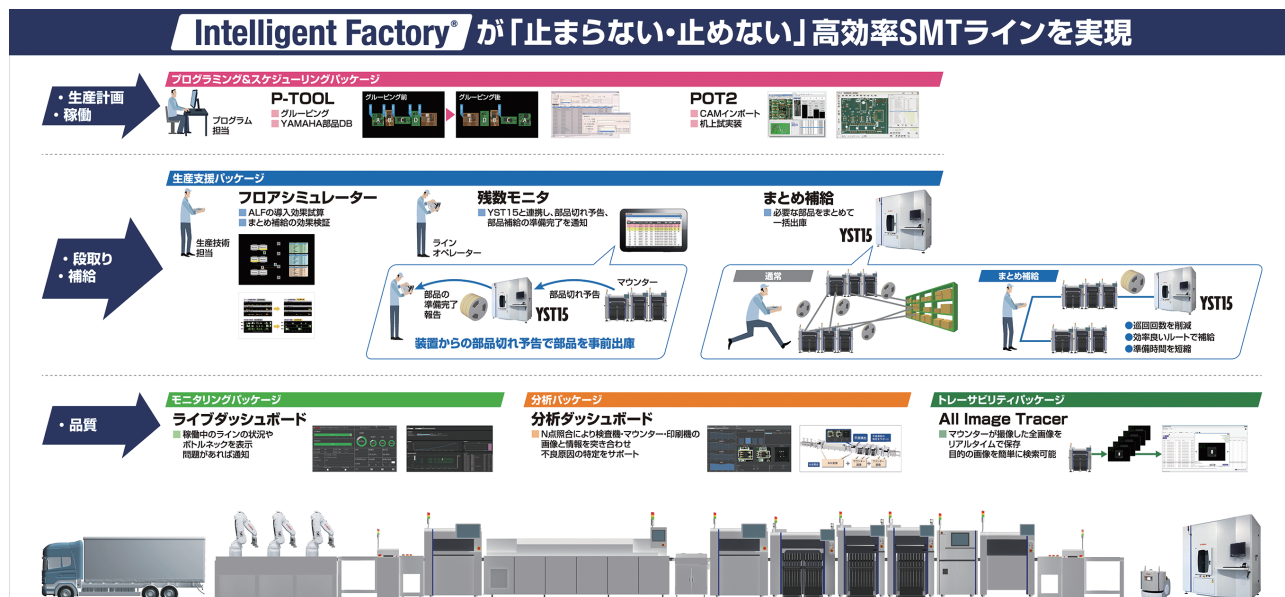
<https://global.yamaha-motor.com/jp/profile/technical/library/mov/55ss06.html>



インテリジェントファクトリー 「止まらない・止めない」高効率 SMT ラインを実現

Intelligent Factory
Realizing high-efficiency SMT lines that will not stop or be stopped

金子 康弘 横山 泰幸



Abstract

In recent years, in the SMT (Surface Mount Technology) industry, while the performance of SMT equipment such as mounters implemented in the mounting process have been enhancing, on a production line made up of these machines, more importance is put on necessity to realize higher productivity for end users by providing high working rates and maintaining high quality as a total line solution. Also, in technology trends, the use of technologies such as “IoT (Internet of Things)” and “M2M (Machine to Machine)” play a major role in business, and the penetration rate of communication infrastructure is getting higher and the cost reduction for storage, sensors, etc., is also accelerating. This current trend is becoming more prevalent.

Here, we introduce “Intelligent Factory” , an IoT / M2M integrated system that aims to realize high-efficiency SMT lines that will not stop or be stopped by utilizing “IoT” and “M2M” technologies.

1 はじめに

近年、SMT(Surface Mount Technology:表面実装技術)業界では、実装工程に導入されているマウンタをはじめとしたSMT装置の高性能化が進む一方で、これらの装置で構成された生産ラインにて、ライントータルとしての高稼働率、高品質を維持することでエンドユーザー様における生産性向上の実現が必要とされている。また技術トレンドとして、「IoT(Internet of Things)」および「M2M(Machine to

Machine)」等の技術を活用することが、ビジネスにおいて大きな役割を担っており、通信インフラの普及率やストレージ、センサー等のコストダウンが進んだ現在の潮流が後押しをしている。

今回は、「IoT」「M2M」技術を活用することで、「止まらない・止めない」高効率SMTラインを実現させることを目的としたIoT/M2M統合システム『インテリジェントファクトリー』を紹介する。

2 開発の背景

数年前より最先端の技術トレンドとして「IoT」や「M2M」が注目されているが、当社はそれ以前から「M2M」技術をSMT装置に取り込み、生産性の効率化に対して実績を積み上げてきた。

2010年代に入ると、ドイツ政府による産官学連携体制での国家プロジェクトである「Industrie4.0」を皮切りに、欧米諸国の第4次生産革命に関わる取り組みが急速に広がり、様々な「IoT」関連技術の進展が進んでいる。また社会インフラに関して2000年代と比較すると、高速通信ネットワークの普及や、通信・ストレージ装置などのコストダウンが進んだ環境も影響してこの流れは飛躍的に進み、製造業を中心とした分野への導入が加速している。

このような技術革新の背景より当社としては、これまで開発してきた各ソフトウェアや関連機能などに対して「IoT」の最新技術を組み込むことで、SMT実装工程を支援するためのシステム統合や機能拡充を図るべく、新たにIoT/M2M統合システム『インテリジェントファクトリー』を開発した。

3 製品の概要

SMT工場には複数の異なる作業工程があり、個々の作業において、いまだ人が自ら考えて作業を行う場面が多々見受けられる。インテリジェントファクトリーはそれらの作業を支援するため、作業工程ごとに以下のパッケージを提供している。

- 装置を動かすためのプログラムデータを短時間で作成かつ装置パフォーマンスを最大化できるプログラミング&スケジューリングパッケージ
- それぞれの装置を操作するオペレータの作業の効率化および平準化をすることでオペレータの負担を減らす生産支援パッケージ
- SMTラインの進捗、品質の見える化を提供するモニタリングパッケージ
- 各装置から送信されるデータを収集して、製品の品質およびSMTラインの稼働の問題となる要因を分析できる分析パッケージ
- 装置が撮像した全画像と関連情報をリアルタイムで保存するトレーサビリティパッケージ

これら以外にも装置同士が通信を行い、各装置が連携するM2Mやインターネット回線を使ったリモート操作によるメンテナンスパッケージがある。各パッケージはそれぞれ単体で

も動作するが、パッケージ同士が連携することでさらなる相乗効果を生む構成となっている。その中でもライン全体の見える化によりボトルネックを見つけ、分析できるモニタリング、分析パッケージについて詳しく紹介する。

4 特徴

4-1. いつでも、どこでも、誰でも使えるパッケージ

モニタリング、分析パッケージでは、“いつでもどこでも誰でも使える”をコンセプトとして開発を進めた。Webベースのアプリケーションにすることで、“いつでもどこでも”を実現した。装置から継続的に送信される様々なデータをサーバーにあるDB(データベース)へ蓄えるデータ保存処理部とBIツール(Business Intelligent:ビジネスインテリジェント)とよばれるアプリケーションのダッシュボード機能を使って画面を表示する部分で構成されている。画面の表示はWEBブラウザから参照でき、ネットワークさえつながっていれば、“いつでもどこでも”、様々な端末で参照が可能となる。装置から送られたデータは分析を行うために全てDBへ蓄える一方、画面表示するまでの時間を短くするためにデータを事前に計算してDBへ保存する方法をとっている。

“誰でも使える”に対しては、UI(User Interface)デザインが重要となる。これまでは一から画面を作っていた所を、外部のBIツールを利用するようにしたことでリッチな画面を短期間で作成できるようになり、ソフトエンジニアはこれまで以上にユーザビリティに専念できるようになった。

また表示部とデータ処理部を完全に分離することで、他のアプリケーションとの連携も可能となる(図1)。

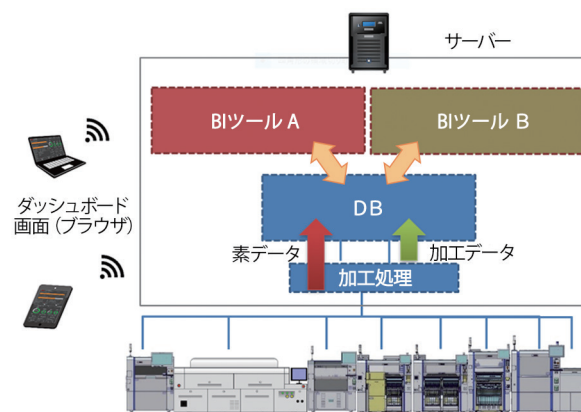


図1 システム構成図

4-2. モニタリングパッケージ(リアルタイムダッシュボード)

モニタリングパッケージでは、SMTフロアにある複数のSMTラインや、各ラインの状態を一覧でモニタリングするリアルタイムダッシュボードを提供している。画面には各装置の状態、進捗、OEE(Overall Equipment Effectiveness: 総合設備効率)、KPI(Key Performance Indicator: 主要業績評価指標)などを表示している(図2、図3)。OEE、KPIはユーザーごとに定義が異なることが多いため、設定によりユーザーの求める指標を表示させることができる仕様となっている。また新たな項目も簡単に追加できる。

ライン	状態	Progress (Actual/Plan)	OEE	稼働稼働率	性能稼働率	品質率
DP_Line_1-1	Stop	進捗 68/100枚	67%	94%	71%	100%
Line2	Run	やや遅延 138/160枚	90%	89%	91%	100%
Line3	Wait	完了 100/100枚	70%	72%	97%	100%
Line4	Run	やや遅延 49/50枚	92%	94%	98%	100%
Line5	Wait	完了 50/50枚	89%	89%	100%	100%

図2 フロアモニタ

YAMAHA Line Monitor		DP_Line_1-1		14:14:06	
Planned Progress (PP)		OEE		稼働率 性能 品質	
Actual Progress (AP)		67%		94% 71% 100%	
Board Count of PP	200	CPH	48,221	Pick Up Rate	99.211%
Board Count of AP	168	Defective Rate	99.221	Board NG	2 2
Lot Name	KLF_M735X_B_CN	First pass yield	98.02%	Over Judge	2 2
Program Name	KLF_M735X_B_CN				
Actual / Plan	68/100				
Work Shift	1				
Line Status	Run				
ステータス	YSK02_Y3102 YSK02_Y3126	Worker			

図3 ラインモニタ

4-3. 分析パッケージ(分析ダッシュボード)

分析パッケージでは、簡単なマウス操作で稼働や品質の問題点を見つけ、問題点を解決するための情報を提供する。

4-3-1. OEE分析

OEEの稼働率、性能、品質という3つの指標から数値の低い項目を選び、分析を行い、アクションを促す分析手段となる(表1)。

例えば品質の数値が低い場合には、画像N点照合機能による分析を行う。これは、各装置が撮像した画像を横並びで表示させる機能で、各装置で問題がなかったかどうかを視覚的に瞬時に判断することができる(図4)。この時のマウンタの画像はトレーサビリティパッケージで保存した画像から連携して表示されるため、原因分析に最適な画像が自動で選択される。

表1 OEE分析例

OEE	分析	アクション
稼働率	装置停止種別 ランキング	段取り工程の改善 人員配置見直し
性能	吸着エラー分析	原因箇所の特定と改善 (ヘッド、フィーダー、データ)
品質	画像N点照合	原因装置の特定と改善

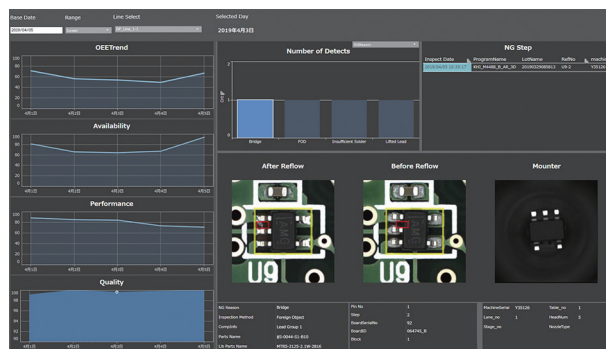


図4 N点照合

4-3-2. 吸着分析

OEEの性能の数値は、装置の短時間停止が主原因で低くなるが、マウンタの場合は電子部品の吸着動作に起因することが多い。部品の吸着に失敗する要因としては、「部品を吸着するヘッド部」や「ヘッド部に取り付くノズル部」、「部品を供給するフィーダー部」、また「部品そのもの」が考えられるが、このような際に、吸着分析機能を使って各項目のワーストランキングを表示させることができる(図5)。ある条件で吸着エラーが発生した場合に、部品以外の条件が違う場合にはどういう傾向がみられるかといった問題個所の特定を簡単な操作で参照することができる(図6)。また、吸着エラーが発生した時の前後のイベントを調べることで原因と結果の関係性を分析できる(図7)。



図5 エラーランキング表示

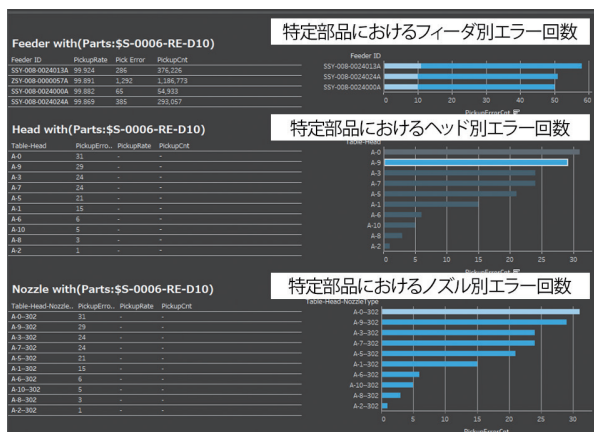


図6 項目別分析

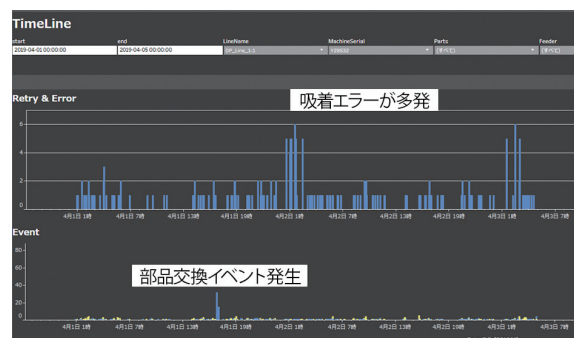


図7 イベント表示

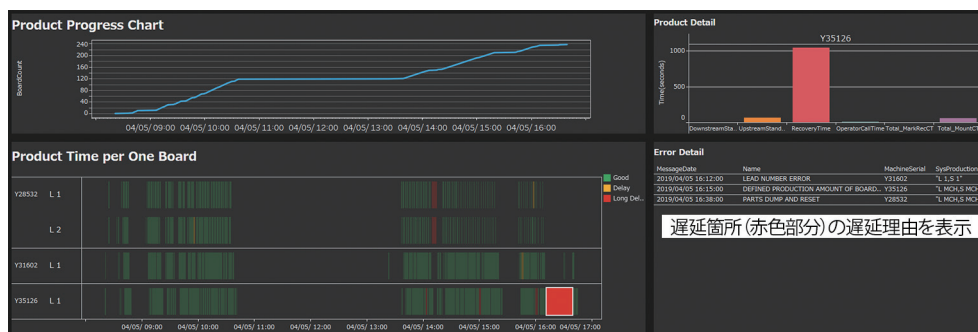


図8 生産分析

4-3-3. 生産分析

生産分析では、マウンタが電子基板へ部品を搭載する1枚ごとの時間を色と線の幅で表示することで、どこで遅延したかをすぐに判断できる。遅延が出ている箇所は赤く表示され、赤い部分を選択すると、遅延理由と遅延したマウンタの前後の各装置がその時にどういう状態だったかがリストで表示される。問題となった装置だけでなく前後の装置の状態を確認できるため、自身の装置の問題か、周辺装置による問題かを判断できる。これまではログとよばれるテキスト情報を使って原因を調査する必要があった。そのため調査の時間とある程度の知識が必要であったが、これらの機能を使うことで誰でも容易に分析ができ、これまでと比較して10%以下の時間で分析が可能となった(図8)。

5 おわりに

2015年から始動したインテリジェントファクトリーは、商品の市場投入は開始したが、さらなるご要望に応えるためにより一層進化させていく必要がある。SMT業界も装置単体のパフォーマンス向上からSMT工場全体の高効率化を求められており、そのために、あらゆるものとインテリジェントファクトリーが容易につながり、自律的に動作する製品を今後も提供していく。

■著者



金子 康弘
Yasuhiro Kaneko
ロボティクス事業部
SMT統括部
商品開発部



横山 泰幸
Yoshiyuki Yokoyama
ロボティクス事業部
先行開発部

細胞（塊）ピッキング&イメージングシステム 「CELL HANDLER™」

CELL HANDLER™ Picking and Imaging System for Single Cells and Cell Aggregates

熊谷 京彦



Abstract

CELL HANDLER™ is a picking and imaging system that carefully, yet rapidly and precisely transfers single cells and cell aggregates. Yamaha started developing the system in 2010 under the slogan “Yamaha Technology for Lives” and delivered the first unit to Fukushima Medical University in September 2017.

Its main function is to pick and transfer single cells or cell aggregates of 10-200 μm diameter to laboratory containers called microplates. The CELL HANDLER™ and its control system apply surface mounter technology. Special materials have been developed for parts that make direct contact with the cells.

CELL HANDLER™ is intended for fields in drug discovery and cancer research, regenerative medicine, antibody therapy, etc. This report introduces the technology and examples of specific CELL HANDLER™ applications.

1

はじめに

細胞（塊）ピッキング&イメージングシステム「CELL HANDLER™」は、細胞（塊）を高速・高精度かつダメージレスに移動するシステムである。「ヤマハの技術を命のために」をスローガンに、2010年に開発を開始し、2017年9月には1号機を公立大学法人福島県立医科大学に納入している。

移動のターゲットは直径10～200 μm の細胞（塊）¹⁾（図1-1）であり、それらをマイクロプレート（図1-2）と呼ばれる研究用の容器に移動（ピッキング）することを主な機能としてい

る。機体やその制御には、サーフェスマウンターの技術が応用されており、細胞に触れる部分には、それに特化した部材を開発し使用している。

利用分野は、創薬・がん研究分野、再生医療分野、抗体医療分野等が想定されている。本稿ではCELL HANDLER™に使用されている技術と利用場面の具体例を紹介する。

1) 細胞（塊）・・・細胞および細胞が塊状に凝集したもの。

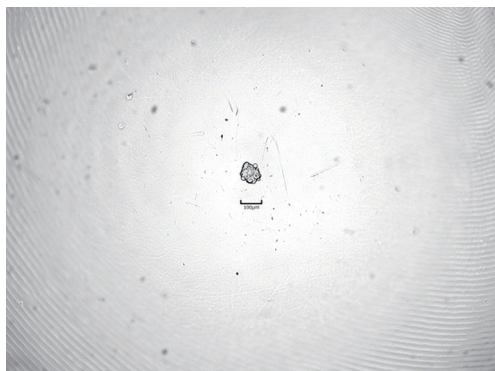


図1-1 100 μm程の細胞塊

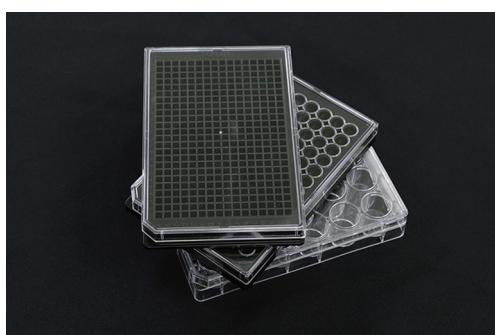


図1-2 マイクロプレート

2 製品の狙い

近年、医療業界では抗体医薬品の台頭、iPS細胞を用いた組織製造の開始、個別化医療時代の到来などが話題となっている。この潮流の中で、細胞実験の重要性が再認識され人の手を介さないことによる評価精度向上や製造細胞均質化の手法に注目が集まっている。

従来、細胞試験には取り扱いが容易な二次元培養法が主に使用されており高度な自動化も実現されている。しかし、人体内に存在した際の特性や機能を失うため、生体における有効性を評価しにくいデメリットがある。一方、三次元培養法は、それで得られた細胞塊が元の存在形態に近く、特性や機能を良く再現することで知られているが、取り扱いが難しく人の手技に頼るところが大きいため自動化が進んでいない(図2-1)。

CELL HANDLER™はこの点に着目し開発されている。細胞（塊）を高速・高精度にハンドリングすることにより様々な分野の三次元細胞実験をハイスループット化することを狙っている。

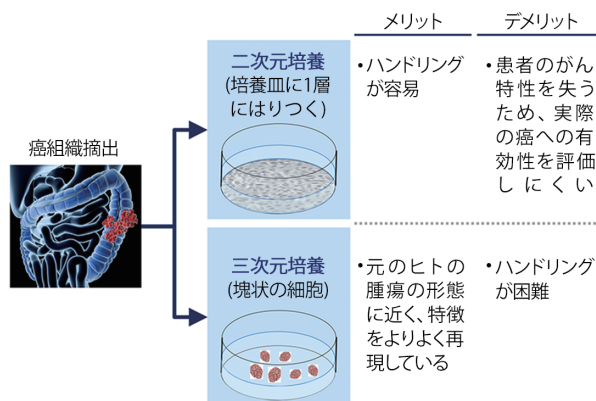


図2-1 がん細胞における二次元培養と三次元培養の比較

3 製品の特徴

3-1. 構成

製品の構成を図3-1に示す。

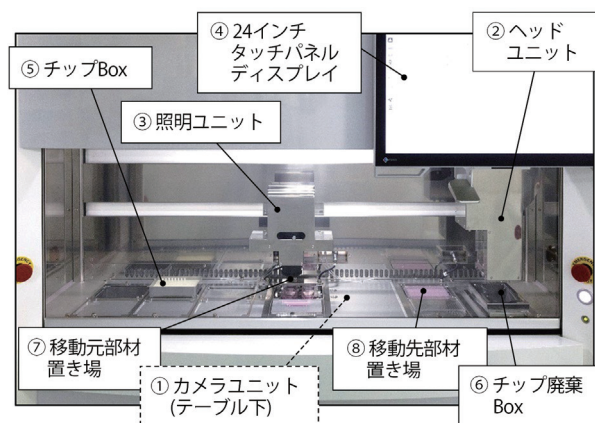


図3-1 製品の構成

- ① カメラユニット：テーブル下に倒立顕微鏡²⁾が設置されている
4、10倍レンズによる明視野、位相差、蛍光観察が可能
- ② ヘッドユニット：8本のノズルにチップを装着し、細胞を移送する
- ③ 照明ユニット：上から部材を照らす、絞りの調整が可能
- ④ ディスプレイ：タッチ操作による直感的な操作が可能
- ⑤ チップBox：チップを自動装着するためのBox、384本設置可能
- ⑥ チップ廃棄Box：チップを自動廃棄するBox
- ⑦ 移動元部材置き場：部材設置面はヒーターガラスであり、観察と温度調整が可能
- ⑧ 移動先部材置き場：主にマイクロプレートを置く、構造は⑦と同様

2) 倒立顕微鏡・・・試料を下側から観察する構造の顕微鏡

3-2. 部材

3-2-1. Yamaha Precision Chamber (図3-2)

細胞塊の単離と吸引成功率向上を狙い開発された容器で、細胞塊の移動元として用いられる。16 mm角のメッシュ内におよそ2000個のグリッド(一辺が400 μm) (図3-3)が形成されている。各々のグリッド中央には微小な穴(30 μm 角)があり、不要細胞(塊)のふるい分け、細胞塊の再配置、吸引時の水流最適化の機能を担っている。

また、各グリッドを仕切る壁の上部は斜面になっており、細胞塊の落下を促進するとともに、チップ先端をグリッド中央にガイドし吸引位置のズレを防止している。



図3-2 Yamaha Precision Chamber

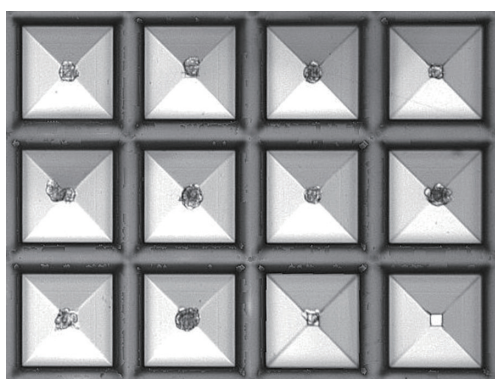


図3-3 細胞塊の入ったグリッド

3-2-2. Yamaha Precision Tip (図3-4)

細胞塊の吸引吐出をダメージレスに行うために開発されたディスポーザブルタイプのチップ。シリンジ(筒)とプランジャ(押し子)の2部品で構成されている。

先端部の内径は180 μm であり、細胞塊サイズに最適化されている。プランジャ構造を採用したことで、極微量の培地吸引と細胞(塊)吸引の両立を実現している(図3-5)。

チップは8本装着でき、それぞれ独立した動作が可能である(図3-6)。このことによりピッキング作業の高速化を図っている。



図3-4 Yamaha Precision Tip



図3-5 吸引の様子

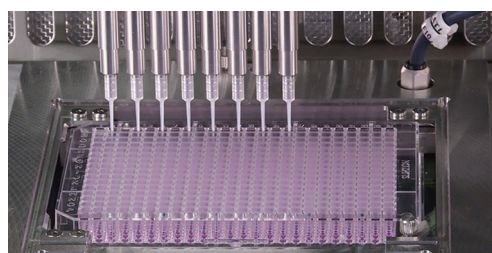


図3-6 吐出の様子

3-3. 主な機能

3-3-1. 細胞塊認識

CELL HANDLER™は、光学顕微鏡ユニットと高解像度カメラを内蔵しており、移動前後の細胞塊の画像を取得できる。同時に画像処理による細胞塊認識(図3-7)が行われ、個々の特徴量や三次元的な位置情報を取得している。

これらは、細胞塊選択や吸引ポジション決定に使用されるだけでなく、細胞塊集団の統計的解析にも使用が可能である。さらに、画像と細胞塊データは時間情報とともに自動的に保存され、実験のトレーサビリティ確保に有用である。

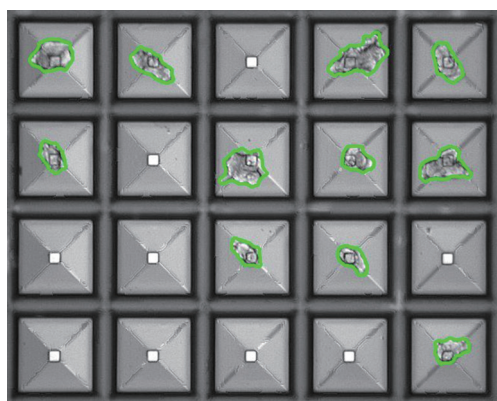


図3-7 認識された細胞塊

3-3-2. ヒストグラム選択

研究者が目的の細胞塊を高精度、短時間に選択できる機能は、ピッキングマシンとして必須である。CELL HANDLER™は、認識された細胞塊データ（面積値、真円度、グレイスケールなど）をヒストグラムとして表示することでそれを実現している（図3-8）。

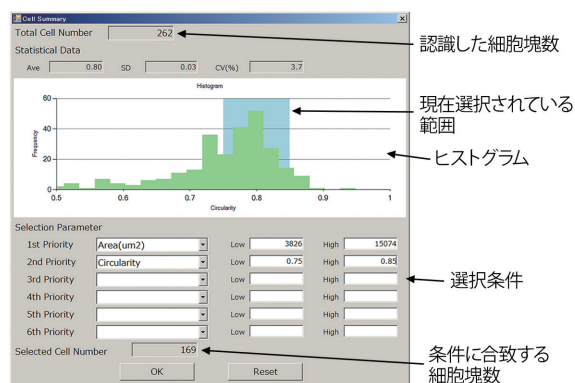


図3-8 ヒストグラム選択機能

研究者は、ヒストグラムにより特徴量の分布を視覚的に認識することが可能であり、選択範囲を容易に決定できる。また、最大6個の特徴量を重ねて選択条件として使用できるため、高精度な選択が可能となる。

さらに、機械学習機能も備えており、研究者の手作業による選択を学習させることが可能である。学習後はスコアが特徴量の一つとして出力され選択条件として利用できる。

3-4. 使用事例

3-4-1. 抗がん剤感受性試験への適用事例

CELL HANDLER™の最も一般的な用途は抗がん剤感受性試験である。

ここで言う抗がん剤感受性試験とは、マイクロプレート中

の細胞塊に段階的な濃度の抗がん剤を添加し数日の培養後、細胞塊の生存率を測定する試験を指す（図3-9）。この試験により、特定細胞塊への抗がん剤効果を評価できるため、創薬や個別化医療の現場で利用されている。

CELL HANDLER™をこの試験に用いることで、必要な試料を削減できる、試験誤差を低減できる、より多くの抗がん剤を評価できるといった利点がある。

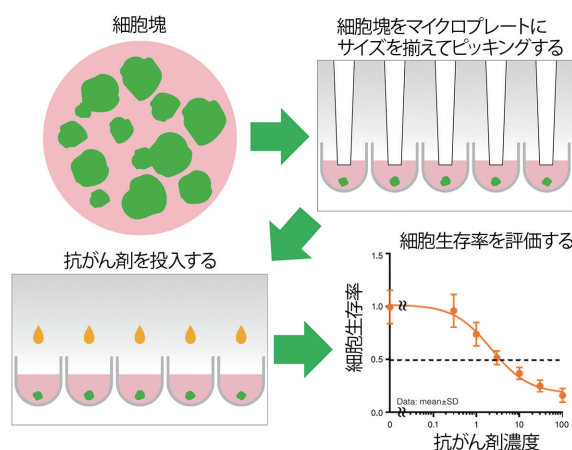


図3-9 抗がん剤感受性試験

3-4-2. シングルセルへの適用事例

CELL HANDLER™は細胞塊だけではなく、シングルセルのピッキングにも利用が可能である。シングルセルとは細胞の最小単位であり、直径15 μm程の大きさをもつ。シングルセルを一つだけマイクロプレートに移動することにより、細胞由来の遺伝子を個々に解析できるため、集団では見逃していた特性を発見することができる。

さらに、蛍光標識を利用すれば特定の遺伝子を発現したものを等を選択することが可能であり、図3-10にその一例を示す。蛍光標識されたシングルセル（GFP³導入CHO⁴細胞）を選択・移動し、六日間の培養後に蛍光特性を損なわずコロニー⁵を形成している様子が観察できる。これは、CELL HANDLER™のピッキングがシングルセルに対してもダメージレスであることを示している。

- 3) GFP …… Green Fluorescent Proteinの略、緑色の蛍光を発するタンパク質
- 4) CHO …… Chinese Hamster Ovaryの略、CHO細胞は研究用途に広く使用される
- 5) コロニー …… 細菌や培養細胞などが形成する単一細胞由来の集団

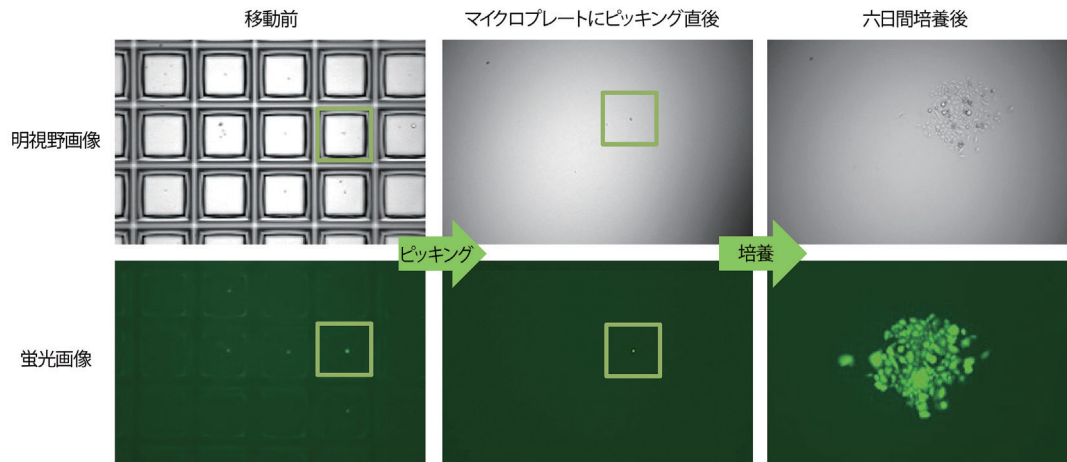
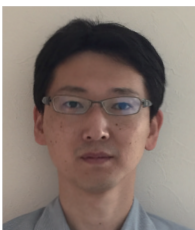


図3-10 蛍光標識したシングルセルのピッキング事例

4 おわりに

CELL HANDLER™は、ヤマハのロボティクス技術を医療研究分野に応用した初の商品である。当初は、細胞塊のみを扱う製品であったが、国内外の研究機関や企業と積極的にコラボレーションすることで、その機能や適用範囲は拡大を見ている。また、CELL HANDLER™の機能を生かしたソリューションビジネスへの展開を開始している。今後も、展示会等を通じて認知度を向上し、より多くのお客様に受け入れられる製品にしていきたい。その結果として、ヤマハの技術が世界の人々の命を救う一助となることを願っている。

■著者



熊谷 京彦

Takahiko Kumagai

先進技術本部

NV事業統括部

MDB開発部

■映像ライブラリー

<https://global.yamaha-motor.com/jp/profile/technical/library/mov/55ss08.html>



防音型インバータ発電機 EF1800iS (海外向けモデル名 EF2200iS)

EF1800iS Low-Noise Inverter Generator
(Overseas Market Model Name: EF2200iS)

山村 尚 長澤 佑樹 金子 誠孝 望月 俊治 川村 晃正 大久保 公貴



Abstract

Demand for 2kVA-class generators is driven by their usage in a variety of situations, such as for power supply to RVs or power sources for tools at home or on construction sites (in the U.S.A.), as well as power sources for tools and night lighting on construction sites, lighting for street vendors, heating/refrigeration, and more recently for disaster readiness (in Japan), making them the output class with the highest unit sales.

However, the emergence of low-priced, multi-function Chinese brands and greater output performance by major brands has meant that existing models have lost competitiveness. Yamaha Motor has therefore developed and launched its first new generator in ten years, the EF1800iS.

While based on the layout of the EF1600iS, the new model has seen improvements to the engine, which together with the newly developed generating mechanism and inverter control unit has increased output performance. Customer feedback has also been incorporated into improving operability and maintenance.

In addition, dedicated features have been included for specific uses such as camping (power supply to RVs) in the U.S. market and disaster readiness/construction equipment rental in the Japanese market.

In this report, we will introduce the details of the new model's development.

1

はじめに

2kVA 出力帯の発電機は、アメリカ市場ではキャンピングカーへの給電や自宅および工事現場での電動ツールの電源として、日本市場では工事現場での電動ツールや夜間照明、路上屋台での照明や保温・保冷機器の電源として、また昨今は災害時の備えなどさまざまなシーンで需要があり、最も販売台数の多い出力帯となっている。

しかしながら、安価で多機能な中国勢の台頭やメジャーブランドの出力性能の向上等により既存モデルの競争力が低下してきたため、10年ぶりとなる「EF1800iS」を開発し市場投入した。

本モデルは「EF1600iS」のレイアウトをベースにエンジンの改良や発電機、インバータコントロールユニットを新規開発することで出力性能を向上させるとともに、市場の声を参考に操作性、メンテナンス性の改良を加えた。

さらにアメリカ市場でのキャンピングユース（キャンピングカーへの給電）や日本市場での防災、建機レンタルといった各用途に合わせた専用フィーチャーを採用した。

ここにその開発内容を紹介する。

2

開発の狙い

「EF1600iS」に対し高出力化、競合他社にない機能の追加等（下記下線）による差別化を図ることで選択肢を広げ、



図1 フィーチャーマップ

アメリカ市場においては 2kVA 出力帯発電機のシェアを 3% から 10% へ拡大することを目指した。本開発では、その達成に向けて以下の項目を主要な目標に設定した。

- 1) 定格出力 1.8kVA およびエアコン等の高い起動電力に対応するブーストモードの採用
- 2) エンジン始動手順数の削減および長期保存時に便利なキャブレター内ガソリン排出コックの採用
- 3) 使用電力が一目でわかる 4 段階 LED 出力インジケーターの採用
- 4) 運びやすさの向上とスタイリッシュなボディーデザインの両立

本モデルのフィーチャーマップを図 1 に、仕様諸元を表 1 に示す。

表1 仕様諸元表

名称	EF1800iS	
型式	7PC1	
発電方式	多極回転界磁形	
交流	定格周波数	50/60Hz
	定格出力	1.8kVA
	定格電圧	100V
	定格電流	18A
直流	定格電圧	12V
	定格電流	3A
並列時交流	定格出力	3.6kVA
	定格電圧	100V
	定格電流	36A
使用燃料	無鉛ガソリン	
燃料タンク容量 ※赤レベル	4.7L	
連続運転可能時間 *1	10.5h~4.2h *2	
エンジンオイル容量	0.4L	
全長×全幅×全高	555mm×300mm×470mm	
乾燥重量	25kg	
騒音値	Lwa 3/4 負荷 *3	92dB
	7m 1/4 負荷~定格負荷 *4	57~65dB(A)

*1: 連続運転可能時間とは、赤レベルまで燃料を入れた状態で運転できる時間。
*2: エコノミーコントロール ON 時 1/4 負荷~定格負荷。
*3: ISO03744 に準ずる試験環境での音響パワーレベル。
*4: エコノミーコントロール ON 時、機測 7m、4 方向の算術平均値。

3 技術的特徴

3-1. エンジン

軽量コンパクトな排気量 79cc の現行エンジンをベースとしながら目標出力性能を達成するために、下記の吸排気部品を見直し、流量改善による性能アップを狙った (図 2)。

- ・エンジンのインポート形状の最適化
- ・インテークバルブ径のサイズアップ
- ・キャブレターボアベンチュリのサイズアップ
- ・エアクリナーの吸気通路経路の拡大
- ・マフラーパーテーションの構造変更、排気パイプ径のサイズアップ

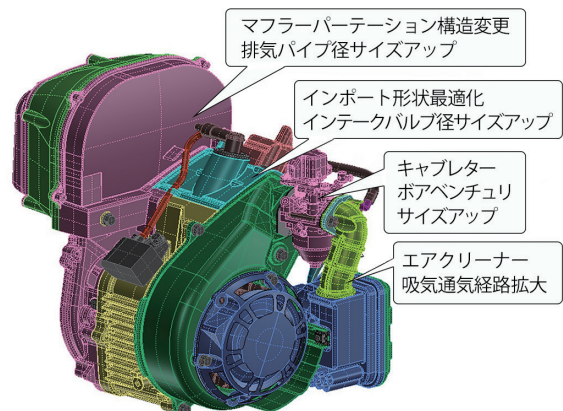


図2 エンジン性能アップ部品

性能アップの背反として、強制空冷のエンジンの冷却性能不足が予測されたため、流体解析を活用してシリンダヘッドの放熱フィンおよびエアシュラウドの通路形状を最適化した。それにより、排気量とエンジン外形サイズを同等としながら、従来モデルより 10% の性能アップを達成した。

3-2. ボディ

3-2-1. デザイン

何処でも誰でも使える機能性の高さと安心・親近感を、使って分かるデザインでなく、見て分かるデザインに昇華させた。具体的には、中心の片手用ハンドルと両端の両手・二人用ハンドルで運搬性を向上させ、タフなイメージと親しみやすさを両立したラウンドスクエアボディによる、新しい機能美としてまとめた。

3-2-2. 始動性・整備性

始動操作を簡素化するため、エンジンスイッチと連動させた燃料コックを採用した。

また、リア側のメンテナンスハッチには、工具レススクリュー（図 3）を採用した。これにより簡単にハッチを外せるようになり、オイル交換等の整備が容易になった。さらに、キャブレター内の燃料を排出するためのコックを設けることで、長期保管時やメンテナンス時に簡単に燃料を抜くことができるようになり、整備性を向上させた。



図3 工具レススクリュー



図4 キャブレター燃料排出コック

3-2-3. 冷却

エンジンの性能アップにともない、完成機全体での冷却性能を見直して強化し、冷却仕様を成立させた（図 5）。

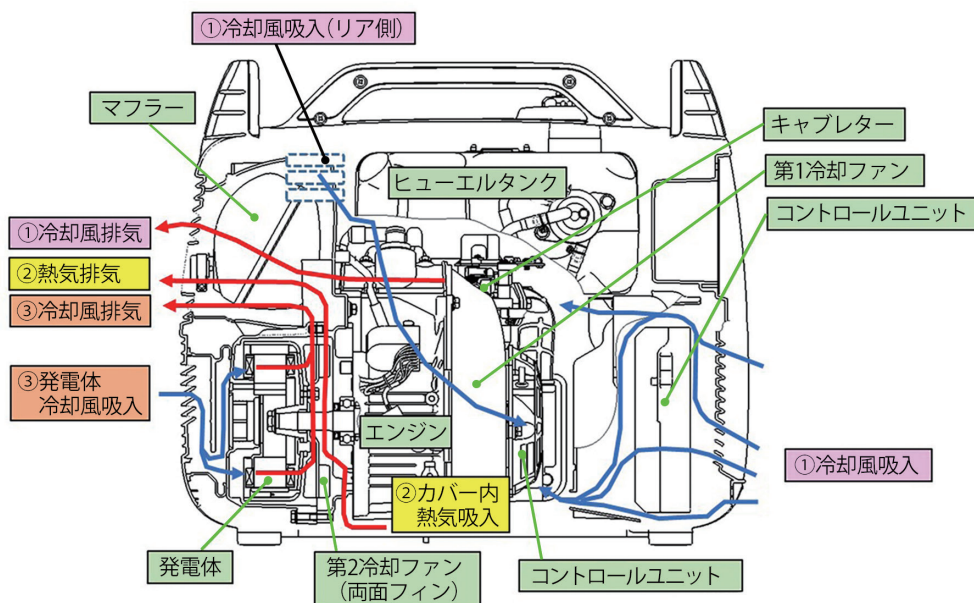


図5 冷却システム

以下に対応事例を示す。

- ・リアカバーへの冷却孔の追加（カバー内部のタンク周辺にこもった熱を抜く）
- ・吸排気ルーバーおよびコントローラーのフィン、カバー形状等の冷却通路の最適化

3-2-4. コントロールパネル

コントロールパネルについては、電力や警告等の表示を備えた多機能 LED インジケーターと、安定した DC12V を取り出せる車載アクセサリソケットを新規に採用した。また、LED インジケーターについては、下部に LED 照明を備えることで暗所での操作部の視認性を向上させた。

3-3. 発電体

発電効率のアップについて下記を主要ポイントとし、出力損失の低減を行った。

- ・熱損失分の削減
- ・磁気損失分の削減

従来の机上計算の設計に加えて磁気解析を活用し、巻線抵抗損失分（熱損失）および鉄芯磁路体積を削減し、鉄芯寸法を最適化した。また、安定した巻き線抵抗および起磁力にするため、鉄芯ティース間の角度を従来モデルに対して 3° 広げた形状とすることで、巻線有効面積率を従来比で 45% 増やし、巻き線導体径をアップすることができた。結果として発電体の巻線抵抗としては、熱損失を 10% 削減することができた（図 6、7）。

次に磁気損失の削減のために、マグネット幅に対する鉄芯先端のティース幅をやや広めにとり、フェライトマグネットから受け取る磁力線を効率よく循環させる形状を採用した。また、マグネットの素材結晶配向を放射状配向からストレート配向とすることで磁力線による起磁力の効率化を行った。その結果、磁気損失分を 3% 削減することができた。

さらに、磁力線のエアギャップ損失の低減として、ローターとエンジン取り付けテーパの芯出し加工をローター ASSY 後に施すことにより、取り付けテーパとマグネットの同心精度を上げ、エアギャップは従来比で 3 割減を実現した。それにより製品の電圧のバラツキが無くなり、安定した品質を維持するとともに、発電効率 3% アップを達成することができた。

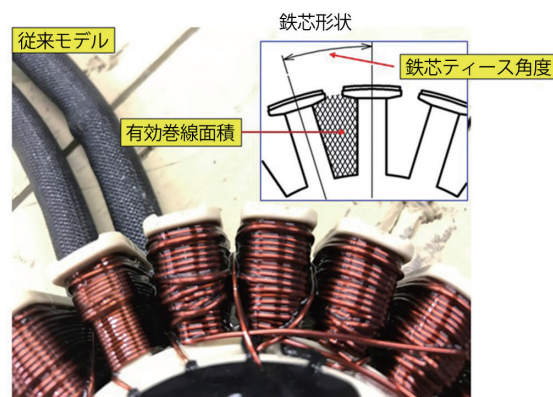


図6 発電体（従来モデル）

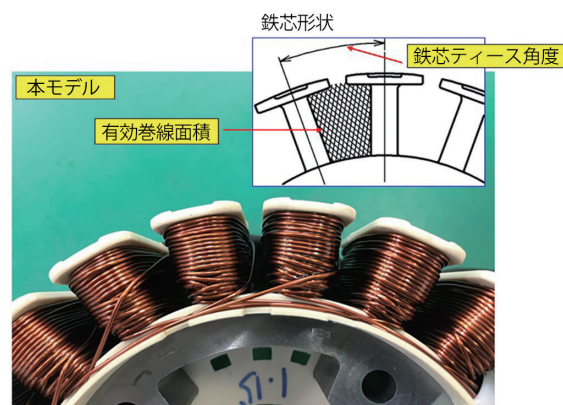


図7 発電体（本モデル）

3-4. インバータコントロールユニット

主要課題は以下の 3 点であり、それぞれの要求を満足する必要があった。

- ・中波周波数帯での電磁ノイズの低減（伝導・輻射）
- ・効率アップ
- ・負荷起動性アップ

電磁ノイズを低減する場合、コモンモードチョークコイルによるノイズフィルタを活用することが効果的であるが、ノイズフィルタを実装することで損失が増えてしまうデメリットがある。また、ノイズフィルタは伝導ノイズには効果的だが、輻射ノイズにはノイズ低減効果があまり期待できないという課題があった。そこで、本モデルでは、バイポーラ PWM 方式によるインバータ駆動および AC リアクトルの閉磁路化、インバータ入出力をバイパスするコモンモード電圧抑制回路を採用した。これにより、ノイズフィルタを用いずに電磁ノイズの低減を実現した。（定格出力・平均値検波にて、伝導は 10dB 以上、輻射は 20dB 以上低減）

また、上記とあわせて構成部品の最適化を実施することにより、効率をアップさせた。（定格出力にて、約 2% 向上）

さらに、本モデルではスイッチ ON 後に 5500rpm を 1 分間維持するブーストモード機能を追加した。これにより大きな負荷起電力が必要な機器でも、起動時の出力電圧の低下を抑制して起動させることを可能にした。

3-5. 並列運転

本モデルも EF1600iS 同様、オプションの並列コード（本体取り付けタイプ）を使用することで並列運転が可能である（図 8）。ただし、EF1600iS は並列定格出力が単機定格出力の 1.9 倍であるところ、本モデルは 2 倍を目標とした。また、本モデルではキャンピングカー等でのレジャーユースが多い米国向けに、コントロールパネルに装備した RV レセプタクル（30A 出力）より 2 台をケーブルのみで接続するコンパニオン仕様を設定している（図 9）。



図8 米国向け以外仕様



図9 米国向けコンパニオン仕様

上記目標を達成する場合、並列の 2 台間で発生する無効電力のやりとり（横流）が課題となる。従来の制御では出力電流で出力電圧を垂下しているため、横流が大きくなることで出力電圧が垂下してしまい、定格出力電圧の維持が困難であった。さらに、コンパニオン仕様においては、並列ケーブルによりインピーダンスアンバランスが発生することによ

て、横流が大きくなってしまい、定格出力電圧の維持がより困難となる。

そのため、本モデルでは、下記の対応により横流を最小限に抑えている。

- ・有効電力による出力電圧の垂下制御
- ・負荷力率による周波数の可変制御

これにより、並列定格出力はコンパニオン仕様も含めて単機定格出力の 2 倍を達成することができた。

4 おわりに

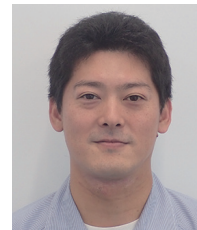
本モデルは 10 年ぶりのインバータ発電機の新規開発であったため、企画段階では多くの市場要望からの仕様の絞り込みに時間を要したが、最終的には使用できる電気機器も増え、使い勝手も向上したことで、これまで EF1600iS を選択されなかったお客様にも訴求できる商品ができたと考えている。

今後お客様の声、市場の情報に耳を傾け、より多くのヤマハユーザーを増やせる発電機開発を進めていく。

■著者



山村 尚
Takashi Yamamura
ヤマハモーター
パワープロダクツ株式会社
開発部



長澤 佑樹
Yuki Nagasawa
ヤマハモーター
パワープロダクツ株式会社
開発部



金子 誠孝
Masataka Kaneko
ヤマハモーター
パワープロダクツ株式会社
開発部



望月 俊治
Shunji Mochiduki
ヤマハモーター
パワープロダクツ株式会社
開発部



川村 晃正
Kousei Kawamura
ヤマハモーター
パワープロダクツ株式会社
開発部



大久保 公貴
Yoshitaka Ookubo
ヤマハモーター
パワープロダクツ株式会社
開発部

ショットピーニング残留応力付与による ピストン鍛造金型寿命改善

Shot Peening Residual Stress Application Leads to Greater Piston Forging Die Life

村松 龍馬 榊原 浩 小倉 純一 山村 易見

要旨

ヤマハ発動機では、ピストンの軽量化のために鍛造ピストンを採用している。近年では、さらなる軽量化のために製品形状の複雑化が進んでおり、それにともない鍛造成型時の金型への負荷応力が高まることによって、金型の早期破損を引き起こしている。金型の短寿命化により、金型償却費が製造コストの14%を占めるまでとなり、コストの低減が課題となっている。鍛造ピストンのコスト競争力を上げるためにも、製品の軽量化とそれにとまなう金型寿命の改善が必須である。

そこで、鍛造ピストン用金型にショットピーニングによって圧縮応力を付与し、成型時に発生する応力を抑制する手法で金型寿命の改善に取り組んだ。その結果、1.7倍の寿命向上効果が確認でき、これにより金型費を40%削減することができた。

Abstract

Yamaha Motors use forged pistons to reduce the weight of its pistons. In recent years, as the product shape has become more complicated for further weight reduction, the load stress on the die during forging has increased. This has been the cause of early breakage in the die themselves. Due to the shortening of the die life, depreciation costs account for 14% of manufacturing costs, making cost reduction an issue to be tackled. In order to increase the cost competitiveness of forged pistons, it is essential to reduce the weight of the product itself and improve the life of the die used to create them.

In order to help achieve this, we applied compressive stress to the die used for forged pistons by shot peening and worked to improve the die life by suppressing the stress generated during molding. As a result, a life improvement effect has been achieved at 1.7 times, and this has resulted in a 40% reduction in die costs.

1 はじめに

二輪車のエンジンは高速回転を常に求められており、慣性重量による大きな振動を起こさないため、軽量ピストンが必要とされている。軽量化されたピストンを成型するには金型の複雑形状化が不可欠だが、複雑化により金型の早期破損を招き、ピストンの製造コストの増加につながっている。この問題を解決するために、金型の寿命改善に取り組むことにした。

2 ピストンの軽量化にとまなう問題

ピストンは、強度を保ちつつ軽量にする必要がある。軽量化されたピストンは、従来のピストンのランドとよばれる部位に溝を設けて、そこにリブを立てることで強度と軽量化の両立を図っている(図1)。この軽量溝を鍛造で成型するためには、型に突起形状を設ける必要がある(図2)。しかし、この形状の型は突起部分に応力が集中し破損に至り、突起形状のない従来の型に比べて1/10ほどの寿命となっている。

そのため従来のピストンに比べて、軽量溝をもった軽量化ピストンは金型償却費(以下、金型費)が高くなってしまっている。そこで金型費を下げるための活動として「金型寿命向上」

をテーマとして掲げた。本稿では「金型寿命向上」の取り組みについて報告する。

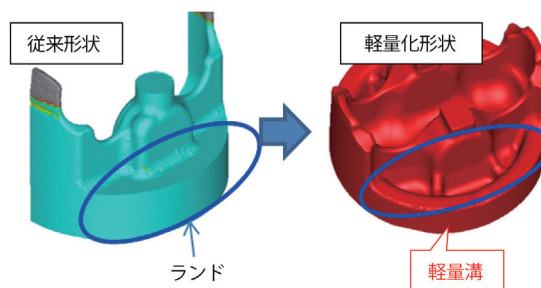


図1 従来ピストンと軽量化ピストン

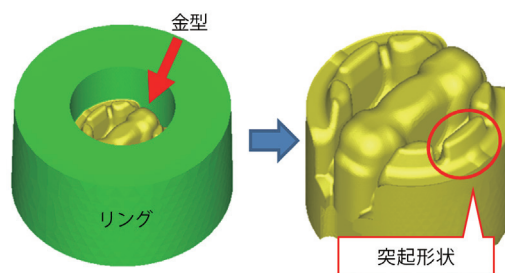


図2 金型の突起形状

3 開発の狙い

ピストンの鍛造コストのうち、50%が金型費で占められている。ピストンの製造コストを下げるため、金型費を下げる施策として寿命を2倍にすることで金型費を1/2にすることを目標とした(図3)。

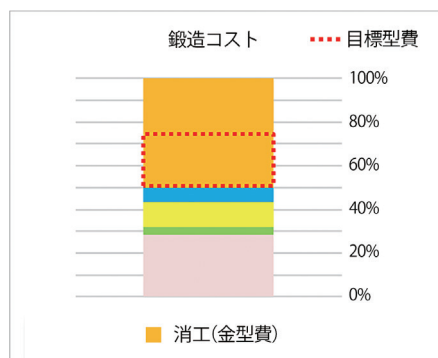


図3 コスト構成

4 現状分析と対策案の検討

4-1. 破損部位の調査

金型寿命を延ばすためには、金型の破損原因を調査する必要がある。寿命の短い金型の破損形態を分析するために、破損した金型の組織観察を行った(図4)。破損部位の組織観察の結果、R部を起点とする放射状模様および疲労破壊の特徴である貝殻模様である貝殻模様が確認された。クラック進展中の金型の断面を観察すると、上側に進行するクラックと下側に進行する複数のクラックが発生していることが確認できた。以上のことからR部を起点として疲労破壊が発生し、クラックが進展することによって金型破損が発生していることが分かった。

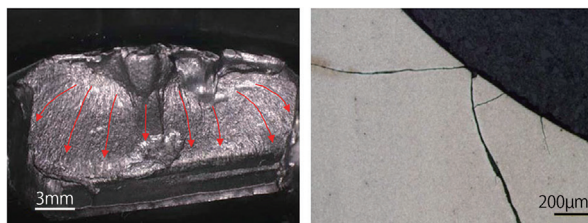


図4 組織観察結果

4-2. 解析による応力分布の確認

疲労破壊が起こっていることから、起点のR部には高い力が加わっていることが考えられる。そこで構造解析を行い、破損部位周辺の応力分布を確認した。解析結果より、クラックの起点部分で一番大きな引張応力が出ているのが分かった

(図5)。この引張応力が繰り返し発生することで疲労破壊が起こっていると考えられる。

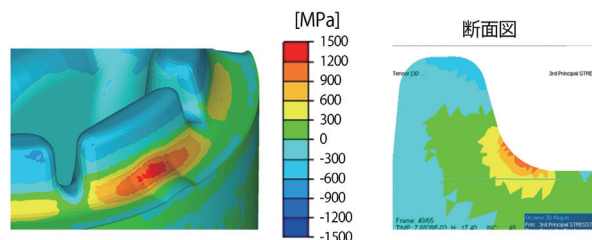


図5 破損部位の最大主応力分布

4-3. 疲労現象

延性金属においては、疲労現象は繰り返し応力のもとで材料の表面に生ずる非可逆的な滑り変形が、次第に表面に微細な凹凸または入込み／突出しを作り出す過程からなることが知られており、疲労亀裂は、通常、そのような入込み／突出し部に形成される^[1](図6)。

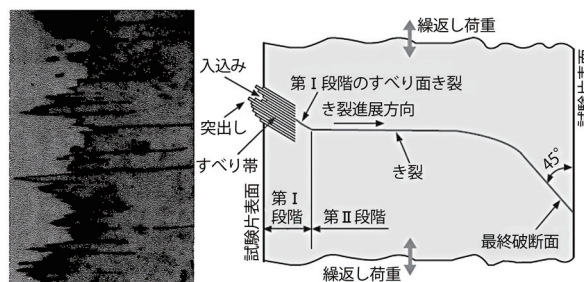


図6 高力アルミニウム合金平滑材の疲労で観察される種々の破壊形態^[1]

組織観察と構造解析の結果から、今回のピストン金型にも同様の現象が起こっていると考えられる。滑りを起こさないためには、繰返し応力を抑制する必要がある。その方法として、繰返し応力が発生する場所にあらかじめ圧縮残留応力を付与しておき、滑りを抑制する手法がある。

そこで今回の取り組みでは、圧縮応力を付与する方法を検討することにした。圧縮応力を付与する工法を表1に示す。工法の選定にあたっては、ショットピーニング、磨き、浸炭焼入れ、高周波焼入れの4工法について、圧縮応力の付与の大きさ、金型の変形のしにくさ、金型への処理コストを評価した。

磨きに関しては、すでに金型製作工程の最終工程として導入済みである。浸炭焼入れは、今回の金型材である工具鋼には適していない。高周波焼入れに関しても、破損部位がR部をもつ突起形状であるため、今回の金型には向いてない。ショットピーニングに関してはどの手法よりも大きな圧縮応力を付与することができ、変形しにくい処理であるため今回の金型に最も適している。

以上のことから、ショットピーニングを圧縮応力付与の工法として選定した。

表1 圧縮応力工法比較

工法	圧縮応力	備考	変形しにくい	コスト
ショットピーニング	◎	大きな圧縮応力を付与できる	◎	○
磨き	○	導入済み	◎	△
浸炭焼入れ	○	工具鋼には向かない	×	◎
高周波焼入れ	○	複雑形状には向かない	×	△

4-4. ショットピーニング

ショットピーニングとは、冷間加工の一種である。ショットピーニングを一言にしていえば、無数の鉄あるいは非鉄金属の丸いたまを高速で金属表面に衝突させることである(図7)。これら鉄の丸いたまをショットという。一般的には材料に比べショットは硬いので、このショットが高速で材料の表面に衝突すると、材料表面がへこみ、表面に丸いくぼみを残すようになる。従ってショットピーニングを行った面は無数のくぼみ(痕)でおおわれるようになり梨子地模様となるが、表面の硬さが増し、また繰返し荷重に対しては表面層に付与された圧縮残留応力が相殺する形で作用し疲れ強さが増す^[2]。

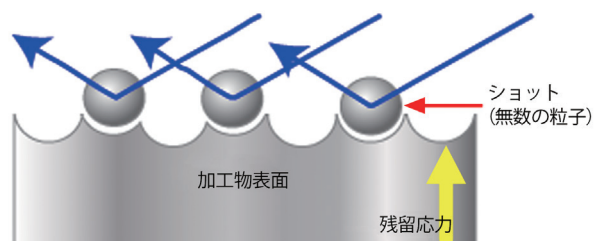


図7 ショットピーニング^[2]

5 圧縮応力による寿命向上効果

5-1. 圧縮残留応力付与と疲労寿命の確認

金型に残留圧縮応力を付与する前に、試験片を用いて、残留応力が付与できるか、また疲労寿命が向上するか疲労試験を実施し確認を行った。試験片材料はピストン鍛造に用いられるマトリックスハイスに金型と同様の焼入れ焼き戻しを処したものを使用した。

疲労試験の方法は様々あるが、今回は表面起点での破損を促進する回転曲げ疲労試験を選択した。熱の影響を除外するために、温度は常温にて実施した。応力振幅は、疲労形態を実機に近付けるため、10000回前後で破損する応力を設定した(表2)。

回転曲げ疲労試験は島津製小野式回転曲げ疲労試験機を用いて行った(図8)。

表2 回転曲げ疲労試験条件

試験機	島津製小野式回転曲げ疲労試験機
回転数[rpm]	3460
試験温度	室温
応力振幅[MPa]	±1400
材料	マトリックスハイス
熱処理	焼入れ焼き戻し

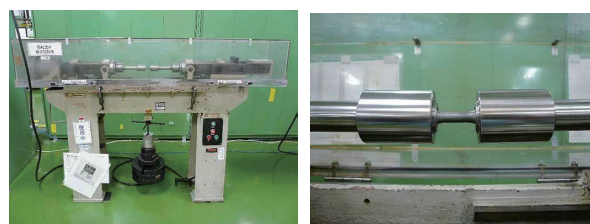


図8 島津製小野式回転曲げ疲労試験機

試験片は、生産型と同等条件で作成した試験片Aと、その試験片にダブルショットピーニングを施した試験片Bを用意した。ダブルショットピーニングとは、異なる大きさのメディアをそれぞれ照射して適度な深さまで応力を付与する方法である。まずはX線回折装置(以下、XRD)を用い、表面の残留応力を比較した。

測定の結果、試験片Aは-621MPa、試験片Bは-1241MPaの残留応力を確認した。試験片Aに対して、ダブルショットピーニングを施した試験片Bの方が-620MPa圧縮側に応力が付与されていることが分かる(図9)。

この試験片Aおよび試験片Bを用いて、回転曲げ疲労試験を実施した。

結果は、試験片Aが10200回で破損、試験片Bが39700回で破損した(図10)。ダブルショットピーニングを施すと、4倍の寿命向上効果があることが確認できた。

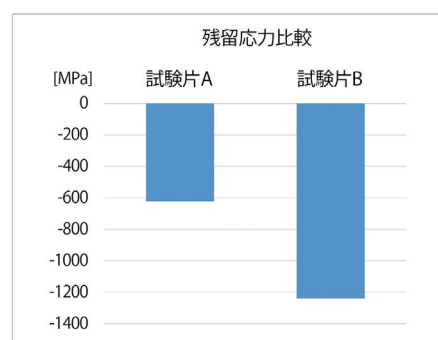


図9 残留応力比較結果

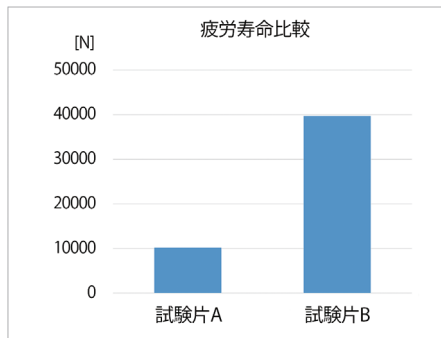


図10 疲労寿命比較結果

5-2. 圧縮残留応力の付与深さ

与える圧縮残留応力の深さや値を変化させた際、寿命に影響があるかの確認を行った。

まず、残留応力の付与深さに差をつけることができるか確認する。そのためにメディアの大きさと処理回数を変えて、深さ方向の分布に変化を加えた。

電解研磨機とXRDを用いて、条件を変えながらそれぞれの試験片の残留応力の付与深さを確認した。その結果、トリプルショットピーニング>ダブルショットピーニング>シングルショットピーニングの順に、深い部分まで圧縮応力が付与できていることが分かった(図11)。

次に、残留応力の値をさらに圧縮側に増やそうと試みた。しかし、条件を変えても1200MPa以上付与することができなかった。この理由としては、材料の降伏応力以上の残留応力は付与できないことが考えられる。

残留応力の付与した深さと寿命の関係をみるために、それぞれの処理方法で試験片を用意し、疲労試験を実施した。今回の疲労試験では、実機の鍛造状態をできるだけ模擬するために、周波数や試験温度を実機に合わせて設定し、引張圧縮試験で再現した(表3)。

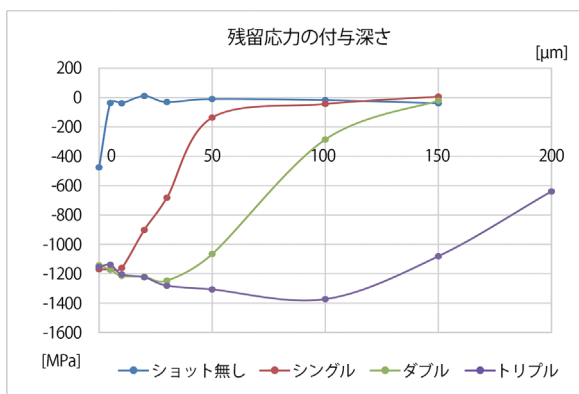


図11 残留応力比較結果

表3 回転曲げ疲労試験条件

試験機	油圧サーボ疲労試験機
周波数[Hz]	10
試験温度[℃]	300
応力振幅[MPa]	±1200
材料	マトリックスハイス
熱処理	焼入れ焼き戻し

疲労試験の結果は、深さ方向で残留応力の分布が変わっても大きく寿命に影響しないことが分かった(図12)。現状はダブルショットピーニングを主な改善手法として用いているが、今後はコストメリットのあるシングルショットピーニングも検討していきたい。

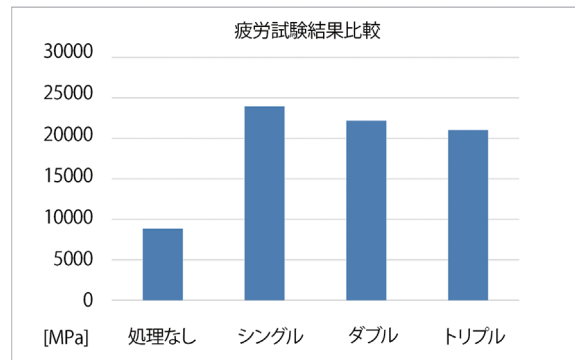


図12 残留応力の付与深さと寿命の関係

5-3. 圧縮残留応力と熱の関係性

ここまでの試験を通し、ショットピーニングの寿命向上効果として以下のことが分かった。

- ・ 常温での疲労試験では4倍の効果を確認
- ・ 300℃での疲労試験では2倍の効果を確認

寿命効果に乖離が見られたが、2つの疲労試験の大きな違いとして温度があげられる。温度が加わったことで、応力除去焼きなましのような現象が起り、付与した圧縮応力が緩和してしまった可能性がある。

そこで熱により、付与された圧縮応力がどれだけ解放されるか確認することにした。金型材にダブルショットピーニングを施した試験片を用意して、炉で熱を与えた時の残留応力変化を確認した。

炉の条件を決めるにあたり、ピストン生産時にデータロガーを用いて金型の温度を確認した。ピストンを1000shot生産した際、破損部位において、300℃で50分(条件1)、210℃で370分(条件2)の熱負荷が加えられていることが確認できた(表4)。

表4 熱処理条件

	温度 [℃]	時間 [min]
条件 1	300	50
条件 2	210	370

試験片に条件1、条件2の熱負荷を与え緩和状態を確認した。それぞれの加熱前後の残留応力を測定し、変化量の確認を行った。測定結果は各条件2点を複数回測定した平均値である。

まず、試験片に条件1で熱負荷を与えた結果、熱処理前に -1261MPaだったものが -1100MPaまで応力が緩和された(図13)。

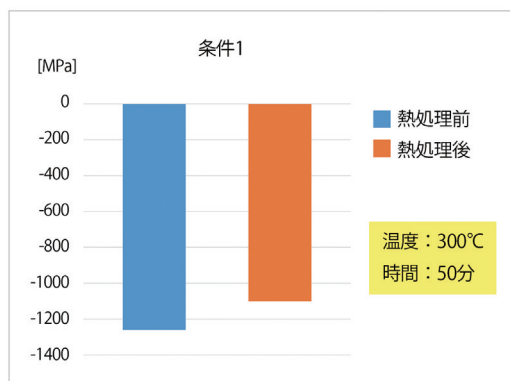


図13 熱による応力緩和—条件1

次に、試験片に条件2で熱負荷を与えた結果、熱処理前に -1245MPaだったものが -1132MPaまで応力が緩和された(図14)。

条件1は161MPa、条件2は113MPa引張方向に推移した。それぞれの残留圧縮応力の緩和にあたり、2つの熱負荷による緩和量の和が成り立つと仮定すると、1000shot生産した際、付与した圧縮応力が274MPa程緩和されることが推測できる。このことから、金型に残留応力を付与する際、2000～3000shotごとにショットピーニングを施すことで型表面の圧縮応力を維持できると考えられる。

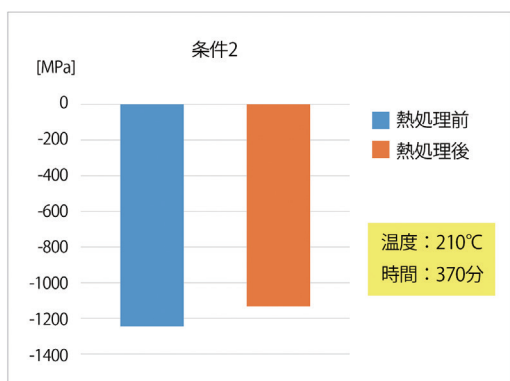


図14 熱による応力緩和—条件2

5-4. 生産での寿命検証

生産型と生産型にダブルショットピーニングを施した金型(以下、トライ型)を用意し、実機での寿命を比較した。まず、生産型にて1000shotごとにXRDを用い表面の残留応力の

測定を実施した。3000shot時に型表面を観察した際、初期クラックの兆候がみられ、2000～3000shotの間で初期クラックが発生していることが確認できた。残留応力の変化としては、初期クラックが発生するまで生産するごとに表面の残留応力がプラス方向(圧縮応力が緩和する方向)に推移することが分かった(図15)。この生産型は5300shotで破損に至った。

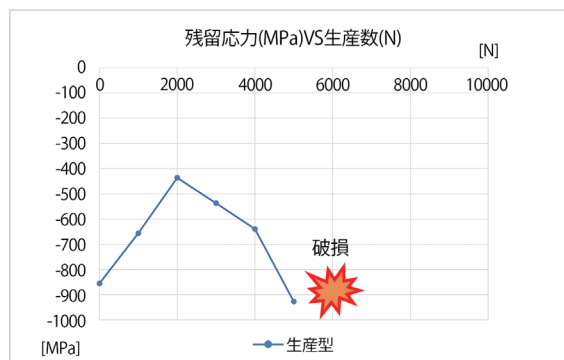


図15 生産金型の残留応力の変化

0shotの時点で表面に圧縮残留応力が付与されているのは、金型作成の最終工程である磨きで圧縮応力が付与されたと考えられる。3000shotで残留応力が圧縮側に推移しているのは、クラックが発生したことで最表面に引張応力が発生しなくなったからと推測される。

トライ型では表面の圧縮残留応力を維持するために、定期的にダブルショットピーニングを処理し、割れにくい表面状態を維持した。(0、2000、5000、7000shot時にダブルショットピーニングを実施。)このトライ型では、5000shot時に型表面に初期クラックの兆候がみられ、4000～5000shotで初期クラックが発生していることが確認できた。トライ型では8800shotで破損に至った(図16)。

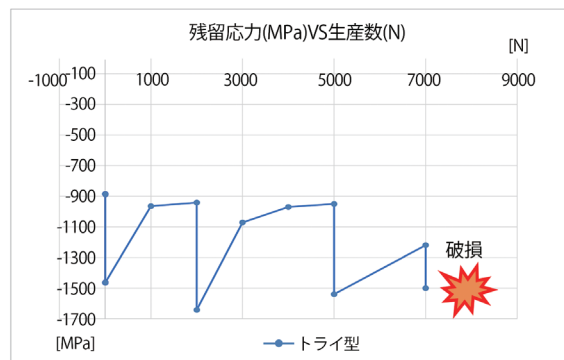


図16 トライ型の残留応力の変化

5-5. 圧縮応力付与に関するまとめ

金型にダブルショットピーニングを施すことで、通常生産用金型の1.7倍の寿命向上効果が確認できた。金型表面にもそ

の効果があらわれている。5000ショット時の生産型とトライ型を観察した際、ショットを施したトライ型の方が、クラックの発生を遅らせることができていることが分かる(図17)。ダブルショットピーニングを施すことで、耐疲労効果を見込めることが分かった。

熱による応力緩和はトライ型でも確認ができた。海外拠点では潤滑剤の塗布方法の違いにより、国内より低い型温度で生産しているため、ショットピーニングの効果は国内よりも期待される。



図17 金型表面の比較

6 寿命改善の成果

今回のショットピーニングによる型寿命向上の取り組みを通して、寿命向上を見込めるところまで進めることができた。現在までの取り組みをコストの観点で見たとき、鍛造コストの金型費としては、金型寿命向上の効果により40%削減となっている。目標まであと10%の削減が必要である(図18)。

今後の方針としては、ダブルショットピーニングの処理費用の低減と海外拠点でのN増し検証による寿命向上効果の確認を行っていき、目標達成を目指す。

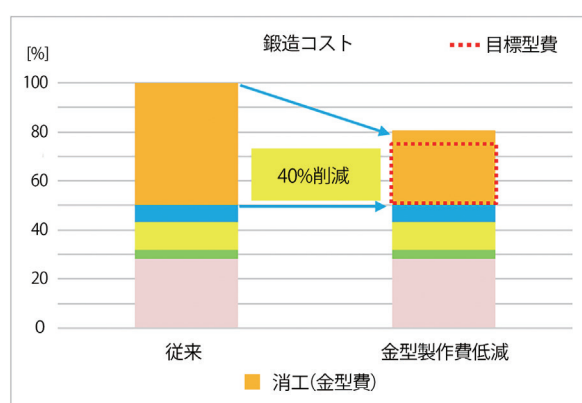


図18 現時点でのコスト効果

7 まとめ

- (1) 金型材にショットピーニングを用いることで2倍から4倍の寿命向上効果が確認できた。
- (2) 熱影響のある環境では応力開放を起こすが、生産実績から1.7倍の寿命向上効果が確認できた。

- (3) ショットピーニングを用いた型寿命向上の取り組みで、鍛造コストとしては、金型費を40%削減することができた。

今後も目標達成のために、ショットピーニング費用の削減活動と海外拠点にて本手法を展開し、寿命向上効果の確認を行っていく。

■謝辞

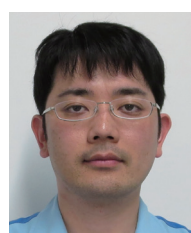
本調査にあたりエンシュウ株式会社スタッフの方々に多大なご協力を頂いたことに深謝する。

ご指導頂いた、イノベーション社会連携推進機構の中村保客員教授、静岡大学大学院の早川邦夫教授に感謝の意を表する。

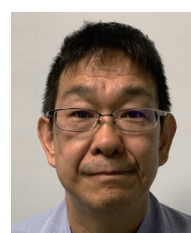
■参考文献

- [1]中曽根 祐司: 金属疲労の基礎とFEM解析・寿命および耐疲労設計への応用 JTCセミナー資料
 - [2]ショットピーニング技術協会: <http://www.shotpeening.gr.jp/shotpeening/index.html>
- ※引用内にある「ショット」は本稿の「メディア」と同義

■著者



村松 龍馬
Tatsuma Muramatsu
生産技術本部
生産技術部



榎原 浩
Hiroshi Sakakibara
生産本部
製造技術統括部
PT技術部



小倉 純一
Junichi Ogura
生産技術本部
生産技術部



山村 易見
Yasumi Yamamura
生産技術本部
生産技術部

アルミ鍛造製コネクティングロッドへの6000系材料適用

Application of 6000 series aluminum alloy to forged connecting rods

大島 かほり 栗本 幸広 村山 友貴

要旨

二輪車サスペンション部品であるコネクティングロッドは、路面からの入力吸収する機構の一端を担っており、高強度を求められる部品である。加えて、使用環境によっては水や土などが付着し、耐食性も必要である。従来、当社オフロードコンペティションモデルであるYZシリーズには、高強度と高耐食性を成立させるため、2000系アルミ合金に表面処理を施したコネクティングロッドを採用してきた。しかし、2000系アルミ合金の材料費、および表面処理費は部品のコストアップにつながる。本稿では高強度6000系アルミ合金に着目し、部品機能（高強度、高耐食性）を満たしながらも材料費と表面処理費削減によるコストダウンを達成した例を紹介する。

Abstract

Connecting rods, a component of motorcycle suspension, are part of a mechanism that absorbs input from the road surface. These components also require high strength. In addition, depending on the environment where water, and soil etc., may adhere to it, corrosion resistance is also necessary. Previously, the YZ series, our off-road competition model, adopted 2000 series aluminum alloy connecting rods with high strength and corrosion resistance achieved through surface treatment. However, the material and surface treatment cost of 2000 series aluminum alloy leads to a cost increase of the parts themselves. This paper focuses on high-strength 6000 series aluminum alloys and introduces examples of achieving cost reductions by reducing material and surface treatment costs while satisfying component specifications (high-strength and corrosion resistance).

1

はじめに

アルミニウムは鉄鋼に比べて比重が小さく、燃費向上のため輸送機器の軽量化に必要な不可欠な材料である。加えて、素材耐食性も良好であるため、外観上の要求が厳しい部品に対しても適用されている。当社では、ユーザーが走行、取り回しを含めて取り扱い時に重量を感じやすいことや、外観上の露出が多い部品が多いことから、二輪車にアルミニウムを広く採用してきた。特にオフロードコンペティションモデルのYZシリーズは、製品特性上、軽量化要求が高く、高強度アルミニウム（2000系合金や7000系合金）を多く採用している。リヤサスペンション部品のコネクティングロッドもその1つで、従来2000系合金を採用し、鍛造によって製造している（図1）。



図1 YZシリーズとコネクティングロッド

一方で、近年アルミニウムメーカー各社では、2000系合金に迫る強度を有し、かつ耐食性や耐応力腐食割れ性に優れる

高強度6000系合金の開発が進んでいる。四輪業界では、サスペンション部品において鉄鋼から高強度6000系合金への切替が1990年代頃から始まった^[1]。現在では上級モデルのみならず、大衆モデルにも展開されており、国内以外にも中国やアメリカ等、世界各国の鍛造メーカーで高強度6000系合金を採用した鍛造部品が製造されており、大型部品も増加している。

本稿では、YZシリーズ向けのコネクティングロッドに高強度6000系合金を適用し、部品機能を満たしながらもコストダウンを実現した例を紹介する。

2

課題と解決手段

2-1. 現状課題

コネクティングロッド単体部品には、大きく分けて3つの開発要求【強度特性、腐食特性、コスト】がある。当社では、強度特性と腐食特性、加えて調達性の観点から、従来A2014FD-T6に塗装を施した仕様を採用してきた。高力合金とも呼ばれるA2014は十分な強度特性を有するが、一般的に2000系合金は材料費が高く、また、塗装を採用していることで部品コストが高い。一方で、6000系合金は比較的安価な材料で、耐食性が良好な材料であり、材料費と塗装費が削減できる可能性がある。しかし、代表的な6000系鍛造合金であるA6061FD-T6では強度特性の開発目標を満足できない

(表1^[2,3])。部品形状を変更することで部品強度を維持する手段もあるが、この場合、部品重量が増加するため、軽量な車体が要求されるYZシリーズには採用が難しい。

表1 強度特性、腐食特性

材種	強度特性 (機械的性質)			腐食特性	
	引張強度	耐力	伸び	耐食性	耐応力腐食割れ性
A2014FD-T6	450 MPa 以上	380 MPa 以上	8% 以上	D	C
A6061FD-T6	265 MPa 以上	245 MPa 以上	10% 以上	B	A
開発目標	350 MPa 以上	300 MPa 以上	10% 以上	—	—

※腐食特性は良好なものから順にA～Dの4ランクに分類。

2-2. 解決手段

2-1節より、6000系合金採用における課題は強度特性であることがわかる。そこで、高強度6000系合金に着目した。

高強度6000系合金は、過剰Si型と呼ばれる6000系合金に分類される。今回はA6061に対して主要元素であるSi、Mg、Cuと、遷移元素であるCr、Mnの成分添加量を主に変更したものを採用した。SiとMgは人工時効処理によってMg₂Siとして析出し、6000系合金を高強度化する役割を担っており、Cuはその析出を促進する効果があると言われている^[4]。また、CrやMnなどの遷移元素を添加することで、一般的には強度特性低下の影響を及ぼすと言われる再結晶組織の成長を抑制する効果が見込める^[5,6]。

また、強度特性は合金成分だけでなく、鍛造および熱処理条件によっても左右される。強度変化は、鍛造と溶体化処理時の再結晶組織の成長、溶体化処理と人工時効処理時の析出現象が起因する。本合金においても適切な鍛造・熱処理条件はあるが、製造上は特別管理となり、コストアップの可能性がある。したがって、本研究では製造コストを増加させることなく、強度特性を高める鍛造・熱処理条件も検討した。

3 試験方法と結果

3-1. 製造条件

コネクティングロッドの製造工程を図2に示す。従来材A2014は全工程を通したものを、候補材高強度6000系合金(以下、High Strength 6000 seriesの略称としてHS6000と記載)は塗装工程を除いたものを完成部品とした。ここで、HS6000においては、素材加熱や熱処理条件の温度を高温化することで高強度を狙えるが、一方で製造条件が特殊になるためコストアップが懸念される。そこで、製造コストの増加を抑えながら強度特性を高める鍛造・熱処理条件を見出した

め、鍛造前の素材加熱条件と熱処理条件が異なる3条件の比較を行った(表2)。

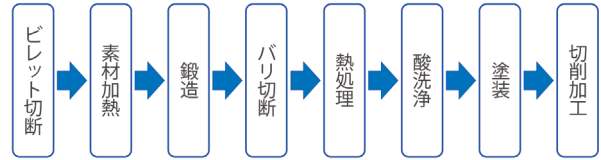


図2 製造工程(鍛造～切削加工)

表2 鍛造および熱処理条件

サンプル	鍛造		T6			強度向上	コスト低減
	素材加熱	プレス機	溶体化	焼入れ	人工時効		
A2014	生産条件	生産条件	生産条件	生産条件	生産条件	-	-
HS6000条件A	高温	大型機	高温	A6061類似	HS6000向け	A	C
HS6000条件B			低温(A6061類似)			B	B
HS6000条件C	低温	小型機				C	A

※オレンジ色は強度向上に、青色はコスト低減に寄与する項目

※強度向上とコスト低減は効果が高いものから順にA～Cの3ランクに分類

各条件の概要は以下のとおりである。

<条件A>

鍛造条件、熱処理条件いずれもHS6000に適しており、高強度が見込める。工程レイアウト上、大型プレス機を使用するために高コストとなる。

<条件B>

鍛造条件は条件Aと同様である。熱処理条件は溶体化温度を低くしており、十分な強度が得られない可能性があるが、一般材A6061と類似条件のためやや低コストとなる。

<条件C>

鍛造条件は素材加熱温度が低く、熱処理条件は溶体化温度が低いため、十分な強度が得られない可能性がある。工程レイアウト上、小型プレス機が使用でき、かつ溶体化条件が一般材A6061と類似条件のため低コストとなる。

3-2. 金属組織

アルミニウムには塑性加工によって格子欠陥が導入されるが、加熱によりそれらが消滅したり、再配列が生じたりすることが一般的に知られている。この現象を進行させると再結晶と呼ばれる結晶粒が成長し、条件によっては粗大化する。結晶粒が粗大化すると一般的には機械的性質が低下するため、再結晶がコネクティングロッドのどの位置で成長しているかを確認した。

HS6000の条件A、B、Cにおいて、コネクティングロッドの金属組織を観察した。まず、条件Cを代表として部品全体を観察

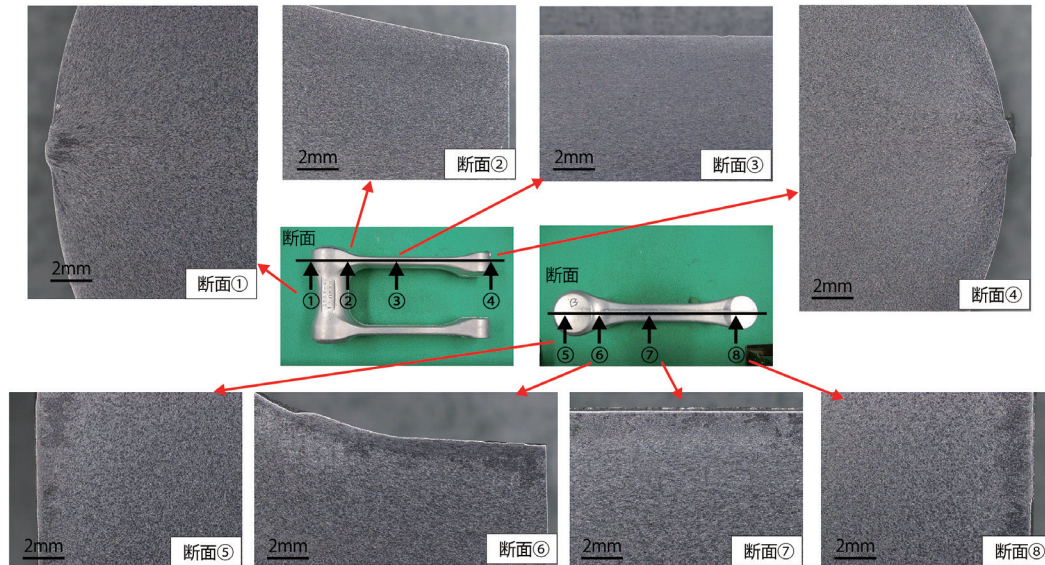


図3 HS6000 条件Cの金属組織観察

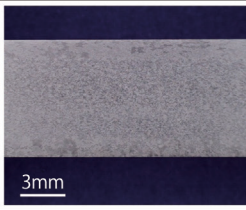
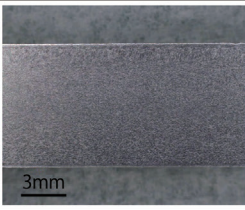
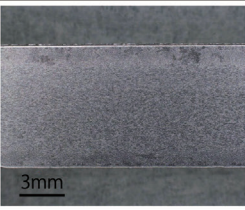
サンプル	条件A	条件B	条件C
金属組織			
再結晶組織の厚さ	1.9mm	0.5mm	1.5mm

図4 アーム部の金属組織観察

すると、表層の鍛造パーティングライン部分に再結晶組織が確認された(図3)。特に再結晶組織が明瞭に見られるアーム部のパーティングライン断面について、条件A、Bも金属組織を観察したところ、サンプルによって再結晶組織の厚さが異なることが確認できた(図4)。いずれのサンプルも内部には再結晶組織が確認されなかった。

3-3. 強度特性

3-3-1. 機械的性質

機械的性質を取得するため、引張試験を行った。試験は、万能試験機(島津製100kNオートグラフ)を用いて、荷重レンジ10kN、クロスヘッドスピード0.5mm/minで行った。試験片は、標点間距離20mm、板厚2.5mm、幅5.0mmとし、コネクティングロッドのアーム部より採取した。耐力は、ひずみゲージ測定値を採用した応力-ひずみ線図と、その弾性域0.2%オフセット線との交点から求めた。伸びは突合せ伸びとし、試験前後の標点間距離を投影機にて測定して算出した。A2014とHS6000条件A、B、Cの引張強度、耐力、伸びの代表値を比較した(図5)。

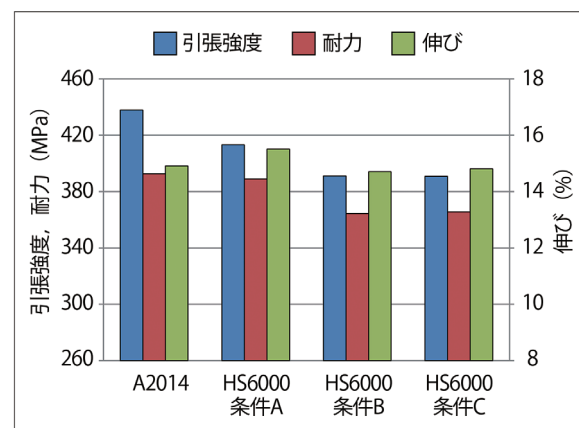


図5 機械的性質

A2014を基準にHS6000を比較すると、条件Aは引張強度のみ、条件B、Cは引張強度と耐力が6～11%程度低いが、伸びは同等である。A2014同等の強度は得られなかったが、開発目標はいずれの条件でも達成することができた。

また、HS6000の条件の違いに着目すると、条件A、Bの結果から、溶体化温度が高いほうが高強度となる。一方、条件B、C

の結果から、素材加熱温度が異なっても機械的性質への影響は小さいことがわかる。

3-3-2. 実体強度

3-2節で観察したように、アーム部のパーティングラインには再結晶組織が見られる。再結晶組織は低強度であると言われるが、引張試験では試験片採取位置の関係上、表層の再結晶組織の影響は無い。そこで、再結晶組織の影響を評価するため、実体強度試験を行った。試験は、アーム端部に負荷してパーティングラインが曲がるようにし、反対側のアーム部に接触するまで負荷を続けた(図6)。

試験時の最大荷重で比較すると、引張試験結果と同様に、最大荷重はA2014>HS6000条件A>HS6000条件B≒HS6000条件Cの関係である(図6)。HS6000の再結晶組織の厚さは条件B>条件C>条件Aであったことから、最大荷重との関係性は見られず、差異も3%程度である。したがって、コネクティングロッドの実体強度に対して表層の再結晶組織の影響は小さいと言える。

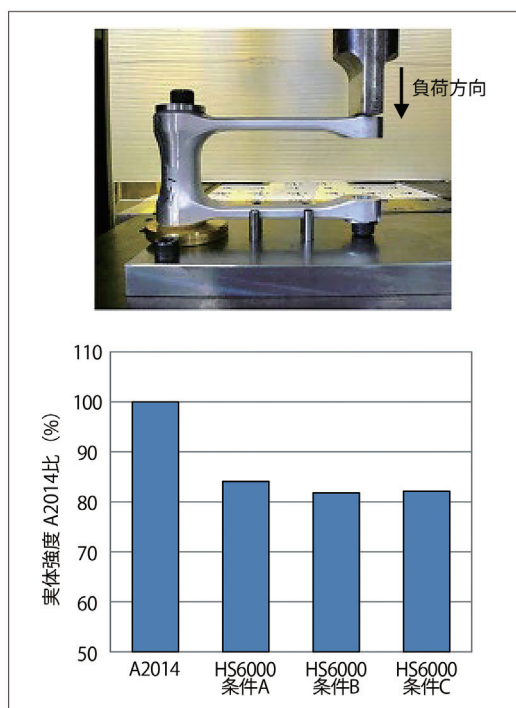


図6 実体強度の試験方法と結果

3-3-3. 疲労特性

機械的性質と実体強度の結果を踏まえ、疲労特性は最も引張強度が低いHS6000条件Cを試験対象とした。疲労試験は、平面曲げ疲労試験機(東京衡機製PBF-30C型)を用いた応力比-1の両振りとし、14PSN試験法に準拠して行った^[7]。繰返し数が 10^7 回に達した場合は試験を打ち切り、その応力を疲

労限とした。試験片はコネクティングロッドのアーム部より採取した。疲労限は耐力の約30%^[8]を想定していたが、44%にあたる162MPaであり(図7)、想定を上回る結果であった。

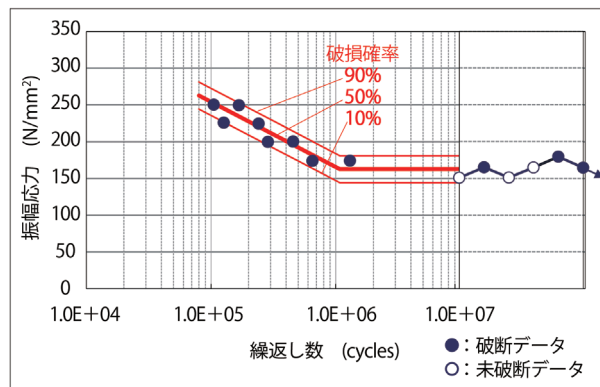


図7 平面曲げ疲労試験結果

3-4. 腐食特性

腐食特性は、A2014と、再結晶組織の厚さが最大であったHS6000条件Aを比較試験した。

3-4-1. 耐食性

外観の耐食性を比較するため、塗装の影響を含む部品耐食性と、加工面を模擬した素材耐食性を試験した。試験はJIS Z 2371に準拠した塩水噴霧試験とした。

部品耐食性は、コネクティングロッド完成品を試験片とした。A2014は塗装有り、HS6000は塗装無しの仕様である。試験時間は1時間、2時間、4時間、8時間、24時間、48時間、72時間、96時間とした。各時間で試験機を停止させて試験片を水洗し、目視にて腐食発生有無を確認後、試験機に試験片を戻して再開する方法で最大96時間まで実施した。A2014とHS6000いずれも24時間後に腐食発生が確認された(図8)。A2014は鍛造パーティングラインに白色の腐食生成物と変色を伴う腐食が発生し、96時間後にはその範囲が広がっ

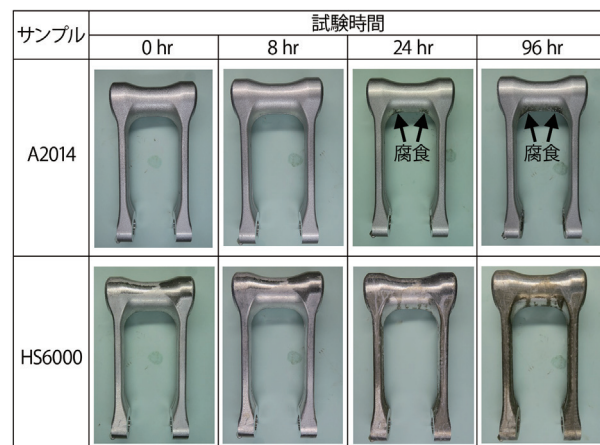


図8 部品耐食性試験結果

ていた。対して、HS6000は大部分に変色が発生し、96時間後には変色の濃化が進行した。外観上の腐食発生面積はA2014のほうが小さいが、腐食発生時間は同じであったことと、表面の変色は部品機能を低下させる腐食ではないことから、HS6000は塗装無しでも採用可能なレベルであると言える。

素材耐食性は、コネクティングロッドのアーム部を切り出した後、切削加工面を模擬して研磨をしたものを試験片とした。試験方法は部品耐食性と同様である。A2014は1時間後に薄い白色の変色が大部分に発生し、HS6000は4時間後に薄い白色の変色が一部に発生した(図9)。いずれも時間経過に伴って腐食が進行し、96時間後にA2014は大部分に白色の腐食生成物が発生し、HS6000は一部に発生していた変色が濃化した。この結果から、腐食発生時間が遅く、かつ腐食発生面積が小さいHS6000のほうが、素材耐食性が良好であると言える。また、部品耐食性の試験結果を振り返ると、塗装が有るA2014においてパーティングラインから腐食が発生して

おり、長期的には腐食によって塗装がはく離する可能性もある。塗装はく離の進行を想定すると、優れた素材耐食性を有するHS6000が好ましい。

ここで、A2014とHS6000の素材耐食性に差異がある要因の1つとして、自然酸化被膜の膜厚が関係している可能性がある。アルミニウムは周囲環境の酸素と反応して、表面に自然酸化皮膜を形成し、実用上優れた耐食性を示すことが一般的に知られている。両材料の膜厚を比較するため、オージェ電子分光法により表面から深さ方向の各成分の強度を測定した。測定元素は、主要元素および酸化皮膜と、洗浄しきれなかった表面の汚れを考慮し、Al、Cu、Mg、Si、O、Cとした。測定はサンプリングエリアを20 μm として鍛造肌と加工面の2箇所とした。ただし、A2014は塗装が有るため、鍛造肌の測定はしなかった。膜厚は、表面から、Oの最大強度が半減した深さまでとした。一般的に膜厚は数 μm と言われるが、A2014とHS6000の膜厚は10～30 μm であった(図10)。鍛造肌のほうが膜厚が厚い要因としては、鍛造や熱処理で高温にさらされて皮膜が成長したためと考えられる。また、素材耐食性はHS6000のほうが優れていたが、加工面の膜厚を比較するとA2014のほうが厚い。このことから、HS6000の優れた耐食性は、表面の自然酸化皮膜だけでなく材料の組成や金属組織によるものと推察する。

3-4-2. 耐応力腐食割れ性

A2014製コネクティングロッドに塗装が採用されていた理由は、軸穴のベアリング圧入部近傍のパーティングラインで応力腐食割れ発生が懸念されたためである。そこで本試験では、車両使用環境と破損が懸念される箇所を想定して、コネクティングロッドにベアリングを圧入した状態で長期間の塩水

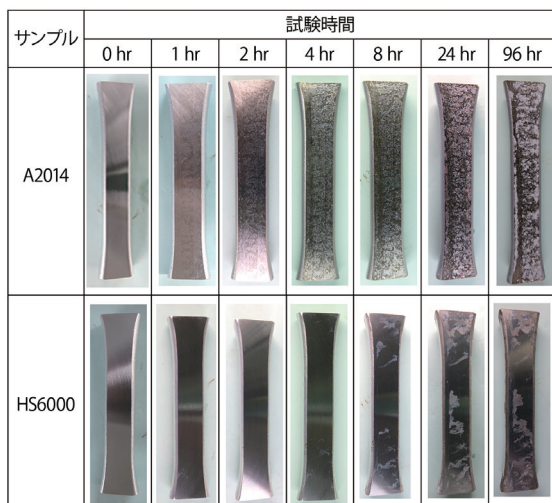


図9 素材耐食性試験結果

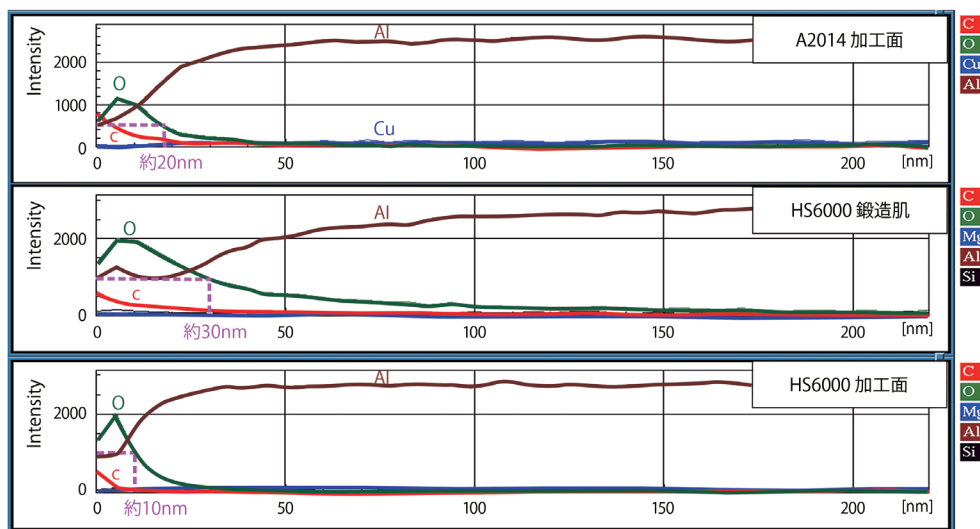


図10 深さ方向の元素分析結果

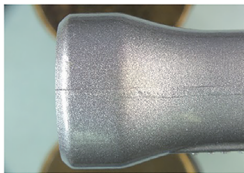
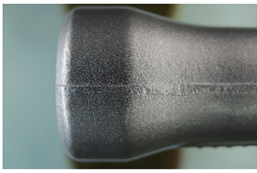
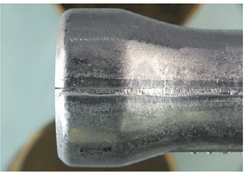
サンプル	試験時間		
	0 day	10 day	30 day
A2014			
HS6000			

図11 応力腐食割れ試験結果

噴霧試験を行った。試験時間は、愛知県刈谷市でのA5052大気暴露試験1年相当に必要な塩水噴霧試験期間が2日^[9]であることを参考に、5年相当の10日間とした。割れ発生有無の確認は、試験片を水洗後、実体顕微鏡にて実施した。A2014塗装有りとHS6000塗装無しはいずれも割れが発生しなかった(図11)。参考までに本試験を30日間まで延長したが、割れは発生せず、A2014塗装有りとHS6000塗装無しいずれでもコネクティングロッドにおける耐応力腐食割れ性は十分であることがわかった。

4 まとめ

HS6000は、強度特性ではA2014に劣る点はあるものの、開発目標より高い実力を有する。また、車両実走評価(耐久試験や衝撃試験等)においても問題は認められなかった。腐食特性においては、耐食性が良好で、実用上は部品機能を低下させるレベルの腐食まで進行しないことから、HS6000では塗装廃止の実現が可能であると判断した。なお、製造条件は鍛造時の素材温度が低く、小型プレス機を使用することがコスト面からも有利であるため条件Cを採用した。

以上の結果から、コネクティングロッドを高強度6000系合金に置換することで、既存の加工工程を変更することなく、材料費約20%削減と塗装廃止による部品コストダウンを達成した。本部品は、YZ450Fを筆頭に、YZシリーズに順次展開している。

高強度と高耐食性を兼備する材料であり、今回の事例を知見とし、今後はマリン製品やオフロードレクリエーションルビークルも含む輸送機器全般に広く展開される技術となることを期待している。

■参考文献

[1]関口常久:軽量化のための非鉄金属の適用方法, 素形材

vol.53, No.8(2012), p.2-11

[2]JIS H 4140(1988), アルミニウム及びアルミニウム合金鍛造品

[3](株)日本アルミニウム協会:アルミニウムハンドブック, 第8版(2017)

[4]櫻井健夫, 小松伸也, 河野紀雄:Al-Mg-Si系合金の時効硬化挙動に及ぼす均質化処理温度と銅添加の影響, 軽金属vol.58, 9号(2008), p.433-438

[5]山田 始, 田中他喜男:Al-1%Mg-0.6%SiおよびAl-3%Mg合金の再結晶粒度に及ぼすCrの効果, 軽金属vol.38, 2号(1988), p.71-75

[6](株)日本アルミニウム協会:循環性に優れた6000系合金の創製に関する研究 遷移元素の統一

[7](株)日本機械学会:統計的疲労試験方法-JSME S 002-1994-

[8]布村成具:アルミニウムおよびアルミニウム合金の疲労, 軽金属vol.28, No.11(1978), p.566-574

[9]林直宏, 山下勝也, 小林弘明, 片岡泰弘:複合サイクル試験の腐食促進試験への適用, あいち産業科学技術総合センター研究報告2013, p.20-23

■著者



大島 かほり
Kahori Oshima
生産技術本部
材料技術部



栗本 幸広
Yukihiro Kurimoto
生産本部
製造技術統括部
PT技術部



村山 友貴
Yuki Murayama
モビリティ技術本部
MS統括部
MS開発部

ベベル冷間歯形成型の ROV デファレンシャル部品への適用

Application of Beveled Cold Gear Forming to ROV Differential Parts

仲田 武弘 熊崎 正祥 鈴木 由美子 松下 浩次

当論文は、日本プラントメンテナンス協会(JIPM)の2018年度TPM優秀論文賞を受賞した内容に基づくものです。

要旨

近年、鍛造業界においては付加価値の高い鍛造品が求められている。社内ではこれまでニアネットシェイプを進めてきており、さらなる付加価値向上のために、ROV (Recreational Off-Highway Vehicle) のフロントデファレンシャルユニット (以後、フロントデフ) の構成部品であるベベルギヤの鍛造歯形成型に挑戦した。今回、解析を用いながら難鍛造加工材における冷間鍛造1工程成型を実現し、低コストな工法で立上げを行った。また、歯当たり試験機とベベルギヤ用三次元測定ソフトを用い、ベベルギヤの単品歯車精度保証方法を構築し、量産で運用を開始した。本稿では上記の活動について紹介する。

Abstract

In recent years, high added-value components have been in demand in the forging industry. At Yamaha Motor, progress has been made with near net shaping, but in order to make further improvements in added value, we have embraced the challenge of bevel gear forging tooth forming of the constituent parts of ROV (Recreational Off-Highway Vehicle) front differential units. Through the use of analysis, this initiative successfully achieved cold forging one-process forming with difficult forging materials, thus establishing a low-cost production method. In addition, single-gear accuracy assurance methods were developed and usage in mass production begun through the use of tooth contact test equipment and three-dimensional measurement software for bevel gears. This report introduces the initiatives taken as part of the application of beveled cold tooth forming.

1 はじめに

近年、製造業において国内の人件費の高騰にともない、人件費が安く、消費地に近い海外での生産が進んでいる。鍛造業界においても同様に、国内の生産量は減少し、国内では付加価値の高い鍛造品が求められている。世の中では鍛造にて歯車を成型する工法は広く行われており、平歯車やベベルギヤの量産が行われている。

社内ではこれまで、鍛造完成品の段階で製品形状に近い形状に成形するニアネットシェイプを進めてきたが、鍛造歯形成型の生産実績はまだなかった。

今回、ROVのフロントデフを内製するにともない、構成部品であるベベルギヤ3部品(GEAR1、GEAR2、PINION DIFFERENTIAL)を対象に、2015年3月から歯車精鍛化量産開発に着手し、2017年4月より量産を開始することができた。本稿ではベベルギヤの歯車精鍛量産化の活動の中で行った、鍛造工程の作りこみおよび歯面精度保証について報告する。

2 内製化にともなう課題

フロントデフの構造と対象部品を図1に示す。フロントデフは前輪の中央付近に設けられ、左右のタイヤの回転数差を吸

収しつつ、同じトルクを振り分けて伝える差動装置であり、左右の回転数差に合わせて必要な方向に回転するのが特徴である。フロントデフの要求機能として、音や振動が少なく、滑らかに駆動することが重要であり、今回のROVに求められる商品性としても、静粛性が求められている。これらはベベルギヤの歯面精度の影響を大きく受けるため、良好な歯面を安定して生産することが求められる。また、内製化をするにあたり、低コストな工法選定も課題である。

3 工法選定

まず始めに、ベベルギヤの製造QDCを満足するための製造工法の検討を行った。

ベベルギヤの製造工法として、方案①『切削歯切り』、方案②『冷間鍛造1工程』、方案③『熱間鍛造+冷間鍛造(サイジング)による複合2工程』を検討した。各工法の特徴を表1に示す。

表より、鍛造工法である方案②③は切削工法である方案①と比べ、約40~50%コストが低いことが分かる。これは鍛造工法のサイクルタイムが速いことが大きな理由である。また、歯面状態においても、鍛造工法は切削加工で見られるツール

マークが無く、滑らかな歯面を成型することができるため、次に鍛造工法である方案②と③の比較を行った。

一般的なベベルギヤは方案③にて成型されているが、方案②が実現できると、工程数削減効果から、コストをさらに低減することができる。コストダウン効果としては方案③と比較し、約10%のコスト削減が見込まれるため、今回方案②『冷間鍛造1工程』による成型にチャレンジした。

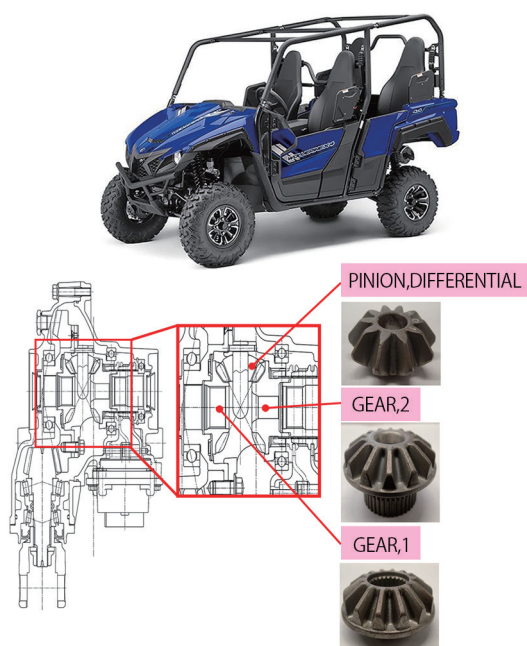


図1 フロントデフ構造と対象部品

表1 製造工法の特徴

方案	Q(歯面精度)	D(工程数)	C(コスト相対比)
①切削歯切り	±0.02	○	工程:6 △ 1.0 -
②冷間鍛造 1工程	±0.02	○	工程:4 ○ 0.5 (▲50%) ○
③熱間鍛造 +冷間鍛造 (複合鍛造)	±0.02	○	工程:6 △ 0.6 (▲40%) △

4 鍛造工程設計

鍛造の工程図を図2に示す。材質はSNCM系の改良合金鋼にて実施した。この材料は鍛造成型性が低いため、素材の前処理として、鍛造成形性を向上させるための球状化焼鈍と金型カジリ対策としてMoボンデを施した。



図2 鍛造工程図

また、今回の冷間鍛造工法には閉塞鍛造を採用した。閉塞鍛造の模式図を図3に示す。閉塞鍛造とは上下型を閉じた状態で上下のセンターピンを押し込み、材料を半径方向に流すことにより、低荷重で成型が行える工法である。この工法は軸部から半径方向に突起した部品に使用されることが多く、ベベルギヤの成型には広く使用されている工法である。一方で、稼動軸が2軸になるため、変形予測が難しいのが特徴である。この工程にて初回鍛造試作を実施した。

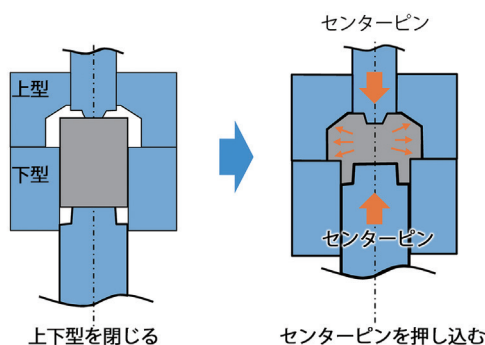


図3 閉塞装置構造図

5 鍛造工程作り込み

5-1. 初回鍛造試作結果

鍛造試作を行った結果、1ショット目から外径側歯底部に割れが発生した。成形過程の破断部の経過を図4に示す。図より、割れは外径側歯底部成型途中からすでに発生しており、破断部を観察すると、軸方向に対して斜めに割れていることが分かる。

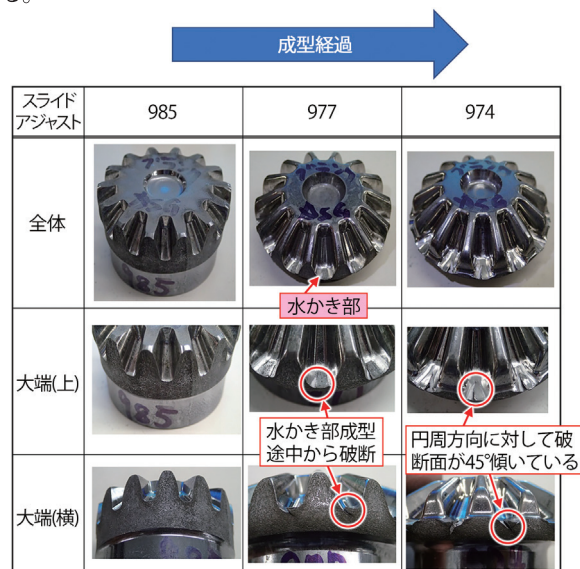


図4 成型経過

一般的に延性破壊の破断面は引張り応力の発生する方向に対し、45°方向に傾いて発生することから、これは円周方向に大きな引張り荷重が発生していることが要因と考えられる(図5)。

上記の推察から円周方向の応力に着目し、今回の試作のCAE解析を実施した(図6)。CAE解析結果より、外径側歯底部が成型される時、外径側歯底部の円周方向には最大で1120MPaの応力が発生しており、他の部位と比較して高い応力であることが分かる。そこで、この円周方向に発生する応力を現状以下に低減するための対策を検討した。

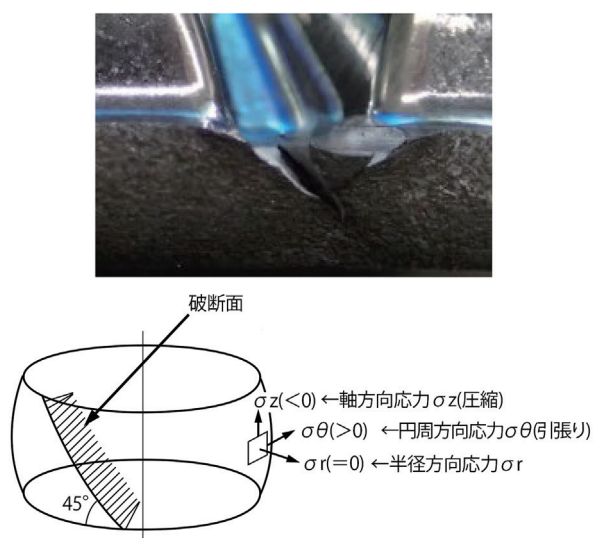


図5 割れの形態^[1]

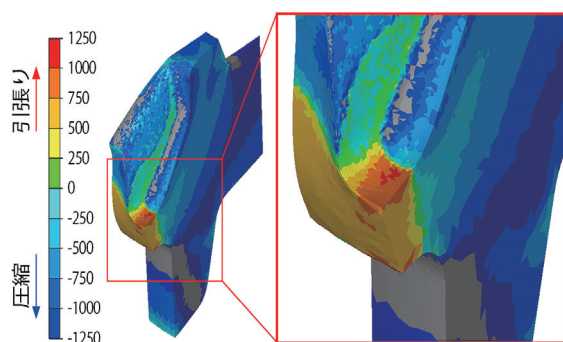


図6 破損部解析結果(円周方向応力)

5-2. 要因の検討

外径側歯底部成型時の円周方向応力に対する特性要因図を図7に示す。因子の中から、効果が予想される因子4種類を抽出し、確認を行ったが、『硬度』、『予備成形』、『加工速度』については効果が見られず、『材料流れ』の視点から、材料を破断部に流すことにより応力を下げる対策を検討した。検討にはCAE解析を用い、金型形状の違いによる影響を約40仕様の解析を実施し、検証した。

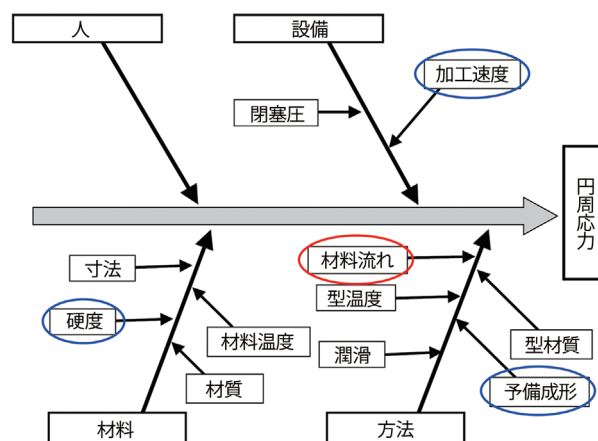


図7 特性要因図

5-3. 対策案検討

現状のフランジ部の厚さは4.5mmであり、その隙間に材料が流れ込むには大きな材料変形をとめない、材料割れが発生していると考えられる。そこで、破断部に材料を供給し、材料変形を抑え、応力を低減させる形状を検討し、最終的にボス部にテーパをつけた形状をCAE解析にて検証した(図8)。テーパは20°、30°、40°の3仕様にて実施した。解析結果を図10に示す。解析結果より、テーパが大きくなるにしたがって、円周方向応力が小さくなっていることが分かる。初回鍛造試作の解析結果と比較して25%~68%の円周方向応力の低減が見られた。

一方で、テーパ角度を大きくすると、その分素材重量を増やす必要があり、コストアップにつながるため、対策案としてはテーパ角度 $\theta = 30^\circ$ (現行比応力42%減)を採用した。

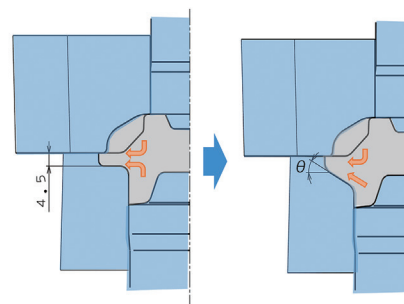


図8 対策案

5-4. 対策効果確認

対策仕様にて鍛造試作を実施した結果、外径側歯底部の割れは抑制された(図10)。今回、解析にて円周方向応力に着目し、これを低減させることにより、鍛造割れを抑制することができたが、現状その閾値は分かっていない。今後、解析と実機の合わせ込みを行い、閾値を明確にしていくことが必要である。

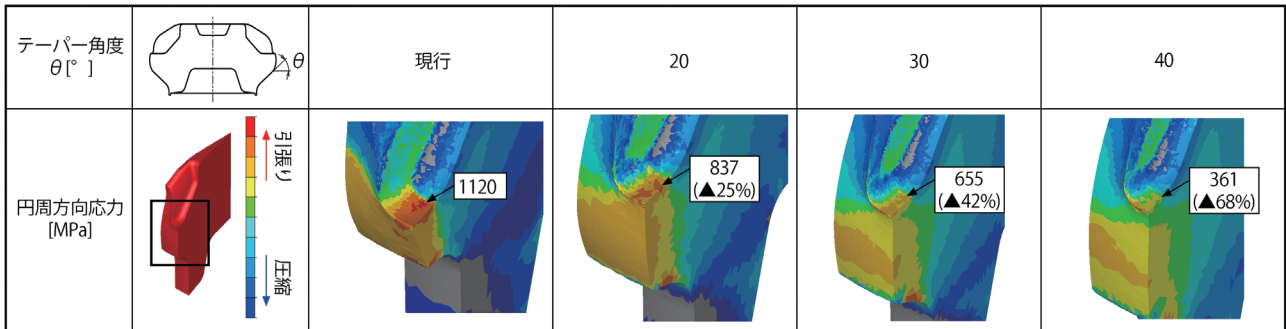


図9 テーパー角度による応力への影響

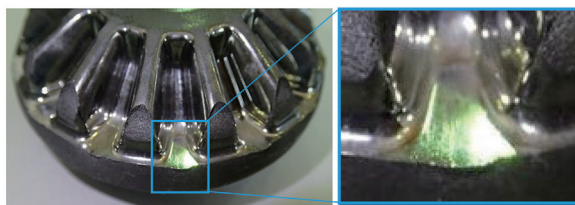


図10 対策後成型ワーク

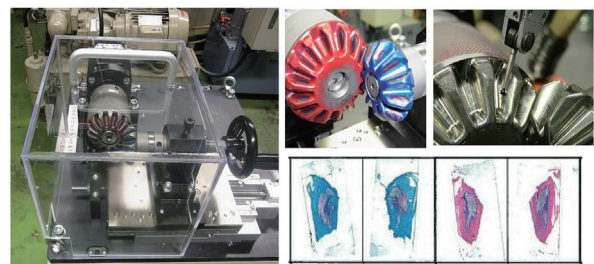


図11 歯当り試験機

6 歯面精度保障

6-1. 課題

通常、ベベルギヤの品質は組立位置での『歯当り』と『バックラッシュ』を歯当り試験機にて検査し、評価される。歯当り検査とは、かみ合う2つのベベルギヤを組立位置となる基準の位置に塗料を付けた状態でかみ合わせ、互いの当り方を確認する検査であり、バックラッシュ測定は組立位置での2つのギヤの遊びを示している(図11)。これらは歯面のできでばえに影響を受け、精度が悪いと歯車の騒音、振動、破損・磨耗につながる。鍛造歯形成型において、従来通りでは鍛造成型後の旋盤工程後に初めて歯当り・バックラッシュ検査を行い、品質確認を行うことになってしまう。しかし、この段階で鍛造精鍛歯面が原因によるNGが発生すると、大量の不良品が発生してしまうため、鍛造完成品状態でできばえを保证する必要がある。また、歯当り・バックラッシュはGEARとPINION、DIFFERENTIALのセットでしか検査できず、単品での評価ができないのが現状である。

図12にフロントデフの要求品質体系図を示す。鍛造工程において、歯当り・バックラッシュに影響を与える因子として歯形精度(歯厚、ピッチ誤差、歯溝の振れ、歯面形状)があげられるが、歯厚、歯面形状については具体的な単品での規格は無く、歯面のできばえを管理することができなかった。そこで、単品での歯面の精度を数値的に管理する仕組みの構築を目指した。

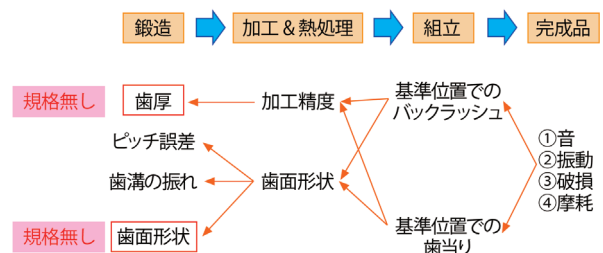


図12 フロントデフ要求品質体系図

6-2. 歯面の数値化と管理項目

まず、歯面を数値的に評価するために、ベベルギヤ用の三次元測定機測定ソフトを導入した。このソフトを用いた三次元測定結果を図13に示す。出力結果には『歯面誤差』、『歯厚誤差』、『各種ピッチ』が表示される。歯面誤差は歯面の任意のエリアを均等に分割し、ベースとなる3Dモデルに対して実物がどれほどずれているかを示した数値である。結果は各測定点を長方形に模擬して出力され、測定位置となる各格子交点に誤差が記載されている。また、歯厚誤差は測定エリアの中央の値を用い、3Dモデルとの差異が記載される。

歯面誤差においては歯面のできばえを管理するうえで、出力結果をそのまま管理項目とするにはデータ数が多く、歯面の特徴を捕らえづらい。そこで、平歯車で用いられている歯面精度規格を参考に、歯面全体と歯形・歯筋方向にデータを整理し、管理項目を決めた。管理項目を図14に示す。歯面誤差についてはこれらの管理項目をもとに評価を行い、歯厚誤差、

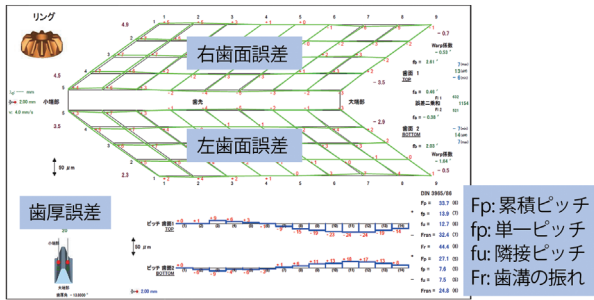


図13 三次元測定出力結果

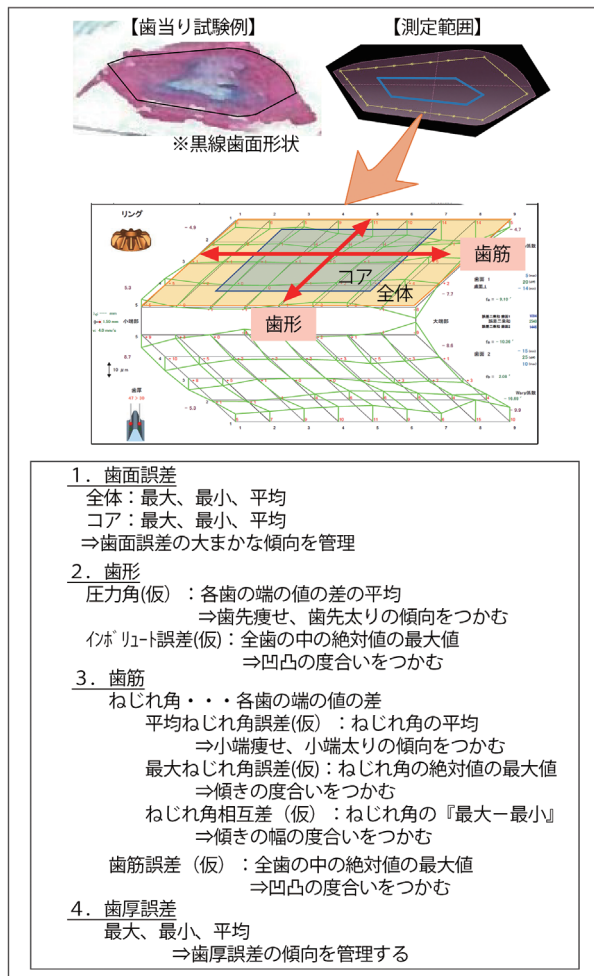


図14 管理項目

各種ピッチは測定結果をそのまま評価した。また、これらの管理項目には規格が無いので、歯当り試験機を製作・導入し、歯当り検査と紐付けして管理規格の確からしさの確認を行った。

一方、上記の管理方法にて管理を行う場合、三次元測定を行う前に測定基準となる面を旋削加工にてつくる必要があり、生産中に評価することは困難である。そのため、管理頻度を確認するために歯面精度のばらつきも合わせて確認した。

6-3. 管理規格とばらつき確認

前述の管理規格をもとにN増しのトライにて管理規格の確認および歯面精度のばらつき確認を行った。加工数は1ロット約1000個を4ロット実施した。歯厚誤差および歯面誤差の結果を図15に示す。どちらの規格も同ロット内、同一金型内ではばらつきも少なく安定しており、歯当り結果も良好であった。このことから、一型内では安定した歯面精度を得ることが確認できた。

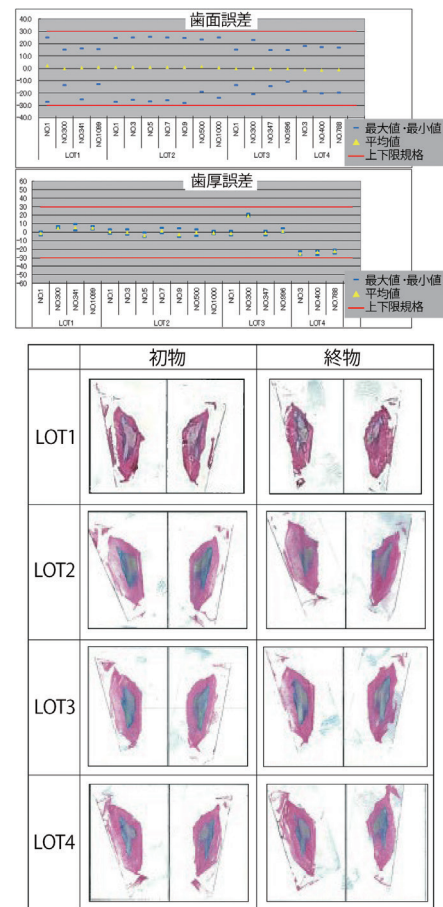


図15 歯面精度バラつきと歯当り結果

6-4. 型ごとのばらつき確認

上記よりロット内、ロットごとのばらつきについては確認ができたが、今後歯形を成型する金型を交換した時に、金型のできばえによるばらつきも確認する必要がある。金型交換時の歯面精度確認フローを図16に示す。確認項目は、金型歯面測定、鍛造品歯面測定、本工程加工確認、歯当り確認とし、これらが今回決めた規格の範囲内である時は予備型として生産現場に保管をすることとした。仮に歯面精度測定結果で規格外が発生した場合、歯当り検査結果が合格の場合はその数

値まで規格を変更し、規格の見直しを行うこととした。今後、金型更新ごとの測定データを蓄積し、規格・確認フローの改善を行っていく。

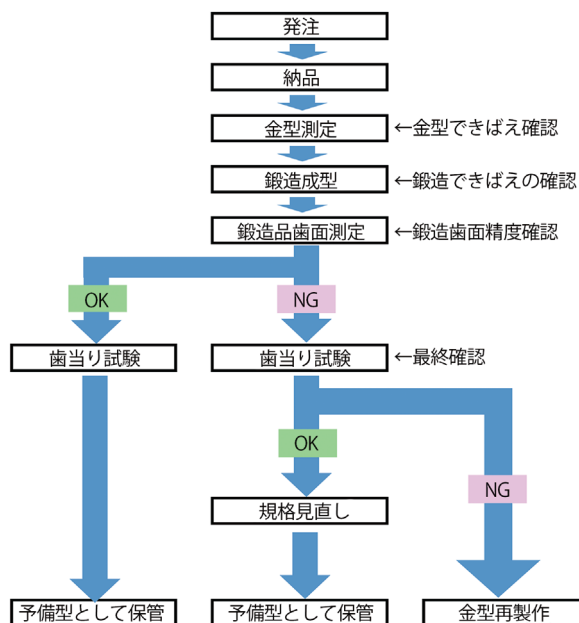


図16 予備金型確認フロー

■著者



仲田 武弘
Takehiro Nakada
生産本部
製造技術統括部
PT技術部



熊崎 正祥
Masayoshi Kumazaki
生産技術本部
生産技術部



鈴木 由美子
Yumiko Suzuki
生産技術本部
生産技術部



松下 浩次
Kohji Matsushita
生産技術本部
生産技術部

7 おわりに

今回、鍛造歯形成型に挑戦し、生産立上げを行った。その中で、難鍛造加工材における冷間鍛造 1 工程成型を実現し、低コスト(切削加工比▲50%、従来加工比▲10%)の工法での立上げおよび精鍛化歯面保証の仕組みを構築することができた。新規部品内製化ということもあり、検証が不十分な部分も多く、後々に問題が発生してしまうことがあった。しかし、今回の開発を通して、ベベルギヤの歯形成型についてのポイントが見えてきたことは大きな収穫であった。今回の取り組みをもとに、冷間鍛造のしやすい製品形状の標準化を行い、製品設計・工程設計にフィードバックしつつ、他部品への展開を行っていきたい。

■参考文献

[1] 鍛造 —めざすはネットシェイプ— コロナ社 日本塑性加工学会

要旨

燃料ポンプは燃料噴射システム(以下、FIシステム)を構成する部品の一つで、燃料を噴射するインジェクタへ燃料を圧送する役割を担っている。FIシステムを搭載する小型二輪車の台数は、排気ガス規制の強化に対応するため、特に中国やインドで増える傾向にある。一方、これらの地域では燃料に含まれる土壌成分などの粉体(以下、燃料中ダスト)の量が多いことが知られている。燃料中ダストは燃料ポンプの上流にあるサクションフィルタですべて捕捉することができず、一部が燃料ポンプ内へ流入する。これにより燃料ポンプの構成部品であるボデー、インペラ、カバーポンプが摩耗し、その結果必要な燃料流量を吐出できなくなる懸念がある。

そこでまず、基礎試験としてダスト耐久試験を実施し、摩耗と燃料流量の推移を調べ、燃料ポンプのダスト摩耗現象について考察した。次にその結果をもとに市場における必要最低限の燃料流量に至るまでの走行距離(以下、摩耗寿命と呼ぶ)を予測可能か検証した。ダスト耐久試験では燃料中に粒径を制御した試験ダストを投入し、燃料ポンプを連続作動させた際の摩耗量と燃料流量を測定した。その結果、試験初期には燃料流量は低下したが、一定の時間で安定した。その際の燃料ポンプのボデー、インペラ、カバーポンプの摩耗量の変化および燃料流量の変化は、そこを通過したダストの粒径および総数と相関があることが分かった。そしてダスト耐久試験で得られた燃料ポンプ通過ダストの粒径および総数と、燃料流量との相関を一般式化し、流量低下予測カーブと名付けた。市場における摩耗寿命の予測可否を調べるために、流量低下予測カーブに対して市場における燃料ポンプ通過ダストの粒径および総数を当てはめて予測した走行距離に対する燃料流量の推移と、市場から収集した燃料ポンプを用いて実測した走行距離に対する燃料流量の推移とを比較した。これらは同等の推移を示したことから、市場における燃料中ダストの粒径と濃度を事前に調査して流量低下予測カーブに当てはめることで、その市場での摩耗寿命を予測し、設計に反映できると考えられる。

Abstract

Fuel pumps are one of the constituent parts of fuel injection systems; their role is to supply pressurized fuel to the injectors, which then spray fuel into the intake port of the cylinders. In order to comply with stricter emission standards, the number of compact motorcycles featuring fuel injection systems is increasing, particularly in China and India. However, it is also known that fuel in these regions contains high volumes of dirt and other granular contaminants. Contaminants cannot be completely captured by the suction filter positioned upstream in the fuel pump. Some will flow through into the pump, causing wear in components such as the body, impeller, and pump cover. This situation poses the risk that a pump may become unable to supply fuel at the necessary flow rate.

As a first step, we conducted contaminant durability testing, investigating the correlation between wear and fuel flow rate to make observations about fuel pump contaminant wear phenomena. Based on these results, we evaluated whether it is possible to predict the vehicle mileage until the fuel flow rate reaches the minimum level, i.e. the wear life. Contaminant durability testing was conducted by continuous pump operation using particles of controlled diameters and the fuel itself. Fuel flow rates were measured during the test and wear amount was measured after the tests. The results showed that fuel flow rate decreased initially but stabilized as testing continued. It was found that a correlation exists between the changes of wear amount in the fuel pump body, impeller, and cover pump as well as the changes in the fuel flow rate on one hand, and the particle diameter and total number of the contaminants which flowed through on the other. The correlation between the contaminant particle diameter/total number through the fuel pump and the fuel flow rate obtained through the contaminant durability testing was converted to a general expression. This general expression was designated as the "flow rate decrease prediction curve." In order to investigate whether or not the wear life can be predicted, the fuel flow rate correlation with vehicle mileage was predicted by applying the actual contaminant particle diameter and total number to the "flow rate decrease prediction curve". This was compared to the fuel flow rate trends by mileage measured using fuel pumps which had been actually used. As the two showed similar trends, it can be considered that the wear life can be predicted. Accordingly, design adjustments can be made by surveying the real-world fuel contaminant particle diameter and density in advance and applying it to the "flow rate decrease prediction curve".

1 はじめに

FIシステムを搭載する小型二輪車の台数は、排気ガス規制強化に対応するために、今後特に中国やインドで増えると予想されている。一方でこれらの地域では、すでにFIシステムが浸透している地域と比較して、燃料中ダストの量が大幅に多いことが知られている。そのため燃料中ダストにより燃料ポンプの構成部品であるボデー、インペラ、カバーポンプが摩耗し、それにより燃料流量が低下することが懸念される。燃料流量が車両要求値に対して不足した場合、混合気の空燃比が異常となり、エンジン性能低下や排気ガス中の有害ガスの増加につながる可能性がある。

燃料ポンプのダスト耐久性を向上させるための対策には、摩耗箇所であるボデー、インペラ、カバーポンプの耐摩耗性を向上させる^[1]他、サククションフィルタの燃料中ダストのろ過特性を向上させるといった手法が考えられる。これまでは、ダストを含む燃料で耐久試験を行い、基準以下に流量低下した場合には前記の対策手法を施して再試験を行い、合格するまでこれを繰り返していた。しかしこの手順では開発に時間がかかるだけでなく、その対策手法がコストも含めて最適かどうか分からないという課題があった。そこで本報では、燃料ポンプのダストによる摩耗のメカニズムを明確にし、燃料中のダスト濃度から流量低下の推移を予測可能にすることで、最適な仕様を設計時に選択可能とすることを目的とした。まず燃料ポンプのダスト摩耗現象を理解するための基礎試験としてダスト耐久試験を実施した。燃料中に粒径を制御した試験ダストを投入し、燃料ポンプを連続作動させた際の摩耗形態、燃料流量を測定することで、通過したダストの粒径、総数と、燃料流量との相関を明らかにした。この試験で得られた燃料ポンプ通過ダストの粒径および総数と、燃料流量との相関を一般式化し、流量低下予測カーブと名付けた。次に、この結果をもとにして市場における摩耗寿命を予測可能か検証した。市場にお

ける燃料ポンプ通過ダストの粒径および濃度を、前記の流量低下予測カーブに当てはめて予測した燃料流量の推移と、市場で使用中の燃料ポンプを用いて実測した燃料流量の推移とを比較した。

2 試験方法

2-1. 燃料ポンプ

FIシステム、燃料ポンプアセンブリおよび、今回試験対象とした燃料ポンプの構成を図1から図3に示す。エンジンへ燃料を供給する仕組みとしてFIシステム(図1)を用いる目的は、正確な量の燃料を供給することで、混合気の正確な空燃比を実現して燃費向上や排気ガス規制対応をすることである。構成部品の一つに燃料タンク内に位置する燃料ポンプアセンブリ(図2)があり、その役割は燃料ホース、インジェクタ内の燃料圧力を規定値に保つことである。燃料圧力が保たれた状態でインジェクタ先端が一定時間開くことで、正確な量の燃料が噴霧される。燃料ポンプアセンブリは燃料圧力を発生させる燃料ポンプ、燃料圧力を一定にするためのプレッシャレギュレータ、そして燃料中ダストを捕捉するためのサククションフィルタなどから構成されている。燃料ポンプはインペラ(羽根車)を回転させることで燃料吸入口から出口穴の間で燃料圧力を昇圧する(図3)。燃料ポンプアセンブリの性能はプレッシャレギュレータ下流の燃料ホース内の燃料圧力と燃料流量の関係で表現することが一般的である(図4)。図4の実線は燃料ポンプアセンブリの特性を示し、一点鎖線は燃料ポンプ単品の特性を示す。燃料ポンプ単品では出口側の圧力が上がるに従い流量が低下する。燃料ポンプアセンブリでは高圧時にプレッシャレギュレータが作動することで、余分な圧力を燃料タンクに開放し、制御圧力(図4の黒破線)で一定となる。燃料ポンプアセンブリは新品の状態(図4の青線)では、最大車両要求流量(図4の緑破線)においても燃料圧力はプレッシャレギュレータの制御圧を保持できる。燃料ポンプ

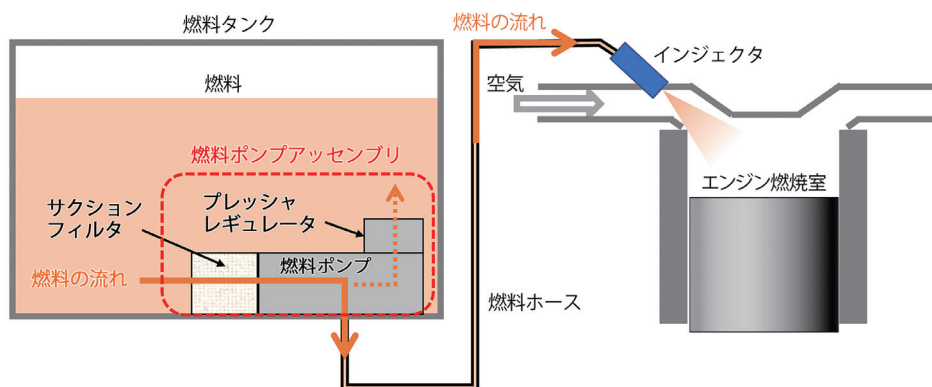


図1 燃料噴射システム(FIシステム)の概略図

アッセンブリでは、サクシオンフィルタを通り抜けた燃料中ダストによりボデー、インペラ、カバーポンプが摩耗し、それにとともに性能低下がおこる。図4の赤線のように想定以上の性能低下をすると、車両ではインジェクタが開弁、閉弁を繰り返す中で燃料圧力がプレッシャレギュレータ制御圧まで昇圧されないため、インジェクタの開弁時間制御による燃料流量の調整を正確にできなくなる。そのため、燃料ポンプが性能低下した場合でも、最大車両要求流量時の燃料圧力をプレッシャレギュレータ制御圧で保持できる必要がある(図4の黄線)。

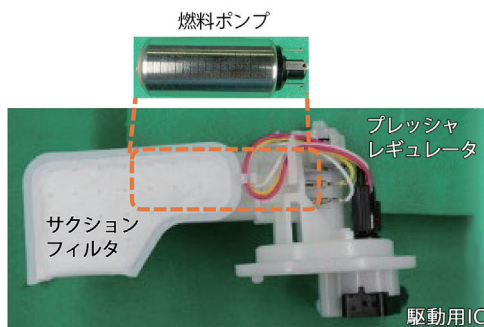


図2 燃料ポンプアッセンブリ

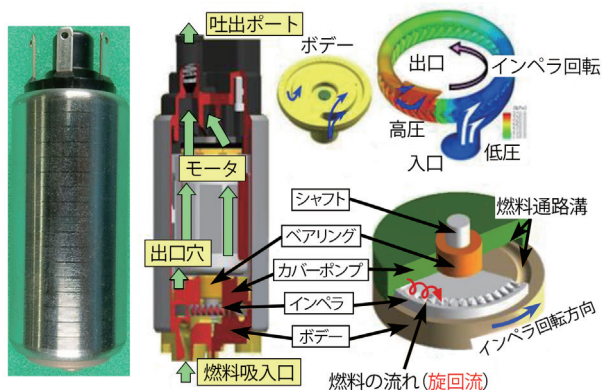


図3 燃料ポンプの構造と燃料を昇圧する原理

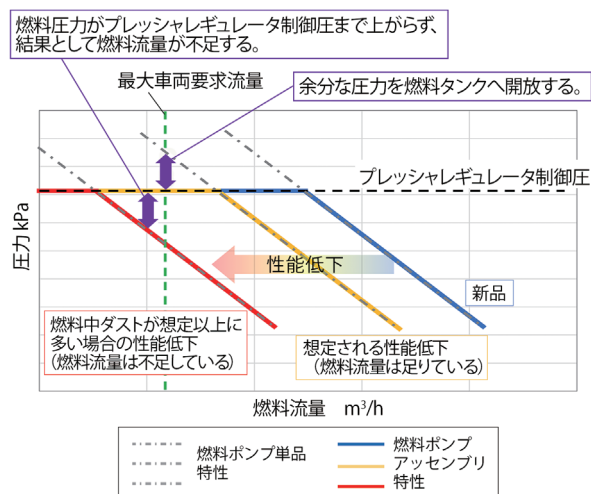


図4 燃料ポンプアッセンブリの性能(圧力流量特性)

2-2. 試験ダスト

JIS Z 8901に規定されている試験用粉体1の3種(けい砂)を用いて分級を行い、最大粒径を4種類に制御した試験ダストを作製した。試験ダストの粒径分布を図5に示す。最大粒径が小さいものから順に、粒径A、粒径B、粒径C、粒径Dと名付けた。

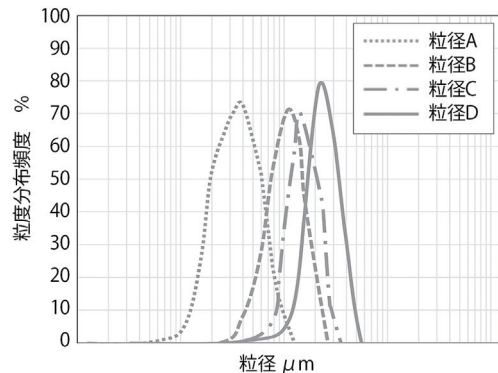


図5 試験ダストの粒径分布

2-3. ダスト耐久試験方法

燃料ポンプのダスト耐久試験機の概略を図6に示す。試験槽に燃料油、試験ダストを投入し燃料ポンプを作動させた。燃料ポンプの作動電圧は搭載車両のシステム電圧とした。また燃料圧力は燃料ポンプアッセンブリのプレッシャレギュレータ制御圧とした。サクシオンフィルタを用いていないため、試験ダストを攪拌機で均一分散した燃料油が燃料ポンプ内を直接通過する。流量計(東京計装P-771-00-TW-R1)とパーティクルカウンタ(PAMAS S4031FUEL)を用いて、それぞれ燃料流量と燃料中試験ダストの粒径分布(粒径ごとの濃度)の試験中の経過を測定した。各粒径の試験ダストにおいて、試験を3回ずつ行った。

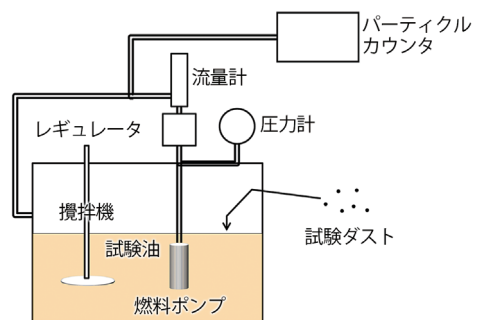


図6 ダスト耐久試験機の概要

ダスト耐久試験後に燃料ポンプを分解し、ボデー、インペラ、カバーポンプの摩耗量を形状測定機により測定した。図7中の摩耗箇所と記した部分を測定し、それぞれの摩耗量の合算

値を“ポンプ摩耗量”と定義した。また、ダスト耐久試験の結果から得た燃料ポンプ通過ダストの粒径および総数と、燃料流量低下量との相関を近似式化して流量低下予測カーブとした。

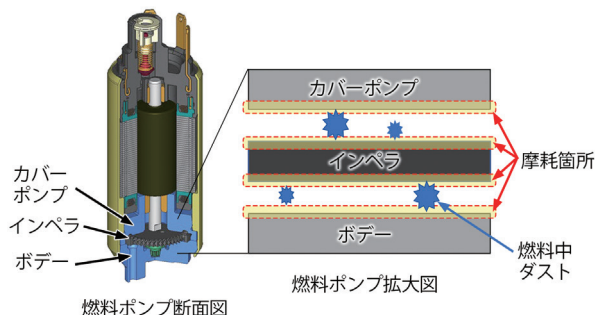


図7 燃料中ダストによる燃料ポンプの摩耗箇所とポンプ摩耗量

ダスト耐久試験のポンプ通過ダストの総数は燃料体積（ポンプ流量×試験時間）とダスト濃度より下記式（1）にて計算した。

$$M_d = C_d \times Q_d \quad (1)$$

M_d はダスト耐久試験中に燃料ポンプを通過したダストの総数であり単位は個である。 C_d はパーティクルカウンタにより測定されたダスト耐久試験中のダスト濃度であり、単位は個/ m^3 である。 Q_d はダスト耐久試験中に燃料ポンプを通過した燃料体積の総数であり単位は m^3 である。

2-4. 実市場における摩耗寿命予測

実市場で使われている車両の燃料タンク中の燃料油と燃料ポンプを用いて、次の手順で調査を行った。まず、燃料タンク中の燃料油のダストの粒径を実測し、総数を計算で求めた。これを流量低下予測カーブに当てはめて、走行距離に対する燃料流量推移を予測した。一方、実市場の車両の燃料ポンプで燃料流量を実測し、走行距離に対する燃料流量推移を求め、先の予測値と比較した。以下、詳細な手順を説明する。

まず、市場での燃料ポンプ通過ダストの総数を（2）式より各粒径に対して計算した。

$$M_m = c_f \times \alpha_s \times Q_f \times \frac{D_v}{V_v} \quad (2)$$

M_m は任意走行距離における燃料ポンプ通過ダストの総数で単位は個である。 c_f はタンク内燃料中のダスト濃度であり、単位は個/ m^3 で示す。市場の車両の燃料タンク内の燃料をパーティクルカウンタにより実測した平均値である。 α_s はサクシオンフィルタのろ過効率である。パーティクルカウンタによりろ過前、ろ過後の粒径分布を測定し各粒径ごとのろ過効率を計算した。 Q_f は燃料ポンプの燃料流量であり寸法公差中央品の燃料流量を使用した。単位は m^3/h である。 D_v は車両走行距

離であり単位はkmである。 V_v は車両速度であり市場平均を想定した値を用いた。単位はkm/h である。市場の燃料ポンプの燃料流量については、前記の実市場で使われている車両の燃料ポンプ単体の燃料流量を実測した。走行距離は当該サンプルが搭載されていた車両の走行距離メーターから読み取り、走行距離1万Kmごとに区切り、走行距離の平均値、流量の平均値から走行距離と燃料流量の推移を得た。

3 結果と考察

3-1. ダスト耐久試験結果

図8にダスト耐久試験時の試験時間と燃料流量変化を示す。燃料流量は試験開始時には大きく低下したものの、一定時間後に変化は小さくなる傾向が見られ、最終的に安定した。安定後の燃料流量について、試験ダスト粒径が大きいほど低下量が大きくなった。図9に試験ダスト粒径と試験後のポンプ摩耗量の関係を示す。試験ダストの各粒径ごとに3回測定し、平均値を示した。この結果より試験後のポンプ摩耗量は投入したダスト粒径と相関があることが分かった。

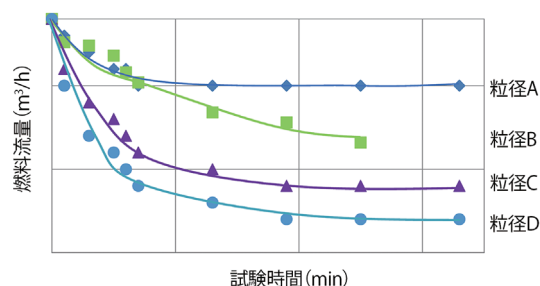


図8 試験時間と燃料流量の推移

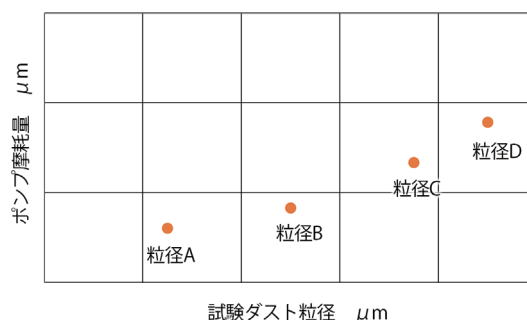


図9 試験ダスト粒径とポンプ摩耗量（平均値）の関係

以上の結果より燃料中ダストによる燃料ポンプの摩耗現象を考察した（図10）。試験初期にはダストがボデーやインペラ、カバーに強く押し付けられ、その結果急激に摩耗が進行する。しかし摩耗が進むに従いクリアランスが増加することで、ダストはインペラを摩耗させるほどの力で押し付けられず、摩耗量および流量はダストの粒径に応じた値で安定する。流量が

安定した際の摩耗量は通過ダストの粒径の関数になると考えられる。

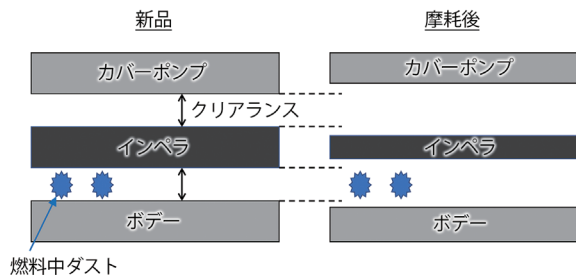


図10 燃料中ダストによる燃料ポンプの摩耗箇所

3-2. 実市場における摩耗寿命予測

図8に対して(1)式から計算したポンプ通過ダスト総数を当てはめることで、粒径ごとのポンプ通過ダスト総数と流量低下の関係性を求め、図11に示した(流量低下予測カーブ)。

(2)式を用いて計算した各距離でのダスト通過総数から、流量低下予測カーブを用いて予測した燃料流量の推移と、市場で使われている車両の燃料ポンプで実測した燃料流量との比較を図12に示す。双方の流量低下傾向は類似していることから、本手法による流量低下の予測手法は実測と整合すると考えられる。

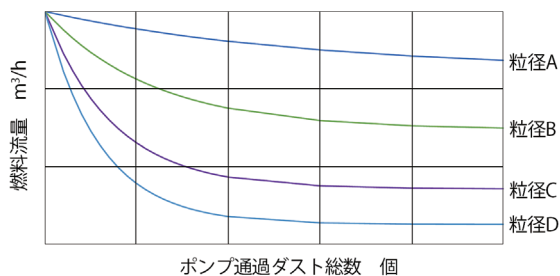


図11 ポンプ通過ダストの総数と燃料流量の関係

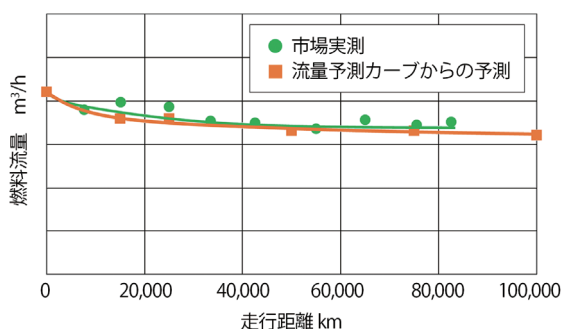


図12 市場の燃料ポンプを実測した走行距離に対する燃料流量推移と流量予測カーブから予測した走行距離に対する燃料流量推移

本手法を用いれば、将来FIシステムを展開する市場の燃料中のダスト濃度を測定して(2)式に代入することにより、燃料流量低下量を予測することが可能になる。この結果がもし車両の最大要求流量を満たさない場合には、サクションフィルタのろ過効率 α_s を向上させる、もしくは燃料ポンプの耐摩耗特性を向上させるといった手段を、設計段階で、しかも定量的な目標値を定めて実施することが可能になる。

4 おわりに

排気ガス規制強化にともない、FIシステムを採用する小型二輪車の販売地域は拡大している。各地域における燃料中ダストによる燃料ポンプの摩耗、流量低下を設計段階で予測する手法を検討した。その結果、下記2点の知見を得た。

1. 本報で使用した燃料ポンプのダストによる摩耗、流量低下は通過ダストの総数が増えてもその粒径により一定のところで安定する。
2. 本報で使用した燃料ポンプの流量がダストにより低下し安定するまでの挙動は一般式化することができ、これを流量低下予測カーブとした。これを用いることで市場の走行距離に対する流量推移を予測することができる。

上記2点の知見より、FIシステムを展開する市場の流量低下を予測し対策することが設計段階で可能となった。

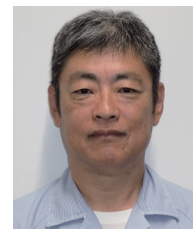
参考文献

- [1] 金子ら：アルミ陽極酸化被膜に対するDLC成膜技術の開発
ケーヒン技報Vol.1(2012) p.13-18

著者



安原 純平
Jumpei Yasuhara
生産技術本部
材料技術部



原 慎也
Shinya Hara
生産技術本部
材料技術部

鈴木 敏郎
Toshiro Suzuki
愛三工業㈱
設計品質統括部

宮寄 洋彰
Hiroaki Miyazaki
愛三工業㈱
二輪事業部

山本 大介
Daisuke Yamamoto
愛三工業㈱
第2製品開発部

クロムモリブデン鋼およびステンレス鋼上に電析したパーマロイめっき膜中に存在する内部応力の外部応力検出感度に及ぼす影響

Effects of internal stress found in electro-deposition permalloy plating film on chromium molybdenum steel and stainless steel upon external stress detection sensitivity

石川 さとみ

本稿は、公益社団法人 日本金属学会 2018 年春期(第162 回)講演大会で発表した内容に加筆修正を加えたものである。

要旨

電動アシスト付き自転車に使われている磁歪式力学センサは、磁性体が寸法変化すると透磁率が変化する逆磁歪効果を用いた力検出センサで、高剛性かつ非接触式であることが利点である。そのセンサ素子として、透磁率の高いパーマロイめっき膜(Ni-Fe合金; λ (磁歪定数) >0)を選定し、基材と熱処理条件を変えて引張圧縮荷重に対する応力検出感度を測定するとともに、パーマロイめっき膜中に存在する内部応力を測定し、内部応力が応力検出感度に与える影響を考察した。

Abstract

The magnetostrictive mechanical sensor used in electrically power assisted bicycles is a force detection sensor using the inverse-magnetostriction effect in which the magnetic permeability changes with the dimensions of the magnetic material. This has advantages as it is highly rigid and is a non-contact type. As the sensor element, a permalloy plating film with high magnetic permeability (Ni-Fe alloy; λ (magnetostriction constant) >0) was selected, and the effect of the internal stress on the stress detection sensitivity was studied by measuring the stress detection sensitivity to tensile & compressive loading and the internal stress that exists in the permalloy plating film for different base materials and heat treatment conditions.

1 はじめに

高剛性かつ非接触式の力検出センサとして、磁歪式力学センサは有用である。電動アシスト付き自転車の踏力検出用トルクセンサには、クランク軸の高剛性化、およびペダル踏力の低減のために、磁歪式のトルクセンサが使われている。

磁歪式力学センサの素子は強磁性体であることが求められるが、バルク材では強度と応力検出感度の両立が困難である。そこで、基材に一般的な構造材を用い、軟磁性材料であるパーマロイをめっきし、熱処理することで、強度と応力検出感度の両立を狙う試みが実施されている^{[1][2]}。熱処理の目的はめっきと基材の密着強度の確保である。めっきが基材から剥がれるとセンサ特性が不安定になり、センサ特性を安定させるためには670 K以上の熱処理が必要である。一方で、応力検出感度は、Ni-Fe組成比と熱処理条件の組み合わせで複雑に変化する。

本稿では、シンプルな引張圧縮式の磁歪式力学センサを用い、Ni-Fe組成比、熱処理条件が応力検出感度に及ぼす影響とその要因を考察した。

2 試験方法

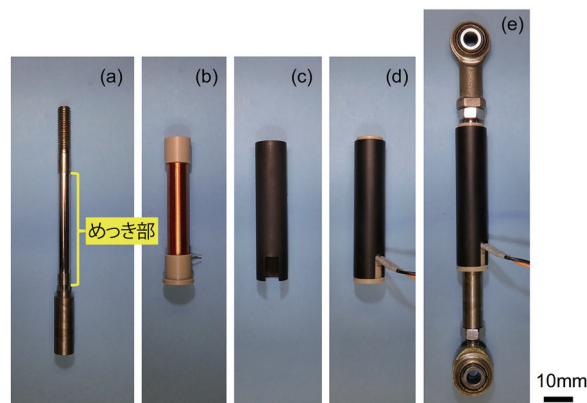
2-1. 試験片仕様

素子部は、上下に雄ネジと雌ネジを設けたクロムモリブデ

ン鋼(SCM435)あるいはステンレス鋼(SUS304)の円柱基材を用い、外径 ϕ 5.6の部位に0.5~1 μ mの Niめっき下地を施し、その上にNi-Fe(組成20 - 37 at%Fe)を70 μ mめっきした複合体を作製し、ガス置換炉(N_2 ガス雰囲気)を用いて、室温から目的の温度まで1時間で昇温し1時間保持(焼鈍)した後、炉の中で室温まで冷却(炉冷)した。

磁束検出部は、励磁と検出を兼ねるコイル(Cu細線整列巻き320ターン)と、磁路を形成する軟磁性体ヨーク(STKM11AE-C; N_2 ガス雰囲気中770 Kで熱処理済み)を重ね合わせ、接着剤で固定したものを使用した。

素子部と磁束検出部を組み合わせた後、上下にボールジョイントを接続した(図1)。



(a) 素子部 (b) 励磁および検出コイル (c) 軟磁性体ヨーク
(d) 磁束検出部(b)+(c) (e) (a)+(d)+ボールジョイント

図1 試験片形状

2-2. 応力検出感度測定

図1(e)の試験片について、万能試験機(島津製作所製, オートグラフAGX-plus)を用い荷重を印加しながら、インピーダンスアナライザ(榊岩崎通信機製, PSM1700)でコイルのインピーダンス Z を測定した。

万能試験機での印加荷重は ± 200 N、ストロークスピードは 0.03 mm/s、インピーダンスアナライザによる励磁条件は 2 kHz、 40 mA、サンプリング周期は 0.1 sとした。

図2は測定結果の一例である。

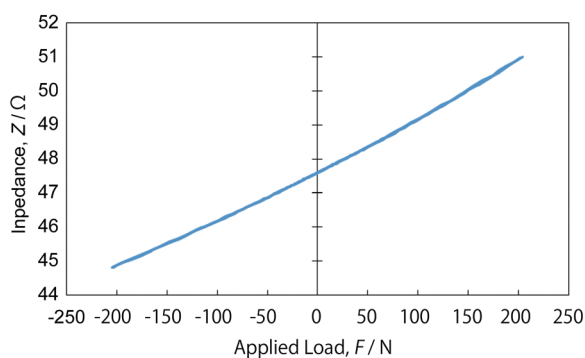


図2 応力検出感度測定結果例

2-3. 応力検出感度算出方法

応力検出感度算出フローを図3に示す。

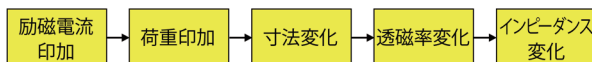


図3 応力検出感度算出フロー

磁束検出部に励磁電流を流した状態で試験片に荷重を印加すると、逆磁歪効果によって Z が変化する。

磁性体に交流磁界を与えた場合の Z は、①式で、透磁率 μ は②式で表される^[3]。

$$Z = R + j\omega L = R + j \cdot 2\pi f \cdot L \quad \cdots \textcircled{1}$$

$$\mu = \frac{Ll}{n^2 A} \quad \cdots \textcircled{2}$$

Z : コイルのインピーダンス	R : コイルの直流抵抗
j : 虚数単位	ω : 角周波数
L : 自己インダクタンス	f : 励磁周波数
μ : 透磁率	l : 磁性体の長さ
n : コイル巻数	A : 磁性体の断面積

①式に②式を代入した③式が Z と μ の関係を表す。

$$Z = R + j \cdot 2\pi f \cdot \mu \frac{n^2 A}{l} \quad \cdots \textcircled{3}$$

③式の右辺は、 μ を除いて定数であるため、 μ の変化率は Z の変化率と考えることができる。

このため、 X [N] 負荷時の Z を Z_x と表すと、応力検出感度 S は以下の通りと考えることができる。

$$S = \frac{Z_x - Z_0}{Z_0} \quad \cdots \textcircled{4}$$

今回、荷重は引張圧縮両方向に印加したため、引張の応力検出感度を S_+ 、圧縮の応力検出感度を S_- 、合計の感度を ΔS とし、

$$\Delta S = S_+ + S_- \quad \cdots \textcircled{5}$$

2-2の実測値から⑤式を用いて計算した。

2-4. 内部応力測定

素子部の内部応力を、微小部X線応力測定装置(リガク製 AUTOMATE II ; Cr管球)により測定した。図4に内部応力測定時の試料の配置を示す。測定は、(220)結晶面、傾斜角 ϕ を一定($\phi = 0 \sim 45^\circ$)、回折角揺動幅を 3° で行った。

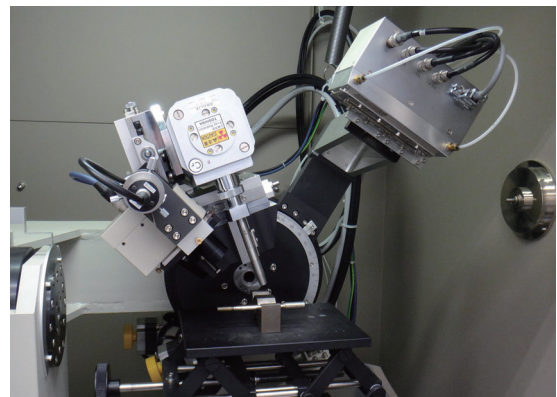


図4 内部応力測定時の試料配置

2-5. 熱膨張測定

めっき膜と基材界面に発生する熱応力(内部応力)を見積もるため、熱膨張率計(NETZSCH製 TD5020SE)を用い、温度 $370 \sim 770$ Kの範囲で基材であるSCM435とSUS304の試料長さ l を測定した。

パーマロイの格子定数(文献値)と、2-5.で実測した基材の I からめっき膜と基材界面に発生する内部応力を計算した^[4]。

σ : 内部応力 E: ヤング率
 a : 格子定数(370 ~ 770 K) a_0 : 格子定数 (室温)

 l : 試料長さ (370 ~ 770 K) l_0 : 試料長さ (室温)

図5にSCM435基材上のパーマロイめっき膜の無負荷時の
コイルのインピーダンス Z_0 、+200 N負荷時の応力検出感度

熱処理温度が620 Kを超えると、SCM435基材では ΔS のピークはFe濃度が低い側にシフトする。670 K-26 at%Feで ΔS が最大になり、それ以上の温度で応力検出感度は徐々に低下していく。一方、SUS304基材では、20 - 37 at%Fe全域で S⁺、S⁻共に急激に小さくなり、720 Kで ΔS がほぼ0になる。

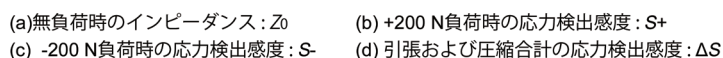


図5 SCM435基材上Ni-Feめっき膜のインピーダンスおよび応力検出感度に及ぼすめっき中Fe濃度および熱処理温度の影響

クロムモリブデン鋼およびステンレス鋼上に電析したパーマロイめっき膜中に存在する内部応力の外部応力検出感度に及ぼす影響
Effects of internal stress found in electro-deposition permalloy plating film on chromium molybdenum steel and stainless steel upon external stress detection sensitivity

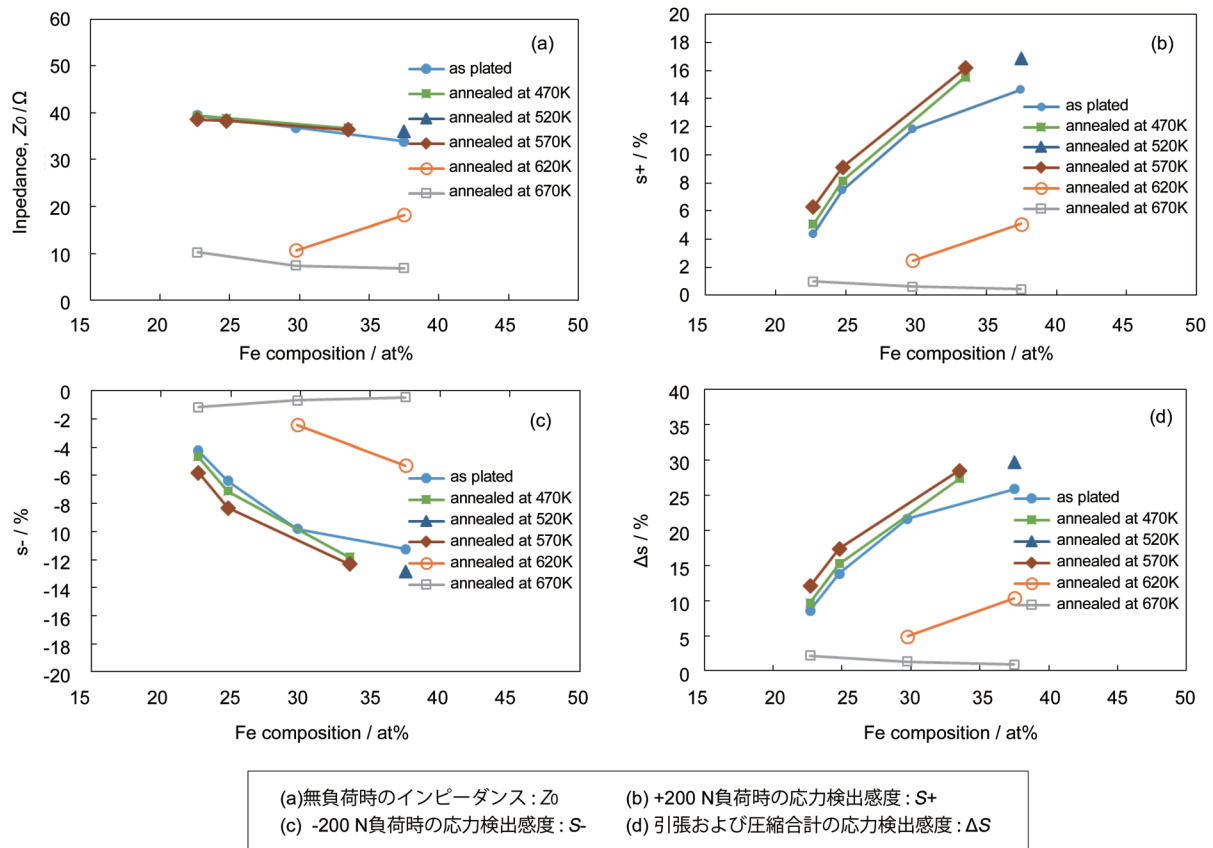


図6 SUS304基材上Ni-Feめっき膜のインピーダンスおよび応力検出感度に及ぼすめっき中Fe濃度および熱処理温度の影響

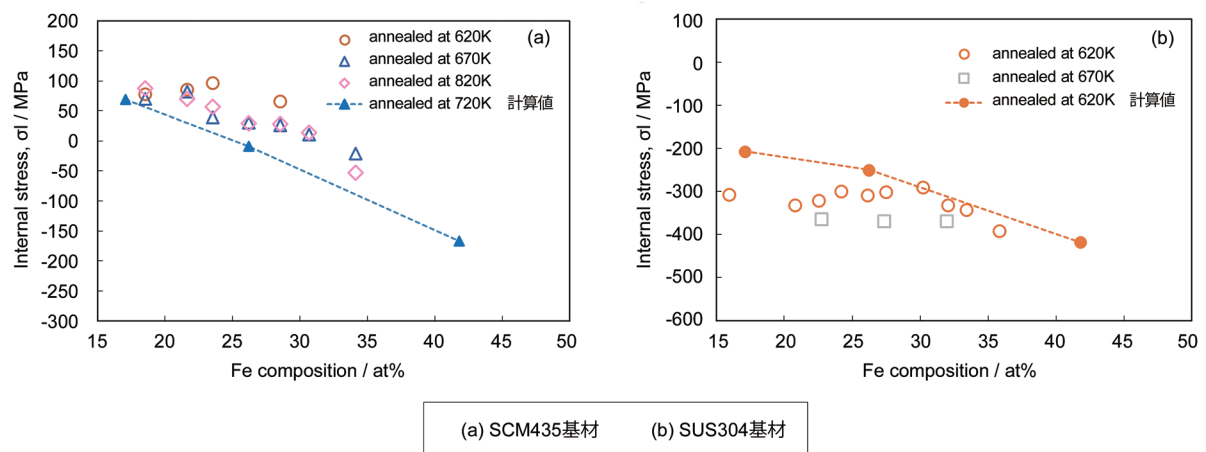


図7 Ni-Feめっき膜の内部応力に及ぼすめっき中Fe濃度および熱処理温度の影響

図7にSCM435基材上のパーマロイめっき膜およびSUS304基材上のパーマロイめっき膜の内部応力に及ぼすめっき中Fe濃度と熱処理温度の影響を示す。

どちらの基材でも、熱処理温度570 K以下では内部応力が測定できなかった。これはX線による内部応力測定はZ方向

(めっき膜の厚み方向)に応力分布があると測定できないことから、Z方向に応力分布があるものと推察される。620 K以上で測定できたのは、熱処理によって応力が緩和され、Z方向の応力分布がなくなった(小さくなった)からであると推察される。

620 K以上の熱処理では、SCM435は25-30 at%Feを境に低Fe濃度側で引っ張りの内部応力が、高Fe濃度側で圧縮の内部応力が検出された。SUS304では15-35 at%Fe全てで圧縮の内部応力が検出された。

めっき時に発生する内部応力は、めっき液の組成やめっき条件にもよるが、一般的に引張応力であると言われている^[5]。めっき時に発生した応力は620 K以上で緩和されると考えられるが、SUS304基材で大きな圧縮応力が検出されたことから、応力緩和と同時に新たな応力が付与されたと考えられる。この新たな応力は、SCM435の720 KとSUS304の620 Kの内部応力測定結果が、基材の熱膨張の実測値と格子定数から計算した値に近いことから、基材とめっき膜の熱膨張率の差によって発生した熱応力であることが確認できる。

応力緩和が起こったと推測される620 K以上で ΔS が変化し始め、大きな圧縮応力が入ったSUS304基材では ΔS が消失し、SCM435基材でも圧縮応力が検出された30 at%Fe以上で ΔS の低下が見られたことから、めっき膜中に圧縮応力が存在すると ΔS が得られず、引張応力が存在すると高い ΔS を得ることができると推測される。

4 おわりに

SCM435基材およびSUS304基材上に種々Fe濃度を変化させたパーマロイめっきを施した後、熱処理条件を変化させた磁歪センサ試験片を作成し、引張圧縮試験により応力検出感度の評価を実施した。その結果、応力検出感度を高くするには、めっき膜中に引張応力が存在するような線熱膨張を持つ基材、熱処理温度を採用する必要がある、本稿の検討においてはSCM435基材、約26 at%Feのパーマロイめっき膜を670 Kで熱処理したもので感度と強度が両立し、最大の応力検出感度を得られることが判明した。

今回検討した引張圧縮式の磁歪式力学センサは、寸法ばらつき等の影響を排除するため、比較的大きいサイズで作製した。実用においては、引張圧縮式でもトルク式でも、搭載スペースの制約がある。小型化は、応力検出感度の低下やセンサ特性の信頼性の低下を招くため、特性を保ちつつ小型化することが今後の課題となる。

■謝辞

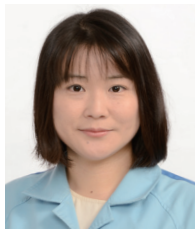
本研究を遂行するにあたり、ご助言を賜った隅山兼治氏に感謝の意を表す。

また、めっき技術の指導を頂いた故神谷正市氏に深謝する。

■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, 14-17, 2017
- [2]向坊長嗣ら: ニッケル-鉄合金めっき膜中の水素および空孔の安定化熱処理, 日本金属学会誌第71巻第9号(2007) 809-814
- [3]太田恵造: 磁気工学の基礎Ⅱ—磁気の応用—(共立出版株式会社 1973年) P306-307
- [4]W.B.Pearson: A Handbook of Lattice Spacings and Structures of Metals and Alloys, (Pergamon Press, 1958) P638 - 641.
- [5]永山富男: めっき法により作製したFe-Ni合金膜の金属組織学的研究と低熱膨張材料への展開(奈良先端大学博士論文 2017年) P16

■著者



石川 さとみ

Satomi Ishikawa

先進技術本部
研究開発統括部
基盤技術研究部

LES 詳細化学反応計算による高回転過給
ノッキング解析High-Speed Supercharging Knocking Analysis by LES Detailed Chemical Reaction
Calculation

田中 大二郎 高須 康嗣 大村 亮介

本稿は、公益社団法人自動車技術会 2019年春季大会 学術講演会予稿集 No.86-19 20195411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。

Abstract

In order to improve the performance, in-cylinder combustion calculation was carried out as part of knock counter-measure. Since knocking occurs due to cycle fluctuation, calculation was performed by a combination of LES that can calculate cycle fluctuation and detailed chemical reaction calculation that can perform self-ignition calculation. As a result, the knock corresponding to the octane number and the ignition timing was calculated, and new suggestion was given about the knock mechanism.

1 まえがき

ノッキング対策が、ガソリンエンジンの永遠のテーマであることに議論の余地はない。熱効率向上にダイレクトにつながる圧縮比アップにはノッキング対策が不可欠であり、圧縮端温度低減が効果的ではあるが、それ以外の特にノック発生基点でのピンポイント対処方法、さらには高回転ノック計測については、報告が乏しいのが現状である^{[1][2][3][4][5]}。今回、高回転最大出力向上を目的として、圧縮端温度低減以外のノック低減手法により、それを達成させる手法を模索した。そのためにはまずは実際のノック現象解明が求められるが、実機の特に高回転高負荷でのノック計測は困難であるため、計算での実機再現を試みた。ノッキングは毎サイクル起きるのではなく、サイクル変動中の高IMEPサイクルにて起きる。よって、サイクル変動計算が可能なLES計算を採用した。さらには、ノックの本質とされる自着火現象も再現させるべく、詳細化学反応計算と組み合わせた。

その結果、運転条件に応じたノック振幅が計算された。また、高回転におけるノックメカニズムについて、新たなメカニズムが示唆される結果も得られた。

2 解析方法

2-1. 解析ソルバー

AVL社のFIRE Version: R2017fを使用した。

まずは点火までの筒内流動計算として、Smagorinsky LESをECFM乱流モデルで解いた。点火時期からは、詳細化学反応計算を行なうのに、TABKINTM/FGM燃焼モデルを使用した。TABKINTM/FGMを採用した理由としては、事前に詳細化学反応計算を解いてルックアップテーブルを作成しておき、実際

の燃焼計算では、そのテーブルを参照するだけで済むことで、従来の数十分の一の計算時間まで短縮できるからである。これにより、膨大な計算時間で敬遠されがちであったLES詳細化学反応計算が、RANS計算並と実用化に近づいた。

2-2. 実験および計算条件

今回の実機評価および計算に当たり、高回転高負荷ノック評価に供試したエンジン諸元を表1に、運転条件を表2に、計算条件を表3に示す。

Table 1 Engine specification

Inline-4cylinder Turbocharged	
Displacement	2.0
Bore × Stroke, mm	87.5 × 83.0
Compression ratio	10.0
Fuel injection type	Direct injection

Table 2 Engine operation condition

Engine speed, rpm	5600
Volumetric efficiency, %	206.5
Air fuel ratio	12.7
Power, kW	222
Intake pressure, kPa abs	213

Table 3 Calculation condition

Mesh Resolution mm	0.4
Number of Cells	4 million
Time Step deg.CA	0.02
Number of Chemical Species	1387
Number of Reaction Formula	5739

計算は、図1の形状をモデル化した。吸気ポート上流に吸気管およびサージタンクを設置し、表2の体積効率になるような過給圧をサージタンク上流面に定常的に与えている。また、排気側は、今回、排気行程は計算せず、オーバーラップ時相当の圧力を排気ポート出口端面に与えている。メッシュ生成状況を図2に示す。



Fig. 1 Engine geometry

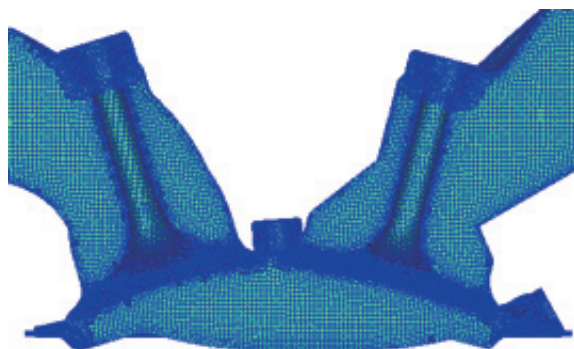


Fig. 2 Generated Mesh

2-3. 計算手順

計算手順は、2-1.でも紹介したが、図3の通り、まずは点火までの筒内流動計算として、ECFM乱流モデルで解き、点火時期からは、詳細化学反応燃焼計算を行なうのに、TABKIN™/FGM燃焼モデルに切り替えて計算した。

クランク角の表示として、720deg.CAを点火上死点とする。

この一連の計算で多サイクル計算を行ない、実機相当のノックサイクルを抽出し、以後は、そのサイクルを使い、点火時期、オクタン価等を変えて、ノックへの影響を確認した。

なお、参考までに計算時間を記すと、吸気上死点から点火までが、48時間(68コア)、点火から740deg.CAまでが、13時間(24コア)であった。

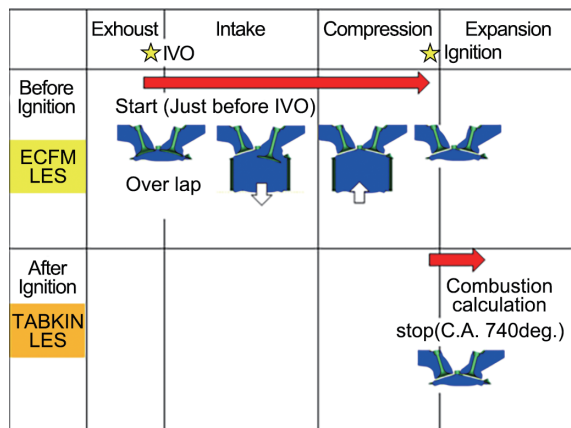


Fig. 3 Calculation Procedure

3 解析結果

3-1. ノック計算検証

図4に、100RONトレースノック点火時期の条件において、計算結果と、実機でのサイクル変動の中での筒内圧が高いサイクルと低いサイクルとの比較を示す。

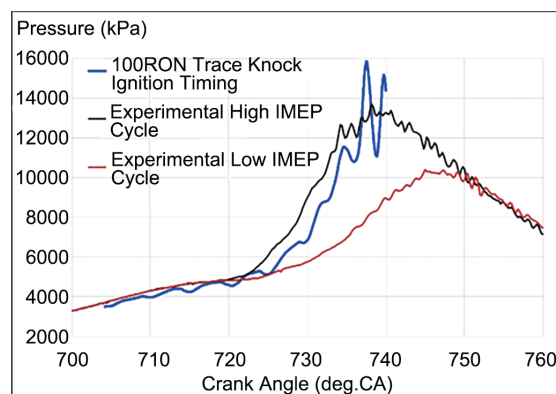


Fig. 4 Comparison of the Results of Experimental and Calculation

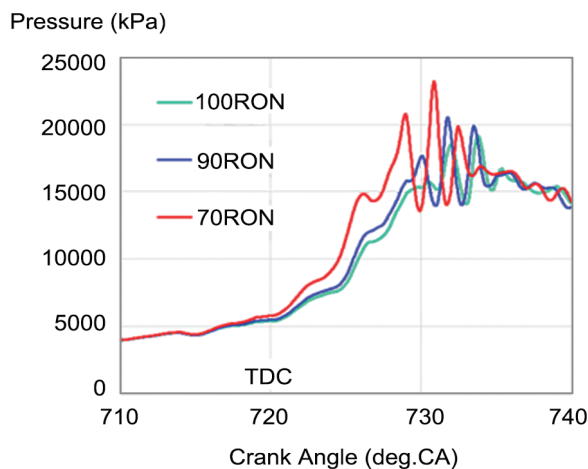


Fig.5 Comparison of Octane Number

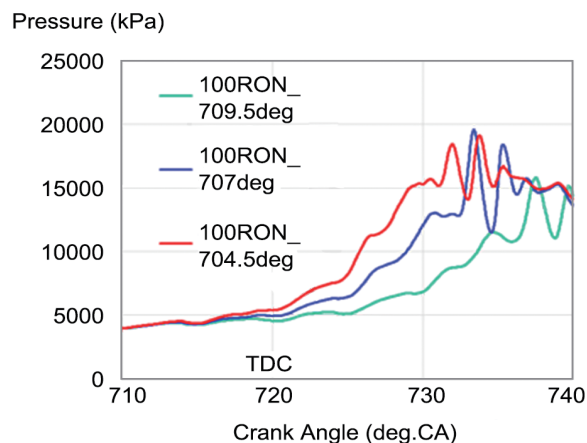


Fig.6 Comparison of Ignition Timing

この計算結果にて、実機でのノックサイクルが再現できていると判断した。

また、さらにオクタン価を変えて計算したものを図5に、点火時期を変えたものを図6に示す。

いずれも、それぞれの条件に応じたノック振幅とノック発生タイミングが計算できているため、今回の手法でノッキングそのものが計算できていると考える。

3-2. ノック発生箇所とタイミング

以上より、ノックは計算できていることがわかった。では次に、それらのノックの発生場所について、考察する。

なお、以後の計算は、特に記載がない限り、ノック現象がわかりやすいように、70RONかつ、点火時期に強制的に温度・圧力を1.1倍にして計算したものとする。

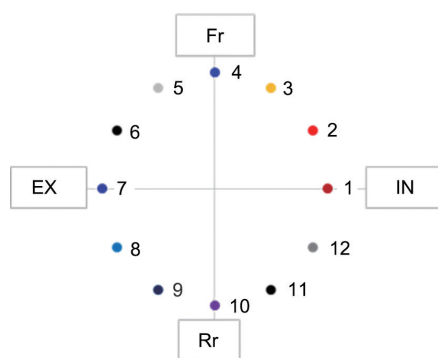


Fig.7 Pressure Sensor Location

ノック発生箇所を感知するために、図7のように、シリンダーヘッド燃焼室壁面近傍に、解析上の圧力センサーを設置し、それぞれの位置の違いによるノック振幅と発生タイミングの違いを確認した。

図8に、12カ所のうち、5カ所のセンサーでの筒内圧比較を示す。7番のみ、ノック振幅が明らかに大きくなっているが、これはスキッシュに位置しているための影響が考えられる。

これらのノック振幅の立ち上がりが一番早いところがノック基点と考え、図9にFFT処理したものを示す。なお、3番の結果は、設定不良のため、除外した。

立ち上がりが一番早いのは、1番であるが、最初の立ち上がり以降は、目立った振幅が無く、次の10番も同様である。よって、さらに次の9番はその後の振幅も大きく、ここがノックの基点と仮置きしておく。

次に、その他のセンサーの立ち上がりタイミングをプロットしたものを図10に示す。9番センサーから、圧力が伝播していく様子が見られ、やはり9番がノック基点と考えられる。いずれにせよ、ノック発生タイミングは、721~722deg.CAと考えられる。

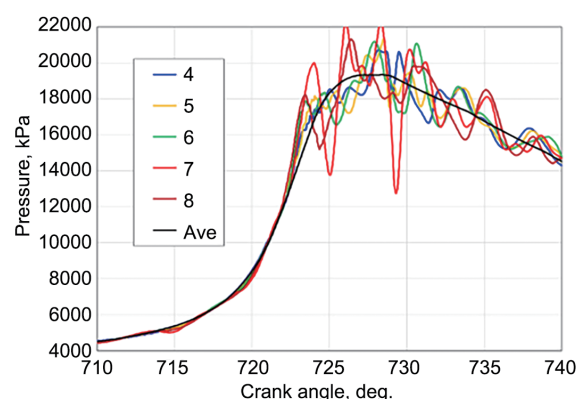


Fig.8 Comparison of Sensor Location

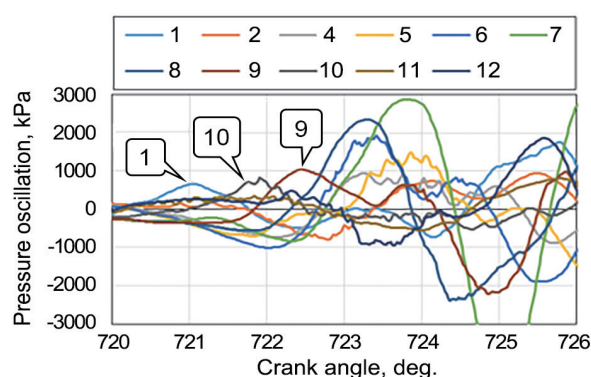


Fig.9 Comparison of FFT Analysis

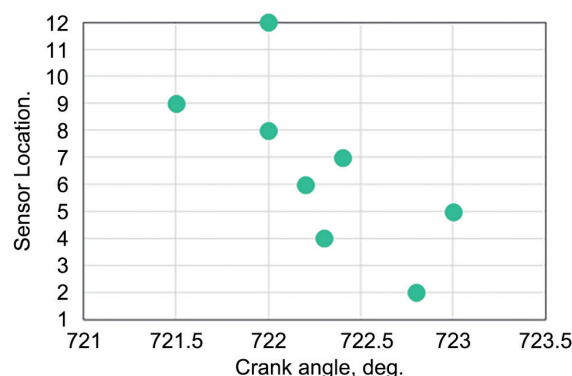


Fig.10 Rising Point difference of Sensor Location

3-3. ノック振幅発生メカニズム仮説

次に、このタイミングで、何が起きているか、調査する。図11

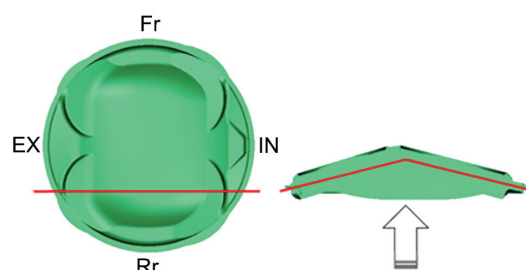


Fig.11 Monitoring cross section

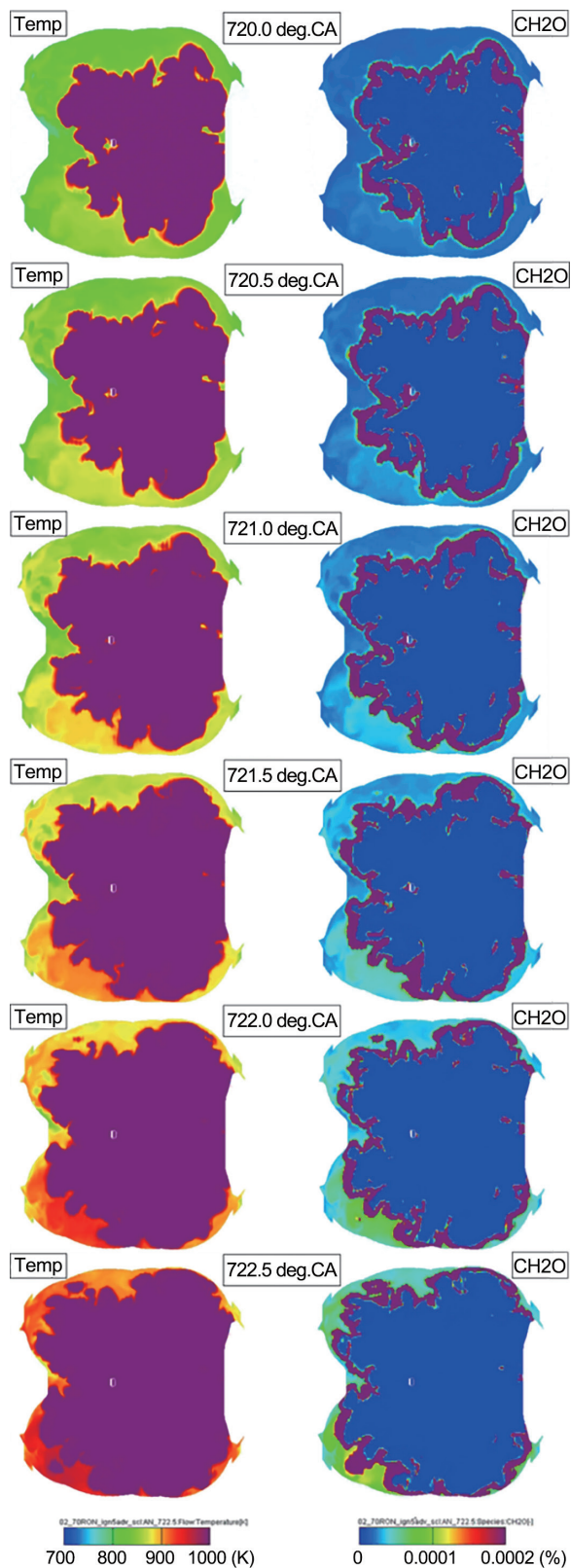


Fig.12 Temperature and CH2O Behavior around Knock Timing

に示すベントルーフ断面にて、図12に前述のノックが起きていると推定された721～722deg.CAの前後における筒内温度

と、代表的な中間生成物としてCH2O濃度を示す。

排気リア側に、CH2Oの発生が見られ、温度も冷炎反応が起きるとされる900K前後になっており、冷炎反応が起きていると考えられる。

しかし、ノック現象としての急激な自着火現象は認められず、先の筒内圧振幅発生メカニズムが説明できない。

ここで、図13に、2018年アーヘン・コロキウムでのIAV論文資料^[6]を引用する。この資料によると、副室式燃焼により、ノックが起きていなくても、筒内圧振幅が発生している。よって、以下の仮説を立てた。

「低回転ノックは、冷炎反応の後に急峻な自着火反応が起き、それがノックの源となるが、高回転では、冷炎反応自体が、ノック振幅の源となる」

これを確かめるために、図14に示すベントルーフ断面上の赤星印の1点について、解析を行った。

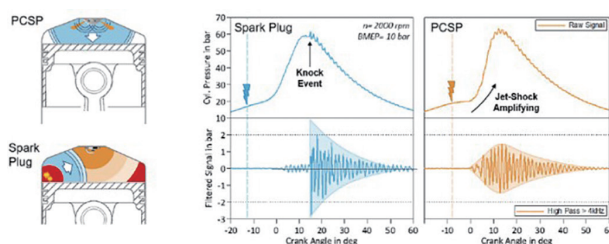


Fig. 31: Physical principle of PCSP specific pressure oscillation compared to knock (left) and corresponding raw and filtered pressure traces of striking cycles at medium load for spark plug and PCSP (right)

Fig.13 Knock Oscillation by Jet from Pre-Chamber

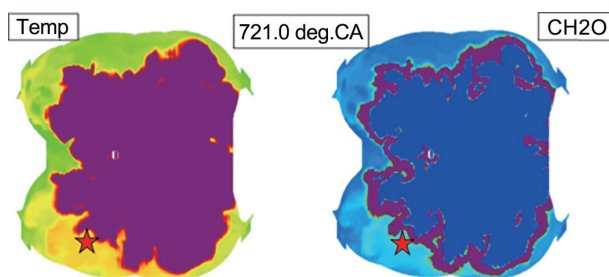


Fig.14 Monitoring Point

図15に、前述の点火時期に強制的に温度・圧力を1.1倍したケースも含めて、筒内圧力、温度、CH2O濃度のオクタン価比較を示す。赤星印のように、温度・圧力を1.1倍したケースでのノック振幅立ち上がりタイミングを仮置きすると、その時の温度は885Kであり、その温度であれば、オクタン価の違いに依らず、CH2O濃度は3.5E-5と同一であるが、図12の考察同様、明確な屈曲点は認められず、定量的な値でノック立ち上がり位置を判断せざるを得ない。なお、中間生成物として、他に、

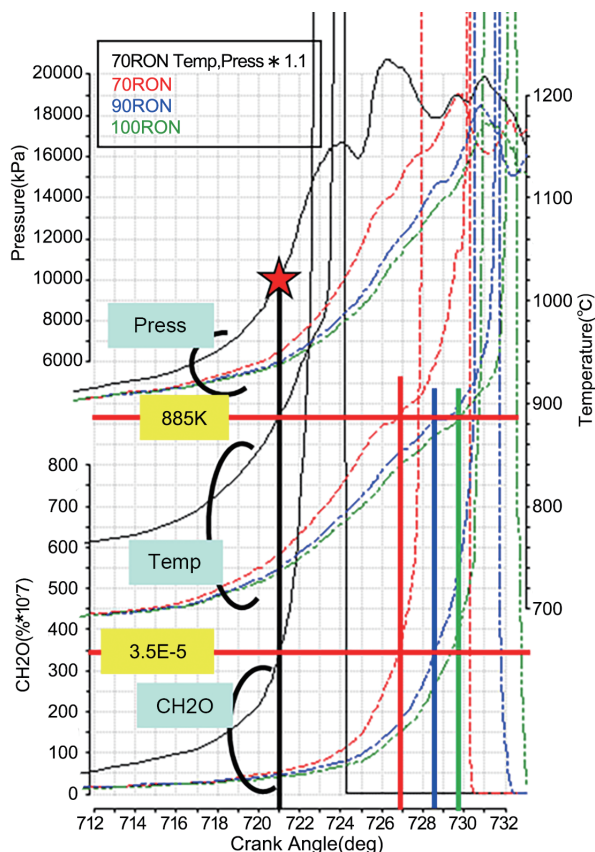


Fig.15 Octane Number Comparison

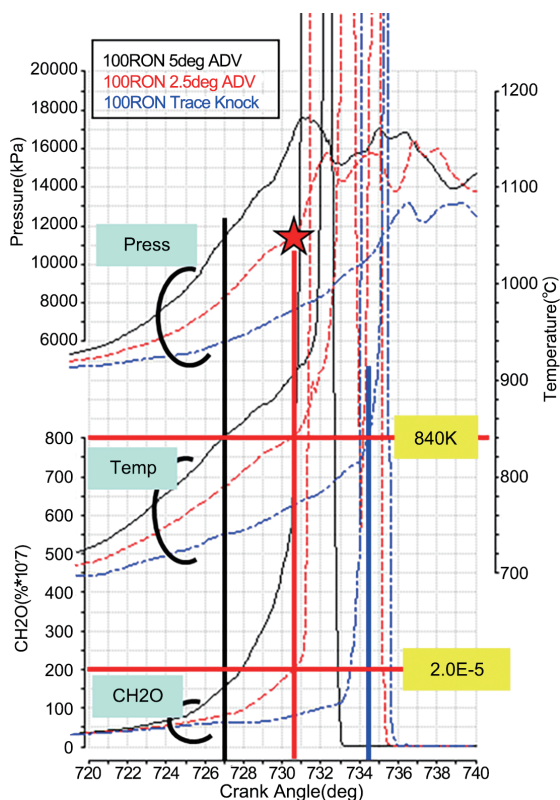


Fig.16 Ignition Timing Comparison

C₂H₂, H₂O₂, OHの挙動も確認しているが、同様に屈曲点は認められないため、今後はCH₂Oを代表させる。

次に100RONでの点火時期比較を図16に示すが、ノック振幅立ち上がりが明確な2.5deg進角から同様の作業を進めると、その時の温度は840Kに低下し、CH₂O濃度も2.0E-5までに低下することから、CH₂O濃度絶対値では、ノック立ち上がり指標にはならない。

3-4. 筒内A/F分布および温度の影響

次に、なぜ排気リア側でノックの起源となる冷炎反応が起きるのか、解析を行った。

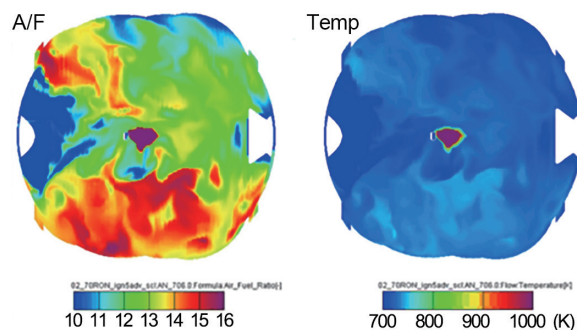


Fig.17 A/F and Temperature before Ignition Timing

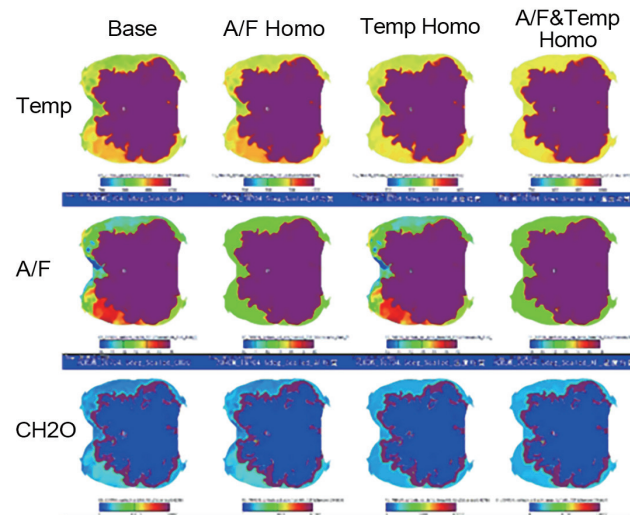


Fig.18 Effect of A/F and Temperature Homogeneity

図17に点火前におけるA/F分布と温度分布を示す。フロント側に対しリア側は、概して約 Δ A/F=2リーンに、または数十℃高くなっている。それぞれの分布の模様、グラデーションは一致しており、燃料濃度不均質による気化熱違いにより、温度分布違いが生じていると思われる。よって、これらの影響を分離するために、点火時期から強制的に筒内全体を、①A/F均質化 ②温度均質化 ③A/Fと温度両方を均質化した計算を行なった。721.0degCAにおけるそれらの結果比較を図

18に示す。

- ① A/F 均質化の影響：排気リア側は、CH₂O 増加が見られる。これは、出力 A/F に近づき、燃焼が速くなったことによるものと思われる。
- ② 温度均質化の影響：排気フロント側は、温度上昇し、CH₂O 増加し、リア側は逆に温度低下し、CH₂O 減少。
- ③ A/F と温度両方を均質化した影響：排気リア側では、出力 A/F 化よりも、温度低下の影響が勝り、CH₂O 減少。

よって③より、A/F と温度両方の均質化により、ノックを抑制できる可能性があることがわかった。

4 まとめ

本研究では、LES詳細化学反応計算にて、高回転高負荷での計算を実施し、ノック発生箇所とタイミングの解明を試みた。

- (1) TABKINTM/FGMにて、高回転ノックは計算できており、ノック解析に有効である。
- (2) 低回転と高回転とのノックのメカニズムは異なり、今回の高回転での計算では、未燃部の自着火はなく、冷炎発生が、ノック振幅の基点になっていると考える。
- (3) ただし、ノック基点、発生タイミングについては、筒内の温度、中間生成物等生成挙動に、明確な屈曲点が無く、現状は、適切な閾値で判定せざるを得ない。
- (4) さらなる筒内A/F分布の均質化が、ノック抑制につながる可能性がある。

■謝辞

本計算では、エイヴィエルジャパンのスタッフに多大なるご協力をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

■参考文献

- [1]田中 大二郎 ほか：吸排気バルブ表面を含むイオンプローブによる筒内噴射ガソリンエンジンにおける火炎伝播計測とノッキング挙動解析，自動車技術会 春季大会学術講演会前刷集，20075024 (2007)
- [2]Y.Suzuki et al.: S.I. engine combustion flame propagation measurement and knocking analysis by ion current probes including moving intake and exhaust valve faces, SAE 2007-01-1420 (2007)
- [3]M.Kowada et al.: Study of Knocking Damage Indexing Based on Optical Measurement, SAE 2015-01-0762 (2015)

[4]H.Ando et al.: Heat Release Rate and Cylinder Gas Pressure Oscillation in Low and High-Speed Knock, SAE 2015-01-1880 (2015)

[5]松浦 勝也 ほか：局所熱伝達促進によるノック限界改善手法の提案、自動車技術会 秋季大会学術講演会前刷集，20166141 (2016)

[6]M.Sens et al.: Pre-Chamber Ignition and Promising Complementary Technologies, 27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2018 p.32 fig.31(2018)

■著者



田中 大二郎

Daijiro Tanaka

マリン事業本部
マリンエンジン統括部
機能開発部



高須 康嗣

Kouji Takasu

AM事業部
AM第1技術部



大村 亮介

Ryosuke Omura

AM事業部
AM第1技術部

高速 PIV 計測および初期火炎伝播可視化による 低負荷運転時における燃焼サイクル変動の解析

Analyses of cycle-to-cycle variation of combustion at low load condition by using
high-speed PIV and direct photographing of early flame propagation

保木本聖 窪山達也 森吉泰生 孕石三太 渡辺敬弘 飯田実

本稿は、一般社団法人 日本機械学会 2018年日本機械学会論文集 84巻865号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。本論文の著作権は一般社団法人 日本機械学会に属し、無断複製・転載を禁じます。

Abstract

Cycle-to-cycle variation (CCV) of combustion is an important issue because it affects emissions and drivability. Improvement of CCV of combustion has been carried out using electronic controls (e.g. ignition timing, fuel injection and variable valve timing) in motor vehicle's engines. However, electronic devices are hardly used for motorcycle's engines because of limited space and cost. Therefore, the engine performance itself must be improved to reduce CCV of combustion in motorcycle. Though CCV of combustion is caused by CCV of in-cylinder flow pattern, fuel distribution, temperature and residual gas, and ignition energy, it is difficult to measure and analyze these factors. In this study, the simultaneous measurement of high-speed PIV and direct photographing of flame propagation was carried out. CCV of in-cylinder flow was evaluated as temporally-averaged flow that was obtained by instantaneous flow using low-pass filtering and cut-off frequency. As a result, in-cylinder temporally-averaged flow pattern fluctuated between individual cycles. Especially, the flow pattern on the surface of piston at BDC was different between the highest and the lowest cycle in IMEP. This difference is considered to be due to the location offset of tumble flow. Also the fluctuation of turbulence kinetic energy (*TKE*) is caused by tumble flow offset. *TKE* distribution near the spark plug at ignition timing affected the direction and speed of flame propagation.

1 諸言

内燃機関の熱効率の向上に関し、これまで多くの研究・開発が成されてきた。特に、四輪車のエンジンの場合、多くの複雑な電子制御を採用し、運転条件に合わせた点火系、燃料系、そして可変バルブ機構を用いた動弁系の最適化を行うことで、各運転負荷における熱効率の改善を図っている。しかしながら、二輪車のエンジンの場合、搭載スペースとコストの都合上、四輪車のように大規模な電子制御を搭載することはほとんどなく、決められた条件の中で幅広い負荷条件の運転を行わなければならない。特に、スポーツ性を商品とした二輪車の場合、高負荷・高回転の条件でより出力を出せるように最適化されているため、バルブオーバーラップも広く取られている。前述した通り、可変バルブ機構は二輪車に搭載されることは殆どないため、広いバルブオーバーラップで固定されたまま、低負荷時のアイドルも行わなければならない。厳しいエンジン諸元での運転が求められる。また、アイドル時の点火時期は、最適点火時期であるMBT (Minimum advance for the Best Torque) よりも大きくリタードした時期に固定されることが多く、その結果、低負荷運転時に大きな燃焼サイクル変動を引き起こす。

燃焼サイクル変動は、サイクル毎の仕事(net IMEP)が変動することで、出力の変動を生じ、ドライバビリティを悪化させる。また、失火を伴うようなサイクル変動では、失火したサイクルで未燃HCを多量に排出するため、特に問題視されている。燃焼サイクル変動は、点火時における筒内の様々な要素が相互作用し引き起こされ、その要因の代表例として、筒内流動、筒内燃料濃度分布、筒内温度分布、残留ガス分布、そして点火エネルギーなどが挙げられる。これらの要因がサイクル毎に変動することで点火時期における点火栓近傍の雰囲気変動し、初期火炎成長の変動が誘発され、結果的にnet IMEPの変動が起こる。

サイクル変動を可視化実験から解析した研究例、特に筒内流動を解析した研究例は多い。Müllerらはモータリング条件におけるタンブル渦構造のサイクル変動に着目し、タンブル渦中心位置が水平方向に大きく変動し、タンブル渦構造の違いから運動エネルギーおよび乱流運動エネルギー履歴が大きく変動することを確認した(Müller et al., 2010)。また、筆者らもモータリング条件において低負荷条件ほど、吸気流れのサイクル変動率が大きくなることを確認した(保木本他, 2016)。また、吸気ポートに隔壁を設けタンブル流を強化した場合、サイクル変動が抑制されることも確認されている(ショールズ他,

2005)。筒内流動のサイクル変動は、噴霧形状にも影響を及ぼし、Zengらは、直噴(DI)ガソリンエンジンにおいて燃料噴射前の筒内流動のサイクル変動により、噴霧形状が変化することを実験的に求めた(Zeng et al., 2014)。

ファイヤリング条件での解析例として、Fontanesiらは、高回転・全負荷条件において点火プラグの接地電極の向きが局所流動と火炎伝播形態のサイクル変動に及ぼす影響をLES (Large eddy simulation)により解析した(Fontanesi et al., 2015)。実験的検討例として、DIガソリンエンジンにおいて局所流動と燃料濃度分布のサイクル変動を燃焼・可視化同時計測した例や、点火エネルギーと初期火炎成長を評価した例がある。(Peterson et al., 2011, Peterson et al., 2014)。

以上より多くのサイクル変動解析例はあるものの、スロットルを閉じた低負荷ファイヤリング条件での解析例や、DI条件に比べ燃料濃度斑が生じにくいポート噴射(PFI)条件での研究例はほとんどない。そこで本研究ではPFI可視化単気筒エンジンを用い、低負荷燃焼条件における高速PIV(粒子画像流速)計測と火炎伝播の直接撮影の同時計測を行い、サイクル毎の燃焼データと比較することで、燃焼サイクル変動を引き起こす要因について調べた。

2 実験装置および実験方法

2-1. 可視化単気筒エンジン

図1に本研究で使用した可視化単気筒エンジン(小山ガレージ製)を示す。本可視化エンジンは、ペントルーフ部およびシリンダライナに石英ガラスを使用しており、前面から筒内全域を可視化することが出来る。また、ピストン冠面中央部に $\phi 40\text{mm}$ の石英ガラス窓を装着した延長ピストンを用いることで、ピストンボトムからミラーを介し、筒内の可視化および外部からの光源の照射が可能である。

表1に本可視化エンジンの諸元を示す。可視化エンジンのヘッドは、量産四輪車の2L、4気筒エンジンヘッドの1気筒を使用しており、排気量は 500cm^3 である。ボア・ストロークは $86 \times 86\text{mm}$ のスクエアで圧縮比は9.2である。また本可視化エンジンの吸排気バルブ位相は、可変プーリにより任意に設定することができる。緒言において二輪車はバルブオーバーラップが広いと述べたが、今回は基礎研究としてバルブオーバーラップがゼロになるようにバルブ位相を設定し、各バルブ開閉タイミングは表2に示す通りとした。また、燃料噴射方式としてPFI、DIのどちらも可能なエンジンであるが、本研究では二輪車のエンジンを対象としているため、PFI条件により実験を行った。

筒内圧力はヘッドに設置したピエゾ式の圧力センサ(Kistler, 6052C)を用い、吸排気圧は吸気管および排気管にそれぞれ設置した絶対圧センサ(Kistler, 4005B, 4007C)を用い、高速データロガ(YOKOGAWA, DL750)により1deg. 間隔で計測した。また、ピエゾ式圧力センサの絶対圧補正では、吸気バルブが十分開いた時期390 ~ 570deg. ATDCにおいて、吸気圧センサで計測した値(絶対圧)と等しくなるように補正した。

空燃比A/Fは排気管に設置したA/Fセンサ(NGK, ZFAS-U1)を用い、吸排気温度はK型シース熱電対を用い、低速データロガ(OMRON, ZR-45)により200ms間隔で計測した。

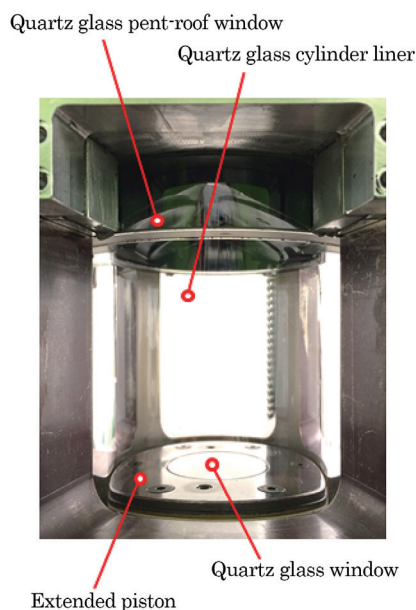
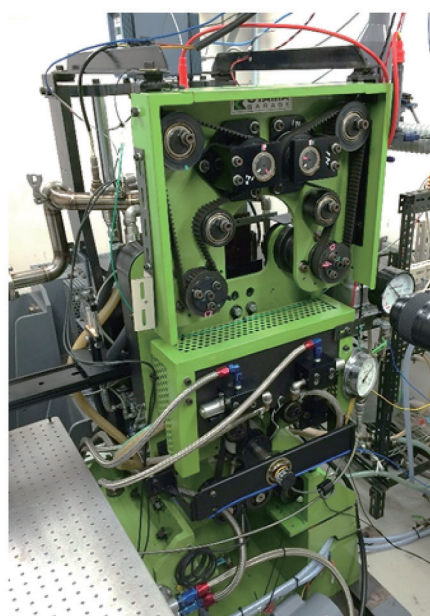


Fig.1 Optical single-cylinder engine

Table 1 Specifications of optical engine

Displaced volume	[cm ³]	500
Stroke	[mm]	86
Bore	[mm]	86
Connecting rod length	[mm]	139
Compression ratio	[-]	9.2
Number of valves		4
Intake valve opening (IVO)	[deg.ATDC]	360
Intake valve closing (IVC)	[deg.ATDC]	600
Exhaust valve opening (EVO)	[deg.ATDC]	130
Exhaust valve closing (EVC)	[deg.ATDC]	360
Injection type		PFI
Material of cylinder liner		Quartz glass

2-2. 光学系

図2に光学系の概略図を示す。本光学系は、TR-PIV(Time resolved - PIV)による時系列筒内流動計測とPLIF(Planar Laser Induced Fluorescence)による筒内燃料濃度分布計測の同時計測を行うために組まれている。ただし本論文ではPLIFについては述べず、PLIFの代わりに火炎伝播の直接撮影を行った。PIVの光源は、波長527nm、最大発振周波数10 kHzのダブルパルスNd:YLFレーザ(New wave research、Pegasus PIV)を使用した。YLFのビームは532nm用ミラーにより90度反射した後、266nm用のミラー(シグマ光機、TFMHP-50C08-266、HR 266nm : 98%)を透過させた。この266 nmのミラーはPLIFに用いる波長266nmのNd:YAGレーザ(New wave research、SOLO120)を反射させるためのミラーで、このミラーにより異なる波長の二つのレーザ光を同じ光路へと導いた。今回はPIV用のYLFレーザしか使用しないため、このミラーはビームを透過させる役割しかない。レーザビームは二つのシリンドリカルレンズ(シグマ光機)によりシート光を形成すると共に、幅と厚みを調整し、ピストン下にあるミラーを介し筒内へと照射した。なお、本光学系では平行シート光には形成しておらず、筒内下から上に向けてわずかに末広りの形状とした。

トレーサ粒子は、粒径およそ2 μ mのSiO₂中空多孔質粒子(鈴木油脂工業、ゴッドボールB-6C)を用い、粒子を封入したタンク内に圧縮空気を通過させることにより気流に乗せ、スロットル上流へと供給した。筒内への導入はスロットルを介し吸入空気と共に吸気させた。この際、トレーサ粒子の周波数応答性は、サンプリング周波数3kHzに対し99.3%と非常に高く、流れの追従性は十分である(可視化情報学会、2013)。レーザ照射により得られるMie散乱光(527nm)はダイクロイックミラー(IRIDIAN、495DPS、HR > 500nm : 99%、HT400 -

500nm : 96.3%)により反射させ、マクロレンズ(Nikon、Ai AF Micro Nikkor 105mm F2.8D)を装着した高速度CMOSモノクロカメラ(Photron、SA-X2)により撮影した。

撮影した粒子画像はPIV解析ソフトウェア(DANTEC、Dynamic studio 2015a)によりベクトルマップへと処理した。本ソフトウェアでは、FFT相互相関法による解析を行うが、本研究では、8×8pix、16×16pix、32×32pixと探索領域を3段階に変化させながら50%オーバーラップにより相関を取った。また、エラーベクトルは3×3vectorsの窓によるメディアンフィルタを用い除去した。ここまでで得られたベクトルマップは、オープンソースの数値計算ソフトウェア(Scilab Enterprises、scilab 5.5.2)を用いた自作プログラムにより、アンサンブル平均、時間平均などの処理を行い、ポスト処理としてベクトルマップやコンター図の再作成ではグラフ作成ソフトウェア(i-WORKS、Graph R plus ver. 1.58)を用いた。

火炎伝播の直接撮影では、ダイクロイックミラーを透過する青色の可視光(400 ~ 500nm)をマクロレンズ(Nikon、Ai AF Micro Nikkor 105mm F2.8D)を装着した高速度CMOSカラーカメラ(Photron SA-X-CV)により撮影した。なお、ダイクロイックミラー前方にロングパスフィルタ(シグマ光機、SCF-50S-37L、TR > 370nm : 90%)があるが、これもPLIF計測の際にレーザ波長(266 nm成分)を除去するためのものであり、今回の結果に大きな影響はない。

表2に詳細な撮影条件を示す。TR-PIVのレーザシート厚みの設定は、厚みに対し直交する流速が1/4以下が望ましいというクォータールールに基づき1mmに設定した(Keane and Adrian、1991)。Nd:YLFレーザは、クランクシャフトに接続したロータリーエンコーダ(OMRON、E6B2-CWZ3E)からの360 deg.信号を基に、分周回路やパルスジェネレータ(nf、WAVE FACTORY WF1946)を介して発振トリガを生成し、そのトリガを用い発振させた。そのためエンジン回転との同期が行える。PIV撮影時期は、吸気行程始めの358deg.ATDC (After Top Dead Center)から点火時期1deg.前の714 deg. ATDCとし、2deg間隔で計測を行った。ここで、PIVの微小二時画面像の相関を取る際に、粒子移動距離は5 ~ 10 pix.が最適であると言われている(可視化情報学会、2015)が、筒内流動の平均流速は吸気行程と圧縮行程で10倍ほどの差が生じる。そのため、全行程を一定の微小間隔 Δt で撮影した場合、計測精度が低下する。そこで本研究では、吸気行程は $\Delta t = 25 \mu$ s、圧縮行程は $\Delta t = 50 \mu$ sと吸気終わりBDC(Bottom Dead Center)で Δt を切り替えることで、データ精度の向上を図った。 Δt を切り替えても高速度カメラのフレームレートは同一とし、フレームストラドリング(フレームまたぎ)撮影を行った。

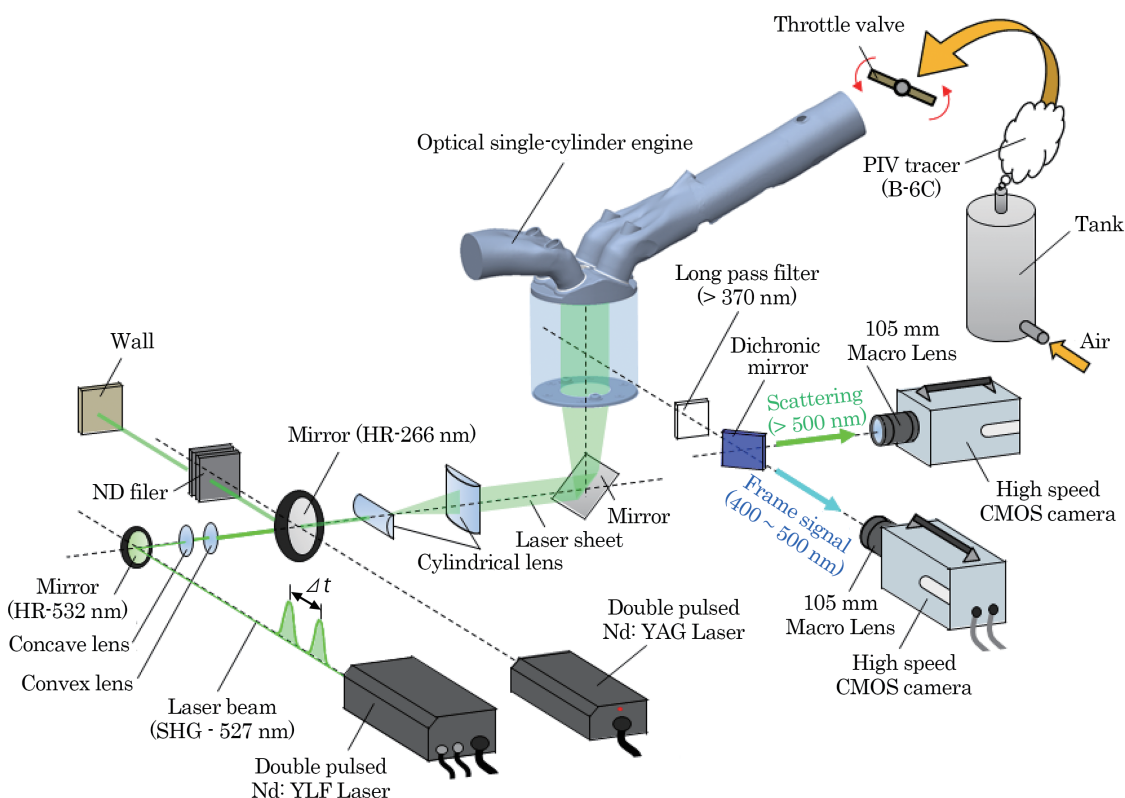


Fig.2 Schematic drawing of the optical setup

Table 2 Specifications of optical setup

	PIV	Direct photo-graphing
Laser type	Doubled Nd:YLF	none
Wave length [nm]	527 (SHG)	400 ~ 500
Sheet thickness [mm]	1	none
Shot timings [deg.ATDC]	358 ~ 714	-27 ~ 153
Time resolution in C.A. [deg.]	2.0 (3 kHz)	1.0 (6 kHz)
Δt between two laser shots (for TR-PIV) [μ s]	25@Intake stroke 50@Comp. stroke	none
Frame rate [fps]	20000	6000
Shutter speed [1/s]	20416	6102
Spatial resolution [Pix.]	672 x 1024 (0.8 mm/vector)	1024 x 1024 (7.5 pix./mm)
Measured cycles [cycles]	45	45

火炎伝播の直接撮影では、点火信号をトリガとし、点火時期の22deg.前から撮影を行い、1deg.間隔で1サイクル当たり180フレーム取得した。なお前述した通り、カラーカメラにより撮影を行ったが、ダイクロイックミラーを透過した光は、青色の可視光のみであるため、青炎と輝炎の切り分けを行うことは出来ない。

図3にPIVの計測範囲および火炎伝播の解析範囲を示す。PIVの計測断面位置はボア中心とし、本可視化エンジンでは $\phi 40$ mmの石英ガラス窓を装着した延長ピストンを使用しているため、計測範囲幅はボア86mmに対しおよそ半分の40mmである。また、火炎伝播の評価では初期火炎成長に着目したため、計測範囲は図中の破線四角で囲った範囲とした。

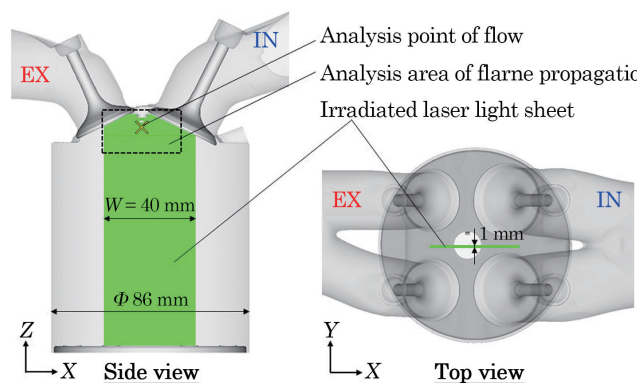


Fig.3 Measurement area of TR-PIV and analysis area of flame propagation

3 実験条件

本研究では、二つの低負荷燃焼条件を対象とした解析を行った。表3に実験条件を示す。機関回転数は1000rpm、冷却水の入口温度は70deg.Cとし、A/Fセンサにより計測した排気当量比は1のストイキ条件、点火時期は二輪車のアイドリングを想定し -5deg.ATDCとし、点火コイルへのチャージ時間は3.0 msとした。燃料噴射時期は、できるだけ燃料濃度分布を均一に近い状態で燃焼させるため、燃料噴射開始時期180 deg.ATDCの排気行程噴射を行い、燃圧は350kPa(abs.)で一定とした。ここまでの条件を一定とし、以下二つの負荷条件の運転を行った。負荷はnet IMEP(ポンプ損失を含んだ図示平均有効圧力)で140kPaと350kPaの二条件で、負荷の調整はスロットル開度による吸入空気量と、それに合わせてストイキになるような燃料噴射期間の調整により行った。燃料はどちらの条件もiso-octaneを用いた。

本可視化エンジンは、シリンダが石英ガラス製のため、長時間の連続ファイヤリングを行うことはできない。そこで、ガラス保護のためファイヤリングを開始してからおよそ30秒を暖機時間とし、そこから連続45サイクルを計測した。なお、連続45サイクルはPIVに用いた高速度カメラの搭載メモリの都合上、2deg.間隔で吸気～圧縮行程を撮影した際に、一度に収録できるサイクルの数である。

Table 3 Experimental conditions

Engine speed	[rpm]	1000
Water temperature (inlet)	[deg.C]	70
Equivalence ratio	[-]	1.0
Ignition timing	[deg.ATDC]	-5.0
Ignition dwell	[ms]	3.0
Start timing of fuel injection θ_{SOI}	[deg.ATDC]	180 (Exhaust stroke)
Fuel pressure (abs.)	[kPa]	350
Load (net IMEP)	[kPa]	140 350
Injection duration	[ms]	2.89 4.12
Fuel		iso-octane
Warm up time	[sec]	30
Number of measurement cycles	[cycles]	45

4 サイクル変動を含んだ平均流成分の抽出

筒内流動のサイクル変動を評価するため、サイクルごとの瞬時流を、サイクル変動を含んだ平均流成分と乱流成分に切り分け、平均流の変動で評価しなければならない。ある時刻、ある点における瞬時流速 u は式(1)および式(2)で定義される。

二つの式より、瞬時流速 u は、アンサンブル平均流速 $\bar{u}$ と乱れ u' 、または時間平均流速 $\bar{u}$ 、乱れ u' 、そしてサイクル変動流速 u_c で表すことが出来る。そのため、サイクル変動がない流れ場、つまり式(2)の u_c がゼロの場合、式(1)および式(2)から式(3)が得られ、エルゴードの仮説が成り立つ。

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (1)$$

$$u_i = \langle u \rangle_i + u'_i + u_{ci} \quad (2)$$

$$\bar{u} = \langle u \rangle \quad (3)$$

瞬時流の平均流成分と乱流成分の切り分けには、空間平均法と時間平均法が用いられる。空間平均法では、主に任意空間サイズを用いたガウシアンフィルタやローパスフィルタが用いられる(Reuss et al., 2000)。しかしながら、空間サイズに任意性があることと、空間平均流速 $\bar{u}$ は瞬時流速を表す式には含まれない。そのため、空間平均法は定義上、LES(Large-eddy simulation)計算結果との比較には適しているが、時間的変動を有するサイクル変動の評価には使えない。

時間平均を用いた方法は、かつてはLDV(レーザドップラ流速計)により任意定点の流速を高周波サンプリングし周波数解析することで、平均流と乱流を切り分けるカットオフ周波数を決定していた(神本他, 1987)。現在ではレーザやカメラの性能向上に伴い、PIVでも高速サンプリングが可能となったため、PIVのデータでもLDVのように同様の解析を行うことができる(大倉他, 2013)。著者らもこれまでにカットオフ周波数を用いたローパスフィルタリングにより、サイクル変動を含んだ平均流成分の抽出を行ってきた(Hokimoto et al., 2017)。本論文でも時間平均法によるサイクル変動成分を含んだ平均流の抽出を行った。

カットオフ周波数の決定に際し、実験から得られたベクトルマップの任意定点における流速強度の時間履歴を用いFFT(高速フーリエ変換)による周波数解析を行った。図4に図3内×印で示した定点から取得した流速強度の周波数パワースペクトルを示す。図4上段は定点における流速強度の時間履歴で、横軸にクランク角、縦軸に流速強度を示す。下段は流速強度履歴をFFTし得られたパワースペクトルで、横軸に周波数、縦軸にパワーを示す。本計測のサンプリング周波数は3 kHzであるため、ナイキスト周波数は1.5kHzである。なお、図中灰色線は各45サイクルの瞬時流で、赤線に45サイクル・アンサンブル平均流の結果を示す。図4(a)にnet IMEP = 140 kPa条件、図4(b)にnet IMEP = 350kPa条件の結果を示す。

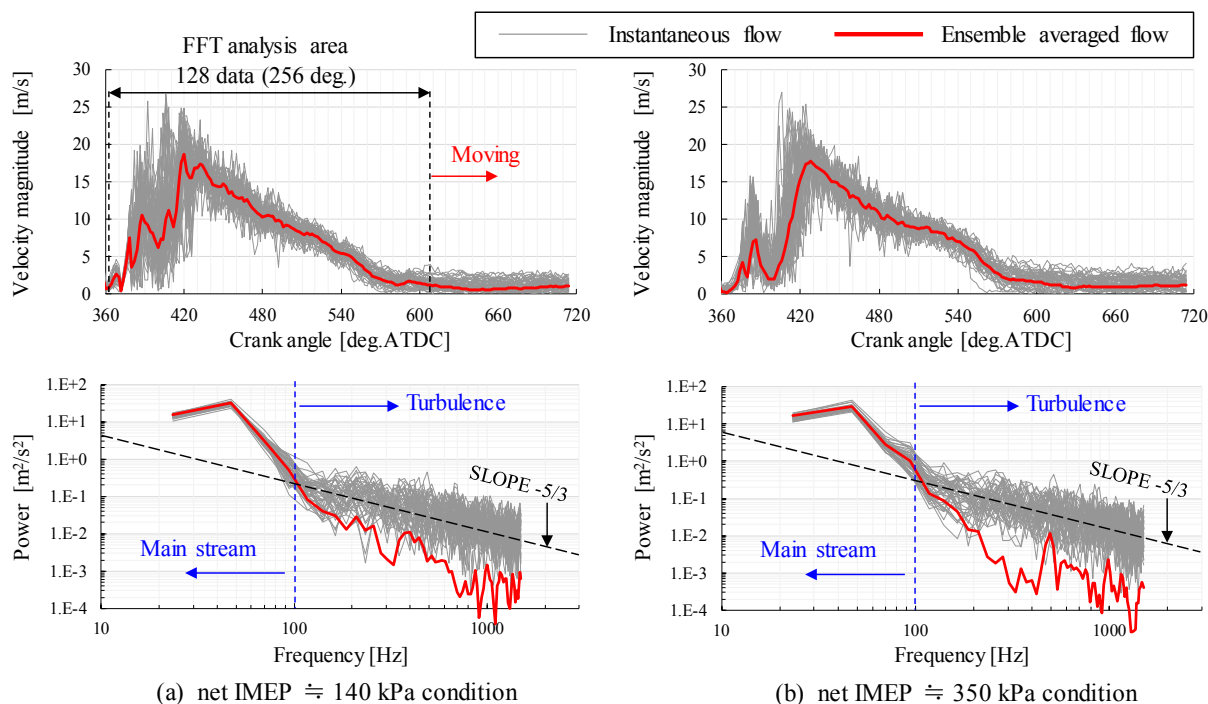


Fig.4 Results of flow analysis. Time series data of the velocity magnitude at fixed point are shown in upper figure. Power spectrum of velocity magnitude are shown in lower figure. Instantaneous flows have high frequency component, compared with ensemble averaged flow. It can be considered that this high frequency components are turbulence.

本計測で取得できるPIVのデータ点数は、最大179データ(358deg.)であるが、FFTの処理の都合上、2の累乗個のデータを扱わなければならない。そこで上段に示した流速強度履歴に、黒矢印で示すように128データ(256deg.)の解析期間を設けた。そこでのパワースペクトルを算出した後、解析期間を固定したまま、位相を1deg.ずつ遅角させ、計51個(179 - 128data)のパワースペクトルをアンサンブル平均した。また、FFTを掛ける際に窓関数としてハニング窓(Hanning window)を使用した。

下段に示すパワースペクトルを見ると、低周波数域から $f = 100\text{Hz}$ 付近までは瞬時流とアンサンブル平均流は近いパワーとなる。 $f = 100\text{Hz}$ 付近から高周波数域にかけては、アンサンブル平均流に比べ、明らかに瞬時流は高いパワーとなる。この瞬時流の高周波数成分は乱れによるものであり、この結果より、本解析で時間平均に用いるカットオフ周波数は $f_c = 100\text{Hz}$ と定義した。

5 実験結果および考察

5-1. 燃焼解析結果

可視化と同時計測した連続45サイクルの燃焼圧解析結果を図5および図6に示す。図5横軸にクランク角を示し、上段縦軸に筒内圧力、下段縦軸に見かけの熱発生率を示す。図5(a)にnet IMEP $\approx$ 140kPa条件、図5(b)にnet IMEP $\approx$ 350 kPa条件の結果を示す。図中、灰色細線に各45サイクル、赤線に45サイクル中で仕事(net IMEP)が最大となったサイクル、青線に最小仕事となったサイクル、緑線に45サイクル・アンサンブル平均の結果を示す。

図5(a)、(b)上段の筒内圧力履歴より、点火時期は-5deg. ATDCで固定しているため、着火遅れ期間である10deg.ATDC付近までは同じ値となるが、燃焼圧による圧力の立ち上がり後は、サイクル毎に大きなばらつきが生じていることがわかる。45サイクル中の燃焼変動率COV(Coefficient of Variation)は、net IMEP $\approx$ 140kPa条件で7.91%、net IMEP $\approx$ 350 kPa条件で3.35%と、2倍以上の差となった。

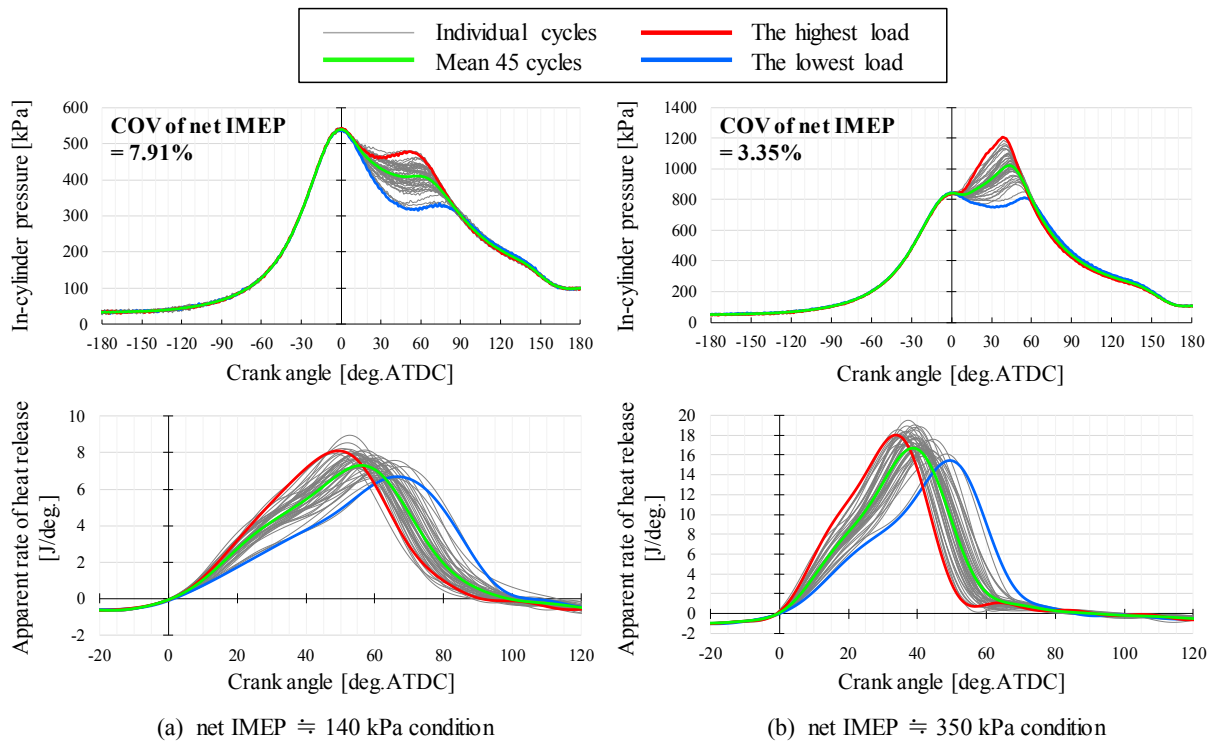


Fig.5 In-cylinder pressure and rate of heat release in the cases of net IMEP $\approx$ 140 and 350kPa condition. A big difference appears in the cylinder pressure between highest and lowest load cycle. Also heat release rate in the case of highest load cycle raises from an early period, compared with in the lowest load.

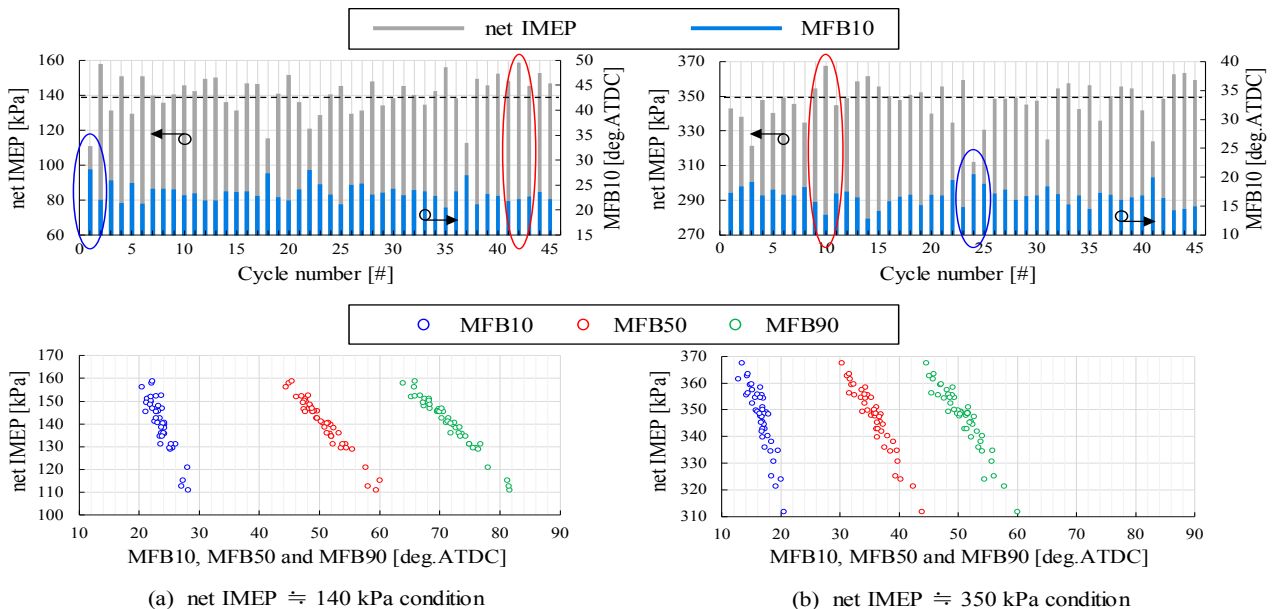


Fig.6 Results of combustion analysis in the two load conditions. As basic trend, net IMEP drops when MFB10 retards. The difference of net IMEP from the average in the lower load cycle is larger than that in higher load cycle. Relationships between net IMEP and MFB10, MFB50 and MFB90 are obtained linear.

図5(a)、(b)下段に示す見かけの熱発生率は、筒内圧力から算出した値で熱損失を含んだ結果である。そのためTDC(Top Dead Center)前の燃焼開始前では、熱損失の影響により値がマイナスとなる。最大仕事となった赤線と最小仕事となった青線を比較すると、TDC付近の燃焼初期の段階から差が生じ、燃焼が進むにつれその差が拡大し、最大熱発生時期も最小仕事のサイクルが最も遅れるという傾向となった。

次に、サイクル毎の燃焼解析結果を図6に示す。図6上段は、横軸にサイクル番号、左縦軸にnet IMEP、右縦軸にMFB10を示す。図中青の棒グラフにnet IMEP、灰色の棒グラフにMFB10を示す。なおMFB10は、熱発生率の積分値が最大値の10%に達したクランク角(Mass fraction burnt 10%)と定義した。図6(a)および図6(b)より、どちらの負荷条件においても、net IMEPが大きく低下するサイクルではMFB10も遅角する傾向にあることがわかる。また黒破線で示す45サイクル平均のnet IMEPに対し、net IMEPが増加するサイクルに比べ、低下するサイクルの方が平均からの差分が大きくなる傾向が見られる。

図6下段は、横軸にMFB10、MFB50、そしてMFB90、縦軸にnet IMEPを示す。プロットはそれぞれ45サイクルの結果であり、プロット色で各燃焼位相を示した。図より、どちらの負荷

条件においても各燃焼位相とnet IMEPはリニアな関係性となり、各位相が遅れるほど、net IMEPは低下する傾向が得られた。

火花点火機関では、基本的にMBTよりも燃焼重心が遅角している場合、燃焼位相が遅角するほどnet IMEPは増加する。MBTは概ねMFB50 $\approx$ 8deg.ATDCであり、本計測結果の場合、MFB50はMBTから遥かに遅角しているため、燃焼位相が遅角するサイクルほどnet IMEPは増加する。

以上の燃焼解析結果より、燃焼変動(net IMEPの変動)は、燃焼位相の変動が大きく影響し、各燃焼位相とnet IMEPの関係はリニアな関係であることから、MFB10の変動、つまり初期燃焼の変動が支配的であることがわかった。そこで次の可視化試験では、図6上段に示した赤丸および青丸で囲んだ最大仕事サイクルおよび最小仕事サイクルに着目し、初期火炎伝播や点火時期までの筒内流動についての解析を行った。

5-2. 初期火炎成長のサイクル変動

初期燃焼のサイクル変動を確認するため、図7に燃焼PIVと同時に計測した火炎の直接撮影画像を示す。ここでは最大および最小仕事サイクルを比較した。図7(a)にnet IMEP $\approx$ 140 kPa条件の最大仕事サイクル、図7(b)に同負荷の最小仕事サ

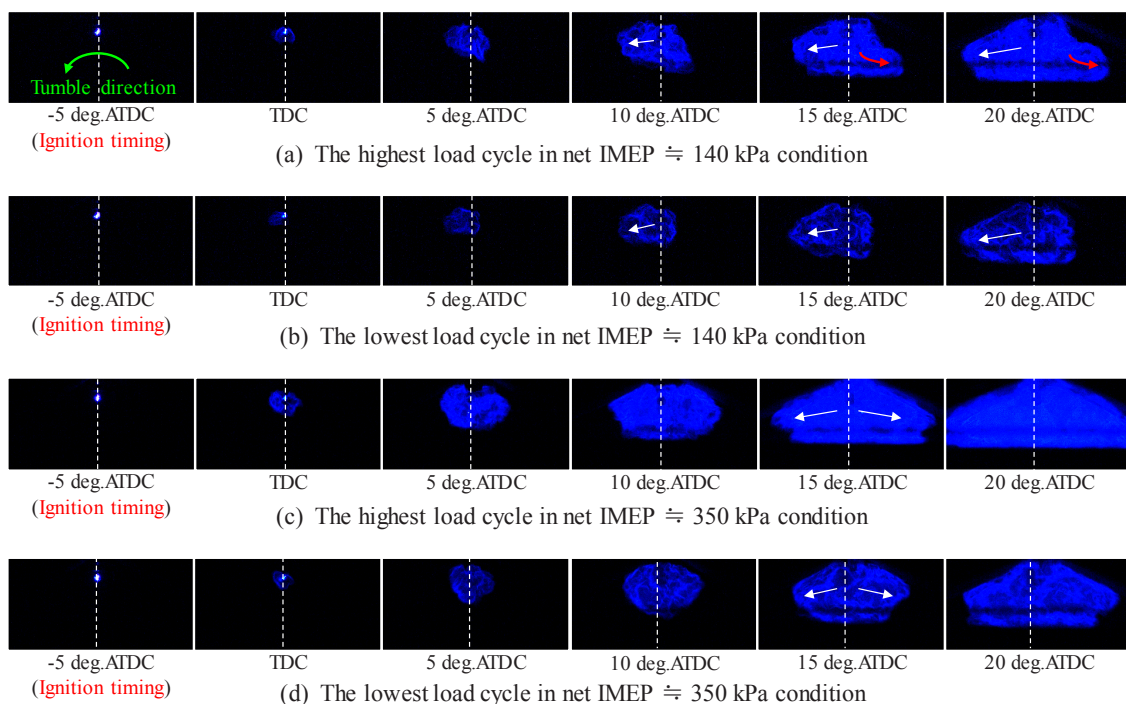


Fig.7 Direct photographs of an early flame propagation. The flame propagates toward tumble direction in the net IMEP $\approx$ 140kPa condition. However, the flame also grows toward counter tumble direction in the highest load cycle.

イクル、図7(c)にnet IMEP $\approx$ 350kPa条件の最大仕事サイクル、図7(d)に同負荷の最小仕事サイクルを示す。代表例として点火時期である-5deg.ATDCから5deg.間隔に6枚表示した。なお、図中白破線は点火プラグ中心軸を示している。

図中に示す緑矢印はタンブル回転方向を示す。図7(a)および図7(b)より、サイクル違いの火炎伝播形態を比較すると、点火からの10deg.ATDC付近までの初期火炎伝播はタンブル流れに乗り、白矢印で示すように反時計方向へと火炎伝播し、時計回り方向へはタンブル流れと対向するため、あまり伝播していない。しかしながら、15deg.ATDC付近から図7(a)の最大仕事サイクルでは、赤矢印で示すように時計回り方向へも火炎伝播し始める。20deg.ATDCの結果では、点火プラグ中心軸から左側の火炎帯の前面投影面積はあまり変わらないが、右側は明らかに図7(a)の方が大きい。この差異により燃焼速度に差が生じ、結果的にnet IMEPが変動したものと考えられる。

一方、図7(c)および図7(d)に示す高負荷条件の結果を見ると、低負荷条件のようにタンブル回転方向へと火炎伝播

するというよりも、点火プラグ軸から左右均等に火炎伝播していることがわかる。最大／最小仕事サイクルの違いとしては、全体的な火炎伝播速度が明らかに最大仕事サイクルの方が速いことで、これが前節でも述べた初期燃焼速度の違いとなり、最終的にnet IMEPの差(変動)となる。

5-3. 筒内平均流のサイクル変動

火炎伝播形態を比較することで、火炎伝播方向および伝播速度違いが明らかとなったが、何が火炎伝播形態に影響を与えるかを次に調べた。図8にnet IMEP $\approx$ 140kPa条件における、最大仕事および最小仕事サイクルの筒内流動ベクトルマップを示す。前述した通り、平均流のサイクル変動を比較するため、図中に示したベクトルマップは、瞬時流をカットオフ周波数 $f_c = 100\text{Hz}$ でローパスフィルタリングした時間平均流である。ベクトルのカラスケールは、吸気行程と圧縮行程で切り替えており、吸気行程中は0 ~ 25m/s、BDC以降の圧縮行程中は0 ~ 7m/sで示した。

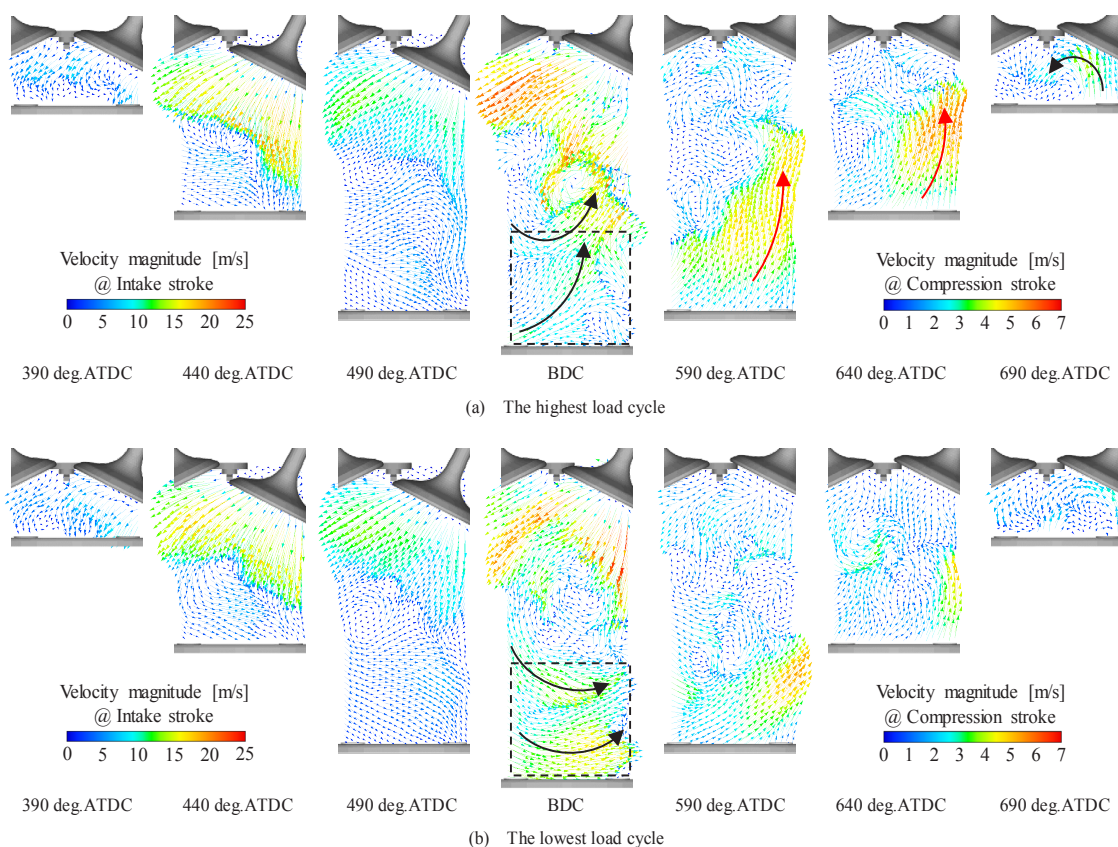


Fig.8 Comparison of the temporally-averaged flow pattern between the highest and the lowest load cycle in the case of net IMEP $\approx$ 140 kPa condition. The wind-up flow from a piston head during compression stroke in the highest load cycle is stronger than that in the lowest load cycle.

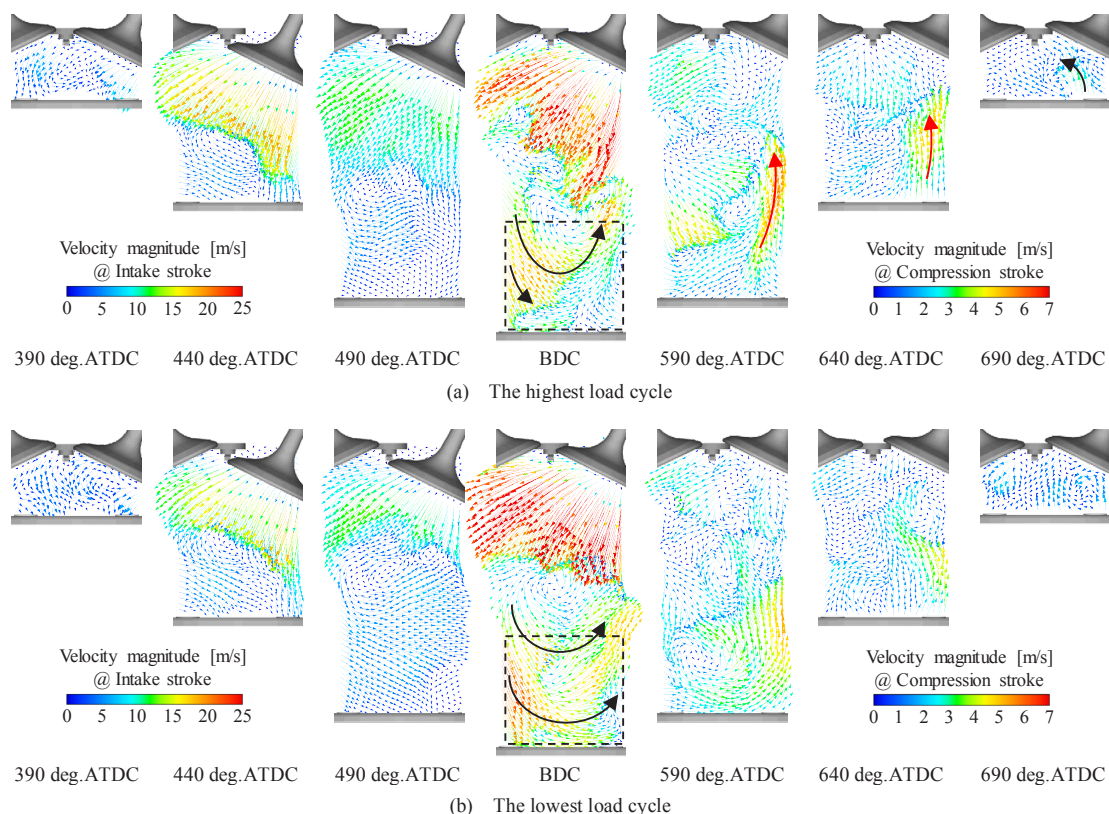


Fig.9 Comparison of the temporally-averaged flow pattern between the highest and the lowest load cycle in the case of net IMEP $\approx$ 350kPa condition. The wind-up flow from a piston head during compression stroke in the highest load cycle is stronger than that in the lowest load cycle.

図8(a)に示す最大仕事サイクルと図8(b)に示す最小仕事サイクルの平均流を比較すると、吸気行程までは大きな差異を確認することができない。BDCの結果を比較すると、ピストン冠面上の流れパターンに大きな差異が生じた。最大仕事サイクルの場合、黒矢印で示すようにピストン冠面からヘッドへ向けた曲率半径の小さい流れが形成されており、最小仕事サイクルでは、ピストン冠面に沿うような流れパターンとなった。また、BDCの破線四角で囲まれた範囲の流速を比較すると、最小仕事の方が流速強度が高くなった。BDC以降の圧縮行程を比較していくと、最大仕事の場合、明らかにピストン冠面からの巻き上げ流れが強いことがわかる。筒内流動の傾向として、吸気行程中に筒内に形成された大規模タンブル渦構造は、ピストン圧縮により崩壊しながら、エネルギーカスケードを通じて小さな渦(乱れ)へエネルギー遷移していくが、690deg.ATDCの結果を見ると、最大仕事の場合は強い平均流の成分が残存していることがわかる。

図9に示す net IMEP $\approx$ 350kPa条件の結果でも、net IMEP $\approx$ 140kPa条件と同様の傾向が得られた。吸気行程では大きな差異は確認できず、BDCのピストン冠面上流れに差異が現れた。この負荷条件でも、最大仕事のサイクルでは、流

れのヘッド面へ向けた曲率半径の小さな流れとなり、最小仕事のサイクルでは冠面に沿うような流速の高い流れパターンとなった。圧縮行程においても低負荷条件と同様に、最大仕事のサイクルで強い巻き上げ流れが確認された。

BDCにおけるピストン冠面上流れに差異が生じた理由として、Müllerらも確認した通り、タンブル渦構造の水平方向へのオフセットが考えられる。図8(a)および図9(a)に示した最大仕事のサイクルでは、ピストン冠面上の流れはヘッド側へ向いており、この流れはタンブル流れの先端部であると考えられる。一方、図8(b)および図9(b)に示した最小仕事サイクルでは、冠面に沿うように右方向に流れており、タンブル流れの先端部を予測すると、計測範囲外の右側(吸気バルブ寄り)に位置していると考えられる。すなわち、最大仕事サイクルではタンブル渦構造は排気バルブ寄りに、最小仕事サイクルでは吸気バルブ寄りにオフセットする。そして最大仕事サイクルの場合、その後の圧縮行程でタンブル流先端であるピストン冠面からの巻き上げ流れが、ボア中心寄りにオフセットし、点火時期前において点火プラグ周辺に流速の高い平均流が位置すると考えられる。

点火時期における点火栓近傍の平均流が強いということは、同時に高い乱れをもたらし、火炎伝播速度を増加させると考えられる。そこで次に筒内の平均流の運動エネルギー、および乱流運動エネルギーについて調べた。

5-4. 平均流の運動エネルギーおよび乱流運動エネルギーのサイクル変動

初期燃焼を促進させる要素として、筒内の乱れが挙げられる。乱れは乱流燃焼速度を増加させ火炎成長を促進する。そこでPIV計測範囲内における時間平均流の運動エネルギーおよび乱流運動エネルギーの空間平均履歴を比較することで、評価を行った。平均流の運動エネルギー KE および乱流運動エネルギー TKE は、それぞれ式(4)および式(5)から算出した。 KE の算出は時間平均流速 $\bar{u}$ のX,Z成分(u , w)を使用した。 TKE は、瞬時流 u とアンサンブル平均流速 $\langle u \rangle$ の差分をとって算出されることがあるが、その場合サイクル変動成分 u_c も含まれてしまう。そこで本研究では式(1)にも示した通り、乱れは瞬時流 u と時間平均流 $\bar{u}$ の差分とし、式(5)のように求めた。これをクランク角ごとにPIVの全計測座標 N で求め、PIV計測範囲全体の空間平均値を算出した。

$$KE = \frac{1}{N_x N_z} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{k=1}^{N_z} \frac{1}{2} \left(\bar{u}_{i,k}^2 + \bar{w}_{i,k}^2 \right) \quad (4)$$

$$TKE = \frac{1}{N_x N_z} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{k=1}^{N_z} \frac{1}{2} \left\{ \left(u_{i,k} - \bar{u}_{i,k} \right)^2 + \left(w_{i,k} - \bar{w}_{i,k} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

図10に各負荷条件におけるBDC以降の圧縮行程中における KE および TKE の空間平均履歴を示す。図10上段に KE 履歴、下段に TKE 履歴を示す。図中灰色線に各45サイクル、赤線に最大仕事サイクル、そして青線に最小仕事サイクルの結果を示す。 KE 履歴より、特に図10(a)に示す低負荷条件において、明らかに最大仕事サイクルの方が圧縮行程中の KE が高くなった。これは点火時期1 deg.前まで持続され、714 deg. ATDCでは最小仕事サイクルに比べおよそ2倍の差となった。図10(b)に示す高負荷条件においても、最大仕事サイクルの方が、わずかに KE が高く遷移する傾向が得られたが、714 deg. ATDCにおいては最小仕事サイクルとほぼ同じとなった。

次に TKE 履歴を見ると、 TKE の全体的な傾向として、BDCから圧縮行程後半にかけて一度増加し660deg. ATDC付近で

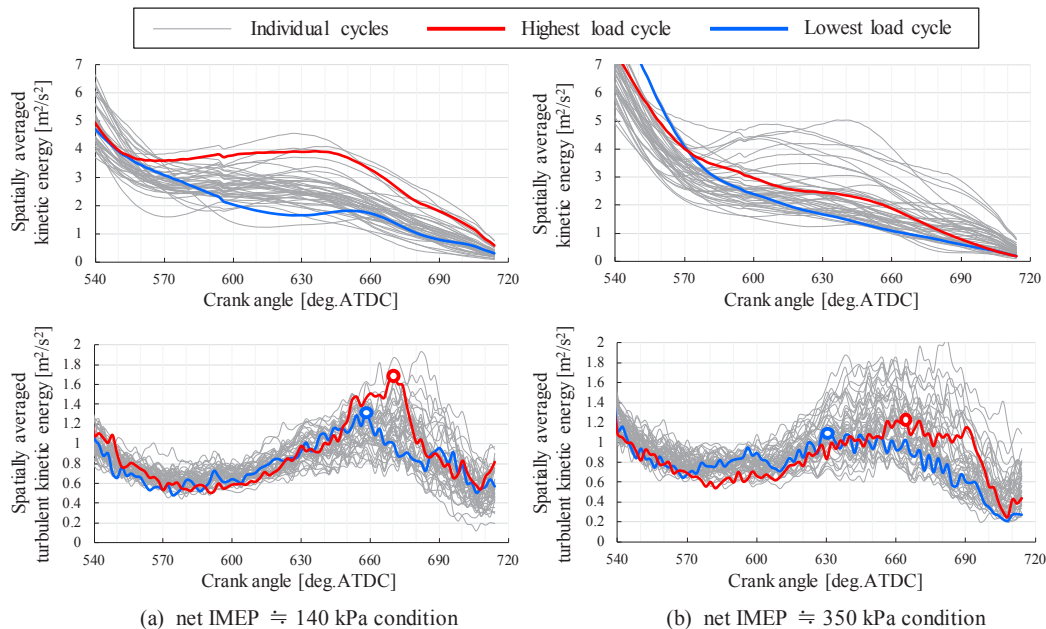


Fig.10 Comparison of spatially averaged kinetic energy and spatially averaged turbulent kinetic energy. KE in the highest load cycle becomes higher than that in the lowest load cycle during compression stroke. Similarly, TKE in the highest load cycle becomes higher in the latter half of compression stroke.

ピークを迎え、その後TDCに向かうにつれ減少していく傾向が得られた。この傾向はMüllerらの研究でも得られている。図10(a)および図10(b)のどちらの負荷条件でも、圧縮行程前半では最大／最小仕事サイクルでTKEに大きな差はないが、圧縮行程後半では、最大仕事サイクルの方がTKEが高くなり、丸プロットで示すピーク位置も遅角していることがわかる。714 deg.ATDCの点火時期1deg.前の結果を見ても、最大仕事サイクルの方が高くなった。

前節で述べた、タンブル渦構造の差異と圧縮行程中のTKE履歴の関係を調査するため、BDCにおける時間平均流パターンと、その後の圧縮行程におけるTKEの履歴を比較した結果を図11に示す。図11(a)および図11(b)で、それぞれの負荷条件の代表例としてnet IMEPが高い、および低いサイクルを二つずつ抽出し、その後のTKEの履歴を比較した。右図に示すTKE履歴は、図10下段に示した結果と同じであるが、その中から高net IMEPサイクルを暖色で、低net IMEPサイクルを寒色で示す。なお、グラフの線色は左図のBDCにおける時間平均

流のベクトルマップ下に示したサイクル番号と一致している。

左図のベクトルマップより、図11(a)および図11(b)どちらの負荷条件においても、net IMEPが低下するサイクルでは、黒矢印で示すようにBDCではピストン冠面上を沿うような流れが形成されており、タンブル渦構造が右側(吸気バルブ寄り)にオフセットしていると言える。一方、net IMEPが高くなったサイクルでは、その流れパターンは確認できず、ヘッド面へ向けた流れ、またはピストン冠面から離れた流れが生じており、タンブル流れ先端がBDCにおいてボア中心部に位置していることがわかる。

右図に示すTKE履歴を見ると、高net IMEPサイクルでは、圧縮行程後半に現れるTKEのピーク位置が総じて遅角していることがわかる。特に、図11(b)の#044の高net IMEPサイクルでは、BDCにおいてピストン冠面上にほとんど平均流の成分を確認することが出来ないが、その後の圧縮行程では、非常に高いTKEを維持していることがわかる。

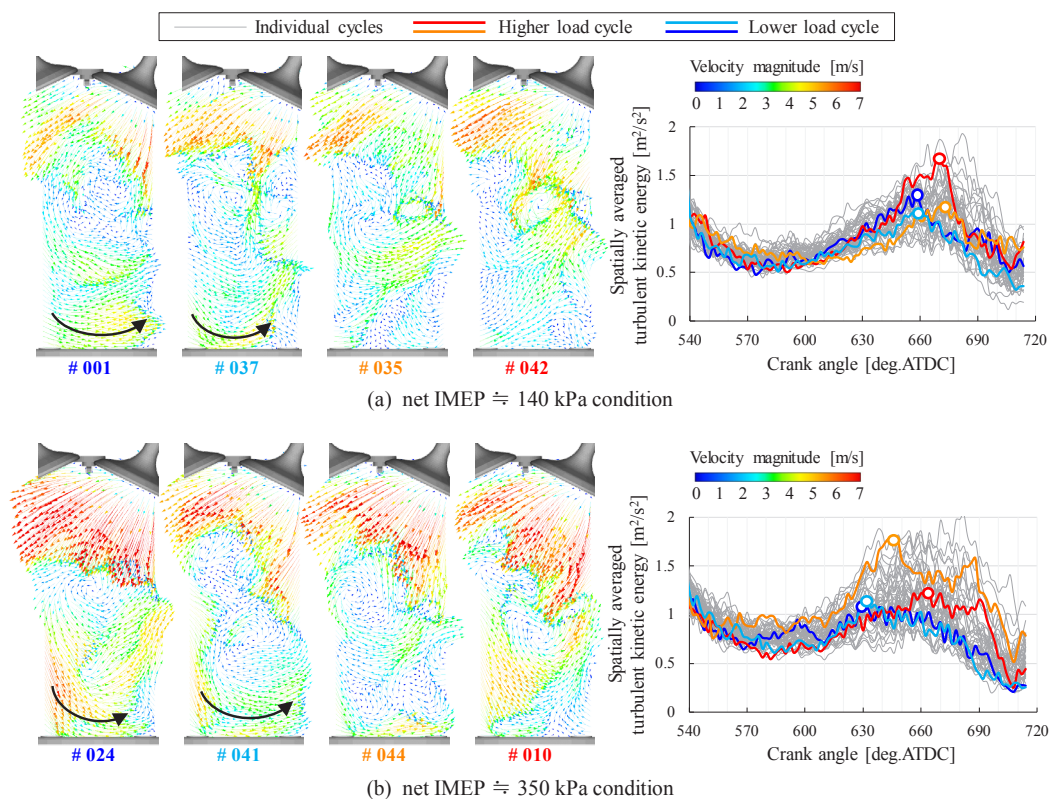


Fig.11 Comparison of spatially averaged turbulent kinetic energy and temporally-averaged flow pattern at BDC. TKE becomes lower in the latter half of compression stroke when flow pattern along the piston head existed at BDC.

以上の結果より、BDCにおけるピストン冠面流れのパターンと圧縮行程中のTKEの強弱には定性的に相関性があり、BDCまでにピストン冠面上にタンブル流が到達しないサイクルでは、その後の圧縮行程で高いTKE履歴を辿る傾向にあることがわかった。言い換えると、BDCまでに筒内に形成されるタンブル流れの安定化は、圧縮行程中の乱れ(TKE)のサイクル変動を少なくし、燃焼初期における乱流燃焼速度を安定させると言える。

ここで、図10の結果では最大仕事サイクルの場合にTKEは全サイクル中で最大値ではないことがわかる。最大仕事のサイクルよりも高いTKEを推移するサイクルはいくつか見られる。この理由は、仕事を増加させる要因がTKEの他にも存在するからである。本実験はPFI排気行程噴射条件のため、DI条件に比べれば空間的な燃料濃度斑は少ないはずだが、PFIでも完全に均一予混合気にはならず、多少の濃度斑の変動はある。点火時期にTKEよりも燃料濃度斑の方が初期火炎成長に支配的に作用するならば、相対的にTKEの初期燃焼への寄与率は低下してしまう。そのため今回の結果では、高net IMEP条件では圧縮行程後半のTKEが増加し易い傾向にあることがわかったが、サイクル変動に影響を与えるその他の要因とそれぞれの寄与率については今後の検討課題とする。

5-5. 点火時期1 deg.前の局所平均流と乱れ分布

圧縮行程中の筒内平均のTKEより、高仕事サイクルでは高いTKEが点火時期まで残存し易い傾向にあることがわかった。そこで次に、点火時期1 deg.前の時間平均流分布およびTKE分布を比較した。

図12に点火時期1 deg.前の時間平均流分布およびTKE分布の比較結果を示す。なお、TKEは式(5)にも示した通り、瞬時流 u と時間平均流 $\bar{u}$ の差分をエネルギーにした値で、サイクル変動成分 u_c を含まない乱れ u' のエネルギーである。図中の比較に用いたサイクルは、各負荷条件において図11にも示した4つのサイクルを対象とした。図12(a)にnet IMEP $\approx$ 140 kPa条件、図12(b)にnet IMEP $\approx$ 350 kPa条件の結果を示す。図12(a)に示す低負荷条件を見ると、最小仕事サイクルである#001の結果に対し、最大仕事サイクルである#042の結果では、点火栓右側に強い平均流が形成されており、高net IMEPサイクルでは高い平均流が点火時期に存在する傾向にあると言える。同時に、#042では点火プラグ右側に高いTKE分布が確認できる。同様に、#035の高net IMEPサイクルでも高いTKE分布が確認できる。低net IMEPのサイクルでは、#001も#037も高いTKE分布は存在していない。最大仕事サイクルでは火炎伝播形状が逆タンブル方向(右側)へと伝播したが、図

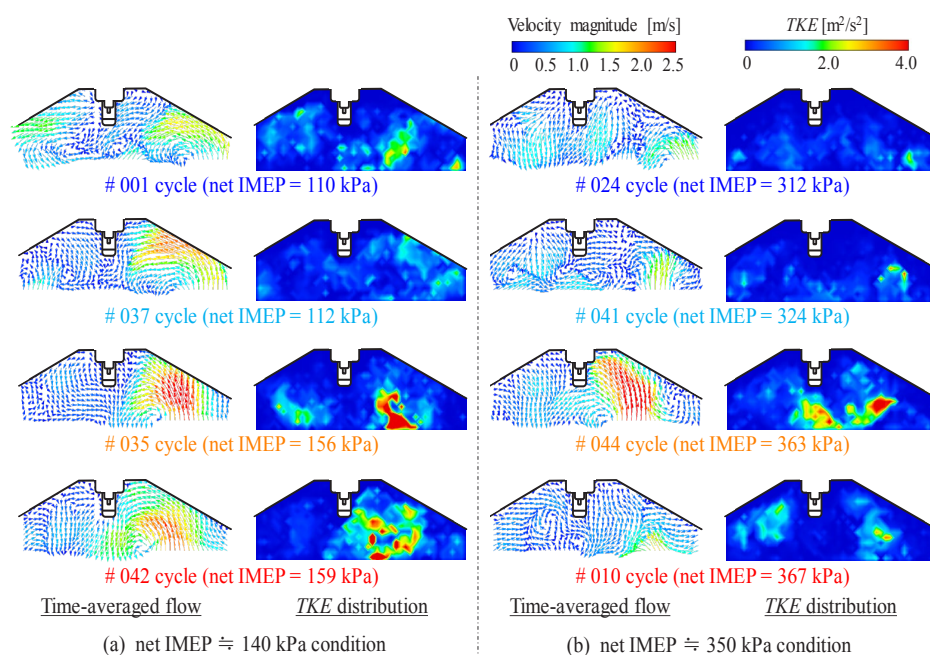


Fig.12 Comparison of temporally-averaged vector map and TKE distribution at 1 degree before ignition timing (CA = 714deg.ATDC). Strong tumble flow exists in higher load cycle, and high TKE spot also locates on the right side of the spark plug in net IMEP $\approx$ 140kPa condition. This high TKE spot increases flame propagation speed toward counter tumble direction.

12の結果より、その原因は点火プラグ右側に存在する局所的な高TKE領域における乱流燃焼速度の増加であると考えられる。ただし、図12に示すTKE分布は点火時期1deg.前の結果で、その後も高いTKE分布がプラグ右側に存在し続けるかは確認できていない。しかしながら、火炎伝播形状から考察すると、この高TKE分布の影響は大きいと考えられる。

図12(b)に示す高負荷条件の低net IMEPサイクルでは、点火時期前の平均流が全体的に遅く、高net IMEPサイクルである#044では強い平均流が確認できた。しかし、最大仕事サイクルである#010では高い平均流成分は確認できなかった。この理由として、筒内流動よりもnet IMEP増加に大きな影響を与える要素がこのサイクルでは存在したことが考えられる。TKE分布を見ると、高net IMEPサイクルの#044では点火プラグ下に、#010では、点火プラグ両側に高いTKE分布が確認できた。高負荷条件における火炎伝播形態は、伝播方向は点火プラグから左右均等で、その伝播速度に差が生じていた。TKE分布を見ると、図12(a)の低負荷条件のようにプラグ右側に高TKE分布が偏るのではなく、プラグ中心軸上または左右均等に分布していることから、火炎伝播方向ではなく、全体的な火炎伝播速度へ影響を与えたと考えられる。

6 結言

本研究では、低負荷燃焼時における燃焼サイクル変動の発生要因を特定するため、高速PIV計測による筒内流動の可視化および初期火炎伝播の直接撮影の燃焼同時計測を行った。得られた知見を以下に示す。

1. 燃焼計測では、net IMEP $\cong$ 140kPaおよびnet IMEP $\cong$ 350 kPaのどちらの負荷条件においても、net IMEPが低下したサイクルでは、総じて燃焼位相の遅角が発生していた。またサイクルごとのMFB10、MFB50、MFB90の各燃焼位相はnet IMEPと線形関係であることから、MFB10の遅れ、すなわち初期燃焼の遅れがnet IMEPの低下を引き起こした。
2. 初期燃焼における火炎伝播形態を比較したところ、net IMEP $\cong$ 140kPa条件の最大仕事サイクルでは、タンブル流れ方向と対向する火炎伝播が確認でき、そこでの燃焼速度の違いからnet IMEPの変動が生じた。
3. 瞬時流をカットオフ周波数 $f_c = 100\text{Hz}$ で時間平均した時間平均流を比較した結果、BDCにおけるピストン冠面上の流れパターンは、net IMEP $\cong$ 140kPaおよびnet IMEP $\cong$ 350kPaどちらの条件でも、最小仕事サイクルではピストン冠面に沿うような高い流速の流れパターンと

なり、最大仕事サイクルではピストン冠面から離れ、ヘッド面へ向けた低い流速の流れパターンとなった。これはタンブル流れ構造の水平方向オフセットによるもので、最小仕事サイクルでは、タンブル流れが吸気バルブ寄りに、最大仕事サイクルでは排気バルブ寄りにオフセットしていると考えられる。BDC以降では、タンブル流れによるピストン冠面からの巻き上げ流れが、最大仕事サイクルの方が明らかに強くなり、圧縮行程後半まで平均流が崩壊せず残存する傾向となった。

4. 圧縮行程中の平均流の運動エネルギー(KE)および乱流運動エネルギー(TKE)を比較した結果、最大仕事サイクルの方が最小仕事サイクルに比べ、KEとTKEが点火時期まで高い値で推移した。また、圧縮行程後半に増加するTKEのピーク位置は、BDCにおけるピストン冠面上流れのパターンと相関があり、タンブル流れが排気バルブ側にオフセットしたサイクルでは、高いTKEが圧縮行程後半まで残存する傾向となった。
5. 点火時期1deg.前のプラグ近傍のTKE分布を比較したところ、高net IMEPサイクルでは、点火プラグ右側に局所的に高いTKE分布が確認され、タンブル流れ方向と対向する火炎伝播が生じたのは、この領域で乱流燃焼速度が増加したためであると考えられる。

以上の結果より、低負荷燃焼サイクル変動を引き起こす要因の一つとして初期燃焼のサイクル変動が挙げられ、その変動は、点火時期の局所的なTKE分布の影響が大きく、遡るとBDCにおけるタンブル流れ構造の変動が原因であると考えられる。そのため、燃焼サイクル変動抑制手段の一つとして、吸気行程からBDCまでに筒内に形成されるタンブル流れの安定化が重要であると言える。

参考文献

- [1]Fontanesi, S., d'Adamo, A. and Rutland, J. C., Large-eddy simulation analysis of spark configuration effect on cycle-to-cycle variability of combustion and knock, International Journal of Engine Research, Vol.16, Issue 3 (2015), pp.403-418.
- [2]保木本聖, 窪山達也, 森吉泰生, 飯田実, 渡辺敬弘, 可視化エンジンを用いた筒内混合気形成過程の可視化による低負荷時の燃焼変動要因の解析, 自動車技術会2016年秋季大会予稿集 (2016), 20166313.

[3]Hokimoto, S., Kuboyama, T., Moriyoshi, Y., Iida, M. and Watanabe, T., Analyses of cycle-to-cycle variation of combustion and in-cylinder flow in a port injection gasoline engine using PIV and PLIF techniques, SAE technical paper (2017), 2017-01-2213.

[4]神本武征, 八木田幹, 森吉泰生, 小林治樹, 盛田英夫, 透明シリンダエンジンによるシリンダ内空気流動に関する研究, 日本機械学会論文集B編, Vol.53, No.492 (1987), pp.2686-2693.

[5]Keane, D. R. and Adrian, J. R., Optimization of particle image velocimeters : II multiple pulsed systems, Measurement Science and Technology, Vol.2 (1991), pp.963-974.

[6]Muller, R. H. S., Bohm, B., Gleißner, M., Grzeszik, R., Arndt, S. and Dreizler, A., Flow field measurement in an optically accessible, direct-injection spray-guided internal combustion engine using high-speed PIV, Experimental Fluids, Vol. 48, Issue 2 (2010), pp.28

[7]大倉康裕, 樋口和哉, 浦田泰弘, 染矢聡, 店橋護, 高速PIVによるエンジン燃焼室の乱流計測, 日本機械学会論文集B編, Vol.79, No.806 (2013), pp.319-332.

[8]Peterson, B., Reuss, L. D. and Sick, V., High-speed imaging analysis of misfires in a spray-guided direct injection engine, Proceedings on the Combustion Institute, Vol.33, No.2 (2011), pp.3089-3096.

[9]Peterson, B., Reuss, L. D. and Sick, V., On the ignition and flame development in a spray-guided direct-injection spark-ignition engine, Combustion and Flame, Vol.161, No.1 (2014), pp.240-255.

[10]Reuss, L. D., Cyclic variability of large-Scale turbulent structures in directed and undirected IC engine flows, SAE Technical paper (2000), 2000-01-0246.

[11]ショールズケビン, 川島純一, 森信三, PIVによる筒内流動サイクル変動解析手法の開発, 自動車技術会論文集, Vol.36, No.6 (2005), pp.25-30.

[12]可視化情報学会, PIVハンドブック, 第1版第4刷発行 (2013), 森北出版.

[13]可視化情報学会, 第20回可視化フロンティア「PIV講習会2015(大阪)」(2015).

[14]Zeng, W., Sjöberg, M. and Reuss, D., Using PIV measurements to determine the role of the in-cylinder flow field for stratified DISI engine combustion, SAE International Journal of Engines, Vol.7, No.2 (2014), pp.615-632, doi:10.4271/2014-01-1237.

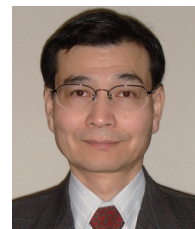
■著者



保木本 聖
Satoshi Hokimoto
サステナブル・エンジン・
リサーチセンター
研究部、研究員



窪山 達也
Tatsuya Kuboyama
千葉大学大学院
工学研究 院 機械工学コース
次世代モビリティパワーソース
研究センター 准教授



森吉 泰生
Yasuo Moriyoshi
千葉大学大学院
工学研究 院 機械工学コース
次世代モビリティパワーソース
研究センター長・教授



孕石 三太
Santa Haramiishi
先進技術本部
研究開発統括部
基盤技術研究部



渡辺 敬弘
Takahiro Watanabe
先進技術本部
研究開発統括部
基盤技術研究部



飯田 実
Minoru Iida
先進技術本部
研究開発統括部

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) 経営企画部
	今 井 浩 久	ソリューション事業本部 ロボティクス事業部 UMS統括部 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) 開発部
	近 藤 巧	PF車両ユニット 技術統括部 企画推進部
	沢 淵 敦 志	パワートレインユニット パワートレイン開発統括部 第2PT開発部
	澁 谷 啓 之	デザイン本部 プランニングデザイン部
	田 阪 嘉 章	マリン事業本部 マリンエンジン統括部 機能開発部
	伊 藤 正 二	AM事業部 AM第1技術部
	土 居 航 介	生産技術本部 材料技術部
	中 本 剛 広	ヤマハモーターエレクトロニクス(株) 電装事業統括部 電装開発部
	長 森 基 樹	ソリューション事業本部 ロボティクス事業部 FA統括部 開発部
	野澤 伸治郎	ソリューション事業本部 SPV事業部 開発部
	藤 井 隆	ヤマハモーターパワープロダクツ(株) 開発統括部 パワートレイン開発部
	二 木 善 希	マリン事業本部 ポート統括部 WV開発部
	村 松 恭 行	モビリティ技術本部 EM開発統括部 EM開発企画部

編集事務局	池 田 厚 司	人事総務本部 法務・知財部
	望 月 範 久	人事総務本部 法務・知財部
	三 宅 英 典	企画・財務本部 コーポレートコミュニケーション部
	高 関 久美子	デザイン本部 コーポレートデザイン部
	村 松 恭 行	モビリティ技術本部 EM開発統括部 EM開発企画部
	神 野 裕 文	先進技術本部 技術管理グループ
	久 米 裕 子	先進技術本部 技術管理グループ

ヤマハ発動機 技報 第55号

YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW 2019 No.55

印 刷 2019年11月30日
発 行 2019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 渡部 克明
デ ザ イ ン (株)スタジオコバ
印 刷 所 (株)スタジオコバ
〒437-1196 静岡県袋井市松原2455-2

お問い合わせ 技報編集事務局 TEL 0538-32-1171
(先進技術本部 技術管理グループ)

ホームページ <https://global.yamaha-motor.com/jp/profile/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