

ISSN 0387-7906

川崎重工技報

技術開発本部 特集号

Teamwork & Challenge

No. **175**
March 2015

Vibration & Noise
Control System

System Integration

Structural Analysis &
Strength Evaluation

Material Processing &
Application

Measurement & Diagnostic
TECHNOLOGY

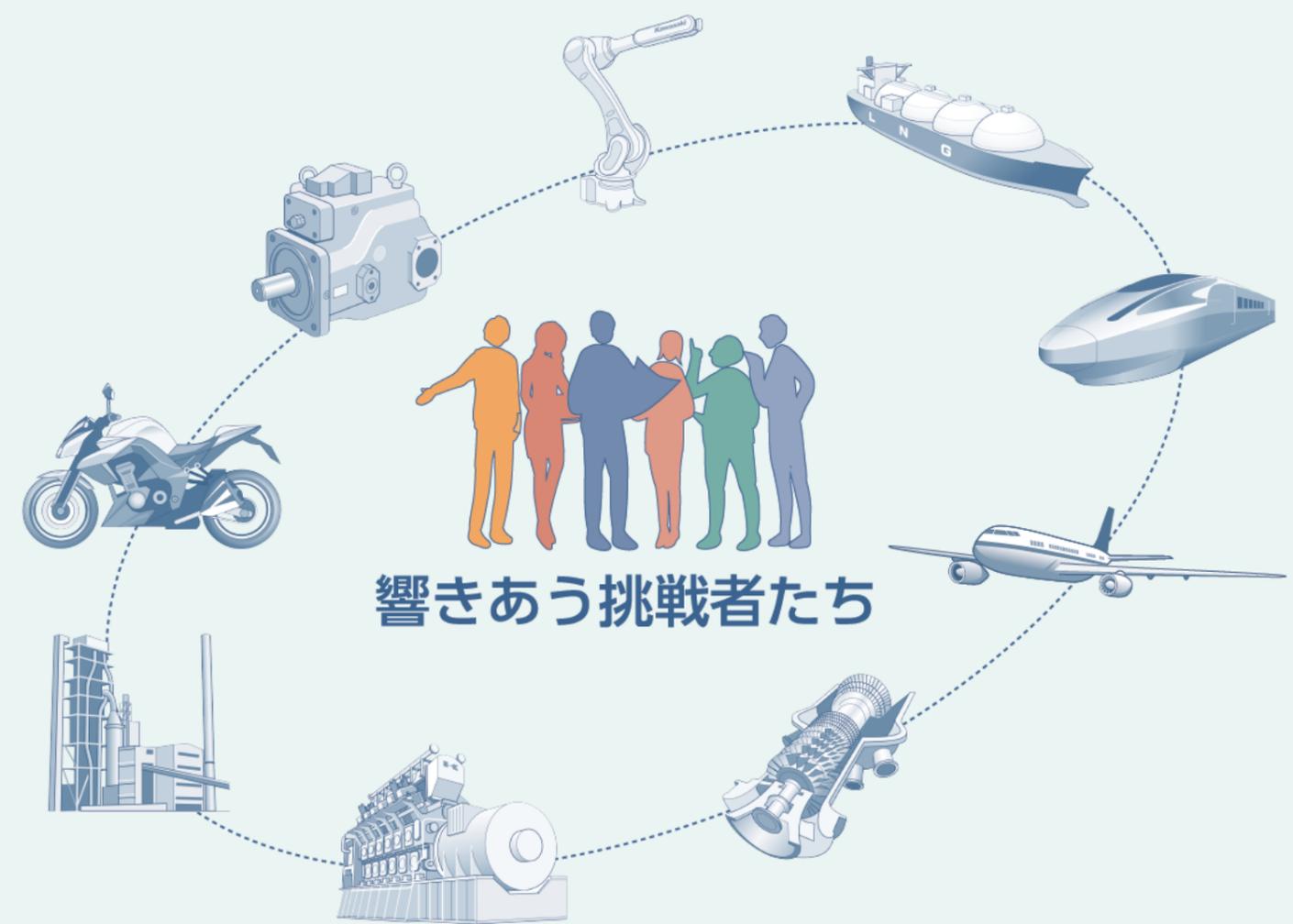
Electromechanical System

Combustion &
Thermal System

Production System

Manufacturing
Fluid

Mechanical System & Mechanism



響きあう挑戦者たち

■ 巻頭インタビュー チームで響きあう技術開発	1
■ 総括説明 将来を見据え、総合力で挑戦する技術者たち	2

特集記事

■ 前人未踏の解析技術への挑戦	6
－ 世界最高難度の航空エンジンのオイルマネジメントに成功 －	
■ モーターサイクルの操縦感をデザイン	10
－ 「感性の言葉」から「技術の言葉」へ －	
■ 鉄道車両を見守るセンシング技術の進化	14
－ より安全・快適な鉄道車両を目指して －	
■ 成型加工プロセスの技術革新	18
－ 航空機ボディの完全自動成形技術の確立 －	
■ 業界トップレベルの効率を誇る下水浄化用曝気ブロウの開発	22
－ オール自社開発で創出した市場優位性 －	
■ フルードパワー製品のさらなる効率追求	26
－ トップを目指し、挑んだ限界を超える戦い －	
■ 安全技術で生産現場を改革	30
－ 人間とロボットが協働する職場へ －	
■ ガスタービンの水素燃焼技術の確立	34
－ 来るべき水素社会に向けた先行研究の今 －	
■ 3D 活用による製品開発プロセスの革新	38
－ 製品ライフサイクルを見通す新視点 －	
■ 水素プロジェクトの今とこれから	42
－ 究極のクリーンエネルギーで実現する新しい未来 －	

— 牧村技術開発本部長に聞く — チームで響きあう技術開発

技術開発本部の役割について、教えてください。

川崎重工グループには、「船舶海洋」「車両」「航空宇宙」「ガスタービン・機械」「プラント・環境」「モーターサイクル&エンジン」「精密機械」の7つの独立したカンパニーがあります。各カンパニーは、独自の歴史とカルチャーと共に、多彩な製品と幅広い技術を保有し、それぞれが異なった市場環境の中で自立自存のビジネスを展開しています。一方、この中でも特に重要な新製品開発プロジェクトについては、カンパニーの設計／生産、および営業部門の各担当者と、コーポレートの研究開発部門である本社・技術開発本部の技術の専門家が、織物の縦糸と横糸のごとく相互に連携することで、より顧客ニーズにマッチした、競争力に優れた製品をタイムリーに開発しています。

また、技術開発本部は、各カンパニーが持つ高度な独自技術を全社横通しで活用し、シナジー効果を最大限に発揮することで、これまでの製品技術を上回る新たな力、強い力を生み出していく役割も担っています。このような役割を担うことにより、全社の「新製品・新事業」の開発を効率的に推進でき、グループ全体の求心力を高めることで、さらなる企業価値の向上を目指しています。

どのような形で、カンパニーと連携しているのですか？

新製品や新技術については、開発の初期段階から、カンパニーと技術開発本部がチームを組んで進めています。例えば海外向けの高速鉄道車両ならば、速度や軽量化の顧客要求と共に、安全性や環境への配慮、快適な移動空間の提供、リーズナブルな価格なども求められるため、二律背反どころか五律背反くらいの難しい課題が存在します。これをどう乗り越えるか、チームで議論しながら開発を進めます。そうすると、開発当初は絶対無理だと思っていたものが、ある時突然、美しい全体最適の形となってまとまります。

また、技術開発本部の技術者は、鉄道車両、航空機、ガスタービンと、その時々で違う案件に携わります。このようにして、開発した技術が、技術開発本部を介して全社へ水平展開されていくのです。

なぜ、全体最適が達成できるのですか？

チーム全員が将来の事業ビジョンを共有し、本質的な課題に対してそれぞれの立場で真剣に解決に向け努力するからです。この良い関係を私はよく「チームで響きあう」と言っています。将来ビジョンを構築する際、カンパニーと



牧村 実 *Minoru Makimura*
常務取締役 技術開発本部長

共に、まず将来の市場トレンドや顧客ニーズ、競合の動きなどを予見し、そこから今後の事業や新製品の方向性や、そこへ向けてのアクションを議論することで、事業としてのゴールイメージと開発目標を共有するように周知徹底しています。良いこと尽くめに聞こえるこの手法も「正の循環」として定着するまでに、約10年かかりましたが、今では、開発に携わり成功体験を重ねた人財がリーダーとなり、新たなチームで次のゴールを目指しています。

将来に向けた製品開発には、どんなものがありますか？

究極のクリーンエネルギーである「水素」に注目しています。2020年開催の東京オリンピック・パラリンピックを契機に、燃料電池車や水素発電などで利活用が本格化すると見込まれていますが、この「水素社会」の到来を数年前から見透し、その実現のために必要となる製品開発に、全社一丸となって取り組んでいます。水素の大量輸送に有効な液化水素運搬船や水素を安定して貯蔵する技術の開発、あるいは水素を天然ガス同様のガス燃料として利用可能なガスタービンなど、水素の製造から、輸送・貯蔵、利用に関わるインフラ製品を支えるコア技術を早期に開発し、ビジネスに近いものから順次製品化を進めていきます。

最後に

技術開発本部は、これからも革新的な製品をタイムリーに創出できるよう、事業部門と常に市場ニーズや製品ゴールイメージを共有しつつ、全体最適を目指した「チームで響きあう」技術開発を実践していきます。また、その鍵となるのが「人」であるため、未来志向で常に改革を意識した人財、経験のない課題にも即時に対応できる人財の育成に努めていきます。

将来を見据え、 総合力で挑戦する技術者たち



原田 英一 *Eiichi Harada*

理事 技術開発本部 副本部長 兼 技術企画推進センター長

まえがき

川崎重工グループは、7つのカンパニーが「輸送システム」、「エネルギー・環境」、「産業機器」の3つの事業分野を軸に、極めて多岐にわたる製品群をグローバルにビジネス展開している。これに対して、本社・技術開発本部は、事業部門と一体となり、自らが保有する先進の基盤技術を駆使し、事業部門のコア・コンピタンス強化や新たな顧客価値の創出に向け、「新製品・新事業」の開発、製品の競争力強化、革新的な生産技術の開発などに取り組んでいる。また、将来の社会や市場ニーズを想定した上で、「今」取り組むべき「新しいコア技術」の育成を積極的に進めている。

このように、事業部門との垣根を越え、チームカワサキとして「技術のシナジー効果」を最大限に発揮できる「人財」こそが、本社・技術開発本部の原動力となっている。

本稿では、研究開発の全体像を説明し、その中で、成長戦略の実現に向けて、技術開発本部の技術者たちが将来を見据え、事業部門とともに研究開発を推進している姿を紹介する。

1 技術者たちが挑む研究開発の全体像

技術開発本部は、常に事業部門と連携しながら、研究開発を大きく3つのカテゴリーに分け、並行して研究開発を進めている。それらは事業化時期の近い順に、事業部門の「新製品・新事業」の開発、「将来基盤技術」の育成・強化、「将来事業コア技術」の開発と位置付けている。

(1) 事業部門の「新製品・新事業」の開発

事業部門の「新製品・新事業」を早期に製品化・事業化し、事業部門の将来の収益基盤とするため、顧客ニーズ、競合メーカー、さらにスピード感やコスト感を強く意識し、

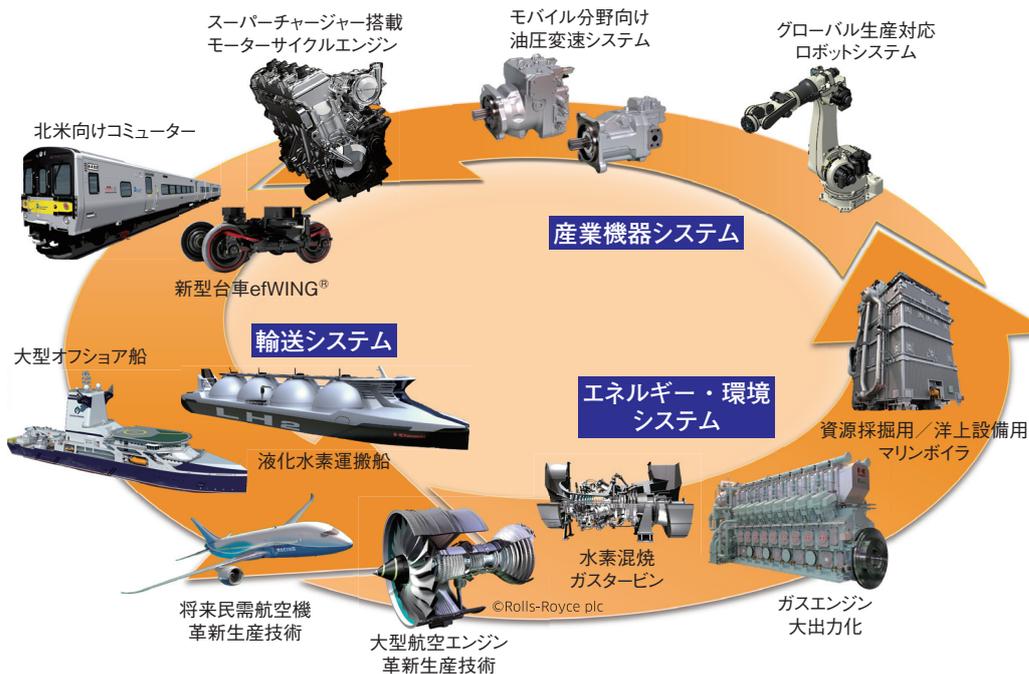


図1 コア・コンピタンスを重視した「新製品・新事業」の開発

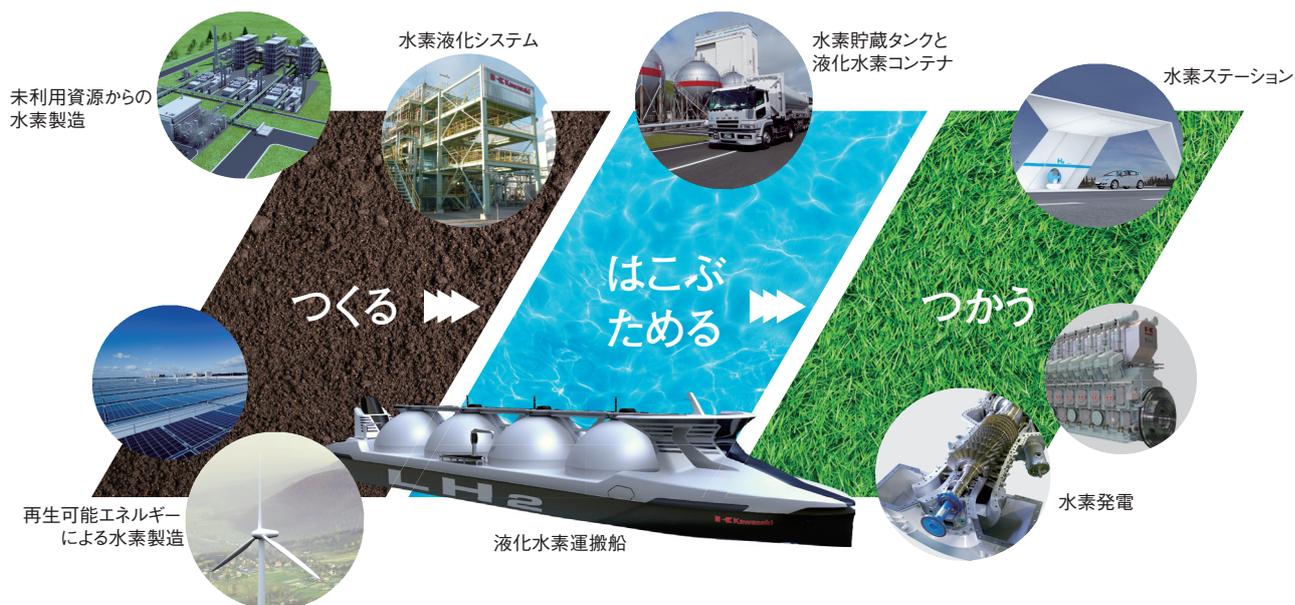


図2 水素の製造／輸送・貯蔵／利用技術の開発

差別化技術を中心に事業部門と一体となって開発に取り組んでいる。

また、「開発のフロントローディング」と「開発と生産のコンカレント化」を推進し、課題を前倒して検討することにより、顧客ニーズを反映した商品価値の創り込みとともに、事業部門の開発効率の向上にも貢献している。

現在、事業部門とともに注力している開発テーマの例を図1に示す。

(2) 新たな顧客価値の創出に向けた「将来基盤技術」の早期育成・強化

次世代の事業部門の「新製品・新事業」を想定し、その開発の立ち上げを円滑化し、開発期間の短縮を実現するために必要な「将来基盤技術」の早期獲得を目指している。

具体的には、動力機器の高効率化・大出力化・高回転化・低コスト化を支える「先進駆動技術」、機械システムの電動化を支える「機電一体システム技術」、生産性や品質の向上のみならず、製品の設計にまで変革をもたらす「革新生産技術」などの獲得に取り組んでいる。

(3) 「将来事業コア技術」の確立

政府の「エネルギー基本計画」において、「水素」が将来の重要な二次エネルギーの一つに位置付けられた。当社は、燃料電池自動車や水素発電などによって、水素が本格的に活用される水素社会の実現を見通し、他社に先駆けて水素を安全かつ大量、安価に供給し利用するための研究開発に取り組んでいる（図2）。

例えば、水素の大量輸送を担う液化水素運搬船や、液化

水素を長期間安定的に貯蔵する技術の開発、あるいは水素燃料に対応したガスタービンなど、水素の製造から、輸送・貯蔵、利用に関わる水素インフラ製品に不可欠となるコア技術を開発し、事業に近いものから順次製品化している。さらに、知的財産の戦略的獲得や安全技術の規格化なども含めて、若手から熟練技術者までが、世代を超え全社を挙げた取り組みを進めている。

2 技術者たちが総合力で挑む研究開発「マトリックス運営」

成長戦略の実現に向けた研究開発では、革新的な製品をタイムリーに創出するために、技術開発本部が、市場ニーズや製品の開発ゴールイメージを含めた事業戦略を事業部門と共有することが重要である。

その鍵となるのが、技術開発本部が保有する多種多様な基盤技術を、最適な形で新製品の開発に反映させる手法である「マトリックス運営」である。これを実現するためには、各技術者が高度な専門技術を保有することはもちろん、組織の枠を超えて事業部門の技術者たちとチームを組み、「最適解」を見つけるために力を発揮していく必要がある。

(1) 設計・生産技術者と技術の専門家の連携による全体最適解の追求

事業部門の新製品開発や製品改良などのプロジェクトにおいて、マトリックス運営では、技術開発本部の技術者たちがそれぞれの専門技術分野ごとに個別に対応するのではなく、プロジェクトリーダーを中心に、開発初期の段階から複数の技術者が事業部門とともに、一つのタスクチーム

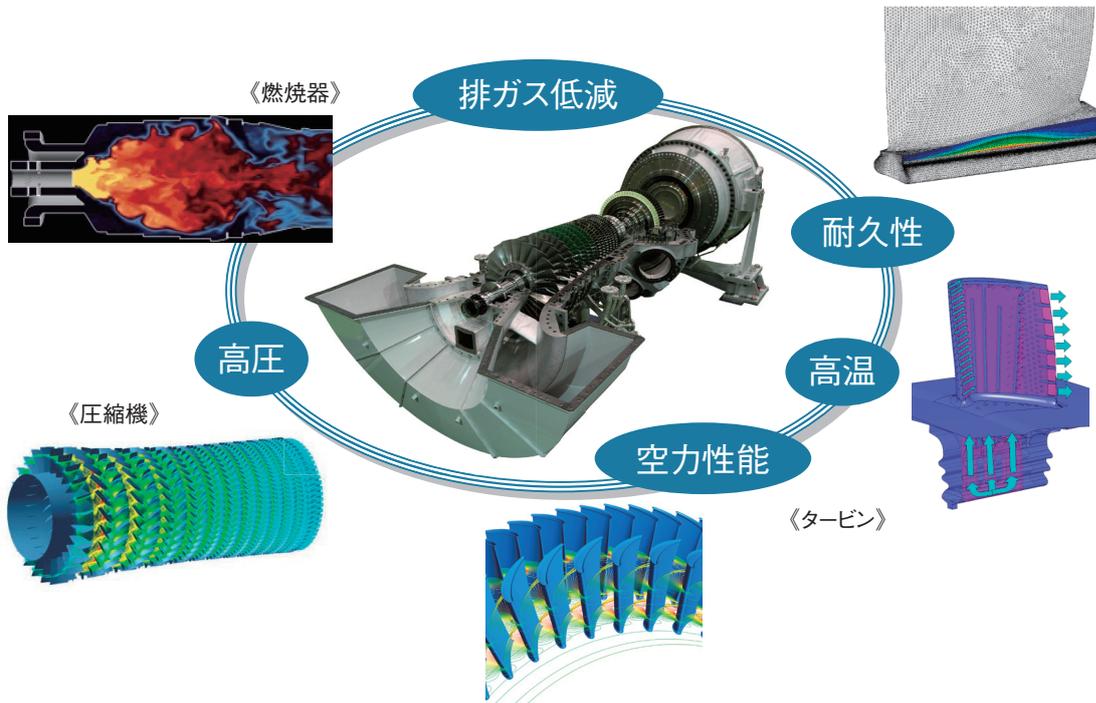


図3 相反する技術課題に対する全体最適解の追求 —高効率ガスタービン「L30A」開発

を構成してプロジェクトを推進している。

このタスクチームは、プロジェクト全体を把握する事業部門の設計・生産技術者と、技術開発本部の各技術の専門家から構成される。

製品開発にともなう技術課題に対して、通常の場合、技術の専門家は、自らの技術分野のみの範囲内において解を求める。しかし、実際の製品開発では複数の要因が複雑に関係し合うため、一つの技術的側面だけに囚われていると部分最適に終始してしまい、製品トータルとしての「全体最適解」を得ることができない。

これに対し、マトリックス運営におけるタスクチームでは、技術の専門家たちが、組織の枠を越えて他の技術分野の専門家と密接に連携して製品開発を支援する。このように、技術の専門家たちが総合力で「全体最適解」を希求するしくみにより、そのポテンシャルが最大限に製品開発に活かされるとともに、柔軟にチームを組み替えることにより、事業部門の要請や市場環境の変化に対して、臨機応変に対応することができる。

マトリックス運営の具体的事例として、高効率ガスタービン「L30A」の開発を紹介する。競合機種を凌駕するクラス最高の発電効率と環境性能といった極めて高度な目標にチャレンジした開発では、図3に示すような耐久性の確保、空力性能の向上、クリーン燃焼の実現など、複数の高度な技術課題の解決に取り組んだ。これらガスタービンに要求される課題の多くは互いに相反し、例えば、高効率化

のためには、燃焼温度を向上させることが必要になり、タービン翼の耐熱性向上が求められる。一方で、燃焼温度が向上すると、NO_xの発生量が増加して環境性能が低下してしまうため、燃焼器の改良が必須となる。

これに対し、タスクチームを構成して、これら課題の同時実現に取り組み、製品トータルとしての「全体最適解」を見出して、従来のガスタービンの開発期間に比べて極めて短期間で開発目標を達成することができた。

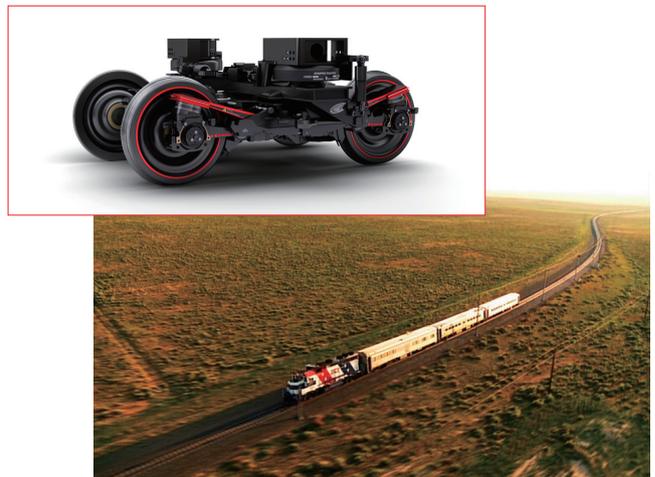


図4 鉄道車両用新型台車 efWING®



図5 スーパーチャージャー搭載
モーターサイクルエンジン



図6 発電用ガスエンジン

(2) 技術の横展開による革新的製品の創出

開発した技術を全社へ横展開できるのもマトリックス運営の特徴の一つである。ある製品で開発、蓄積した技術について、技術開発本部の専門家たちが橋渡し役となり、他の製品分野に横展開することにより、シナジー効果を上げている。

例として、鉄道車両向けの新型台車efWING[®]を紹介する(図4)。efWING[®]は、台車主構造に炭素繊維複合材料(CFRP)を世界で初めて適用し、従来台車と比較して圧倒的な軽量化と安全性を両立させた画期的な台車である。efWING[®]の開発では、技術開発本部が保有するシミュレーション技術や構造設計技術、材料技術などに加えて、すでにCFRPの採用が進んでいる航空宇宙カンパニーと協力し合えたことも、カワサキの総合力の証である。

また、先進国向けモーターサイクル用として、量産型二輪製品としては世界初となる過給機(スーパーチャージャー)搭載エンジンを開発した(図5)。モーターサイクルに適した「過給能力」と「小型・軽量」を両立する過給機の開発には高いハードルがあったが、ガスタービンやジェットエンジンの開発で、技術開発本部が長年培ってきたタービン技術、駆動ギア技術を横展開することによって、モーターサイクルメーカー唯一の自社製スーパーチャージャーを実現することができた。

さらに、モーターサイクル向けエンジンの開発で培った燃焼技術を横展開し、世界最高の発電効率・クリーン燃焼を達成した8MW発電用ガスエンジンを図6に示す。海外では、10MWを超えるガスエンジン市場の拡大が継続しており、今後、発電効率を維持・向上しながら、さらなる大出力化に向けた開発を進めていく。加えて、排ガス規制、重油価格高騰による船舶用推進機のガスエンジン転換のニーズに対応すべく、世界最高の効率を維持しつつ、舶用化

に取り組み、ガスエンジンの用途拡大、新たなビジネス領域への進出に向けた開発にも取り組んでいる。

このように、技術開発本部の技術者たちがカンパニーと一体となり縦横無尽に活動して、カワサキの総合力の駆動源となっている。

(3) 技術者の人財交流による総合力育成

技術開発本部では、新製品・新事業の立ち上げ状況に応じて、マトリックス運営にとどまらず事業部門との人財交流を活発に行っている。

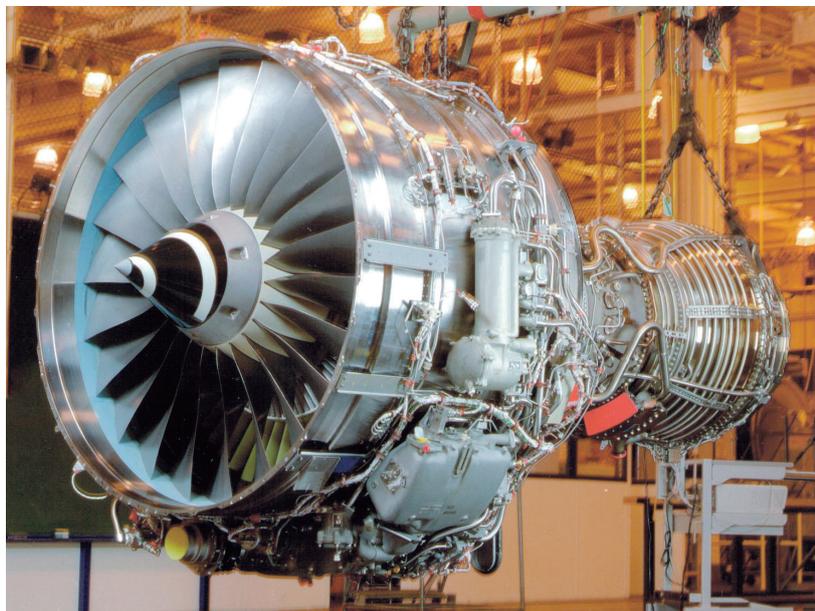
例えば、海洋開発などの新たな事業領域の開拓に際しては、必要に応じて技術開発本部の技術者が事業部門に一時的に在籍し、ビジネスの立ち上げに向け苦楽をともにするケースもある。事業部門の技術・生産、および営業部門の人たちと一体となって、海外顧客の生の声(ニーズ)を確認し、差別化に必要な技術開発をともに考えるなどの取り組みを積極的に行っている。また、事業部門の設計・生産技術者が技術開発本部に一時期転籍して、既存製品の差別化に不可欠な基盤技術を習得するような交流も実施している。

このように、それぞれの組織の枠を超えた人財交流を通じて、ビジネスに必要な技術の活用・育成など、さまざまな試みを進めている。

あ と が き

チームカワサキの一員として事業部門と一体となり、「新製品・新事業」の開発や、将来を見据えた新技術の育成・強化に果敢に挑戦する、本社・技術開発本部の技術者たちの姿を、以降に紹介する。

前人未踏の解析技術への挑戦 —世界最高難度の航空エンジンのオイルマネジメントに成功—



航空機のエンジン効率を高め、小型軽量化を実現する。
それは航空機製造における永遠の命題。
その一環としてスタートした、日本の航空ギヤ技術を
世界トップクラスにするために立ち上げられた国家プロジェクトの
成否の鍵を握ると考えられたのが、オイル挙動の解析技術。
いまだかつて世界で解き明かされたことのない真理をつかみ、
それをマネジメントへと活かす——。
不可能とされていた高難度な技術への軌跡をご紹介します。



有澤 秀則
Hidenori Arisawa

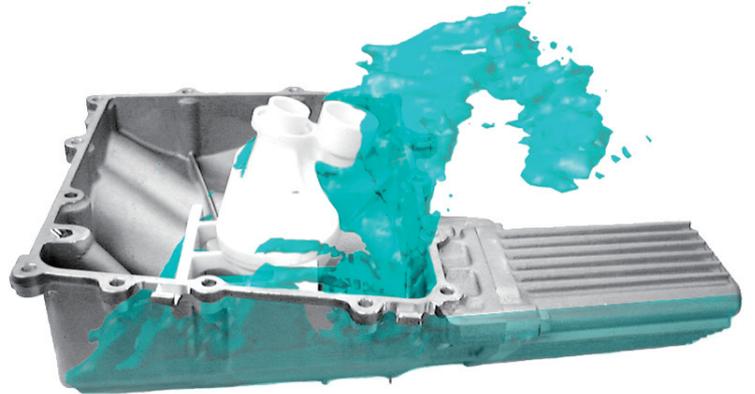
技術開発本部
技術研究所
熱システム研究部 研究二課
基幹職

製品性能を左右する オイルマネジメント

航空機や船舶など当社の多くの製品では、動力伝達部品として「ギヤ」を使用しています。大きな動力を確実に伝えたり回転数を変えたりと重要なパーツですが、摩擦による損失は避けることができません。この損失を減らすためにオイル潤滑などを活用しますが、オイル挙動のコントロール次第で、製品の性能が大きく変わるといっても過言ではありません。

この「オイルマネジメント」は、製品の耐久性に関わる技術ですが、解析はそのコアとなる重要な技術です。この解析技術によって「今ここで起こっている現象を把握」することで、起こりうる現象を予測し、設計に活かすことができるようになります。

その一例が、モーターサイクルエンジンのオイルパン内オイル挙動解析です。オイルパンとは、エンジン部分に付



モーターサイクルのオイルマネジメントの事例
(オイルパン内オイル挙動解析)

けられた底蓋のようなもので、エンジン内の各部品へ供給するオイルを溜めておく機能を果たします。課題は、モーターサイクルが急加速・急減速した際でもオイルが適切量供給されるように設計することでした。それも、非常に短い期間内に解析を終了させ、オイル挙動を予測できるようにした上で、それに基づいた設計改良案の提出が求められました。

一般的な解析手法では、多様な部品が複雑に入り組んだエンジン内のオイル挙動を評価することは極めて難しく、また計算量が膨大なため、要求された期日に到底間に合いません。そこで、過去に培ったLNG船のタンクスロッシング解析の知見から、現象の支配的な挙動はオイルパン付近のスロッシング挙動であると見極め、オイルパン付近のみに限定して解析モデルを作成し、周辺の影響については境界条件として適切に与えることで、解析精度を犠牲にすることなく検討期間を短縮する解析方法を試みました。つまり、無数に存在する変数の中から必要なものだけに絞り込んで検討したわけです。この取捨選択こそ、解析技術において極めて重要かつ高度な知見が求められる技術です。

このようにして提示したオイルパン設計の改良案は、一度の試作で、目標とする信頼性をクリアし、従来手法では達成できなかった高い精度でオイル挙動現象を予測することにより、製品（初期型ZX-10R）に採用されました。

航空機開発に係る国家プロジェクトに参加 不可能とされた解析手法への挑戦

モーターサイクルエンジンで培ったオイルマネジメント技術は、次に、航空エンジンのギヤボックス差別化に貢献

し、より重要性を認識されることになりました。当社の航空エンジンの競争力強化のために、日本の航空ギヤ技術を世界トップクラスにするための国家プロジェクトに参加しようとしていた、ガスタービンビジネスセンターの部長(当時課長)から技術支援の要請を受けたのです。

ギヤボックスとは、メインエンジンに接続された、文字通りギヤがぎっしり詰まった箱のようなもので、発電機などの補機類にエンジンからの動力を伝える役割を果たします。このギヤボックスの「損失を低減する」すなわち「さらなる高効率化を図って低燃費を実現する」ことが、本プロジェクトのミッションでした。

鍵を握るのは、損失の主要因となるオイル挙動です。ギヤボックス内で、各パーツの潤滑・冷却用に供給されるオイルの無駄な動きを極限までなくすことによって、高効率化を図るのです。しかし、この解析技術は世界最高難度とされ、NASAですら解明できていない謎に満ちた世界でしたので、当然、社内でも不可能と考えられていました。それでも、声をかけてくれたカンパニーの役に立ちたいとの一心で、開発への取り組みを引き受けました。

解析を困難にしている主要因は2つありました。1つは、高速気液二相流が発生していることです。航空機のエンジンはモーターサイクルに比べてはるかに高回転であることから、ギヤボックス内の空気とオイルも秒速100mという高速で混ざり合い、二相の「流れ」を作り出します。この極めて複雑な高速気液二相流をモデル化して解析することが求められました。もう1つは、ギヤのかみ合いによる影響です。2つのギヤがかみ合う際、それぞれの歯の間には極小の隙間が生まれ、かつその間隔はギヤの回転に応じて微細に変化していきます。この高速回転ギヤのかみ合



航空機に搭載されたターボファンエンジン

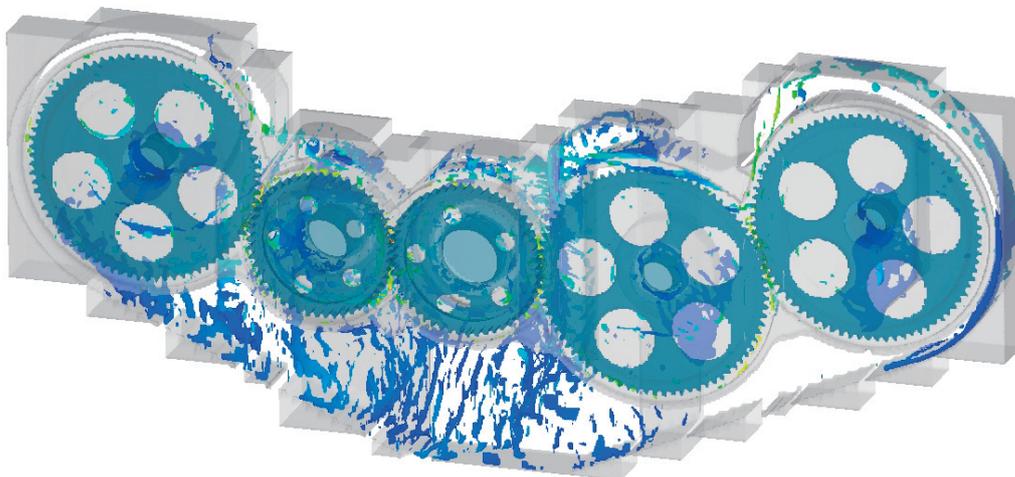
いが「流れ」にもたらす影響もモデル化する必要がありました。

カンパニーの経験知を 解析技術の力で可視化する試み

一般的に、解析技術で重要なのはモデル化です。つまり、解析モデル上で予測した挙動と、実際の挙動とが合致するよう、各種の現象を解析に折り込むことです。そのため、ギヤボックス内でいかなる現象が起こっているかの仮説を立てては解析モデルを変更し、実験結果と解析結果の合わせ込みに全力を注ぎました。ところが、起きている現象がわからないため、仮説の検証作業は困難を極めました。

現象の本質を探る中で道標となったのは、カンパニーの設計部門が30年以上にわたるものづくりを通して積み上げた経験知でした。カンパニーと協力して試行錯誤を繰り返す中で、駆動システムの技術者から得た「ギヤが空気をかき混ぜ、その空気がさらにオイルをかき混ぜているのではないか」という推察です。それが正しければ、空気のオイルに対する挙動を解析に折り込めばいいということになります。こうしたカンパニーの経験知を活用するとともに、技術開発本部が蓄積している解析技術も役立てることにより、高速気液二相流のモデル化を大きく前進させることができました。

残る問題は、ギヤのかみ合いです。前述したように、解析のポイントはモデル化すべき現象の取捨選択です。通常



航空エンジンのギヤボックスにおける複雑な挙動のオイル攪拌現象

なら、ギヤの回転がもたらす複雑で微細な空気流に着目しがちですが、これまでの知見から、主にギヤのかみ合い前後の空気圧差にのみ着目したモデル化を試みました。つまり、重要なのはオイル挙動であって、空気流については、大ざっぱなモデル化でも現象の本質は十分捉えており、求める精度を担保できると判断したのです。そうした考えに基づく解析手法によって、ギヤのかみ合いについてもモデル化の目処がつかしました。

エネルギー損失40%改善という快挙 世界最高権威の論文賞を受賞

こうして、精度と時間的制約の両方をクリアする解析モデルの開発に成功しました。解析上でさまざまな試行錯誤を行える環境を整えたことにより、実験による確認回数を激減させ、開発期間の大幅短縮を実現しました。そして、プロジェクトのミッションであった「高効率化による低燃費の実現」についても、解析によって導き出したギヤボックス内の構造設計変更によって、エネルギー損失を40%改善するに至りました。これは、機体燃費0.1~0.3%向上に相当する非常に大きな値です。一連の開発技術を記載した

技術論文は、当該分野では世界最高権威とされる ASME（米国機械学会）の航空エンジン部門で、2009年最優秀論文賞を受賞し、世界中のエンジンメーカーが当社の高度な技術を改めて認識することになりました。

航空機用ギヤは、低燃費を実現するギヤードターボファンなどの登場により、ますますその重要性が増しています。それに伴い、オイルマネジメントの重要性も増す傾向にあります。今回のオイルマネジメント技術開発の成功は、当社の航空エンジンギヤ技術の国際的なプレゼンス向上に寄与するもので、国際共同開発においても有利な立場での推進につながると考えています。

引き続きオイルマネジメントに係る解析技術の高度化を進めるとともに、今後は、オイルから熱へと解析の対象範囲を広げ、発熱や冷却をマネジメントすることによって、製品の信頼性・耐久性向上に貢献していく予定です。

川崎重工の技術開発・製品開発においては、カンパニーが持つ経験知に基づく「技術の蓄積」と、技術開発本部が研究開発活動を通じて築いた「技術の蓄積」との両方が、重要な競争力創出やブレークスルーの原動力となっています。今後も、製品開発における本質の課題に対応すべくカンパニーと一体となって取り組んでいきます。



開発者たち

モーターサイクルの操縦感をデザイン —「感性の言葉」から「技術の言葉」へ—



モーターサイクルの開発において
設計の重要な指標とされてきたライダーの感性。
その研ぎ澄まされた感性がとらえている操縦安定性のメカニズムを
何とかして技術的に解き明かせないか…？
不可能と思われた難題への挑戦が、
モーターサイクルの開発を新視点でバックアップするものとなりました。



市川 和宏
Kazuhiro Ichikawa
技術開発本部
技術研究所
強度研究部 研究一課
主事
技術士（機械部門）

モーターサイクルの重要要素のひとつ「操縦安定性」 プロの開発ライダーしかとらえられない聖域

当社のモーターサイクルの最大の魅力は、『Fun to Ride』です。この『Fun to Ride』を実現する取り組みの一環として、モーターサイクルを思いのままに操る性能、「操縦安定性」に関する研究を行っています。この操縦安定性とは、「操縦性」と「安定性」のバランス良い両立によってもたらされる性能で、モーターサイクルの世界では乗り味を決定づける極めて重要な要素のひとつであり、この性能向上のために当社ではレース車を用いた先進技術の研究を行って、その先進技術をリアルタイムに市販車に反映しています。ここで言う「操縦性」とはライダーの意思通りに走行する車体性能を指し、「安定性」とは文字通り車体が安定しているかどうかを指します。

従来この操縦安定性は、開発ライダーによる感性評価を参考にしながら作り込まれてきました。すなわち、まず試験走行を実施し、操縦性と安定性についてどう感じたか、

研ぎ澄まされた感覚により評価された開発ライダーのコメントを参考にしながら、設計者が調整を図るという開発サイクルを重ねることによって、目指す車体コンセプトを実現させていたのです。そうした作り込みがあるからこそ、すばらしい完成度を備えたモーターサイクルができあがるわけですが、一方で、操縦性と安定性は互いに極めて複雑に絡み合った現象であることから、その調整に要する多大な労力が課題となっていました。開発期間が限られる中で、こうしたギリギリの調整を完遂している開発メンバーの負担を、少しでも軽減する方法はないか、といった観点から研究がスタートしました。

成果が出ないまま過ぎ去った1年 突破口となった「チャター」現象の解決

開発ライダーは、1秒の誤差も出すことなく、まったく同じコースどりで、サーキットを走行する技術を持っています。その開発ライダーが、研ぎ澄まされた感覚を駆使して何とか感じ取れる操縦安定性を、技術的に解明する…。実際、研究開発を始めた当時は、その難しさが想像以上であることを実感しました。まず、試験走行後のヒアリングで開発ライダーから聞くコメントを理解することすらできません。たとえば、「接地感がない」というコメントは、すなわち「路面をつかんでいる感覚が薄い」という意味ですが、何が影響してそのような感覚を得るに至っているかわかりません。そこで、仕様を変えた車体でそれぞれ試乗してもらい、走行中のさまざまな計測データより、接地感がある時とない時との差異を探ろうと試みました。しか

し、データ上にはこれといった差異が現れません。開発ライダーが感じているのは、センサでは測れない世界なのかと、大きな壁を感じるに至りました。その後、モーターサイクルの運動理論に始まり、分析の手法、走行モードの研究まで、およそ1年がかりで、ひたすら基礎の積み上げに努めました。

これといった成果が出ないまま、それでも開発ライダーのコメントから徐々に操縦安定性解明のヒントを得るようになった頃、あるレースの車体研究の一員として参加することになりました。そこで与えられた課題が、「チャター」と呼ばれる現象でした。チャターとは、ある条件が重なることでコーナリング時に発生する、車体の振動です。車体各部の加速度や、チャター発生時におけるさまざまな計測データを、これまでに蓄積した知見と合わせて分析することにより、なんとかチャターを解決することができました。現象が発生する仕組みさえわかれば、試験走行の前プロセスである設計検討段階で対策が可能です。実際にチャター対策を施した後に試験走行してもらったところ、ライダーからは一発OKの返事を得ることができました。ライダーの研ぎ澄まされた感性に、一歩近づいた瞬間でした。

レースにおける走りを追求した最適剛性 そして、機能的デザイン形状の実現

チャター問題の解決に向け、車体設計実務者と議論を重ねることでお互いに理解が深まったこともあり、次は車体設計に携わるチャンスを得ることができました。市販車を



ライダーコメントのヒアリング

改造したバイクで競う「スーパーバイク世界選手権 (WSB: World Superbike Championship)」のレース車両向けとして、スイングアームやホイールをどう設計にすべきかを、研究を活用して検討することになったのです。

スイングアームとは、メインフレームとともに車体の重要骨格を構成する部品で、最適剛性をいかに実現するかが設計のポイントになります。剛性には、「ねじり剛性、横剛性、縦剛性」の3つがありますが、このすべてを高くすると重量が増してしまいます。逆に剛性が低すぎると操縦性が確保できなくなります。そこで、解析と走行計測による分析を繰り返すことによって、走行中にスイングアームがどのように変形するかを解明するとともに、複雑にからみ合う3つの剛性と形状の関係性を明らかにしました。また同時に、ライダーから操縦感をヒアリングすることで、3つの剛性それぞれが、操縦感とどのような関係にあるかを解き明かしました。そして、この研究成果を開発にフィードバックしたところ、求められる操縦感を確保した最適剛性バランスの新しいスイングアームが実現しました。

一方、ホイールについては従来、軽い方がいいとされてきましたが、よくよく調べてみると、軽量素材のアルミを使ったホイールのライダー評価は必ずしも高くはありませんでした。そこで、逆にどのような特性を持ったホイールがライダーに評価されるのかを調べるため、さまざまな素材や形状のホイールを用いて走行試験を実施しました。それぞれのライダーの評価とホイールの分析結果を突き合わ

せることによって、その合致点を探り、走行性能を高めるために重視すべき特性を導き出しました。その結果、軽さとは関係のない一つの特性に着目し、それを重要特性と結論づけ、新しいホイール設計思想を生み出しました。ホイールは従来、デザイン重視で設計されてきましたが、まずこの重要な特性を最適値に持っていくため、最適形状を解析によって導き出し、それを基にデザインするという、いわば機能的デザインによるホイールを実現しました。

操縦安定性のメカニズム理解を進め さらなる技術支援を目指していく

こうしたものづくりの流れを変えるインパクトを持った形状創出技術は、2013年のWSBで当社をワールドチャンピオンに導く一翼を担いました。また、レースに限ったことでなく、そうした優れたレース仕様車の設計の基となる重要パラメータをつかんでいるため、それを高性能な市販車の開発に活かすことも可能となりました。

現在も、走行計測と解析を用いた分析による改良を継続しており、目標とするレベルの操縦安定性を実現するためには、どのような仕様であるべきかを理論的に究明しています。また、市販車の開発で使える設計技術にするため、個々の機能部品についても定量化を図り、開発を効率的に行う取り組みを継続しています。

これらの技術は、2015年春に発売された新フラッグシッ



2013年のスーパーバイク世界選手権で優勝したモデル



圧倒的なパワーと高い次元の操縦安定性を備えたスーパーチャージャー搭載「Ninja H2R」

プロモデルNinja H2/H2Rにも、ふんだんに盛り込まれています。まずは、要求性能に基づき創出した、フロントとリアで異なる形状のホイールの採用です。また、特殊な片持ちタイプのスイングアームについても、これらの技術を駆使することにより、「形状×剛性×操縦性」が最適にコントロールされたスイングアームを実現することができました。

新フラッグシップモデルがたいへん魅力あるモーターサイクルとして完成し世に送り出されたことは、技術開発本部のメンバーに大きな喜びと、今後に向けてのさらに高いモチベーションをもたらしました。これからも、開発を支える技術構築に尽力したいと考えています。



開発者たち

鉄道車両を見守るセンシング技術の進化

— より安全・快適な鉄道車両を目指して —



環境に優しい大量輸送インフラとして世界的に脚光を浴びる鉄道車両。その足元には安全を常に見守る「技術の目」が活躍しています。川崎重工が独自のセンシング技術により実用化した台車状態監視装置「BIDS (Bogie Instability Detection System)」は、高速鉄道車両の安全を支えるコア製品としてグローバルに活躍中。今後は、さらに監視機能を高め、故障や劣化を自ら診断する先進的で安全な鉄道車両の実現を目指します。



三津江 雅幸
Masayuki Mitsue

技術開発本部
システム技術開発センター
制御システム開発部 第三課
基幹職

鉄道車両の安全・安定運転を見守る センシング技術との出会い

多くの乗客を乗せて走る鉄道車両は、ひとたび事故が起これば多くの人命が危険にさらされる恐れもあるため、その安全性を確保するための技術革新は車両メーカーにとって極めて重要なテーマです。

当社は鉄道車両の国内トップメーカーとして、鉄道事業者とともに車両の安全・安定走行、安全停止、耐衝突性能向上、軌道・駅での安全確保に取り組んでいますが、その中でも安全・安定走行の確保には、車両および地上設備（軌道や架線など）の検査・整備が極めて重要、かつ多くの時間と労力を要しています。当社ではこれらの作業を迅速かつ確実に実施する装置の実用化にも取り組んでおり、その中でセンシング技術、すなわち「対象とする物理現象をセンサにより数値化して解析・識別する技術」を駆使してこれらの課題に取り組んできました。

鉄道車両の安全を支える製品として、技術開発本部が取

り組んだものの一つに「軌道アラームシステム（営業用軌道検測装置）」があります。当時、新幹線の軌道（線路）点検は、「ドクターイエロー」と呼ばれる新幹線電気軌道総合試験車を10日に1回程度走らせることで行われてきましたが、新幹線の営業速度が時速300kmを超え、さらにタイヤが過密になる中、点検頻度を上げて安全性を確保すべきだというニーズが出てきました。そこで、日々営業運行する車両に搭載できる監視システムの開発に着手し、試験車両による性能評価を経て、1997年3月の500系新幹線の営業開始とともに運用を開始しました。車両の上下・左右の揺れを検知する本システムは、軌道に異常の兆候を認められた際に無線で情報を発信するなど、安全性確保に有益な情報をリアルタイムに提供します。この軌道アラームシステムは現在も新幹線の軌道保守に役立てられており、鉄道車両の安全確保の重要性とそれを実現する技術者としての責任と誇りを意識するきっかけとなりました。

台湾高速鉄道向けに 国内では前例のないセンサシステムを開発

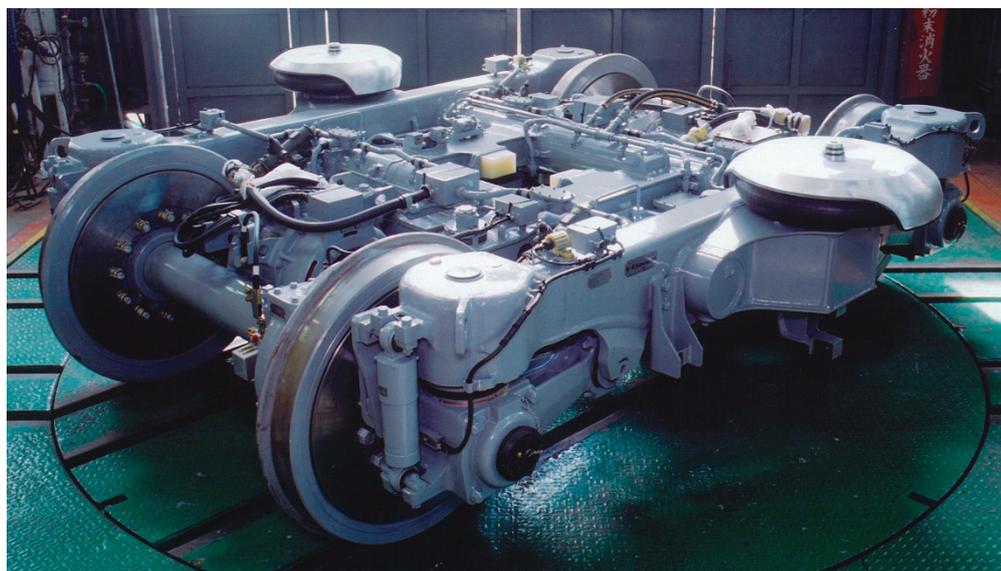
軌道アラームシステムの開発に続いて、新型軌道中心間測定システム（高速度カメラとレーザセンサの活用により高速走行しながら隣接軌道との距離を計測）を開発するなど、鉄道車両の安全確保を担うシステムの開発・実用化に取り組んでいた技術開発本部に、カンパニーから新たな挑戦の話が舞い込んできました。

「当社が初めて海外に納入する高速鉄道車両に最新の安全技術を盛り込みたい」、これがのちに台湾高速鉄道の全車両に搭載される「台車状態監視装置BIDS」開発の始ま

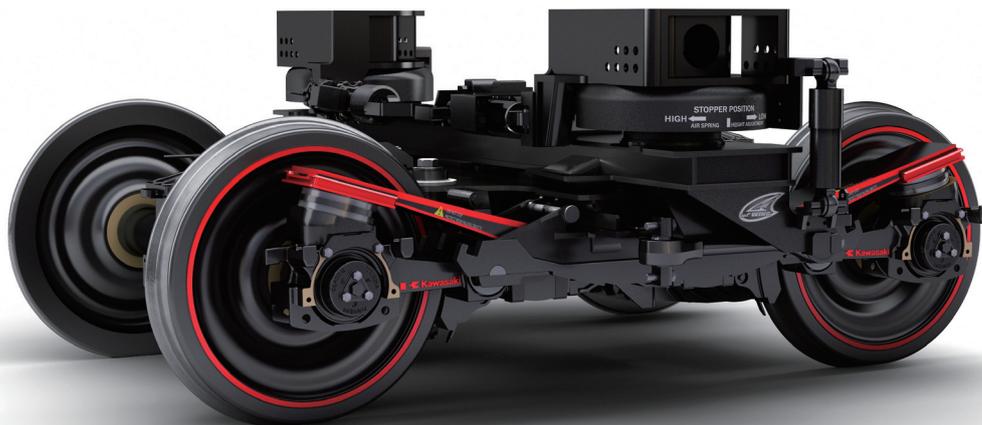
りでした。彼らが盛り込みたいと考えていたのは、高速車両のだ行動などをリアルタイムで監視し、車両の安全・安定走行への信頼性を飛躍的に向上させるシステムでした。だ行動とは、高速走行時に車体と台車が激しく左右に振動し、これが持続する不安定現象を指し、一般的には鉄道車両で高速で走行する際に発生しやすくなると言われています。だ行動は乗り心地を悪化させるだけでなく、最悪の場合には脱線に直結する危険な現象ですので、鉄道車両メーカーとしては、だ行動の発生を防ぐ技術は非常に重要なものです。彼らは台車の構造設計改良に加えて、だ行動につながる異常を早期に察知するセンサシステムをすべての台車に設置することによって信頼性をさらに向上させ、欧州などのグローバル市場をも視野に入れた性能を実現することを切望していました。当社をはじめとする国内メーカーでは前例のない新たなセンサシステム開発への挑戦です。

この装置のキーテクノロジーは、センシングと判定アルゴリズムの2つです。センシングは、対象物の動きなどの物理量を数値化する技術で、判定アルゴリズムは、その数値を加工して有益な情報として取り出す技術です。両者はともに重要な要素技術ですが、このプロジェクトでは特に前者のセンサ設計開発で苦しめられました。

このセンシング機能の実現に向けて事前検討を行った結果、車両の走行状態を正確に捉えるためには、車両の振動を検出するセンサを台車上に設置する必要があることがわかりました。しかし、台車は風雨や高低温多湿に直接さらされるだけでなく、レール上を走行する車輪からの大きな振動や、駆動用モータからの強大な電磁ノイズの影響を受けるなど、センサを設置するという点において非常に劣悪な環境です。そのような場所で安定して台車の状態を検出



台湾高速鉄道車両の安全・安定走行を支える状態監視装置搭載台車



炭素繊維強化プラスチックを用いた次世代鉄道車両台車「efWING[®]」

し、しかも限りなくメンテナンスフリーで使用できるセンサを設計する必要がありました。

軌道アラームシステムなどのこれまでの開発ノウハウをベースに、カンパニーの設計部門をはじめとして技術開発本部の振動や電磁解析メンバーの支援も受け、設計着手から約2年後の2004年、台湾高速新幹線の全車両に搭載され、神戸港から台湾に向けて船積みされていきました。

最終試験走行でまさかの破壊現象が連発 営業開始日が迫る中での原因究明

台湾に陸揚げされた真新しい新幹線車両は、現地の軌道・付帯設備が整うのを待って、いよいよ試験走行を開始しました。ところが試験走行を重ねる中で、台車に取り付けたセンサが次々に破壊されるという想定外の事態が発生しました。営業開始までの限られた時間内に対策を講じな



海外向けオリジナル高速車両「efSET[®]」

ければ、開業そのものが危ぶまれます。カンパニーの担当者とともに現地へ駆けつけ、焦りを感じつつ原因究明を急ぎました。

台湾での試験走行データの取得と現象解析と並行して、国内の開発試験設備で再現テストを繰り返した結果、原因は想定を大幅に超える強大なサージ電流（急激な電圧変化などによる瞬間的な大電流で、電子機器に致命的な損傷を与えることがあるもの）であることが判明しました。実は納車後、長期間にわたって走行することなく車両が放置されたことから車輪やレールが錆びてしまい、通電時に台車内で極めて大きな、想定外の電位差が発生していたのです。この雷のような電位差に対して、センサ内の耐力が不足していたことが直接の原因でした。さっそく構成部品や内部部品の絶縁耐性が向上するよう設計を見直し、ラボでの試験で問題ないことを確認しました。あとは、調達・製造部門の協力も得て、納入全数への対策を完了しました。その後、台湾高速鉄道は2007年1月に営業運転を開始し、台車状態監視装置BIDSはその安全・安定走行を支え続けています。

センシングとアルゴリズムの力で 新しいメンテナンスシステムを実現

今回開発した台車状態監視装置BIDSは、今後、当社の次世代鉄道車両台車「efWING®」にも搭載される予定です。「efWING®」は、台車フレームの主構造に炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を用いた革新的な台車であり、大幅な軽量化によりエネルギーコストの大幅な削減への貢献が期待されています。ここではだ行動の監視に加えて、台車部品として世界で初めて採用されたCFRPの健全性を診断する機能を導入する予定です。また、車両としては、海外市場で競合メーカーに打ち勝つための世界標準に沿った自社開発のオリジナル車両「efSET®」を開発しており、これらの組み合わせにより、川崎重工ならではの先進的で安全な鉄道車両の実現を目指しています。

今回紹介したBIDS開発の経験も活かして、鉄道車両をはじめとする当社製品の安全かつ安定した稼働を実現することによって、顧客満足度の向上に貢献していきたいと考えています。



開発者たち

成形加工プロセスの技術革新

— 航空機ボディの完全自動成形技術の確立 —



航空機の「顔」とも言えるフロント部分の外板。滑らかな美しい3次元曲面を描くこの金属板は、長さ8m、厚み0.3～5mmという薄く巨大なフラット板を金属成形加工技術「シートストレッチャ」によって自動成形したもの。従来、熟練作業者が経験をもとに手動で行ってきた成形加工を機械による完全自動化へ。その挑戦の道のりをご紹介します。



木村 剛
Tsuyoshi Kimura

技術開発本部
システム技術開発センター
生産技術開発部 第二課
主席研究員
技術士（機械部門）

川崎重工にとって初となる 成形加工プロセスへの挑戦

さまざまな形をした数多くの金属部品からなるKawasaki製品において、各部品をいかに「高精度・短納期・低コスト」で作るかは、製品の競争力の向上に大きく影響する重要なポイントです。技術開発本部ではかねてより、そうした観点から金属加工分野の技術革新に取り組んできましたが、その一つが「成形加工」です。成形加工は、熱や圧力、機械力などを用いて金属材を変形させる方法で、他の加工方法に比べて高い生産性が得られる一方、技術向上においては難度の高い課題を多く抱えたプロセスと言えます。

最初に手がけたのは、高圧水を用いた「ハイドロフォーミング」と呼ばれる成形加工技術の開発です。ターゲットにしたパーツは従来、複数の金属材を溶接して設計形状に仕上げる「接合加工」によって製造していた部品です。これらを、管材に高圧水を送り込むことによって一体成形し、性能向上とコストダウンの両方を可能にする最適形状を実現するという試みです。ただし、この技術は当社でも初め

でのチャレンジとなるため、技術的な知見がない中で、さまざまな試行錯誤を繰り返しながら技術を確立していきました。

基盤技術となるのは、高圧水をうまくコントロールする「高圧技術」、そして実機と同じ環境を再現したコンピュータ上で仮想成形実験を行う「成形シミュレーション技術」です。実は前者の「高圧技術」については、入社当初に高圧水を用いて部品を切断加工する「ウォータージェット」という技術の開発に携わっていたことから、その経験をここで大いに役立てることができました。また逆に後者の「成形シミュレーション技術」については、ここでいろいろと試行錯誤した経験が、後の研究開発テーマでも活躍する重要な技術知見となりました。こうして、二輪車やガスタービンに用いる一部の部品についてハイドロフォーミングによる成形に成功し、複数部品の一体成形を実現するなど、一定の成果を得るに至りました。

成形技術のポテンシャルの高さを実感した後、次に着手したのが「ストレッチフォーミング」です。高圧水を用いるハイドロフォーミングに対し、ストレッチフォーミングは文字通り形材を引っ張りながら金型に巻き付けていく成形方法です。手がけたのは、リニア鉄道車両の構体フレームと呼ばれる部品で、形材をゆるやかな曲線を描くように曲げながら成形します。形材を引っ張る方向や力、タイミングといった各種条件の設定如何では、ねじれやしわが発生してしまうため、さまざまな条件設定でシミュレーションすることにより、設計通りの形状を得られる設定を導き出していきました。これらの開発プロセスを通して、ストレッチフォーミングの基礎技術を蓄積していったと言えます。

革新的プロジェクトの始動 そして見えてきた難課題

そしていよいよ2010年、これまでの開発成果を大きく飛躍させるミッションに携わることとなりました。航空機ボディのシートストレッチ加工プロジェクトです。航空機ボディは薄い金属板でできていますが、もちろんそれぞれの箇所に求められる理想の形状があります。従来は、熟練した作業者がストレッチャ機を完全手動で操作することにより成形していましたが、それでは量産に対応できません。より低コスト・スピーディ・高精度に製造するために、新型ストレッチャ機の導入により完全自動のストレッチ加工を実現すること、それが本プロジェクトのミッションでした。

ところが、越えなければならないハードルは極めて高いものでした。まずは扱う素材ですが、対象となる板材は長さも厚みもさまざまで、それぞれに異なる成形技術が求められます。次に設計形状で、以前に手がけた車両リニア構体フレームでは単一方向に曲げるシンプルな成形でしたが、航空機ボディは複雑な形状のままに3次元曲面ですので、成形難度は格段に高まります。板材となる最も大きな金属板は長さ最大8m、板厚わずか2mm、巨大で極薄のこの金属板を引っ張りながら金型に巻き付ける——、それは、ひっくり返したサラダボウルに食品ラップをしわ無く巻き付けるようなものです。しかもそれを、機械で自動的に行う…。この難プロジェクトに、シートストレッチャ機を製造する川崎油工(株)と航空宇宙カンパニー、そして技術開発本部のスペシャリスト達を集めたチームで臨むこととなりました。



ストレッチフォーミングを適用した航空機（固定翼哨戒機：P-1）

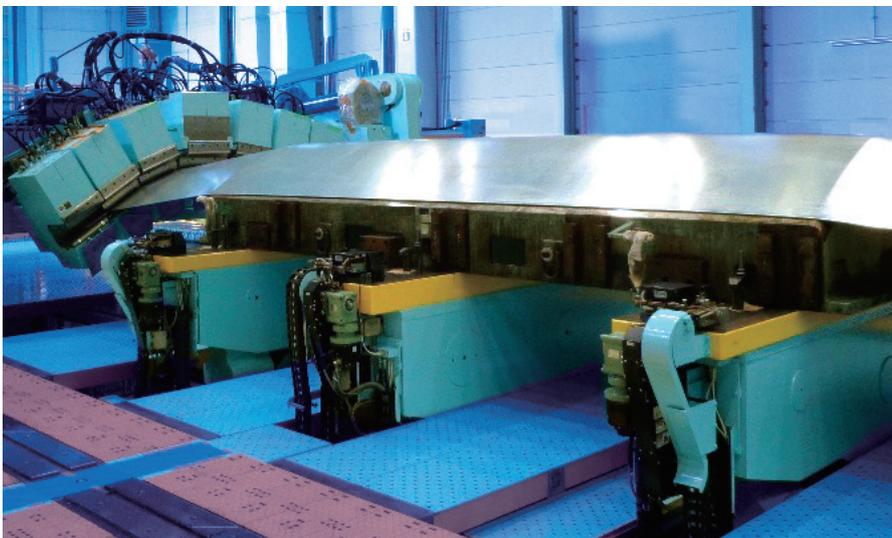


板材を力制御により巧みにつかむジョー（把持機構）

筆者らの担当は、成形加工条件の選定で、いわば設計通りの成形を実現するために、どのようなプログラム設定で機械を動かすかを検討する役割です。まず着手したのは、金型の調査です。工場の各所に点在する600を超えるすべての金型を形状測定し、一つ一つデータベース化しました。次の課題分析では、現行のストレッチャ機を用いて手で成形加工する際に発生している課題をすべて洗い出し、それらを特徴別に分類しました。中でも最も大きな課題となった事象が「しわ」の発生でした。板材を引っ張る機械のアームが思うように動かないことによって発生する「端部しわ」、そして、引っ張る強さやタイミングなど機械の動かし方が原因で発生する「縦しわ」です。新たに導入した新型機で、これらの課題をどう克服するか、試行錯誤の始まりです。

課題攻略への道を開いた 熟練作業者との対話

用いたのは、ハイドロフォーミングの開発時代から知見を蓄積してきた成形シミュレーション技術です。ところが検討を開始すると、実機試験では確かに現出したしわが、シミュレーションでは発生しません。つまりは、実機環境がシミュレーション上に正しく再現できていないということです。そこで、材料特性や摩擦設定など各種パラメータをすべて見直し、両者の環境の合わせ込みに徹底的に取り組みました。その結果、ようやくシミュレーション上でも同様のしわが発生するようになりました。あとは、そのしわが発生しない条件を見つけ出せばいいわけですが、これが最も困難な課題となりました。板材の各所を引っ張る方向や強さ、タイミングといった諸条件が複雑に絡み合い、



複雑な動作をするストレッチ加工の状況

なかなか最適解に近づけませんでした。

シミュレーションを進める一方で、実はプロジェクト開始当初より、熟練作業者たちへのヒアリング調査を重ねていました。完全手動の機械操作で、いかに目的の3次元曲面を作り出しているのか、その優れた技術ノウハウを解明するためです。しかし話を聞いて返ってくるのは「板材がこういう肌合いになった時に…」などといった、経験に裏打ちされたまさに職人の感覚世界の言葉でした。なかなか肝心のノウハウがつかみきれずにいましたが、それでもヒアリングを繰り返すうちに、ようやく言わんとすることが理解できるようになってきました。熟練作業者が、現場で板材と向き合いながら、長い時間をかけて試行錯誤を繰り返した後にたどり着いた「感覚的なノウハウ」のポイントは、「食品ラップ」と形容できる板材の薄さにありました。強引に力でねじ伏せるように金型に巻き付けても、どこかで無理が生じてしわが発生してしまいます。そうではなく、食品ラップをふわりと優しく皿にかぶせるような感覚で金型に巻き付けていく、その感覚的なイメージにこそしわ攻略のヒントが隠されていたのです。

熟練作業者との対話からヒントを見出して、「ふわっと」巻き付けながらも、しわが発生しないようピンと引っ張るイメージで、シミュレーションをもとに各種条件を割り出し、機械の設定を調整していきました。そしてついに、しわのない美しい3次元曲面をシミュレーション上に描き出すことができました。続いて、実機試験にも成功して、新型シートストレッチャ機による航空機ボディの完全自動成形加工を実現するに至りました。

さらに広くさらに高度に 究極の目標はワンプレスの成形

成形加工技術は、設計段階で描いた理想の形状を実現する基盤技術の一つで、その出来次第で性能にも大きく影響する、まさにものづくりそのものといえます。また、接合や切削といった加工に比べ、成形加工は不要材料を出さないエコな加工技術であり、寄せられる期待も大きいと感じています。しかしながら、これまでさまざまな成形加工技術を開発してきましたが、それが適用できている製品は、まだごく一部に過ぎません。さらに適用範囲を広げる必要があるとともに、今後、「より軽く、強く」というニーズの高まりの中で、対象がさらに扱いきれない材料になっていくことを考えれば、ますます高度な成形加工技術が求められることになるでしょう。

そうした中で、当社製品のものづくりを手がけているという自負のもと、高性能・低コスト・低環境負荷のものづくりに向け、これからも研究開発を進めていく考えです。究極の目標としては、たとえば今は手作業で作っていますが、非常に複雑な形状である新幹線の先頭車両のボディなどを、シートストレッチャ機によるワンプレスで成形加工することでしょうか。それも決して夢物語ではないと考えています。川崎重工の成形加工技術の進展をけん引するメンバーの一員として、ぜひ実現させたいと願っています。



開発者たち

業界トップレベルの効率を誇る下水浄化用曝気ブロワの開発 — オール自社開発で創出した市場優位性 —



曝気とは、下水処理装置内の微生物に酸素を送り込むこと。
当社製曝気用ブロワ「MAGターボ[®]」は、
飛躍的な高効率化とメンテナンスフリーの実現で、
省エネを求める市場から喝采を浴びた高性能機です。
可能にしたのは、業界トップレベルの革新的な駆動システムの開発。
そこには、川崎重工の強みを活かす
機電一体の自社開発へのチャレンジがありました。



松尾 和也
Kazuya Matsuo

技術開発本部
システム技術開発センター
機電システム開発部 第一課
課長

ユーザーの声にこたえる 革新的な曝気用ブロワの実現に向けて

日本各地に設けられた下水処理施設に設置された処理装置内には、汚水中の有機物を分解するための微生物が生息しています。それら微生物の活動を活発にするために、常時新鮮な空気を送り込むのが、「曝気用ブロワ」と呼ばれる装置で、当社は40年間にわたって国内の多数の処理施設に納入してきました。下水処理施設では、電力消費量の40～60%を曝気用ブロワが消費しており、その高効率化・省エネ化の要望は年々高まっています。またブロワは常時稼働する必要があるため、長期間のメンテナンスフリー性も必要になります。

曝気用ブロワには、ちょうど扇風機の羽根のような「羽根車」という部品が付いており、効率よく送風するためには、この羽根車を高速で回転させる必要があります。従来、当社では汎用モータの回転軸に、増速ギヤを取り付けることで羽根車の回転数を上げていました。しかしこの方式で

は、ギヤの摩擦損失などにより、どうしてもエネルギー効率が悪くなってしまいます。また、機械的接触部があり、定期的な開放点検が必要となるため、お客様からは省エネに加えてメンテナンスコストも抑えた機種を望む声が高まっていました。

そこで当社では、羽根車とモータを直結し、モータ自体を高速回転させることによって増速ギヤをなくすとともに、「磁気軸受」を採用することにより、エネルギー損失の大幅な低減とメンテナンスコストの削減を実現する、革新的な新製品の開発にチャレンジすることを決定しました。従来機種では、高速回転するロータ（回転軸）を支持するのにすべり軸受を使っていましたが、この方式だと金属が接触する部分に潤滑油が必要となり、メンテナンス負荷が高くなってしまいます。これを磁気軸受に切り替え、ロータが浮上したままで高速回転する仕組みにしました。これなら機械的接触がないためエネルギー損失を低減でき、さらに潤滑油を使う必要もなくなります。

しかし、目標とする新製品を実現するためには大きな課題がありました。従来、モータなどの電機品は社外からの購入品を組み込んでいましたが、モータと羽根車を一体化した回転体を毎分30,000回転以上の高速で効率よく回転させ、さらにその回転体を磁気軸受で安定して支えるためには、機械・電気双方の性能を最大限引き出す必要がありました。すなわち、機械装置と電機品を一体で設計・開発する「機電一体技術」が求められていたのです。

2003年秋、ガスタービン発電装置など高速回転機械の電機品に関する研究開発に取り組んでいた技術開発本部に、

新型の曝気用ブロワ開発支援の要請が到来しました。曝気用ブロワの運用形態に最適な「モータ」、「磁気軸受」、そしてこれらを駆動する「電源装置と制御装置」の新規開発です。いずれもほぼゼロからのスタートで、求める高速回転レベルでは国内で成功した事例もありません。当社の機電一体技術の大きなステップとなる新たな挑戦が始まりました。

数ミクロンレベルの制御を叶える 磁気軸受制御装置の開発

磁気軸受では、ロータを浮上させる力を得るために電磁石を用います。電磁石とは、磁性材料でできた芯のまわりにコイルを巻き、そこに電気を流すことによって一時的に磁力を発生させるものです。ロータ浮上を高精度で制御する必要があるため、これらのコイルに高精度で通電させることが主な技術テーマとなりました。磁気軸受とロータの間はわずか数百ミクロン程度しかなく、数ミクロンレベルの繊細な制御が求められます。そこで、位置センサによってロータの現在位置を高速に計測して検知したわずかなズレに対して、磁気軸受用に新設計した制御装置が電磁石に流す電流を緻密に調整し、ロータの位置変化を基準位置から数ミクロン以内に抑える性能を実現しました。また、この磁気軸受制御装置には、停電が発生したときにも、高速で回転するロータの浮上を維持して、安全に停止させるための特殊な電源システムを装備しました。停電発生時には高速回転していたモータが瞬時に発電機として回生電力を



高効率かつメンテナンスフリーを実現する磁気軸受を採用した曝気用ブロワ

発生し、この電力によって停電時にもロータの浮上状態を低回転速度まで維持するのです。この機能により停電発生時の軸受やロータの接触損傷を防ぐことができます。

一方、プロワを駆動するモータには、高効率・低損失を特徴とする永久磁石同期電動機を採用し、これを駆動する電源装置には、その駆動源となる高周波の電流波形を生成するインバータ（直流-交流変換器）を新たに開発する必要がありました。インバータの動作周波数が低いと、電流のひずみによってロータの表面が発熱し、熱に弱い磁石が過熱されます。かといってインバータの動作周波数を高くすると、インバータ内の電子回路で損失が高くなって効率低下を招くという、いわばトレードオフの関係にあります。そこで、2台のインバータを設置して、両者の電流増

減のタイミングをずらすという方式（インターリーブ方式）を考案しました。こうして、トレードオフの関係にあった双方の低損失化を両立させて、従来機種和省エネ性能をはるかにしのぐ見通しが得られ、詳細設計、製作が始まりました。

浮上回転していたロータが突如落下 万が一の可能性まで追求して得られたもの

前述の開発課題を乗り越え、いよいよ出荷前試験を迎えました。プロワシステムに組み込んで実際に動かし、各種データを取りながら、正常に駆動するかどうかを検証するのです。緊張の一瞬でしたが、ロータは無事に浮上、位置



機電一体設計により実現した3 MW超電導モータ



機電一体設計を活用した将来の船用推進システム（オフショア船のイメージ）

精度も合格点です。ところが、モータの回転数を上げていくと、数万回転に達したところで突然、浮いていたロータが落下して緊急停止するというトラブルが発生しました。早速、カンパニーの担当者と原因究明に着手しましたが、ロータ落下直前の振動など計測データにはおかしな兆候は見られず、また軸受やモータなどにも異常は見当たりません。ところが、制御装置のデータと内部の電子回路の確認を進める中で、電源駆動用の半導体部品の一つが破損していることが判明しました。事前に単体試験を何度も繰り返して持ち込んだにも関わらず発生してしまったトラブルでした。いくら見直しても電子回路に問題は見当たらず、また試験を繰り返しても再発しません。しかし、半導体部品が壊れたということは、何かしら異状があったということです。電子回路内の動作波形のチェックを繰り返しますが、データには異常な波形は見当たりません。それでも根気よく検証を続けた結果、電子回路内のパルス信号が数十万回に1回程度、すなわち数十秒に1回程度欠落するケースを発見しました。一部のIC（集積回路）部品が周囲環境の電磁ノイズで誤動作し、電源駆動用の半導体部品の破壊に至っていたのです。万が一の可能性まで想定した回路設計の重要性、ノイズと対峙して対応することの重要性を改めて認識する機会となりました。

オール自社開発によって創出した 圧倒的なアドバンテージ

こうして完成したMAGターボ[®]は、2007年に初号機が出荷されました。インバータ制御式による高速電動機のロータの軸端に、羽根車を直接取り付け付けたプロワで飛躍的な高

効率化を叶えるとともに、潤滑油が不要な磁気軸受の採用によって長期間のメンテナンスフリーも実現した、まさにユーザーの求める「夢の曝気用プロワ」でした。他社を圧倒する総合効率を誇るMAGターボ[®]は、市場でも強力なアドバンテージを発揮し、発売以降、年間10~20台ペースで出荷されていて、すでに80台を超える納入実績を上げています。実際、その省エネ効果も高く評価されており、MAGターボ[®]を導入いただいた大都市圏の処理場では、曝気関係の電力について大幅なコストダウンを達成しています。また信頼性も抜群で、2007年に発生した震度6の能登半島地震の際も、富山県に納入されていたMAGターボ[®]は安定稼働を続けていました。

この分野において、当社が特に強みを持つのは大型高速回転機などの技術難度の高い領域です。そこで有する当社の強みを最大限に活かすには、製品の隅々まで「川崎重工のものづくり」を反映させる必要がありました。今回のMAGターボ[®]開発においては、プロワ本体はもとより、モータ、電源装置、そして磁気軸受制御装置に至るまで、すべて自社で開発・設計・製造しています。こうした機電一体の自社開発は、今後の当社の製品にとって、その市場競争力を向上させるために極めて有効な開発手法になると確信しています。

現在、機電一体技術のさらなる展開として、将来の船用推進システムとして期待される大型超電導モータや、オフショア船などのハイブリッド推進システムの開発にも着手しています。これからも川崎重工ならではのものづくりを牽引し、地球環境の未来のためにさらなる高効率化の実現にチャレンジしていきたいと考えています。



開発者たち

フルードパワー製品のさらなる効率追求 — トップを目指し、挑んだ限界を超える戦い —



競合メーカーがひしめき合い、
激しい性能競争が繰り広げられる油圧機器分野。
川崎重工はそこで世界トップブランドを目指しています。
今後そのポジションを維持するために求められるのが
頭一つ抜きん出た高効率の性能。
すでに限界に達しているとされる効率追求のその先へ。
これは、いわば限界を超える戦いの記録です。



野村 陵
Ryo Nomura

技術開発本部
技術研究所
機械システム研究部 研究三課
基幹職
工学博士

油圧機器効率向上プロジェクトのメンバーに

学生時代、流体力学の研究を行っていましたが、入社後、まず「超音速風洞」の開発に携わりました。風洞とは、ロケットや航空機の開発に用いる模型試験用の装置で、数m四方のトンネルのような筒に超音速の気流が流れるようになっています。ご存じのようにロケットや航空機の評価基準は非常に厳しく、極めて高い精度で一様化された気流が求められました。そのため流体解析技術を用いて、壁の形状をミリ以下の単位で調整するなど繊細な気流制御を実現しました。結果、要求性能を達成した風洞は(独)宇宙航空研究開発機構 JAXA に納入され、流体解析技術の有用性を認識しました。こうして流体力学の専門家となり、2005年、これまで全く携わったことのない油圧機器の効率化プロジェクトの一員となりました。

油圧機器といっても一般にはあまりなじみがないかもしれませんが、建設現場で活躍する油圧ショベルなどの心臓部として使われている重要なパーツです。この油圧ショベルは大きな力を発揮し、重たい土砂を次々とすくいますが、



油圧機器が搭載されたパワーショベル（イメージ）

その強大な力を作り出しているのが、「油圧ポンプ」に代表される各種油圧機器です。油圧機器の特徴は、比較的小型の装置で大きな力を作り出せる点にあります。出力密度が大きいため、同じパワーなら電動機よりも小型化が可能です。

油圧ショベルは、まずエンジンが油圧ポンプを回転させ、このポンプが高圧油を吐き出す、すなわち回転力を油圧力に変換する仕組みになっています。この吐き出された高圧の油は、油圧ショベルのアームなど各所のシリンダへと流し込まれ、油の持つ圧力によってアームを曲げるなどの動作をさせています。この際、各所に油を振り分ける機能を果たすのが「コントロールバルブ」です。

当社は、これら油圧ポンプ、コントロールバルブ、旋回モータといった各種油圧機器を製造していますが、こうした油圧機器メーカーは世界に多数あり、激しい性能競争を繰り返しています。その中で川崎重工は世界トップブランドのポジションを目指していますので、常にさらなる性能向上にチャレンジしていかなければなりません。とはいえ、当社は約50年という長きにわたる油圧機器開発を通して、着実に技術を進展させ、より高性能・高効率を実現してきました。もはや、改良の余地がほぼないと考えられるほどに洗練を極めた製品、それが油圧機器でした。たとえば、プロジェクトに招集された当時の油圧ポンプの効率（ポンプに与えられたエネルギーが、ポンプの力として無駄なく使われる割合）は実に90%に達していました。この限界とも思われる壁を越えて、さらなる高効率化を実現し、シェ

ア拡大を図る、本プロジェクトのミッションは、限界への挑戦ではなく、限界を超える戦いと言えました。

複雑きわまりない損失の仕組み 油圧ポンプをゼロベースで見つめ直すところから

油圧ポンプの効率を上げるためには、大きく分類すると、「機械損失」と「容積損失」の2つの損失を低減させる必要があります。油圧ポンプの駆動軸は毎分約2,000回転で回転しており、駆動軸と連動する回転パーツ同士が干渉して摩擦が起こると、それがブレーキとなって効率が落ちる「機械損失」を招きます。また激しい摩擦は故障の原因にもなるため、油圧ポンプ内では、パーツ間に意図的に設けられた隙間から油を少量ずつ漏らし、表面に潤滑油膜が形成されるようにしています。この潤滑油として使われる油は、本来の目的であるポンプからの吐出油としては使われないため、「容積損失」となってしまいます。摩擦を避けようと潤滑油を多くすると、機械損失は低減されるものの容積損失は増加してしまうという、両者は二律背反の関係にあるわけです。さらに細かく見ていくと損失はいくつかに分類され、それぞれの低減が求められる一方で、二律背反の関係が複雑に絡み合うため、高効率化への道筋は容易なものではありませんでした。

技術開発本部がまず行ったことは、油圧ポンプの機構と機能をゼロベースで見つめ直すことでした。そのために、何度もカンパニーに足を運び、分解した複雑な要素部品を

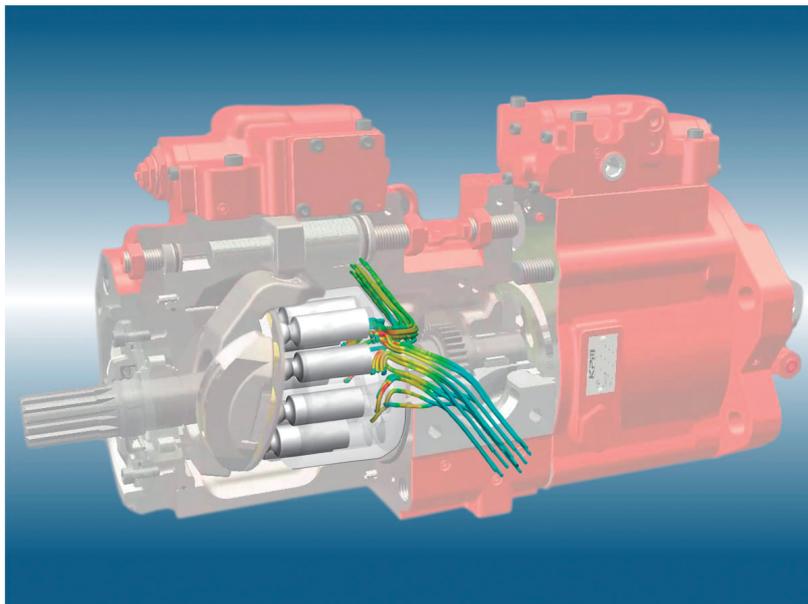


高度な擦り合わせ技術による高効率油圧ポンプ

前に、製品設計者に繰り返しヒアリングを行いました。また、半年間カンパニーに身を置いて設計業務を経験したほか、逆にカンパニーから技術開発本部に人材を迎えるなどして積極的な技術交流を図り、カンパニーと技術開発本部それぞれで保有する高度なテクノロジーをお互いに共有しながら一丸となって取り組みました。

このようにして製品理解を深めながら、技術開発本部として解析技術や性能評価への取り組みを進めていきました。「HYPAM」という独自の性能評価設備を用いての高

度な計測と、シミュレーションによる検証の繰り返しです。前述の機械損失と容積損失の理想的なバランス点を探るべく、さまざまな条件・形状でテストを実施しました。具体的には、回転数やトルク、圧力といった各種の性能を計測したり、高速度カメラで潤滑油の漏れる現象を分析したりといった検証を、何百回も重ねました。そして、得られた計測データをもとに、機構解析や流体解析などの各種シミュレーションを行い、各パーツの関係性が抵抗や損失にどう影響するかを一つずつひもといていきました。



複雑な油の流れ解析によるポンプの高効率化

一気に現れ始めた改良効果 ふたを開ければ損失30%低減を達成

気がつけばプロジェクト始動から、あっという間に数年が経過していました。その間、目に見える成果は一切ないという厳しい状況でした。現状を把握するだけでも非常に難しく、改良の方向を見出すことができずにいたのです。それでも決してあきらめることなく、一つ一つの現象を根気よくつかんでいくうちに、膨大なデータが蓄積され、数多くの仮説検証結果がそろってきました。同時に、個々の部品についてミクロンレベルで最適解を導き出すことにより、一つ一つは小さいものの数多くの改良点が見つかるようになりました。中には、従来、効率にはほぼ無関係と考えられていたものが、実は大きな影響を及ぼすことが証明された、画期的な発見もありました。いったん改良点を見出し始めると、数年がかりで蓄積してきた膨大な裏づけデータに助けられ、目に見える効果が一気に現れ始めました。

パーツごとの最適化を図るミクロな視点と、油圧システム全体としての最適化を図るマクロな視点の両方から検討を重ね、従来手法では着目していなかったところまで検討対象とすることによって、最終的に、エネルギー損失を30%低減させることに成功しました。限界とされていた90%の効率を93%へと飛躍的に向上させ、世界トップレベ

ルと言える効率を達成しました。現在、当社はショベル分野における油圧ポンプ、コントロールバルブ、旋回モータでは世界トップシェアを誇りますが、本プロジェクトの成果は、このポジションの維持を支えるものであると同時に、トップメーカーだからこそ果たさなければならぬ環境負荷低減という命題に応えるものだと言えます。

現在は、プロジェクト始動時の数人から50人規模に増加したメンバーで、油圧機器製品の効率向上や新製品開発に取り組んでいます。油圧は「Fluid (流体) Power」と称される通り、流体機械の一つに数えられます。今後は油圧ポンプだけでなく、モータやバルブなど他製品の性能向上にも貢献していきたいと考えています。また、油圧機器は建設機械のシステム構成品あるいは制御機器であるとの観点に立ち、建設機械システムの中で最適に用いられる製品の開発にマクロな視点まで幅を広げて取り組んでいきます。

油圧機器の開発は、幅広い専門知識に加えミクロ・マクロ両方の視点が求められ、技術者の守備範囲が広い分、非常にやりがい大きい分野です。これからも世界のトップメーカーであり続けるために、カンパニーと一体となり、多くの技術者と協力しながら、限界を超える高性能製品の開発を目指します。



開発者たち

安全技術で生産現場を改革 — 人間とロボットが協働する職場へ —



先進的な安全技術で人間とロボットの協働を可能とした当社独自のハンドガイドシステム。同システムの登場により、これまで自動化が進んでいなかった生産現場でも人間とロボットの協働を強力に推進。未来の生産現場実現に向けた挑戦をご紹介します。



高山 裕規
Yuuki Takayama

技術開発本部
システム技術開発センター
制御システム開発部 第二課
係員

ロボットの強みを最大限に引き出し 生産工程の自動化を実現

経済成長が目覚ましい新興国において、自動車をはじめさまざまな製品の生産工場がまたたく間に増加しています。しかし、新興国の工場では、現地採用人員の定着率の低さから、労働力確保の困難さや、技能不足による品質低下が問題となっています。このような状況の中、当社は産業用ロボットを提供することで、生産現場の要求に応じています。

自動車工場においては、すでに溶接工程や塗装工程においてロボットが活躍していますが、今後はこれまで自動化が進んでいなかった組立工程にもロボットが導入され、生産の効率化が推進されていきます。たとえば、組立工程のひとつである艤装において、ロボットに重量物であるインパネの取り付けを任せるなどすれば、作業員の負担を軽くすることができます。また、成長目覚ましい電気電子分野



巧みに複雑な形状のワークを把持するロボットハンド

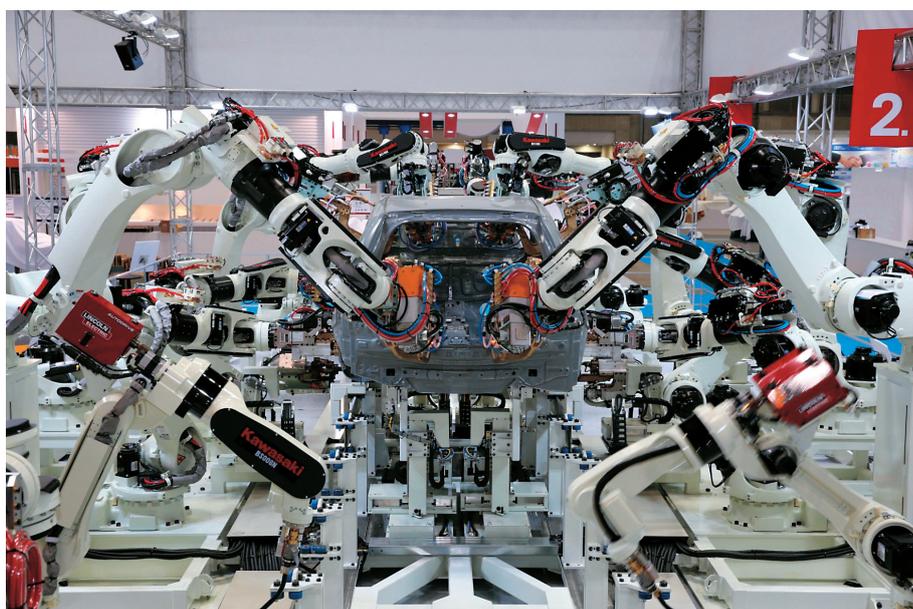
では、ノートPCやタブレットなどの組立において、作業員に代わって長時間にわたり正確に作業を行わせることも考えられます。

これら組立工程の自動化は、ロボットの手となる器用なハンド・ツールや、目となるビジョンセンサなどの高度な機器を駆使して実現されます。油圧バルブ組立工程の自動化を通じて、ロボット導入の効果の大きさとともに、その難しさを実感していますが、困難な自動化を達成すること

で、より安全で効率的な生産現場を実現することも可能です。

人とロボットそれぞれのアドバンテージを共存させた半自動化の協働プラン「ハンドガイドシステム」

一方で、全ての工程に対して、完全自動化が最適とは限りません。高度で複雑化した自動化システムを開発しても、



高度な技術で実現された自動車組立の完全自動化ライン

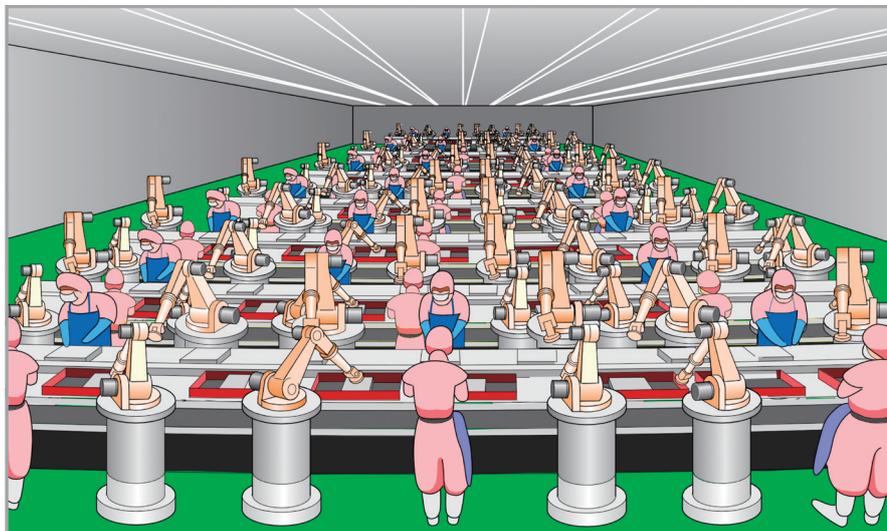
利用経験の少ない新興国の技術者にはメンテナンスが難しく、実際の運用は厳しいというのです。そこでロボットビジネスセンターと協議を重ねて発案したのが、完全自動化ではなく、人間とロボットが力を合わせて作業を行う「協働」を実現しようというアイデアでした。人間がその場に応じた適切な判断を得意とする一方、ロボットはパワフルで疲れを知らないという強みを持っています。この両者のアドバンテージをうまく組み合わせて生産現場の効率化を図ろうという構想が、半自動化の協働プラン「ハンドガイドシステム」でした。部品を組み付ける際の微調整を作業者が行いますので、ロボットにはセンサのような周辺機器が不要となります。このため、メンテナンスが比較的簡単で、高度な専門知識やノウハウを持たない顧客でも導入しやすいので、このシステムを足掛かりとして、ロボットユーザーの裾野を広げていくことが期待できます。

ただしそこには、「安全の確保」という大きな壁がありました。生産現場において安全に対する要求は非常に厳しく、従来、人は稼働中のロボットの動作範囲に立ち入ることができなかつたのです。しかし、「規格に定める措置を実施した場合に協働作業が可能」とするロボットの国際規格改定（2011年）により、「協働」への道が開けました。また当社においても、そうした社会情勢を先読みして、別の開発チームがロボット動作監視安全ユニット「Cubic-S」をすでに開発していました。これは、領域監視と速度監視によってロボットの動作を制御し、人との接触を回避できるようにするものです。こうして安全面でも条件が整って、川崎重工の「ハンドガイドシステム」の開発プロジェクトが発足しました。

社内の生産工程を適用例に 思想を具現化したプロトタイプを開発

顧客案件に向けて事前に検証を行うため、まずは社内の製造工程を適用対象として「ハンドガイドシステム」の思想を具現化したプロトタイプを作ることになりました。対象としたのは、モーターサイクルの最終組立工程です。前輪ユニットを車体に組み付ける工程で、扱う部材の重量は20kgに及びます。現状は、重量をキャンセルしてくれる「ハンドクレーン」という作業ツールの助けを借りて組み付けていますが、全ての製品の組立に対応できるわけではないという点で課題がありました。常に同じ製品の組み付けなら問題ありませんが、将来、同じラインでいろいろな種類の製品を製造する混流生産が進み、前輪ユニットの挿入方向がさまざまになると、ハンドクレーンでは対応が難しくなります。また、ハンドクレーンを用いる際には、常に作業者がそこに付いて操作ハンドルを握っていないといけないという、作業効率を向上させるうえでの限界もありました。

そこで、これらの課題を解決する「ハンドガイドシステム」を導入しようと検討を開始しました。それは、重量20kgに及ぶ前輪ユニットを取り出して運ぶところまでをロボットに任せ、微妙に位置を調整しながらセットする際は人間が手を貸すという協働イメージでした。これなら、人間はセットの時だけ補助すればよく、あとの時間は別の作業に従事できます。また、混流生産しているときに製造する製品の種類が変わっても、ロボットを採用しているため、その動作プログラムを入れ替えることで、たとえば手



単調な繰り返し作業から人を解放するロボット
(人とロボットが協働する生産環境のイメージ)

先のツールを自動で取り替えるなど、柔軟に対応することができます。

ただし、ロボットの動作範囲に作業員が入って補助することになるため、その際の安全確保は絶対条件です。そのため、前述したロボット動作監視安全ユニット「Cubic-S」を用いて、ロボットのアームなどと人間の距離が一定以下になると、ロボットが自ら動作を止める安全機能を搭載しました。人間の位置は各所に設置した安全センサが計測します。センサはロボットにとって、いわば「目」です。死角をつくらず、どの方向から人が近づいても確実に検知するように、適切な位置にセンサを配置することにより、求められる安全基準がクリアできる機能を備えました。

また、操作性についてもクリアしなければならない課題がありました。新興国での導入を想定し、利用経験の少ない作業員でも容易に扱えるよう、簡単かつ正確にロボット動作の指令入力を行うコントローラが求められたのです。そこで採用したのが、直感的に操作が可能なジョイスティックでした。よくゲームの入力機として用いられるものですが、レバーを倒すと、それと同じ方向へアームが動いていきます。これなら、たとえ予備知識のない作業員でも比較的簡単に操作が可能です。こうして操作性についても、産業用ロボットとしては新しいアイデアを盛り込むことで、課題をクリアしました。

「国際ロボット展」で注目を浴びたプロトタイプ 次なるインターフェースそしてその先へ

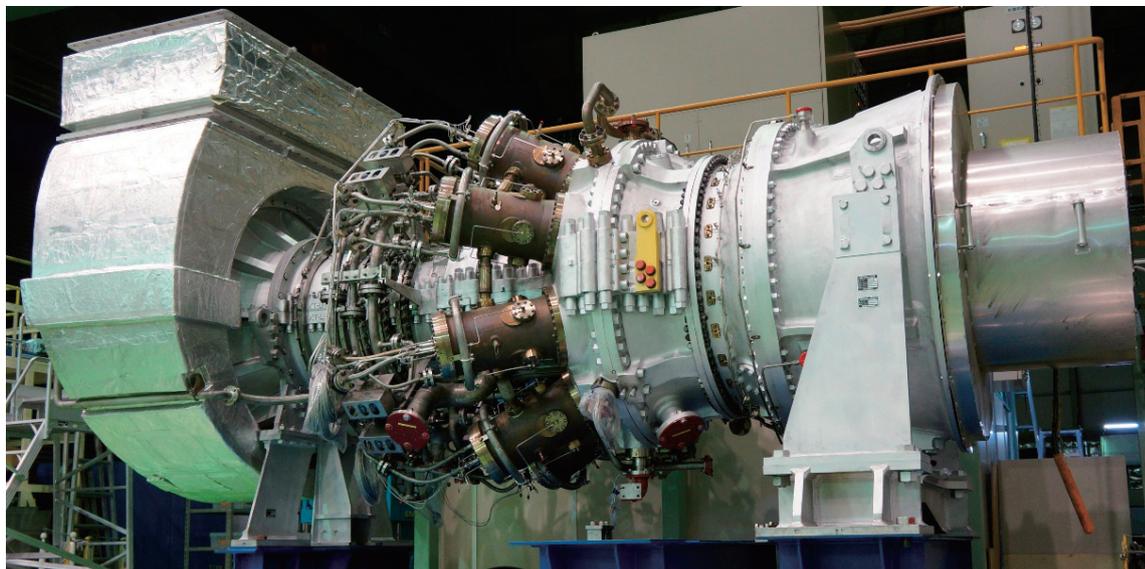
ハンドガイドシステムのプロトタイプの開発に成功し、2013年に東京で開かれた「国際ロボット展」で発表しました。海外メーカーも数多く訪れていた会場で、新しい考え方を提示したこのプロトタイプは大いに注目を浴び、来場者の好評を得ました。ただ一方で、「レバー操作に慣れ親しんでいないので、感覚をつかむのが難しい」という感想も聞かれました。それは今後に向けた課題ととらえ、より直感的な操作ができるよう、人間が操作する力を感じ取るセンサの採用を検討するなど、すでに次なるインターフェースの開発に向けて動き出しています。

本来、産業用ロボットの導入は、人間との置き換えによって、省人化や品質向上のメリットを得ることを目的としており、これは将来も大きくは変わりません。しかしながら、生産現場には完全自動化を進めにくい工程も少なからず存在し、それらには、今回ご紹介したハンドガイドシステムという協働スタイルが活躍します。これからロボットを導入する客先はもちろんのこと、既存のユーザー、あるいは社内の生産拠点においても、新たな価値を提供する生産設備として有効活用できるものと考えています。生産現場の革新を目指し、夢に向かって一つ一つ、ロボットシステムを進化させていきたいと思えます。



開発者たち

ガスタービンの水素燃焼技術の確立 — 来るべき水素社会に向けた先行研究の今 —



燃焼させてもCO₂を排出しないことから
究極のクリーンエネルギーとして注目される水素。
現在は天然ガスを使用しているガスタービンの燃料に
水素を用いることで、CO₂と燃料コストの削減を試みる——。
世界中の企業・大学が覇権をねらって研究を加速させる中、
川崎重工独自の研究開発の最前線を報告します。



堀川 敦史
Atsushi Horikawa

技術開発本部
技術研究所
熱システム研究部 研究二課
主事

天然ガスから水素へ 未利用エネルギーの有効活用

当社は、産業用ガスタービンのパイオニアメーカーとして、純国産・自社開発のガスタービンをかたちにしてきた歴史を持ちます。ガスタービンは通常、「圧縮機・燃焼器・タービン」の3要素から構成されており、圧縮機で加圧した空気に、燃焼器で燃料を投入し燃焼させ、発生した高温高压のガスでタービンを回して、回転運動エネルギーを生み出すという仕組みになっています。一般によく見聞きするピストンエンジンと同様の働きをしますが、ガスタービンは小型軽量で大出力であることが特徴で、航空機のジェットエンジンや火力発電所、工場の自家発電設備、病院や大型施設等の非常用発電に用いられています。

学生時代にガスタービン燃焼の研究を行なっていたので、技術開発本部においても、2012年にリリースされた産業用ガスタービン「L30A」の低NO_x（窒素酸化物）燃焼器の開発を担当し、NO_xの排出量を世界最高レベルに

抑える優れた環境性能の実現に寄与しました。

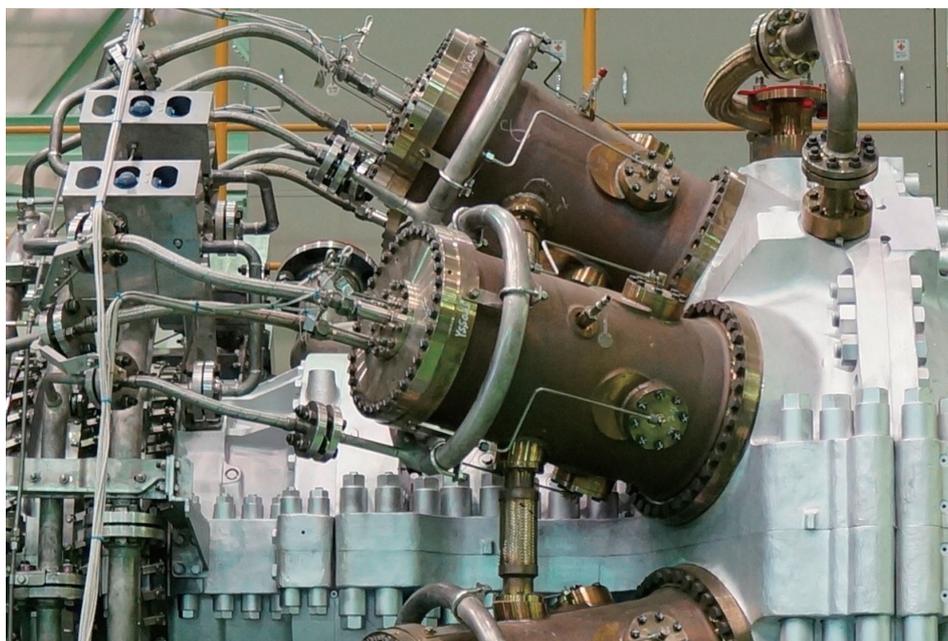
「L30A」の燃焼器開発に取り組んでいた頃、一方で活発化してきた議論がありました。産業用ガスタービンでは通常、燃料に天然ガスを使用していますが、これを水素燃料に切り替えられないかというものです。実は、ガスタービンのユーザーから、工場で生成される副生水素ガスを有効利用できないかというお客様からの声が多く寄せられていました。メーカーによっては化学的な製造プロセスの中で水素が発生しますが、100%に満たない低濃度であるため取り扱いが難しく、ほとんど利用されることなく燃焼廃棄されていました。それをガスタービンの燃料として有効活用できないかというのです。

こうした余剰副生水素は国内で年間180億 m^3 に及ぶとも言われており、日本の天然ガス需要量の5%に相当します。この副生水素を活用できれば、天然ガスの使用量を減らして燃料コストを削減できるとともに、水素は燃やしても水蒸気しか出ないことからCO₂削減にも貢献します。そこで、水素ガスタービンの開発プロジェクトがスタートし、そのコア技術となる水素燃焼技術の開発を担当することになりました。ガスタービンの主要3要素のうち圧縮機とタービンについてはL30Aのものを流用できるため、プロジェクトの成否は、燃焼器の開発を含めた水素燃焼技術の確立にかかっているという、重責を担っての船出でした。

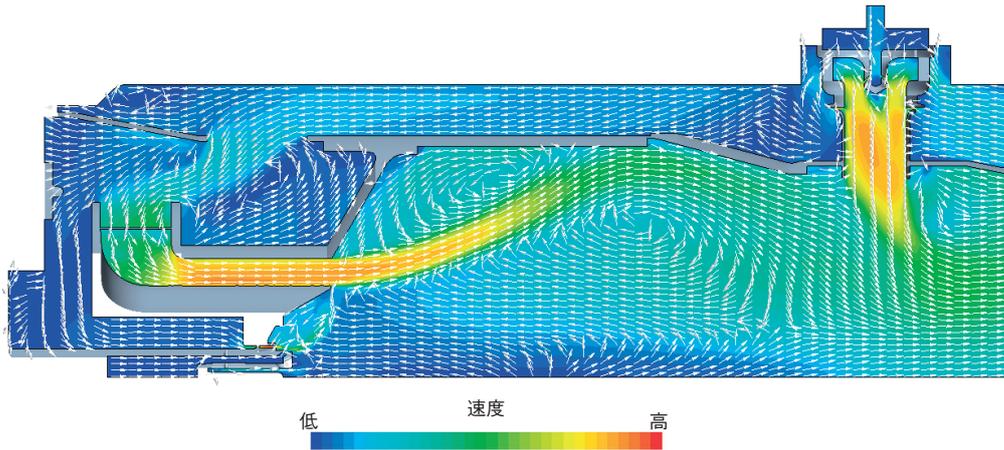
課題は「安定燃焼」と「低NOx化」の実現 水素が本来的に持つ特性との戦い

当社の低NOx燃焼器では、空気と天然ガスをあらかじめ混ぜた燃料ガスを燃焼室内に送り込んで燃やす「希薄予混合燃焼」という方式を採用しており、空気内に天然ガスを送り込んで燃やす「拡散燃焼」と比較すると、NOx発生量を低く抑えられるという大きな利点を持っています。ただし、天然ガスが薄い状態で燃やすため火が消えやすく、燃焼安定性の確保に高い技術を要します。そこで、燃焼室内に適切な旋回流を起こすことで、空気の流動と燃焼反応のバランスを取ります。また希薄予混合燃焼では、燃焼室内の炎が、燃料ガスを送り込む通路内に逆に進入してくる「逆火（ぎゃっか）」のリスクもあります。逆火が起こると熱で部品が焼損することもあるため、確実な対策を施す必要があります。希薄予混合燃焼に係るこれら一連の燃焼技術分野において、当社は世界トップレベルにあります。

そうした技術的知見を十分に活用しながら、水素燃料の活用にも道を開くべく検討をスタートさせました。まず開発対象としたのは、「混焼」技術です。ユーザーの工場内で発生する余剰水素量は限られており、ガスタービンを運転するすべての燃料を水素に置き換えるのは難しいことから、天然ガスに水素を混合して燃やす「混焼」が現実的だと考えたためです。



水素ガスタービンのキーとなる燃焼器



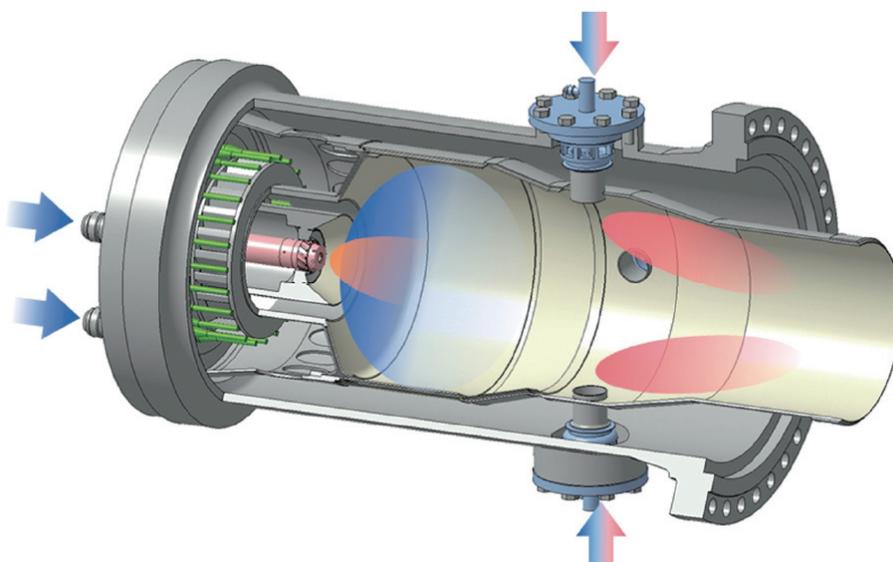
燃焼器内の燃料ガス流れ予測による安定燃焼と低NO_x化の実現

ところが、開発の初期段階からすでに2つの大きな課題が見えていました。「安定燃焼」と「低NO_x化」という、水素が本来的に持つ特性に起因する課題です。水素の燃焼速度は天然ガスのおよそ7倍と反応が速い分、逆火のリスクが高まるということです。実際、これまでと同じ希薄予混合方式を用い、天然ガスのごく僅かな量を水素に換えて実験してみたところ、あっという間に逆火が発生してしまいました。かといって、逆火を避けるために希薄予混合方式から拡散燃焼方式に切り替えると、NO_xは増加してしまいます。さらに水素燃焼時にはNO_x排出量が天然ガスに比べて2倍近くになります。これではいくらCO₂排出量を削減できたとしても、製品としての新たな価値は見いだせません。逆火を起こさない「安定燃焼」と環境負荷を抑えた「低NO_x化」をいかに実現するか、検討を進めていきました。

当社独自の「追焚き燃焼方式」に活路 水素燃焼でも川崎重工らしさを追求

用いたのは、燃焼室内に送り込んだ燃料ガスがどのような気流を描くかを予測する流動解析技術や、燃焼室内における各所の温度変化を予測する燃焼シミュレーション技術などです。さまざまな条件下における燃焼室内の状態を調べながら、課題をクリアする方法を探りました。しかし、シミュレーションや実験を重ねてもなかなか解決策の糸口が見えず、開発は暗礁に乗り上げました。

燃料は、天然ガス／水素と異なるものの、天然ガス燃料のL30AでNO_x排出量を世界最高レベルに抑えることができたのですから、どこかに水素燃料対策のヒントもあるに違いないと考えました。そして着目したのが、低NO_x燃焼に一役買っている当社独自の「追焚き燃焼方式」でした。



希薄予混合燃焼器+追焚き燃焼方式による水素ガスタービン用燃焼器の設計

L30Aの燃焼器には3つのバーナが搭載されています。起動用のパイロットバーナ、ベース燃焼に用いるメインバーナ、そして最大出力を発揮する際に活躍する追焚きバーナです。このうち、パイロットバーナとメインバーナには天然ガスを用い、追焚きバーナについてのみ天然ガスと水素の混焼にすることを思いつきました。メインバーナ付近で一度燃焼した燃料ガスは、追焚きバーナ付近に流れてきた時には温度が1,000度を超える高温で、かつ酸素濃度が低くなっています。こうした高温・低酸素の条件下では燃焼反応は比較的低下するため、この領域で水素を投入したとしても、NOxが発生しにくい穏やかな燃焼になると考えました。

この考え方をベースに、あとはそれをどうすれば実現できるかを検討していきました。まずは、天然ガスと水素と空気という三者の最適な混合についてです。次に、混合した燃料ガスを燃焼室内に送り込む際の最適な噴射速度を調整し、これで逆火の抑止を図ります。さらに、燃焼室内の温度分布のムラを抑制することによって、NOxの低減を図りました。

燃焼器の形状が概ね決まると、次は実際のエンジン条件で性能を確認します。ただしそれには、圧力24気圧、温度500度という高温高压の空気条件が必要です。そのため、ガスタービン燃焼器の大規模な試験設備を保有するドイツのアーヘン工科大学に試験用燃焼器を持ち込み、試験を実施しました。

水を用いない低NOxの水素専焼技術へ 日本のため世界のための技術革新

こうして検討を重ねた結果、天然ガスと水素の混焼により、CO₂排出量を最大3割削減しつつ、NOx排出量は天然ガス100%と同程度まで抑制する燃焼技術を確立しました。もともとは燃焼廃棄していた水素を活用できるこの混焼技術は、お客様に燃料費削減という大きなコストメリットとCO₂削減効果をもたらします。

混焼の次に目指すのは、やはり天然ガス燃料を全量水素に置き換える水素「専焼」技術の確立です。この場合、燃料ガスとは別に蒸気や水を噴射する方法によりNOxの低減を図りますが、発電システムの効率低下が懸念されます。そのため将来的には、蒸気や水を用いない低NOxの水素専焼技術を開発したいとの考えから、海外研究機関と共同研究を進めています。

昨年日本政府から発表された「エネルギー基本計画」には、将来にわたるエネルギーとしての水素の利用がうたわれています。その一翼を担うであろうガスタービン分野において、必ずや水素専焼を実現し、クリーンで豊かな社会の実現に貢献したいと考えています。



開発者たち

3D活用による製品開発プロセスの革新 — 製品ライフサイクルを見通す新視点 —



世界初となる海上LNGプラント「Prelude」に搭載される世界最大の洋上ボイラの製造。大型、短納期に加えて突きつけられた厳しい品質基準。かつてない難しい課題を乗り越えるために新たに取り組んだのは、新しいものづくりへの挑戦。人からモノまで、あらゆる対象を3Dで可視化して検証する取り組みが、製品ライフサイクルのあり方を変えようとしています。



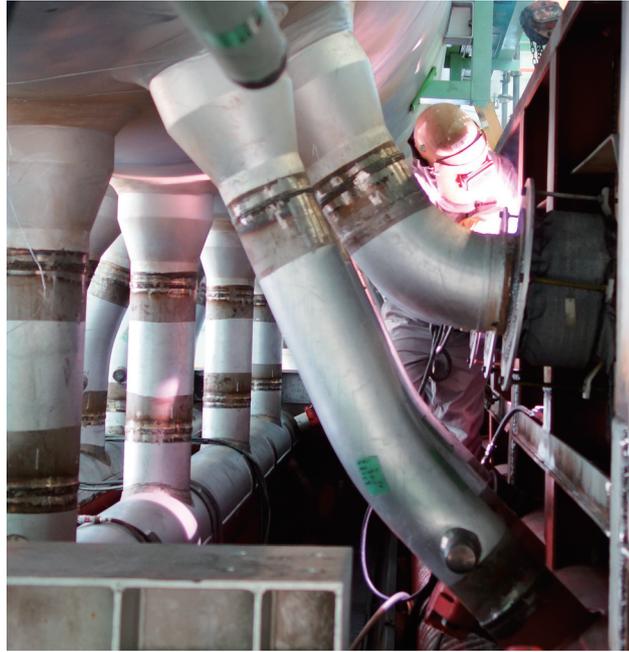
志子田 繁一
Shigekazu Shikoda

技術開発本部
システム技術開発センター
システム統合技術部 第三課
主席研究員

作業員視点で人間工学的検討を

製品開発プロセスを革新し、顧客の要望に応えながら企業として成長を続けるために、他の製造業の例に漏れず、当社の製品についてもライフサイクル全体に渡って改善のための検証を重ねています。その目的によってアプローチの方法はさまざまですが、開発期間の短縮を目的とした取り組みの一つとして、3Dデータを活用した事前検証があります。数値解析によって性能向上を図る手法は、以前から多くの受注製品や社内生産設備に適用されていますのでノウハウの蓄積がありますが、筆者らが着手しているのは、主に製造現場や製品メンテナンスでの作業性向上を目的とした取り組みです。

これまで、自社の工場内で用いる生産設備の設計などを手がける中で、現場ではこちらの思うように受け入れてもらえないケースがありました。真に使いやすい機械を作るにはどうすればいいかを考え抜いた末、使う側の立場で設計することの重要性を再認識するに至りました。つまり、作業する「人間」についてよく考えるということです。そこで、人間工学的な検討を設計に取り入れようと、3D人間モデルを使ったヒューマンシミュレーションを実践し



複数の配管が入り組み困難を極める溶接作業

始めました。このシミュレーションでは、3D CADで仮想的に構築した作業空間の中にさまざまな体型の作業者を配置して任意の作業を行わせ、そのアニメーションを作ることが可能です。製造現場での作業や製品のメンテナンス作業など、内容をあらかじめ推定して3D人間モデルを自在に動かし、機械の操作性や作業性を事前に確認することができますので、これを元に使いやすい機械構造、あるいは作業が効率的に進む作業環境を検証していきます。たとえば、狭い配管の中に入って溶接を行う作業の事前検証を行った際には、もともとの設計では内部の配管が作業員のヘルメットと干渉して所望の作業ができないことが判明

し、支障となる部品の位置変更を設計段階で行うことができました。こうした取り組みを通じて、3Dを活用した人間工学的検討の有効性を実感するとともに、少しずつカンパニーにも認知されていきました。

世界最大の洋上ボイラの製造ライン構築 取り組んだ3Dヒューマンシミュレーション

3D活用技術の可能性を大きく拓いたのが、2011年7月に当社が受注したFLNG（Floating LNG）用ボイラの製造プロジェクトでした。FLNG用ボイラとは、シェル社が建



浮体式洋上天然ガス液化プラント（イメージ）

設する浮体式海洋天然ガス液化プラント (FLNG)「Prelude (プレリュード)」向けの特殊ボイラです。当社にとっては、今後も市場規模の拡大が見込まれる海洋開発に参入し、実績を積むための重要なプロジェクトです。洋上で使用されるボイラとしては世界最大のもので、従来の船用ボイラの最大実績蒸発量は1缶あたり140t/hであるのに対し、FLNG用ボイラは220t/hと、およそ倍近い規模です。また品質については、洋上で半永久的に稼働し続ける必要があることから、ロイド船級規格に加え、シェル社の厳格な設計標準とプロジェクト仕様に忠実に従うことが求められました。加えて、製造部門を悩ませたのが納期でした。従来の船用ボイラは2缶同時製作で、遅くとも1年以内には製造完了というペースで作りますが、今回のFLNG用ボイラでは7缶を1年強の期間で製造するという超短納期です。手戻りが頻発すれば納期を守れないだけでなく、今後の受注活動にも多大な影響を及ぼす可能性がありました。

短納期、高品質、そして当然のように求められる低コストといった必達ミッションを達成するために取り組んだのが、3D活用技術の適用です。大型かつ複雑な構造物であるこの製品を手戻りなく生産するには、極めて緻密な計画と事前の検証が必要になります。3D人間モデルを使用したヒューマンシミュレーションであれば、作業上の問題点を視覚化し、具体的にイメージしながら改善策を導くことができますので、まさに得意分野といえます。実際に

FLNG用ボイラを製造するプラント・環境カンパニー生産本部の担当者と一緒に課題に取り組みました。最初は溶接作業の作業性検証でした。たくさんの細い配管を高密度に溶接して熱交換器に仕上げていく作業はその一例です。配管が溶接されるごとに作業者の姿勢が変わるため、一つ一つ作業を検証し、問題がありそうな箇所については改善策を提案しました。実際、カンパニーの担当者から次々と検討課題を受け、作業現場へ通いつつ3D人間モデルを使った検証を進めました。長時間にわたって辛い姿勢や、品質への影響が懸念される無理な姿勢となりそうな作業箇所を見つけ出し、作業順序の変更や足場設置など、実作業に向けての対策を前もって進めることができました。

工程計画に作業指示書そして作業者教育と 安全確保それぞれに3D技術が独自の視点を提供

プラント・環境カンパニーでは他にも3Dの活用を積極的に進めていました。例えば工程計画の立案です。生産現場を構築する場合、組立作業をいくつかのステージに分ける必要がありますが、その際、各ステージの作業日数を均一にしておかなければ、一斉に製品を動かすことができません。そのため、全工程における実際の作業量を推定して各ステージに振り分ける必要があり、検討には3Dを活用しました。作業者の動作が立体的に表示されるので、一つ



浮体式海洋天然ガス液化プラント (FLNG) 用ボイラ生産工場

一つの作業が無理なく所定時間内に完了できるものであるかを具体的に確認しながら、詳細な検討を行うことができました。たとえば、蒸気ドラムとその下側に位置する熱交換器を間仕切りする、鋼板の搬入方法を検討しました。蒸気ドラムは主要構造物であり、鋼板の設置は必然的に後工程となってしまうため、検討が必要でした。クレーンも使えない狭いスペースに設置するので、人が運べるサイズ・重量にカットし、所定の場所に設置した後、鋼板どうしを溶接して完成させます。まずは3Dで作成した仮想的な作業空間の中で、鋼板の搬入ルートを試行錯誤しながら探して見つけ出しました。次は、見つけた搬入ルートを通して、人の力で安全に運び込むことができるかという観点で検証していききました。他の構造物の間をかいぐりながら鋼板を通していくので、作業員の姿勢や構造物との干渉、鋼板を傾けるタイミングに注意して検証を繰り返し、ついに適切な搬入作業方法を導き出すことができました。こうして各ステージで行う作業を明確にした後、作業の全容を視覚的にとらえられるイメージ図を3D生産シミュレーションによって作成し、関係者で共有しました。

さらに、ポイントとなる重要工程については、作業手順や組立手順が一目でわかるアニメーションを作成し、それをベースに携わる作業員が誰でも同じ作業ができるような作業指示書が仕上がりました。このような3Dを活用した作業指示書は、作業者のスキルアップにも役立ちました。

製品ライフサイクル全体を見通し よりよいものづくりに貢献

これら3D活用技術の適用も手伝って、FLNG用ボイラ7缶は無事出荷することができました。現在は2隻目以降の生産に向けて適用領域をさらに広げるべく、新たな取り組みにチャレンジしています。たとえば、3D計測技術を用いた検査システムの導入です。レーザを照射して物体の形状を計測する3Dスキャナを用いて、製作した部品を実測します。その計測データを3D図面と比較して、設計通りの形状になっているかどうかを判定します。これなら、複雑な構造の部品も比較的短時間で品質チェックすることが可能となります。今後も、こうした新たなチャレンジをカンパニーと一緒にあって取り組んでいき、さらに短納期・高信頼性・低コストでの製造を実現していきます。

また、FLNG用ボイラ以外のプラント製品や、他カンパニーの製品への3D活用技術の適用も始めています。3D活用技術はものづくりの効率化と高品質化を支える一つの手段に過ぎませんが、実際の作業をより具体的にイメージし、今までは実際に製造するまで分からなかったことを事前に把握するのに大いに役立っていると感じています。さらに将来的には、計画から設計、生産、メンテナンスに至る製品ライフサイクル全体において3D活用技術を適用し、製品開発プロセス全体を見通した上で、よりよいものづくりに貢献していきます。



開発者たち

水素プロジェクトの今とこれから — 究極のクリーンエネルギーで実現する新しい未来 —



エネルギーの安定的確保と地球環境保全。
この2つの課題を解決するのが「水素エネルギー」です。
「究極のクリーンエネルギー」と言われる水素を
一般エネルギーとして用いるためのサプライチェーンの確立。
産業界や政府が水素社会に向けて大きく舵を切る中、
川崎重工にしかできないチャレンジが始まっています。

官民挙げて実現を目指す水素社会 川崎重工は従来技術との高い親和性で大きくリード



西村 元彦
Motohiko Nishimura
技術開発本部
技術企画推進センター
水素プロジェクト部
部長
理事
工学博士

カンパニー所属時から、エネルギー分野の研究に従事。現在、水素プロジェクトをけん引。

西村：川崎重工が取り組むCO₂フリー水素プロジェクトの背景には、確かな社会的要請があります。日本のエネルギー事情を考えた時、原子力発電所の増設が困難な社会情勢の下、今後CO₂削減についても責任を果たしていかなければならない中で、「究極のクリーンエネルギー」と言われる水素の活用は、エネルギーセキュリティの確保とCO₂削減の両方の観点から非常に有効な手立てと言えます。

そもそも技術立国の日本は、家庭用燃料電池を世界で初めて商品化したほか、燃料電池車の開発においても世界をリードするなど、世界一の水素利用技術を保有しています。特にここ1～2年は、そうした技術を活かして水素の本格利用に道を開こうとする産業界の動きが活発

化しています。その契機となったのが、自動車メーカーがいわば「燃料電池車量産宣言」をした2013年の東京モーターショーです。実際、トヨタ自動車(株)はその後、2015年度の予定を2014年に前倒しして燃料電池車の市販を開始しました。

一方で政府も、2014年4月11日に採択された「エネルギー基本計画」の中で、今後のエネルギー政策をにらんで水素の利活用推進を明記しています。2020年開催予定の東京オリンピックでは、政府と東京都が「水素オリンピック」として日本の水素利用の先進性を広く訴求する方針で、東京都はそれに向けてさまざまな実証をしているとすでに動き出しています。

このように官民挙げて、来る水素社会をどう実現していくかについて真剣に考え始めているのが現状です。ただし、社内で水素に関する事業構想がスタートしたのは、ずっと以前の2008年頃のことです。当時、CO₂削減にどう取り組んでいくかが盛んに議論されていました。

東：確か、一つは「電動化」の流れで、もう一つが「水素」でしたね。

西村：その通りです。そこで当社の技術的なバックグラウンドを考えた時、水素エネルギーの活用の方が有益であろうという判断から、2009年11月に正式に水素プロジェクトを発足させ、水素社会の実現に向けた水素インフラの確立を目指して現在技術開発を進めているところです。水素を選択した理由としては、当社の保有技術と親和性が高かったことが挙げられます。水素の輸送・貯蔵については天然ガスと同じく液化が有望視されていますが、当社はアジア地域で最初にLNGタンカーを建造した実績を持つとともに、陸上においても現在、世界

神谷 祥二 Shoji Kamiya

技術開発本部
技術企画推進センター
水素プロジェクト部
エネルギー・
環境プロジェクト室
プロシニア
工学博士
技術士（機械部門）



入社以来、一貫して極低温技術の開発に従事し、その分野の第一人者。

最大のLNGタンクを建設中です。ここで培ってきたLNG貯蔵輸送技術を応用して進化させることで、水素貯蔵輸送技術も開発していけると考えました。鍵を握るのは極低温を扱う技術ですが、これについては、神谷さんお願いします。

神谷：天然ガスを液化するには-162度の極低温にする必要があります。私は入社以来一貫してこの極低温技術の研究開発に携わってきました。水素はさらに低温の-253度を扱う技術が求められますが、当社は、すでに水素分野での極低温技術開発の実績を持っています。鹿児島県の種子島に、皆さんよくご存じのH-IIロケットの発射場がありますが、ここにある液化水素の地上設備を川崎重工が手がけているのです。1970年代後半、灯油系から液化水素へのロケット燃料切り替え構想に伴い、当時LNG



の極低温技術で実績のあった当社がその立ち上げを担うこととなりました。それが当社の、液化水素の輸送・貯蔵に関する研究開発の始まりです。ですから、もうかれこれ30年に及ぶ年月の中で、水素プロジェクトのキーテクノロジーとなる極低温技術のノウハウを蓄積してきたと言えます。

「つくる」から「つかう」まで 川崎重工ならではの技術を活用

西村:川崎重工が進める水素プロジェクトの最大の特徴は、「製造～輸送～貯蔵～活用」という社会インフラとしての水素サプライチェーンを、上流から下流まで一貫して構築しようとしている点にあります。このうち特定分野について技術を有する企業はあるでしょうが、サプライチェーン全体を手がけることができるのは、高いLNG貯蔵輸送技術が活かせる当社だからこそと自負しています。

個々の取り組みをご紹介しますと、まず「製造」については、水素は自然界に単体では存在しないため、原料となる物質から水素だけを取り出す必要があります。その方法は非常に多種多様ですが、その中で私たちが着目したのが、オーストラリアの褐炭を用いる方法です。社会インフラとしての確立を目指す以上、低コストで安定した大量の水素製造が求められます。その点、褐炭は化石燃料で現地に大量に存在するため、安定供給が可能です。また、それだけ豊富な資源でありながら、輸送に適さない性質を持っているため、現地の火力発電燃料としてわ

ずかに使用されているだけで、海外取引の一切ない未利用資源なのです。安価な原料から現地生産するため、コストも低く抑えられます。唯一の問題点は、水素を取り出す際に副生物としてCO₂が発生してしまうことですが、これも、発生したCO₂を回収して地中に埋める「Carbon dioxide Capture and Storage (CCS)」の技術を用いればクリアできます。

新郷:CCSについてはオーストラリア側で引き受けるなど、オーストラリア政府もこのプロジェクトには非常に協力的ですよ。

西村:彼らからは「Exciting Project」と評されていて、褐炭炭田のあるヴィクトリア州政府と連邦政府、どちらからも非常に歓迎されています。もともと輸出できなかった資源を付加価値の高いクリーンエネルギーに変えて輸出できる上、高度な技術に携わる質の高い雇用を現地で大量に生み出すとあって、大きなメリットを認めています。

ともあれ、こうして作り出したガス状態の水素をパイプラインで港へ送り、積み出し港の液化設備で液化することによって体積を800分の1にした後、液化水素輸送船に積んで日本へ運ぶ構想です。日本に到着した液化水素は、専用のトレーラーやローリーで輸送され、半導体製造などの工場や、水素ステーション、あるいは水素ガスタービンなどのエネルギー機器、発電所などで用いられるという仕組みです。

この一連のサプライチェーンにおいて、唯一、確立されていないのが船舶による「輸送」技術です。今は、当社が製造する小型の液化水素輸送船を試験的に航行させ



液化水素運搬船 (イメージ)

て、技術立証しようと試みているところです。2013年12月にはタンクの基本構造について基本認証を得るなど、着々と進めています。このように、世界初となる大型液化水素輸送船の開発に取り組んでいます。陸上の液化水素タンクを造る技術、そして大型LNG船を造る技術、その両方を保有しているのは世界でも当社くらいだと思いますので、ぜひその技術力を活用してかたちにしたいと考えています。

神谷：水素の輸送に関しては、液化の他に圧縮などいくつか方法がありますが、大量輸送を前提にすると体積をわずかに800分の1にできる液化が有効だと考えています。単に液化水素の輸送ということ言えば、私たちはすでに種子島案件で実績があります。ただし、それはあくまでもロケット用燃料としての輸送で、一般のエネルギーとしての輸送とは事情が異なります。それに対して本プロジェクトで求められているのは、大量に、安全に、しかも安く運ぶためのエンジニアリング技術です。基本技術はあるものの、それをエンジニアリングレベルまで引き上げていくには、まだ乗り越えなければならない技術課題がいくつもあります。その解決に向けて今、ここにいる2人を含めた若い技術者たちが奮闘しているところです。

長年培ってきた極低温技術をベースに挑む 水素インフラのエンジニアリング技術

新郷：私は主に、 -253 度の液化水素を貯めたり運んだりする際に用いる容器の、断熱構造技術に係る研究開発を担当しています。

-162 度のLNGと -253 度の液化水素では、温度が100度違うだけで同じ極低温技術のように見られがちです

新郷 正志 Masashi Shingo

技術開発本部
技術研究所
環境システム研究部
研究一課
基幹職



長年、断熱構造技術の開発に従事しており、設計から評価までを担当。

が、実は空気が液化する -200 度という温度をまたぐ点
が大きな違いで、それが取り扱い技術に高度化が求められる要因です。LNGの場合、輸送タンクの周囲をウレタンなどの断熱材で覆い、そこに不活性ガスを含ませておけば断熱が可能です。しかし液化水素の場合は -200 度よりも低い温度なので、LNGタンクと同様の断熱方法では、ウレタン中の不活性ガスが液化して断熱材として機能しなくなります。そこで用いるのが、真空断熱です。タンクを魔法瓶のような二重構造にし、内側容器と外側容器の間を真空にして内側へ熱を通さないようにする考え方です。熱は温度の高い方から低い方へ伝わりますが、その伝わり方には「伝導、対流、放射」の3つがあります。真空にすることにより、気体を通して伝わる「伝導、対流」は抑えられます。しかし「放射」は残るため、当社が種子島案件を通して開発した極低温用の真空断熱技術を用いて遮断しようと考えました。これなら



陸上用の液化水素タンク



東 誠
Makoto Azuma

技術開発本部
技術研究所
材料研究部
研究二課
課長

材料技術をベースに、極低温機器、高圧ガス機器の技術開発に従事。

3つすべての伝熱をカットした断熱構造を実現できます。

こうした研究開発においても、これまで神谷さんたちが何十年かけて蓄積してきた技術を大いに活用しています。液化ガスを大量に運ぶ技術、そして水素をハンドリングする技術、その両方を持っているのは世界でも当社だけです。この組み合わせによるオンリーワン技術を活用すれば、水素インフラのためのエンジニアリング技術も必ず確立できると考えています。

東：私は、二重容器の内側容器の支持構造の開発に携わっています。この部材は液化水素が入っている内側容器が、室温の外容器と接さざるを得ないため、そこから「伝導」で熱が伝わってしまいます。そこで、金属よりも熱が伝わりにくいFRPのような特殊樹脂材料を用いる検討を進めています。しかし、極低温領域では樹脂材料が構造的に縮んだり硬化したりといった特性変化を来したり、真空度を悪くする反応を起こしたりといった問題があるため、現在、-253度の環境を作って材料特性変化について

調査しているところです。

一方で、水素圧縮ガスを運ぶための高圧水素ガストレーラーの開発も担当しています。このトレーラーは、各所に設けられた水素ステーションへのデリバリー用で、水素を450気圧に圧縮して運びます。タンクには、金属製のタンクに炭素繊維の複合材を組み合わせたものを用いています。高圧水素ガストレーラーの開発は国内初の取り組みだったため、高圧ガス保安法、道路三法など、さまざまな関連法のうち何がどう適用されるのかを有識者とともに検討しながら開発を進めてきました。現在すでに、350気圧仕様と450気圧仕様の2台が製造完了し、実際に国内を輸送走行しています。これで、液化と圧縮両方の輸送技術を確立する考えです。

西村：ちなみに水素ステーションへのデリバリーについては、当初は需要も限られているので高圧水素ガストレーラーでサポートし、燃料電池車が普及期を迎えた時は液化水素輸送ローリーによって大量輸送に寄与するというビジネスモデルを構想しています。

また、輸送後の「活用」分野への取り組みとしては、水素を燃料とするガスタービンの開発を進めています。これは産業用だけでなく、地域マンション向けにも活用することで、平常時だけでなく非常時におけるエネルギー供給設備として、「Business and Living Continuity Plan (BLCP)」にも貢献できると考えています。

神谷：そして重要な点は、やはり「安全」面です。かつてない新しいエネルギーだけに、安全管理に関する基準や法規制もまだ整備されていません。大切なのは、正しく理解してもらうことです。そこで私は技術者の立場から、関係監督省庁との折衝に携わるほか、水素貯蔵輸送技術に関する学会活動も積極的に推進するなどして、環境整備に努めています。

西村：神谷さんの言うように、水素インフラを確立する上



高圧水素ガストレーラー



水素専焼ガスタービンの開発

で安全性の担保は極めて重要です。ただ、当社はすでに種子島のロケット基地における液化水素のタンクや1 kmに及ぶ真空配管の運用で、30年を超える無事故実績を持っており、安全性については十分確保できると確信しています。これから本格的に活用するにあたり、日本初・世界初となる取り組みを多く手がけている当社が、レギュレーション作りにも参画しながらしっかりリードし、安心して水素社会を迎えられるよう貢献していきたいと考えています。

目指すは再生可能エネルギー由来の水素活用 世界をリードする技術立国・日本の使命

西村：それでは最後に、水素プロジェクトのこれからの見据えて、一人ずつ抱負や夢を語って終わりましょうか。

新郷：では私から。水素は水と電気さえあればどこでも作ることができます。エネルギー資源のない国と言われる日本でも、水素を作ることができれば世界にエネルギーを輸出できるのです。実用初期は褐炭からの水素製造を構想していますが、将来的には自然エネルギー由来の水素を製造し、エネルギーを生み出す国にしていくのが夢です。

東：高压水素ガストレーラーは現在、国内に2台しか存在しません。しかし、2014年の燃料電池車の市販スタートに伴い、これからどんどん水素の需要は高まり、水素ステーションも増えていくに違いありません。そうなった時、私の開発した高压水素ガストレーラーが、街中を走

る姿を一般の皆さまにも目にしてもらえるくらい普及すれば技術者としてうれしく思います。

神谷：私が水素に携わり始めた1970年代から長らく、水素は注目されてきませんでした。ところが、今から20年ほど前の1993年、海外から水素を持って来ようというプロジェクトがあり、その時に私自身は「いずれ水素社会が訪れて、液化水素を大量輸送する時代がくる」と確信していました。果たして、これまで何十年かけて積み重ねてきた技術をついに花開かせるチャンスがやってきた今、大きな喜びとやりがいを感じずにはおれません。ぜひメンバーと一丸となってこの技術を結実させ、液化水素輸送船が建造されていくのをこの目で確かめたいですね。そして、日本が世界をリードするかたちで社会貢献できる喜びをかみしめたいと思っています。

西村：当社が掲げる理想としては、再生可能エネルギーから作った水素の活用です。ぜひここを目指したいと考えています。それに向けて、国内外の水力発電や地熱発電などを用いた場合の事業成立性について、すでに机上検討を始めています。一方で、今後は自国のインフラ整備にとどまらず、新興国に向けた水素インフラの輸出というビジネスも出てくるでしょう。その時、川崎重工は「つくる」から「つかう」までのサプライチェーン全体をパッケージとして提供できる存在でありたいと考えています。そのためには、何としても最初に世界標準を獲得しなければなりません。そうして、技術で勝ち、ビジネスでも勝つ。これこそ、川崎重工が、ひいては日本がやるべきことだと考えています。

将来社会を見据え、多彩なテクノロジーを進化させて、
新たな顧客価値を創り出す。



世界の人々の豊かな生活と
地球環境の未来に貢献する
“Global Kawasaki”

川崎重工技報 第175号

2015年3月1日

編集・発行 兵庫県明石市川崎町1番1号
川崎重工業株式会社 技術開発本部

発行責任者 技術開発本部長 牧村 実

発行人 技術開発本部 技術企画推進センター長
原田 英一

印刷 広島県広島市中区中島町9番6号
株式会社 秀巧堂クリエイト

禁無断転載

