



# IHI技報

*Journal of IHI Technologies*



2015

Vol.55 No.3

特集 IHI力

ISSN 1882-3041

IHI技報 第55卷第3号 平成27年

This document is provided by JAXA.

## ◆巻頭言 Opening Essay

特集「IHI 力」号の発刊にあたって……………	取締役 朝倉 啓	1
Message for the Special Issue of "IHI's Capability"		

## ◆社長が語る Message

研究開発から成長するビジネスへつなぐ 過渡期に立つ宇宙開発事業 IHI AEROSPACE CO., LTD.	株式会社 IHI エアロスペース 代表取締役社長 木内 重基	2
キーワードは“成長!”独自のセンシング&コミュニケーション技術で 打って出る 世界へ、宇宙へ MEISEI ELECTRIC CO., LTD.	… 明星電気株式会社 代表取締役社長 石井 潔	4
機械システムの製造販売のみならず、 アフターサービスやプロセス技術できめ細かくサポート IHI Machinery and Furnace Co., Ltd.	… 株式会社 IHI 機械システム 代表取締役社長 瓦谷 立身	6

## ◆てくのすこーぶ Techno Scope

てくのすこーぶで視たターボチャージャーの発明……………	知的財産部	8
A Patent on Turbochargers with Movable Flow Control Vanes		

## ◆我が社の看板娘 Products

次世代過給機はモーターの力で加速……………	株式会社 IHI	10
Next Generation Electric Supercharger and Assisted Turbocharger		
宇宙の謎 暗黒物質の起源に迫る……………	株式会社 IHI エアロスペース	12
CALET, Search for origin of Dark Matter		
小惑星探査の第一撃を撮影せよ!……………	明星電気 株式会社	14
Super Digital Camera DCAM3 to Imprint the First Hit on the Asteroid		
全遠隔操作による難工事 ガラス溶融炉解体設備完工……………	株式会社 IHI	18
Completion of Full Remote Installation Work for New Glass Melter Dismantling Equipment		
無人建設機械が実現する より安全で確実な災害復旧工事……………	IHI 建機 株式会社	22
Unmanned Construction Equipment Enables Safe and Secure Disaster Recovery		
水密ゴムの改良で開閉装置のコストダウン……………	株式会社 IHI インフラシステム	24
Low Friction Rubber Seal Realizes the Cost Reduction of High-Pressure Gates		

## ◆我が社のいち押し技術 Technologies

油の流れを整え 真空浸炭の品質アップ……………	株式会社 IHI 機械システム	26
Quality Improvement of the Vacuum Carburizing by Oil Flow Control		
雪でも定刻 < かがやき 500 号 > 東京行き……………	新潟トランス 株式会社	30
Punctual Operation of Shinkansen in Snowy Region is Supported by Motor Car Rotaries		

## ◆こんなビジネスが面白い Business

IT 資産マネジメントのパートナー……………	株式会社 IHI エスキューブ	34
IT Life Cycle Management (IT-LCM) Service to Help Saving the TCO		
ジェットエンジン部品用工具の製作工程計画自動化で増産対応……………	株式会社 IHI ジェットサービス	36
IJS VISTA (IHI Jet Service Visible System of Tool Abrasion work)		

## ◆箸休め Essay

レールと車輪のお話 (前編)……………	技術開発本部 小野塚 正一	38
A Short Talk on Train Wheels on Rails		

## ◆技術論文および解説 Technical Papers

ハンドガイドによる人・産業用ロボット協働システムの生産ラインへの適用性検討…	藤井 正和, 村上 弘記, 曾根原 光治	41
Study on Application of a Human-Robot Collaborative System using Hand-Guiding in a Production Line		
橋梁技術の進歩と溶接技術……………	倉田 幸宏, 猪瀬 幸太郎	48
Progress of Welding Technology in Bridge Construction		
複合材サンドウィッチパネルへのシェアログラフィ法の適用……………	滝沢 真実, 前田 朝樹, 藤原 貢, 細谷 昌厚	54
Applying Shearography to Composite Sandwich Panels		
パルス電流波形による溶込み形状の制御……………	野々村 将一, 兵間 賢吾, 小林 和行, 山岡 弘人, 宮坂 史和	58
Control of the Penetration Shape by Pulsed Current Waveform		
ロボット車両と技術……………	曾根原 光治, 生川 俊則	66
Robot Cars and Technologies		

## ◆箸休め Essay

レールと車輪のお話 (後編)……………	技術開発本部 小野塚 正一	74
A Short Talk on Train Wheels on Rails		

## 特集「IHI 力」号の発刊にあたって

取締役 朝 倉 啓

物質は何でできているか？という疑問については、古来、さまざまな議論がなされてきました。実験と理論の進展により、物質は原子からなり、原子は原子核と電子からなり、…といった階層構造があって、最小単位として素粒子からなると理解されるに至っています。最近の素粒子の研究には目覚ましい発展があり、1995年にフェルミ国立加速器研究所（アメリカ）でトップクォークが発見され、2012年にはCERN（欧州合同原子核研究機構）でヒッグス粒子が発見されました。共に、実験に用いられた大型加速器の超電導磁石の冷却用に、IHIの開発した極低温コンプレッサーが活躍をしています。そして、ここで用いられたオイルフリーの技術はIHIグループの次世代過給機にも生かされています。



一方、宇宙は何でできているか？という疑問については、最近の宇宙科学の急速な進展にも関わらず、主要な構成要素の正体は未解明です。我々が知る通常の物質は宇宙の約5%を占めるにすぎず、残りは謎の暗黒物質および暗黒エネルギーで占められるとされています。この暗黒物質については、本特集号で紹介する株式会社IHIエアロスペースが開発した観測装置がその正体の解明に貢献することが期待されています。宇宙に関しては、このほかにも国際宇宙ステーションに搭載される静電浮遊炉や「はやぶさ2」に搭載された超高性能カメラについても紹介しています。

今回は「IHI 力」号ということで、IHIグループだからこそできる技術を中心とした記事を集めました。IHIは、現在、グループ経営方針2013に基づき、「つなぐ」をキーワードとした成長を目指して各種施策に取り組んでいますが、今回ご紹介しているものもIHIグループのあらゆる力をつないでイノベーションに結びつけたものとなり、読者の皆さまにもその一端を感じ取っていただければ幸いです。

さて、宇宙の話に戻って、宇宙はどのように誕生したのか？という疑問については、真空のゆらぎから粒子が生まれ、ビッグバンにより膨張したというのが現代物理学の一つの説となっていますが、実は2000年以上前の中国の古典「老子」にも無から有が生じたという宇宙観が述べられており、その先見性には驚くばかりです。

宇宙誕生の疑問の解明は、まだ理論物理学の研究分野ですが、今後「IHI 力」の結集によって解明に向けた貢献ができるよう、さらなる磨きを掛けてまいります。

# 研究開発から成長するビジネスへつなぐ 過渡期に立つ宇宙開発事業

株式会社 IHI エアロスペース  
代表取締役社長

**木内 重基**



2015年6月にはボーイング社の静止衛星用メインエンジンを受注、また8月には開発を担当した新しい観測装置 CALET が H-II B ロケットで打ち上げられる補給機「こうのとりのり」によって国際宇宙ステーションに輸送されるなど、日本の宇宙開発事業のメインプレーヤーとして株式会社 IHI エアロスペースのプレゼンスは揺るぎないものがあります。しかしながら、その事業性は現在大きな岐路に立っています。

日本の宇宙技術開発がスタートしたのは、1955年のペンシルロケットからといわれています。それ以来60年間、国際宇宙ステーション (ISS) における宇宙実験装置、衛星のコンポーネント、それらの輸送ロケット、そして近年では小惑星探査機の「はやぶさ」シリーズなど、日本が手掛けてきた宇宙開発において、株式会社 IHI エアロスペース (IA) が参加していないものはありません。

最近の例では2013年に打ち上げたイプシロンロケットの開発・製造を担当し、H-II A/B ロケットでも IHI グループで約4割のシェアを占めています。また、2015年の夏に宇宙ステーション補給機「こうのとりのり」でISSに届けられる高エネルギー電子・ガンマ線観測装置 CALET、これはいわば宇宙に設置する天文台のようなものですが、こちらも開発しました。特に固体燃料ロケットモータの開発・製造におい

ては、先ごろ日米共同開発の弾道ミサイル防衛用迎撃ミサイルのフライトテストが成功するなど、世界水準の信頼性を獲得しています。

このように世界の第一線で宇宙開発に参加してきましたが、今、IAも含めて宇宙開発に携わってきた企業はどこも同じ課題を抱えていると思います。それは「研究開発事業から、いかに普通のビジネスへと移行するか」ということです。宇宙開発は国家予算で支えられてきました。ですから持続はしますが大きな成長は見込めません。しかしながら、2015年1月に政府は宇宙基本法に基づく宇宙基本計画を発表し、そのなかで日本の培ってきた宇宙技術を、今後10年間で官民合わせて5兆円規模の事業にすると明らかにしました。現在の予算がおよそ3500億円ですから、そこに民間資金も期待されているということです。

宇宙開発は安全保障・防衛政策とも深く関係してい

ます。国際的な戦略技術の不拡散というルールがあり、世界のどの国とでも自由に技術を取引できるわけではなく、込み入った制約があります。それらの制約がすべて解かれることはあり得ませんが、個々の分野では外交交渉などにより緩められることも考えられます。そのときに、すぐに対応できるかどうか勝負の分かれ目です。「どうしたら世界市場で成長できるのだろう」、それが現在の私の偽らざる悩みです。

成長のキーワードとして常に意識しているのは、「つなぐ」ということです。これまでの宇宙開発では開発した成果が国によって利用されてきました。今後必要なのはそれらを民間に転用できるか否かの技術的検討と市場探索です。

現在「はやぶさ2」のミッションが進行中ですが、例えば「搭載したカメラがこのような映像を撮影した」というように、宇宙での実力を分かりやすくアピールできれば、その技術に対して世界中からの投資を集めることも可能でしょう。そうした宇宙技術と地上での利用を「つなぐ」視点を社内に育てたいと思っております。

すでに成功している例としては FRP (Fiber Reinforced Plastics: 繊維強化プラスチック) が挙げられます。IA ではロケットモータが大型化するなか、効率を考慮してより軽量で耐圧性に優れた FRP の新素材を開発してきました。それを IHI のジェットエンジン部品に適用することになり、2014 年に新工場を建設しました。



イプシロンロケット ©JAXA



高エネルギー電子、ガンマ線観測装置 CALET ©JAXA

IA の強みとしては、ロケット開発で得た固体燃料や樹脂の化学反応データの蓄積と優れた分析技術があります。純粋な化学反応についてのみならず、さらに優れた化学メーカーはあるでしょう。しかしながら、IA には化学反応と装置設計的な観点が融合し、さらには宇宙環境という特殊な条件を考慮して設計・製造できるものづくり力があります。これを強みにして、新ビジネスにつなげることができるのではないかと考えています。

もうひとつ可能性を探っているのは信頼性評価システムを使った日本の民生産業基盤の取り込みです。宇宙で使う機器はすべて高い信頼性が必要ですから、素材や装置を開発するときには、厳しい条件での試験と解析・評価をしています。試験装置や解析ツールがなければ自作し、あらゆる状況を想定して製品を検証します。こうした評価技術を活かして、日本の優秀な民生品のなかから宇宙での使用基準をクリアする製品を見だしていくことができるのではないかと。これが確立できればロケットのような宇宙で使う製品の価格も下がり、新しい宇宙ビジネスが生まれる可能性も高まるでしょう。

もちろん、今後予定されている H-Ⅲロケット開発での主要なコンポーネントの製作、また IHI ブランドとしてイプシロンロケットの付加価値を高めるための社内研究も進めていく所存です。

IA は、宇宙活動においては地上からのロケット打ち上げから衛星の姿勢制御、カプセルのようなリエントリーシステムなど打ち上げから軌道上運用、回収までのすべてのフェーズの製品を有しており、もちろんすべて世界基準を満たしています。このものづくり力に、世界へ「つなぐ」視点を強化して差別化を図り、宇宙開発という特殊な事業から成長を目指せる“普通”のビジネスへと転換して参りたいと考えております。

# キーワードは“成長！”

## 独自のセンシング&コミュニケーション技術で 打って出る 世界へ，宇宙へ



明星電気株式会社  
代表取締役社長

石井 潔

明星電気株式会社はさまざまな自然現象を捉えて「測り」、価値ある情報として「伝える」技術に特化した革新的な製品を次々と生み出してきました。その製品群は水中から宇宙まで広範囲にわたります。ラジオゾンデによる高層気象観測、アメダスなどの地域気象観測システムをはじめ、ダムや河川の水量監視や制御、地震・火山や山崩れなどの観測・警報システム、さらに小型衛星やロケット搭載カメラなど宇宙、防衛分野にもその技術を展開しています。2012年にIHIグループに加わってからは、海外への販路拡大や電気通信制御技術に関する新たな製品・サービス創出での協働などで着実に成長を重ねています。

明星電気株式会社は、2013年に策定した中期事業計画で成長のための三つの柱を打ち立てました。『差別化された独自製品の開発』、『海外や民需など新市場への製品展開』、『IHIグループとの営業、技術開発、生産などの連携によるシナジー創出』の三つです。

第1の『差別化された製品』の例としては、2013年に開発した超高密度気象観測システム POTEKA が挙げられます。POTEKAの気象計は超小型かつ低価格で、気温、湿度、気圧、日射、風向・風速および感雨の観測データをリアルタイムで自動送信します（IHI技報 Vol. 54 No. 2 6～9ページ）。従来の気象計アメダスの設置間隔約17～20kmに対して、POTEKAは圧倒的な低価格のおかげで密に2～5km間隔で設置できます。これによって竜巻や突風、ゲリラ豪雨な

どの気象現象も精緻に観測できるようになり、局地的な災害対策に役立ちます。このように緻密に配置した気象計と情報システム（IT）を組み合わせた全国規模での情報提供は全く新しい試みです。すでに実証試験ではアメダスには捉えられない竜巻や突風を何度も観測しました。データの収集や活用方法についても検討を重ね、2015年7月より本格的にビジネス展開しています。

また、気象分野のもう一つの主力製品ラジオゾンデは、気圧・温度・湿度などのセンサーを気球に吊るして上空に飛ばし、大気を直接観測してデータを地上に無線伝送する装置です。1938年の創業以来の製品ですが圧倒的な小型化（同業他社質量比1/3）で差別化を図りました。2014年に完成した世界最小・最軽量の新

型ラジオゾンデは手のひらサイズでコストも半減、上空約 3 万 m までの観測や通信機能の信頼性はそのままに、お客さまの運用コストの削減に貢献します。

第 2 の柱『新市場への製品展開』に関してもこのラジオゾンデが一例となっています。2014 年 7 月にリリースし、ロシアでの国際展示会など世界各地で営業活動を展開した結果、2015 年 2 月にはトルコとの間で 10 000 台の大型受注が実現しました。

防災分野では他社との共同による ODA プロジェクトで、フィリピン向け広域防災情報システムを納入し、フィリピン全域に地震観測装置（46 か所）や津波観測装置（19 か所）を設置しました。観測データは衛星通信を介してフィリピン火山・地震研究所に集約されます。これらの実績を活かして防災事業をグローバルに展開し、各国の気象当局や関係機関との商談を進めています。

また、民需分野においては、高層ビルの高層階特有の大きな揺れ（長周期地震動）に対応した地震計を開発し、これを緊急地震速報受信装置や制御用地震計などと組み合わせ、総合地震対策システム MAPS（IHI 技報 Vol. 55 No. 1 20～23 ページ）として、大規模商業施設や学校・病院・工場など民間向けに販売展開を図っています。

第 3 の『IHI との連携』ですが、IHI グループに加わり、海外営業拠点の協力が得られるようになったことは大きなメリットであり、トルコでは開設間もない IHI のイスタンブール事務所との営業連携が実現しました。技術、生産の面での連携も進んでおり、例えば三次元レーザーレーダーによる踏切監視システムは明星電気が生産を担当しており、海外向けや道路用システムへの展開など、今後ますますその役割が拡大していきます。

また、IHI グループの製品を電気通信制御技術でシステム化して、付加価値を向上させることも明星電気の大切な役割です。例えば、東日本大震災で河川を遡上する津波が多くの犠牲につながったことを踏まえて、水門の機械設備のトップメーカーである株式会社 IHI インフラシステムや株式会社 IHI インフラ建設のハードウェア技術と明星電気の電気通信制御技術を組み合わせ、遠隔操作による水門の自動開閉システムの展開を加速しています。

明星電気の事業の中核であるセンシング&コミュニ



ラジオゾンデの放球

ケーションは、現代という時代的要請が反映された技術であり、大手メーカー各社も開発に力を入れるなか、当社も独自性を維持しながら攻め続けていくことが肝要であると考えています。

明星電気の一つの強みはお客さまのリクエストに素早くレスポンスする小回りの利いた活動です。例えば、宇宙開発の世界では人工衛星の小型分散化が進んでいます。大型では極度に高い信頼性が求められ、開発の長期化・高コスト化が問題であったことから、事業リスクを分散・低減できる小型衛星に対する潜在需要が高まっています。ここでは民生品の活用が開発期間短縮や低コスト化の一つの要になっており、適切な部品選択および性能評価試験や、弱点補強に関する経験の蓄積と高いインテグレーション技術がものをいいます。このような流れのなかで、大手メーカーが何百億円という予算規模で開発する衛星を明星電気は 10 億円以下のコンパクトな衛星として製造し、大学やベンチャー企業などさまざまな立場の方に提供したいと考えています。

明星電気は現在、成長に向けて若手社員の積極的採用を進めています。手間をいとわず新しく面白い商品を生み出すベンチャー的な社風ですので、若手の夢を形にする機会がたくさんあります。特に電気や制御が得意な工学系の方は大歓迎です。

近年続く地震や火山活動、豪雨などの自然現象を見ても、センシング&コミュニケーションは安全・安心な社会を実現していくうえでの必須の技術です。明星電気の担う責任は重大であり、世界で唯一の総合環境観測システムメーカーとしてさらなる高みを目指して成長する所存です。

## 機械システムの製造販売のみならず、 アフターサービスやプロセス技術で きめ細かくサポート

株式会社 IHI 機械システム  
代表取締役社長

瓦谷 立身



株式会社 IHI 機械システムは機械部品の品質を向上させる熱処理炉や新素材炉の製造販売およびゴム、プラスチックなどの圧延機械の製造販売を手掛けています。これらの機械システムを国内だけでなく、中国などアジア圏や西欧諸国に IHI の国際的ブランド力を武器にビジネスを展開しています。

株式会社 IHI 機械システム (IMS) は、四つの会社が合併してできた会社です。まず、2007 年に、製紙機械、ゴム・プラスチック設備などを製造する「石川島産業機械株式会社」と新素材製造設備、真空熱処理炉、高炉設備の製造を手掛ける「株式会社石川島岩国製作所」が合併しました。その後、2009 年に真空浸炭プロセスの特許をもつ「株式会社日本ヘイズ」が加わり、2012 年には、IHI の幅広い事業分野をエンジニアリング力でサポートしてきた「株式会社アイメック」が合流しました。

現在は真空・新素材炉事業分野を岐阜県各務原市と山口県岩国市、産業機械事業分野を福島県本宮市の事業所でそれぞれ担当しています。

IMS の真空・新素材炉事業分野は IHI グループの熱・表面処理ビジネスユニットに属しており、そのなかでも真空熱処理の装置製造を担当していますが、表面処理装置を製造する IHI Hauzer Techno Coating B. V. (オ

ランダ)、表面処理受託加工を担当する IHI Ionbond AG (スイス) と密接に連携しつつ、IHI グループとして世界の真空熱処理・表面処理業界をリードしております。

表面処理を担当するこれらの会社は欧米系のお客さまを中心に事業を行ってきました。一方、IMS は日系のお客さまとともに成長してきました。現在、IHI グループの熱・表面処理事業各社もいっそうグローバル展開を進めており、今後、お客さまのグローバルな事業活動に対してこれまで以上にお役に立ってまいります。また、自社への装置導入よりも表面処理委託を望まれるお客さまもいらっしゃいます。ご要望に応じて装置製造と受託加工のどちらでも引き受けられる点も IHI グループの強みです。

IMS の真空・新素材炉事業では、主に真空熱処理炉、真空浸炭炉、新素材炉を扱っています。真空熱処

理炉は 1960 年代に Ipsen 社（ドイツ）から技術導入して以来、IHI のジェットエンジン部品の熱処理に用いられてきました。そして世界の最先端を行くジェットエンジン事業の発展とともに IMS の技術や事業も発展し、さらに、独自の真空熱処理炉を製造して多くの機械部品製造業のお客さまから信頼を獲得してきました。

真空浸炭炉については、真空浸炭の特許をもっていた日本ヘイズとの合併により、この分野で世界に先んじていると自負しています。主に鉄などの素材表面に炭素を浸透させて硬化する浸炭は、CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> などから構成された浸炭ガスから浸透させる「ガス浸炭」が主流です。しかしガス浸炭の場合は表面に酸化層ができてしまう難点があります。従来の真空浸炭技術ではそうした難点はないものの、メンテナンスが煩雑、処理コスト・設備費が高いなどの問題がありました。IMS が特許を保有している真空浸炭は、炉の構造がシンプルかつ省エネで環境負荷も小さく、働く環境も清潔であるなど上記の課題を一気にクリアした優れたもので、今後のいっそうの活躍が期待されています。

真空熱処理炉や真空浸炭炉を必要とされるお客さまは、自動車部品関連を中心として世界中にいらっしゃいます。このようなお客さまに密着して営業活動やアフターサービスなどができるように、最近では中国に真空熱処理設備生産の合併会社を設立しました。東南アジアにも会社を設立して日系のお客さまを中心に設備・サービスを提供しております。

真空熱処理や真空浸炭にはもちろん標準的な処理手順があるのですが、特定の素材から期待どおりの性能を引き出すには「ガスの配合をどうするか、どの温度で何分間処理するか」といったレシピがそれぞれに必要です。微妙に違う処理手順すなわちレシピは、個々のお客さまのノウハウです。同じ炉を使っても品質が全く違うのです。同じお鍋を使ってもメニューやレシピによって全く違った味わいの料理ができるのと似ています。2016 年のアセチレン真空浸炭の基本特許期限切れに伴い、市場が活発化することが予想されます。実は、このときが IMS にとって成長のチャンスと考えています。というのも、IMS は多種多様な素材に対するアセチレン真空浸炭のレシピを保持しているため、これが大きなアドバンテージになると期待さ

	熱処理	表面処理
装置事業	株式会社 IHI 機械システム (真空・新素材炉)	IHI Hauzer Techno Coating B. V. (オランダ)
受託加工事業		IHI Ionbond AG (スイス)

株式会社石川島岩国製作所  
株式会社日本ヘイズ  
株式会社アイメック

IHI グループの熱・表面処理事業の分担

れるからです。2016 年春には岐阜県各務原市に熱処理テクニカルセンターを開設する予定で、熱処理プロセスに関するお客さまサポートを充実させてまいります。

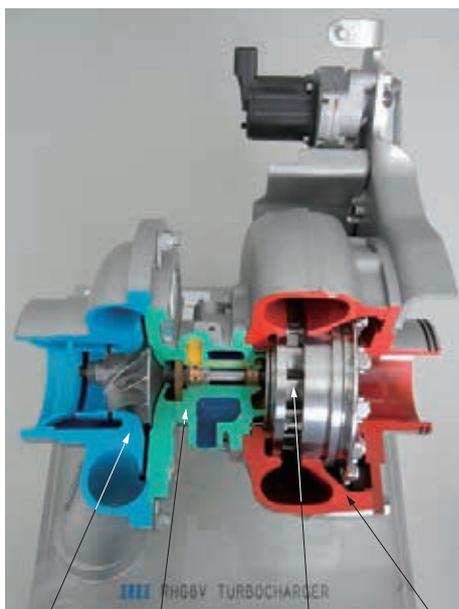
一方、産業機械事業では、円柱状の圧延ロールで素材を押し延ばす「カレンダー装置」を中心に製造しています。例えばタイヤ製造業では一定厚さのゴムシートを製造するカレンダーが欠かせません。膜厚の高精度さや 24 時間操業しても不具合が出ない信頼性が求められます。タイヤの品質の 50% はカレンダーで決まるともいわれ、しかも 1 ラインに 1 台しか設置されない非常に重要な設備です。ハイエンドなカレンダー装置を製造できる会社は現在 IMS を含めて世界に 3 社といわれており、IMS はマーケットシェアを競っています。また、樹脂カレンダーは、押し出し装置で加工が難しいタイプの樹脂を圧延してシートやフィルムにする機械で、太陽電池の表面を覆う非常に薄くて丈夫な樹脂フィルムのカレンダーがその代表です。今後も、多様な素材の開発に伴い、カレンダーによる樹脂加工のニーズが広がると期待されています。さらに、カレンダーで培った薄いシートやフィルムの巻き取り・巻きほどこき・取り扱い技術、いわゆるロール to ロールをコア技術としており、チャレンジングで夢のあるご依頼もあり、現在実用化の道を探っている段階です。

今後とも、優れた機械システムと、きめ細かいサポートで、お客さま満足度を高め、世界でプレゼンスのある産業機械メーカーとして発展して参りたいと願っております。

# てくのすこーぷで見たターボチャージャーの発明

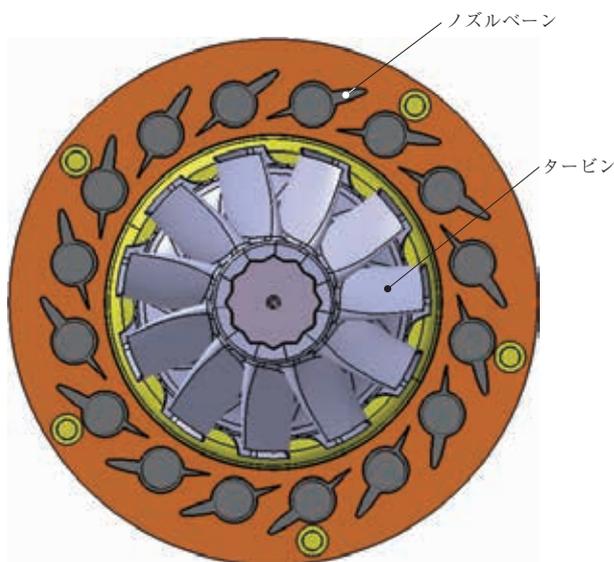
技術開発の現場で生まれた「発明」は、特許という知的財産になります。

今回は、2012 年度関東地方発明表彰を受賞した特許「可変容量型過給機の可変ノズル装置」をのぞいて、車両用ターボチャージャーの技術について知ってもらいたいと思います。  
(特許第 4547718 号)



コンプレッサー部    ベアリング部    ノズルベーン    タービン部

ターボチャージャーの構造



ノズルベーンの配置

IHI グループでは、軽自動車向けの小型のものからバス・トラック向けの大型のものまで、幅広いニーズに応える多種多様な車両ターボチャージャーを生産・供給しています。生産・供給の拠点は世界 6 か国（日本、ドイツ、イタリア、アメリカ、タイ、中国）にあります。IHI グループのターボチャージャーは、世界の有力メーカーに採用されており、世界中で活躍しています。2014 年末には、IHI グループでの累計生産台数が 5 000 万台に達しました。

ターボチャージャーは、大きく分けてタービン部とコンプレッサー部とそれらを同軸上で支持するベアリング部から構成されます。自動車に搭載されたターボチャージャーは、自動車の排気ガスによってタービンが回り、それに伴ってタービンと同軸でつながるコン

プレッサーも回ります。コンプレッサーが回ることで、エンジンにはより多くの空気が送り込まれます。たくさんの空気を得られたエンジンはより大きな爆発を行えるようになり、ターボチャージャーを搭載したエンジンは、一回り大きなエンジンと同等以上のエネルギーを生み出すことができます。ターボチャージャーは、900℃を超える高温下で用いられ、最も小型のターボチャージャーであれば毎分 30 万回転する超高速回転機械です。

ターボチャージャーを搭載することで、小さなエンジンで必要な出力が得られるため、同じ出力の大排気量エンジンと比べて低燃費になるというメリットがあります。また、低回転でも高トルクが得られるので、アクセルの軽い踏み込みで楽に運転できるなど、運転



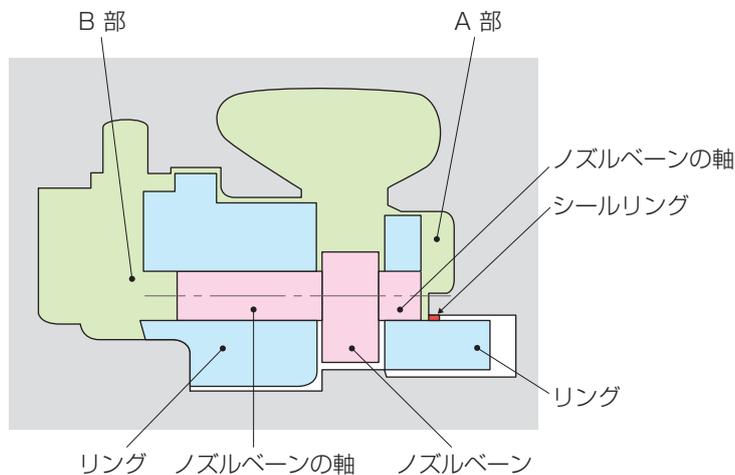
がしやすくなるというメリットもあります。また、ディーゼルエンジンの場合、エンジンに送り込まれる空気量をコントロールすることで排出される粒子状物質や NO<sub>x</sub> を低減でき、排気ガスがクリーンになるというメリットもあります。

今回紹介する発明の名称にある「可変容量型過給機」とは、排気ガスがタービンに流入する直前の部分に、ノズルベーンと呼ぶ案内羽根を周方向に等間隔に複数配置したターボチャージャーで、主にディーゼルエンジンに用いられています。これらのノズルベーンはアクチュエータと呼ぶ装置によって一斉に動かせるようになっており、エンジンの回転数に応じてノズルベーンをの角度を適宜変えることが可能です。この技術により、タービンに流入する排気ガスの量や速さを制御することができます。

ターボチャージャーの効率をよくするためには、このノズルベーンとそれを両側で支えるリングと呼ぶ軸受との隙間をできるだけ小さくし、排気ガスが隙間から漏れにくくするようにする必要があります。

しかし、隙間を小さくしすぎると、ノズルベーンを動かす時に、両側のリングとの摩擦が大きくなり、摩擦の発生や作動性に影響を及ぼしてしまう恐れがあるので、隙間をあまり小さくはできないという問題がありました。

この問題を解決したのが、今回紹介する特許です。  
ノズルベーンの軸端がある両側の空間（A部・B部）



部)それぞれと排気ガスが流れる流路部分とを連通する(自由に流れる)ことで、両側の空間の圧力を流路部分と同じにして、ノズルベーンの両軸端に作用する圧力が均等になるようにしました。これによりノズルベーンの軸方向に作用する力が小さくなり、ノズルベーンのしゅう動抵抗を大幅に小さくすることができます。その結果、ノズルベーンとリングの隙間を小さくしても作動性を確保することができました。

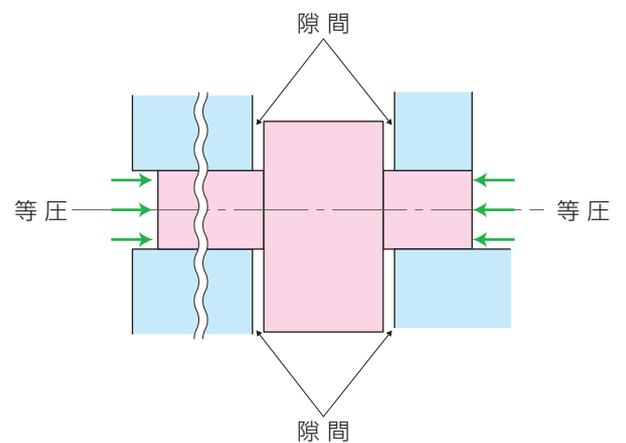
この発明を適用したターボチャージャーは、主に大型トラックや大型バスに搭載されています。

IHIグループでは、ターボチャージャーについて多くの発明を創出し、世界各国で特許を取得しています。

ターボチャージャーは、各国の環境規制強化を受け、エコデバイスとしてさらに注目度が高まっています。世界におけるターボチャージャー市場は、2015年の3000万台超から2020年には5000万台を超える見通しです。

IHIグループでは、2020年には年間生産台数1000万台を計画しており、今後も、高い信頼性を有するIHIグループの開発・生産技術により、グローバルに生産・供給活動を展開していきます。

(文責：知的財産部)

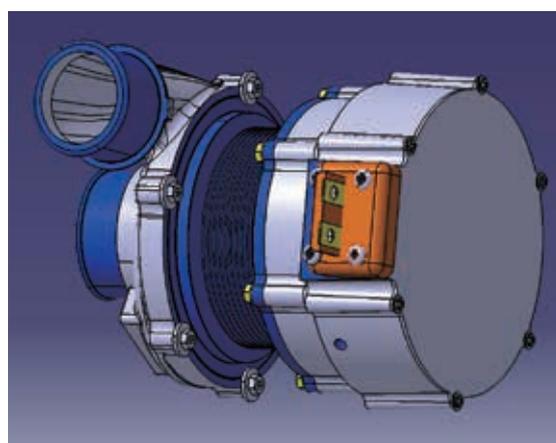
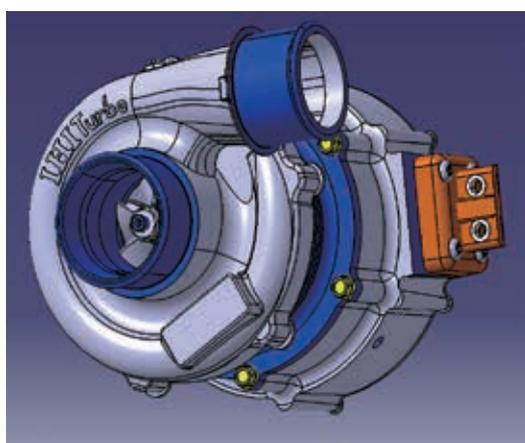


ノズルベーンの構造

# 次世代過給機はモーターの力で加速

## 排気ガスエネルギーだけでなく、 電気エネルギーを使って加速するターボ

近年のエンジン熱効率の向上に伴い、回収できる排気ガスエネルギーが減る傾向にある。これからは電気モーターの技術をターボチャージャーに応用した製品を展開し、市場の要求に応えていく。



電動コンプレッサー

現在、日本でもターボチャージャーが再び脚光を浴び始めているが、ヨーロッパではすでに大排気量車のエンジンを小型化し、ターボチャージャーを使用することで低燃費と力強い走行性能の両立を図る「過給ダウンサイジング」と呼ばれるエンジンが増えてきている。市場の動向としては、この先 2020 年ごろに各国で厳しい燃費規制が予定されており、各社ともどのように規制をクリアするかを検討と開発が進められている。

その厳しい燃費規制をクリアするための方法として、エンジンとモーターを併用するハイブリッドシステムが有効であるが、今後国際基準として採用される WLTP (Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedures: 乗用車などの国際調和燃費・排ガス試験方法) モードによる評価では、より高負荷域まで試験運転領域が広がり、ハイブリッドのメリットを出しにくくなる。つまり、街中での低速・渋滞走行から高速走行まで幅広く、力強さと低燃費の両立が求められることになる。一般ユーザーにとってみればうれしい話であり、歓迎すべき規制動向であろう。一方、開発する技

術者にとっては、これまでの延長上の技術では容易に超えられない目標値と思われ、新しいチャレンジが必要となる。どのような方式を選択するとしても、パワートレイン (発生させた動力を車輪に伝える装置) としてのエンジン全体効率向上が必須であり、技術の実力が問われるのは確実である。IHI としては、お客さまとの日々の会話を重ねながら、将来技術動向を見据え、最適な提案ができるよう先行開発を実施している。

今回は、次世代エンジン向けに開発を進めている、電動化技術と過給技術を融合した、新しい二つの製品を紹介する。

### 電気エネルギーを使える市場環境

今後の燃費規制をクリアするために、ヨーロッパの自動車メーカーも日本と同様な PHEV (プラグインハイブリッド車) を開発し、販売を開始している。PHEV は電気自動車としても一定距離を走行できるため、バッテリーの電気がなくならないように一定距離内の利用と充電を繰り返していれば、燃料をほとんど

消費しない。そのため、燃費の算出方法に議論が起きているものの、平均燃費を向上させる有効な手段であることから、今後も普及は進むとみられている。ターボエンジン（ターボチャージャーを搭載したエンジン）と PHEV の組み合わせなど、電気エネルギーをターボチャージャーの加速に活かせる環境に市場は変化してきている。

### 電動アシストターボチャージャー

電動アシストターボチャージャーは、圧縮機とタービンの間にモーターを配置したターボチャージャーである。排気エネルギー駆動タービンと電動モーターをもつことで、排気ガスエネルギーが不足するときに電力が使えるため、空気を圧縮するという機能を幅広い条件下で実現することができる。さらに必要とされる圧縮空気の量が少ない場合に、排気ガスのエネルギーの一部を電力として回生することも可能であり、いわばターボチャージャー版ハイブリッドシステムといえる。適用条件としては、通常のターボチャージャーとしての使用を前提としているため、最高回転数やガス温度、耐久信頼性は通常のターボチャージャーと同等仕様としている。

車載されている 12 V バッテリーの電気を使うことを前提にすると、ターボチャージャーの回転を短時間に加速するうえで十分な電力を得ることが困難なので、ヨーロッパで検討が進んでいる 48 V の適用が有効である。

電動アシストターボチャージャーは、シングルターボ（エンジンにターボチャージャー 1 台搭載）で低速から高速まであらゆる領域での電気エネルギーによ



電動アシストターボチャージャー

る加速が可能で、電力回生もできるという特長があるため、今後のエンジンシステムの性能向上に寄与できる製品である。

### 電動コンプレッサー

電動コンプレッサーはタービンがなく、モーターとコンプレッサーを組み合わせた製品である。排気ガスを扱うタービンのような高温部がないという特長を活かし、使用制限温度の低い電子機器からなるインバーターと一体型にしたコンパクト設計としている。

使用用途として想定しているのが、ターボチャージャーと組み合わせた 2 段過給システムである。シングルターボでは達成困難な過給圧と、作動レンジを得る手段としての 2 段過給は現在でも採用されている。しかし、排気管が複雑形状になり、低速レスポンスを得るために片方のターボをかなり小さくしなければならぬなど、開発するには時間と費用が掛かるうえ、搭載に広いスペースが必要という問題がある。

電動コンプレッサーであれば、排気ガスや潤滑油配管も不要で、電気を供給するだけで過給圧を得られるため、搭載するメリットが大きい。またレスポンスに関しても最適制御と低慣性モーメント設計により、ターボラグ（アクセルを踏んでからターボチャージャーの力が発揮されるまでの時間遅れ）はないに等しい。IHI は連続運転が可能な高効率仕様のモーターを自社開発しており、十分な電力供給が得られれば、常時運転可能な 2 段過給システムとして使用可能である。

これからの高効率なエンジンシステムに対応できる 2 種類の電動技術を応用した新型過給機を紹介した。

排気ガスエネルギーをもらってタービンを回す従来のターボチャージャーに、電気エネルギーの力で加速する電動過給機をラインナップに加えることで、ますます多様化するお客さまのニーズに最適な提案をし、過給技術でエンジンの発展に貢献していきたい。

問い合わせ先

株式会社 IHI

車両過給機セクター 営業部

電話（045）759-2849

URL：www.ihico.jp/

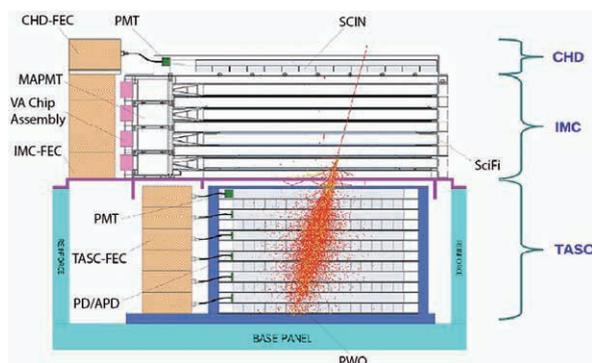
# 宇宙の謎 暗黒物質の起源に迫る

## 高エネルギー宇宙線を観測する 最新鋭の宇宙線観測装置 CALET

株式会社 IHI エアロスペースでは国際宇宙ステーション「きぼう」の船外実験プラットフォームに設置する、世界最高レベルの観測性能を備えた宇宙線（電子，ガンマ線）観測装置（CALET）を開発した。



CALET ©JAXA



カロリメーター模式図

宇宙には我々が光，あるいは電磁波などで観測できる物質の数倍を超える質量を持つ観測にかならない物質「暗黒物質」が存在することが知られている。暗黒物質の正体は現在でも特定されていない宇宙物理学の謎である。

暗黒物質の正体の探求など宇宙の構造や天体現象の総合的理解のためには，従来の可視光，赤外，X線などの電磁波による観測に加えて，宇宙線や高エネルギーガンマ線を直接観測する観測装置が求められている。

株式会社 IHI エアロスペース（IA）では，国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）のもと，研究の中心である早稲田大学のご指導により，宇宙ステーションに搭載する宇宙線観測装置の高エネルギー電子，ガンマ線観測装置（CALorimetric Electron Telescope

：CALET）を開発した。

CALET は個々の高エネルギー宇宙線の到来方向，エネルギー，種類の観測を行うことで，その起源と加速のメカニズムなどを解明することを目的として開発した観測機器であり，国際宇宙ステーション（ISS）の「きぼう」日本実験棟 船外実験プラットフォームに取り付けられる大きさ  $0.8\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.85\text{ m}$ ，質量  $613\text{ kg}$  の箱型の装置である。ISS には宇宙ステーション補給機「こうのとり」（HTV）により輸送し，船外実験プラットフォームに設置される。船外実験プラットフォームから電力，通信機能，冷却水などの提供を受け観測を行う。

CALET はカロリメーター，ガンマ線バーストモニター，ミッションデータ処理装置，サポートセンサー，および ISS，HTV とのインターフェース機器



左：全吸収型カロリメーターセンサー（タングステン酸鉛結晶シンチレーター）  
 中：イメージングカロリメーターセンサー（シンチレーションファイバー）  
 右：電荷測定器センサー（プラスチックシンチレーター）

で構成され、観測機器を含めて、IA が開発した。

カロリメーターは CALET のメインミッション機器であり、入射粒子の原子核成分の原子番号を特定する電荷測定器、宇宙線の電荷や到来方向などを検出するイメージングカロリメーター、シャワーという次々と発生する粒子の発達の様子やエネルギーを計測する全吸収型カロリメーターの 3 層により構成されている。従来の観測装置では困難であった高エネルギー宇宙線を精密に観測できるため、これまで解明できていなかった高エネルギー宇宙線の加速、伝播のメカニズムなど世界に先駆けた発見が期待されている。

宇宙線の観測は、通常の光による観測とは異なり、宇宙線の入射により発光する蛍光物質のシンチレーターと、発生した蛍光を電気信号に変換する光電子増倍管やフォトダイオードなどの光検出器を組み合わせたセンサーにより実施する。

カロリメーターのそれぞれの機器は、入射した粒子が検出器との相互作用を繰り返しながら、発達していく姿を可視化できるようにセンサーを敷き詰めた層を、互いに直角方向に交互に配置している。電荷測定器は 32 mm 幅のプラスチックシンチレーターを使用したセンサー 14 本を 2 層、イメージングカロリメーターは、1 mm 角のシンチレーションファイバーを使用したセンサー 448 本を 16 層、全吸収型カロリメーターは 20 mm 角のタングステン酸鉛結晶を使用したセンサー 16 ch を 12 層に配置しており、全体で 7 564 ch のセンサーを有している。それぞれのセンサーの出力は前置回路と呼ばれる装置により処理されミッションデータ処理装置を介して出力し、地上に観測データとして送信される。送信された観測データは

地上で研究者により処理され、粒子の種類やエネルギーの大きさなどが特定される。

宇宙に打ち上げられる装置は、軽量化、小型化が要求される。また、宇宙特有の環境である真空、温度、打ち上げ時の振動環境に耐える必要がある。これに加えて、CALET ではシンチレーターの脆性、真空環境下での高電圧の放電防止、微小信号に対するノイズを課題として開発を行った。

前述したシンチレーターの一部はガラスよりももろい材料である。一般的な金属構造による剛な保持では、打ち上げ時の振動や線膨張係数の違いなどにより割れてしまう。CALET では、通常とは異なり、ゴムにより全体を保持する設計を採用した。構造解析により成立性を確認したうえで、個々の材料や試作品の試験を行い、試験結果を解析にフィードバックして設計を確定した。

観測装置で使用する光検出器は高電圧を使用するが、CALET では約 80 チャンネルもの高電圧を使用している。高電圧を宇宙で使用する場合は、放電に注意する必要がある。真空に近い環境では放電が発生しやすく、放電が発生した場合には機器の損傷につながる。放電防止は、設計、製造の両方に特段の注意を払う必要があり、経験の少ない分野であったが、電子機器を絶縁保護するコーティングや、ケース内に絶縁体を注入するポッティングにより放電経路を遮蔽する設計とし、試作試験によりコーティング材料を決定、製造工程を確立し製品を製造した。

また、光検出器からの信号は、特に微小（ $\sim 10^{-15}$  クーロン）であり、必要な測定精度を確保するためには回路ノイズを極限まで下げる必要がある。これを限られたスペースの中で実現するために回路試作と評価を繰り返し、所定の性能を達成した。

CALET は HTV5 号機に搭載され、2015 年 8 月に宇宙ステーションに設置される。設置後、初期機能確認を実施した後に、観測を開始する予定である。

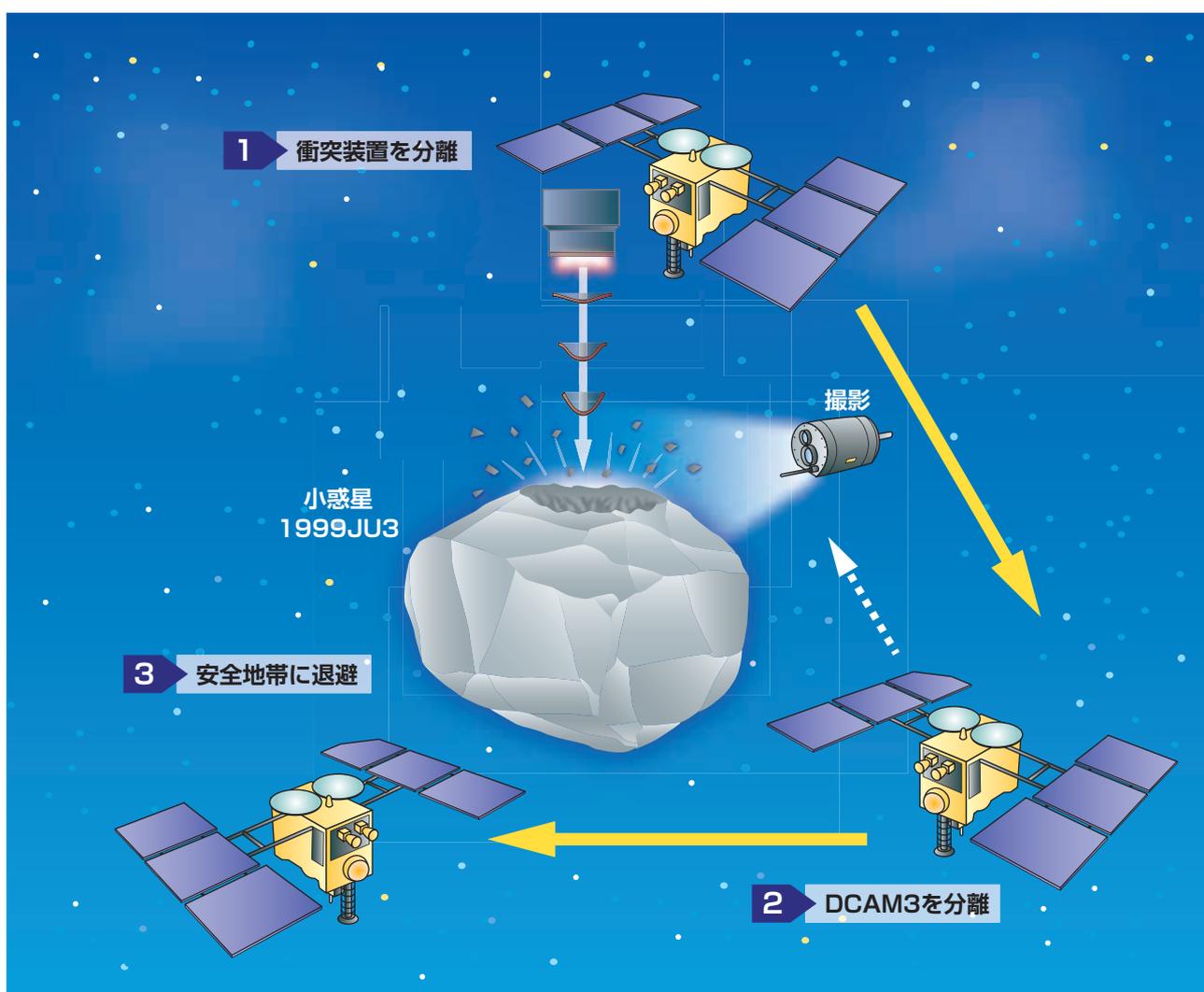
#### 問い合わせ先

株式会社 IHI エアロスペース  
 宇宙技術部 宇宙利用技術室  
 電話（0274）62-7676  
 URL：www.ihico.jp/ia/

# 小惑星探査の 第一撃を撮影せよ！

## COTS 品の活用で実現した超高性能・低コスト・短納期 分離カメラ DCAM3

数々の困難を乗り越えて地球に帰還した小惑星探査機「はやぶさ」の記憶もさめやらぬ  
2014年12月3日、「はやぶさ2」がH-IIAロケットにより無事打ち上げられた。  
今回の「はやぶさ2」には明星電気株式会社が製作に携わった機器が3台搭載されているが、そのなかのDCAM3について紹介する。



分離カメラ DCAM3 ミッションイメージ

## 衝突装置がクレーターをつくる瞬間を撮影

現在、「はやぶさ2」は火星よりもやや太陽に近い軌道にある小惑星 1999JU3 を目指して飛行中だ。主なミッションは前回の「はやぶさ」と同じく小惑星に到着し、探査するとともにそのサンプルを持ち帰ること。この 1999JU3 は、前回探査したイトカワとは異なる種類の小惑星で、より多くの有機物や水分が含まれていると考えられている。その物質を採取、分析することで、現在地球上にある水はどこから来たのか、生命体をつくる有機物はどのようにしてできたのか等々の疑問に答える糸口を見つけ出そうとしている。

今回のミッションで最も注目されているのが、風化の影響を受ける惑星表面の物質ではなく、“新鮮”な、すなわち“太陽系が生まれた当時の物質”を小惑星の内部から採取することだ。その方法として、衝突装置を小惑星の表面にぶつけて人工的なクレーターをつくり、現れた部分を採取する方法が開発された。明星電気株式会社が製作した DCAM3 は衝突装置がぶつかる瞬間を撮影するのが主な役割である。

具体的な手順は以下のとおり。「はやぶさ2」が小惑星にある程度接近したところで衝突装置を分離する。さらに、その衝突装置から約 1 km 離れた位置に DCAM3 を分離する。宇宙空間にこれら二つの装置を“置いた”後、母船である「はやぶさ2」本体は、小惑星の裏側の安全地帯に回り込む。一定時間経過後に約 5 kg の爆薬によって衝突装置が小惑星に向けて発射され、最大直径 10 m ほどのクレーターを形成する。DCAM3 が担うミッションは、衝突装置が当たる様子とそのとき表土が飛び散り舞い上がる様子を高分解能で撮影することだ。

## 高分解能カメラの予定外“同乗”の難題もクリア

DCAM3 は衝突実験のスタート数分前に自動的に電源が入れられ、衝突装置が発射されてからの 1 時間あまり、約 1 km 先の衝突装置が 4 ピクセルに収まる程度の高分解能で 1 秒間隔の連続写真を撮影する。その後、電池が切れるまで低分解能で撮影を続ける。これらの画像データを圧縮し、母船である「はやぶさ2」に無線送信する。電池が切れたところでミッ

ション終了となる。

当初は、状況の撮影のみがミッションであり、それほど高い分解能は求められていなかった。このため別メーカーが開発した低分解能（アナログ）カメラを搭載することになっていたが、プロジェクトが進むなかで、高分解能カメラで撮影すれば、その画像を分析することでどのような成分（水分や無機物）が含まれているかが分かるというアイデアが浮上した。そのため急遽、すでに配置が決まっていた DCAM3 の中に、アナログカメラのほかに全く独立したレンズと回線によるデジタルカメラを“同乗”させることになったのだ。このデジタルカメラの製作および、撮影した画像の圧縮プログラム、母船である「はやぶさ2」への送信プログラムと送信システム（母船側での受信、メモリーへの蓄積も含む）の構築を明星電気担当した。

## プロジェクトに遅れて参加でも 通常の 2/3 の開発期間で完成

開発にあたって三つの点で苦労した。第 1 はスペースの問題。すでにアナログカメラの配置は決まっていた、限られたスペースの中にデジタルカメラと一緒にうまく格納するにはどうしたらよいか、ということ。これには小さな部品を選んで全体をコンパクトに仕上げることに効率良く配置することが不可欠である。第 2 は通信の問題。10 km 先の母船（「はやぶさ2」）までは 4 Mbps で、10 km から 20 km 先までは 1 Mbps で送信するという仕様だった。それを満足させることができるかどうか。さらに第 3 として製作期間が通常の 2/3 ほどしかなかったことも苦労した点として挙げられる。

明星電気がプロジェクトに加わったのは、2012 年夏。ほかの機器の担当メーカーは基本設計審査会（PDR）を経て、技術検証モデルの製作および検証を行い、詳細設計（フライトモデル設計）に入るタイミングだった。すでに進んでいたプロジェクトに途中から参加する形だったが、当然のことながら納期は最初から関わってきた機器と同様だ。今回は 2014 年 3 月までの 2 年弱の期間で仕様をクリアする製品を作り上げる必要があった。

## 長年の実績に裏打ちされた 小回りの利くうれしい対応

DCAM3 に組み込まれるのは、デジタルカメラ、データの圧縮装置、送信装置とアンテナ、これらのバッテリーおよび回路。第1のスペースの問題は、アナログカメラを搭載することが先に決まっていたので、空いているスペースとの勝負だった。まずは、宇宙環境に耐える必要な部品を集め、回路図を書き、プリント板実装図という図面に載せて配置した。高分解能であることが第1条件なので、レンズと3.5mm角のセンサーの組み合わせは動かすことができない。また、電波を使って送信する回路はアンテナのそばに置かなくてはならない。加えて、膨大な画像処理を行うIC（集積回路）にもある程度の大きさが必要だ。これらの整合性をとりつつ図面に載せていくのだが、載りきれなくなると部品選びに戻る。基板や配線などのスペースを削りに削り、部品の選び直しの作業が続いた。

通常、宇宙開発に使われる部品は、その信頼性からも防衛目的に開発されたものがほとんどである。これらは堅固である一方、コンパクトではない場合が多く、今回のように限られた空間に搭載するのには向かない。そこで今回はCOTS品（民生品）のなかから放射線耐性などを考慮しながら選別し、宇宙環境に使える電子回路を組むという技術を駆使する必要があった。

宇宙では瞬間的に大きなエネルギーをもった放射線が入射することがあり、制御回路が予期せぬ動きをすることがある。また、放射線によりICの絶縁が破壊

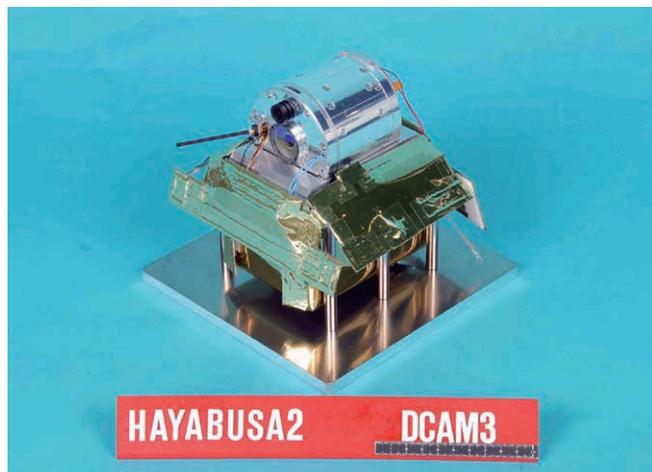
されると復帰の方法がなく致命的だ。あるいはイメージセンサーに宇宙放射線が当たると“白キズ”といわれる、ポツポツと画素の色が抜けてしまう症状が起きることなどがある。そのほかにも、真空状態になるとシールドに使っているプラスチックなどからアウトガスという不必要なガスが出ることがあるので、これを避けて選ぶことが重要だ。

通信機能のテストでは、受信機側の感度が低く、安定的に10km先に送ることができなかつたり、画像処理がうまくいかなかつたりと調整を要する一幕もあった。これは、受信機側の電力を若干上げることで要求性能を達成した。

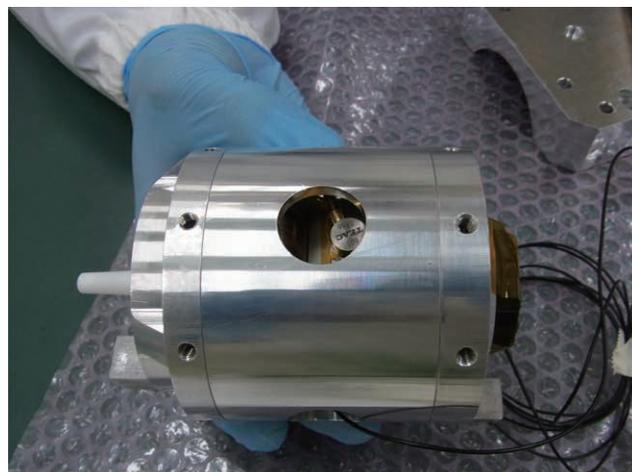
さまざまな困難な条件を乗り越えられた要因の一つは国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）との信頼関係だろう。レンズを含め光学的な画像を撮影する機器の製作技術や画像処理の技術は、ハイビジョンカメラで月面を撮影した月周回衛星「かぐや（SELENE）」などで実証済みだ。データ通信技術は宇宙での実績こそなかったが、電話事業、ラジオゾンデ、防衛関係を手掛けてきたことで信頼関係があった。同時にコストに敏感できめ細かい要求に応える小回りの良さも明星電気の特徴として知られており、「宇宙関係のカメラ技術はまず明星へ」という流れができつつあった。

## 宇宙仕様のニッチなニーズにとことん応える

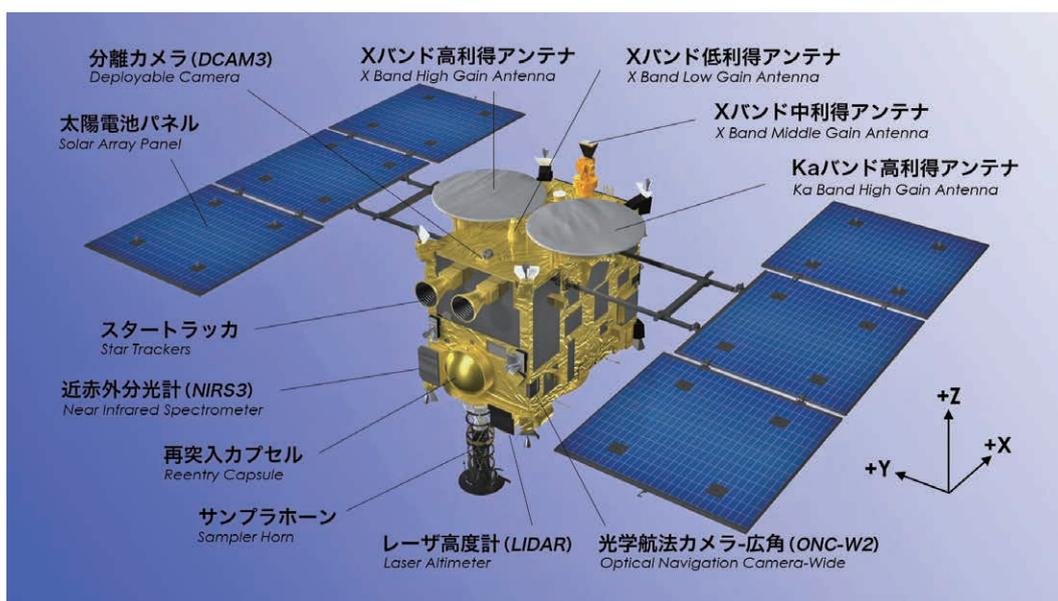
実は明星電気のみが有していて、他社が持っていない独自の技術はない。例えば、DCAM3を作る際もイ



分離カメラ DCAM3 ©JAXA



デジタルカメラを組み込んだ振動試験用模擬筐体



「はやぶさ 2」機器名称 ©JAXA

イメージセンサーの構造には CMOS ( Complementary Metal Oxide Semiconductor ) や CCD ( Charge-Coupled Device ) があり、そのなかで放射線に耐えやすいものを試験して選び出した。今回採用した CMOS は放射線耐性では最高性能ではないが、サイズが小さく、少ない電力で作動する。これは一般のデジタルカメラに使われている半導体で、部品として購入して採用した。ただ、このイメージセンサーからの画像情報を圧縮して母船に送る技術は、明星電気が開発した。あえて自社の特徴を挙げれば、民生品の部品のなかから宇宙仕様に適しているものを選び出すこと、選ぶためにどのような試験をすればよいかなどのノウハウが社内に蓄積されていることが、独自の技術といえるのかもしれない。

限られた時間のなかで、コンパクトで高性能な仕様を求められるときは、JAXA の許可を得たうえで民生品を使うことも必要となる。

明星電気では過去にさまざまな部品を試験しており、その経験からメーカーごと、部品ごとのおよその傾向をつかんでいる。疑問点があればメーカーと直接やり取りするルートも確立しており、適切なものを選び出すことができる。もちろん、自社で製作する部分もあるが、民生品のなかからフレキシブルに部品を調達しアSEMBルすることにより、高度な仕様、期待されるコスト、そして納期に答える。非常にニッチな立ち位置だが、ニーズは確実に存在し、ここに対応できることが明星電気の真骨頂であり、DCAM3 ではまさ

にそれが存分に活かされた。

さて 2018 年、「はやぶさ 2」が小惑星に到着し、DCAM3 による衝突実験の撮影が無事成功したとしても、それを私たちが地上で見るのは、衝突実験から 1, 2 年後になる。「はやぶさ 2」は地球との間でさまざまなデータをやり取りしているが、その合間を縫って、これらの画像データを送信するので、圧縮されたデータとはいえかなりの時間が掛かることが見込まれるためだ。難題続きの開発と同じく、すべてがうまくかみ合い成功の果実がもたらされることを期待しつつ、画像データの受信および 2020 年の帰還を待ちたい。

## ミニ解説

### COTS 品

従来航空宇宙や軍事関係で用いられる機材や部品はほとんど特注品であったが、コスト低減や納期短縮のために民生品のなかから仕様を満足するものを積極的に採用するようになってきた。これが COTS 品であり最近では特注品の使用が多い産業分野でも同様の動きがある。品質評価と選定技術力が一つのポイントとなる。

### 問い合わせ先

明星電気 株式会社

宇宙防衛事業部

電話 ( 0270 ) 32 - 1111

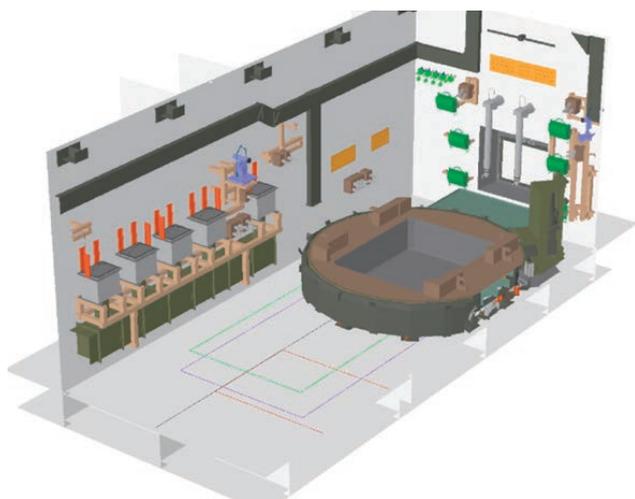
URL : [www.meisei.co.jp/](http://www.meisei.co.jp/)

# 全遠隔操作による難工事 ガラス溶融炉解体設備完工

## 全遠隔操作による高放射線環境下での 設備導入工事実績の紹介

高レベル放射性廃液をガラス原料と混合・溶融して固化し、安定な廃棄体とするためのガラス溶融炉は、人の立ち入れない高放射線環境下で定期的に交換・解体する必要がある。ここでは、このガラス溶融炉を遠隔操作にて解体するため新たに開発した設備について、その開発経緯および導入実績を紹介する。

(a) 設備導入工事前



(b) 設備導入工事後



ガラス溶融炉解体設備全景 (3D モデル)

### 背景

青森県六ヶ所村にある日本原燃株式会社再処理工場では、使用済み核燃料の再処理工程で「高レベル放射性廃液」が発生する。本廃液は「高レベル廃液ガラス固化施設」内に設置された「ガラス溶融炉」にて、原料ガラスと混合・溶融し、長期保管に適した安定な固化体とする。

ガラス溶融炉およびその周辺設備は、高レベル放射性廃液と同様、極めて高い放射能を有するため、同施設内の「固化セル」と呼ばれる遮へいされた部屋の中に設置されている。また、ガラス溶融炉には設計上の

寿命があり、施設運転を継続するため、数年に一度定期的に新規品と交換する。加えて、寿命を迎えたガラス溶融炉（廃溶融炉）の保管スペースには限りがある。

そのため、廃溶融炉は施設内で解体・減容したうえで、所定の搬送容器に入れ、順次施設外へ搬出する必要がある。

この廃溶融炉を解体・減容するための設備が、「ガラス溶融炉解体設備」であり、上述の固化セル内に設けた専用の解体作業エリアに設置されている。本設備は、2009年より基本設計を開始し、詳細設計・製作・試運転などを経て、2014年4月にすべての設備導入を完了した。

## ガラス溶融炉解体設備の概要

ガラス溶融炉解体設備は、主に「切断装置」および「遠隔操作装置」により構成される。

切断装置は、廃溶融炉を切断・解体するために使用され、本設備で新たに開発したレーザー切断方式の装置を採用した。レーザー切断方式を採用した主な理由は、他方式と比較して以下のような利点があるためである。

### 【レーザー切断方式の利点】

- ・切断能力が高く、廃溶融炉の主材であるステンレス鋼の厚板も高速で切断できる。
- ・さまざまな形状の切断対象物（主にステンレス鋼）に対し、切断作業の自由度が高く、遠隔操作での高効率な切断を実現できる。
- ・切断時に発生する二次廃棄物が少ない。

次に遠隔操作装置は、解体作業エリア内での装置の搬入、設置、運転および保守を行うために使用され、遠隔操作可能なクレーンおよびマニピュレーターにより構成される。

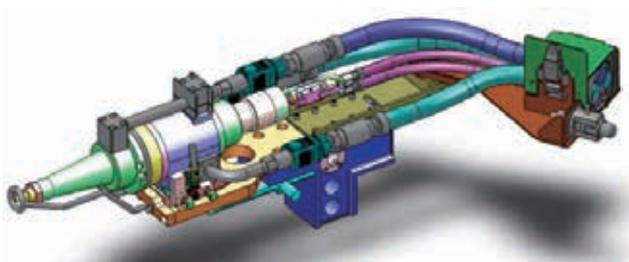
解体作業エリアは、非常に限られた作業スペースしかなく、その限られたスペースの中で、ガラス溶融炉へのアクセス性および作業性の向上を図る必要があった。そのため、解体作業エリアには、単腕の電動マニピュレーターアームを複数配置した。

## 遠隔操作装置による作業性を考慮した設備開発

遠隔操作装置を使用した作業には、さまざまな困難が伴う。

たとえば、フランジ付配管交換のような作業一つとっても、

- ①フランジボルトを緩める



レーザー切断装置外観



ガラス溶融炉外観



天井クレーン付マニピュレーターアーム



自立式マニピュレーターアーム

- ②古いフランジ付き配管とボルトを受け側フランジから取り外し、搬送する
  - ③古いナットとガスケットを取り外し、搬送する
  - ④新しいナットとガスケットを搬送し、所定の位置に取り付ける
  - ⑤新しいフランジ付き配管とボルトを搬送し、所定の位置に取り付ける
  - ⑥ボルトを締め付ける
- という作業ステップに分けることができる。

人手による作業ではさしたる困難はないが、遠隔操作では各作業ステップにおいて、

- ・作業の様子、遠隔操作装置とハンドリング対象物（フランジ付き配管、ボルト、ナット、ガスケットが該当）の位置関係をカメラで確認できること（視認性）
  - ・遠隔操作装置およびハンドリング対象物が、他設備、機器などと干渉することなく施設内で移動できること（動線・ハンドリング）
  - ・遠隔操作装置で、ハンドリング対象物を容易に取り外し、また取り付けられること（脱着性）
- などの条件をクリアする必要がある。

加えて本解体設備では、装置の搬入・設置および、運転・保守作業のすべてを遠隔操作で実施する必要があった。

これらを踏まえ本設備には、遠隔操作が必要となる設備固有の構造・手順・配置に関する工夫が盛り込まれている。

さらに、各装置の設計と併せて、遠隔操作に関するさまざまな検証を行うことで、遠隔操作性のさらなる向上を図っている。

以下に、その検証の一部を紹介する。

## 【設計段階での検証】

まず、想定されるすべての遠隔操作について、3D-CAD を用いた遠隔操作シミュレーションを行っている。シミュレーションでは、遠隔操作装置の動作や操作に用いる監視カメラの視野などを再現し、遠隔操作に適した装置構造の妥当性を検証している。

## 【試運転による検証】

加えて、実機または模擬体を用いたモックアップ試験による検証を実施することで、検証の確度を向上させている。

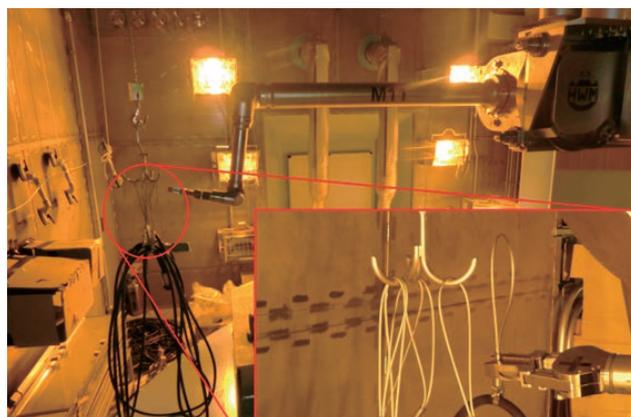
今回の導入工事では、日本原燃の実規模モックアッ

プ施設にて、製作した装置を用いて各遠隔操作を実際に行い、遠隔操作性の最終検証を実施した。

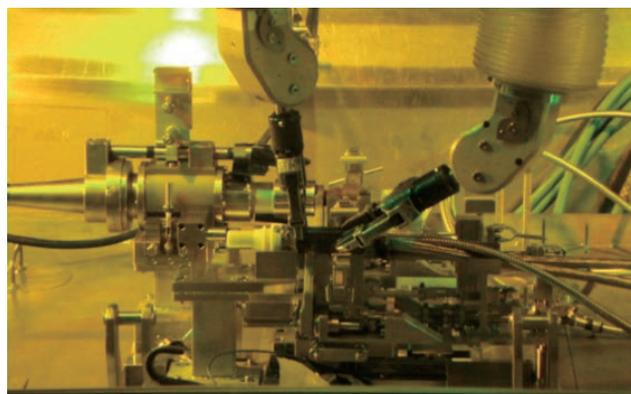
これらの入念な検証作業を経ることで、遠隔操作による本設備の現場への導入工事を大きなトラブルなく完工することができた。



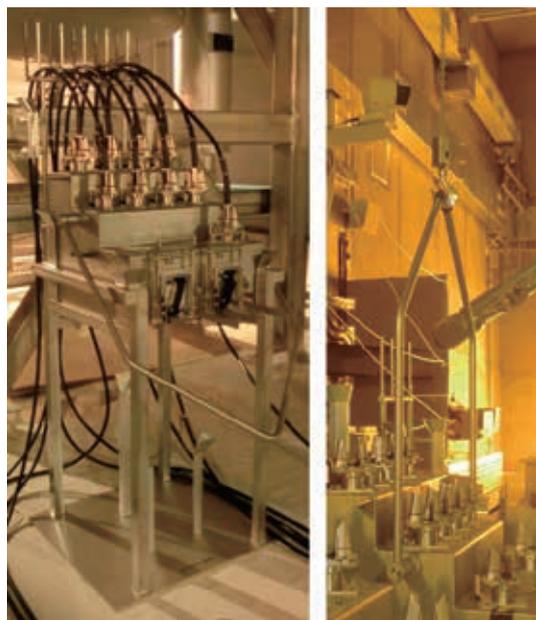
3D-CAD を用いた遠隔操作シミュレーション



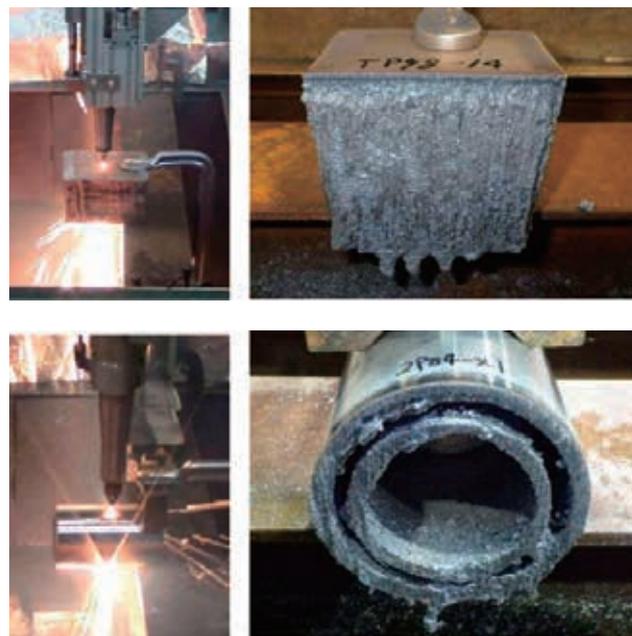
ホイストフックおよびマニピュレーターによるケーブル敷設作業（モックアップ施設にて）



接続治具による、光ファイバーおよびレーザーヘッドの接続作業



中継端子箱  
(左：全体、右：吊金物にホイストフックを掛けた状態)



レーザー切断装置によるガラス溶融炉部材の切断試験  
(上：ステンレス製厚板、下：インコネル製二重管)

## レーザー切断装置の開発

本解体設備に適用したレーザー切断装置は、既存の高出力ファイバーレーザー切断装置をベースに、高放射線環境下であることはもとより、特殊な作業環境を考慮したさまざまな開発および実証試験を経て誕生した。

以下に本レーザー切断装置の特徴を紹介する。

まず、本切断装置のレーザーヘッド部は、徹底的な軽量化・スリム化を図った。これにより、マニピュレーターアームによるスムーズなレーザーヘッドの遠隔操作が実現できる。

また、レーザーヘッドに接続される複数のケーブル・ホースは、遠隔操作の妨げになり得る。そのため、これらケーブル・ホースのルーティングについて入念な検証作業を経て、本解体設備向けの最適化を図った。

さらに、切断時のレーザー光により、切断対象物以外の施設内構造物を損傷させることのないよう、レーザー光の熱影響範囲を考慮した安全インターロック機能を付加した。

これらの特徴により、スムーズな遠隔操作で、安全かつ高効率なガラス溶融炉解体作業を実現することができる。

## 今後の展望

今回のガラス溶融炉解体設備導入工事は、全遠隔操作による非常に難しい工事であったが、遠隔操作を考慮した工夫や、入念な検証を行うことで、大きなトラブルもなく無事完工することができた。

今後は、実機ガラス溶融炉解体作業の成功に向けた運転支援を行っていく。また、今回の工事で得られた知見や教訓を活かし、施設内で遠隔操作が必要な各種作業のさらなる操作性向上や作業効率の改善を図り、再処理施設の安定運転に貢献していく。

さらに、本工事のように人の立ち入れない高放射線環境下での遠隔解体技術は、福島第一原子力発電所をはじめとする廃炉事業においても多くのニーズが期待されるものである。このニーズに応えるべく、今後本技術を活かした廃炉事業への展開も図っていきたい。

問い合わせ先

株式会社 IHI

原子力セクター システム設計部

電話 (045) 759-2664

URL : [www.ihico.jp/](http://www.ihico.jp/)

# 無人建設機械が実現する より安全で確実な災害復旧工事

## CAN 制御車両により建設機械の ロボット化を促進

台風や地震、噴火などの自然災害に見舞われることが少なくない日本。被災地では迅速かつ安全な復旧作業が求められる。そのような復旧現場での活躍が期待されているのが、遠隔操作が可能な無人建設機械である。IHI 建機株式会社では、新しい方式の無人建設機械を開発し、現場作業での実証試験を行って実用化に成功した。



CAN 制御車両 CL45 (トラックローダー)



無人化施工操作室

### 現在も続く雲仙普賢岳の防災工事

1990年に噴火した雲仙普賢岳（長崎県）では、活発な噴火活動は治まったものの、現在でも続く火山活動の元で、火砕流や土石流による被害抑制を目的とした砂防堰堤えんていの建設工事が続けられている。

砂防堰堤の建設は火砕流が発生する恐れのある「立入禁止区域」で行われているため、遠隔操作が可能な無人建設機械（以下、無人建機）が用いられている。したがって、通常の砂防堰堤の建設で行われる型枠や鉄筋の設置など、専門の作業員が担当する作業を行うことができない。そこで採用されたのが RCC (Roller Compacted Concrete) 工法である。

工事は以下の手順で行う。① 砂防堰堤の外周に沿って土盛りをする ② 一定の高さの土盛りが完了す

ると、土盛りで囲まれた空間に固練りコンクリートを打設する ③ コンクリートが固まった後、再び土盛りを行い、コンクリート表面の土砂などを取り除き、再度コンクリートを打設する ④ この作業を繰り返すことで、必要な砂防堰堤の高さを実現する ⑤ 所定の高さに達したら、周囲の土盛りを取り除き、砂防堰堤が完成する。土盛り、コンクリート打設、清掃などの各工程、各作業でそれぞれ用途に応じた無人建機が用いられ、工事が進められている。

### 無人建機からのフィードバックが重要

1994年から行われている無人化施工では、市販されている建機を遠隔操作が可能になるよう改造を施した無人建機を用いるのが一般的である。建機の多くは

油圧を利用して操作する仕組みを採用している。これを無人化するためには、通信系に加え、油圧を制御するための電磁弁などを新たに設置する必要があり、改造には多くの時間とコストが必要だった。また信号が一方通行のため、オペレーターが操作レバーなどに感触として伝わる「手応え」が感じられない点も、無人建機による効率的な施工を難しくしている一因であった。

国土交通省は、2014年度に「次世代社会インフラ用ロボット（災害応急復旧技術）」プロジェクトの一環として、現場検証・評価が可能なロボット技術・ロボットシステムを公募した。そこで株式会社熊谷組、株式会社 IHI、IHI 建機株式会社（IK）では、これまでの無人建機の課題を解決できる新しい無人建機システムの開発に取り組んだのである。

## オペレーションの要となる「味付け」

開発に当たって IK が対象として採用を決めたのが、CAN（Controller Area Network）と呼ばれる制御システムをもつ車両である。CAN はすでに自動車で広く採用実績があり、電子制御が導入されつつある建機でも一部導入が始まっている制御規格である。CAN 制御車両では、ハンドル、アクセルなどの各種操作がいったん電気信号に変換され、車上のネットワークに流される。これが同じネットワークに接続されたモーターや電磁弁などを制御し、オペレーターが望んだ動作を実現する。

無人化するためにネットワーク上の信号を無線でオペレーターのところまで飛ばすということは、おなじみの Wi-Fi（無線 LAN）と同様の仕組みとなる。実際、現場では市販の Wi-Fi 装置を用いたため、システムの堅牢性、短い信号遅延時間、免許不要で遠距離通信可能といった多くのメリットがあった。なかでも有効だったのがオペレーター、建機の両方から情報を送れる双方向性という特長である。

建機には自動車と異なるニーズがあり、それが「味付け」と呼ばれる操作感の微調整である。建機のアームなどの操作レバーへの追従性は、オペレーターによって好みが異なり、油圧系を微調整することによって応えていた。従来機ではこの調整作業を建機本体に対して行う必要がある。しかし CAN 制御車両で

は、建機の手応えをパラメーター変更で、遠隔の微調整が可能になった。

また、オペレーターは自分自身が搭乗して操作しているように見える画面よりも、客観的に建機を見ながら操作する方が、より確実に操作できることが分かったことも、今回の開発で得られた知見の一つである。車両の傾きなどを感じられない無人機では、バーチャルリアリティーよりも客観的な視点の方が好まれた。これは現場のオペレーターと幾度となく実証試験を重ねた成果といえるだろう。

## 実証試験で新しい無人機の有効性を確認

開発された 2 機の無人建機は、2012 年度から行われている「赤松谷川 11 号床固工工事」の砂防堰堤の建設で使用された。1 台は複数のカメラを搭載した「移動カメラ車」で、もう 1 台は打設したコンクリートの表面を清掃する「清掃車」である。移動カメラ車はほかの無人建機に先駆けて現場に入り、現場の状況の把握と、作業状況の確認に大きく貢献した。また、清掃車も迅速かつ確実な作業を実現でき、高い評価を得た。

実用化に成功した CAN 制御車両を利用した無人建機は、低コストで無人化が可能なことに加え、通常は一般の建機として利用し、災害発生時は無人建機として使用するという活用方法も可能である。災害復旧専用機を導入するには導入コストが障害になるが、一般建機としても使用できるのであれば、導入の障壁は大きく下がることになる。

今回開発した建機はトラックローダーと呼ばれる多目的作業車両で、アタッチメントを取り替えることでさまざまな工事に対応することが可能だ。IK ではさらにこの技術の運搬用建機への展開を図る予定である。無人建機の普及拡大を通じて、IK は迅速な災害復旧に貢献していく。

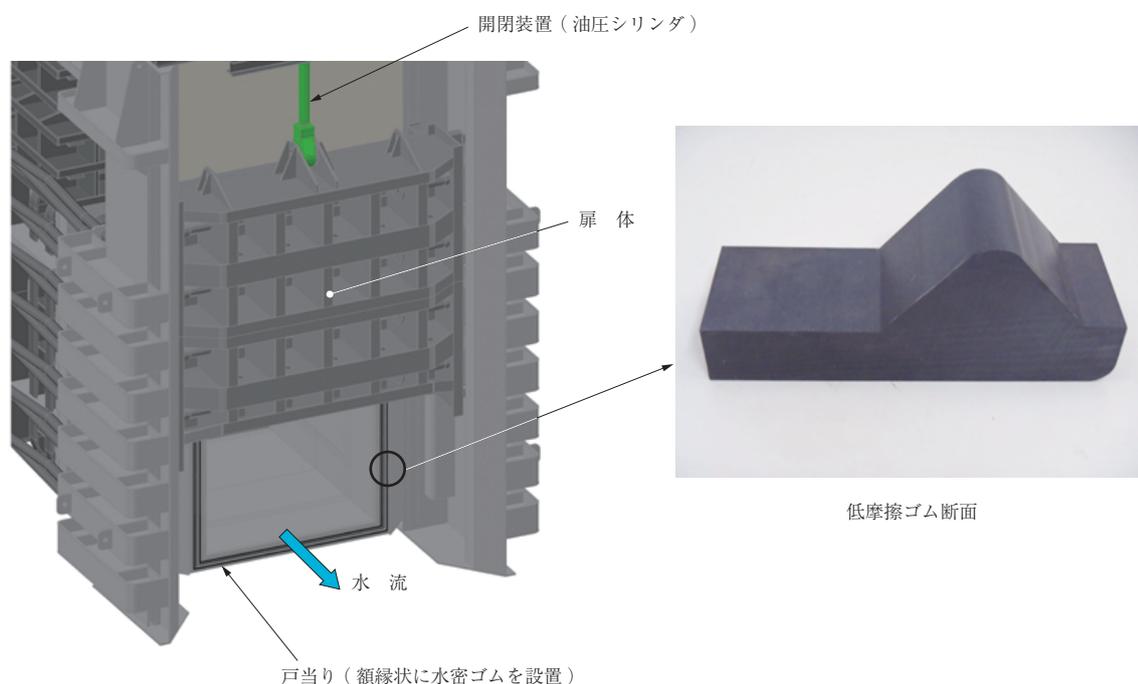
問い合わせ先

IHI 建機株式会社  
営業統括部 営業戦略部  
電話（045）276-2463  
URL：www.ihikenki.co.jp/

# 水密ゴムの改良で 開閉装置のコストダウン

## 水密ゴム摩擦抵抗の低減を実現した「低摩擦ゴム」

ダムに設置される高圧ゲートの水密ゴム摩擦抵抗は、開閉荷重のなかで大きな割合を占め、開閉装置の大型化、コスト増が課題となっている。この抵抗を可能な限り低減させることができれば、開閉装置のコンパクト化を図ることができ、新設備はもとより取替工事にとっても大きなメリットになる。



高圧ローラゲートに設置される低摩擦ゴム

### 水密ゴム摩擦抵抗の低減がコストダウンの決め手

ダムや河川に設置される水門・ゲートとは、流水の止水または調節を行う機能を有し、扉体<sup>ひたい</sup>、戸当り、開閉装置で構成された可動設備である。その構造のなかで、止水を目的として扉体と戸当りの間に額縁状に設置されるものが水密ゴムであり、今回紹介する低摩擦ゴムはその水密ゴムを一部改良したものである。

水門を身近なものに例えると、スライドさせて開閉する窓やサッシなどが近い機構となる。水門と窓の各部の構造を対比すると、扉体は窓本体、戸当りは窓の枠体（建物側）、水密ゴムは窓の周辺を額縁状に囲っている防水用パッキン、開閉装置は窓を動かす人の手

ということになる（細かく言えば、水門のゴムは戸当り、すなわち固定側に付いている点が窓と異なる）。

このように水門と窓の機構は似ているものの、止水という観点においては大きな違いがある。窓は雨水を止水できれば十分な役割を果たすこととなるが、水門は水深に応じた水圧荷重が作用した状態で確実に止水する必要がある。そのため、ダムに設置される高圧ゲートはその水圧荷重を利用して、水密ゴムを扉体に圧着させて止水する構造となっている。

今回の開発のキーワードとなる水密ゴム摩擦抵抗とは、止水状態にある扉体を動かそうとするときに水密ゴムと扉体の間に発生する摩擦抵抗のことである。

高圧ゲートの水密ゴム摩擦抵抗は、開閉荷重（扉

体を開閉させる際に考慮すべき荷重のこと、扉体自重、浮力、摩擦力、水理力など）のなかで大きな割合を占め、開閉装置の大型化、コスト増が課題となっている。

これは、言い方を変えると、水密ゴム摩擦抵抗を低減させることが開閉装置のコンパクト化およびコストダウンにつながるということである。

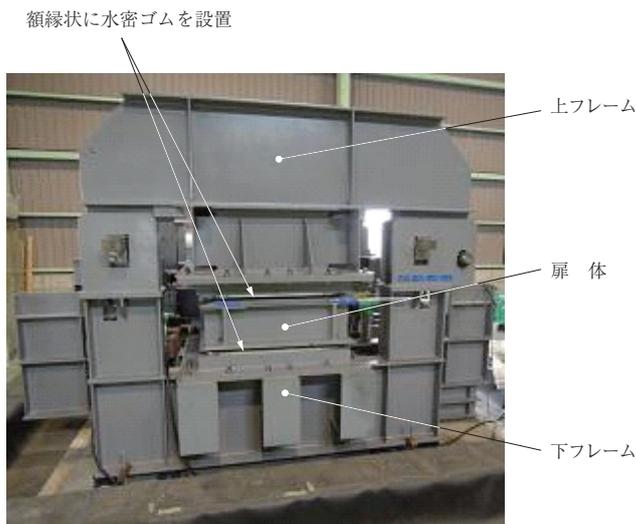
株式会社 IHI インフラシステムでは、高圧ゲートにおいて水密ゴム摩擦抵抗を低減させるために、従来の水密ゴムの扉体圧着面を超高分子量ポリエチレン（低摩擦材料）で覆い、摩擦抵抗を低減させた低摩擦ゴムを開発した。

### 水深 100 m 相当の水圧を考慮した試験の実施

低摩擦ゴムの開発に当たっては、実際の高圧ゲートの条件下で摩擦係数、まくれ込み状況、水密性、耐久性の 4 項目において低摩擦ゴムが従来の水密ゴムよりも優位であることを確認する必要がある。

そこで、実際の高圧ゲートと同様に扉体、戸当り、水密ゴム、開閉装置を有し、水深 100 m 相当の水圧まで負荷可能な試験装置を製作し、従来の水密ゴムと低摩擦ゴムの 2 ケースで比較検証試験を実施した。

比較検証試験より、従来の水密ゴムと比較して低摩擦ゴムはすべての項目において同等以上の結果が得ら



水深 100 m 相当の水圧まで負荷可能な試験装置



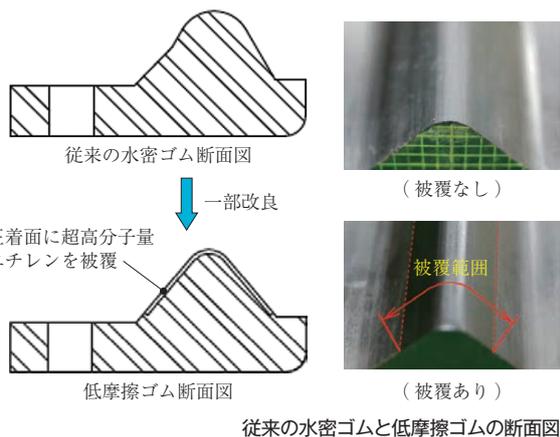
高圧ゲートの取替工事

れた。特に、摩擦係数においては従来の水密ゴムの 1/6 ~ 1/7 になるという結果が得られ、摩擦抵抗の低減を実現することができた。

### 低摩擦ゴムの今後の展開

今回の開発により、高圧ゲートに低摩擦ゴムを使用することで、開閉装置のコンパクト化およびコストダウンが実現可能となった。

今後は水門の新設工事とはもともと、開閉装置老朽化および機能向上に伴う取替工事をターゲットとし、お客様のニーズに合わせた最適な提案を行い、より一層社会資本整備に貢献していく所存である。



従来の水密ゴムと低摩擦ゴムの断面図

No.	試験項目	試験で得られるもの
1	開閉力を求める試験	実際の摩擦係数
2	扉体摺動試験	水密ゴムの挙動
3	水密性試験	止水限界水深
4	圧縮移動試験	水密ゴムの耐久性

従来の水密ゴムと低摩擦ゴムの比較検証試験項目

問い合わせ先

株式会社 IHI インフラシステム

営業本部 鉄構営業部

電話 (06) 4704 - 5704

URL : [www.ihico.jp/iis/](http://www.ihico.jp/iis/)

# 油の流れを整え 真空浸炭の品質アップ

## 冷却油の流れを均一化させ、 真空浸炭処理品のバラツキを低減

真空浸炭処理プロセスには、減圧下で昇温して処理品の表面に炭素を拡散浸透させた後、急冷（焼き入れ）して表面硬度を上げる工程がある。この焼き入れ工程で、冷却媒体（油）の流れの最適化を図った。処理品のひずみ・硬度のバラツキを抑え、生産性向上に寄与できる。

株式会社 IHI 機械システム  
真空新素材炉事業部 設計部 坂本 治



真空浸炭炉 外観



拡大写真  
(油攪拌モーター)

### 熱処理

熱処理は自動車部品をはじめ、建設機械、工作機械、航空機部品など幅広く用いられている金属の性質を変える方法の一つである。

近年、熱処理は環境負荷低減を図るため、ガス雰囲気での処理から真空での処理に移行している。その理由として、排気ガスを出さないこと、真空断熱により熱源（ヒーター）の熱ロスが少ない点が挙げられる。これらの点から環境に優しく、省エネルギーであるとの評価を受け、ガス雰囲気処理から真空処理への置き

換わりが進んでいる。

特に真空浸炭処理は、比較的安価な金属材料で表面硬度を上げられ、耐摩耗性向上に寄与できるため、その需要は各産業分野で増えつつある。今後も国内にとどまらず、海外の需要拡大も見込まれている分野である。

### 真空浸炭の品質

熱処理といってもさまざまな処理が存在するが、ここでは、熱処理の一つである真空浸炭処理について説明する。



油槽内ダクト



処理品の荷姿

真空浸炭とは減圧下で鋼の表面に炭素を拡散浸透させる熱処理である。この処理の直後、鋼を冷却媒体で急冷（焼き入れ）し、表面硬度を上げることで耐摩耗性の向上に寄与する。比較的安価な材料でも表面の耐摩耗性が向上するため、自動車部品のギヤなどの量産品でその処理が行われている。

品質面の要求は次の3点が挙げられる。

- ① 有効浸炭深さが均一であること
- ② 表面硬度が規定値内であること
- ③ ひずみが規定値内であること

このうち、①は、処理品の温度バラツキが少ない状態で処理することで実現できる。しかし、②と③は、さまざまな金属材料・処理品形状・処理品の設置方法の条件に加え、冷却媒体、処理品に冷却媒体が接触する状況などによって大きく変化するため、冷却媒体の選定や処理品に対する冷却媒体の流れの適正化が重要となってくる。

## 冷却媒体（水・ガス・油）

処理品を急冷するための冷却媒体は、三つに分類される。一つは水、一つはガス、そして油である。

これらのうち、処理品の熱を最も奪いやすい冷却媒体は水である。しかし冷却が速すぎるため、冷却ムラが発生しやすく金属の焼き割れも起こりやすい。

逆に最も冷却能力が低い冷却媒体はガスで、主に窒素ガスが多く使用される（窒素ガスは安価で入手しやすく、安全性が高い点から使用されることが多い）。ガス冷却は大気圧程度では焼き入れ性が悪く、品質の要求を満足できないことが多い。10～20気圧

程度まで昇圧した高圧冷却を行うことで、十分な焼き入れも可能となる。しかし、高圧容器が必要であり、焼き入れ性の良い材料を選択するなど、その要求品質を実現するためには多数の条件が必要となる。

最後に油であるが、水とガスの中間の冷却能力がある。焼き割れや硬度のムラ・低下などの問題を比較的容易に解決することができる媒体である。油の場合、温度を調整することで、幅広い処理品に対応可能である。油の温度を上げて冷却するとひずみを低減でき、焼き入れで硬化しにくい部品を油の温度を下げた処理することで所定の硬度にすることができるなど、比較的容易に調整が可能で、油は処理品の品質の安定化に寄与する。日本国内で真空浸炭の冷却媒体は油が主流となっており、株式会社 IHI 機械システム (IMS) 製真空浸炭炉の冷却工程も油冷却を標準としている。

## 冷却媒体（油）の流れが品質に与える影響

冷却媒体で油を使用するメリットは前述のとおりであるが、油であれば必ず一定の品質を得られるわけではない。金属の材質や質量、焼き入れする部品の形状や投入数量、投入時の部品の向きや積み込み方などによって、焼き入れ硬度は同じロットでも部位ごとで変化する。品質は各部品に定められたひずみと硬度の基準に入ることが必須条件となる。油の流量のみ大きくしても、処理品への流れが一定でなければ、硬度・ひずみのバラツキは大きくなり、不具合となる。

したがって油冷却における重要な点は、攪拌機で発生させた流れを整流し、均一に処理品に接触させることである。

## 油の流れの改良に向けて

ある部品を現在の攪拌機構で焼き入れを行った際、ひずみと硬度のバラツキが大きく、要求品質の許容範囲に収まらない結果がでた。この事象を現状の攪拌機で解決すべく、まず実施した対策はロットごとの積載数量を減らし、冷却媒体の流れを良くすることである。この対策によって、硬度を確保することができた。次にひずみのバラツキを低減する対策として、流量分布の調査を行い、流量が小さい場所に部品を設置しないことにした。その結果、ひずみ・硬度のバラツキを要求品質内に収めることができた。しかし、品質は維持できたが1ロット当たりの処理数量が少なくなったことで、部品のコスト単価が上がる結果となった。そこで、ロット数量をこれまでと同等でも要求品質を満足できるよう、油攪拌の能力向上を目指すことにした。

既設設備の一部改修も視野に入れ、整流ダクトの最適化を検討した。

## 既設油攪拌ダクトの問題点

既設油攪拌ダクトの問題点は、攪拌機の回転方向に流れが偏る点にあった。これまで主に処理される部品は自動車用のギヤ部品で、その多くが材質・形状的に焼きが入りやすいものであったため、冷却媒体である油の流れの均一化を図る必要性がなかった。換言すれば、要求品質が保たれていたため、油の流れを注視できていなかった。

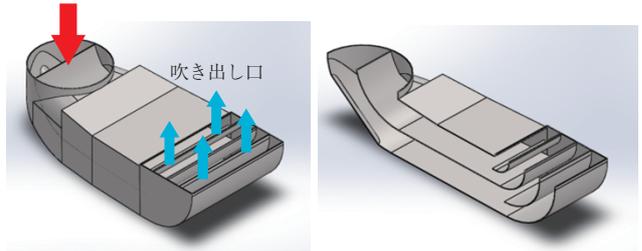
今回、処理の対象となる部品は、シャフト部品で材



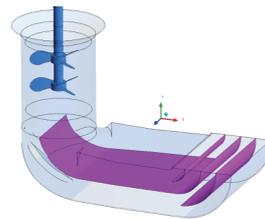
流れに偏りがあり、流れやすい側にこぶ状の盛り上がりがある

既設油攪拌ダクトでの油流れ

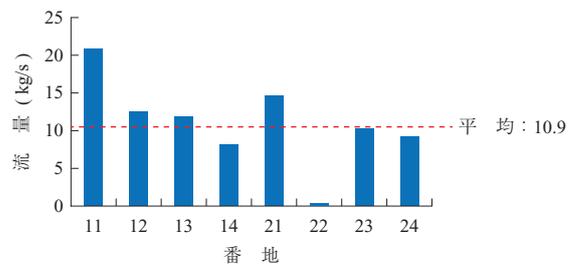
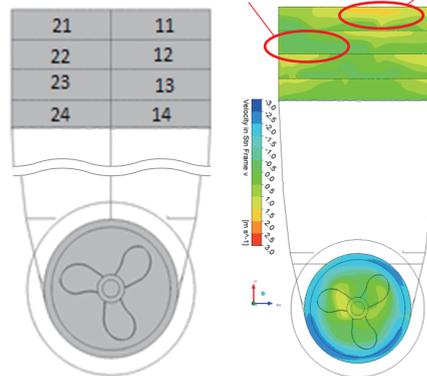
油の流れ向き



流れの入口から吹き出し口まで断面積が縮小しないダクト (縦の仕切りなし)



流量が少ない部分 流量が多い部分

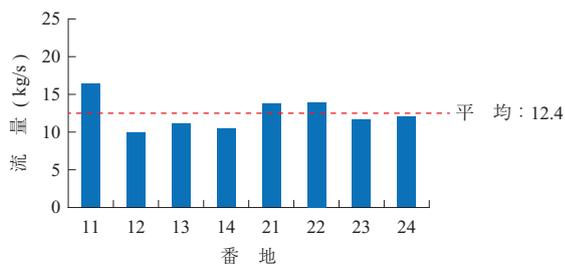
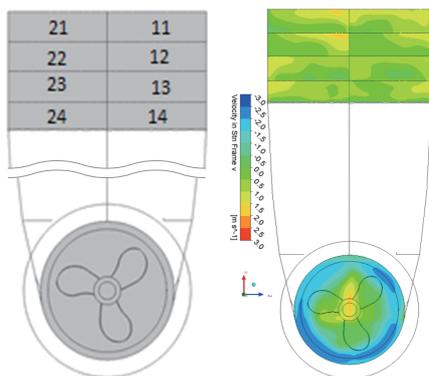
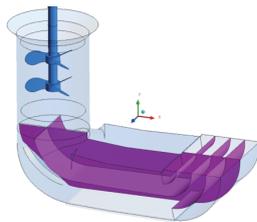
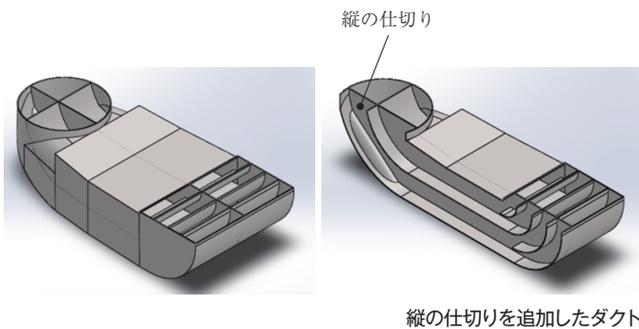


縦の仕切りがない場合の流れ解析の結果と各吹き出し口の平均流量分布

質的にも焼きが入りづらいものである。また、シャフトは立てて隙間なく詰め込まれるため、油が流れにくい状況である。よって、油が処理品に均一に接触するようにし、かつ流れにくい部分は、全体に流速を上げる対策が必要となった。

## 新規ダクト形状の検討

ダクト形状の最適化を検討するため流体シミュレーションを実施した。



縦の仕切りを追加した場合の解析結果と各吹き出し口の平均流量分布

既設油攪拌ダクトでの油流れには、偏りがあった。これを改善するためにまずはプロペラを収容している円筒からダクト吹き出し口まで、断面積が縮小しない構造を検討した。具体的には、円筒からダクト吹き出し口までの 3D モデルを作成し、油が流れる各断面を細分して個々に面積を確認し、縮小のない形状ができるまでモデルの修正を繰り返した。その結果、流れの入口から吹き出し口まで断面積が縮小しないダクトのモデルが得られた。

この構造体で流れ解析を実施した。その結果、流量

が多い部分と少ない部分が明らかになった。また、各吹き出し口の流量分布も得られた。流量は均一になりつつあるが、まだ偏りがあり、流量が多い部分と少ない部分の差が大きい結果となった。

そこで、プロペラを収納している円筒からの流れをダクト入口部で分断することを狙って、ダクト内部に縦の仕切りを設置するモデルを考案した。

この形状で解析を行った結果、細分化した吹き出し口の流量は一部突出している部分はあるものの、ほぼ均一になった。

良好な解析結果が得られた縦の仕切りを追加したダクトを製作した。実機に搭載し、検証した結果、既設ダクトに見られた局所的な油の盛り上がりがなく、流れが均一化された。

## 今後の展開

現在、この解析結果と実機による処理品の品質との整合性を注意深く比較・検討中である。解析結果と実機との整合性がとれ次第、IMS 標準真空浸炭炉に展開していく。標準機での基本性能向上によって、より幅広い条件での処理に対応できる機種に発展させていきたい。

### 問い合わせ先

株式会社 IHI 機械システム  
真空新素材炉事業部 設計部  
電話 (058) 379-1306  
URL: [www.ihico.jp/ims/](http://www.ihico.jp/ims/)

# 雪でも定刻 < かがやき 500 号 > 東京行き

## 北陸新幹線を支える 軌道用除雪車「MCR」

世界でも有数の豪雪地帯をかかえる日本の鉄道。  
安全に定刻で運転するためには除雪作業が欠かせない。  
真夜中に黙々と作業する除雪車の古くて新しい技術。

新潟トランス株式会社  
技術・開発室 特機技術部

宮廻 成志



MCR600 除雪状況

## 軌道用除雪車の活躍

2015年3月、北陸新幹線が長野駅から金沢駅まで延長開業したことは記憶に新しい。さっそく多くの観光客が詰めかけ、北陸地方のにぎわいぶりが報道されている。

新しく開通した区間は、長野県北部から新潟県西部、富山県といった日本でも有数の豪雪地帯を通過する。新幹線としても、雪に負けずに安全・定刻に運転するための対策が不可欠となる。1982年に同様の豪雪地帯に開業した上越新幹線では、線路にスプリンクラーを設置するなどして線路内の積雪自体を防ぐ対策が採られた。一方、北陸新幹線ではスプリンクラーに必要な水の確保や費用の面から、主に除雪で対応するという方針が採られている。そこで活躍するのが新潟トランス株式会社（NTS）の製造した軌道用除雪車 MCR（Motor Car Rotary）である。

## MCR の仕組み

鉄道線路の除雪には大きく二つの方式がある。

一つはラッセル式といい、線路上の雪の山に斜めの板を押し当てて前進させ、雪を線路の脇へ移動させる。NTS のラッセルでは、この板は上から見て V 型のものと斜め直線になっているもの（片流れと呼ぶ）がある。両側に除雪したい場合は V 型、片側に送りたい場合は片流れを使う。片流れの板は左右逆向きにすることも可能である。

もう一つはロータリー式で、オーガという回転する刃物で雪を切り崩しながら装置に取り込み、それをフロアと呼ぶプロペラ状の回転翼の遠心力で加速して、シュート（投雪筒）の先端から遠くへ投げ飛ばす。このとき、装置と一緒に前進するかき寄せ翼を立てて雪を十分に取り込めるようにする。さらにフランジャーといってレールとレールの間の地面近くの雪を取り込むベロ状の板も備えている。

ラッセル式とロータリー式にはそれぞれ得手不得手がある。ラッセルは浅い雪であれば高速（実用的には 40 km/h 程度まで）に走行しながら雪を排除していくことができる。ただし深くなると雪の抵抗が大きくなって除雪が困難になる。一方、ロータリーはその逆で、最大でも 10 km/h 程度の速度しか出せないが、

深い雪を確実に除いていける。そこで最新の MCR では、モーターカーの両側にラッセル装置とロータリー装置をそれぞれ装備して、状況に応じてより適した方式を使用できるようになっている。

実際にはお客さまによって運転パターンはおおむね決まっており、例えば北陸新幹線では、行きは前側のロータリー式でそれまでに積もった雪を除雪し、帰りは反対側のラッセル装置でその後に積もった雪を排除するという使われ方をする。しかし、例えば MCR の基地から北側を除雪するときと南側へ向かうときでは、車体の向きを逆にする必要がある。そこでモーターカーの底には「転車台」が用意されているものもある。転車台は車体を持ち上げて、180度回転させて前後の向きを入れ替えるもので、蒸気機関車時代の転車台がほとんど残っていない現在では、除雪車の向きを自力で変えられるというのは非常に便利である。

さらに特徴的な装備として「アウトリガー」というシリンダーも広く装備されている。これは車体の下にある伸縮可能な足状のもので、車両全体をレールから持ち上げられるようになっている。万一、深い雪に乗り上げるなどして車両が脱線したときでも、これを使ってレールの上に戻すことができる。

このような特殊な作業を行う MCR の動力源には最新のディーゼル機関が用いられ、出力は想定される雪の深さに応じて 300～590 kW（約 400～800 馬力）が用意されている。

こういった装備を備えた MCR は今では鉄道線路除雪の主役であり、旧来の機関車を基にした除雪車は姿を消している。NTS では、道路用の除雪車と並行して鉄道用除雪車両を旧株式会社新潟鐵工所以来長く手掛けてきており、NTS 発足以降だけでも在来線向けに 50 台以上を納めている。

なお、この除雪車は法的には鉄道車両（機関車など）ではなく、軌道上の機械として登録・管理される。したがって運転・操作するのは、鉄道会社の免許を持った運転士ではなく、保線担当の作業員ということになる。

## 新幹線用の MCR

今回、北陸新幹線用に MCR を製作するに当たっ

て、新たに幾つかの技術を開発・導入した。やや専門的になるが、順に解説してみよう。

## 【かき寄せ翼の範囲拡大】

ロータリーのかき寄せ翼は通常、レール面よりも上の雪をかき集める。北陸新幹線では、20年に一度の大雪に備えて線路の脇に「貯雪帯」と呼ばれる側溝を設け、そこに一定量の雪をためてからロータリーで吹き飛ばすことが想定されている。そのため、かき寄せ翼はレール面よりも低い位置の雪を集めることが求められた。

機構としては、翼の根元の支持部に翼を上下に移動させる構造を持たせればよい。しかし実際に想定される条件で試験を行ったところ、下の方の雪はオーガの待つ中央部にかき寄せられず、押す力は十分にあるにもかかわらず満足な除雪を行うことができなかった。そこで雪の動きや翼に掛かる力などを種々の解析や観察によって検討し、かき寄せ翼の形状、具体的には斜面部の角度を最適化した結果、要求どおりの除雪ができるようになった。

## 【油圧走行とトルコン走行の両立】

MCRの動力源はディーゼル機関であると述べたが、通常のディーゼル車のように機関が車輪を回して走っているわけではない。機関の出力をいったん油圧に変換して油圧モーターが車輪を回す油圧走行を行う。雪の負荷を受けるなかで低速で一定の速度を保て

る最適な駆動方法である。

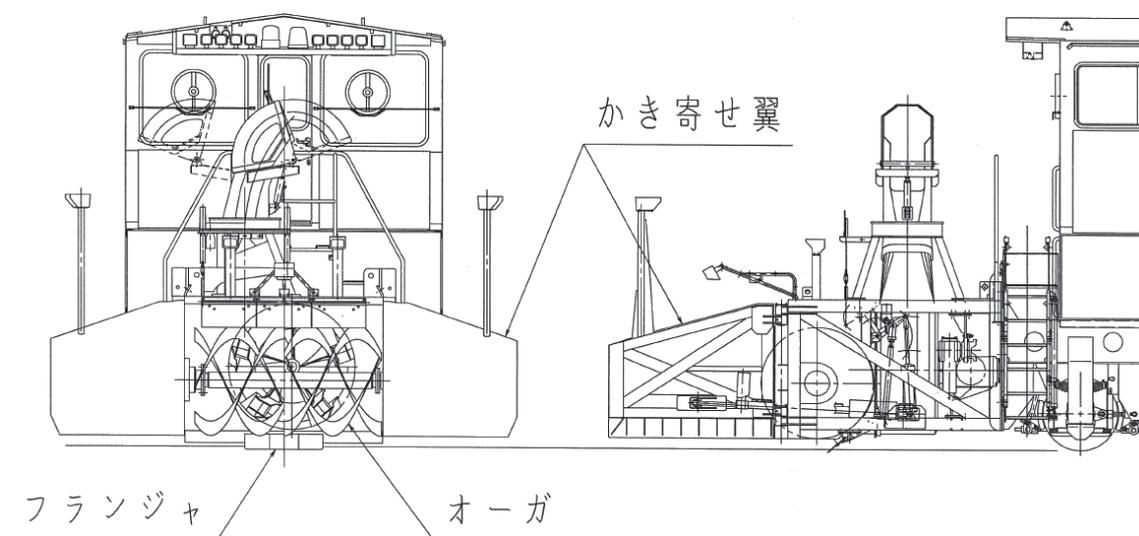
通常のディーゼル車は機関と車輪の間に変速機（トルクコンバーター：トルコン）を設けて、車輪を駆動している。走るためにはこのトルコン走行の方が力があり、スピードも出る。また起動停止などの運転も容易である。しかしトルコン走行と油圧走行を両方備えるのは質量やコストの制約から困難だった。

北陸新幹線では、スピードや機敏な運用が求められることからこの制約に挑戦し、各機器の軽量化やコンパクト化を図って、トルコン走行と油圧走行の両方を具備したMCRを開発した。トルコン走行が可能なおことから、冬期以外でも汎用の運搬車やけん引車として活用することが容易となった。

## 【必ず帰投する】

新幹線の営業時間はおおむね6:00～24:00であり、除雪は終列車から始発列車の間の最大で6時間の間に行わなくてはならない。そして翌朝には確実に除雪を終え、線路を営業列車に明け渡す必要がある。万一MCRが線路上で故障、立ち往生すると、そのMCRをどこかまで運転が開始できないことになってしまう。新幹線を止めるとたちまち大きな損失となることから、仮にMCRにトラブルがあってもなんとか基地まで帰投できるよう、幾つかの仕組みを導入した。

- ・ 前述の脱線から復帰するためのアウトリガー
- ・ 予備の緊急用油圧ポンプ（手動、電動）
- ・ 開いた翼を強制的に格納できる機構



MCR ロータリー装置図



V型ラッセル装置



ロータリー装置

- ・ 除雪装置の先端に格納されている緊急用の連結器（ほかの車両にけん引させて移動する）
- ・ 止めない制御…エンジンの異常ランプが点灯しても、警告を発するだけで自動的に止めることはしない。壊れるまで回し続ける。

こうして開発した北陸新幹線用 MCR は 25 台が東日本旅客鉄道株式会社、西日本旅客鉄道株式会社に納入された。営業運転ではまだ最初の冬を迎えていないが、すでに試運転期間中に毎晩のように出動している。

### 【油圧走行でも惰行が可能】

またこれは在来線用 MCR の機能であるが、鉄道車両としては国内で初めての技術を開発した。

油圧走行は極低速（1～2 km/h）で安定して走ることが可能であり、ロータリー除雪を行うときは必ずこちらを用いる。しかし油圧走行に独特の性質として、惰行、つまり動力を切って惰性で走るということができなかった。走行レバーを戻すと、いきなりブレーキが強力に掛かるため、スムーズな加減速を行うことが難しい。そこで、油圧ポンプと油圧モーターを独立に制御するという今回の開発によりこの弱点を解消して、ボタン一つで動力を入れた走行（力行という）と惰行を切り替えられるようにした。これによって例えばトロッコをけん引するときなどは格段に運転が容易になった。車体前後のロータリー、ラッセル装置は取り外すことが可能であり、汎用モーターカーとして通年での活躍が期待される。

### 多品種少量生産でお客様のニーズに応える

MCR は原理としてはほぼ完成された機械といえるが、いっそうの性能向上や使いやすさ向上の余地はまだまだあると考えている。一例として在来線向けの「段切り装置」がある。これは無人駅のプラットフォームの除雪や雪庇落としを線路上の除雪車から行おうとするものである。いまだに昭和の古い段切り装置が残っており、最新の技術を用いて簡素化、軽量化を図ろうとしている。これに限らず、MCR 全体の軽量化やダウンサイジング、もちろん燃費向上も終わりのない課題といえる。

一口に除雪といっても、地方ごとに雪の性質や降り方は異なる。除雪の方法も鉄道会社、除雪業者ごとの流儀がある。そのため在来線用 MCR はほとんど一品生産のようにお客様の要求が異なっている。設計・製造をする側からすると苦しい面もあるが、多品種少量生産こそが NTS の特色であり、今後もお客様のニーズに応える MCR を提供していきたい。

#### 問い合わせ先

新潟トランスシステム株式会社  
技術・開発室 特機技術部  
電話（025）256-3614

URL：www.niigata-transys.com/

# IT 資産マネジメントのパートナー

## IT 資産のライフサイクル全体を支援する IT ライフサイクルマネジメント ( IT-LCM ) サービス

IT 機器の導入・計画から購入、管理、保守、消去・破棄までの一連のライフサイクル管理全体をワンストップで提供する。



IT ライフサイクルマネジメント ( IT-LCM ) サービス 概念図

### IT 投資のコストとリスク

昨今の厳しい経済環境下において、各企業では投資効果の最大化が経営上の重要課題の一つとなっている。IT ( Information Technology ) 投資もその例外ではない。

IT 投資を有効な投資とするに当たり、考慮が必要なポイントがある。それは、IT 投資を計画する際には導入・開発時の費用だけでなく、維持・運用も含めた IT ライフサイクル全体の費用 ( TCO : Total Cost of Ownership ) を考慮しなければならない点である。ここで「運用」にはパソコンの障害発生現場に駆けつけて、フォローや再設定するなどの「保守」も含まれる。

また、TCO を評価する際に見過ごされやすい点として、導入・開発および維持・運用の直接コスト (ベンダーへの保守費など) に加えて、お客さまが自ら実施する障害対応、非公式の学習、データ管理などの間接コストが占める割合が比較的大きい点である ( TCO 全体に対する割合は 60%以上 : ガートナー・ジャパン株式

会社調べ)。

一方、IT の稼働停止 (ダウンタイム発生) やセキュリティ・インシデントは事業に対する重大なリスクとなっている。これらのリスクを回避して、IT を事業で活用できるよう維持・運用していくためには、高度で専門的なスキルが必要である。

IoT ( Internet of Things ) 時代を迎えて旧来のオフィスに比べて桁違いに多数の IT 機器が導入されている今、企業にとって低コスト・高レベルでの IT 資産の維持・運用はますます重要な経営課題となってきている。

株式会社 IHI エスキューブ ( IS3 ) は、この課題に対する解決策として、IT 購入資産のライフサイクル管理の問題全体をワンストップで解決する IT-LCM サービスを提供している。

### IT-LCM サービスとは

#### 【導入・計画】

効果的な IT 投資を行うためには、事業や業務など

導入目的の正しい認識と IT 利用状況の現状把握, そして IT 最新技術の理解が必要である. 一口に IT 技術といってもコンピューターのハードウェアやアプリケーションなどのソフトウェア, さらにはネットワークや通信など多岐にわたり, 日進月歩の状況を全て適切に把握することは一般の利用者にとって負担である. そこで IS3 は高度で専門的なスキルをもつ ICT ( Information and Communication Technology ) 専門企業として, IT-LCM サービスによってお客さまが導入予定の要求仕様を満足する機器やソフトウェアの選定のお手伝いなど IT 投資計画を支援する.

**【 購 入 】**

IT 資産購入に当たっては, ベンダーのセールス・トークに左右されて判断を誤ることなく, お客さまの要件を的確に反映した RFP ( Request for Proposal : 提案依頼書 ) を作成し, ベンダーからの提案・見積もりの評価・選定, 価格交渉, 契約締結を行っていく必要がある. しかし, お客さまにはそのための専門的知識・経験が不十分な場合が多く, 購入プロセス全体に要する間接コスト ( 工数 ) も多大である.

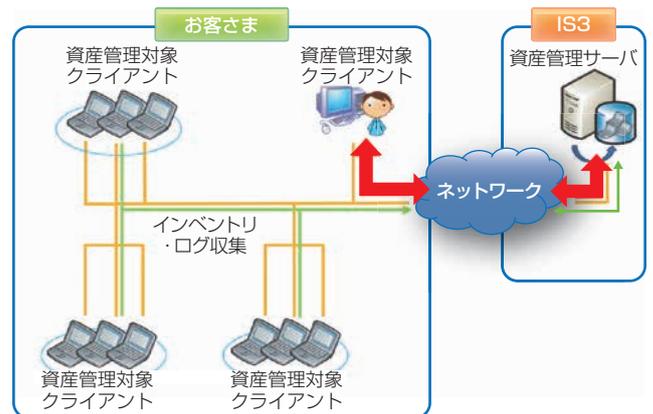
IT-LCM サービスでは, ベンダーニュートラル, すなわち特定のベンダーと排他的な提携をせず, プロセスを支援・代行することにより最適な IT 資産購入を最少の間接工数で実現する.

**【 管 理 】**

「測定できないものは管理できない」といわれるとおり, IT 資産の適切な管理を行うためには, IT 資産の導入状況を正確に把握することが必要である. しかし, 増設や移動, バージョンアップなどが多発する多種多様な IT 資産をお客さま自身で把握し, 管理し続けるのは多大な工数を要し, 抜け・漏れも発生する.

IT-LCM サービスでは, 以下の方策により, 最少の工数で抜け・漏れのない最新の管理情報を把握し, 提供する.

- ① 導入・計画, 購入プロセスを支援することにより, 構成情報, 契約情報, ソフトウェアバージョン情報など関連情報が全て一元化された IT 資産台帳を作成し, 維持・更新する.
- ② お客さまのパソコンにインストールした管理エージェント・ソフトを利用して, 各パソコンのハードウェア, ソフトウェアの最新の構成情報をネットワーク上の資産管理システムに自動的に送信す



資産管理システム概要図

ることにより, 管理情報を集中管理する.

**【 保 守 】**

従来, 操作方法の問い合わせ, 誤操作復旧, 故障時の修理・代替品手配などは, お客さまの IT 担当者やユーザー部門の「有識者」が対応してきたため, 多大な間接工数を要し, 専門的な対応も困難であった.

IT-LCM サービスでは, IS3 専門チームがお客さまからの電話・メールによる依頼に対して, 一元化された管理情報を利用して, 迅速・的確に対応することで, TCO の最少化とダウンタイムの最少化を同時に実現する.

**【 消 去 ・ 破 棄 】**

IT 資産を破棄する際には, セキュリティ上, データを確実に消去することが非常に重要だが, お客さま自身で, 確実な消去や結果検証を実施することは難しい.

IT-LCM サービスでは, IT 資産破棄に当たって国際基準に準拠したツールを使用して, 確実なデータ消去・結果検証を実施している.

**まとめ**

IS3 が提供する IT-LCM サービスでは, お客さまの負担が大きい IT 資産のライフサイクル全体の管理を支援・代行することにより, お客さまの間接工数を含む総所有コスト ( TCO ) と IT 資産の維持・運用リスクの低減を実現する.

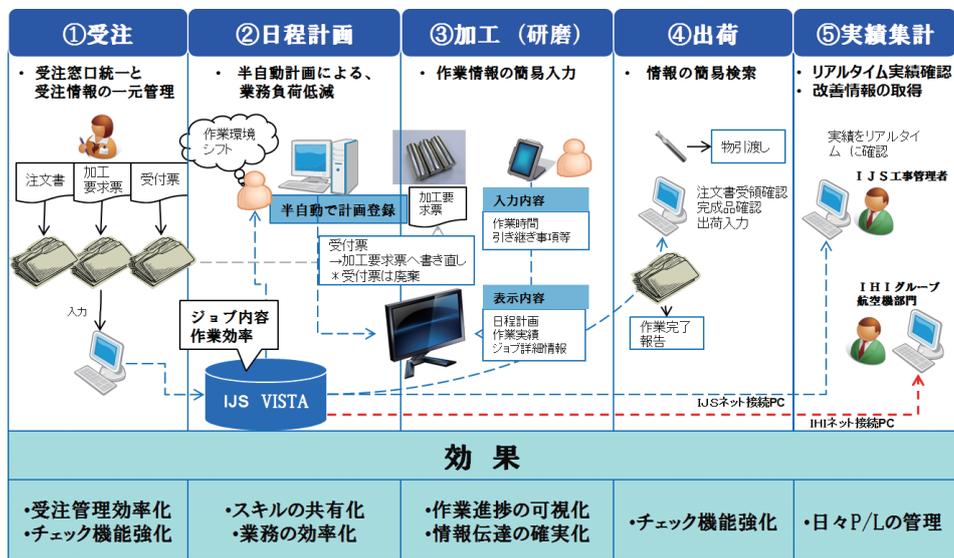
問い合わせ先

株式会社 IHI エスキューブ  
 システム技術事業部 カスタマーサービスグループ  
 電話 ( 03 ) 6204 - 8103  
 URL : [www.iscube.co.jp/](http://www.iscube.co.jp/)

# ジェットエンジン部品用工具の 製作工程計画自動化で増産対応

## エンドミルの製作工程情報を IHI グループの 航空機部門と共有するシステム「IJS VISTA」

従来、ジェットエンジンのタービンブレード加工工程計画は、担当者の経験によって作成されていた。ブレードの増産や急な変更迅速かつフレキシブルな対応をするために、製作工程計画自動化システムを開発した。



IJS VISTA による製作工程情報の管理

### エンドミル

世界の民間航空機需要は、今後 20 年間で 2 倍に拡大するという市場予測があり、国内で製造する航空機用エンジン部品の加工量が増大してきている。ジェットエンジン部品のタービンブレードは、旋盤で円盤状に削った材料をマシニングセンターという切削機械に固定して、エンドミルで切削加工していく。マシニングセンターには各種十数本のエンドミルが装着されており、切れ味が悪くなると新しいエンドミルと交換する。ジェットエンジンのタービンブレード生産性は、エンドミルの安定供給に支えられていると言っても過言ではない。

エンドミルの製作工程は、受注、生産、加工進捗、出荷、実績管理から構成される。これらを滞りなく進めることと、個々の加工機械の能力の違いを見極め

て、エンドミルの種類に対して効率の良い加工機械の組み合わせを選択することで、増産体制は整えられた。しかし、日程管理の方法に弱点が残されていた。

従来、管理業務において日々発生する新規受注、日程変更、数量変更などの情報は、担当者の経験に基づいて生産計画に反映されていた。特に、日程計画は専任の立案者が前後工程の生産の関連性や加工方法、納期、加工機械の砥石交換などさまざまな条件に対し、「どのように計画すれば要求納期で対応できるか？」を考え、ホワイトボードに手書きで計画修正していた。しかし、部品加工が多くなるに従い、この手書きベースの計画方法では各種エンドミルの増産や新切削刃形状エンドミルの開発、数量増減、納期変更、緊急製作などの要求に応えられなくなってきた。



最新の状況表示パネル



タッチパネルによる日程計画表示

## IJS VISTA ( IHI Jet Service Visible System of Tool Abrasion work )

先に述べた課題を解決するために株式会社 IHI ジェットサービス ( IJS ) は、エンドミル製作における日々の予実管理や完成状況の情報を IHI グループの航空機部門と共有し、業務運用上の仕様変更にも素早く対策を立案・実施するための日程計画自動化システム「 IJS VISTA 」を開発した。

IJS VISTA の開発にあたり、エンドミル増産への対応方針は以下の通りである。

- (1) 機械の稼働率向上
- (2) 専任日程計画立案者の業務負担低減
- (3) 製造情報 ( 実績 / 計画 ) のリアルタイム確認に

よる改善 PDCA ( Plan-Do-Check-Action ) 実施

(1)(2) の方策として日程計画を自動的に作成するシステムを採用した。このシステムは機械の標準時間および非稼働時間を計算し、自動的に JOB 割り付けを行って非稼働時間に JOB を埋めるシステムである。(3) の方策として生産管理者および IHI グループの航空機部門が常に現場の業務進捗、完成情報などを把握できるように環境を整えた。

IJS VISTA による処理の流れは大略以下の通りである。

- ・ 受注情報の入力
- ・ 作業進捗状況データの入力
- ・ 作業進捗状況の可視化
- ・ 最適日程計画の自動計算
- ・ 他システムとの情報共有 ( 調達, P/L など )

IJS VISTA 導入により、業務において日々発生する製作情報 ( 新規受注, 日程変更, 数量変更など ) をタブレット端末や PC でインプットすることによって

次の効果が得られた。

- (1) 加工時間の予実を分析することによって標準時間を精査できるようになり、加工機械の非稼働時間が短い運用が可能となった。
- (2) 専任日程計画立案者以外でも計画 ( 機械の JOB 割り付け ) を短時間で立案できるようになった。これによって現場の業務標準化や効率化が実現できた。
- (3) 生産管理者および IHI グループの航空機部門に対して、常に現場の業務進捗、完成情報などが把握できる環境を整えた。これにより、生産変動要因が発生した場合にも早期発見でき、スピーディーな対策検討が可能になった。

今後 IJS VISTA の運用を継続して作業情報を蓄積することにより、自動日程計画の精度を向上するとともに、一元管理された情報から業務改善につなげ、航空機産業への発展に役立てていきたい。

### ミニ解説

エンドミル

エンドミルは切削加工に用いる工具一種。エンドミルの代表的な種類としてフラット、ラジアス、ボール、テーパボールがある。エンドミル加工は円柱状素材にらせん状の刃を付けた工具を回転させ、側刃、底刃で被削材を切削する加工方法である。



IJS 製作のエンドミル

問い合わせ先

株式会社 IHI ジェットサービス  
生産技術部

電話 ( 042 ) 500 - 8297

URL : [www.ihico.jp/ijsv/](http://www.ihico.jp/ijsv/)

「ボー」と高らかに汽笛を響かせ、汽車は、郡山駅1番ホームを離れました。市街地の家並みを抜け、岩代熱海まで30分の小さな旅の始まりです。緑の田圃が後ろにすっ飛んでいきます。びっくりしている5歳の自分がそこにいました。

小学校卒業までは、鉄道大好き少年でした。時刻表と首っ引きで急行列車を乗り継ぎ、空想の国巡りをしました。時には入場券をポケットに、駅のホームが遊び場でした。東北線の郡山は、磐越線、水郡線とのターミナル駅で、旧型の機関車が貨物列車の編成作業で、行ったり来たりしていました。

中学2年の理科では、遠心力を習いました。“カーブを曲がる時、重力に加え遠心力が働くが、線路はどんな力を受けるか”がテーマでした。すぐの休み時間に、今は泌尿器のお医者さんをしている秀才のY君が、「汽車は自動車と違って車輪の向きを変えられない。どうして線路に沿って曲がれるか、おまえ、知ってるか？」と質問してきました。答えられないでいると、赤い鼻の頭をそれこそつんと高くして得意げに説明してくれました。彼は電車通学で鉄道に詳しく、お父上が技術屋さんでした。

走っている“乗り物”が向きを変える、これにはいろいろな形態がありあまりやさしくはありませんが、“曲がる”を取っ掛かりにそれではこれから、「車輪の物理」の散歩に出掛けましょう。

先ずは、「曲がる」がテーマです。身近な乗り物から、線路上しか動けない鉄道車両、道路を選んで左右に動ける自動車、水面ならどこでも進める船、さらに、上下が加わる飛行機について考えてみましょう。

「4輪自動車」では、一部に例外がありますが、基本は4輪の位置が固定されていて、前2輪だけが舵取りハンドルの操作で向きを変えられます。前の車輪、後ろの車輪それぞれが回転方向に進もうとします。でも、車輪の向きが違うので無理が生じ、結果、4つの車輪（タイヤ）はそれぞれが微妙に滑って、力が釣り合う方向に向きを変えます。無理がある分、前輪は真っ直ぐ状態に戻ろうとしますから、ハンドルを力ずくで抑え込まないと真っ直ぐ方向に戻ってしまいます。

「船」は優雅にゆったりと向きを変えます。船尾の舵を、「ようそろ、おも面舵一杯、そうれ」です。ちなみに、面

# レールと車輪のお話

技術開発本部  
小野塚 正一





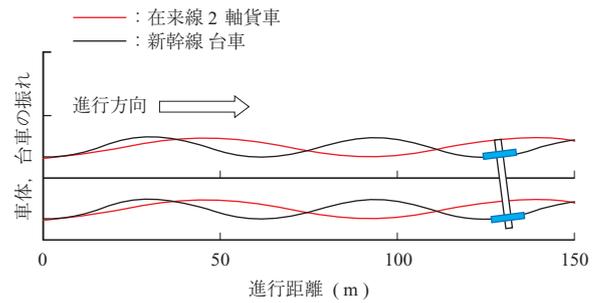
舵は<sup>う</sup>卵面舵で右 90 度方向，取舵は<sup>とり</sup>酉舵で左 90 度方向を意味します。舵は流れから揚力を受け，船の重心と舵の位置の関係で回転力が生じ，向きを変え始めます。進む方向と船の向きに違いが出始めると，今度は船そのものが水面に突き立てた翼になり，流れ中の角度をもつ翼になって，船そのものに回転力が生まれ，さらに向きを変えます。その航跡は何とも優雅です。向きを元に戻すときはちょっと難しそうでもあります。

船に比べると上下そして進行軸回りの自由度が加わる「飛行機」の運動はちょっと複雑ですが，基本は船と同じです。舵と自身の翼で向きを変えます。

最後に主題の「鉄道車両」です。先の Y 君いわく。「鉄道車両では左右の車輪が軸で固定され，一体となって回る。車輪の傾斜面でレールを踏む。カーブに差し掛かると，この一体車輪がカーブ円の外側に寄る。その結果，当り位置が変わり，直径の大きな外側車輪が小さな内側車輪に比べ長い距離を進む。カーブの円弧差を，うまい具合になぞってくれるのさ」。何とスマートに良くできた仕組みでしょう。でもねえ，結果がそうなりそうなことは分かるんだけど，本当にそううまい具合にいくんかいなという思いも残ります。ちょっと考えてみましょうか。

まず，軸でつながれた左右の車輪を，真っ直ぐな線路の上を転がすことを考えます。簡単のため，車輪の踏面には直線の傾きを与えます。内側の「つば（フランジ）」は考えません。直角断面のレール側コーナーに車輪のテーパー面を載せるモデルを考えます。

真っ直ぐな線路に少しだけ左を向いて車輪を転がします。少しの回転で車輪は少し左に位置を変えます。踏面が傾いているので当り所が変わり，右車輪の当り直径は小さくなり，逆に左車輪の当り直径は大きくなり左が前に出ます。結果，左向きの姿勢が少しだけ右向きに修正されます。修正が連続して行われるのですが，この変化の様子を式にまとめるとこれが“振動”の式と同じ形です。車輪が左右に首を振る様子が表現されます。国内で使われている車輪の寸法で実際の様子を見てみましょう。昔むかし，長さ 10 m 弱の屋根つき 2 軸有蓋貨車<sup>ゆうがい</sup>が在来線を走っていました。これと新幹線電車台車の比較です。貨車の軸間は 5.3 m で，輪軸の向きは車体に固定です。新幹線の車両台車は軸間 2.5 m です。軌間は，在来線が狭軌で



車輪の蛇行

1 067 mm ( 3 ft 6 in )，新幹線は標準軌で 1 435 mm ( 4 ft 8.5 in ) です。軌間はレール間の内寸法ですので，接触は軌間より少し広い点で生じます。車輪の直径は，在来線が 810 mm，新幹線は 860 mm です。踏面の勾配は 1/20 と 1/40 としました。

この計算では，輪軸間の距離が振れに影響します。在来線の固定軸貨車は 92 m 進むごとに 1 振れ，一方の新幹線台車（注意：車体ではありません）は，62 m 進むごとに 1 振れという結果になりました。両者では速度が，60 km/h と 300 km/h で 1 桁ほども違います。貨車の 1 振れは 6.6 秒，新幹線台車の 1 振れは 0.75 秒になりました。レールと車輪は忠実に滑ることなく，踏み続けるとする幾何計算です。

実際の運動では“すべり”があるので少しの違いがありますが，このように左右に首を振りながら走るのが基本です。カーブに差し掛かると，“線路の曲がり”という刺激を受けます。レールと車輪の関係では，レールの方向と輪軸の向きの相互関係が少し変わります。左カーブなら，車輪からレールが左に逃げる傾向になり，より小径の左車輪，大径の右車輪が実現されて左コーナーリングという理屈です。常に首を振りながら落ち着くべきところを探しているのがレールと車輪の関係と言えましょうか。分かったような分からない説明で申し訳ありませんが，車輪がその接触位置を線路の曲率に合わせて微妙に自動調整しながら進む結果，線路の曲率に合わせて曲がりながら進むのだとご理解ください。実際の車両では，複数の台車で車両が構成されることが多く，結構な重さ（有限な質量）の車体や乗客，荷物が台車に載り，さらに前後の車両の影響を受けますので，これらの運動のエネルギー（慣性力）や重心位置，台車と車両のリンクを考えないと正確な議論はできません。（74 ページに続く）

# ハンドガイドによる人・産業用ロボット協働システムの 生産ラインへの適用性検討

## Study on Application of a Human-Robot Collaborative System using Hand-Guiding in a Production Line

藤井正和 技術開発本部技術企画部 主査  
村上弘記 技術開発本部総合開発センター 副所長  
曾根原光治 技術開発本部総合開発センターロボット技術開発部 部長

生産現場における重量物や大型部品などの搬送・組付作業において、効率化や作業者の安全確保、省人化のために助力装置の導入や自動化など、さまざまな工夫がなされている。しかし、助力装置では省人効果は得られない。また、自動化においても高度なセンシングと制御による位置決めと作業完了判定が必要となり、稼働率が低下し、投資に見合う効果が得られないことがある。本稿では、これらの課題を解決するため、人・産業用ロボット協働システムを生産ラインへ適用することを検討する。「ハンドガイド」と呼ばれる、人が産業用ロボットを直接操作し作業を行う協働システムを対象に、安全性についての考え方や操作性を向上させる手法、人のスキルを支援する手法について検討結果を報告する。

Power assist devices and automated facilities are applied to the transportation and assembly of heavy or large parts in production lines to improve efficiency, keep workers safe and reduce the number of workers. However, power assist devices cannot reduce the number of workers. Moreover, automated facilities have to be equipped with advanced sensing devices and controls for positioning purposes and judging when a task is complete, and then such facilities may hamper utilization or make the return on investment too small. In this paper, to resolve such problems, we studied the application of a human-industrial robot cooperative system to a production line. Safety, operability and the assistance of human skills were studied as they relate to hand-guiding, in which a human operates an industrial robot directly and they work collaboratively.

### 1. 緒 言

少子高齢化に伴う労働人口の減少は、製造業においては熟練作業者の技能伝承の問題を引き起こしている。品質の低下を引き起こすだけでなく、景気の影響を受け生産量を増やしたいときにも容易に作業者を確保できず、結果として企業の競争力の低下へとつながる。

作業者の量と技能の質についての問題を解決すべく、大規模な生産を行う企業を中心として、生産の自動化が進められている。溶接やマテリアルハンドリング（マテハン）を中心として自動化が進んでいる一方で、組立作業は自動化が進んでいない。熟練作業である組立作業の動作や作業の完了・失敗の判定を自動で行うことが難しく、自動化には高度な制御やセンシングが求められるため、自動化してもチョコ停（故障ではなく、軽微な事象による一時的な装置の停止）が度々起こって稼働率が下がったり、人による作業と比べて投資対効果が上がらなかったりすることが理由の一つと考えられる。

このような問題を解決するため、筆者らは「ハンドガ

イド」と呼ばれる人と産業用ロボットの協働システムを提案してきた<sup>(1) (2)</sup>。ハンドリング対象の把持と作業場所近傍への搬送など単純・繰返し作業は産業用ロボットが自動で行い、組付けや設置などの作業は作業者が産業用ロボットのエンドエフェクタ付近に取り付けられた操作デバイスで産業用ロボットを操作して行うものである。自動化の妨げとなっている詳細な位置決めや作業の完了・失敗の判定などの熟練作業は作業者が行うため、チョコ停が起これにくい。しかも大型や長尺の部品の場合、重量や姿勢の保持は産業用ロボットが行うため、作業者の負担を減らす助力装置として利用ができる。能動的にパワーアシストや作業支援を行う装置はこれまでも開発されてきた<sup>(3) (4)</sup>が、産業用ロボットではないため自動動作はなく、助力装置と同様に常に作業者による操作が必要となる。作業によっては作業者なしに自動動作で作業できる点が、産業用ロボットを用いて協働システムを構成する利点の一つといえる。

作業者と産業用ロボットの協働システムで重要な要素は「安全性」と「操作性」である。安全性については産業

用ロボットの安全に関する標準規格で人との協働運転要件が記載されており、このなかで「ハンドガイド」に必要な要件も具体化されている。また日本の安全法令でも国際標準規格への準拠が求められている。リスクアセスメントによって、① 作業者と産業用ロボットの作業空間を分けること ② 協働運転時のみ作業者が産業用ロボットの操作デバイスに触れられるようインタロックを解除すること、などを盛り込んでシステム化し、安全性を担保する事例を提案してきた<sup>(1) (2)</sup>。一方、操作性については、作業者の意図どおりに産業用ロボットを操作して作業を完遂させるために必要な性能である。入力装置の種類や、操作量に応じて算出するロボット指令速度のパターンを変えるなどの工夫によって作業者の意図どおりの操作を実現し<sup>(5)</sup>、動作軸の選択、回転中心の切替えによって熟練が必要な作業を容易にこなせるようにする、いわば協働システムによる熟練者スキルの支援などを提案してきた<sup>(6) (7)</sup>。

本稿では、生産ラインに人・産業用ロボット協働システムを適用するに当たって、大型や長尺の部品を扱う組立作業を想定して検討・設計すべき事項を、これまでの研究成果を整理する形で述べる。

## 2. 標準規格と国内の安全法規、協働運転の形態

### 2.1 人と産業用ロボットの協働運転に関する標準規格

産業用ロボットのための安全要求事項を定める国際標準規格として ISO 10218-1:2011<sup>(8)</sup>と ISO 10218-2:2011<sup>(9)</sup>がある。前者はロボット単体、後者はロボットシステムとインテグレーションについての要件が示されている。日本工業規格 (JIS) を国際標準規格と整合させるため、2015年3月にそれぞれ JIS B 8433-1:2015<sup>(10)</sup>の改正と JIS B 8433-2:2015<sup>(11)</sup>の制定がなされた。人と産業用ロボットの協働運転に関する要件はこれらの規格に記載されており、第1表に標準規格に記載の協働運転要求事項の概要を示す。当然ながらリスクアセスメントを行い、許容できる程度までリスクを下げる方策を実施することが必要である。

### 2.2 人と産業用ロボットの協働運転に関する安全法規

従来、日本国内では労働安全衛生法第20条に基づく労働安全衛生規則第150条の4に、産業用ロボットの安全について記載されていた。モータの定格出力(80W以上)や動作の自由度などで産業用ロボットを定義し、人が産業用ロボットと接触することで危険が生じるおそれがあるときは、「さく又は囲いを設ける等当該危険を防止するために必要な措置を講じなければならない」とされて

第1表 標準規格に記載の協働運転要求事項の概要

Table 1 Collaborative operation requirement according to the standard

協働方式	要求事項(要約)
全 般	協働運転であることを示す視覚表示と、以下のいずれかを満足することを要求
安全適合の監視停止	人間が協働作業空間内に存在するときのロボットの振る舞い(停止と自動運転への復帰)に対する要求
ハンドガイド	ハンドガイド装置が必要とする操作装置の配置・機能、ロボットの動作速度や姿勢、協働作業空間の明示などに対する要求
速度および間隔の監視	ロボットの速度と、ロボットと人間の間隔に対する要求
動力および力の制限	本質的設計または制御機能による動力や力の制限に対する要求

(注) 協働作業空間とは、ロボット作業セルの安全防護空間内のロボットと人間が同時に作業を遂行できる作業空間をいう。

いた。しかし、標準規格で規定された人と産業用ロボットの協働運転についての要求との対応が不明確であった。

対応を明確とするため、2013年に、労働安全衛生規則の解釈が見直され、標準規格と国内の安全法規の対応が明確となった。標準規格に準拠するロボットおよびロボットシステムとすることで、安全法規が満足される。

### 2.3 協働運転の形態

標準規格に記載された協働運転の形態を第2表に示す。「安全適合の監視停止」、「速度および間隔の監視」は、産業用ロボットが作業者に衝突しないようにする方式である。「動力および力の制限」は産業用ロボットが作業者に接触しても許容できるリスクしか作業者に与えないように動力と力を制限する方式である。これらは産業用ロボットと作業者が物理的に作業空間を区切らず、作業空間を共有する協働方式であり、いわば産業用ロボットと作業者の「共存作業」といえる。

一方、「ハンドガイド」は作業者が産業用ロボットのエンドエフェクタ近傍に取り付けられた操作デバイスによって産業用ロボットを操作するものである。産業用ロボットが把持したワークを作業者が産業用ロボットに触れながら

第2表 協働運転の形態

Table 2 Method of collaborative operation

協働方式	運 転 形 態
安全適合の監視停止	協働作業空間内に作業者が存在するとき、ロボットは停止する。
ハンドガイド	作業者がエンドエフェクタ近傍に配置されたイネーブル装置を有効としている間、エンドエフェクタ近傍に配置された入力装置でエンドエフェクタの位置や速度を指示する。
速度および間隔の監視	ロボットと作業者が所定の離隔距離を保っている間、ロボットは動作する。離隔距離が保てなくなるとロボットは停止する。
動力および力の制限	リスクが許容される程度まで動力および力を制御または本質的に制限する。

動かすことが想定された方式であり、いわば産業用ロボットと作業者の「協調作業」といえる。

「共存作業」では、柵や同等の効果を提供可能な電子検知デバイス（ライトカーテンやマットなどの作業者の存在検知装置）の有無を除けば、作業空間が物理的に分けられた従来の産業用ロボットシステムと大差なく、産業用ロボットと作業者は個別に自身の作業を行う。これに対し「協調作業」では産業用ロボットと作業者が協調して一つの作業を行うため、たとえば大型や長尺の部品を運び、組み付ける作業では産業用ロボットを助力装置として使うこともできる。また、作業に応じて、たとえば姿勢を変更せず位置のみ合わせる場面では回転移動を制約し並進移動のみ認める、姿勢を合わせたいときは適切な回転中心を選択したうえで回転移動のみ認めることも可能である。組付けなどの作業を行うために必要なスキルを協働システムが提供することになるため、作業者がスキルに熟練していなくても容易に熟練作業が実現可能となる。

実現したい作業に応じ、協働方式の特徴を生かす選択が必要となる。後述する安全性と操作性の検討も十分に行ったうえで、人による作業、および産業用ロボットを用いた自動化システムに対して効率、稼働率、信頼性、コストなどの何らかのメリットが得られなくては協働システムとする意義がないため、協働方式の選択に当たっては十分な検討が必要である。

### 3. 協働システムの設計

人と産業用ロボットの協働システムを設計するに当たり、検討すべき事項は大まかに以下の3点である。

- (1) 協働方式
- (2) 安全性
- (3) 操作性

これらの詳細について、大型のワークを運び、組み立てる生産ラインへの適用を想定して検討する。

#### 3.1 協働方式

本稿では、「ハンドガイド」を採用する。2.3節に記載したとおり、「ハンドガイド」では助力装置として協働運転が可能のため作業者が扱えないような大型や長尺の部品を扱える一方、産業用ロボット単独での自動運転も可能であり、自動運転中は作業者は別の作業を行うことができる。つまり、一般的な助力装置と同様にロボットが把持した作業対象ワークを、作業者が動かす作業方法を採用することができながら省人化に寄与できるといえる。本稿で適用を

想定する大型や長尺の部品を扱う生産ラインに適用することで、協働システムとするメリットを生かせるものと考えた。一方、「共存作業」では作業者と産業用ロボットが個々に作業をするものであり、共存によって個々が行えない作業を実現できるわけではない。よって、本稿では協働方式として「ハンドガイド」を採用する。

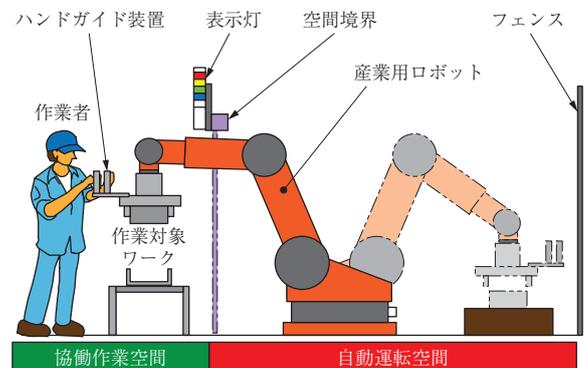
第1図にハンドガイドシステムのコンセプトを示す<sup>(1),(2)</sup>。一般的な産業用ロボット単独のシステムと異なる特徴的な構成要素は、ロボットと作業者が協働で作業を行う「協働作業空間」、通常作業者が立ち入ることはなくロボットが自動運転可能な「自動運転空間」、二つの空間を物理的または存在検知などの方法で区切る「空間境界」、作業者がハンドガイド操作をするための「ハンドガイド装置」である。

以降で、安全性および操作性の観点でこれらの構成要素の詳細を示す。

#### 3.2 安全性

JIS B 8433-1:2015, JIS B 8433-2:2015 から、規格としてハンドガイドシステムが備えるべき要件を整理すると以下となる。

- (1) リスクアセスメントの実施
  - (2) 協働運転中であることを示す視覚表示
  - (3) エンドエフェクタ近くへのハンドガイド装置（JIS B 8433-1:2015 に適合する非常停止およびイネーブル装置をもつ）の配置
  - (4) オペレータが協働作業空間全体を明確に視認できること
  - (5) その他、JIS B 8433-1:2015, JIS B 8433-2:2015 に準拠したロボット、保護装置や存在検知装置、安全適合監視速度機能
- これらを踏まえ、(1)のとおりリスクアセスメントも



第1図 ハンドガイドシステムのコンセプト  
Fig. 1 Concept of a hand-guiding system

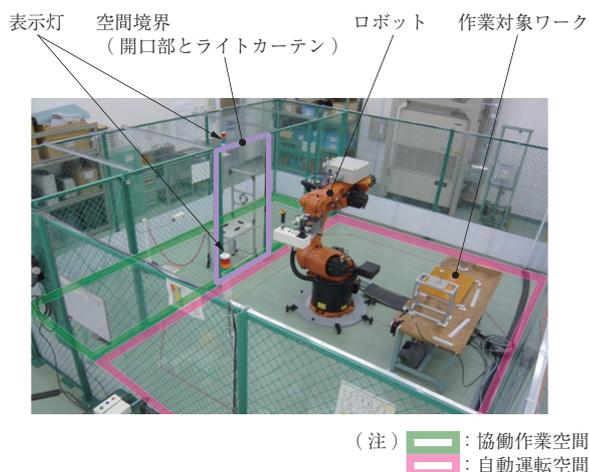
行い、第1図に示すコンセプトを具現化し、第2図に示す試験システムを設計した<sup>(1)</sup>、<sup>(2)</sup>。

(2)については、第1図に示すように作業員から見える場所に表示灯を設置することで実現する。

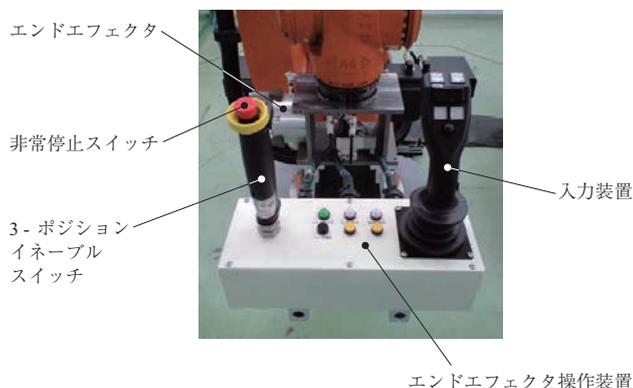
(3)については、第3図に示すハンドガイド装置のように、エンドエフェクタの近くへ3-ポジションイネーブルスイッチ、非常停止スイッチ、および位置や速度の指示を出す入力装置を設置した。

片手操作によって手をロボットや作業対象ワークに挟みこむリスクが想定されたため、イネーブルスイッチと入力装置をそれぞれ左右の手で操作することとし、かつ片手で両方の操作を行えないよう十分な距離を離して配置した。入力装置は第3図ではジョイスティックとし、スティックの傾き角度がロボットへ入力されるセンサ値となる。後述するが、スティックに掛かる力覚を入力とするための力覚センサを用いることもできる。

(4)については、第2図に示すように「協働作業空間」と「自動運転空間」をフェンスで区切ることによって明示する



第2図 試験システムの外観  
Fig.2 View of experimental system



第3図 ハンドガイド装置  
Fig.3 Hand-guiding equipment

と同時に、作業員以外の意図しない侵入を防ぐこととした。

空間境界は、作業員の「自動運転空間」への侵入を防ぐ仕切りや作業台を設置した。また、協働運転時以外に開口部から作業員の身体が「自動運転空間」へ入ったり、産業用ロボットが「協働作業空間」へ入ったりした場合に産業用ロボットを停止させるための安全センサ（ライトカーテン）を設置した。なお、3.1節で示した「共存」と「協働」を組み合わせることも可能である。たとえば「協働作業空間」と「自動運転空間」を物理的に分けられないこともできる。この場合、床に色を塗るなど空間を明示したうえで、産業用ロボットが単独で自動運転している最中に、「協働作業空間」に作業員が立ち入った場合は作業員との離隔距離に応じて停止し、協働運転時は協働作業空間内で「ハンドガイド」を可能とすることもできる。

(5)についてはこれを満足するよう産業用ロボットや制御装置、その他検知装置などを設計した。

これ以外にも、リスクアセスメントによって動作速度や協働運転時の産業用ロボットの動作、自動運転と協働作業の切替操作、各種構成要素の配置などを定めている。本稿に記載した対策のみであらゆるリスクが許容される程度まで下がるわけではなく、またどのようなシステムにとっても適切な対策ともなりえない。実際のシステムを構築するうえでは、システム構成や使用方法に応じて適切にリスクアセスメントを行い、適切な対策を採る必要があることに注意されたい。

### 3.3 操作性

協働システムの操作性は、作業員と産業用ロボットの共存であれば、自動運転と協働作業の切替えや、産業用ロボットが作業員に衝突したり、大きな力を加えるなどして停止した後の復帰動作が該当する。「ハンドガイド」においては、これらに加え、産業用ロボットへの位置や速度指令の与え方も重要な操作性である。これを工夫することで、素早く高い成功率で作業を完了させることができる。理想は作業員が自身の手で作業対象ワークをもっているかのように意図どおりに作業できることであるが、そのためには以下のような操作性向上の仕組みが必要となる。

(1) 入力装置の操作量に対するロボット速度指令値の関係

(2) 入力装置の種類

また、作業員がもつべき熟練スキルを協働システムで支援することで、熟練作業を容易に行えるようにするスキル支援として、以下が挙げられる。

(3) 操作自由度の制限と, TCP ( Tool Center Point ) の選択

(4) 作業座標系の変換

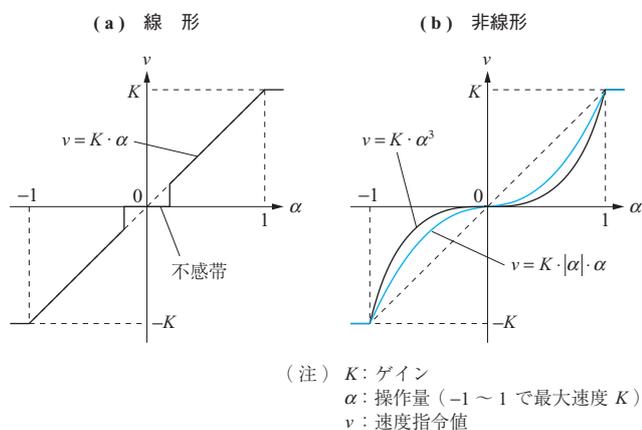
### 3.3.1 入力装置の操作量に対するロボット速度指令値の関係

作業対象ワークを遠くへ移動させるときは大まかな操作で高速移動をし, 組立などの作業をするときはゆっくり細かく移動できることが望ましい. そのためには, 入力装置の操作量からどのようなロボット速度指令値を算出するかが重要となる. 第4図に入力装置の操作量と速度指令値の関係を示す. 図では, 操作量に比例した速度指令値の算出 ( - (a) ) と, 操作量の2乗や3乗に比例した速度指令値の算出 ( - (b) ) を示している. 特に線形 ( 第4図 - (a) ) の場合, 操作量がゼロ近傍で微小な速度指令値が出ないよう, 不感帯を設けている. 試験を行った結果, 操作量の2乗に比例した速度指令値とすると作業に要する時間が短いことが分かった<sup>(5)</sup>. ただし, 「ハンドガイド」作業時に行う細かい作業と大まかな移動の割合によって効果的な関係が変わるものと推測される.

### 3.3.2 入力装置の種類 ( 第5図 )

入力装置はスティックの傾き角度を制御装置へ出力するジョイスティックと, スティックに掛かる力とモーメントを出力する力覚センサが考えられる. 一般に人が物を持ち動かすという行為において, 人は物に力を加えている. よって力覚センサを用いた方が自然な操作感が得られると考えられる.

試験を行った結果, 6軸入力可能な力覚センサを用いた方が作業に要する時間が短いことが分かった<sup>(5)</sup>. 一方で, 姿勢を合わせる回転運動では力覚センサの方がやり直しが多いことも分かった. 前述のように, 力覚センサは直

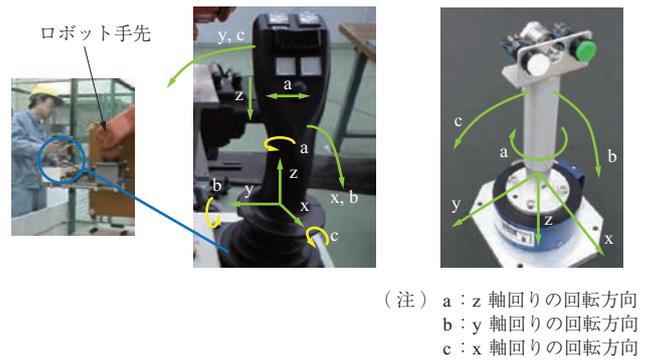


第4図 入力装置の操作量と速度指令値の関係

Fig. 4 The relationship between input device and robot velocity command

(a) ジョイスティック (3軸)

(b) 力覚センサ (6軸)



第5図 入力装置  
Fig. 5 Input device

感的に操作が可能な一方, 特定方向にのみモーメントを加えるレバー操作が難しく, ほかの方向に意図せず姿勢が変わるためと推測する.

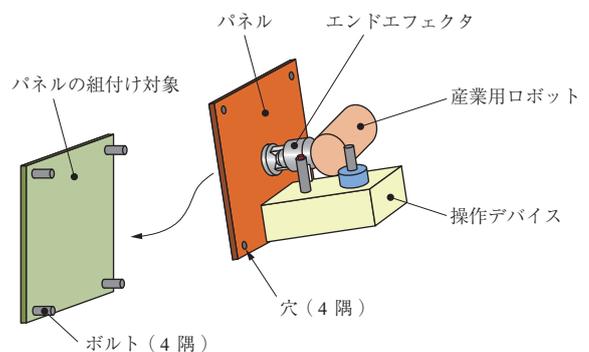
### 3.3.3 操作自由度の制限と, TCP の選択

前述のとおり, 力覚センサでは意図しない方向への回転運動が生じることが分かった. 「ハンドガイド」であれば移動させたくない方向への移動を意図的に防ぐ操作自由度の制限が可能である.

また, 回転運動を行う回転中心として設定する TCP を作業に応じて変更することで, より意図した回転運動を実現することができる.

このほか, 作業の内容 (フェーズ) に応じて移動の自由度や回転中心を切り替えることで, 熟練作業を支援することもできる. これを操作ガイドと呼ぶ.

第6図に, 作業対象ワークである4隅に穴が開いたパネルの組立作業の例を示す. これを対象に, 作業フェーズに応じて操作自由度の制限と TCP の選択を行う, パネル組付けにおける操作ガイドの例を第3表に示す. フェーズ1ではパネルの移動であるため並進のみ認めている. フェーズ2ではパネルと組付け先を平行にするための2



第6図 パネル組立作業の例

Fig. 6 Example of panel assembly

第3表 パネル組付けにおける操作ガイドの例  
Table 3 Example of operation guidance for panel assembly

フェーズ	1	2	3	4	5
作業	パネルを軸付近まで搬送する。	パネルと組付け対象を平行にする。	1か所の穴と軸の位置を合わせる。	合わせた軸中心にパネルを回転させて、残りの穴と軸の位置を合わせる。	パネルを組み付ける。
説明図					
必要な自由度	3軸並進	2軸回転	2軸並進	1軸回転	1軸並進

(注) 作業はフェーズ1から5まで順番に進める。

軸の回転を認めている。フェーズ4では四つの穴の位相を合わせるため、作業員から見やすい穴にTCPを移動させ、かつ1軸のみ回転を認めている。試験によってパネル組付けに要する作業時間が短縮したことを確認した<sup>(6)</sup>。大きなパネルの6自由度の位置と姿勢を、4隅の穴と軸の位置関係をそれぞれ確認しながら合わせることは難しい熟練作業であるが、「ハンドガイド」に操作自由度の制限とTCPの選択を組み合わせることで、熟練スキルを支援し、熟練作業を容易に実現できる。

### 3.3.4 作業座標系の変換

作業対象のワークを置く場所や組み付ける場所が作業によって変わる場合、場所によって作業座標系が変わることがある。たとえばコンベヤライン上で作業を行う場合、図面上(理想上)は直線で設置されるコンベヤが、実際には設置面の平行などの関係でゆがんで設置されることもある。第7図にコンベヤラインのゆがみを示す。

そこで、幾つかの場所で作業座標系を教示し、場所に応じて作業座標系を変更・切り替えることが考えられる。これによって、「ハンドガイド」で並進移動のみを行っても移動の向きや姿勢は作業座標系に応じて自動で変化させることができるため、作業員はラインのゆがみを気にせず作業できる。試験によって、「ハンドガイド」中の姿勢修正が不要となった分作業時間が短縮したことを確認した<sup>(7)</sup>。これについても、一般的な助力装置を用いた作業の場合、ラインのゆがみは作業員が意識して姿勢を変化させながら

作業を行う必要があり、習熟が必要となる。しかし、「ハンドガイド」では産業用ロボットを用いるため、作業座標系を教示して切り替えることで習熟なく作業を行える。これも熟練スキルの支援といえる。

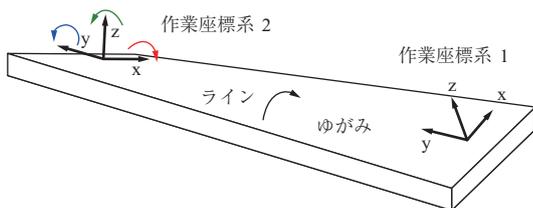
## 4. 結 言

本稿では、人と産業用ロボットの協働システムを生産ラインに適用するため、「ハンドガイド」を想定して安全性と操作性を向上させる手法について検討を行った。安全性については標準規格を満足したうえで、リスクアセスメントに従い設計を行う必要がある。操作性については入力装置や操作自由度の制限とTCPの切替え、作業座標系の切替えなどの取組みを紹介した。これらを組み合わせることで作業員の思いどおりの操作を実現するだけでなく、作業員が習熟していない熟練スキルを協働システムが支援することで、熟練作業をより容易に実現することが可能となる。女性や高齢者も含め、幅広い作業員が熟練作業を行えるようになることから、生産性向上に寄与できるシステムであるといえる。

国内法は改正されたが、協働システムの事例はまだまだ多くない。生産ラインの価値を向上させるシステムの一つとして、協働システムの安全性や操作性を向上させる取組みを続けながら、社内外の生産システムへの適用を図っていく。

## 参 考 文 献

- (1) 藤井正和, 塩形大輔, 村上弘記, 曾根原光治: 人間・産業用ロボットの協働のための安全システムの提案 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 2008年6月 2A1-A21
- (2) 藤井正和, 小椋 優, 村上弘記, 曾根原光治: ハンドガイドによる人と産業用ロボットの協働作業シ



第7図 コンベヤラインのゆがみ  
Fig. 7 Skew of conveyor line

- システムの提案 IHI 技報 第 51 卷 第 2 号  
2011 年 3 月 pp. 18 - 24
- (3) 鴻巣仁司, 荒木 勇, 山田陽滋: 自動車組立作業  
支援装置スキルアシストの実用化 日本ロボット  
学会誌 第 22 卷 第 4 号 2004 年 5 月 pp. 508  
- 514
- (4) 村山英之, 藤原弘俊, 武居直行, 松本邦保, 鴻巣  
仁司, 藤本英雄: 人と協働する技能支援ロボット  
ウィンドウ搭載アシスト 第 26 回日本ロボット学  
会学術講演会 2008 年 9 月 1B1-04
- (5) 江本周平, 小椋 優, 藤井正和, 村上弘記, 曾根  
原光治: ハンドガイドロボットの操作性に関する実  
験 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス  
講演会 2009 2009 年 6 月 1A2-E05
- (6) 小椋 優, 江本周平, 藤井正和, 村上弘記, 曾根  
原光治: ハンドガイドロボットにおける操作ガイド  
手法の提案 日本機械学会ロボティクス・メカト  
ロニクス講演会 2009 2009 年 6 月 1A2-D15
- (7) Y. Ogura, M. Fujii, K. Nishijima, H. Murakami,  
and M. Sonehara: Applicability of Hand-Guided  
Robot for Assembly-Line Work Journal of Robotics  
and Mechatronics Vol. 24 No. 3 (2012. 6)  
pp. 547 - 552
- (8) International Organization for Standardization:  
ISO10218-1:2011 Robots and robotic devices  
— Safety requirements for industrial robots — Part 1:  
Robots (2011. 7)
- (9) International Organization for Standardization:  
ISO10218-2:2011 Robots and robotic devices  
— Safety requirements for industrial robots — Part 2:  
Robot systems and integration (2011. 7)
- (10) 日本規格協会: JIS B 8433-1:2015 ロボット及  
びロボティックデバイス—産業用ロボットのための  
安全要求事項—第 1 部: ロボット 2015 年 3 月
- (11) 日本規格協会: JIS B 8433-2:2015 ロボット及  
びロボティックデバイス—産業用ロボットのための  
安全要求事項—第 2 部: ロボットシステム及びイン  
テグレーション 2015 年 3 月

# 橋梁技術の進歩と溶接技術

## Progress of Welding Technology in Bridge Construction

倉田 幸宏 社会基盤セクターレジリエンスプロジェクト部 主幹 博士(工学) 技術士(建設部門)  
猪瀬 幸太郎 技術開発本部生産技術センター溶接技術部 主査 博士(工学) 技術士(建設部門)

本稿では橋梁の進歩に果たした溶接技術について、その時代背景とともに総評した。近代日本の橋梁技術の歴史は1970年代以降については、第1期：長大橋時代、第2期：合理化橋梁時代、第3期：本格的な社会資本維持時代と扱うことができる。第1期では高強度鋼を高品質かつ高効率に接合するアーク溶接技術が長大橋の建設に貢献した。第2期では合理化橋梁に供する極厚高強度鋼材の接合技術が開発された。現在に至る第3期は技術提案のための独自性の高い研究開発が行われている。

This paper is a review of the progress of welding technology in bridge construction with its historical background after the 1970's. The recent history of bridge construction could be regarded as consisting of 3 periods. The "Large scale bridge construction period," the "Rational bridge construction period," and the "Full scale infrastructural maintenance period." During the 1st period, highly reliable and efficient arc welding methods contributed to large scale bridge construction. In the 2nd period, the welding process for thick, heavy high strength steel plates had been developed. From the beginning of the 3rd period to present, much original research and development has been executed for technical proposals by fabricators.

### 1. 緒言

橋梁とは道路建設や鉄道敷設に当たり、河川や海峡など地形への対応や市街地の立体交差のため、それまで何もなかった空間に路面もしくは鉄道軌道を供することを目的とする構造物である。橋梁の性能とは空間の確保であり、近年の橋梁技術の性能評価において橋梁規模の大きさが一つの指標となっていた。そういう意味では世界初の金属製(鑄鉄)橋梁アイアンブリッジの橋梁支間長(橋脚、支承などによる支持間隔)が30m程度だったのが、その後200年以上経て建設された第1図に示す「明石海峡大橋」において橋梁支間長は1991mに到達している。この橋梁技術の進歩は、まさに重厚長大が大きな価値基準であった国内の時代背景を如実に表している。



第1図 「明石海峡大橋」  
Fig. 1 "Akashi-Kaikyo Ohashi Bridge"

近代日本の橋梁技術の進歩と時代背景には大きな相関関係があり、大きく分けると1970～1995年までの「より遠くへ、より大きく！」の長大橋梁の時代、1995～2005年の「より合理的な、よりコストが安く！」の合理化橋梁の時代、2005～2015年の現在は「より社会ニーズを捉え、より独自性を！」の自由競争の時代となる。また、2013年には、国土交通省から「社会資本のメンテナンス元年」の方針<sup>(1)</sup>が示され、今後の橋梁技術は「より維持管理性の優れた！」または、「橋梁の合理的な補修技術」そのものが求められる時代を迎えると考えられる。

また橋梁構造において、本体構造部材がどんなに高性能化しても、接合部が弱点となつては採用できないため、溶接などの接合技術と橋梁技術の進歩とは大きな相関関係にある。

本稿においては、前述した時代背景ごとに、橋梁の技術進歩に貢献した溶接技術を紹介して、最後に、今後のメンテナンス時代に期待される溶接技術について報告する。

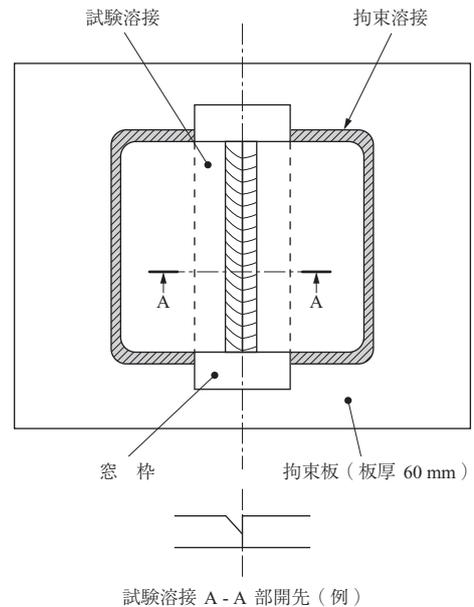
### 2. 「より遠くへ、より大きく！」の時代の溶接技術

長大橋梁の発展に欠かせなかった技術の一つに、まず鋼材の高強度化が挙げられる。橋梁が長大化する際に課題となるのは自重(死荷重)である。支間長を大きくするために鋼材重量が大きくなり、その重量を支えるために、さ

らに鋼材が必要になる問題である。当時の技術者は、それらの課題を高張力鋼 (HT780) の使用によって解決を図った。1974年に完成した「港大橋」、1988年に完成した「瀬戸大橋」、1998年に完成した「明石海峡大橋」ではHT780が大量に用いられている。

高張力鋼を大量に用いた橋梁である「明石海峡大橋」の使用鋼種配置を第2図に示す。本橋ではHT780が多用されているが、すべての部材に対してではなく、設計荷重に応じさまざまな強度レベルの鋼種が配置されている。高張力鋼などの高性能な材料が使用される際には必ず、接合部にも相応な性能が求められ、結果、溶接技術は進歩してきた。

「明石海峡大橋」へのHT780の適用においては、鉄鋼メーカ、ファブリケータ（橋梁製造業者）による研究開発が数多く実施された<sup>(2)</sup>。特に現場溶接では施工環境の難易に関係なく工場溶接と同じ品質が要求され、鋼材の予熱の低減は重要な課題であった。一方、予熱条件は材料だけでなく施工条件、環境の影響も大きい。そこで実施工を模擬した溶接割れ試験による限界予熱条件が検討された。当時の割れ試験片の一例を第3図に示す<sup>(3)</sup>。これは多層溶接割れを対象とした検討であり、溶接方法はSAW (Submerged Arc Welding)、継手の拘束度は、 $R \cong 400 \cdot t$  (N/mm $\cdot$ mm, ここで  $t$  は板厚 mm) である。結果の一部を第4図に示す。また第4図には溶接金属の強度、拡散性水素量などから得た割れ防止予熱パス間温度も併せて示す<sup>(4)</sup>。角溶接と突合せ溶接では用いる溶接材料やフラックスが異なるため、溶接割れ防止温度にも違いがある。

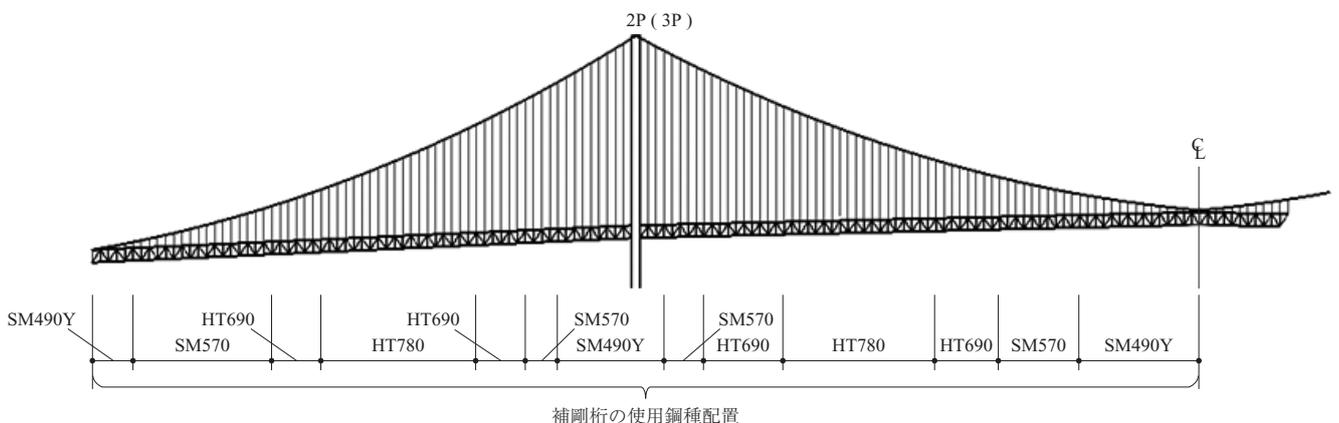


第3図 多層溶接割れ試験片<sup>(3)</sup>  
Fig. 3 Test specimen of multilayer weld cracking<sup>(3)</sup>

また、本図よりパス間温度を50℃に保持することで割れは発生しないことも分かる。ただし本試験の雰囲気は10℃であり、寒冷地における施工については別途確認が必要である。

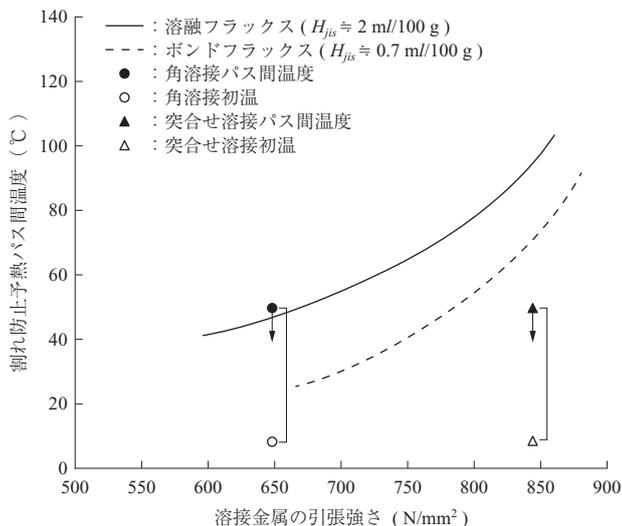
### 3. 「より合理的な、よりコストが安く！」の時代の溶接技術

西川らが「ミニマムメンテナンス橋に関する検討」<sup>(5)</sup>を発表した以降に旧道路公団を中心に、それまでの橋梁工事における材料費ミニマムの設計から、維持管理費・加工費ミニマムの設計に切り替わった工事が大量に発注された。いわゆる少主桁橋の普及である。第5図に鋼桁の架



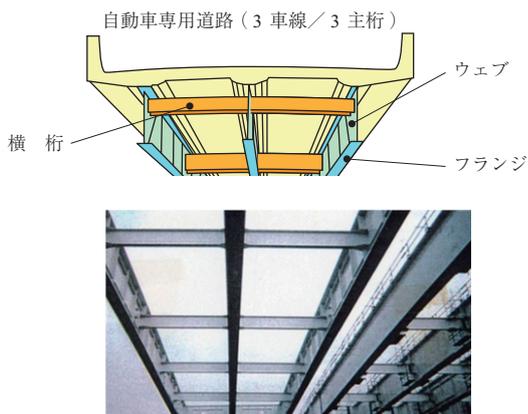
(注) ・1 ケーブル：φ 5.23 mm (ワイヤ外形) × 127 本 × 290 スtrand  
 ・引張強さ：1 760 N/mm<sup>2</sup>  
 ・SM\*\*\*：非調質鋼  
 ・HT\*\*\*：高張力鋼  
 ・\*P：主塔

第2図 「明石海峡大橋」の使用鋼種配置  
Fig. 2 Steels used in “Akashi-Kaikyo Ohashi Bridge”



試験条件  
 ・鋼材 :  $P_{CM}$  (溶接割れ感受性粗成) = 0.23%  
            $C_{eq}$  (炭素当量) = 0.47%  
 ・雰囲気温度 : 10°C  
 ・雰囲気湿度 : 60%  
 ・繰返し : 2体/1条件

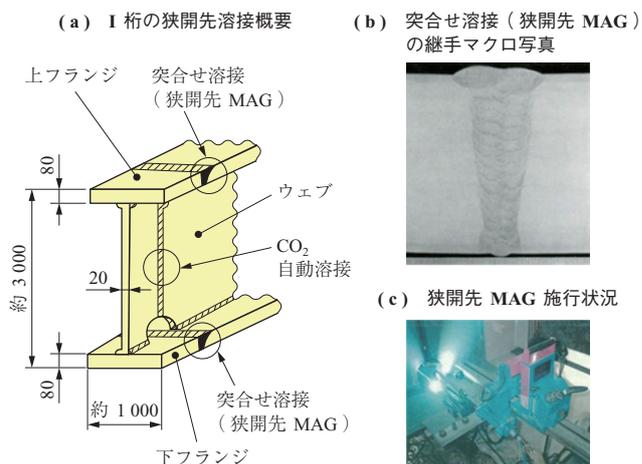
第4図 角溶接および突合せ継手多層溶接割れ防止予熱温度<sup>(4)</sup>  
 Fig. 4 Preheating temperature for preventing multilayer weld cracking in corner welds and butt weld joints<sup>(4)</sup>



第5図 少主桁橋の概要図  
 Fig. 5 Schematic diagram of bridge with few main girders

設が完了した段階の少主桁橋を示す。鋼材量よりも製作工数削減を優先して設計したI桁橋梁であり、主桁本数、補剛材は最小限にとどめ、対傾構、下横構はない。主桁本数が少ないため、主桁にSM570を用いても極厚板(80~100mm)が必要となる場合が多く、列数の制約によって高力ボルト接合ができないため、現場での主桁連結は溶接となっており、溶接量を減らすために狭開先溶接<sup>(6)</sup>が採用された。第6図に狭開先溶接概要を示す。

このような少主桁橋はI桁形式が一般的ではあるが、箱桁形式の実績もある。第7図に箱断面少数主桁橋梁の状況を示す。従来桁よりも箱桁幅が少なく、フランジは板厚99mmのSM570が用いられている。本橋では予熱フ



第6図 狭開先溶接概要 (単位: mm)  
 Fig. 6 Profile of narrow gap welding (unit: mm)

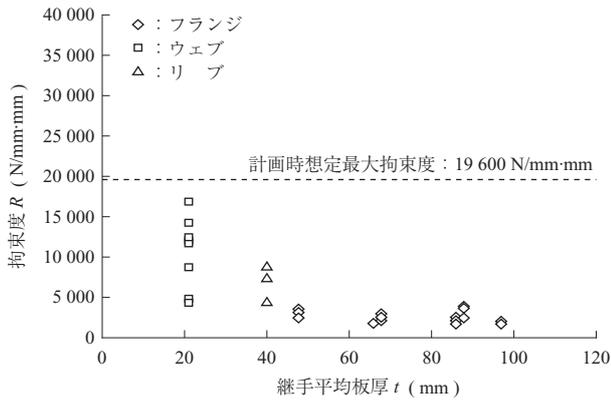


第7図 箱断面少数主桁橋梁の架設状況  
 Fig. 7 Erection of bridge having box-shaped cross section with few main girders

リー鋼が用いられているが、主桁の板厚は極めて厚く、かつ箱断面桁であるため、実物大の部材を用いた溶接施工試験が実施された。第8図に示すように継手の拘束度も実測されており、採用した予熱フリー鋼SM570材が十分対応できる範囲であることが確認された<sup>(6)</sup>。

#### 4. 「より社会ニーズを捉え、より独自性を！」の時代の溶接技術

2005年に公共工物品確法(公共工事の品質確保の促進に関する法律)が施工されると、①疲労強度の向上②溶接時の予熱フリー化③圧縮荷重に対する最高耐荷力の向上、などが社会のニーズとして望まれる。このため、材料、施工、設計などさまざまな観点から技術提案がなさ



第 8 図 箱断面少数主桁橋梁の継手拘束度<sup>(6)</sup>

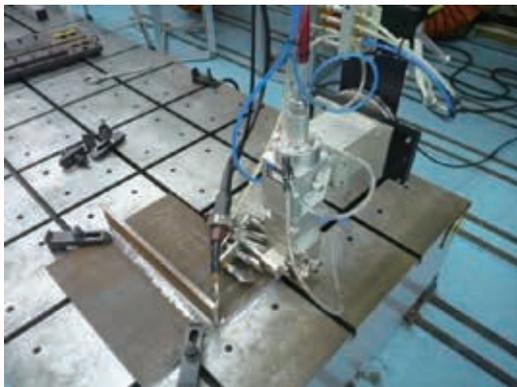
Fig. 8 Constraining degree of welding joint in bridge having box-shaped cross section with few main girders<sup>(6)</sup>

れ、これに対応した研究開発が行われている。ここでは一例としてレーザー・アークハイブリッド溶接について報告する。

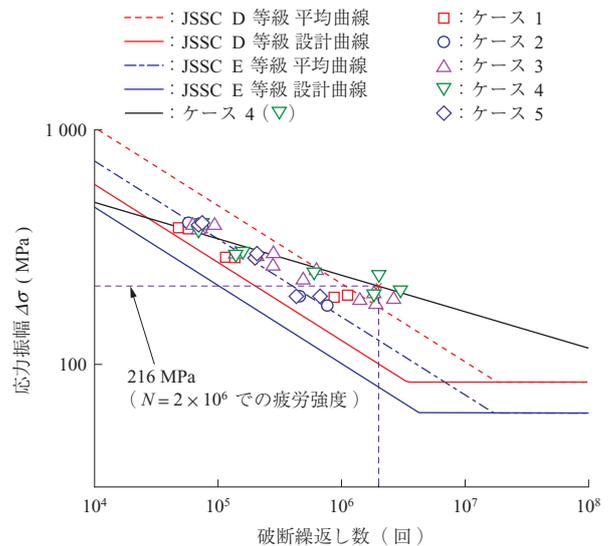
第 9 図にレーザー・アークハイブリッド溶接トーチを、第 10 図にこれを用いて製作した荷重非伝達型すみ肉溶接継手の疲労強度を示す。溶接条件を最適化することによって、疲労強度は向上する。レーザー・アークハイブリッド溶接を用いた場合、① 疲労強度の支配因子は溶接脚長の止端半径とフランク角であること ② 止端半径は小さい方が、フランク角は大きい方が荷重非伝達型すみ肉溶接継手の疲労強度に寄与すること、を確認した<sup>(7)</sup>。フランク角を小さくするには、溶接ワイヤの送給量に対して、十分な入熱を行うことが有効である<sup>(8)</sup>。

アーク溶接の場合はフランク角が小さくなるとのど厚も減少し、継手の接合強度が低下する。しかしレーザー・アークハイブリッド溶接はのど厚が厚くなり、深い溶込みによっても強度を確保できるため、フランク角の減少による強度の低下はない。

橋梁分野においてレーザー溶接技術は、試験的ではあるが



第 9 図 レーザーアークハイブリッド溶接トーチ  
Fig. 9 Laser and arc hybrid welding torch



(注) JSSC \* 等級：一般社団法人日本鋼構造協会疲労強度等級

第 10 図 荷重非伝達型すみ肉溶接継手疲労強度の改善

Fig. 10 Fatigue strength improvement in non-load bearing fillet welded joint

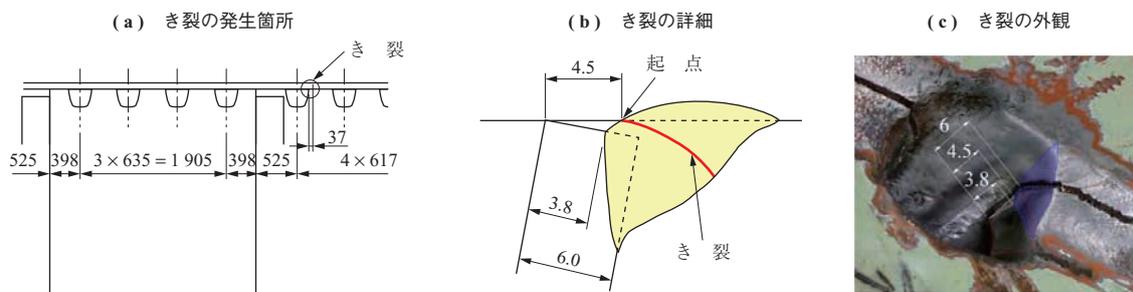
実橋製作にも用いられている。レーザー・アークハイブリッド溶接を用いた橋梁部材は 2007 年に製作されている<sup>(9)</sup>。また、これとは方式が異なるが、同じくレーザー溶接技術であるレーザーホットワイヤ溶接を用いた橋梁部材は 2009 年に製作された<sup>(10)</sup>。どちらの橋梁も製作架設後すぐに供用され、現在に至っている。

## 5. メンテナンス時代に求められる溶接技術について

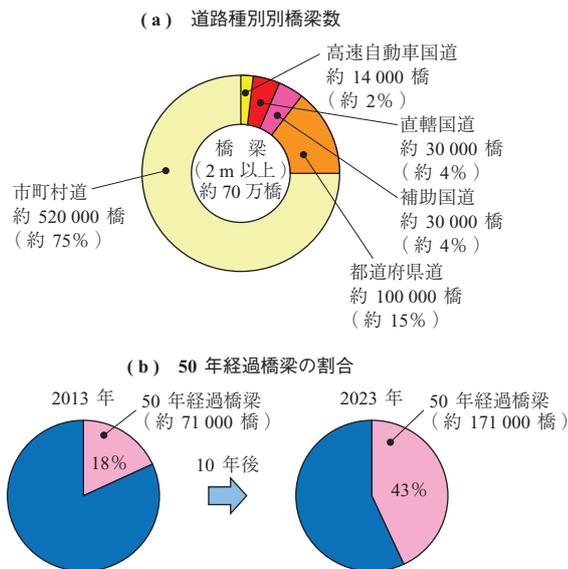
道路の老朽化対策の本格実施に関する提言<sup>(11)</sup>によると、全国約 70 万橋の橋梁のうち、建設後 50 年を経過した橋梁の割合は、10 年後には 43% に増加するとの記述があり、今後、早急に老朽化道路のメンテナンスの取組みを強化すべきと提言している。

2000 年ごろから、交通量の多い橋梁を中心として鋼床版に疲労損傷が数多く報告されている<sup>(12)</sup>。これらの損傷の多くは、主要な溶接部であるデッキプレートと U リブの溶接部に生じるき裂である。これにはルート部からデッキプレートに進展するき裂と、ルート部から溶接ビードを貫通するき裂(第 11 図)<sup>(13)</sup>の 2 種類が報告されている。これらの疲労き裂には多くの研究が行われており、疲労実験や解析などで発生メカニズムについては多くの論文<sup>(12)</sup>で考察されている。

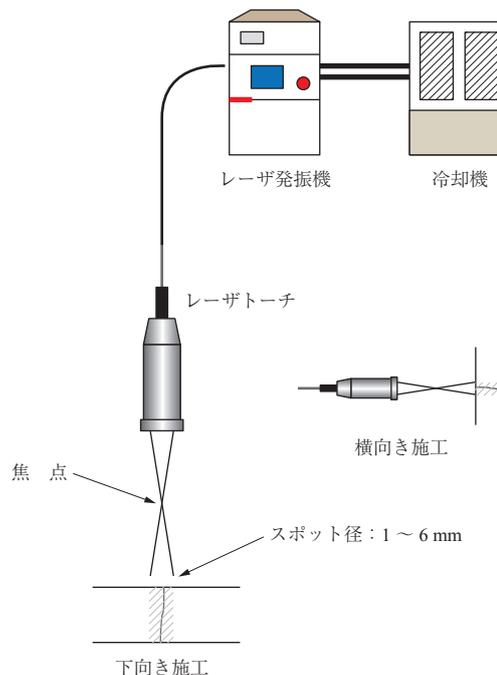
しかしながら、すでに損傷した部位の合理的な補修方法は、まだ確立されていない現状がある。これらの疲労損傷は供用開始後 20 年程度で顕在化されてくる傾向にあり、第 12 図に示す老朽化橋梁の現状を勘案すると、今後は、溶



第 11 図 鋼床版デッキプレート損傷事例<sup>(13)</sup> (単位: mm)  
 Fig. 11 Example of damage of steel floor deck plate<sup>(13)</sup> (unit: mm)



第 12 図 老朽化橋梁の現状<sup>(11)</sup>  
 Fig. 12 Current state of aging bridges<sup>(11)</sup>



第 13 図 レーザによる疲労き裂補修概念図  
 Fig. 13 Conceptual diagram of fatigue crack repairing by using laser

接による補修技術の開発が望まれる。また前述したレーザー溶接技術の応用も期待される。第 13 図にレーザー光による疲労き裂補修の概念図を示す。文献 (14)、文献 (15) では施工技術、施工部位の特性について報告されている。

金らの「高経年鋼材の溶接性および継手の機械的特性評価」<sup>(16)</sup>において、老朽化橋梁に対する溶接補修に関する報告がされている。そのなかで補修・補強を必要としている橋梁に使用されている鋼材は、当時の製鋼技術からして、現在の鋼材に比べ、品質が劣るものと考えられると述べられている。さらに経年材に対し、化学成分分析を行った結果、経年材は SM400A に比べ、P (りん), S (硫黄) は多く含まれているが、Si (けい素) が少ない。P や S が多いと、鋼材のじん性や溶接性を低下させるとともに、溶接割れが懸念されるため、老朽化橋梁に対する溶接補修を採用するに当たっては、経年材に対する配慮が必要と述べられている。

また、猪瀬らによる「老朽既設鋼構造物補修溶接へのレーザー・アークハイブリッド溶接適用検討」<sup>(17)</sup>において

は、経年橋梁などの調査実績に基づき、化学成分や強度などを再現した供試鋼を用いて溶接補修のための実験を実施し、割れ感受性や継手性能を検証した。

これらの事からも、メンテナンス時代における溶接技術の課題の一つとしては、低性能鋼材の入手、再現した鋼材での溶接実験が必要と考える。

## 6. 結 言

近代橋梁技術の進歩と溶接技術について、時代背景に照らし合わせて紹介してきたが、橋梁技術と溶接技術は車の両輪のように切磨琢磨して発展してきた。本稿においては紙面の都合によって筆者が良く知るところの溶接技術の紹介にとどまっているが、実際のところは調査しきれないレベルでの研究が数多く存在することはご理解願いたい。

## 参考文献

- (1) 国土交通省：社会資本メンテナンス元年 老朽化への対策と長寿命化への挑戦 国土交通 No. 122 2013年10月
- (2) たとえば，一般社団法人日本橋梁建設協会：鋼橋技術の変遷 虹橋 Vol. 72 2008年5月 p. 5
- (3) 中西保正，井元 泉，焼野保雄：HT780 高張力鋼の溶接 石川島播磨技報別冊橋梁特集号 1995年4月 pp. 51 - 57
- (4) 矢竹 丘，百合岡信孝，片岡隆一，常富栄一：鋼材の溶接遅れ割れの研究（第3報）溶接金属ミクロ割れ・横割れの防止 溶接学会誌 第50巻3号 1981年3月 pp. 291 - 296
- (5) 西川和広，村越 潤，中嶋浩之：ミニマムメンテナンス橋に関する検討（橋梁特集） 土木技術資料 第38巻9月 1996年9月 pp. 56 - 61
- (6) 中西保正，猪瀬幸太郎：やさしい橋の溶接技術第2回各種溶接法と特徴 橋梁と基礎 第43巻第12号 2009年12月 pp. 37 - 41
- (7) 猪瀬幸太郎，神林順子，阿部大輔，松本直幸，杉野友洋，金 裕哲：レーザー・アークハイブリッド溶接を用いた HT780 すみ肉溶接継手の疲労強度改善 溶接学会全国大会講演概要集 第89集 2011年8月 pp. 214 - 215
- (8) 猪瀬幸太郎，神林順子，阿部大輔，松本直幸：レーザーホットワイヤ溶接を用いたすみ肉溶接継手施工と疲労強度 溶接学会全国大会講演概要集 第92集 2013年3月 pp. 158 - 159
- (9) 猪瀬幸太郎，大脇 桂，中西保正，宮地 崇，藪野真史，小川勝治：レーザー・アークハイブリッド溶接の歩道部鋼床版部材への適用 土木学会第63回年次講演会講演概要集 2008年9月 pp. 815 - 816
- (10) 猪瀬幸太郎，阿部大輔，大脇 桂，大畑和夫，岡田誠司，倉田幸宏，金 裕哲：半導体レーザーを用いたホットワイヤ隅肉溶接継手の性能確認 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集 2010年8月 pp. 967 - 968
- (11) 社会資本整備審議会 道路分科会：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言 2014年4月
- (12) たとえば，村越 潤，梁取直樹，宇井 崇：既設鋼床版の疲労耐久性向上技術に関する研究 国立研究開発法人土木研究所 2008年10月
- (13) 齊藤史朗，川畑篤敬，井口 進，宮下 敏，杉山裕樹：ビード貫通き裂の発生した鋼床版 Uリブ溶接部の形状について 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集 2011年9月 pp. 315 - 316
- (14) 猪瀬幸太郎，松本直幸，阿部大輔，神林順子，大畑和夫：鋼構造物に生じたき裂のレーザー補修技術開発 土木学会年次学術講演会概要集 第68集 2013年8月 pp. 699 - 700
- (15) 猪瀬幸太郎，松本直幸，神林順子，阿部大輔，大畑和夫：鋼構造物に生じたき裂のレーザー補修技術開発 溶接学会全国大会講演概要集 第94集 2014年4月 pp. 82 - 83
- (16) 金 裕哲，堀川裕史，上野康雄：高経年鋼材の溶接性および継手の機械的特性評価 - 既設橋梁の溶接を用いた補修・補強に関する研究（I） - 鋼構造論文集 第12巻第46号 2005年6月 pp. 19 - 25
- (17) 猪瀬幸太郎，神林順子，阿部大輔，松本直幸，金裕哲，廣畑幹人：レーザー・アークハイブリッド溶接の割れ防止に関する実験的検討 溶接構造シンポジウム 2011 講演論文集 2011年11月 pp. 93 - 96

# 複合材サンドウィッチパネルへのシェアログラフィ法の適用

## Applying Shearography to Composite Sandwich Panels

滝 沢 真 実 株式会社 IHI 検査計測 検査事業部技術部  
前 田 朝 樹 株式会社 IHI 検査計測 計測事業部計測技術部 次長  
藤 原 貢 株式会社 IHI 検査計測 検査事業部技術部 部長  
細 谷 昌 厚 元 株式会社 IHI 検査計測 技師長

本稿では、GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）試験体に対してシェアログラフィ法を適用したのでその適用事例を紹介する。剥離模擬欠陥を付与した GFRP サンドウィッチパネル試験体を製作し、シェアログラフィ法によって剥離模擬欠陥の検出性能を評価した。また、シェアログラフィ法と微小面外変形解析結果を比較し、本試験条件における検出可能な最小面外変形量を算出した。本結果は、複合材大型構造物の非破壊検査手法として、広範囲を高速に探傷できる点でシェアログラフィ法が有効であることを示している。

This paper presents a case of shearography we conducted on samples made with Glass Fiber Reinforced Plastics ( GFRP ). The performance of the method was evaluated by conducting shearography to detect simulated sub-surface defects in respective samples of GFRP sandwich panels. The results of shearography were compared with those of out-of-plane micro-deformation analysis to calculate the smallest size of detectable deformation under the testing conditions. The findings indicate that shearography is an effective non-destructive testing method for large structures made of composite materials which provides the advantage quickly detecting defects in an extensive area.

## 1. 緒 言

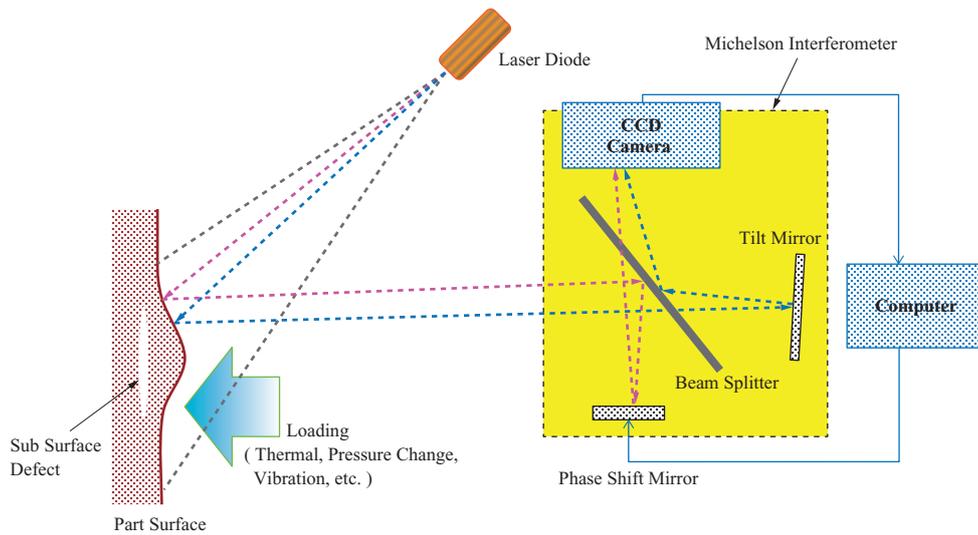
比強度や軽量性に優れた複合材は航空宇宙、船舶などの分野に多く適用されるようになってきた。一般に、複合材の非破壊検査には打音検査や超音波法、放射線法などが用いられている。しかしながら、大型複合材構造物の非破壊検査では広範囲を高速に検査できる技術が求められるため、従来の手法では効率が良いとは言い難い。そこで、著者らは高速で非破壊検査が可能なシェアログラフィ法に着目した。欧米では、航空機や宇宙機器、船舶の FRP（繊維強化プラスチック）部品やウィンドタービンブレードなどの非破壊検査手法として、幅広い分野での適用が始まっている。しかし日本国内においては未だ適用が始まっていないのが現状である。そのため、著者らは剥離を模擬した欠陥を付与した GFRP 試験体を製作し、シェアログラフィ法の適用性を確認した<sup>(1)</sup>。

## 2. シェアログラフィ法

シェアログラフィ法は、試験体表面にレーザー光を照射し、CCD カメラで捉えた反射光の位相を検出して微小な面外変形の変化を捉える方法である。試験体にレーザー光

を照射した状態で加熱や局所的な減圧、振動などを加え、試験範囲内に面外変形を引き起こす。これによって反射したレーザー光を CCD カメラで捉え、形成した干渉縞から試験視野内の位相分布をスペクル像から位相シフト法を用いて算出する。面外変形前と変形後の位相分布を比較することで、表面きずや剥離の有無を位相差像として捉える手法である<sup>(2)</sup>。シェアログラフィ装置の基本原理を第 1 図に示す。フェーズシフトミラーはコンピュータで角度を変え、位相を制御できる。これにより、ビームスプリッターから反射して CCD カメラに到達したレーザー光と干渉しあい干渉縞を形成することができる。フィールドで用いられるシェアログラフィ装置は、レーザーダイオードや CCD カメラ、ミラーさらにはコンピュータまでが一体型となり、持ち運びに適した構造になっているものが多い。

本手法は、レーザーホログラフィ干渉法や電子スペクル干渉法とは異なり、参照光を使用しないため、耐震テーブルが不要であるという大きなメリットがある。また基本的に非接触で検査を行うため、フィールド上で大型構造物を高速で探傷するのに適している。しかし、検出できる欠陥は、表面および表層部では比較的容易であるが、深い内部の欠陥は検出が難しいと言われている。また、微小な欠



第 1 図 シェアグラフィ装置の基本原理  
 Fig. 1 Basic principles of a shearography system

陥の検出や、欠陥サイズの精度良い定量化には適さないとも言われている<sup>(3)</sup>。

### 3. 試験内容

#### 3.1 試験体の製作

厚さの異なる 2 枚の GFRP パネルでバルサ材を挟んで接着したサンドウィッチ構造の試験体を 2 体製作した。バルサ材には、界面剥離を模擬した深さ約 1 mm の人工欠陥を付与した。付与した人工欠陥の表面寸法は、30 × 30 mm, 50 × 50 mm, 70 × 70 mm の 3 種類とし、バルサ材の両面に 3 種類ずつ付与した。GFRP パネルの厚さおよび積層数を第 1 表に示す。なお、GFRP パネル 1-1 と 1-2, 2-1 と 2-2 をそれぞれペアとしてバルサ材と接着させ、試験体を製作した。

#### 3.2 試験装置

シェアグラフィ装置は、Dantec Dynamics GmbH 社（ドイツ）の Q810 を使用した。減圧フードとレーザー光源、CCD カメラが一体となり、持ち運びが容易な形状の装置である。本試験で用いた減圧フードの試験範囲は約 300 × 300 mm である。試験装置の外観を、第 2 図および第 3 図に示す。



第 2 図 試験装置（減圧フード）  
 Fig. 2 Testing unit (decompression hood)



第 3 図 試験装置（制御用 PC）  
 Fig. 3 Testing unit (controlling PC)

第 1 表 GFRP パネルの厚さ  
 Table 1 Thicknesses of GFRP panels

項目	単位	GFRP パネル 1-1	GFRP パネル 1-2	GFRP パネル 2-1	GFRP パネル 2-2
板厚	mm	5.6	3.0	2.8	1.5
積層数	ply	15	9	8	4

### 3.3 試験方法および条件

#### (1) シェアログラフィ試験

試験は、携帯型装置を用いて減圧法で行った。試験範囲を減圧することにより試験面に微小な面外変形を引き起こし、変形の変化を位相差像として PC 上に表示し、記録した。小型の真空ポンプに繋がれているフードを試験片面に  $-5 \text{ kPa}$  で固定し、 $0.2 \text{ kPa}$  ステップで減圧した。パネル 1-1 は最大  $-8 \text{ kPa}$ 、それ以外のパネルは最大  $-7 \text{ kPa}$  まで減圧し、最適な画像を取得した。

#### (2) 微小面外変形解析

減圧法による試験体表面の面外変形量を静応力解析によって算出した。解析に使用した GFRP 材は積層角度  $0/90^\circ$ 、ビニルエステル樹脂のものを想定し、物性値は公表値および GFRP 製造業者から提供された値を用いた。また、解析モデルとして GFRP 平板の中心に剥離が付与された試験体を想定した。剥離の寸法や板厚、解析条件を第 2 表に示す。

第 2 表 解析条件  
Table 2 Analysis conditions

項目	単位	条件
剥離寸法	mm	$30 \times 30$
		$50 \times 50$
		$70 \times 70$
試験体の板厚	mm	2.6
		3.0
		4.6
		5.4
解析ソフト	-	ABAQUS
解析エリアの中心 (剥離部)	メッシュ	$1.0 \times 1.0 \times (1/6)T$
中心以外		$12.5 \times 12.5 \times (1/3)T$
減圧フード内圧	MPa	21.0

(注)  $T$ : GFRP 平板の板厚

## 4. 試験結果

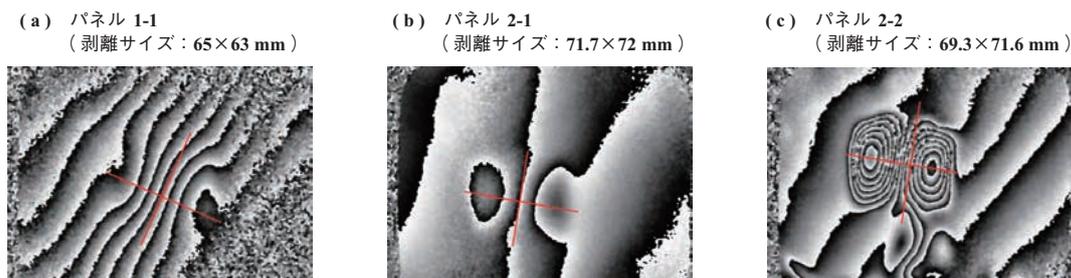
#### (1) 剥離の検出とサイジング

シェアログラフィ検出結果例を第 4 図に示す。第 4 図 - (a) にパネル 1-1 (厚さ  $5.6 \text{ mm}$ )、- (b) にパネル 2-1 (厚さ  $2.8 \text{ mm}$ )、- (c) にパネル 2-2 (厚さ  $1.5 \text{ mm}$ ) の  $70 \times 70 \text{ mm}$  欠陥に対して、シェアログラフィ法を適用し剥離サイズを計測した結果である。パネルが薄くなるごとに指示模様の識別性が向上しているのがわかる。これは薄いパネルの方が、変形導入時の変形量が大きくなったためである。また、剥離欠陥のサイジング評価については、薄いパネル (2-1 および 2-2) では良い一致を示したが、厚いパネル (1-1) では面外変形量が小さいため、剥離サイズは過小気味で算出された。

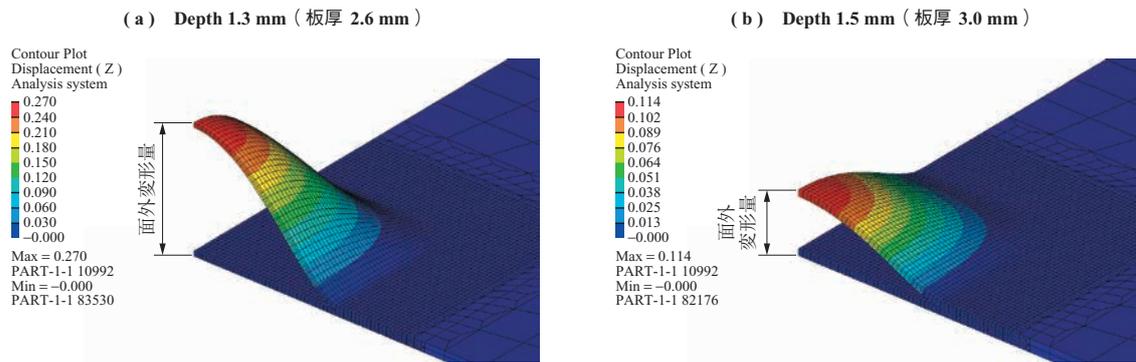
また、人工欠陥サイズ  $30 \times 30 \text{ mm}$  の剥離については、パネル 1-1 以外で  $\pm 1 \text{ mm}$  のサイジング誤差で検出され、比較的精度の良い検査が可能であった。

#### (2) 検出可能な最小面外変形量

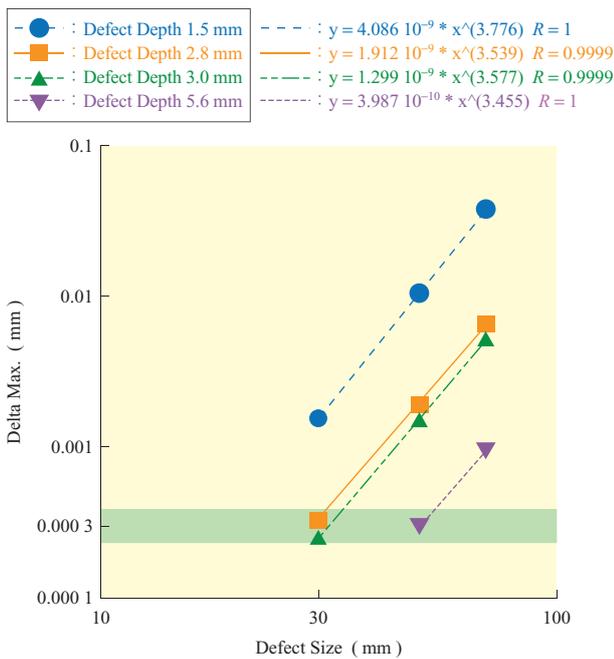
微小面外変形解析結果として、コンタ図の例を第 5 図に示す。図に示すように剥離欠陥中心点の最大面外変形量を解析から算出した。また、面外変形量と剥離サイズの関係を表すグラフを第 6 図に示す。縦軸は、解析によって算出した最大面外変形量で、試験体表面から剥離までの深さごとにプロットした (図中の青、橙、緑、紫線)。横軸はシェアログラフィ法で検出可能であった剥離サイズである。この結果より、シェアログラフィ法で検出が可能であった最小の剥離サイズは  $30 \times 30 \text{ mm}$  で、その際の最大面外変形量は約  $3.0 \times 10^{-4} \text{ mm}$  であることがわかる。すなわち、 $3.0 \times 10^{-4} \text{ mm}$  以上の面外変形が起きる剥離欠陥であれば、本条件においてシェアログラフィ法での検出が可能であるということがわかった。



第 4 図 シェアログラフィ検出結果例  
Fig. 4 Examples of detection results of shearography



第 5 図 微小面外変形解析結果 コンタ図の例  
 Fig. 5 Results from analysis of out-of-plane micro-deformation : Examples of contour maps



第 6 図 最小面外変形量の算出  
 Fig. 6 Calculation of the minimum size of out-of-plane micro-deformation

## 5. 結 言

本稿では、GFRP 試験体に対してシェアログラフィ法を適用し、本手法の有効性を確認した。本試験では、30 × 30 mm サイズの剥離の検出が可能であったが、GFRP 複合材は大型の構造物に使用されることが多いため、30 × 30 mm の剥離が検出できれば、実際の試験でも十分適用可能であると考えられる。また、試験時間については、条件検討に要する時間を除けば一回の試験範囲を 1 分以下で検

査可能であるため、試験対象物が大型であっても、短時間で検査が可能であると予想される。さらに、微小面外変形解析結果と比較することにより本条件における検出可能な最小欠陥の最大面外変形量を算出した。これにより、ターゲットとなる欠陥の大きさを想定し、最大面外変形量を算出すれば、シェアログラフィ法で検出が可能かどうかを事前に数値解析で推定することが可能であると示唆された。

今後は、実機品を視野に入れたシェアログラフィ試験の最適条件を検討する。また、CFRP 複合材についても同様の検討を行い、有効性を確認する予定である。

## 参 考 文 献

- (1) 滝沢真実, 前田朝樹, 藤原 貢, 細谷昌厚: 複合材へのシェアログラフィ法の適用事例 第 17 回表面探傷シンポジウム講演論文集 一般社団法人日本非破壊検査協会 2014 年 3 月 pp. 1 - 4
- (2) Wolfgang Steinchen and Lianxiang Yang : Digital Shearography SPIE PRESS (2003. 2) pp. 73 - 84
- (3) ASTM E 2581-07 : Standard Practice for Shearography of Polymer Matrix Composites, Sandwich Core Materials and Filament-Wound Pressure Vessels in Aerospace Applications ASTM International (2007) pp. 1 - 11  
 (IIC REVIEW No. 52 2014/10 pp. 29 - 33 より転載)

# パルス電流波形による溶込み形状の制御

## Control of the Penetration Shape by Pulsed Current Waveform

野々村 将 一	技術開発本部生産技術センター溶接技術部
兵 間 賢 吾	技術開発本部生産技術センター溶接技術部
小 林 和 行	技術開発本部生産技術センター溶接技術部
山 岡 弘 人	技術開発本部生産技術センター溶接技術部 部長 博士(工学)
宮 坂 史 和	大阪大学大学院工学研究科 知能・機能創成工学専攻 准教授

電流パルス波形で溶込み形状を制御することを目的とし、アーク現象と溶込み形状の関係を検証した。その結果、溶込み形状への寄与度の高い因子が溶滴移行形態であることが明らかとなった。これにより、溶込み形状を制御できる見込みを得た。さらに、溶込み形状を定量化する手法を開発し、パルス波形、溶滴移行形態、溶込み形状の関係を導出することでアークプロセスの体系化を試みた。また、溶滴移行形態の変化を熱源形状の変化として模擬した簡易モデルの開発、検証を行い、本モデルの成立性を確認できた。

Conventional selection of welding conditions has a high dependence over the experience of the welder. Since the effect of process parameter on the penetration has not been grasped quantitatively when the target groove configuration and a welding position change, selection of welding conditions has to be performed each time. Moreover, there is the necessity of cutting and observing a cross-section in the penetration shape check to select optimal conditions, and it requires much time. Therefore, the demand to predicting and controlling penetration shape is increasing. In this research, the relation of an output waveform formation parameter, arc phenomena, and penetration shape is estimated for the controlling of the penetration shape change by a current pulse waveform. As a result, it becomes clear that a large factor in the penetration shape change is a Droplet Transfer Mode. Then, the possibility of penetration shape control is found. Moreover, the above-mentioned relation is incorporated into the conventional penetration shape simulation model and the validity of a simple heat source model which imitates change of the Droplet Transfer Mode as change of heat source configuration is evaluated.

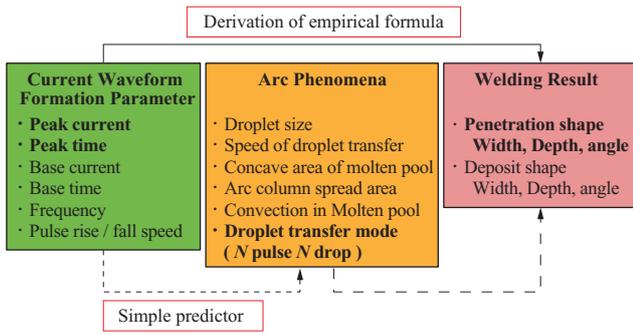
## 1. 緒 言

従来、溶接条件の選定においては、経験に対する依存度が高く、溶接プロセスが定量的に把握されていないため、対象となる開先形状や溶接姿勢が変化する毎に、条件選定を行っているのが実状である。また、最適条件選定手法の一つである溶込み形状確認には、溶接部を切断し断面を観察する必要があり、多くの時間を要する。そのため、溶込み形状を予測、制御することに対する要望はとても高い。デジタルインバータ制御電源の普及により、ユーザーが容易に任意のパルス波形を作り込むことが可能となったが、ユーザーが所望するビード形状、溶込み形状を得るために、パルス波形における個々の電流波形形成パラメータをどのように選定すればよいかは明確化されていない。本来、ビード形状や溶込み形状といった溶接プロセスの下流に分類される溶接結果は、アーク挙動・溶滴移行現象によってもたらされるものであり、パルス波形は、アーク挙動を制御するためのツールに過ぎない。つまり、ビード形

状、溶込み形状の制御にはアーク挙動・溶滴移行現象の制御が不可欠と言える。

パルス溶接に関しては、パルスピーク電流を臨界電流以上とすることにより、低電流域においても安定したスプレー移行を可能とする利点があることは一般に知られるところであるが<sup>(1) (2)</sup>、パルス波形を形成する個々の因子が、アーク挙動・溶滴移行現象にどのように作用し、その結果、溶込み形状にどのように影響を及ぼしているかの知見は少ない。

そこで本研究では、溶接プロセスモデルの開発・評価を行うとともに、適用の多い GMAW に関して、デジタルインバータ制御電源を使用し、**第 1 図**に示すように、電流波形形成パラメータ、アーク現象、溶込み形状の一連のアークプロセスにおいて相互に関連があると思われる、ピーク電流、ピーク時間、溶滴移行形態および溶込み形状の関係を明確にすることを目的とする。また、これより得られた知見を用いて、従来の溶接プロセスモデルに対し、新たな熱源モデルを提案することを目的とする。



第1図 一連のアークプロセス概念図  
Fig. 1 Grasp key map of arc process

## 2. 試験方法

### 2.1 実験装置と溶接条件

溶接電源はデジタルインバータ制御直流電源である。実験では溶接電源の外部特性を定電圧特性とし、パルス電流には台形波を適用した。第2図にパルス波形条件を定義する。パルス溶接の平均電流  $I_{av}$  とパルス周波数  $f$  は、次式で示される。

$$I_{av} = \{I_p \cdot T_p + I_b \cdot T_b + (I_p - I_b) \cdot T_r / 2 + (I_p - I_b) \cdot T_d / 2\} / T \quad \dots\dots (1)$$

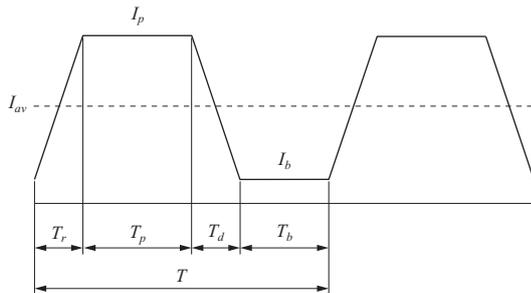
$$f = 1 / T \quad \dots\dots (2)$$

ただし、 $I_p$ ：ピーク電流値、 $I_b$ ：ベース電流値、 $T_p$ ：ピーク電流時間、 $T_b$ ：ベース電流時間、 $T_r$ ：電流立ち上がり時間、 $T_d$ ：電流立ち下がり時間、 $T$ ：パルス周期である。

極性はDCEPとし、シールドガスにAr80% + CO<sub>2</sub>20%混合ガスを用いた。実験では平均電流  $I_{av}$  を変えずに  $I_p$ 、 $T_p$ 、 $f$  を変えてビードオン溶接を行い、溶滴移行とビード形状への影響を検証した。なお、 $f$  は60～300 Hzの範囲を選んだ。使用鋼種は板厚19 mmの軟鋼板(SM490)で、溶接材料はワイヤ径1.2 mmの軟鋼用ワイヤ(JIS Z 3312 : G49AP3M16)である。

### 2.2 溶滴移行現象の観察

ワイヤ先端での溶滴の成長、離脱および移行状況の観察



第2図 パルス電流波形  
Fig. 2 Pulse current waveform

は、高速度カメラを用いた動画撮影により実施した。

撮影は、溶接試験片を台車で移動し、アーク点から溶接線と直角方向となる斜め上方の位置から行った。

撮影状況を第3図に示す。

### 2.3 溶込み形状評価指標の作成

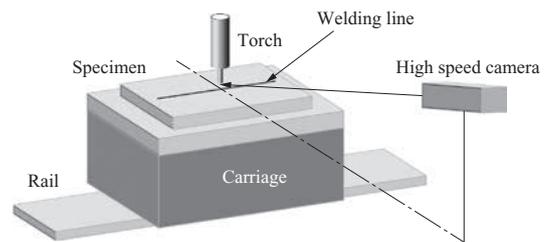
従来の溶込み形状評価は、目視での断面マクロ観察が主流であったが、経験差による評価のばらつきや、主観によっても評価に差が生じていた。

そこで本研究では、溶込み形状の評価にあたり、定量評価可能な溶込み形状評価指標  $P_f$  を作成し、用いた。

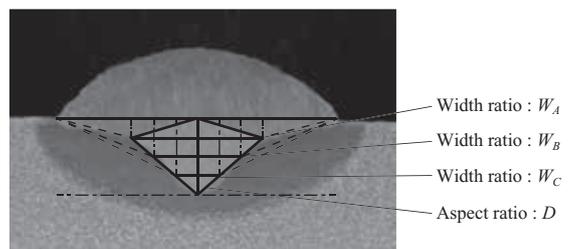
断面マクロ観察により、溶込み形状を計測し、算出した幅比  $W_A$  (ビード幅/溶込み深さの1/4での溶込み幅)、 $W_B$  (同1/2での溶込み幅)、 $W_C$  (同3/4での溶込み幅) 及びアスペクト比  $D$  (溶込み深さの1/4での溶込み幅/溶込み深さ) の4つの特徴量(第4図)を独立変数とし、多変量解析を実施した。従属変数には、第1表に従い、目視での断面マクロ観察によってフィンガー形状から鍋底形状までを1～5点で評価した値を用いた。多変量解析により作成した溶込み形状評価指標  $P_f$  を(3)式に示す。

本指標  $P_f$  を用いて求めた溶込み形状評価点数と目視による溶込み形状評価点数を比較した結果の一例を第2表に示す。

$$P_f = -1.47W_A - 0.73W_B + 0.1W_C + 0.21D + 5.44 \quad \dots\dots (3)$$



第3図 高速度カメラ撮影状況  
Fig. 3 Recording condition of high speed camera



第4図 溶込み形状評価モデル  
Fig. 4 Penetration valuation modeling

第 1 表 目視評価基準  
Table 1 Evaluation standard

Visual evaluation value	Penetration shape
5	
4	
3	
2	
1	

第 2 表 溶込み形状評価指標と目視評価の比較

Table 2 Comparison between visual evaluation and penetration shape evaluation value

Cross-sectional bead shape			
Average visual evaluation value (Number of trials : 4)	2	3	4
Penetration shape evaluation index	1.96	2.78	3.87

### 3. 実験結果

代表的な溶接電流波形と溶滴移行挙動の状態変化を観察した結果を第 5 図に示す。

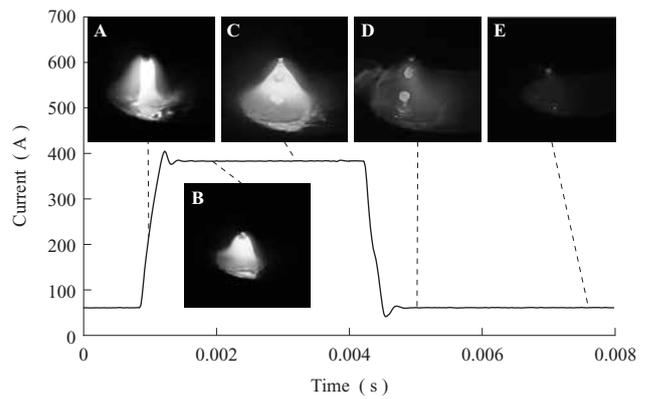
ピーク立ち上がり時から生成される懸垂溶滴は、ピーク時間中に移行していることが観察された。ベース時間では慣性力で落下しているように見受けられる。

電流波形形成パラメータ（ピーク電流値、ピーク時間）と溶込み形状、溶滴移行形態の関係を第 6 図に示す。また本試験において最も溶込み形状に差異が見られた 2 条件での溶込み形状を第 7 図に示す。溶込み形状は 1 パルス 2 ドロップにて最もフィンガー形状となり、N パルス 1 ドロップにて最も鍋底形状に近くなること分かる。

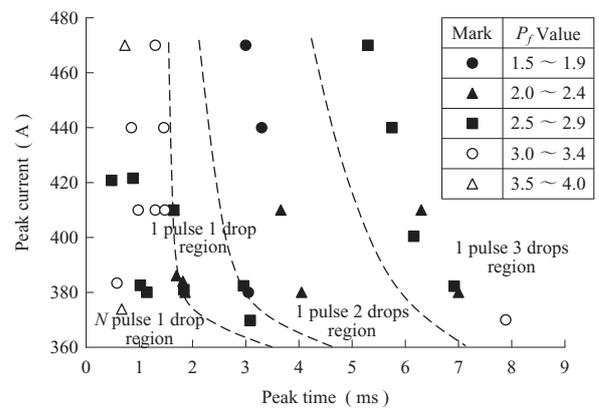
溶滴の挙動が、溶込み形状を決定する重要な因子であることがこの結果から明らかとなった。

このことは、溶滴の挙動を制御することで、溶込み形状を制御できる可能性を示唆している。

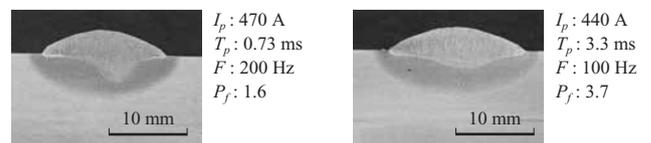
また、溶込み形状と溶滴サイズについて第 8 図に示す。フィンガー状の溶込みは溶滴サイズが 1.5 mm 程度なの



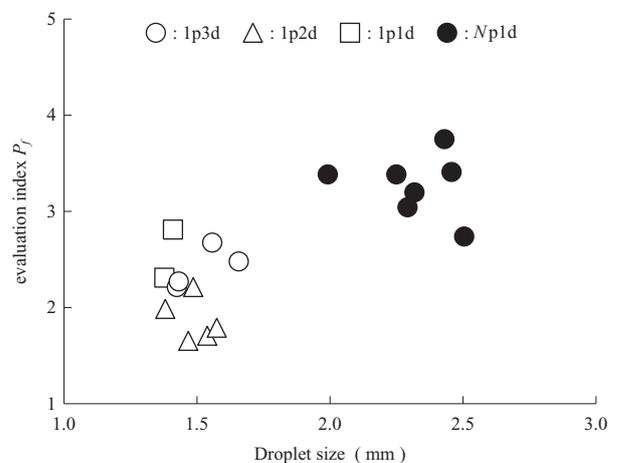
第 5 図 パルス形状と溶滴移行の様子  
Fig. 5 Pulse shape and droplet transfer state



第 6 図 ピーク時間、ピーク電流、溶込み形状の関係  
Fig. 6 Relation between peak time and peak current and penetration shape



第 7 図 パルスによる同溶接電流値 (200 A) での溶込み形状の差異  
Fig. 7 Difference in penetration shape of pulse shape in same welding current (200 A)



第 8 図 溶滴移行形態による溶滴サイズの差異  
Fig. 8 Difference in droplet transfer form of pulse shape

に対し、鍋底状の溶込みは  $N$  パルス 1 ドロップに多く見受けられ、溶滴サイズが 2~2.5 mm 程度と大きいことがわかった。なお、溶滴サイズは高速度カメラ動画から溶滴直径のピクセル数を計測し、同じ動画上に撮像されており、かつ、寸法が既知である溶接ワイヤ ( $\phi$  1.2 mm) のピクセル数から算出した。

#### 4. 溶込み形状予測シミュレーション (3)~(9)

##### 4.1 モデルの仮定と基礎式

本報告で用いるモデルは、非定常状態の溶接現象を対象とするため、以下に示す三次元非定常熱伝導方程式 (4) と、溶融池表面の表面張力と重力のエネルギーバランスによる表面形状方程式 (5) を、差分法を利用して解いている。具体的には、差分の時刻刻みの各ステップにおいて、(4) 式により溶融境界を求め、それを元に (5) 式によって、溶融形状変化を求めている。つまり本モデルでは、時間の進行と共に変化する溶融プールの表面に入熱を行っている。計算に用いた主な仮定は以下の通りである。

- (1) 溶融池内においても熱の流れは、熱伝導方程式に従うものとする。
- (2) 表面張力および溶融金属の密度は一定であるとする。
- (3) 溶融池に作用する力は、アーク圧力、重力、表面張力のみとする。
- (4) 投入した入熱はすべて母材または溶加材のみに供給される。また、一旦溶加材に供給された入熱は母材の溶融現象に影響を及ぼさないとする。

非定常熱伝導方程式

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \dots\dots (4)$$

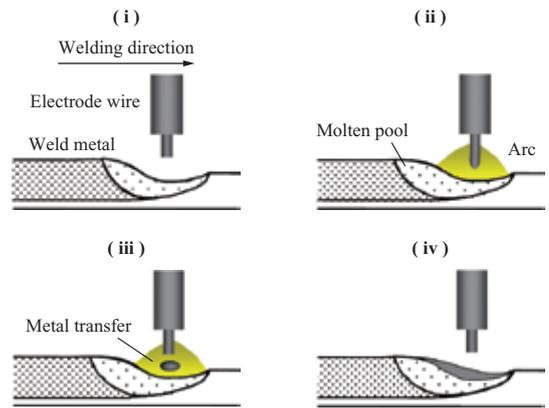
$\rho$ : 密度,  $H$ : エンタルピー,  $K$ : 熱伝導率,  
 $T$ : 温度

表面形状方程式

$$\sigma \left[ \frac{(1 + \xi_x^2) \xi_{xx} + (1 + \xi_y^2) \xi_{yy} - 2 \xi_x \xi_y \xi_{xy}}{(1 + \xi_x^2 + \xi_y^2)^{3/2}} \right] = \sigma g x \alpha + \sigma g y \beta + \sigma g z \gamma - \lambda \quad \dots\dots (5)$$

$\sigma$ : 表面張力,  $\xi$ : 表面変位,  $\rho$ : 密度,  
 $g$ : 重力加速度,  $\lambda$ : ラグランジュ乗数,  
 $(\alpha, \beta, \gamma)$ : 重力加速度の単位方向ベクトル

本計算モデルの計算の流れを以下に説明する。第 9 図



第 9 図 GMAW プロセス  
 Fig. 9 Process of GMAW

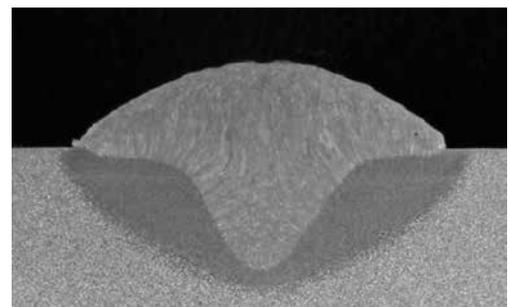
は、溶接線上における縦断面であり、微小時間ステップ間での計算手順を示している。

- (i) トーチ (電極ワイヤ) をある位置に固定する。
- (ii) 非定常熱伝導計算モデルにより、母材をアークで加熱し、その温度場の計算を行う。
- (iii) その微小時間ステップ間で溶融するワイヤ量を母材に投与する。
- (iv) その後、溶融池形状計算モデルを用いて表面ビード形状を計算する。

というものである。ここまで計算が行われると、新たな格子位置にトーチを移動し、同様の方法で目的の位置まで計算が繰り返される。

##### 4.2 溶滴を考慮した熱源モデルの開発

本計算モデルは、これまで溶融池表面に熱源を設定していた。しかし一般の GMAW でみられるようなフィンガー溶込み (第 10 図) を再現することが難しかった。この様にフィンガー溶込みを再現できない理由として考えられることとしては、第一に溶融池内の対流現象を考慮に入れていないことが挙げられる。GMAW においては、ワイヤから供給される溶滴が対流の主たる駆動力であると仮定して GMAW の熱源を以下の様にモデル化した。



第 10 図 フィンガー状の溶込み  
 Fig. 10 Finger type penetration

(1) 入熱をアークからの表面分布熱源と溶滴が持ち込む線状分布熱源に分ける。

(2) 板厚方向への線状分布熱源は溶融池表面から溶融池底部まで均一に分散されるものと仮定する。

計算の進行とともに線状分布熱源が、どの様に変化していくかを第11図を用いて説明する。

(a) 溶接開始時：溶融池が形成されていないため表面分布熱源の中心に点状熱源として投入される。

(b)→(c) 溶融池の形成とともに線状分布熱源の長さが長くなっていく。

### 4.3 シミュレーション結果

第12図に本溶接プロセスを用いた溶込み形状の予測結果を示す。左図が線状熱源無し、右図が線状熱源有りの結果である。

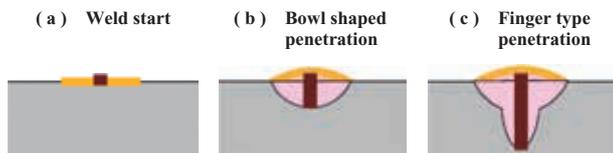
図から分かるように、板厚方向への線状熱源を考慮に入れることにより、フィンガー状の溶込み形状を再現することが可能となった。これは溶込み形状の形成は溶滴エネルギーの寄与度が高いことを示唆している。

## 5. 考 察

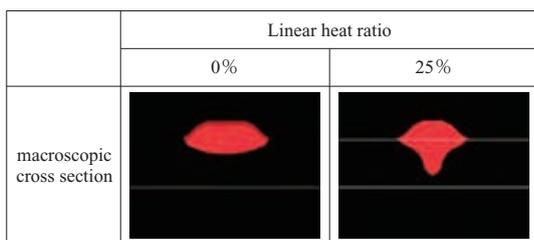
### 5.1 溶込み形状予測指標の作成

#### 5.1.1 電流波形形成パラメータと溶滴移行形態

高速度カメラの動画上から、ワイヤの溶融および溶滴の離脱がピーク電流時に発生していることが見受けられた。そこで、ピーク電流時に溶融するワイヤ量に対してはたらく電磁ピンチ力に着目し、簡易的に溶滴移行形態を予測できる指標を作成した。



第11図 熱源形状の変化  
Fig. 11 Change of heat source shape



第12図 線状熱源有無による溶込み形状の比較  
Fig. 12 Comparison of penetration shape with or without linear heat source

高速度カメラ動画より、ピーク時間中のワイヤ溶融量  $M_p$  ( $m^3$ ) はピーク電流中に送給されたワイヤ体積と定義した。

$$M_p = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \frac{V_f}{60} \cdot T_p \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $d$ : ワイヤ径 (m),  $V_f$ : ワイヤ送給速度 (m/min),  $T_p$ : ピーク時間 (s) である。また、離脱前の溶滴の内部圧力  $P_p$  (Pa) は (7) 式で与えられる<sup>(10)</sup>。

$$P_p = P_0 + \frac{\gamma}{R} + \frac{\mu_0 I_p^2}{4\pi^2 R^2} \cong \frac{\mu_0 I_p^2}{4\pi^2 R^2} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $P_0$ : 雰囲気圧力 (Pa),  $\gamma$ : 液体の表面張力 (N/m),  $R$ : 液柱の曲率半径 (m),  $\mu_0$ : 真空の透磁率 ( $N/A^2$ ),  $I_p$ : ピーク電流 (A) である。なお、右辺の左項から雰囲気圧力、表面張力による圧力、電磁圧力を示す。このとき、ピーク電流時のワイヤ端には電流が集中しているため、溶滴離脱には電磁ピンチ力が支配的であるとして整理した。これにより、ピーク電流時で溶融する溶滴に対して、電磁ピンチ力が行う仕事量  $W_p$  は、(8) 式で与えられる。

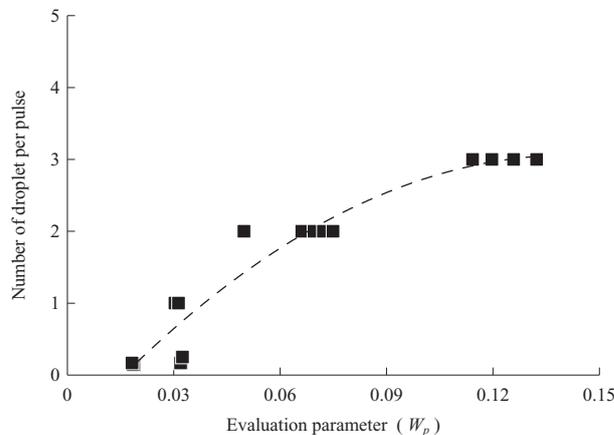
$$W_p = M_p \times P_p$$

$$= \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \frac{V_f}{60} \cdot T_p \times \frac{\mu_0 I_p^2}{4\pi^2 R^2} = AI_p^2 d^2 V_f T_p \dots (8)$$

$$A = \frac{\mu_0}{960\pi R^2}$$

以上より、溶滴移行形態を予測する指標として移行形態評価パラメータ  $W_p (= AI_p^2 d^2 V_f T_p)$  を採用した。

第13図に、 $W_p$  と 1 パルス当たりのドロップ数の関係を示す。本結果は、 $W_p$  とドロップ数に深い相関があることを裏付けている。このことから、 $W_p$  を用いることで簡



第13図  $W_p$  と 1 パルス当たりの溶滴落下数の関係  
Fig. 13 Relationship between  $W_p$  and the number of droplet per pulse

易的に1パルス当たりのドロップ数を予測できると考えられる。

### 5.1.2 溶滴移行形態と溶込み形状

1パルス当たりのドロップ数と溶込み形状評価指標  $P_f$  の関係を第14図に示す。1パルス2ドロップ領域が他の溶滴移行形態と比較し最も  $P_f$  の数値が小さい、つまりフィンガー形状となることが分かった。一方、 $N$ パルス1ドロップとなる領域では、 $P_f$  が大きくなる（鍋底形状となる）ことが分かった。

これは、溶滴サイズが大きい場合、溶融池への入熱の拡散領域が広いため、溶込みは幅方向へ広がり、結果鍋底状となるものと推察される。

よって、溶込み形状の制御には溶滴サイズを制御する必要があると考えられ、 $N$ パルス1ドロップとなるよう電流波形形成パラメータを調整することが効果的と考えられる。

### 5.1.3 溶込み形状予測実験式の導出

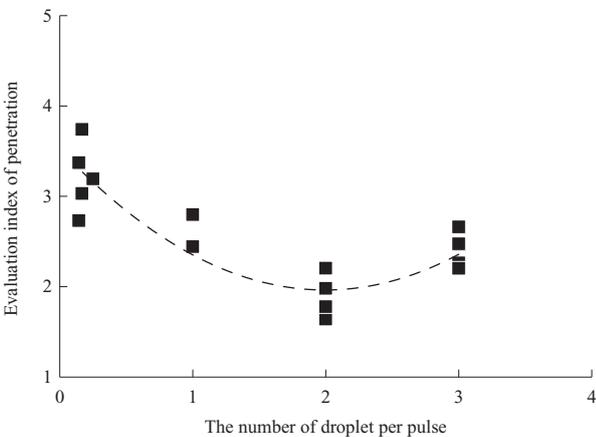
移行形態評価パラメータ  $W_p$  と1パルス当たりのドロップ数（アーク現象）、 $P_f$ （溶込み形状評価指標）の関係から実験式が導き出された（第15図）。これらの式を重畳することで、電流波形形成パラメータと溶込み形状評価指標の近似理論値を導出した（(9)式）。アークを出さずともパルス条件から溶込み形状を予測する指標となると期待できる。

$$P_f = -3854.7W_p^3 + 1141W_p^2 - 102.1W_p + 4.8307 \dots \dots \dots (9)$$

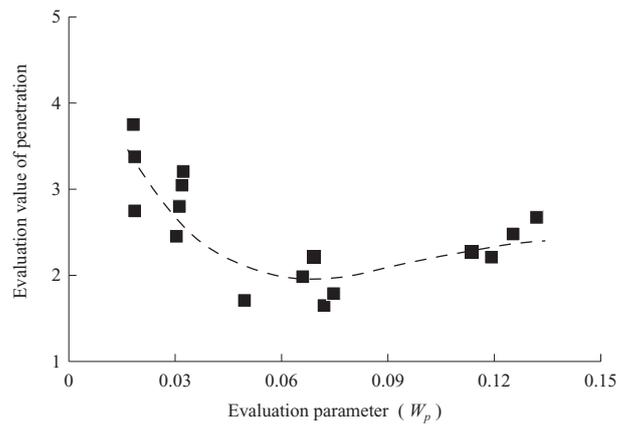
## 5.2 溶込み形状予測シミュレーション

### 5.2.1 熱効率と溶込み形状の関係

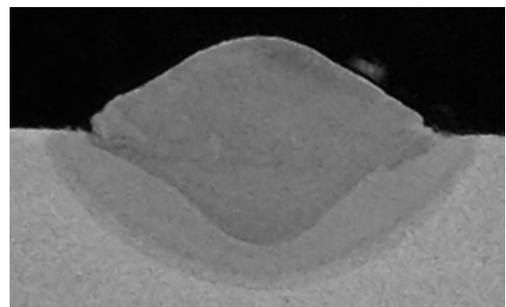
第17図は、第16図の溶接条件に合わせ熱効率と熱源



第14図 1パルス当たりの溶滴落下数と  $P_f$  の関係  
Fig. 14 Relationship between the number of droplet per pulse and  $P_f$



第15図  $W_p$  と  $P_f$  の関係  
Fig. 15 Relationship between  $W_p$  and  $P_f$



( $I = 200$  A,  $V = 27.3$  V,  $v = 70$  cm/min,  $WFS = 6$  m/min)

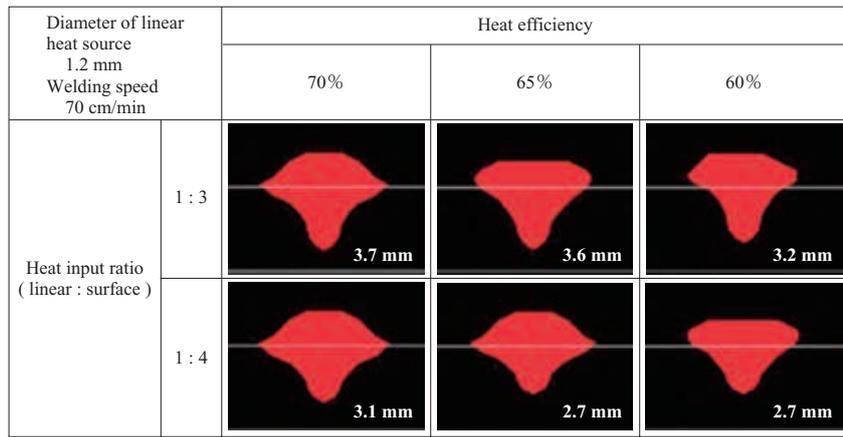
第16図 溶接試験結果  
Fig. 16 Experimental result

比率を変化させて計算した計算結果であり、図中の数字は溶込み深さを表す。熱効率と熱源比率を変化させて計算した。この図を見ると、熱効率が変化しても溶込み深さにはそれほど影響が出ていないことがわかる。また熱源比率を変化させた場合には、フィンガー溶込み先端の幅はそれほど変化しないが、深さが大きく変化している。

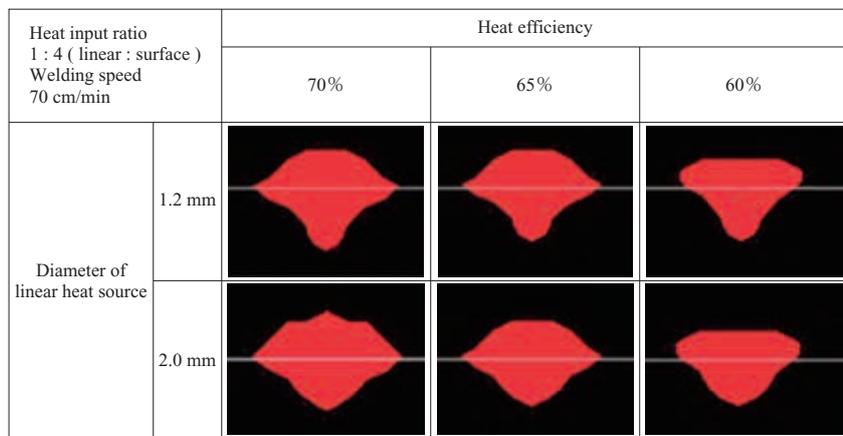
### 5.2.2 溶滴サイズと溶込み形状の関係

前項にて、溶滴サイズが大きい方が鍋底状の溶込みとなる結果を述べたが、板厚方向への線状熱源直径を溶滴サイズとみなし、溶滴サイズが2.0mmの場合の溶込み形状のシミュレーションを実施した。第18図に、第17図と入熱量は同じであるが線状分布熱源の熱源直径を1.2mmから2.0mmに変更した場合の計算結果を示す。

この図から第17図と入熱量が同じであるにもかかわらず、溶込み形状が鍋底形状に大きく近づいたことがわかる。これは入熱量が溶融池内に分散して投入されたことが原因であり、溶滴の挙動によって溶込み形状が大きく変化することを示唆している。本結果は実験結果とも符号している。また溶融断面積も変化しており、単純に熱効率だけ



第 17 図 溶込みに及ぼす線状熱源の影響  
Fig. 17 Effect of line heat rate of penetration



第 18 図 溶込みに及ぼす線状熱源径の影響  
Fig. 18 Effect of line heat diameter on penetration

で溶融量を評価することが難しいことがわかる。このような変動は、溶滴の移行現象に大きく依存していると考えられ、今後はパルス条件やワイヤ径等が溶込みに与える影響を調査していく必要がある。

## 6. 結 言

一連のアークプロセスの把握と最適波形の提案が可能な指標の明示を目的とし、電流波形形成パラメータ、溶滴移行現象、溶込み形状の関係を調査した。また、熱源近傍のみを詳細に計算し、溶滴を模擬した板厚方向への線状分布熱源を考慮した溶接プロセスモデルの開発・評価を行った。

- (1) 従来、主観による評価が主流であった溶込み形状評価を定量化可能で、目視での評価結果と精度良く対応させる指標  $P_f$  を作成した。
- (2) 溶込み形状に最も寄与度の高い因子が溶滴移行形

態であることが明らかになった。1 パルス 2 ドロップで最もフィンガー形状となり、 $N$  パルス 1 ドロップで最も鍋底形状となることが分かった。

- (3) ピーク電流時でのワイヤの溶融量と溶滴離脱にかかる力（電磁ピンチ力）に着目した。出力波形形成パラメータから溶滴移行形態を予測する指標  $W_p (= AI_p^2 d^2 V_f T_p)$  を作成した。
- (4) 電流波形形成パラメータから溶込み形状評価点数を予測する実験式を導出した。
- (5) 従来の計算モデルでは再現が難しかったフィンガー形状の溶込みの再現を可能とした。
- (6) 溶滴サイズが 1.5 mm 程度ではフィンガー形状となり、2.0 ~ 2.5 mm では鍋底形状となる傾向が見受けられた。本傾向はシミュレーションにおいて板厚への線状分布熱源直径を 1.2 mm から 2.0 mm に変化させた場合も同様に見受けられた。

— 謝 辞 —

本研究の遂行に当たっては、技術開発本部生産技術センター溶接技術部 内田雄太氏から多くのご助言とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) K. Hyoma, S. Nonomura, et al. : Preprints of the National Meeting of JWS No. 93 ( 2013. 11 ) pp. 116 - 117
  - (2) T. Okuno, T. Haga, et al. : The Method of Multivariate Statistics < Revised Edition > ( 1981 ) pp. 25 - 155
  - (3) J. F. Lancaster : The Physics of Welding ( 1990. 11 ) pp. 290 - 291
  - (4) Y. Hirata : Gas shielded Metal Arc Welding Journal of the Japan Welding Society Vol. 77 No. 4 ( 2008. 10 ) pp. 32 - 39
  - (5) H. Maruo, Y. Hirata and T. Noda : Effects of Welding Current Waveform on Metal Transfer and Bead Formation in Pulsed MIG Welding Quarterly Journal of the Japan Welding Society Vol. 2 No. 1 ( 1984. 6 ) pp. 12 - 18
  - (6) P. K. Palani and N. Murugan : Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding Journal of Materials Processing Technology 172 ( 2006. 2 ) pp. 1 - 10
  - (7) F. Miyasaka, Y. Yamane and T. Ohji : Development of circumferential TIG welding process model: a simulation model for welding of pipe and plate Science Technology of Welding and Joining Vol. 10 No. 5 ( 2005. 9 ) pp. 521 - 527
  - (8) T. Yamamoto, T. Ohji, F. Miyasaka and Y. Tsuji : 2Mathematical modeling of metal active gas arc welding Science Technology of Welding and Joining Vol. 7 No. 4 ( 2002. 7 ) pp. 260 - 264
  - (9) T. Ohji, Y. Tsuji, F. Miyasaka and T. Yamamoto : Mathematical Modeling of Metal Active Gas ( MAG ) Arc Welding Journal of Material Science and Technology Vol. 17 No. 1 ( 2001. 1 ) pp. 167 - 168
  - (10) S. Nonomura, K. Hyoma, et al. : Preprints of the National Meeting of JWS No. 93 ( 2013. 11 ) pp. 114 - 115
- ( 溶接学会論文集 第 33 卷 ( 2015 ) 第 1 号より転載 )

# ロボット車両と技術

## Robot Cars and Technologies

曾根原 光 治 技術開発本部総合開発センターロボット技術開発部 部長

生 川 俊 則 株式会社 IHI エアロスペース 防衛技術部ロボット開発室 室長 技術士（情報工学）

近年、さまざまなタイプのロボット車両が開発されており、その一部は既に実用化されている。本稿では、防衛やビジネス分野で開発されるロボット車両や、ロボット車両に適用される自律走行技術や遠隔操縦支援技術の動向を紹介する。

In recent years, various types of robot cars have been developed, some of which have already been put to practical use. This paper describes the robot cars developed in the defense and business fields, the trends in autonomous driving technologies, and the remote control support technologies that are applied to robot cars.

### 1. はじめに

2004～2007年に開催された DARPA Grand/Urban Challenge などの長距離無人車競技会により、ロボット車両の実現可能性が大きく示された。DARPA Challenge は、米軍において 2015 年に自律的な無人軍用車両を全体の 1/3 にすることを目標に行われた。現在、自律走行の技術は軍用に限らずさまざまな分野で研究・開発・実証が行われている。本稿では各分野で開発が進められるロボット車両や自律走行・遠隔操縦支援に関する技術を紹介する。なお、ここでは自律もしくは遠隔操縦で走行する車両を無人車、自律的にドライバの運転支援を行う車両を自動運転車とし、両方包括してロボット車両と呼ぶこととする。

### 2. ロボット車両の開発動向

#### (1) 軍事・防衛分野

兵士に代わって危険な作業・任務を遂行する無人車は UGV (Unmanned Ground Vehicle) と呼ばれ、米国での開発・実用化が最も進んでいる。戦場や前線で発生する状況変化に対応する信頼性などに技術課題があることから、米国で実運用される UGV の多くは遠隔操縦型である。一方で長年の自律走行技術の研究開発の成果として、遠隔操縦と自律の機能を組み合わせた半自律型 UGV が装備化前の実証段階にある。

第 1 図は、Lockheed Martin 社が開発する下車分隊支援（個人装備搬送・負傷者後送・偵察など）を



展示会にて撮影

第 1 図 SMSS

Fig. 1 SMSS (Squad Mission Support System)

目的とした SMSS (Squad Mission Support System) で、指定地点への走行や兵士への追従走行などの半自律機能をもつ<sup>(1)</sup>。2014 年夏には TARDEC (Army Tank Automotive Research, Development and Engineering Center) と共同で完全自律での補給、偵察の実証試験も行われており<sup>(2)</sup>、同サイズの半自律型 UGV としては最も早い装備化への計画が進んでいる模様である<sup>(1)</sup>。

日本国内でも防衛省技術研究本部による車両型 UGV の開発が進んでいる。危険地域における偵察や輸送任務の安全性を高めることを目的とした「陸上無人機」の研究においては、障害物の自律回避や経路を自律的に判断して走行する半自律機能を有しており、舗装路・未舗装路などを走行する試験の様子

が映像で公開されている<sup>(3)</sup>。

放射線等により人が危険で近付けない大規模災害時等において、初動対応に必要な情報収集やガレキ処理等の各種作業を安全かつ速やかに実施可能となる「CBRN<sup>\*1</sup> 対応遠隔操縦作業車両システム」の装軌車両や、装輪車両である中継器ユニットが障害物を自律回避して走行する様子が一般公開された（第2図）。また、試験の様子が映像で公開されている<sup>(4)</sup>。

## (2) 民間分野

日本国内では土木分野で先行的に無人車の実用化が進められている。雲仙普賢岳（長崎県）の災害復旧をきっかけに開発・適用が進んだ無人化施工システムでは、遠隔操縦型の建設機械が人が立ち入れない危険区域で作業を行う<sup>(5)</sup>。専用の遠隔操縦型の建設機械は現状、数量が少なく、災害現場への輸送には時間が掛かるため、通常の建機を近隣より手配し、小型ロボットを別送し短時間で装着して建機を遠隔操縦化することで迅速に応急復旧に対応するシステムも存在する（第3図）<sup>(6)</sup>、<sup>(7)</sup>。

同分野の無人車は適用環境が極めて不安定で変化も激しいため、現状では半自律制御などの適用事例は少ないが、安全かつ効率的に作業するための遠隔操縦支援技術の開発が進められている。

現在、災害対応ロボット技術の研究開発・実証プロジェクトが多数進められている。従来はバックホウなどの作業主体の技術開発が中心であったが、2014年から開始された戦略的イノベーション創造プ



陸上装備研究所一般公開  
2014にて撮影



第2図 CBRN<sup>\*1</sup> 対応遠隔操縦作業車両システム  
Remote controlled engineering vehicle system for CBRN<sup>\*1</sup> threat

\*1：Chemical（化学剤）、Biological（生物剤）、Radiation（放射線）、Nuclear（核）



（国土交通省 九州地方整備局・株式会社フジタ共同開発）  
写真提供：株式会社フジタ

第3図 装着型遠隔操縦システム ロボ Q  
Fig. 3 Removable remote control system Robo Q

ログラム（SIP）の1テーマである「遠隔操作型半水中運搬ロボットの開発」では、運搬という走行主体のセンシングや操作支援・制御の要素技術開発・実証なども予定されている（IHIもプログラムに参画中）<sup>(8)</sup>。

鉱山分野では、遠隔地や悪環境などによる労働力不足、安全確保、生産性低下などを解決するため、GPS（Global Positioning System）、ミリ波レーダ、無線ネットワークシステムなどを搭載したダンプトラックを中央管制室で運行管理し、完全無人稼働を実現している。山間地利用での通信・GPSなどロバスト化や未舗装路などに入り込む小障害物検知などに課題があり、研究開発が進められている<sup>(9)</sup>、<sup>(10)</sup>。

農業従事者・熟練者の減少や精密農業・スマート農業と呼ばれる新形態の農業への対応などを背景に、農作業の多くを担うトラクタ自律走行の実用化に向けた研究開発が進められている。農業適用での大きな課題は施肥、播種などに必要な高精度（数cm誤差レベル）の自律走行を安価に提供できるかにある。準天頂衛星システムなど高度測位信号を用いた誘導方式の開発や実証実験などが進められている<sup>(11)</sup>、<sup>(12)</sup>。

近年、最も自律走行技術の精力的な開発が推進されているのが自動運転車である。これまで紹介した無人車と異なり、人が搭乗することが前提で、ドライバーの安全運転を支援し、事故を未然に防ぐアクティブセーフティ（予防安全）技術の一手段として開発が進められている。自動運転に必要な情報を車載センサなどで収集し、周囲状況を判断して走行する「自律型」と、信号や標識などに設置した情報イ

ンフラや他車両などとの通信を利用した外部情報を積極的に使用する「協調型」の大きく2形態が提案されているが、どちらの形態にも一長一短がある。自律型自動運転車の開発例を第4図に示す。また、SIPにおいても、自動走行システムが一テーマとなっており、2020年の準自動走行システム（後述）の実用化を目標に研究開発が進められている<sup>(13)</sup>、<sup>(14)</sup>、<sup>(15)</sup>。

### 3. ロボット車両の自律走行技術や遠隔操縦支援技術

#### (1) 自律レベルの定義

従来「自律走行」の定義が曖昧であったが、米運輸省国家道路交通安全局（NHTSA）が2013年5月に世界に先駆けて自律走行車両を5段階（レベル



写真提供：金沢大学菅沼研究室

第4図 自律型自動運転車（試験機）  
Fig. 4 Autonomous car (testing machine)

0～4）に分類して定義付けを行った<sup>(16)</sup>。日本でも内閣府が2014年6月に発表した「官民ITS構想・ロードマップ」ではほぼ同様の定義を行っている（第1表）。現在の技術はレベル2～3への移行段階と言われており、当面は高速道路などでのレベル3達成を目標に開発が行われている。

同定義はドライバが搭乗する自動車向けであるが、無人車でも「ドライバ」を「遠隔地にいる操縦者」と置き換えることでほぼ同定義を適用できると考えられる。しかしレベル3の定義にあるような緊急時対応の場合、自動運転車では車両に搭乗して周囲状況が把握できるドライバに任せることができ、無人車では無線通信などの制約で限られた情報しか得られないため、遠隔操縦者に全てを負担させることが困難である。このため無人車でレベル3を達成するには、遠隔操縦者に周囲情報などをわかりやすく提示する操縦支援技術なども極めて重要になる。

#### (2) ロボット車両の適用環境と特徴

ロボット車両の適用環境は分野や用途により大きな違いがある。第2表に分野毎に要求される主な適用環境を示す。

自動運転車が対象とする舗装路（特に当面对象の高速道路）は、ガードレール・側壁・縁石・白線など、人の目を見た場合、比較的認識しやすく、また経年変化にも強い環境条件が整備されている。路面も平坦なため走行の障害となる落下物や他車両も比

第1表 安全運転支援システム・自動走行システムの定義<sup>(14)</sup>  
Table 1 Definition of safe driving support system and autonomous driving system<sup>(14)</sup>

分類	概要	左記を実現するシステム		
情報提供型	運転者への注意喚起等			
自動化型	レベル1：単独型	加速・操舵・制動のいずれかの操作を自動車が行う状態	「安全運転支援システム」	
	レベル2：システムの複合化	加速・操舵・制動のうち複数の操作を一度に自動車が行う状態		「準自動走行システム」
	レベル3：システムの高度化	加速・操舵・制動を全て自動車が行う状態（緊急時対応：ドライバ）	「自動走行システム」	
	レベル4：完全自動走行	加速・操舵・制動を全て自動車（ドライバ以外）が行う状態	「完全自動走行システム」	

第2表 ロボット車両の適用環境  
Table 2 Environment in which the robot cars are used

分野	適用環境	
軍事・防衛 災害対応	無人	舗装路～未舗装路～不整地（含む破損状態）
土木・鉱山		未舗装路～不整地
農業		圃場～農道等の未舗装路（当面：大区画～将来：小区画）
自動車	有人	舗装路（当面：高速・幹線道路～将来：一般道）

較的判別がしやすい。このような環境を高速に走行（～100 km/h 程度）することが求められる。

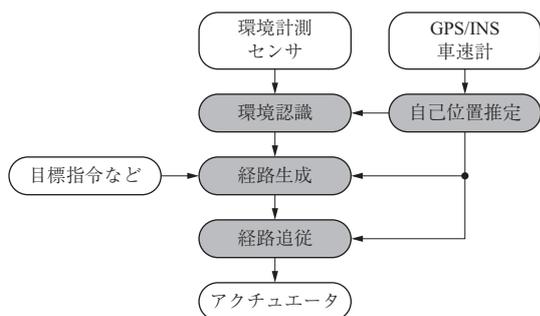
一方、無人車に求められる環境は未整備の環境が多く、未舗装路や不整地などが対象となる。このような道では舗装路に近い場合も存在するが、一般的にはガードレールや白線のような道と道以外の明確な境がなく、路面には凸凹・起伏・轍、更に石などの障害物がある場合も多い。例えば一見通過できそうな草むらの後ろに岩石や窪みなどが隠れているというような、人でも通過判別が難しいケースも存在する。また天候などによる経年変化として、小規模の落石や道端の崩落などの変化要素も大きく、これらの走行の障害を確実に検知しつつ、（高速であることは望ましいが、まずは）横転などせず安定・確実に走行（～数十 km/h）することが求められる。

以上のような要求からも同じ自律走行であっても求められる各要素技術の詳細やレベルは異なると言える。

### (3) 自律走行に必要な要素技術

自律走行するロボット車両は一般的に、地図上で目標位置や中間通過位置などを設定すると、設定位置までの経路を生成して同経路に沿って途中の障害物などを回避しながら走行する。一般的な機能構成を第5図に示す。環境認識した結果は、自車位置に対して障害物位置等の周囲環境の情報としてコンピュータ上で処理される。この情報を環境地図と呼ぶ。第6図に半自律型UGV試験機の例を、第7図に生成した環境地図および障害物を回避した経路の例を示す。

自己位置推定機能は、センサ情報から自車両の現在位置を推定する機能である。一般的にはGPSで得られる地球上の絶対位置情報と、INS（Inertial

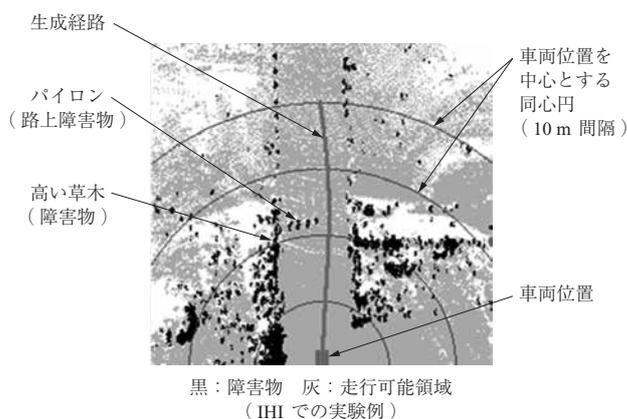


第5図 自律走行の概略機能構成  
Fig. 5 Configuration of the autonomous driving function



(株式会社 IHI エアロスペースでの試験機)

第6図 半自律型UGV試験機例  
Fig. 6 Example of semi-autonomous testing UGV



第7図 環境地図と障害物回避経路例  
Fig. 7 Example of environment map and obstacle avoidance path

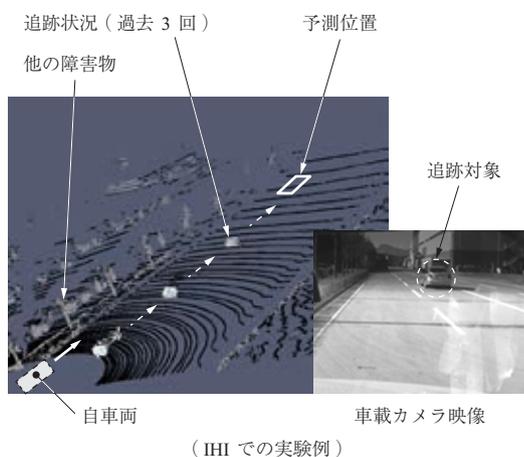
Navigation System：慣性航法装置）や車速計からデッドレコニングにより得られる相対位置情報を補間・統合して推定される。一般的に使用されるディファレンシャルGPSは良好な条件でも0.3 m程度の誤差（1σ）を持つ。しかし複数の衛星から信号を受信して位置計測するため、捕捉する衛星数が少なくなると誤差も大きくなる。衛星からの信号は建物、山、樹木など高い障害物による反射の影響を受け、大きくずれた、誤った位置を示すことがある。デッドレコニングはセンサ誤差やドリフトの影響を蓄積するため、GPSから正しい位置情報が得られない期間が長いと、大きな誤差を持つことになる。

また通常、地図自体にも誤差があるため、GPS/INSによる自己位置情報のみをガイド信号として自律走行させると道から大きく外れてしまう問題もあり、以下に示す環境認識機能が非常に重要となる。

環境認識機能は人間で言うと「目で見て環境や状況を理解する」機能に相当し、主には車載された環境計測センサの情報から車両周囲の走行の障害とな

る物体を検出する機能である。障害物回避には、何処にどの程度の大きさの障害物があるかだけでなく、その障害物が移動体かを判別して、運動を予測する機能も必要となる（第8図）。検出された障害物情報は一般的に自己位置情報を用いて、第7図のような自車両と障害物の位置関係に整理した環境地図として管理される。

第3表に障害物検知・地図生成に用いられる、主な環境（3次元空間）計測センサとその特徴を示す。これらのセンサは計測原理・方式などにより一長一短の特徴をもつ。例えばステレオカメラは比較的安価だが、三角測量の原理で計測しており高い距離範囲・奥行き分解能を得ることが難しい。このため障害物の検出距離や検出サイズには一定の限界もある。またカメラベースのセンサは総じて外乱光や悪天候に弱い。一方 LRF ( Laser Range Finder ) はレーザー光の飛行時間で測距するため高分解能で、路面の凹凸や小さい障害物の検出が可能である。反面、視野方向の検出にはスキャン機構や複数光源が必要で他方式に比べ高価である。また外乱光には強いが雨・雪・霧・砂埃・落葉なども過検出してしまうなどの問題もある。ミリ波レーダは雨雪霧などの悪天候に強く



第8図 移動体検出例  
Fig. 8 Example of recognition of moving objects

第3表 環境（3次元空間）計測センサの特徴  
Table 3 Features of the environment measurement sensors

センサ種類	計測範囲		空間分解能		時間分解能 (フレームレート)	情報量 (輝度など)	耐環境
	視野	距離	上下・左右	奥行			
ステレオカメラ	○	△	◎	△	○	◎	△
距離画像カメラ	○	△	○	○	○	○~◎	△
L R F	○~◎	○	○~◎	◎	△~○	△	○
ミリ波レーダ	△	◎	△	◎	△~○	×	◎

奥行き方向の計測範囲・分解能は高いが、視野方向の能力が低いため、周囲情報を詳細に得るには限界もある。

以上のように、一種類のセンサ情報で、あらゆる天候でのさまざまな環境を判断するのは困難である。このため適用環境などに応じて複数種のセンサ情報を補間・統合して使用することが重要である。民間分野事例では比較的安価なステレオカメラ・ミリ波レーダを主に、高価な LRF を部分的に利用するなど、コストを配慮した構成での開発が進められている。しかし同センサ構成で未舗装路や不整地の凸凹や小障害物を含むさまざまな環境判断を行うことは困難で、使用環境や条件の限定（一定以上の環境整備、自動車専用道路での使用限定、障害物検知サイズ制限など）、運用による工夫（人による事前確認など）も必要である。

軍事・防衛、災害対応分野などの事例では環境を限定できない上、事前情報がない／少ないなどの未知環境を対象とする場合が多い。このため先行する米軍などでも高速3次元 LRF などの高価だが高品質な情報を得られるセンサが使用されている。

このような点から今後は各センサの一層の高精度・耐環境・低コスト化技術やセンサ情報を統合・補間して環境を高度に理解する技術の開発が重要である。また運用面での工夫も重要で、米軍での半自律型 UGV の例のように、直接的な遠隔操縦から高度な自律性をもつ各種モードを用意し、状況に応じて人間／機械の判断で臨機応変にモード変更しつつ任務遂行するようなシステム開発が必要と考えられる。また事前情報が得られると環境計測の一定の要件を緩和できる可能性もあり、別手段で事前情報を収集・準備するような運用を考えることも有効と考えられる。

このような自己位置推定・環境認識機能による結

果を用いて、ロボットの行動を決定することになるが、例えば自動運転車では「現在、道のどの車線のどの辺にいるか」までの高精度な情報を常時把握する必要がある。GPS/INS では先に示すとおり十分な精度が得られない場合があり、近年、環境認識技術を用いた自己位置推定技術が開発されつつある<sup>(14)</sup>、<sup>(17)</sup>、<sup>(18)</sup>。具体的には車線位置や環境の特徴を事前計測して地図として登録しておき、現在取得しているセンサ情報との照合により、高精度に車両位置を推定する。第9図に自動運転車における事前地図例を示す。

自動車分野では地図整備に関するグローバルな議論・取り組みも進みつつある。例えば COCN（産業競争力懇談会）の推進テーマの1つである3次元位置情報を用いたサービスと共通基盤整備に関する報告書では、3次元地図情報（位置情報）整備への具体的な提言がされており<sup>(19)</sup>、SIPでの自動走行システムに関する研究開発でも同テーマが挙げられている<sup>(15)</sup>。

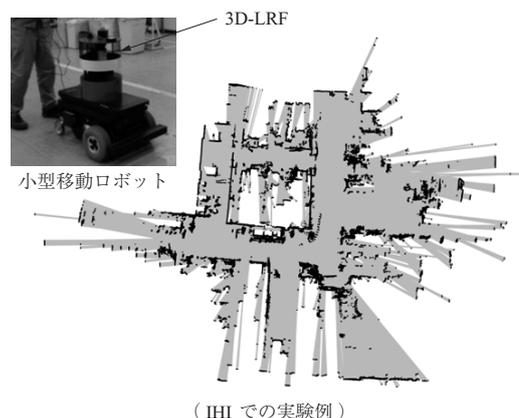
このような地図整備は高速道路や主要幹線道路から順次整備される計画だが、事前地図がない場所や、災害などで大きく状況が変化した場合には同技術を適用できない。このような場合にも対応する技術として、環境計測センサで取得した情報から照合技術を用いて自己位置推定と環境地図生成を同時に行うSLAM（Simultaneous Localization and Mapping）技術の開発が進んでいる（第10図）。例えば日本版DARPA Challengeと呼ばれる「つくばチャレンジ」では参加チームの多くが同技術を採用している。



データ提供：金沢大学菅沼研究所

第9図 自動運転車における事前地図例

Fig. 9 Example of a map prepared beforehand for autonomous driving



第10図 SLAMによる屋内の環境地図生成例

Fig. 10 Example of indoor environment map generation by SLAM technology

SLAM技術は屋内のような比較的安定した環境ではかなり確立しつつある。一方屋外は、先に示した多様性が高く天候などによる変化が大きい点やセンサ自体の耐環境性などから課題が多い。また高速かつ長距離走行する車両では、メモリや計算時間・リアルタイム性などの課題もある。しかし先に示す「つくばチャレンジ」など、一定の状況・環境での実証は進みつつあり、今後は部分的な適用への議論も高まっていくと考えられる。

経路生成機能は目標指令（位置・速度など）に従い、環境地図や車両内部情報から自車両が走行する経路を生成する機能で、経路追従機能は同経路に沿うように車両が追従するためのアクチュエータ制御信号を生成する機能である。静止障害物のみ存在する環境では停止もしくは横を通過する回避行動など、行動パターンは限定されるが、他車両・歩行者などの移動体が存在する環境では交通ルールへの準拠も必要で、行動パターンは飛躍的に増加する。自車両現在状況、静止障害物位置、移動障害物位置（現在・予測）、各種ルール・条件などから適切な行動を決定する判断部（層）と決定した行動に基づく経路計画部（層）が必要となる。（ロボットにとっては複雑であるが人にとっては）比較的単純なケースをベースに条件分岐判断や回避経路計画技術などの開発が進んでいるが、実運用シーンではさまざまなレアケースも存在するため、実証実験などを重ねることで課題抽出・改善などによりレベルアップを図ると共に、長期的には人工知能のような複雑な状況を判断する機能が必要と考えられる。

#### (4) 遠隔操縦を支援する技術

無線通信を介した遠隔操縦では通信量の制約から、多数の精彩な映像を送信することが困難である。このため限られた情報量で把握しやすく提示する技術が有効である。例えば車両に配した複数カメラの映像を統合して、車両を俯瞰した映像を提示する技術<sup>(20)</sup>はひと目で車両と周囲環境の相対関係などを提示でき有効である。(3)で説明したセンサによる地図・地形情報や障害物検出情報を参考情報として併せて提示するなど有効と考えられる。また環境情報に限らず車両の状態情報、例えばINSなどで得られる姿勢などを数値で示すだけでなく、CGなどを使ってビジュアルに提示することで、車両姿勢を体感できない遠隔操縦者に対して横転に対する危険性や傾斜による状況変化などをよりわかりやすく提示できると考えられる。

#### 4. ま と め

各分野で開発が進められるロボット車両や同車両に係る自律走行・遠隔操縦支援技術を紹介した。自律走行・遠隔操縦支援に使われるセンサや技術は適用分野を超えて共通する部分も多い一方、現状ではまだ高コストとなりがちで、技術完成度も十分ではない。このため実用化に向けては分野・アプリケーション毎の特徴、要求環境・状況などを分析・整理し、それら併せた運用面の工夫などを組み込んだシステム化が重要である。

#### 参 考 文 献

- (1) 一般社団法人日本経済団体連合会防衛生産委員会：無人機システム(Unmanned System)の現状と動向 防衛技術調査報告書 2014年3月 pp.2-4 - 5, 62
- (2) Lockheed Martin 社 URL: Robots Moving Robots: Lockheed Martin Conducts First Fully Autonomous Mission <http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2014/august/mfc-081814-robots-moving-robots-lockheed-martin-conducts-first-fully-autonomous-mission.html> (参照 2015-05-07)
- (3) 防衛省技術研究本部 URL: 陸上無人機の性能確認試験 [http://www.mod.go.jp/trdi/news/1309\\_2.html](http://www.mod.go.jp/trdi/news/1309_2.html) [http://www.mod.go.jp/trdi/news/1312\\_3.html](http://www.mod.go.jp/trdi/news/1312_3.html) (参照 2015-05-07)

- (4) 防衛省技術研究本部 URL: CBRN 対応遠隔操縦車両システムの性能確認試験 [http://www.mod.go.jp/trdi/news/1502\\_1.html](http://www.mod.go.jp/trdi/news/1502_1.html) (参照 2015-05-07)
- (5) 建設無人化施工協会 URL: <http://www.kenmukyou.gr.jp/> (参照 2015-05-07)
- (6) 九州地方整備局 URL: 遠隔操縦ロボット「ロボQ」バックホウ用 [http://www.qsr.mlit.go.jp/kyugi/tech\\_develop/kaihatsu\\_naiyou/kaihatsu\\_04.html](http://www.qsr.mlit.go.jp/kyugi/tech_develop/kaihatsu_naiyou/kaihatsu_04.html) (参照 2015-05-07)
- (7) 株式会社フジタ URL: 遠隔操縦ロボット「ロボQ」 <http://www.fujita.co.jp/solution-and-technology/detail/q.html> (参照 2015-05-07)
- (8) 科学技術振興機構 URL: SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 無人化施工の新展開～遠隔操作による半水中作業システムの実現～ 2014年11月 <http://www.jst.go.jp/sip/event/k07/20141105/www/pdf/1-4.pdf> (参照 2015-05-07)
- (9) John Williamson, Autonomous Haulage - The Future of Mining -, Panel session: On-Road and Off-Road Technologies, AUVSI's Unmanned System 2014
- (10) Lou Balmer-Millar, AUVSI Unmanned Systems 2014 CATERPILLAR, Panel session: On-Road and Off-Road Technologies, AUVSI's Unmanned System 2014
- (11) 日立製作所 URL: 稲の立毛時期において自律走行型ロボットトラクターを用いた無人作業に成功 精密農業の実現へ <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2015/01/0114.html> (参照 2015-05-07)
- (12) ヤンマー URL: ロボットトラクター <https://www.yanmar.com/jp/technology/robotics.html> (参照 2015-05-07)
- (13) 安藤敏之, 菅沼直樹, 竹内栄次郎, 服部義和, 柴田英司, 南部朋子: 自動運転・運転支援実用化の取り組み(セミナー資料) 日本ロボット学会 第88回ロボット工学セミナー 2014年10月
- (14) 首相官邸 URL: [http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/kanminits\\_140603.pdf](http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/kanminits_140603.pdf) (参照 2015-05-07) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部 官民 ITS 構想・ロードマップ～世界一安全で円滑な道路交通社会構築に向けた自動走行システムと交通データ利活用に係る戦略～ 2014年6月
- (15) 内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム

- URL：自動走行システム研究開発計画 2014年11月 [http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6\\_jidousoukou.pdf](http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6_jidousoukou.pdf) (参照 2015-05-07)
- (16) NEDO ワシントン事務所 URL：<http://nedodcweb.org/report/DOT%20Policy%20concerning%20Automated%20Vehicles.pdf> (参照 2015-05-07)
- (17) 魚住剛弘, 菅沼直樹：マップマッチングによる自動運転車両の自己位置推定精度向上に関する研究：第一報 Laser Range Finder を用いた白線地図生成ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集'10, 1P1-B11 2010年6月
- (18) 日本経済新聞 電子版 URL：精度数センチで位置推定, 自動運転向け地図制作現場 [nikkei.com/article/DGXNASFK22028\\_S4A420C1000000/](http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK22028_S4A420C1000000/) (参照 2015-05-07)
- (19) COCN (産業競争力懇談会) URL：3次元位置情報を用いたサービスと共通基盤整備 2014年度プロジェクト中間報告 2014年11月 <http://cocn.jp/common/pdf/thema69-S.pdf> (参照 2015-05-07)
- (20) 佐藤貴亮, Alessandro Moro, 藤井浩光, 杉本和也, 野末 晃, 三村洋一, 小幡克実, 山下 淳, 浅間 一：無人化施工における擬似俯瞰映像提示システムの開発 日本機械学会論文集 Vol. 81 No. 823 14-00031 2015年3月 pp. 1 - 13
- (防衛技術ジャーナル 2015年6月号より転載)



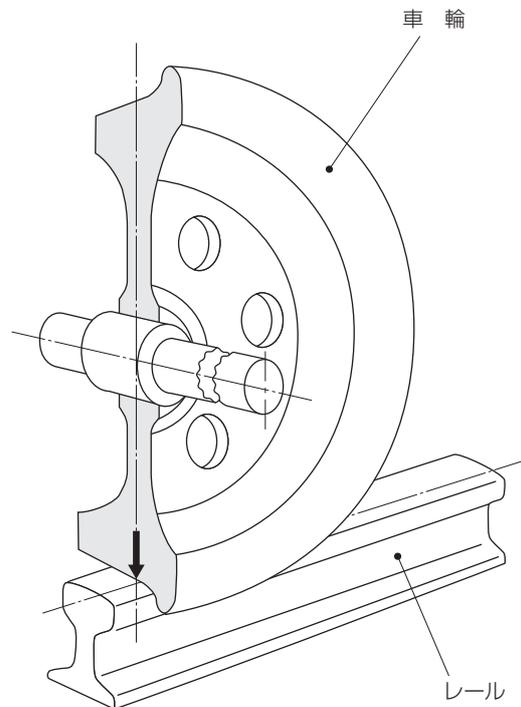
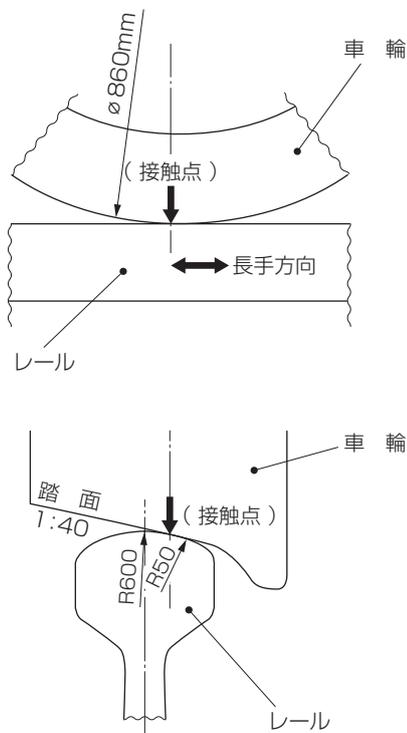
(「レールと車輪のお話」 39 ページから)

レールに載る車輪の接触ではもう一つ、興味深いテーマがあります。踏面が傾斜した車輪は円錐の一部切り出し部分と考えられます。一方でレール頂面は、円柱の一部形態です。両者の接触は、この円錐と円柱の接触ですが、接触部分を拡大すればさらに、丸棒と丸棒の押し付けに簡易化できます。丸棒 2 本を直角に押し当てると幾何の上では、無限に小さい 1 点で接触することになるのですが、無限に小さい点で有限な大きさの力を伝えるとなると無限大の力を考えないといけないことになってしまいます。相手を突き抜けることになるのですが実際にはそんなことはなくて、自動車のゴムタイヤが扁平するように、車輪とレールの場合もある領域がつぶれて、有限な範囲に力を分散して釣り合い状態を作り出し力を支えます。レールの当り部分は窪み、車輪の円弧部分も押しつぶされます。接触部分で同じ位置になるよう接触曲面を形成し、車輪から伝えられる車両の重さをレールが支えます。新幹線車両の重さ(質量)は 43.8 t ですが、8 車輪で等分に支えるとして、車輪直径 860 mm、レール踏面半径 600 mm で接触領域を計算すると、楕円形の当り面が形成されその大きさは、

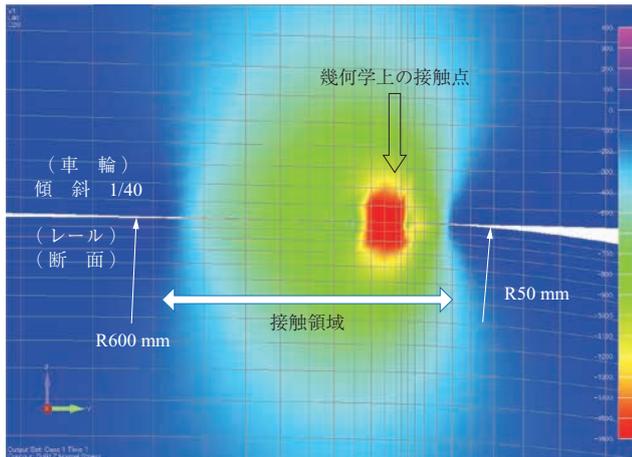
レール長手方向に 10.2 mm、直角方向に 12.6 mm となります。硬い鋼の車輪とレールがこんなにも扁平化するかというのはいかががでしょう。このときの最大押し付け圧力は 800 MPa (82 kgf の力を 1 mm<sup>2</sup> で支える) となります。車輪とレールの変形そして摩耗を評価するときに基礎とする値です。これに対するレールの踏面の強さは 1 300 MPa ほどです。

実際のレールはもう少し複雑な形をしています。新幹線のレールは 1 m 当り 60 kg の太いレールです。頂点部分は半径 600 mm の円弧になっていますが、ちょうど車輪のテーパ部分の傾斜 1/40 になる位置で半径 50 mm の円弧に切り替わります。こうなるときれいな式で算定するのは難しいので、例の通り、道具を使って無理やり計算してみました。次ページの図で赤い部分に上下方向の大きな力が働いています。一部が小さな円弧 (R50 mm 領域) で当り、同じ力を狭い領域で支えないといけないので、接触直下ではその分大きな力が働いています。

この 2 体の物質が接触する状況は、Hertz の接触問題として弾性学の教科書に載っています。電磁物理学分野で



レールと車輪の接触



レールと車輪の接触部に働く大きな力

高名な Heinrich Hertz 先生が、1881 年、曲面レンズを押し付けるときに観察される縞模様（Newton 環）の間隔を計算する解法として考え出されました。ガラスの球を 2 個押し付ける様子をイメージ頂くと考えやすいです。すべての当り点で、同じ変形量、押込力の釣り合いで計算します。物理光学の精密化が目的でしたが、実用機械に多くの具体機構があり、有用な理論式として重用されています。接触の物理として今現在も研究が進められていますが、狭い領域の複雑な応力分布と変形の問題である上に、機構の動きや材料の細かな性質が関係するので、難しい分野の一つです。

Hertz 先生は、周波数の単位にその名誉を記録されました。相対論以前の物理学者で不幸にして 37 歳で早逝されましたが、先生の生涯を知るとき、Helmholtz, Kirchhoff, Planck など、物理学の教科書に名を連ねる多くの巨匠がその周囲を彩っている当時のドイツ物理学界に仰天させられます。

機械工学の粹「鉄道の物理」にはこのほかにも興味深い話題がたくさんありますが、そちらは専門の方々にお任せすることにしてここでは、「物理の散歩」から「線路の旅」に出掛けましょう。ローカルなお誘いで恐縮ですが、中央線各駅停車の旅はいかがでしょう。多摩川、相模川、富士川、天竜川の谷間をたどり、最後に信濃川上流松本までの電車の旅です。思い切って早起きして、春の桜花、夏の緑、秋の紅葉、そして冬なら朝日で真紅に染まる真っ白なお山にご挨拶です。富士のお山を左手に、南アル

プス、八ヶ岳の麓を走り、北アルプスにご面会です。高尾を発車した郊外電車は、小仏トンネルを抜け、相模川の谷間を下ります。相模湖をなぞり大月を過ぎて、“力餅”の笹子峠を目指します。かつて、初狩、笹子は、本線から離れたスイッチバックの平らな駅でした。小さな出力の蒸気機関車では、急傾斜の線路から発進できませんでしたので、平らな線路からの発進を準備しました。遊び客には心楽しい仕組みでしたが、大出力の電車に切り替わるとすぐに廃止されてしまいました。中央線のいくつかの駅には今でもその線路が残ります。笹子トンネルを抜けると武田氏ゆかりの甲斐大和です。“初鹿野”という素敵な名前でしたがなぜか変えられてしまいました。ぶどうの里勝沼に近づくと目の前一杯に甲府盆地と南アルプス、富士のお山が広がります。しばらく甲府盆地の広がりを楽しみ、富士川の支流釜無川に沿い鳳凰山、八ヶ岳の麓をめぐる。信濃境を過ぎると次は諏訪湖にご対面です。塩尻峠を横にトンネルを抜けると、松本盆地を下に北アルプスにご挨拶して終点です。日本百名山のうち 20 余座が見えるはずですが、頂を確認するのはなかなか難しいです。

新幹線、“スーパーあずさ”の快適と便利もよろしいですが、のんびりと、一度、各駅停車の旅を試してごらんになりませんか。時間もかかり、とっても疲れますが。「レールと車輪の物理」でした。



車窓から望む甲斐駒ヶ岳（小淵沢付近 4 月）

お知らせ

・本文中の商品名やソフトウェア名は一般に各社の商標または登録商標です。

<p style="text-align: center;"><b>I H I 技 報</b></p> <p style="text-align: center;">第 55 卷 第 3 号 (通卷 第 303 号)</p> <p style="text-align: center;">平成 27 年 8 月 24 日 印刷 平成 27 年 9 月 1 日 発行 年 4 回 発行</p> <p style="text-align: center;">定 価 1 部 350 円 (本体 324 円)</p> <p style="text-align: center;">無断転載を禁じます。</p>	<p>発行責任者 笠 俊 司</p> <p>発行所 株式会社 I H I 技術開発本部技術企画部 〒135-8710 東京都江東区豊洲三丁目 1 番 1 号 電 話 (03) 6204 - 7092 <a href="http://www.ihico.jp/">http://www.ihico.jp/</a> E-mail : TY9776@ihico.jp</p> <p>印刷所 富士ゼロックスシステムサービス株式会社 ( 発 売 元 ) 〒135-0061 東京都江東区豊洲三丁目 1 番 1 号 電 話 (03) 6204 - 8422 F A X (03) 6204 - 8877</p>
---	---

# IHI 技報 第55巻3号 アンケート用紙

「IHI 技報」をご高覧いただき、ありがとうございます。年4回発行しておりますが、より内容を充実させ、分かりやすい技報にしたいと考えております。つきましては、お手数ですがご意見・ご感想をいただきたく、下記のアンケートにご回答いただければ幸いです。ご記入後は、FAXにてご返送くださいますようお願いいたします。

Q1. 本号の特集でどれが良かったですか？ 関心が持てましたか？

- ①社長が語る ②てくのすこーぶ ③我が社の看板娘 ④我が社のいち押し技術  
⑤こんなビジネスが面白い ⑥技術論文および解説 ⑦箸休め

Q2. 上記「Q1」で②～⑥を選択した方にお聞きいたします。その中でどの記事が良かったですか？面白かったですか？社名または製品名・技術名をご記入ください（複数回答可）

- ②てくのすこーぶ ( ) ( ) ( ) ( ) ( )  
③我が社の看板娘 ( ) ( ) ( ) ( ) ( )  
④我が社のいち押し技術 ( ) ( ) ( ) ( ) ( )  
⑤こんなビジネスが面白い ( ) ( ) ( ) ( ) ( )  
⑥技術論文および解説 ( ) ( ) ( ) ( ) ( )

Q3. 「IHI 技報」を読む頻度はどの程度ですか？

- ①毎号欠かさず読む ②ときどき読む ③ほとんど読まない

Q4. 上記「Q3」で「③ほとんど読まない」を選択した方にお聞きします。

その理由は何ですか？（複数回答可）

- ①興味のある記事がないから ②自身の業務に必要な記事がないから ③内容が難しすぎるから  
④内容がやさしすぎるから ⑤専門用語が多く内容が分かりにくいから  
⑥一冊のボリュームが多く読む時間がないから  
⑦読みにくい誌面構成だから（文字が小さい、写真が見にくいなど） ⑧入手方法が分からないから  
⑨その他 ( )

Q5. 上記「Q3」で「①毎号欠かさず読む」「②ときどき読む」を選択した方にお聞きします。

読む理由は何ですか？（複数回答可）

- ①あなたのかかわるビジネス・研究に直接関係する情報が載っているから  
②あなたのかかわるビジネス・研究には直接関係ないが、興味のある情報が載っているから  
③IHIグループの製品・技術について知りたいから  
④御社・または貴殿のお取引先などに紹介情報が載っているから  
⑤上司などから読むように指示されているから  
⑥その他 ( )

Q6. どのような「IHI 技報」ならもっと読みますか？

- ①もっと論文として権威ある内容であれば ②技術情報が分かりやすく書いてあれば  
③特集テーマが面白そうなら ④製品紹介が沢山あれば  
⑤IHI関係者の語り（歴史、開発苦労話、プロマネの思い、topの思い）が書いてあれば  
⑥その他 ( )

「IHI 技報」の送付先の登録・変更・取消について

登録 変更 取消（該当項目にレをつけてください）

該当事項をご記入のうえ、ご連絡くださいますようよろしくお願いいたします。

住 所：〒

会社/学校名： 所属名： 役職名：

氏 名： TEL：

封筒表面の宛名下に印刷されている場合 コード No.：

お手数ですが、アンケートにご記入の上、FAXにてお送りください。ご協力ありがとうございます。

株式会社 IHI 技術開発本部 技術企画部行

FAX : 03 - 6204 - 8650

# 株式会社 I H I

## 支 社

北海道支社	〒060-0002 北海道札幌市中央区北二条西4-1(北海道ビル)	電話(011)221-8121 FAX(011)221-5229
東北支社	〒980-0014 宮城県仙台市青葉区本町1-1-1(三井生命仙台本町ビル)	電話(022)262-3688 FAX(022)227-6252
秋田オフィス	〒010-0001 秋田県秋田市中通2-3-8(秋田アトリオンビル)	電話(018)835-8815 FAX(018)835-8816
福島オフィス	〒963-8005 福島県郡山市清水台2-13-23(郡山第1ビル)	電話(024)938-0131 FAX(024)938-0145
新潟オフィス	〒950-0087 新潟県新潟市中央区東大通1-3-10(三井生命新潟ビル)	電話(025)245-0261 FAX(025)243-5474
北陸支社	〒930-0004 富山県富山市桜橋通2-25(富山第一生命ビル)	電話(076)441-4808 FAX(076)441-3196
中部支社	〒450-0003 愛知県名古屋市中村区名駅南1-24-20(名古屋三井ビルディング新館)	電話(052)565-7700 FAX(052)565-7709
静岡オフィス	〒420-0853 静岡県静岡市葵区追手町2-12(静岡安藤ハザマビル)	電話(054)255-8961 FAX(054)255-7137
浜松オフィス	〒430-7712 静岡県浜松市中区板屋町111-2(浜松アクトタワー)	電話(053)457-5611 FAX(053)457-5613
豊田オフィス	〒471-0833 愛知県豊田市山之手4-46(三井住友海上豊田ビル)	電話(0565)29-2331 FAX(0565)29-7279
関西支社	〒541-0053 大阪府大阪市中央区本町4-2-12(東芝大阪ビル)	電話(06)6281-2075 FAX(06)6281-2011
中国支社	〒730-0051 広島県広島市中区大手町2-7-10(広島三井ビル)	電話(082)246-2280 FAX(082)246-2100
山口オフィス	〒745-0036 山口県周南市本町1-3(大同生命徳山ビル)	電話(0834)31-8100 FAX(0834)32-2456
四国支社	〒760-0023 香川県高松市寿町2-4-20(高松センタービル)	電話(087)821-5031 FAX(087)822-7893
九州支社	〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通2-1-82(電気ビル北館)	電話(092)771-7241 FAX(092)751-6416
沖縄オフィス	〒900-0015 沖縄県那覇市久茂地2-14-3(朝日生命沖縄ビル)	電話(098)862-7758 FAX(098)863-7122

## 工 場

相馬第一工場	〒976-0001 福島県相馬市大野台1-2-1	電話(0244)37-3712 FAX(0244)37-3731
相馬第二工場	〒976-0001 福島県相馬市大野台1-2-3	電話(0244)37-3712 FAX(0244)37-3731
瑞穂工場	〒190-1297 東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229	電話(042)568-7000 FAX(042)568-7012
横浜工場	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2717 FAX(045)759-2603
愛知工場	〒478-8650 愛知県知多市北浜町11-1	電話(0562)31-8000 FAX(0562)31-8010
相生工場	〒678-0041 兵庫県相生市相生5292	電話(0791)24-2206 FAX(0791)24-2268
相生製造部	〒678-0041 兵庫県相生市相生5292	電話(0791)24-2701 FAX(0791)24-2692
呉第二工場	〒737-0027 広島県呉市昭和町2-1	電話(0823)26-2105 FAX(0823)26-2170

## 研究所 (技術開発本部)

基盤技術研究所	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2227
生産技術センター	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2225
総合開発センター	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2226
インキュベーションセンター	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2224
R&Dテクノセンター	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2311

## 事務所

本社	〒135-8710 東京都江東区豊洲3-1-1(豊洲IHIビル)	電話(03)6204-7800
横浜エンジニアリングセンター (1、2号館)	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2002
昭島事務所	〒196-8686 東京都昭島市拜島町3975-18(IHI昭島ビル)	電話(042)500-7250
相生総合事務所	〒678-0041 兵庫県相生市相生5292	電話(0791)24-2206
呉総合事務所	〒737-0027 広島県呉市昭和町2-1	電話(0823)26-2105

## 海外事務所・海外支社

Paris, Alger, Moscow, Bahrain, New Delhi, Bangkok, Kuala Lumpur, Hanoi, Jakarta, Beijing, Shanghai, Taipei, Seoul, Singapore



低燃費

20% ダウンサイジング 30%

トルクあるいは出力が同じレベルの排気量1.4~1.6Lのターボチャージャー装着エンジンと、排気量2.0Lのターボ無しエンジンを比較した場合、ターボチャージャーを装着したエンジンは、燃費を約20%改善することができます。その結果、CO2排出量も削減が可能となります。

※上記の数値は、2011年10月現在における自動車メーカーのカタログ仕様を基に算出されています。実際の燃費は実走行状況により異なります。  
 ※2011年10月現在、国内市場で販売されている乗用車です。  
 ※燃費改善効果は、運転条件により異なります。また、燃費改善効果は、燃費改善効果の大きい車種に比べて小さくなる場合があります。  
 ※上記の数値は、自動車メーカーのカタログ仕様を基に算出されています。実際の燃費は実走行状況により異なります。

エネルギー回収効果

10%

自動車のエンジンから排出される排気ガスは高温・高圧で、エネルギーをそのまま車外に捨てています。ターボチャージャー装着車は、排気ガスでターボチャージャーのタービンを駆動させるので、エネルギーの10%を有効に回収する効果があります。

※上記の数値は、ターボチャージャーを駆動しているエンジンとターボ無しエンジンを比較した結果です。  
 ※ターボチャージャーを駆動したエンジンとターボ無しエンジンの燃費差が約10%です。



ターボチャージャー

排ガスの  
クリーン化

エネルギー  
回収効果

4つのいいこと。

走りやすさ  
低回転で高トルク

排ガスのクリーン化

90%

過去10年で、ターボチャージャーを装着したディーゼルエンジンから排出されるPM(粒子状物質、いわゆる黒いすす)は、1/10に削減されています。粒子状物質低減のため、ディーゼル車には、ターボエンジンが広く使われています。

※上記の数値は、自動車メーカーのカタログ仕様を基に算出されています。実際の燃費は実走行状況により異なります。  
 ※PMは、PM10とPM2.5に分けられ、PM2.5はPM10の約1/10に削減されています。



走りやすさ・低回転で高トルク

1500 rpm

一般的にターボ無しエンジンでは、最大トルクを得るには4000回転以上にアクセルを踏み込む必要がありますが、ターボチャージャー装着エンジンは、1500回転程度から最大トルクが発揮されます。これにより、アクセルの軽い踏み込みでも楽に運転できるのと同時に、エンジンを大きく吹かさず運転が可能になります。

※上記の数値は、燃費差によるものです。



IHI