



IHI

Realize your dreams

IHI技報

Journal of IHI Technologies



2016

Vol.56 No.1

新技術・新製品・新事業特集号

ISSN 1882-3041

IHI技報 第56卷第1号 平成28年

This document is provided by JAXA.

◆巻頭言 Opening Essay

新技術・新製品・新事業特集号の発刊にあたって……………技術開発本部 副本部長 田中 康仁 1
 Message for the Special Issue of New Technologies, New Products and New Businesses

◆センター長が語る Message

技術開発をベースとした新製品、新サービスの創出を目指す…技術開発本部 インキュベーションセンター センター所長 藤森 俊郎 2
 Targeting the Start-Up of New Products and New Businesses Based on R&D Incubation

◆てくのすこーぷ Techno Scope

てくのすこーぷで視た制振装置の発明……………知的財産部 6
 A Patent on Mass Damper System for Large Structure

◆我が社の看板娘 Products

“ 浮いて逃げる ” ことで命を守る……………株式会社 IHI 8
 IHI Tsunami LifeBoat : Survive by Flotation

交差点をモニターし運転者に注意喚起する……………株式会社 IHI 10
 3-D Laser Radar Playing a Central Role in Intelligent Transport Systems

やさしい音で海底資源を探す……………株式会社 IHI 14
 IHI Marine Seismic Vibrator

水中の二酸化炭素を直接検出……………株式会社 IHI 16
 Direct Detection of Aqueous CO₂

◆我が社のいち押し技術 Technologies

無人ロボットで海洋フロンティアに挑む……………株式会社 IHI 18
 Explore the Ocean Frontier by Unmanned Maritime Systems

◆こんなビジネスが面白い Business

スマート農業でスイートなトマトを……………株式会社 IHI スター 22
 IHI Smart Cultivation System

あなたのビルの非常用発電機は大丈夫ですか?……………株式会社 IHI ジェットサービス 24
 Mobile Load Device for Emergency Generators

◆著休め Essay

雨と雪とオノマトペ……………技術開発本部 内田 博幸 26
 Have You Ever Heard the Sound of Snow?

◆技術論文および解説 Technical Papers

ビジネスジェット機向け GE Passport 20 エンジンの開発……………半場 文浩, 土屋 直木, 守屋 信彦, 西川 秀次 28
 Development of GE Passport 20 Turbofan Engine for Business Jet Aircraft

USV を経由して UUV からソナー画像をリアルタイムデータ伝送する試験……………鈴木 俊光, 須藤 拓, 小林 陽, 越智 文俊, 鈴木 尚也, 蒲 英樹, 北島 仁 34

— 並列航走による水中リアルタイムデータ伝送システム (URCS) の開発 —
 Experiment to Investigate the Real-Time Data Transmission of Sonar Images from a Cruising UUV to a Distant Support Vessel via a USV
 — Development of an Underwater Real-Time Communication System (URCS) using Parallel Cruising —

再生医療の実現化に向けた、iPS 細胞自動大量培養装置の開発……………坂井 慎一, 石井 浩介, 福地 泰彦, 藤田 穰, 谷口 英樹 41
 Development of iPS Cell Automated Mass-Culture Machine for Regenerative Medicine

100 kW 級中型バイナリー発電装置「 Heat Innovator[®] 」によるエンジン排熱の回収……………頼 泰弘, 柴田 成康, 和田 大輔, 三好 一雄, 秋吉 亮 47
 Waste Heat Recovery of an Engine Using the 100 kW ORC “ Heat Innovator[®] ”

海洋貯留モニタリングに向けた溶存 CO₂ 検出技術に関する研究……………佐藤 裕, 秋久保 一馬 51
 Study on Aqueous CO₂ Detection to Monitor the Potential Leakage of CO₂ Stored in the Ocean

プレキャスト PC 床版を用いた床版取替工事……………池上 浩太郎, 吉原 直樹, 井野 耕志 56
 — 複雑な線形・形状を有する「 綱木川橋 」への適用 —
 Replacement of Existing RC Slab with Precast Prestressed Concrete Slab

新技術・新製品・新事業特集号の発刊にあたって

技術開発本部

副本部長

田 中 康 仁

新聞やテレビ、インターネットなどで「新製品」や「新技術」、そして「〇〇会社が新事業を開始」といったニュースを見掛けます。新技術というと最近では人工知能や自動車の自動運転技術が注目を集めています。新製品では人共存型ロボットやモバイル端末、新事業では海外で話題を集めているUBER（ウーバー、配車サービス）などを思い浮かべます。これら普段何気なく目や耳にしている言葉ですが、いずれもそれまでの社会や生活を変える力をもったもので、夢や未来を感じてワクワクします。



IHI グループはものづくりを基本とする企業であり、コーポレート・メッセージの“Realize Your Dreams”のとおり、新技術や新製品開発、新事業で社会の夢を実現しています。私も入社以来、主に新製品開発に取り組んできましたが、最近は数十年前と比べて開発のスピードや対象製品、市場が大きく変化しています。本特集号でも従来のIHIグループになかった新しい事業分野や技術が紹介されており、読者の皆さまにもIHIの変化を感じ取っていただけるものと思います。

社会環境がグローバルに、かつ急速に変化するなか、新技術や新製品、新事業をタイムリーに実現することは従来にも増して難しい課題です。どうすれば実現できるのか？最新の技術や情報を使いこなし、粘り強く取り組むというのはもちろんのこと、注目すべきキーワードの一つに、「サプライズ：驚き」が挙げられます。例えば三次元プリンター技術やApple社のiPhone、オンラインショッピングなどは、これまでの製造方法や業務プロセス、生活様式を変えた素晴らしい技術や事業です。私も初めて知ったときの驚き（こんなことができるのか！）をはっきりと覚えています。このように、お客さまが技術や製品を手にしたときの期待や驚きが大きければ大きい程、社会への拡がりも大きいでしょう。そのようなサプライズを生み出すためには、何事もすぐに無理と決めつけずに、「できたら良いな」と思われるような目標に取り組む発想や柔軟な姿勢をもつことが実現のスタートであり、大事なことだと思います。

2015年は1989年に公開のアメリカ映画「Back to the Future Part2」で想定された30年後の未来社会の年でした。映画の中の未来製品でもすでに実現できているものも多くあり、荒唐無稽と思えることも、努力と着想次第では不可能ではない気持ちにさせられます。映画では未来から現在に戻ってきた主人公が、将来に大きな影響を与える判断を下すというエンディングでしたが、さて私たちは未来に向けて今どのような驚きをもった新しいものを生み出すでしょうか。

技術開発をベースとした新製品、 新サービスの創出を目指す



株式会社 IHI 技術開発本部
インキュベーションセンター センター所長

藤森 俊郎

グローバル化、人口増大、温暖化など地球規模の課題解決には、従来の延長では限界が見え、持続可能な社会を実現する新たな技術、製品、サービスが求められています。IHI は、ものづくりを核とした企業活動により時代のニーズに応じて数々の新製品を世に出し、社会の発展に貢献してきました。その DNA を発展させるべく、技術開発をベースとした新製品、新サービスの開発をより推進、加速させるために 2014 年にインキュベーションセンターを設置しました。

技術開発本部は、IHI グループの技術開発の中核として、既存事業の発展に必要な技術の高度化や次世代技術に取り組み、この活動は、今後も中核となるものです。一方、急激な技術革新や先に述べたような大きな課題に対しては、さらに大きな変革とスピード

が求められます。これまでの技術開発は、事業部が受け取ることを前提に進めてきましたが、新分野においては、必ずしも既存事業の延長にたく、技術開発以降の製造、サービスなどのバリューチェーンの構築まで必要となります。

取り組むプロジェクトは特定の分野とせず、基礎技術が確立され、事業化を目指した試作量産、大規模実証、フィールド実証段階のものを選定します。プロジェクトリーダー以下開発のコアとなるメンバーを専任させ、意思決定を迅速に行えるようフラットな組織として、開発スピードを高めています。また、技術開発本部内で進めることでさまざまな分野の専門家の支援を常に受けることができ、多くの技術分野にまたがる開発を比較的小規模な体制で進めることができま

す。一方、新分野では当然でもありますが、IHI 内に知見、事業リソースがない場合が多く、スピードある開発を進めるためには積極的に社外との連携、技術導入、人材獲得を進めます。また、技術開発本部は最終ユーザーとなる社外のお客さまから直接要望を聞く機会が少なく、ニーズをつかみきれなかったとの反省から、企画、マーケティングを行うスタッフを専任させて、早期に試作機を提供するなどして、お客さまの情報を開発に反映させるようにしています。このように、既存事業との距離感を意識し、オープンイノベーションの手法を最大限取り入れながら、スピードをもった開発を進めてきました。以下に取り組んでいる活動の一部をご紹介します。

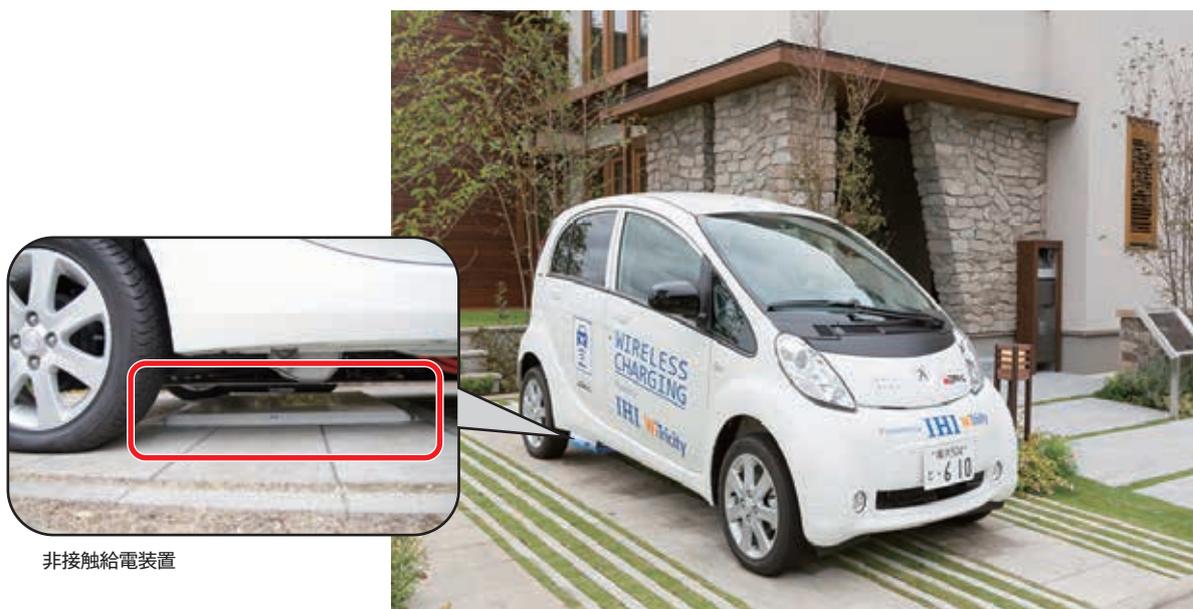
自動車向け非接触給電システム

CO₂ 排出削減をはじめとする環境への配慮のため、電動化がますます多様な製品、分野に広がりますが、蓄電池の容量には制限があり、特に移動体などでは給電技術が重要となります。電気自動車 (EV) やプラグインハイブリッド自動車 (PHV) は、アメリカカリフォルニア州の ZEV (Zero Emission Vehicle) 規制に代表される排出ガス規制の強化に伴い、2020 年には年間 100 万台以上の需要が予測され、非接触給電技術は EV、PHV の利便性を高め、普及促進につなが

るものとして開発に取り組んでいます。

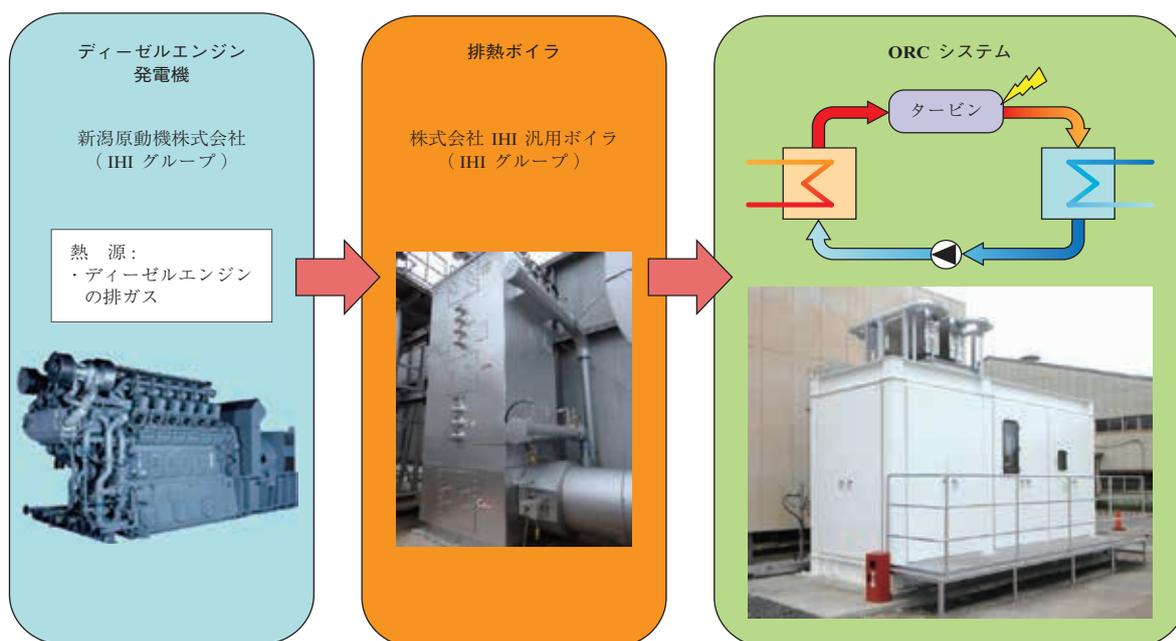
非接触給電技術は、向かい合ったコイルの間で空間を越えて電力を伝えることができます。現在の電気自動車はケーブルをつないでバッテリーを充電しますが、非接触給電を用いれば、車外に出てケーブルをつながなくても、充電スポットに停車するだけで充電が可能となります。

磁界共鳴方式給電に関する基本技術を WiTricity 社 (アメリカ) より導入し、IHI で独自のコイル設計、制御技術の開発を進め、90%以上の高効率給電を達成し、2010 年代後半の製品化を目指して開発を進めています (下図)。コイルの設計には電磁場解析技術、電力制御にはパワーエレクトロニクス・制御技術、コイルの耐久性のためには材料・構造・熱設計技術などの技術開発本部の有するさまざまな技術を総合しています。一方、IHI では自動車向け部品製造はターボチャージャーを除くと経験が少ないため、特に電気回路、制御が中心となる装置の量産化については、社外連携のほかに経験のある技術者の採用によりその知見も活かしながら、迅速に開発を進めています。この技術は、立体駐車場など IHI グループの製品や自動運転技術と組み合わせることで、さまざまな新製品、新サービスにつながり、総合重工企業としての強みを活かせると考えています。



非接触給電装置

非接触給電試験用 電気自動車 (EV)
写真提供: 三井ホーム株式会社



ORC 発電装置によるディーゼルエンジン排熱発電システム

低温熱源による発電システムの開発

わが国は 2030 年の温室効果ガス排出量を 2013 年比 26%削減することを国際的に約束しており、再生可能エネルギー導入に加えてさらなる省エネルギーが求められています。従来利用されていない 200℃以下の低温熱源は、産業プロセスや地熱などに多く賦存しており、これを熱源とする有機ランキンサイクル (ORC) 発電技術の実用化を進めています。ORC は、通常の汽力による火力や原子力発電のように、ポンプで加圧された液体を熱源により蒸発させ、その蒸気によりタービン発電機を駆動し、凝縮器で冷却して液体に戻すランキンサイクルで、代替フロンやアンモニアなど水よりも沸点が低い流体を用いることで、低温の熱源でも発電することが可能となります。

産業排熱のうち、コージェネレーションなどに利用されるガスエンジン、ディーゼルエンジン排熱による発電システムの開発に取り組んでいます。近年、エンジンは高膨張サイクルや希薄燃焼により効率が 40%後半に向上しています。一方、これに伴い排ガスの温度は低下し、ボイラで蒸気をつくる以外の新たな活用方法が期待されます。ORC はエンジン排熱やエンジン冷却水の熱で発電が可能であり、高効率内燃機関と合

わせた総合発電効率は 50%を超えることが可能です。ORC タービン発電機は、磁気軸受を採用したタービン発電機をベースに、用途に応じて冷媒やタービン翼を設計することで、多様な温度条件に適合するシステムの提供を目指します。磁気軸受によるオイルフリー化で、タービン発電機は摺動による摩擦、摩擦がなく機械損失をゼロにできるほか、発電機のメンテナンスが非常に簡便となります。低温熱利用は ORC 発電以外の要素も多く、熱プロセス全体をマネジメントすることが必要です。各種プラントのエンジニアリング、建設を手掛けてきた IHI プラント建設株式会社と協力して、工場排熱や地熱などの熱を利用したシステム開発をスピーディーに進めています。

微細藻類による燃料製造技術

カーボンフリー燃料として、食糧と競合しない非可食バイオマスである微細藻類を用いたバイオジェット燃料の製造技術の実用化に取り組んでいます。微細藻類は CO₂ と太陽光により水中で増殖する微生物であり、パームヤシなどの陸上作物と比べて単位面積あたりの生産量は数十倍高く、第 2 世代バイオマス原料として注目されています。ジェットエンジンを代替する技術は今のところなく、CO₂ 削減には燃料をカー

ポンプリー化にすることが必要で、バイオジェット燃料は将来大きな需要が見込まれています。

IHI は、神戸大学の榎本平教授が発見し、自然環境で品種改良を進めた高速増殖性と高い油含量を併せもつ、微細藻類ポツリオコッカス・ブラウニーからバイオ燃料を大量生産する技術を開発しています。微細藻類からバイオ燃料を製造するには、培養、収穫、乾燥、抽出、製造にまたがる一連のプロセスの開発が必要です。国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援をいただき、低コストで大量に培養が可能な屋外開放系での培養技術の開発に取り組み、2015年にはIHI 鹿児島事業所内の1500m²開放型培養池（下図）の試験で、世界トップクラスのオイル生産性を実証しています。また、培養から油抽出までのプロセスでさまざまな技術開発に取り組み、生産コストの大幅な削減に成功しています。さらに大規模な培養に向けて、IHI グループ内の事業企画やプラントエンジニアリング部門などの協力を得て開発を進めていきます。

リチウムイオン電池システムの適用拡大

個々の技術開発による製品、事業化は始まりであり、そこから周辺に拡がりをもつことがIHI 事業としての成功の姿です。事業体に主体を移行させた後も、点としての事業から面そしてゾーンとして事業領域が広がるよう事業体と協力していくことが不可欠です。例えば、リチウムイオン電池システムは、自動車以外に鉄道、船舶、航空機、運搬装置など多様な分野に拡がり



微細藻類の1500m²開放型培養池



IHI 製リチウムイオン電池システムを搭載したハイブリッドタグボート「翼」

つつありますが、適応される対象により電池に求められる性能や使用環境はさまざまです。インキュベーションセンターではタグボートへの国内初の適用など事業部と協力して、新たな適応先を開拓しています。

今後に向けて

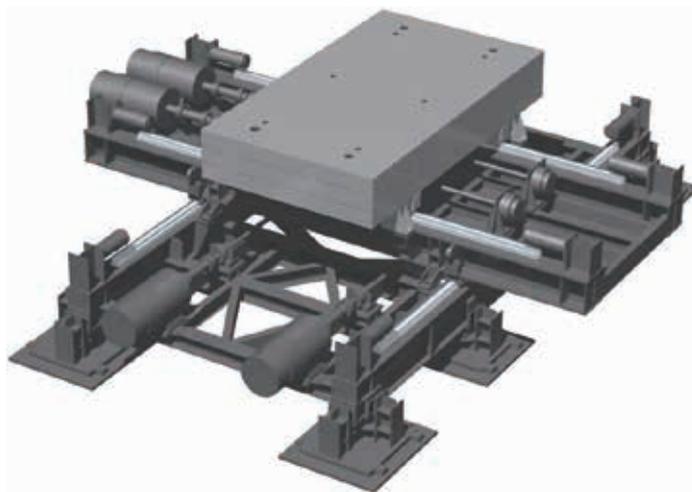
革新的な新事業、新サービスがIT分野を中心に次々と生み出され、それ以外の分野へも広がりつつあります。アメリカではその担い手はベンチャー企業を中心ですが、日本ではIHIのようなものづくり企業に意欲と潜在能力をもった人材が集まっています。技術開発から製品化、事業化の谷を越えるには多くの課題があり、プロジェクトリーダーの強い意志と高いマネジメント能力が必要となります。新分野や大きな変革をもたらす新事業では、経験が必ずしも役立つものではなく、また一度で身に付くものではなく、バイタリティーがあり失敗のできる若いうちに挑戦し、起業家精神をもつ人材の育成を図っていきます。IHI が引き続き社会の要請に応える、技術開発をベースとした新しい製品、サービスを提供し続けられるよう、挑戦と努力を継続していきます。

てくのすこーぷで見た制振装置の発明

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、ビルや橋、船の揺れを減らす装置の特許について紹介します。

(特許第 4857829 号)



フル・アクティブ式制振装置

制振装置とは

高層ビル、橋梁、船舶など、私たちの周りには巨大構造物があふれています。そのなかには、IHI が建造に関わったものも少なくありません。そういった構造物は、常に風、波などの自然からの外力にさらされています。特に、高層ビルでは風による振動の周期が長いため、中にいる人間が船酔いのような不快感や恐怖感を覚えることもあります。このような状況から構造物を守るため、また、構造物の中で人間が快適に過ごすため考案されたさまざまな技術の一つに制振装置があります。

制振装置の原理は、地震などの振動が伝わらないように、建物を柔らかく支持する免震技術とは違って、構造物の振動をおもりや流体などの質量が外力を打ち消すように動くことによって低減させることです。制振装置には質量が自然に動いて振動を低減するパッシブ式（受動式）と、質量をアクチュエーターという

機器で積極的に動かすことで振動を低減するアクティブ式（能動式）があり、IHI 製品は後者が中心です。

IHI は早くから建物に対しての制振装置の開発に取り組み、1988 年にはすでにガイドレール上のおもりを動かす方式の特許を出願しています（特許第 2668990 号）。当時、世の中の制振装置の多くはセンサーで振動を検出して、おもりを動かす力を算出して制御することで、構造物の振動を低減する方法を採用していました。

地震でも止まらない制振装置の開発

地震などの大きな振動や長い周期の揺れに対しては、おもり（可動マス）が動く距離を大きくすることが必要になりますが、可動マスを動かす力を算出する制振装置では、直接動きを制御できないため、揺れを止めるのに必要な距離が制振装置内での可動範囲を超えてしまうという問題がありました。その場合、ガ



イドレールにストッパーを設け、可動マスがストッパーに当たりそうな場合には制振装置を止める、ないしは、センサーで検出した建物の振動レベルに応じて、比較的小さいレベルでも装置を停止させるなどの対処法が行われていたため、大きな地震などの場合には制振装置が止まっていました。1995年の兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）や、2011年の東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）では、国内のアクティブ式制振装置の大半は停止したといわれています。

IHIの制振装置開発において転機となったのは、2004年の新潟県中越地震でした。新潟県中越地方を震源とするマグニチュード6.8のこの地震では68人が死亡し、家屋の全半壊が1万7000棟に上る大きな被害をもたらしましたが、このときに、首都圏では長い周期で建物が大きく揺れる現象が観測されました。IHIではこの現象から、長周期の揺れに対応できる制振装置の必要性に着目したところ、お客さまからもこのような地震でも制振装置を止めないようできないか？との要望もあり、長周期の大きな揺れにも対応できる制振装置の研究が始まりました。

IHIが着目したのは、制御の方式でした。構造物の振動から構造物に働く力を計算し、その力を基にアクチュエーターで可動マスを動かす力を計算して制御する方式に対して、IHIは開発当初から、可動マスの動き（変位）を制御する方式を採用していました。具体的には、構造物の振動を打ち消すような変位を計算し、可動マスの実際の動きを検出しながら、与えた変位指令に追従するようにフィードバック制御を行って可動マスを駆動する方式です。これに制御の強さを振動に応じてリアルタイムで変える制御アルゴリズムを組み合わせたところ、日常の風揺れのような小さな振

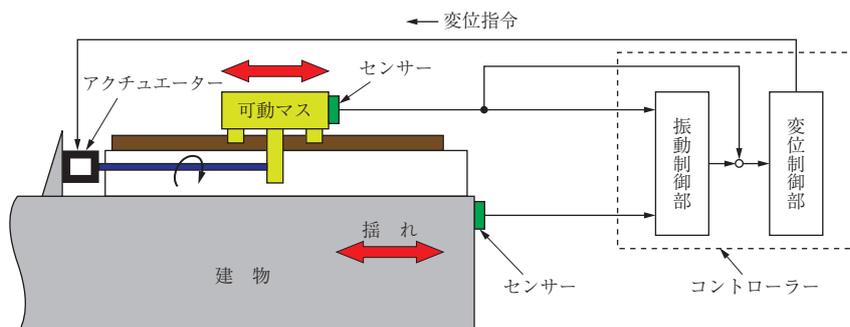
動から、地震の大きな振動まで任意に制御できるという優れた結果が得られました。さらに、この方式により地震の後に残る構造物の後揺れも早く抑えられるという効果も得られたのです。この制振装置の基本となっているのが特許第4857829号です。この方式を採用した制振装置はお客さまにも好評で、2011年の東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）では、IHI製の制振装置は1台も停止せず稼働を続け、優れた性能が実証されました。

制振装置のさらなる進歩

現在、制振装置は株式会社IHIインフラシステムの重要な製品となっています。イギリスのロンドン・ヒースロー空港の管制塔やトルコの「イズミット橋」のほか、国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）の海洋地球研究船「みらい」にも採用され、ビル、船舶、橋梁、クレーンなど、さまざまな構造物に対応した製品を製造しています。

また、可動マスの駆動にリニアモーターを採用して効率を上げる（特開2015-190572号）、可動マスの減速時に得られる電力エネルギーをキャパシターに蓄え、エネルギーを再利用する（特許第4788908号）など、新たな事業分野を開拓すべく現在もさまざまな技術開発を進めています。

（文責：知的財産部）



フル・アクティブ式制振装置の機構と制御系の構成

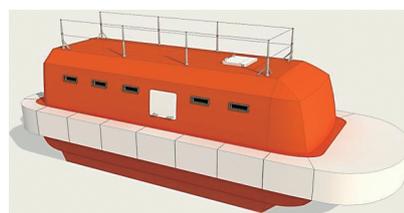
“ 浮いて逃げる ” ことで命を守る

従来の堅牢性^{ろう}と乗員安全性に 高い居住性も備わった新モデルが完成 巨大地震に備える津波救命艇

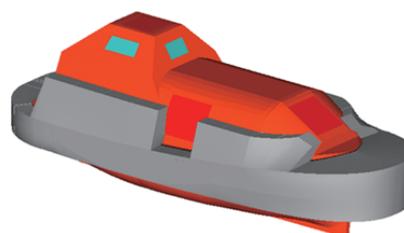
巨大地震発生後、津波の被害を避けるためには 5 分以内に高台や津波避難タワーなどに避難することが肝要だ。しかし、近くに高台や設備がない地域や幼児、高齢者など避難弱者が多い施設ではどのように対策すべきか。その打開策の一つが“浮いて逃げる”ことを想定した津波救命艇だ。2013 年に開発した 1 号艇を改良し、完成度を高めた 2 号艇について紹介する。



試作艇



2 号艇



1 号艇

国のガイドライン策定にも関わった 津波救命艇のパイオニア

東日本大震災から間もなく 6 年目を迎えるが、地震と津波のすさまじい破壊力の記憶は薄れようもない。今後の巨大地震による津波の高さは日本沿岸到達時に最大 30 m を超えると予測されている。そんななか、2012 年、国土交通省四国運輸局が中心となり、津波対応型救命艇の開発が始まった。救命艇の利点は、① 津波に浮くことが前提であるため、波高を想定して設計・設置する必要がない ② 通常の活動場所に隣接して設置することが可能 ③ 津波避難ビルやタワーなどが建設できない場所にも設置可能 ④ 将来避難計画が変わった際などには容易に移設できる、など

である。

IHI グループでは、もともと大型客船やタンカーなどの救命艇を製造していたことからこの国家プロジェクトに応募し、採用された。津波救命艇のガイドライン策定にも加わり、そのガイドラインを十分上回る安全性をもつ 1 号艇を 2013 年に完成させた。

津波救命艇のガイドラインの主な仕様としては、① 本体強度は正面衝突 10 m/s、側面衝突 5 m/s において形状を維持し、強度を損なわないこと（正面衝突速度 36 km/h に耐える）② 艇本体に作用する加速度が 15 G 以下であること ③ 定員分の人が乗り、装備品を満載した状態で沈まず、十分な転覆復原性を有すること、などが挙げられる。津波が来ると設置場所から浮き上がり、海上保安庁などの救援システムに組

み込まれている EPIRB（非常用位置指示無線標識装置）のスイッチを入れれば位置情報が衛星に発信され、救助が来るという仕組みだ。

IHI の技術の粋を結集して衝突安全性を確保

IHI の津波救命艇はこれらのガイドラインをカバーしつつ、独自の仕様で堅牢性と安全性を確保しているが、2015 年秋に発表した 2 号艇では、さらに工夫が加わった。まずは、津波避難のポイント、すなわち「素早い避難」を確実にすることだ。出入り口を地面から約 1 m と低くし、ドアを大きくすることにより、素早く乗り込むことが可能になった。これは、高齢者、障害者、移動に不自由のある病人、けが人、子どもにも配慮し設計した結果だ。艇内の段差は入り口部分で約 40 cm、座席の並ぶ室内はフルフラットになった。また、艇内の空間は天井高、幅ともに広がった。特筆すべきはトイレで、使用者と介助者が入れるだけの空間を確保。津波救命艇では、海上で救助を待つ可能性も考慮されるが、定員 25 名×7 日分の水、食料および医療品などが積み込めるスペースを十分確保し、一般的に居住性が向上した。

ガイドラインでは正面と側面の衝突耐性のみが規定されているが、実際の津波では、あらゆる方向から連続的な衝撃を受けることが想定される。IHI の津波救命艇では先のモデルですでに後方にも緩衝材を装着していたが、2 号艇では後部にユーティリティールームを設けたことで、万一後方から想定以上の衝撃を受けても、この部分が衝突を吸収する（緩衝スペースになる）ことで座席部分に影響を与えない構造にした。



2 号艇内

さらに、乗員保護に関しては、シートベルトのトップメーカー、タカタ株式会社と共同開発した特別なベルトで身体を 4 点で保持。座席は、垂直ではなく 10 度傾斜させることで衝撃時の腰のずれが最小限になるよう設計した。ヘッドレストは当初から、リバウンドの衝撃を受けても脳への障害がないよう、頭部とヘッドレストの距離を計算し、形状、マットの素材、厚さを検討。さらに、シートベルト、座席、ヘッドレストが総合的に身体の安全を確保するかどうか衝突実験を行って検証している。

2 号艇は、外観も大きく変更された。水の抵抗を少なくするための曲線的な船型や船底構造は必要ないため、バスのような箱型に近い形状に。この結果、救命艇自体が自立し、設置のための架台が不要になりコスト低減にもつながった。

津波からの避難が困難と心配される施設、地域から注目を集める

船体の堅牢性、乗員の安全性、居住性を備えた IHI の津波救命艇は、自治体および沿岸にある事業所などから注目されている。例えばある事業所では、海上 1 km 程沖に突き出た細い栈橋の先にモニタリング施設があり、20 名ほどが常駐している。救命艇により非常時に孤立する心配が軽減する点を評価され、設置が決まった。また、近くに高台のない港湾施設や沿岸地区の幼稚園・保育園や病院、老人施設などからも多くの関心を寄せていただいている。

IHI グループには津波避難タワーを手掛ける部署もある。数台の救命艇をタワー付近に設置すれば避難方法の選択肢を増やすことができるため、タワーとの併用を勧める提案も積極的に行っている。

2015 年 4 月、「防災・減災」、「インフラ老朽化」という日本の社会基盤の重要な課題解決を担うべく、レジリエンスプロジェクト部は設置された。津波救命艇をはじめ、人々の生活と命を守る製品の開発、普及を今後も目指していく。

問い合わせ先

株式会社 IHI

社会基盤セクター レジリエンスプロジェクト部

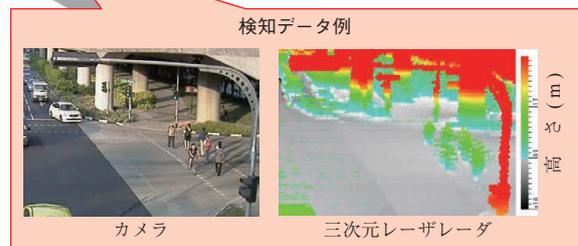
電話（03）6204-7315

URL：www.ihico.jp/

交差点をモニターし 運転者に注意喚起する

高度道路交通システムの中核を担う 三次元レーザレーダは実機適用目前！

自動車・道路・人との間で情報をやりとりし、自動車事故の防止をはじめ渋滞の回避、環境対策などさまざまな課題解決を目指す「高度道路交通システム」。なかでも IHI の三次元レーザレーダは、交差点での事故防止の実証実験を国内やシンガポールで重ねており、実機適用は目前だ。



安全運転支援システム構成例

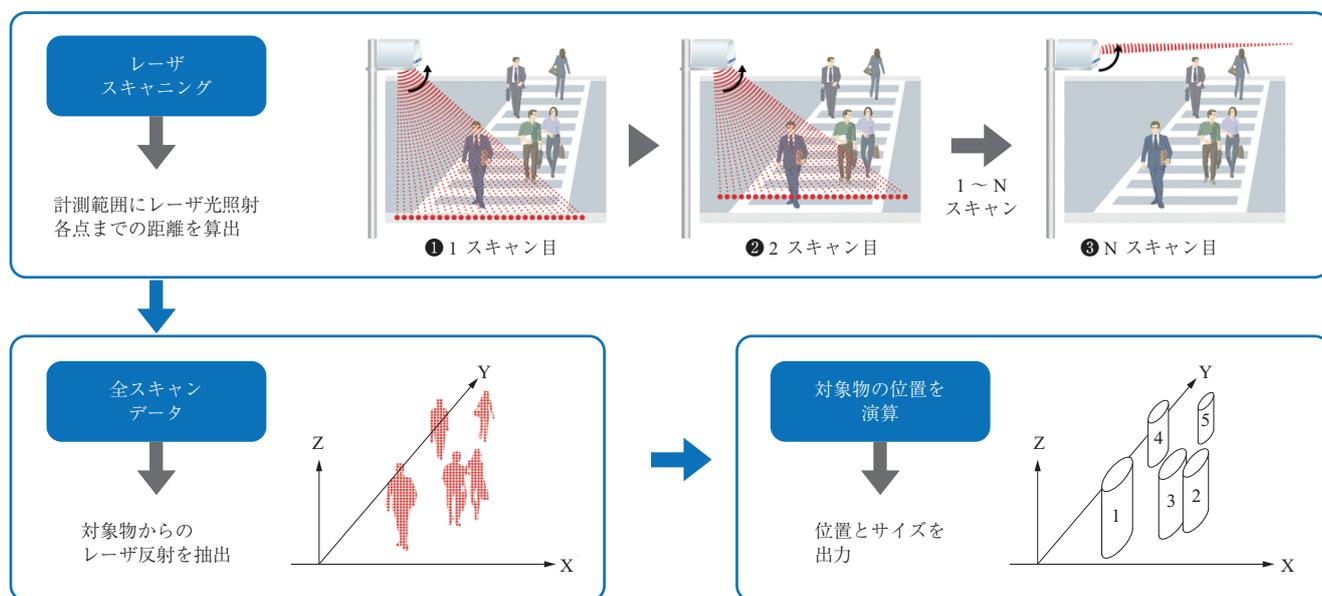
交差点での道路状況を車両に伝える眼

高度道路交通システム (ITS: Intelligent Transport Systems) と呼ばれるものには、渋滞や工事による車線規制などの情報を車載カーナビゲーションに送信し、ドライバーに伝える道路交通情報通信システム (VICS: Vehicle Information and Communication System), 有料道路の自動料金収受システム (ETC: Electronic Toll Collection System), 安全運転支援システム (DSSS: Driving Safety Support Systems) など幾つもの種類がある。DSSS は、道路に設置された光ビーコンから危険要因の情報が受信機能を備えた車載器 (VICS 対応カーナビ) に送信され、カーナビの画面上に簡易図形を表示し、受信音を発することによりドライバーに情報を伝えるシステムである。ゆとりある運転環境を作り出すことによって、交通事故を防止することを目的としており、警察庁主導で 2011 年 7 月から実運用が開始されている。この従来型 DSSS に対して、自車の走行状態に応じて車載器が情報提供の要否を判断する次世代 DSSS の開発や社会実験が、一般社団法人 UTMS 協会の活動などを通じて産学官連携で進められている。IHI が開発した三次元レーザレーダ (以下レーザレーダ) は、主に交差点近傍の安全運転支援に寄与する中核的な機器として採用されている。

一方、省庁横断型国家プロジェクトとして、内閣府が主導する「戦略的イノベーション創造プログラム」

の「自動走行 (自動運転) システム」の一環で、同様の交差点近傍情報を自動走行車両に伝える眼の役割を担うセンサーとしても社会実験が行われている。「自動走行」を実現するためには、まず、“車対車”すなわち車同士の情報を車に伝えて適切な制御を促すシステムが必要である。例えば、追突を避けるために車間距離が一定以下になったら自動的にブレーキが作動するシステムはすでに実用化されている。さらに、“道路対車”すなわち道路の情報を車に伝えて適切な制御を促すシステムも必要である。例えば、交差点に進入する車をどのように動かすか判断するシステムである。後者のシステムの核となる交差点近傍の車両や、歩行者の情報を計測して提供するのが IHI のレーザレーダである。

IHI のレーザレーダは、踏切内の障害物検知およびその情報を列車に知らせるシステムとして先んじて実用化されており (IHI 技報 Vol. 48 No. 1 pp. 1 - 6 「三次元レーザレーダ式踏切障害物検知装置の実用化」参照), 当該用途では日本国内での設置数が 1300 台を超えている。先日も、イタリア国鉄向けレーザレーダの 127 台設置が決まり、日本国内外合わせて年間 200 ~ 300 台の納入で推移している。同時期に開発に着手した ITS 用途のレーザレーダも、国内外の社会実験を通じてようやく実用化の兆しが見えてきた。



車両・歩行者の検出方法

レーザ光反射から対象物を即時に判断

レーザレーダは、ある一定の空間を素早くスキャンし、モニターするものだと考えると分かりやすい。レーザ光を水平および垂直方向にスキャンしながら交差点の路面に照射し、反射光が戻ってくるまでの時間を計測することで、各照射点までの距離を算出する。停止線から交差点を含んで幅3～4車線、奥行き約150mの空間をカバーするまでに掛かる時間はおよそ0.5秒。このようにして常時交差点をモニターし続け、この空間に何か対象物が入り込めば、それがどのくらいの高さや幅があり、どの程度の速度で交差点に接近しているかを把握できる。独自開発のプログラムにより、対象物は自動車なのか、バイクか歩行者かといったことを判断し、また、モニター空間に入った瞬間から捕捉して交差点内の動きを追跡、リアルタイムでその動きを発信する。VICSに準拠したカーナビゲーションを搭載した車両がこのシステムのある交差点に接近すれば、その車載カーナビゲーションはレーザレーダからの情報を受信し、規格どおりの表現で注意喚起する。カーナビゲーションメーカーによって画面の表示は異なるが、音声の言い回しはITSに関わる

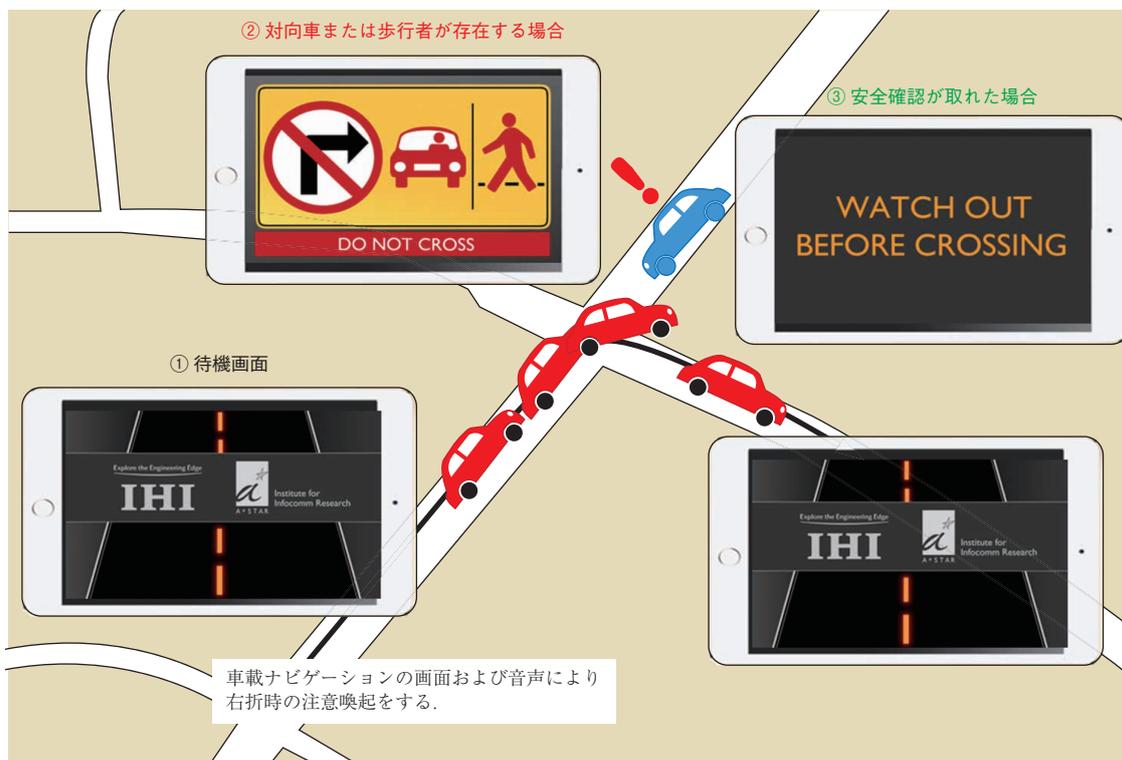
各団体、企業により規格が統一されている。これは音声表現の違いによってドライバーが混乱することがないようにするためだ。

利点は全天候型であることとデータ処理の速さ

交差点事故の多くは、右折車両と直進車両との接触、あるいは、右折した車が直進する歩行者を巻き込むものだといわれている。交差点での右折時、対向する右折車両がバスや大型トラックなどの場合、ドライバーは対向する直進車線の車が見えにくいことがあるが、その場合も、このシステムがあれば直進車両の動きをモニターして伝えてくれるのでスムーズに右折できる。また、右折後の横断歩道での自転車や人の動きについても情報が提供される。

交差点のどの位置にレーザレーダを配置し、どちらの方向をモニターするかは、サービス提供者が、どのような情報サービスを提供したいのかによる。交通量の調査や警察による事故分析および現地調査などを経て決定するが、通常は交通量の多い道路を走る車両に向けて情報提供できるように設置する。

空間をモニターする手法としては、ほかに映像



安全運転支援表示例（シンガポール社会実験）

(ビデオカメラ)もあるが、カメラは距離測定ができなかったり、夜間や雨など時間帯や天候の影響で映像を的確に捉えられなかったりすることがあるため、レーザレーダの方が環境への適応性において優れているといえる。レーザレーダの利点は「スキャンできる範囲が広く」、「高速でスキャン可能」、かつ「記録配信するデータ量がカメラ映像ほど重くないため、高速で処理ができる=大きなサーバがなくとも、パソコン程度の機器でリアルタイムに的確な判断ができる」と集約できる。ちなみに、判定処理ソフトも IHI が独自に開発したもので、すべての情報を処理するのではなく、サービス提供者が必要とする情報を選んで利用できるようになっている。

シンガポールで社会実験を実施

IHI では技術アタッシュと呼ばれる制度が設けられ、若手・中堅技術者が長期に海外現地に滞在し、その地域の市場調査や技術の発掘、現地の公的機関や大学などとの共同研究を行い、将来の新事業につながる案件創出を担っている。

2012 年 4 月のアジア大洋州統括会社設立に先立って、これまで配置していたニューヨークとロンドンに加えて 2011 年 10 月からシンガポールにも技術アタッシュを配置することとなった。

シンガポールは“世界の実験場”ともいわれており、その山手線（東京都）の内側ほどのコンパクトな国土と先進的な情報化社会を活かして、国籍を問わず多くの企業の社会実験を呼び込み、政府も手厚いサポートを提供することで知られている。IHI は、アタッシュの活動を通じてシンガポール科学技術研究庁と包括研究開発契約を締結し、情報通信、生産技術、環境科学工学の 3 分野において連携しており、その一環として、ITS 技術の実証実験が 2012 年 12 月からスタートした。

実験のフェーズ 1 では、ジュロン地区の片側 3 車線の交差点について現地調査とシステム設計を行ったうえで二つのレーザレーダを設置し、レーザレーダが対象物（車両、バイク、人など）を確実に検出するか、誤検出はないか、夜間や雨天など時間帯や天候に左右されないかどうかなどのデータを蓄積した。また、日本と同じく左側通行のため、右折車両と直進車

両の事故防止、歩行者の巻き込み防止に有効であるかどうかも確認した。将来のサービス実用化に向けて、2015 年度も社会実験を継続している。今後はこれらの蓄積データを中心に、さらに機能やサービスの充実を図り、日本国内外の DSSS 普及のために提案活動を行っていく。

日本の技術の粋を集めた ITS の一翼を担い、世界へ!

日本が目指している ITS は、自動車と道路と人の三者間で情報の受発信を行い、安全な交通システムの確立を目指すものだ。前述のとおり、自動車メーカーの技術開発により“車対車”のシステムは追突防止をはじめ、実用性が高まっている。また今回紹介しているレーザレーダを使った“道路対車”の情報受発信も、交差点を中心に近い将来実現する見通しである。しかしながらレーザレーダの検知システムのある交差点において、歩行者の存在は車両側には伝えられるが、歩行者に向けて車両の接近を知らせるシステムはまだ整備されていない。自動車メーカーの一部がスマートフォンを使って歩行者に伝えるアプリケーションを開発しているが、安全に関するデータなどの蓄積や検討を要する段階である。車両接近情報を確実に歩行者へ伝えたり、高齢者など交通弱者が交差点内に取り残されないよう、交通信号を制御したりする情報を提供するなどのサービスも検討されている。

ITS は産官学の連携で研究開発されており、将来的に「自動運転のための技術」、「交通状況のセンシング技術」、「歩行者の安全確保の技術」が組み込まれたインフラとサービスをパッケージにして、日本国内だけでなく世界に向かって発信していこうという政府の戦略もある。IHI のレーザレーダはそのなかでも、確実性の高い中心的な機器として、今後も重要な役割を担うことが期待されている。

問い合わせ先

株式会社 IHI

高度情報マネジメント統括本部

セキュリティプロジェクト部

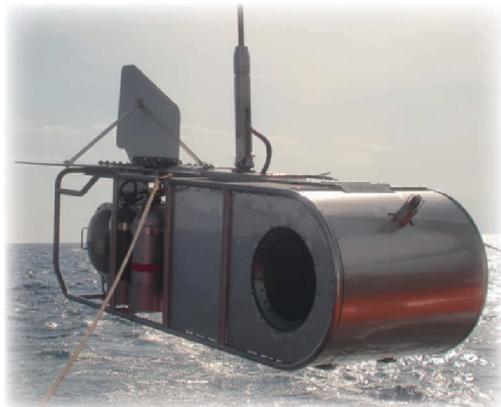
電話 (03) 6204-7235

URL : www.ihico.jp/

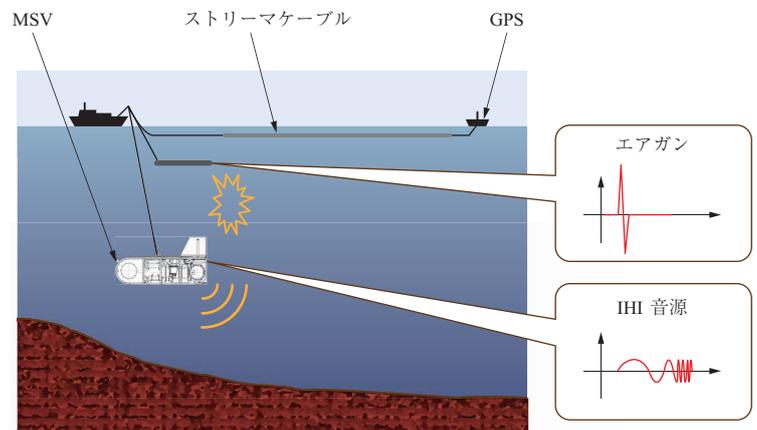
やさしい音で海底資源を探す

IHI Marine Seismic Vibrator による 海底資源探査システム

海底資源探査に使われるエアガンの大きな衝撃音が、クジラやイルカなどの海洋哺乳類へ及ぼす影響が懸念されている。
IHI の蓄積した技術が動物にやさしい音を作り、新しいソリューションを提供する。



IHI-MSV-250



発震波形

海底資源の探査

海底には、石油・天然ガス、メタンハイドレートのような燃料資源、熱水鉱床での鉱物資源やレアメタル、陸地には存在しない微生物資源がある。これらの資源を見つけるためには、海底の地形や地質を探査する必要がある。

探査手法の一つとして、反射法地震探査が広く使われている。これは、海中で音源（この分野では震源と呼ぶ）から音を発生させ、その反射を分析するものである。

一般に使用される震源は「エアガン」で、インパルス（衝撃）の弾性波（爆発音）を発震する。弾性

波は海底面で反射するとともに、一部が海底の中に入射したのちに音響特性の異なる地層境界で反射する。この反射した音響信号は hidroホン（マイク）が多数装備されたストリーマケーブルで受信される。受信した音響信号を解析し地殻構造を知ることで、資源の場所を探っていく。

エアガンは非常に短い時間で圧搾空気を放出して、爆発音のようなインパルス波を発生する。この波は低周波から高周波まで広い範囲（広帯域）の音を含んでいる。このエネルギーが大きく広帯域な音は、クジラやイルカなどの海洋哺乳類の可聴域の周波数帯を含んでいるため、彼らに悪い影響を及ぼしているのではないかと懸念されている。

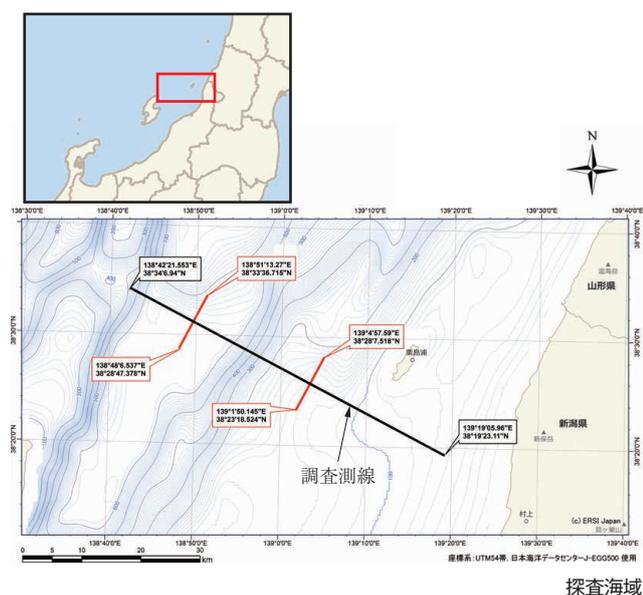
IHI の震源

IHI は 1990 年代に防衛庁（現、防衛省）の研究用に海中で音を発震する震源を開発し、現在は装備品として提供している。この装置はサーボ制御式油圧駆動震源で、発震音の大きさ、周波数、位相などが任意にコントロールできることが特長である。また、エアガンは海面から数 m 下の位置で発震するのに対し、IHI 震源は高深度でえい航し発震することができる。

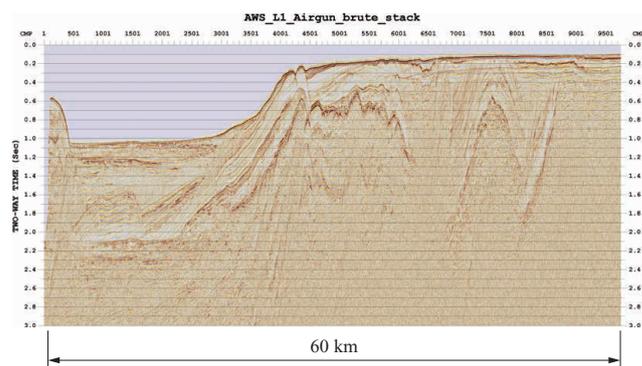
海底資源探査に必要な音響エネルギーは、爆発音でなくとも、限定した周波数範囲の音を所定の時間を掛けてスイープすることで出力できる。つまり、エアガンは広帯域の音を大きなエネルギーで一瞬に発震するのに対し、IHI 震源は限られた帯域の音を小さなエネルギーで発震する。このため海洋生物に影響の少ない、環境にやさしい震源として期待が高い。

試験用の IHI 震源 MSV (Marine Seismic Vibrator) は、コンパクトなボディの中に制御部、振動部、油圧ユニットなどを収めた装置である。高深度で発震可能とするため、装置内部の圧力は海水圧とバランスするようにコントロールされる。

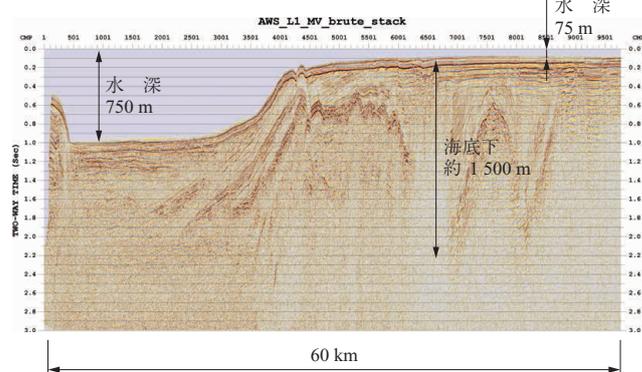
この震源を用いて、2015 年 7 月に探査調査試験を実施した。同時に、MSV の 100 倍以上の音圧（音の大きさ）をもつエアガンでの探査調査試験も実施し、両者の結果を比較することで MSV の有効性を検証した。探査海域は新潟県粟島沖の日本海で、粟島沖の南東から北西にかけて 60 km の調査測線上で調査を行った。



(a) エアガン



(b) MSV



探査地層断面図

その結果、両者からほぼ同じ地層イメージを取得することができた。このことから、MSV で従来のエアガンと同等の探査が可能であることが確認できた。

これから目指すもの

IHI 独自の技術である MSV をベースに、トータルな海底資源探査システムを構築する。ハードウェア・ソフトウェアを提供するだけでなく、探査サービスの事業への進出も視野に入れている。

これらを通じて、海洋音響利用のイノベーターとして海洋資源開発分野に参入し、周辺事業を取り込みながらトータルソリューションを提供できるビジネスとして成長させ、海洋フロンティアで新たなポジションを獲得していく。

問い合わせ先

株式会社 IHI

新事業推進部

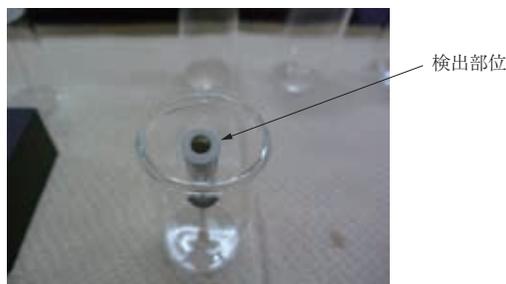
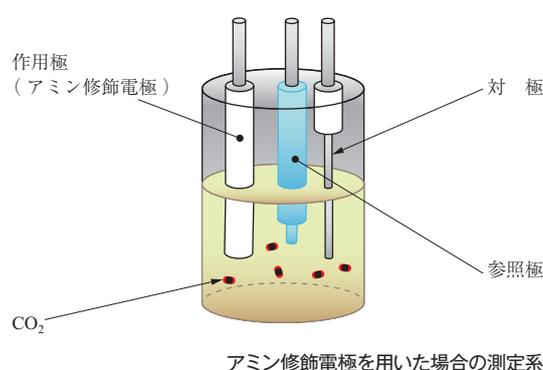
電話 (03) 6204 - 7022

URL : www.ihico.jp/

水中の二酸化炭素を直接検出

貯留した CO₂ の漏洩^{えい}監視ニーズに応える CO₂ 検出化学センサー

もはや待ったなしの地球温暖化対策。大気中の温室効果ガス削減策の一つが CO₂ の海洋貯留。その実用化に不可欠な漏洩モニタリングに役立つ研究成果を紹介する。



作製したアミン修飾電極



アミン修飾電極を用いた実験の様子

CO₂ 海洋貯留実用化には 海中での漏洩監視が欠かせない

2015年11月末から12月にパリで開催されたCOP21（国連気候変動枠組条約第21回締約国会議）で、「今世紀後半には温室効果ガスの排出を実質ゼロにする」という歴史的な合意が得られた旨のニュースは記憶に新しい。産業界でも「産業活動により排出される二酸化炭素（CO₂）をいかに削減するか」は待ったなしの課題で、さまざまな技術開発が進められている。

そのなかでも、大気中のCO₂濃度の増加を抑制する

方法として「CO₂分離回収・貯留技術（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）」が注目されている。CCSは、工場などの排気に含まれるCO₂を何らかの方法で分離して集め、大気中に出ないようにとどめ置く技術である。貯留場所は、人間の活動に影響が少ない広大な地中あるいは海洋が候補となる。

カナダでは、アルバータ州で国際的な地中貯留プロジェクトが進められている。日本では、経済産業省が中心となり、苫小牧沖（北海道）で2020年以降の実用化を目指した海洋貯留の実証実験が、2016年度に開始される。

CCSに関係する技術として、IHIは化学吸収法によ

る CO₂ 回収システムの技術を有している (IHI 技報 Vol.52 No.1 pp.20 - 23). 今回取り上げるのは、この技術によって回収した CO₂ を海洋貯留したときの漏洩監視のニーズに応える研究だ。

CO₂ を海底の地中に貯留することを想定すると、海水中に漏洩していないかを長期間にわたって監視するシステムが必要となる。しかし、水中の CO₂ 検出は、これまでは例えば pH 変化を指標とした間接的な方法しかなかった。今回 IHI で有効性が確認されたのは、水中で直接的に検出する方法だ。従来法に比べて高感度な検出が期待でき、ひいては漏洩監視の精度向上が期待できる。以下に本研究の概要を述べるが、詳細は本号の論文 (51 ~ 55 ページ) をご覧いただきたい。

水中の CO₂ に反応する「化学センサー」

化学センサーは、物質の化学結合をきっかけに電流が流れたり、色を呈したりといった変化を起こす性質を利用して、検出すべき化学物質の有無を判定するものだ。

CO₂ の分離回収システムではアミンを用いた化学吸収法が既に実用化されている。アミンは CO₂ と結合しやすい性質をもつ物質なので、工場などの排気に含まれる CO₂ をアミン吸収液で捕らえ、その液体を加熱することで CO₂ を分離回収するものだ。

そこでセンサーの検出部位にアミンを用い、CO₂ が存在すればアミンと結合し、検出部位の電気的な性質が変わることを利用した。



11th Asian Conference on Chemical Sensors (ACCS2015) 表彰式

直接検出の原理を実証するため、表面にアミンとフェロセンを同時に固定した電極を作製して実験を実施した。フェロセンは、電極に電圧を掛けたとき電流が流れる物質である。海水を模擬した水溶液に電極を挿入し、電圧-電流特性を測定すると、水中の CO₂ 濃度が高いほど電流が流れにくくなる現象が確認できた。

この実験では、次のようなことが起こっていると考えられる。水中に CO₂ が存在しない場合、電極表面のアミンは電気的に中性かプラスである。このとき、フェロセン分子から電極への電子の移動は容易にできる。しかし CO₂ が存在すると、CO₂ はアミンと結合して、電極表面に電気的にマイナスのイオンが生成される。このときは、フェロセン分子から電極への電子の移動は、静電的反発により妨げられる。

実験の結果から、表面にアミンとフェロセンを同時に固定した化学センサーを用いることで、水中の CO₂ を直接検出できることを確認できた。

この化学センサーは、基礎研究の段階であり、海洋貯留のモニタリングで実用化するためには、多くの課題を乗り越える必要がある。例えば、実験室レベルの大きさのセンサーを実際に海中で使用できるところまでスケールアップするという課題。耐久性 (海中の温度や水圧、海流、サンゴなど水中生物の付着などに対して) の課題もある。一方で、食品分野、自然環境モニタリングなどの他分野に応用できる可能性を秘めている。

ちなみに、2014 年に CCS の学会で、また 2015 年には化学センサーの学会で発表したところ、いずれも好評だった。特に後者の学会 (11th Asian Conference on Chemical Sensors) では、Best Paper Award および Best Presenter Award に選出され、出席した研究者から、こうした基礎研究が民間企業でなされ、産業分野に活かされることは興味深いという反応があった。ミクロな現象に着目した化学分野の発明をマクロな産業分野に展開させるべく、日々研究を進めている。

問い合わせ先

株式会社 IHI

技術開発本部 管理部

電話 (045) 759-2213

URL : www.ihico.jp/

無人ロボットで 海洋フロンティアに挑む

自律型の海洋無人ロボットシステム

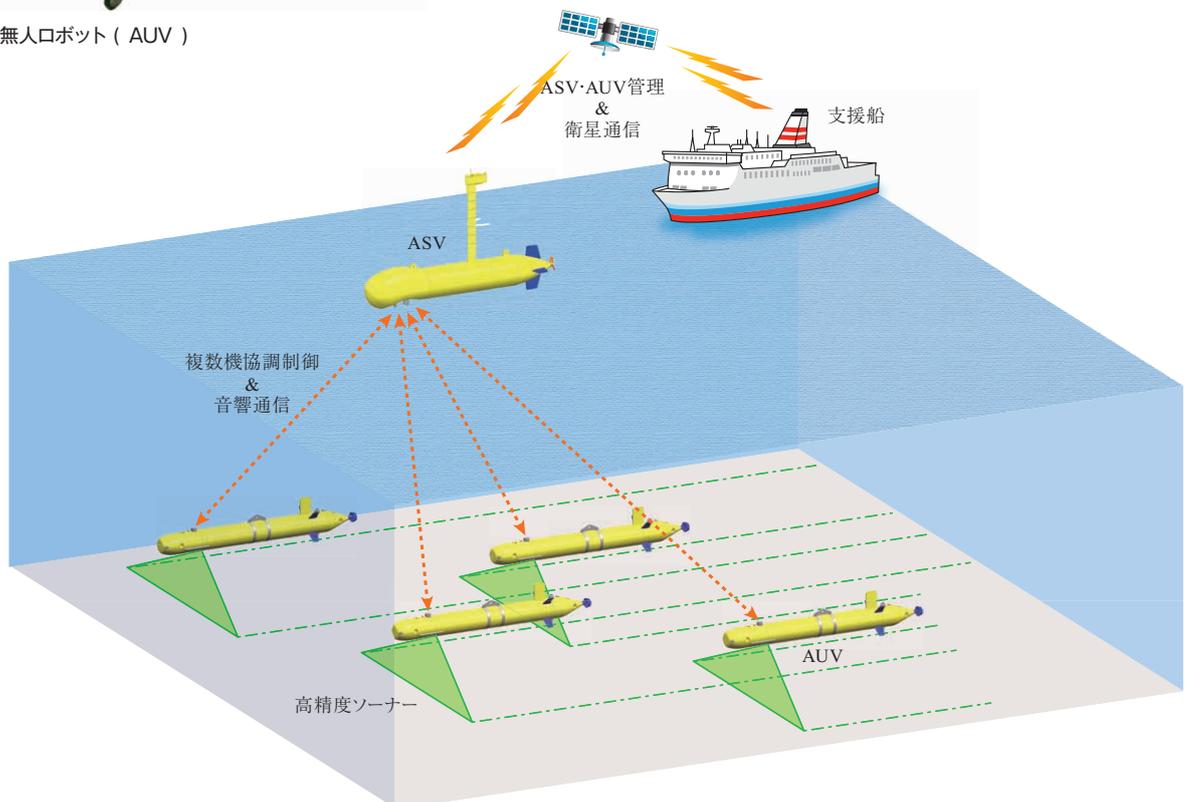
近年、日本を取り囲む広大な海洋において、水産資源だけでなく、石油・天然ガスやレアメタルを含む鉱物などの海底資源が注目されるようになり、国を挙げた調査が進められている。

IHI は、これまでに培ってきたロボット技術により、水深 1 000 m を超える海洋の詳細調査を行う自律型の海洋無人ロボットシステムの実現にまた一步前進した。

株式会社 IHI 技術開発本部
航空宇宙事業本部



自律型海洋無人ロボット (AUV)



複数の海洋無人ロボットによる海底探査

海洋フロンティア

わが国は、国土の四方を海に囲まれた海洋国家である。領海と排他的経済水域 (EEZ) を合わせた面積は、世界第 6 位の 447 万 km² と広大である。我々は、歴史的にこの海域を主に水産と海運の分野で利用してきたが、近年、この海域の深海底にメタンハイドレートなどの新たなエネルギー資源や、海底熱水鉱床などの鉱物資源の存在が確認され、こうした資源の開発に期待が高まっている。さらに、この海域においては、洋上の風力、潮力や海流などの自然エネルギーを利用した発電システムの開発や、海洋微生物を利用した新たなバイオテクノロジーの探究など、新しい利用の可能性についても関心が高まっている。

一方で、これらの海域にはまだ解明されていないことが多く残されている。その大きな要因は、容易に“行けない”、“見えない”、“伝えられない”、という海洋環境の特質にあると考えられる。海の中は過酷な世界であり、潜れば 10 m ごとに水圧が 1 気圧ずつ増していく。例えば世界の大洋の平均水深は約 3 800 m で、このときの水圧は約 380 気圧にもなる。この高圧への対策がなければ目的地に到達することもできない。また、海洋で光が到達する深さは、汚染のない外洋でも最大 200 m と言われており、海面から海底を透視することは難しい。さらに、通信についても、日常使用している電波の海中での伝搬距離は数 m 程度で、情報伝達の大きな制約となっている。

このように海の中は、人間の進出を阻み続ける厳しい環境の広がる世界であるが、この過酷な環境に挑戦する手段の一つとして、海洋無人ロボットの利用が注目されている。本稿では、IHI がこれまで培ってきた海洋無人ロボット技術について紹介する。

海洋無人ロボット

海洋で使われるロボットには海上ロボットと海中ロボットがある。求められる仕事には、海上・海中・海底において搭載した計測機器による情報取得やマニピュレータなどによる実作業がある。ここでは海中ロボットについて説明する。

海中ロボットは、大別してロボット内に人が搭乗する有人ロボットとそれ以外の無人ロボットに分けられる。

有人ロボットのメリットには、人間が自分の目や耳で取得した情報からその場で判断して、優先度の高い仕事を効率的に行うことができること、マニピュレータなどの操作が正確に素早く行えることなどがある。一方で、以下のようなデメリットが考えられる。

- ・人が搭乗するため、全体システムの信頼性・安全性を高める必要があり、一般的に無人ロボットに比べて非常に高価で大型になる。
- ・有人ロボットの運用中は専用支援船による十分な支援体制が必要である。
- ・人が活動するために必要な環境条件（空調、食料など）の確保に伴うエネルギーなどの制約に起因して、運用時間も制約を受ける。

一方、無人ロボットでは上記のような有人ロボットの制約が緩和される。

無人ロボットには、支援船とケーブルでつながれた ROV (Remotely Operated Vehicle) と、ケーブルがなく自由に航走できる AUV (Autonomous Underwater Vehicle) がある。

ROV は、ケーブル通信により人が継続的に遠隔操作を行う海中ロボットで、ケーブルをとおしてエネルギーを供給できるタイプもある。エネルギーを供給する場合には、ケーブルは太くなり、大深度の海底で作業する場合には、ケーブルに働く水からの抵抗が大きくなるため、支援船の設備も大規模になり、ROV にも大パワーが必要になる。一方、エネルギー源を内蔵し、通信だけを光ファイバをとおして行うタイプの ROV では、大深度でもケーブルによる拘束は限定的であり、自由に動き回ることができるが、ケーブル切断のリスクが増加する。

AUV はケーブルのない自律型の海中ロボットである。自律とはロボットに則していえば、開始指令を受けるだけで与えられた目的を自動的に達成することといえる。AUV は、ある海域の探査指令を受けて運用を開始した後は、人が関与する必要がなく、ケーブルによる拘束がないので、少ないエネルギーで事前に設定された目標への軌道を精度良く自律的にたどることが可能である。AUV はエネルギーの続く限り自動で長時間の探査ができるため、広大な海洋の探査には適したロボットといえる。

立ちはだかるハードル

海洋無人ロボットでは、次章で述べる自律性の確立が最大の課題と言えるが、過酷な環境で使用される海中ロボットの前にはそのほかにも立ちはだかるハードルが幾つか存在する。

まず、大水深での運用における耐水圧性である。日本の EEZ 内で開発が期待されている海底熱水鉱床は水深 700 ~ 2 000 m の海域に分布している。この水深 2 000 m の海中ではたった 1 cm² の面積に約 200 kgf もの水圧が掛かっている。可搬型の直径 20 cm × 長さ 100 cm 程度の小型海中ロボットでさえ、その全表面には 1 400 tf 近くの水圧が掛かることになる。大きな水圧に耐えるロボットの耐圧容器の板厚は厚く、重くなる。この対策として油漬均圧法が良く用いられる。これは、容器内に海水と同等の圧縮率の絶縁油などを満たし、容器内外の圧力を等しくできる構造を設けることで容器の耐圧性を不要とする方法で、容器を薄く軽くできる。現状、電池などで利用されている。

次に、海中における情報伝達の難しさがある。海中ロボットでは、通常用いられる電波と比較して通信距離が短く、通信速度の遅い音響通信を用いざるを得ない。最近では、複数の海中ロボットによる音響通信の中継による通信能力向上が期待されている。IHI でも、音響通信器自体の性能を向上させるだけでなく、複数のロボットを協調制御することにより、音響通信の弱点である通信距離の短さや通信速度の遅さを克服する取り組みを行っている。

また、エネルギー源も大きなハードルといえる。酸素のない海中では内燃機関を使うことができないため、海中ロボットでは専ら二次電池をエネルギー源としている。現状、海中ロボットの運用時間は 12 時間程度のものが多いが、次世代のリチウムイオン二次電池ではエネルギー容量が現状の 2 倍になる可能性があり、実現すれば 24 時間連続の運用が見込まれる。また、IHI では海中ロボットの運用時間を延ばす別のアプローチとして、海中非接触給電技術の開発も行っている。

そのほかにも海中では GPS を利用できないことによる自己位置把握の難しさ、海象の影響を受けやすい荒天時のロボットの投入・回収など、海中ロボットにはいろいろなハードルが立ちはだかっているが、これら乗り越えるための研究開発を鋭意進めている。

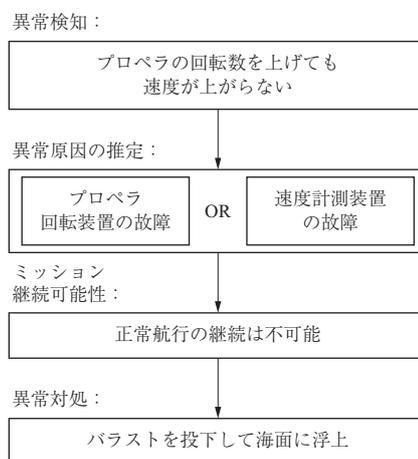
高度な自律制御

AUV に求められる主要な自律性としては、事前に設定された目標地点に向かうための経路を生成し、その経路を適切な速度・姿勢で移動すること。そして、発生した異常状態を異常と判断して（異常検知）、発生した異常に対して可能な範囲で作業を継続し、継続不可能と判断した場合は作業を中止して回収に向けたプロセスに移行すること（異常対処）などが考えられる。複数の無人ロボット運用時には、さらにほかのロボットとの協調制御が付加される。

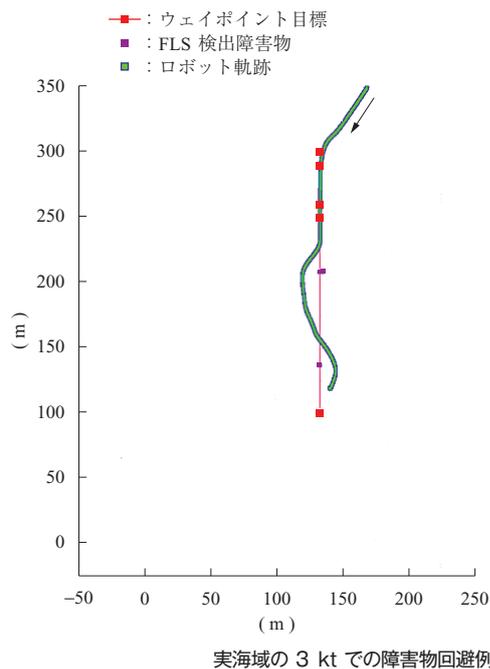
AUV における異常検知と異常対処の構築方法は、「このような場合にはこのように対処する」というルールの集まりで作られるのが一般的である。すなわち、「ある状態でのセンサーの計測値や状態推定値の正常範囲を定め、その範囲外では異常と考え、異常ごとに対処する」というルールの集まりで構築する。ルールの一例として「プロペラの回転数を上げてても速度が上がらない」異常を検知した場合の対処フローを下図に示す。

「何を異常として判定するか」、「その異常に対する適切な対処は何か」の制御ルールの積み上げが AUV を含む自律型無人ロボットの優劣を左右する技術情報である。IHI では AUV の実際の運用をとおして、こうした技術情報の蓄積に取り組んでいる。

また、自律型無人ロボット自身のシステム異常とはいええないが、異常な状態として自律的な対処が求められる事例として、経路上の障害物回避がある。この場合もルールとフローで実現されることが一般的である。

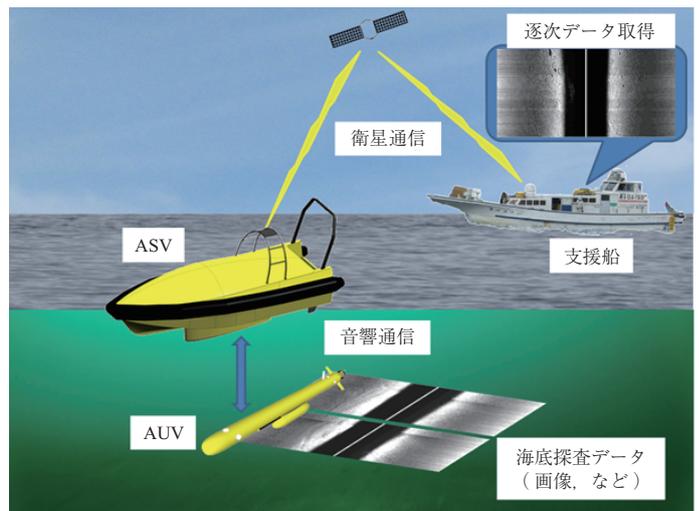


異常検知・異常対処フローの一例



AUV の機首に取り付けられた前方探知ソナー (FLS : Forward Looking Sonar) で経路上の障害物を探知し、回避した例を上図に示す。直線経路上に配置された二つの水中障害物を AUV が 3 kt で航走しながら連続で左右に回避している。

さらに高い自律性として複数の海洋無人ロボットによる協調航走が挙げられる。従来、AUV による海底探査では、AUV は支援船で輸送され、現場で投入されたのち、支援船の監視の下、1 対 1 で運用されていた。これに対して、同時に複数の AUV を運用できれば探査効率を高めることができる (タイトル下右図)。さらに、運用コストの高い支援船の代わりに AUV の監視を自律型海上無人ロボット (ASV : Autonomous Surface Vehicle) で行い、ASV からの情報に基づく遠隔監視が実現できれば、支援船はその間に別の作業が可能となり、より効率的である。このとき、ASV は、対象の AUV の位置、速度および目標方位などの情報を用いて AUV と協調航走すると共に、AUV の情報を逐次無線通信により支援船に伝送する。IHI が実現した ASV と AUV による協調航走と逐次データ伝送システムの概念図 (右上図) を示す。ASV が AUV と 5 kt で協調航走しながら、AUV の探査データを音響通信により取得し、そのデータを衛星通信により支援船に逐次伝送を行った。ASV の協調制御では、



協調航走と逐次データ伝送システム

AUV の測位ができない場合や、音響通信を失敗した場合の異常対処が特に重要となる。

これからの展開

これまでに培ってきた自律型の海洋無人ロボット技術をもって 2010 年から 2014 年に実施された防衛省研究試作「無人航走体構成要素の研究試作」に参加し、ASV と AUV による協調航走、AUV のソナーデータの逐次データ伝送技術などを実現した。また、現在、内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の「次世代海洋資源調査技術」に参加し、複数の AUV と協調航走し、1 台でこれらを管制する ASV の開発を進めており、効率の良い海底探査システムの構築を目指している。さらに、社内では各種要素技術の開発に用いるため運用深度 3 000 m の AUV の開発も進めており (タイトル下左図)、これを活用したさらなる自律性、協調性の向上、海中ネットワーク技術、海中非接触給電技術、海中ドッキング技術などの開発を目指している。

問い合わせ先

株式会社 IHI

技術開発本部 管理部

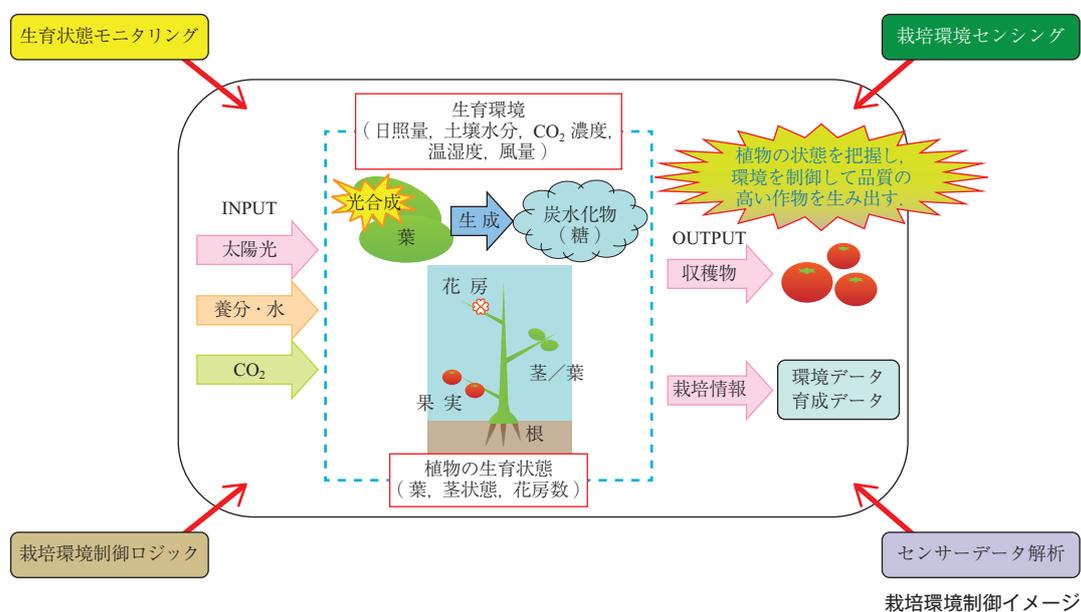
電話 (045) 759-2213

URL : www.ihico.jp/

スマート農業で スイートなトマトを

太陽光利用型植物工場で安全・安心な作物を提供する 「IHI 統合環境栽培システム」

世界の爆発的な人口増加に伴い食料危機が叫ばれている。一方、戦後 1 500 万人を超えていた日本の農業人口は、現在およそ 200 万人に減少し、平均年齢は 66 歳を超えている。IHI 統合環境栽培システムを用いて、安全・安心でおいしい作物を安定して生産し、これらの問題解決に貢献する。



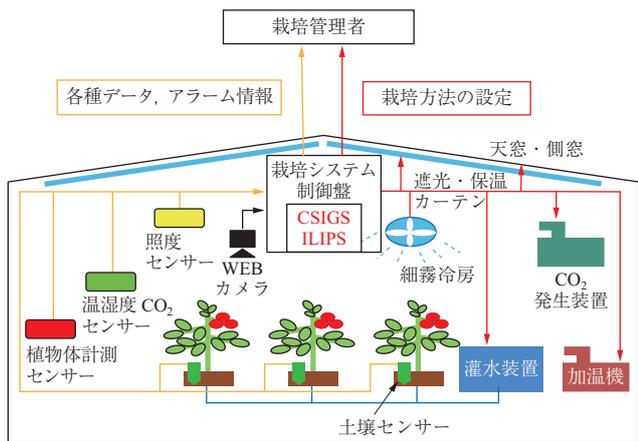
日本の農業事情

現在、日本の農業は従事者の高齢化や後継者不足、食料自給率の低下、TPP（環太平洋パートナーシップ）の脅威などの問題を抱えている。また、輸入食料の安全性に対する不安から、農薬使用量の少ない安全・安心な国産農作物への消費者ニーズが高まっている。

一方、2014 年の農林水産物輸出額は過去最高で 6 000 億円を超えている。さらに世界全体では、2009 年に 340 兆円規模の食料市場が 2020 年には 2 倍の 680 兆円になると予想されている。このことから政府主導で強い農業、農家所得向上の施策や改革が行われ、企業の参入促進、新規就農の支援、農地集積の推進による農業経営の大規模化が進んでいる。

IHI 統合環境栽培システム

安全・安心な作物を安定して供給するために、株式会社 IHI スターと IHI は、多種多様な作物に対応できる太陽光利用型植物工場（ハウス施設栽培）の開発に取り組んでいる。その植物工場のコアとなるのが、IHI 統合環境栽培システムである。本システムに結集されている技術は、① IHI グループの保有する ICT (Information and Communication Technology) ② センシング技術 ③ FA (Factory Automation) 技術 ④ システム制御技術、であり、農薬使用を極力抑えた安全・安心な作物を安定して供給できる。本システムの制御部は大きく、土壤水分センサーや CO₂ センサー、温度センサーなどのセンサー類と、コントローラーとして



IHI 統合環境栽培システム

IHI で開発した CSIGS (Control System of IHI group : Global Series C-type) からなり、冷暖房機器、窓、カーテン、灌水装置などの環境機器を制御する。さらにハウス内環境の計測データは、ILIPS (IHI group Lifecycle Partner System) のリモートモニタリング機能を用いて、お客さまがメールやインターネットで確認できる。

IHI 統合環境栽培システムにおいて、① ILIPS で取得したデータの解析で得た灌水量と糖度・収量の相関に関するノウハウ ② ハウス施設の環境機器の年間を通した運用方法 ③ 灌水量や環境機器の調整など、栽培に関して IHI スターが保有する農業知識（農業機械知識、栽培知識）を活用し、季節や天候の条件を反映した高度な制御の実現を図っている。その結果、例えば、作物の病気が発生しやすい高湿度状態にならないように環境を制御するため、過剰な農薬散布を避けることができる。本システムにより、これまで熟練者に頼らざるを得なかったさまざまな調整をある程度自動化し、安定的で高品質な作物の収穫を目指している。また、集積した栽培データを解析して結果を提供する栽培支援ビジネスも可能となる。

以上のように、このシステムは農業知識と先進的な制御技術を同時に保有する IHI グループだからこそ提案できるユニークなものといえる。

高糖度トマト

IHI 統合環境栽培システムを用いて栽培する作物には以下の観点からトマトを選定、さらに高価格で取引される高糖度トマト（高付加価値トマト）とした。

- ① 日本で最も広く生産され栽培施設が多く、本システムの広範な導入が期待できる。



実証栽培風景

- ② 市場規模が大きく、高付加価値トマトを新たに市場に供給しても値崩れしにくい。
- ③ 単位面積当たりの販売単価が高く、設備投資がしやすい。
- ④ 本システムの導入によって、付加価値を出しやすくなり、高糖度トマトに取り組む農業生産者の拡大が期待できる。
- ⑤ グローバルな食材であり加工品での需要も高く、海外での生産・販売も期待できる。

北海道での実証栽培・販売

IHI スターと IHI は、北海道の施設栽培企業（農家）と共同で、本システムを用いた高糖度トマトを実証栽培して販売している。

3社で協力して栽培した高糖度トマトの評判は非常に高く、首都圏の百貨店からも引き合いが来ており、高値で取引され生産が追い付かない状況である。

現在は、栽培面積 0.5 ha 程度であるが、2015 年度より拡大し、2016 年度以降には 1 ha 以上のまとまった規模で生産・販売していく予定である。

海外も見据えた事業展開

国内での実績を踏まえ、高糖度トマトの需要が見込まれる海外市場への展開を図っていく。特に IHI スター製品の販売実績があり、北海道と似た気候条件の中国、ロシア、アジア諸国などへ進出していくことで、日本だけでなく世界の食料問題解決にも貢献していく所存である。

問い合わせ先

株式会社 IHI スター

営業本部 アグリビジネス部

電話 (0123) 26-1123

URL : www.ihistar.com/

あなたのビルの 非常用発電機は大丈夫ですか？

常用・非常用発電装置などの サービス・メンテナンス時に欠かせない 車載型負荷試験装置を開発，レンタル事業にも参入

非常用発電装置を非常時にきちんと作動させるには，点検時に負荷を掛けての確認が必要。このとき欠かせないのが負荷装置だ。株式会社 IHI ジェットサービスではこのほど車載型の負荷試験装置を開発し，自社使用だけでなくレンタル事業も開始。



車載型負荷試験装置（1号機）

機動力抜群！車載型負荷試験装置を開発

阪神淡路大震災，東日本大震災を経験した日本社会では，企業や自治体が災害時を想定して非常用発電装置を備えることは，リスク管理上当然となった。実は大震災以前にも非常用発電装置を備えていた施設はあったが，災害時に始動しなかったり，起動直後に異常を感知して停止してしまったりしたものがあった。負荷を掛けないメンテナンスがその理由だと考えられている。

メンテナンスには，非常用発電装置本体の点検のほかに，装置を運転して所定の発電ができたかを調べる性能試験がある。

しかし，性能試験はエンジンを回すだけの空ふかし運転だけで負荷を掛けない，すなわち無負荷運転点検

で済ませることが多い。

この理由としては，点検時には普段使用している電気を止めて行う必要がある。更に，負荷試験装置の設置に手間が掛かり，試験費用が高いこともある。無負荷運転点検だけでは発電装置の不具合や故障箇所を顕在化できないため，実際の非常時に発電装置のエンジンに過負荷が掛かりエンジントラブルが生じることがある。このため，なだらかに負荷を掛けられる装置での実負荷運転の点検が重要となる。

株式会社 IHI ジェットサービス (IJS) は，全国の非常用・常用電源装置のある場所に向いて定期点検やメンテナンスを行える，車載型の負荷試験装置を開発した。

IJS は，アメリカのロールス・ロイス社の開発したガスタービンエンジンを転用した発電装置の普及およ

びメンテナンス、遠隔監視などのサービス業務を行ってきた。特に東日本大震災後は据置型の非常用発電装置や、特別な許可なしに一般道路を移動できる最大の発電装置 IM400 移動電源車を多数製造し、そのメンテナンスで車載型負荷試験装置は活躍している。この負荷試験装置は、IJS が納入した電源設備のサービス・メンテナンスに使用するだけでなく、ほかのメンテナンス会社にレンタルすることで新たなビジネス展開も目指している。

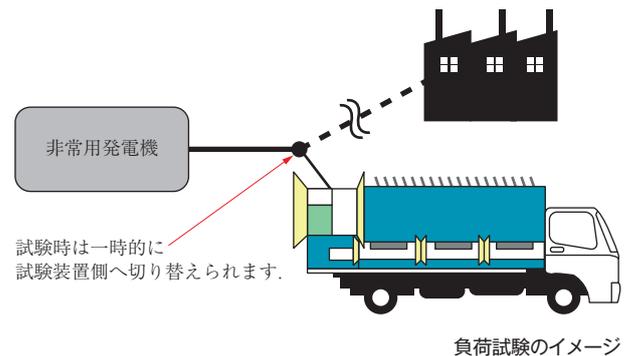
負荷試験装置の役割

非常用の電源設備は、電気設備技術基準、消防法などの法律で点検が義務付けられている。特に消防法では非常事態発生時から「定格負荷で 60 分以上連続運転できること」などに加えて、1 年に 1 度の総合点検時には「実負荷、または疑似負荷 30% 以上を掛けて非常用発電機から送電できること」が規定化されている。発電設備を正しく試験するには、負荷を掛けて発電できることを確認すると同時に、その発生した電力を安全に消費する必要がある。負荷試験装置はその両方を担う。イメージとしては“巨大な電気ストーブ”がそれに近い。

最大 26 600 kW 規模の 発電設備の点検・試験が可能

IJS の従来の負荷試験装置は、工場に設置されもっぱら電源設備の出荷時試験に用いられていた。しかし、電源設備の維持管理（総合メンテナンス）業務を行うには、機動力のある試験設備が必要となり、車載型を開発するに至った。この車載型負荷試験装置を使えば、通常の商用電源の回路を使用しながら、つまり停電をさせずに非常用設備を発電させ点検できるため、全施設を停電させる（＝休業）必要がない。車載型負荷試験装置の容量は 10 kW から 4 000 kW で、IJS ではこの装置を 2 台擁し、最大で 8 000 kW の負荷試験を可能とした。点検時は 30% の負荷が要求されるため、最大 26 600 kW 規模の発電設備を点検・試験できることになる。ちなみに東京都の下水道ポンプのための非常用電源設備は 15 000 kW 程度とされているので、十分試験可能である。

主なお客さまは、上記のような巨大インフラを管理する自治体や電力会社、また、大きな発電設備を搭載



したタンカーや大型客船を所有する運輸会社などが、身近なところでは野外イベント企画会社などからも要請がある。イベント会場では移動電源車で一定の電力が発電されるように設定し、照明を一気に落とす場合など使用されない電気は車載型負荷試験装置に回して消費するという仕組みだ。

現在製造している 2 号機の技術優位性として、まずはヒーター部分の安全性が挙げられる。熱が加わっても取り付け部分が緩まず簡単に締め込めるように工夫した。また装置そのものは、自動、手動どちらでも試験が可能で、タブレット制御による優れた視認性、操作性を誇る。さらに試験結果を分かりやすい形でレポートにまとめる機能、過去のデータを蓄積し処理する機能もあり、メンテナンスの課題把握に役立つ。

順法点検を支援

最後に車載型負荷試験装置のビジネス展開について触れておきたい。非常用発電機の点検時には機動力と高い機能を併せもつ車載型負荷試験装置のニーズは高いが、常時所有する必要性は感じない。そこで、IJS では自社使用に加えて、UPS（無停電電源装置）を含む非常用および常用発電設備の製造販売会社、メンテナンス会社などに可搬式負荷試験装置をレンタルで提供することにした。これは、順法点検の促進および支援につながり、ひいては安定したインフラ供給への貢献にもなり、今後の発展が期待される事業である。

問い合わせ先

株式会社 IHI ジェットサービス

ガスタービン事業部

電話（0422）27-5967

URL：www.ihico.jp/ijs/

以前、拙文「水の流れとオノマトペ」(IHI 技報 Vol. 53 No. 1 pp. 22 - 23)で豊かな日本語オノマトペの一端を紹介しました。オノマトペには擬音語、擬声語、擬態語、擬情語があります。擬音語は「ピコピコ」や「シューワッ」のように物が発する音を、擬声語は「オギャーオギャー」や「ツクツクポーシ」のように人間や動物の声を、擬態語は「まったり」や「スッキリ」のように様子を、擬情語は「ワクワク」や「ハラハラ」のような気持ちをそれぞれ表します。最近マンガに登場するオノマトペを通じて、その魅力が欧米にも認められているようです。今回はお天気にまつわるオノマトペを幾つか取り上げて読者と一緒に味わってみたいと思います。

雨のオノマトペ

日本の降水量は OECD 加盟 34 か国のなかでアイスランド、ニュージーランドに次ぐ多さであり(1668 mm/年(2014年))、雨に対する日本人の思い入れの強さ、ひいては雨に関するオノマトペの豊かさにつながっているようです。たとえば雨の降り方の弱いほうから順に、「ぽつぽつ」、「ばらばら」、「しとしと」、「ざーざー」、「どしゃどしゃ」といった具合です。これらの多くは音を写した

擬音語に属します。

降り始めの様子を表す「ぽつぽつ」は雨のしずくが物に当たった音を想像した擬音語と言えそうです。「り」や「っ」を加えると「ぽつりぽつり」や「ぽつっぽつっ」のように雨粒がまばらな様子が強く感じられます。もう少し降り方が強まると雨粒が木の葉や窓ガラスに当たる音が「ばらばら」と聞こえてきます。いずれにしても、降り始めの音は p 音が主役です。

「しとしと」は弱い雨ですが連続的な降り方を感じます。仲間のオノマトペ「しっとり」からも想像できるように、雨粒が何かに当たる音よりは全体的に湿ってぬれた様子が表されています。新明解国語辞典(三省堂)の用例に「大人の情感をしっとりとして歌いあげる」とあるように好ましい印象があります。しかし、「じっとり」や「じとじと」になると途端に不快感を伴う表現になります。

さらに雨脚が強まると「ざーざー」や「どしゃどしゃ」の出番です。「ざーざー」はたくさんの雨粒が地面や屋根に当たる音です。「どしゃどしゃ」は地面にできた水たまりに雨粒が衝突して出す音を感じます。「どしゃ」は混雑していて騒々しい様子を表す「どさくさ」と同源で「どっさり」も仲間です。「ど」が衝突音、「しゃ」が

雨と雪とオノマトペ

技術開発本部
内田 博幸



「しとしと」



「ざーざー」

水しぶきが飛び散る音を表していると考えられます。ちなみに「土砂（降り）」は借字です。

北原白秋作詞、中山晋平作曲の童謡「あめふり」の中におなじみの歌詞「ぴっちぴっち、ちゃっぷちゃっぷ」というオノマトペが登場します。ここで以前紹介した「ちゃぼん」が思い出されます。池に飛び込んだカエルが立てる「ちゃぼん」という音は、カエルが水面に衝突した音「ちゃ」と、カエルが沈んだあとに立った水柱が再び水面をたたく音「ぼん」だという話です。童謡の「ちゃっぷ」は「ちゃぼん」にとてもよく似ています。筆者の想像では「ちゃっぷ」という音は雨の中をお母さんと楽しく歩く子供が水たまりに足を踏み入れて跳ね返った水の音ではないかと思います。さらに、小池一雄作詞、吉田正作曲の映画主題歌「子連れ狼」に「しとしとぴっちゃん」というオノマトペが登場しますが、「ぴっちゃん」と「ちゃっぼん」は使われている音とリズムがとてもよく似ています。

雪のオノマトペ

ある調査によれば、日本、アメリカ、カナダの人口10万人以上の都市のなかで年間降雪量の多い都市トップ3を青森・札幌・富山が占めています。日本は雨と同様に雪も多く、したがって雪にまつわる言葉ひいてはオノマトペも少なくありません。

雨と同様に雪の強さによって幾つかのオノマトペがありますが雨ほど段階が多くないようです。まず降り始めは「ちらちら」や「ちらほら」。雨のように直線的ではなく

揺れ動きながら舞い落ちる様子が「ちらり」という音によって表されています。仲間には「はらはら」があり、木の葉や涙にも使われます。「はら」には「ちら」より一層はかなさが感じられます。雪があられに変わると「はらはら」が「ぱらぱら」になって物に当たる音を表します。

降り方が強くなると「しんしん」が使われます。雪は静かに降りますので「音」は聞こえません。静寂を表すオノマトペに「しーん」がありますが、「しーん」という音は聞こえるのでしょうか？ 実は、無音の環境にあっても人間は自らの呼吸や心臓の鼓動を聴覚で感じるので「静寂の音」があると言われています。日本語のオノマトペではそれが「しーん」と表されているようです。ちなみに、「お静かに！」と言うとき日本語では「しーっ！」と言いますが、英語では“Shush!”と言います。どちらもsh音で表されているところが面白いです。雪のオノマトペから少し脱線しました。

また、雪のオノマトペは降り方だけではなく積もった雪に関するものもあることを忘れてはなりません。踏みしめる音「さくさく」や「ざくざく」をはじめ、スキーヤーなら誰でも経験したことがあるアイスバーンを表す「がりがり」、「ぱりぱり」や春スキーの「じゃりじゃり」、「しゃりしゃり」などがありヒヤッとした経験を思い出させます。「ふかふか」な新雪もはまると怖いですが。

(写真：内田博幸)



「しんしん」

ビジネスジェット機向け GE Passport 20 エンジンの開発

Development of GE Passport 20 Turbofan Engine for Business Jet Aircraft

半 場 文 浩	航空宇宙事業本部民間エンジン事業部新機種開発部	主査
土 屋 直 木	航空宇宙事業本部民間エンジン事業部新機種開発部	主査 博士（工学）
守 屋 信 彦	航空宇宙事業本部民間エンジン事業部新機種開発部	部長
西 川 秀 次	航空宇宙事業本部民間エンジン事業部新機種開発部	部長 博士（工学）

GE Passport 20 エンジンは、Bombardier 社が開発中の双発大型ビジネスジェット機である Global 7000 および Global 8000 に搭載されるターボファンエンジンであり、2016 年にアメリカ連邦航空局からエンジン型式承認を取得するため開発作業が進められている。当社は General Electric 社のパートナーとして 30% のシェアでプログラムに参画しており、ファン静止部、低圧タービン、ギヤシステムなどの設計・開発・製造を担当している。また、7.4% のシェアで Techspace Aero 社もパートナーとして参画している。本稿では GE Passport 20 エンジンの開発概要と技術的な特長について紹介する。

GE Passport 20 is a turbofan engine that has been selected to power Global 7000 and Global 8000, a large-body, ultra-long range business jet aircraft that is being developed by Bombardier. IHI is participating in GE Passport 20 program as a joint venture partner, having responsibility for the design, manufacturing and assembly for 30% of the engine program, mainly the fan stator, low pressure turbine and gear drive system. This paper presents an overview of the development of the GE Passport 20 engine.

1. 緒 言

ビジネスジェット機は、定期便が就航していない地域への移動、または短時間で効率的に移動する手段として、EU・北米・南米の企業を中心に活用されている。近年では、新興国の台頭によってインド・中国・中東での需要も伸びており、日本国内でもビジネスジェット機を利用しやすい環境の整備が進められるようになった。今後はさらに企業活動のグローバル化が進み、ビジネスジェット機のなかでも長距離をノンストップで移動することができる大型機の需要が高まると予想される。

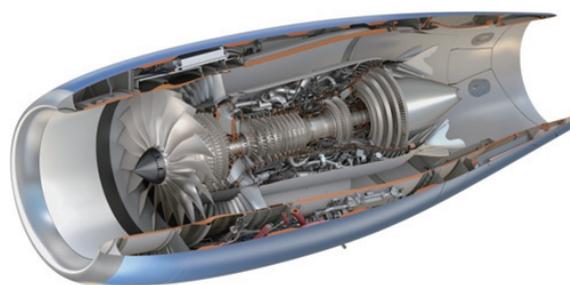
このような市場状況下において、Bombardier 社（カナダ：BA 社）は高速で航続距離が長く、居住空間の広い次世代の大型ビジネスジェット機である Global 7000 および Global 8000 の開発を進めている。第 1 図に大型ビジネスジェット機 Global 7000 を示す。Global 7000 の就航は 2018 年であり、Global 7000 より航続距離が長い Global 8000 はそれに続いての就航となる計画である。

GE Passport 20 エンジン（第 2 図）は Global 7000 および Global 8000 に搭載されるエンジンとして選定され、General Electric 社（アメリカ：GE 社）および Techspace Aero 社（ベルギー：TA 社）とともに 3 社で国際共同開



（出 典：www.bombardier.com）

第 1 図 大型ビジネスジェット機 Global 7000
Fig. 1 Global 7000 business jet aircraft



（提 供：GE 社）

第 2 図 GE Passport 20 エンジン
Fig. 2 GE Passport 20 engine

発を進めている。GE 社とのエンジン共同開発プログラムでは、従来は Revenue Sharing Partner（シェアに応じて事業費の負担・収益分配を受ける共同事業者）としての参画であったが、今回は量産時に共同で事業運営を行う GE Passport, LLC（Limited Liability Company）社を設立し Joint Venture Partner として参画している。そのため、従来以上に事業全体への関与が大きくなっている。

GE Passport 20 エンジン事業における当社のプログラムシェアは 30%であり、主にファン静止部、低圧タービン、ギヤシステムなどの設計・開発・製造を担当している。TA 社は 7.4%のプログラムシェアで低圧圧縮機を、GE 社はそのほかの部位をそれぞれ担当している。

本稿では GE Passport 20 エンジンの開発概要と技術的な特長について述べる。

2. 開発概要

2.1 エンジン諸元

GE Passport 20 エンジンの主要諸元を、既存機種ではほぼ同推力である CF34-10E エンジンと比較したものを第 1 表に示す。GE Passport 20 エンジンが高バイパスターボファンエンジンであり、低圧 3 段 + 高圧 10 段の軸流式圧縮機、低排出ガス燃焼器、高圧 2 段 + 低圧 4 段のタービンの構成になっている。離陸推力、バイパス比、ファン直径は CF34-10E エンジンと類似しているが、高圧圧縮機が 1 段増えているため圧力比は高くなっており、これによって燃料消費率の低減を実現している。

第 1 表 GE Passport 20 と CF34-10E の主要諸元比較
Table 1 GE Passport 20 compared with CF34-10E specifications

項目	単位	諸元	
		GE Passport 20	CF34-10E
エンジン		GE Passport 20	CF34-10E
搭載機体		Global 7000/8000	Embraer 190/195 など
離陸推力	kN	73.4	81.3 ~ 89.0
	lbf	16 500	18 285 ~ 20 000
バイパス比	—	5.6	5.0
ファン直径	mm	1 318	1 346
	in	51.9	53.0
段数 (FAN/LPC/ HPC/HPT/LPT)	段	1/3/10/2/4	1/3/9/1/4

(注) FAN: ファン
HPC: 高圧圧縮機
LPT: 低圧タービン
LPC: 低圧圧縮機
HPT: 高圧タービン

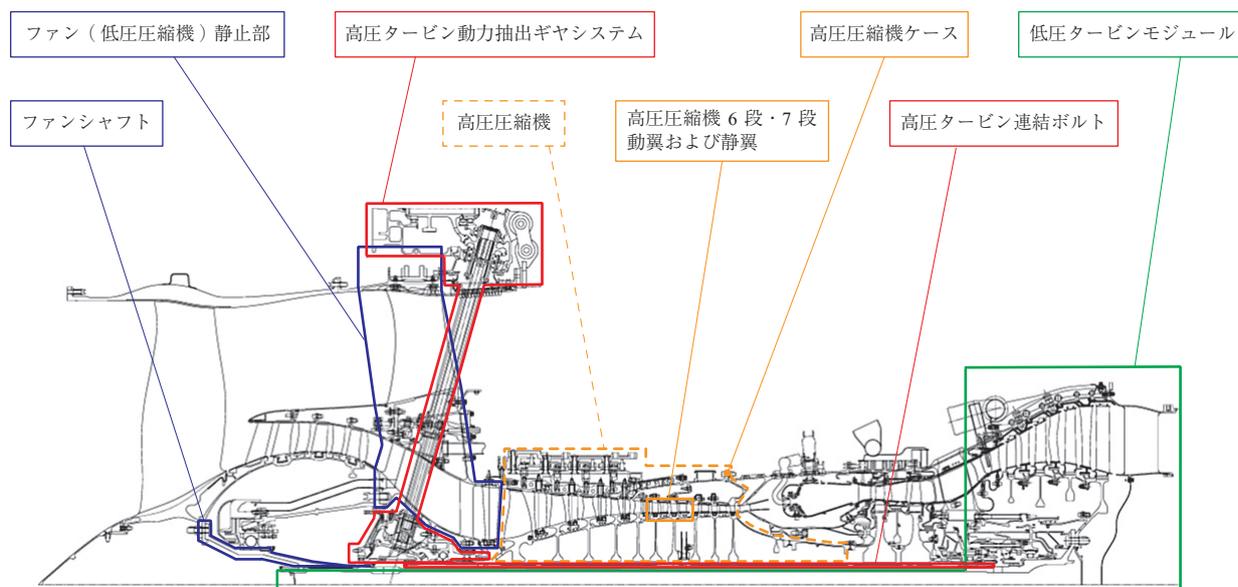
2.2 担当部位

当社が設計・開発・製造を担当している部位は以下のとおりである。第 3 図に担当部位を示す。

- (1) ファンシャフト
- (2) ファン（低圧圧縮機）静止部
- (3) 高圧圧縮機ケース
- (4) 高圧圧縮機 6 段・7 段動翼および静翼
- (5) 高圧タービン連結ボルト
- (6) 低圧タービンモジュール
- (7) 高圧タービン動力抽出ギヤシステム

2.3 開発日程

GE Passport 20 エンジンの開発マイルストーンを第 4 図に示す。2009 年から先行技術開発を進め、2010 年第 4 四半期に Global 7000 および Global 8000 のエンジンと



第 3 図 IHI 担当部位

Fig. 3 GE Passport 20 engine components that IHI is responsible for

西 暦 (y)	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
マイルストーン		プログラムローンチ			開発エンジン初号機試験開始			エンジン型式承認取得予定		商業運航開始予定
設 計		概念設計	基本設計	詳細設計	設計評価/改良設計			改良設計		
製 作				試 作				量産部品製作		
試 験					開発エンジン試験			Global 7000 飛行試験		

第 4 図 GE Passport 20 エンジン開発マイルストーン
Fig. 4 GE Passport 20 engine development milestones

して選定され、製品開発が始まった。2013 年 6 月には開発エンジンの試作初号機による地上試験が開始され、計 11 台の開発エンジンを用いて各種運転試験および要素試験が行われている（第 5 図）。現在はエンジン型式承認取得直前のため開発のピークを迎えており、2016 年にはアメリカ連邦航空局から型式承認を取得する計画で進められている。

また、Global 7000 および Global 8000 の機体型式証明を取得するための各種飛行試験用に、計 14 台のエンジンを供給する計画である。BA 社では Global 7000 の飛行試験用初号機を製造中であり、すでに GE Passport 20 エンジンが搭載されている（第 6 図）。BA 社は 2016 年に Global 7000 の初飛行を予定している。



(提 供 : GE 社)

第 6 図 機体に搭載された GE Passport 20 エンジン
Fig. 6 GE Passport 20 engine mounted on the Global 7000 flight-test vehicle

(a) 氷塊打ち込み試験



(b) 着氷試験



(提 供 : GE 社)

第 5 図 GE Passport 20 エンジンの各種地上試験
Fig. 5 GE Passport 20 engine ground tests

3. GE Passport 20 エンジンの特長

3.1 GE Passport 20 エンジンの特長

通常の旅客機の巡航高度は 11 000 ~ 13 000 m であるが、ビジネスジェット機である Global 7000 および Global 8000 は、通常の旅客機が航行していないため空域の制約が少なく、空気抵抗も少ない高高度（最大 15 500 m）を飛行する。そのため、GE Passport 20 エンジンは高高度での性能も重視した設計となっている。

3.2 ファンブリス

重量の低減を目的に、ファンブレードとディスクが一体となったファンブリスを採用している。従来のダブルテーブルジョイントをなくすことによって、ファン回転部の重量を 20% 低減させることに成功した。第 7 図にファンブリスと統合型案内翼を示す。従来の設計（第 7 図 - (a)）と比べてファンブリスの内側が非常にすっきりとしていることが分かる（第 7 図 - (b)）。また、回転部の重量低減は構造荷重の低減にもつながるため、ファン静止部の重量低減にも寄与している。

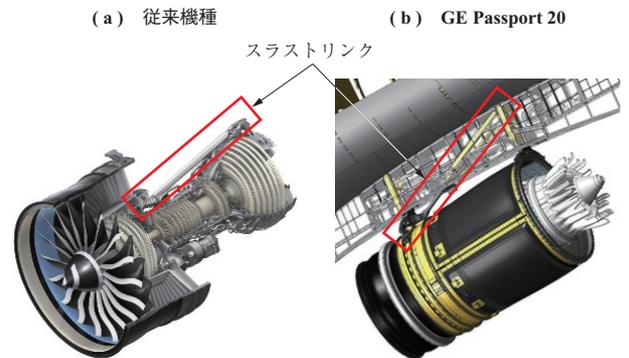
3.3 統合型案内翼

統合型案内翼とは、出口案内翼（Outlet Guide Vane : OGV）にストラット（構造支柱）の機能をもたせたものである。高度な構造解析と空力設計を適用することによってストラットをなくし、ファン静止部重量を 10% 削減させることに成功している（第 7 図参照）。また、ストラットがなくなることによる空力損失軽減によって、性能

面でも燃料消費率の改善に寄与している。

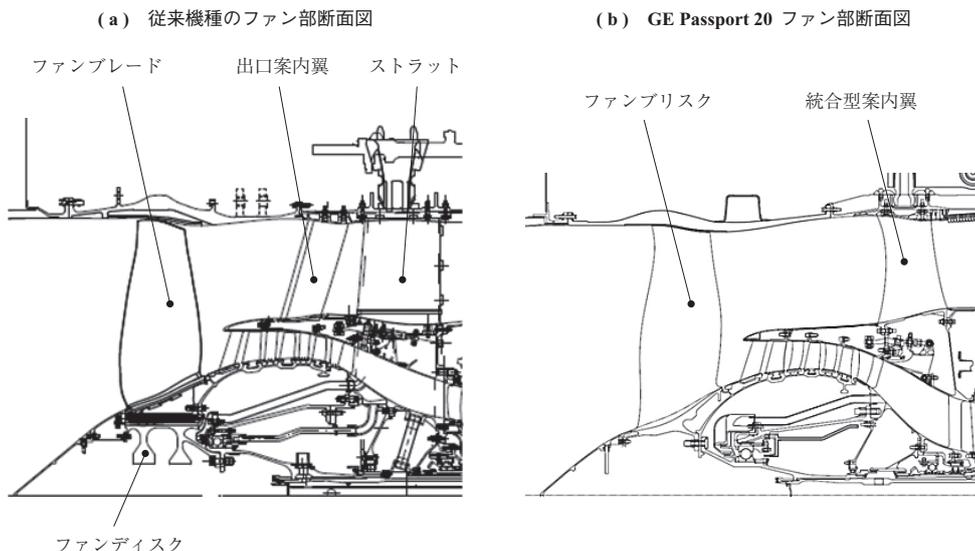
3.4 スラストリンク機構

第 8 図にスラストリンク機構を示す。従来機種種のエンジンでは、スラストリンク（エンジン推力荷重を機体へ伝達する部品）がエンジンのコア部分に接続されている（第 8 図 - (a)）。このため、スラストリンクがバイパス流路を通ることになり空力的な損失を招いている。GE Passport 20 では、スラストリンクをファンケース外側に接続させることによって空力損失を軽減させて、燃料消費率の改善に寄与している（第 8 図 - (b)）。このスラストリンク構造では、ストラットにエンジン推力が伝達されるために構造設計が難しく、同サイズのエンジンでは初めての試みである。



(提供: GE 社)

第 8 図 スラストリンク機構
Fig. 8 Thrust link mechanism



第 7 図 ファンブリスと統合型案内翼
Fig. 7 Fan blisk and integrated guide vane

3.5 高圧圧縮機

全 10 段に対して三次元翼設計を適用することによって、同サイズのエンジンのなかでは世界最高の高圧力比を達成し、燃料消費率を大幅に下げている。

3.6 低圧タービン

Global 7000 および Global 8000 は最大 15 500 m の高高度を飛行するため、従来旅客機のエンジンと比較すると低圧タービン内流れのレイノルズ数は低くなっている。従来の空力設計手法では、高高度すなわち低レイノルズ数での圧力損失が大きくなってしまいうため、三次元多段非定常層流解析を用いた最適化設計を導入し（第 9 図）、高高度で発生しやすい損失を抑えて、燃料消費率の大幅な改善を達成している（第 10 図）。

3.7 最新素材技術の適用

GE Passport 20 ではファンケースに樹脂系複合材料を、またミキサノズルなどにはセラミック系複合材料（Ceramic Matrix Composites：CMC）を採用して、大幅な

重量軽減を図っている。第 11 図に CMC ミキサノズルを示す。

4. テレメトリー計測技術

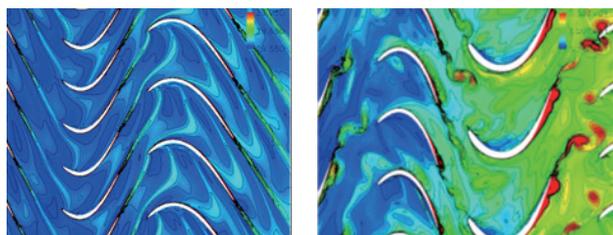
当社は、Datatel 社（ドイツ）のテレメトリーシステムを応用して、ジェットエンジンの計測向けシステムを開発している。テレメトリーシステムとは、無線によって非接触で計測情報を送信するシステムのことである。

GE Passport 20 の開発では、当社が開発した専用テレメトリーシステムが各種運転試験をサポートしている。ジェットエンジンの回転部品の計測データを取得するために、横風試験、過温度試験、振動試験などに採用され、GE 社製エンジンとしては初めて飛行試験（Flying Test Bed：FTB）にも採用された（第 12 図）。2014 年 12 月末の初飛行から 2 か月半に及ぶ計 20 回の飛行試験が行われ、成功裏に完遂された。

FTB 試験とはエンジンを本来搭載される機体とは異なる飛行試験機に搭載して、実飛行条件に合わせた飛行状態で行われるエンジン試験のことであり、GE 社は 2 機の B747 型機を FTB 試験用に保有している。当社社員が GE 社の FTB 試験機に搭乗して試験に立ち会うのは初めてであった。

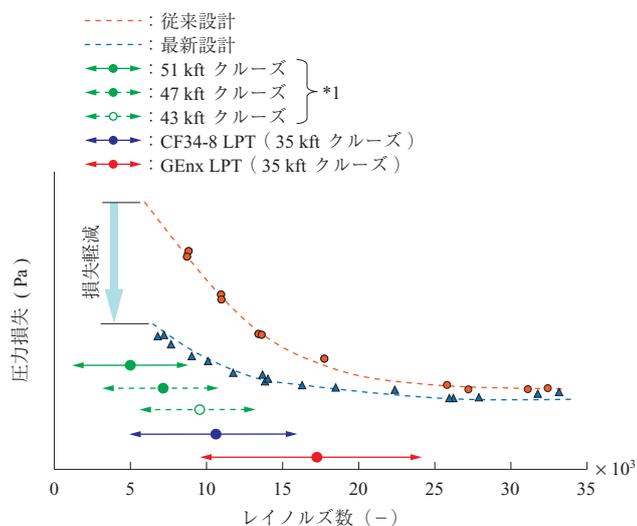
(a) 圧力損失の小さい流れ

(b) 圧力損失の大きい流れ



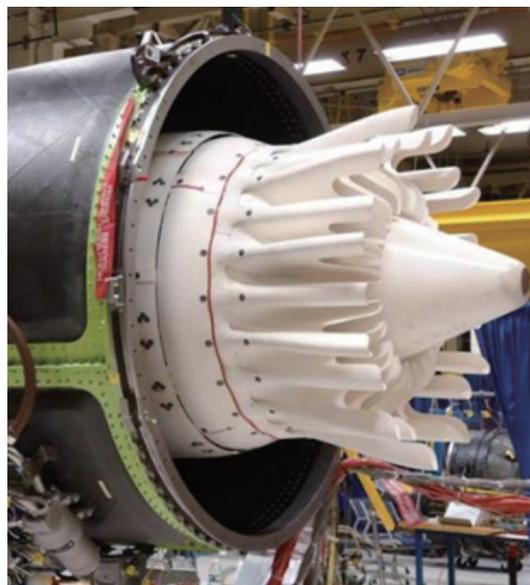
第 9 図 三次元多段非定常層流解析結果

Fig. 9 Numerical analysis of 3D unsteady laminar flow in multi-stage LP turbine



第 10 図 低レイノルズ数領域での圧力損失軽減

Fig. 10 Reduction of pressure loss in low Reynolds number regions



(提供：GE 社)

第 11 図 CMC ミキサノズル
Fig. 11 CMC mixer nozzle

(a) スピナ部に搭載された IHI テレメータ

IHI テレメータ



(b) FTB 試験

GE Passport 20 エンジン



(c) FTB 試験クルー集合写真



(提供: GE 社)

第 12 図 IHI テレメータ搭載の FTB 試験
Fig. 12 Flying Test Bed test with IHI telemeter

5. 結 言

GE Passport 20 エンジンの開発概要と技術的特長について説明した。当エンジンは、お客さまからのニーズである燃料消費率の低減や環境適合性の要求を満足し、次世代を代表するビジネスジェット機用エンジンとなることが期待されている。

また、当社の設計・製造技術だけでなく、当社独自の数値解析手法やテレメトリ計測技術もエンジン開発に採用されることになり、国際共同エンジン開発における当社の貢献度合いはますます大きくなっている。今後もさらに存在感を示せる技術を追求していきたい。

— 謝 辞 —

GE Passport 20 エンジンの開発を進めるに当たり、多大なるご協力をいただいた国内外の関係各団体・企業の方々に感謝の意を表します。また、エンジン全体を取りまとめ、本稿にも情報提供いただいた GE 社、多大なるご支援をいただいている経済産業省、一般財団法人日本航空機エンジン協会のご厚誼^{ご厚誼}に対して、ここに記し深謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 比企野広一, 守屋信彦, 西川秀次: ビジネスジェット機向けエンジン GE Passport 20 の開発
航空技術 No. 719 2015年2月 pp. 46 - 50

USV を経由して UUV からソーナー画像を リアルタイムデータ伝送する試験

— 並列航走による水中リアルタイムデータ伝送システム (URCS) の開発 —

**Experiment to Investigate the Real-Time Data Transmission of Sonar Images
from a Cruising UUV to a Distant Support Vessel via a USV**

— Development of an Underwater Real-Time Communication System (URCS) using Parallel Cruising —

鈴木俊光	航空宇宙事業本部防衛システム事業部機器技術部	主査
須藤拓	技術開発本部総合開発センター機械技術開発部	主査
小林陽	技術開発本部総合開発センター制御技術開発部	
越智文俊	海洋・鉄構セクター愛知工場設計部	主査
鈴木尚也	防衛装備庁 艦艇装備研究所システム研究部	防衛技官
蒲英樹	防衛装備庁 艦艇装備研究所システム研究部	防衛技官
北島仁	防衛装備庁 艦艇装備研究所システム研究部	防衛技官

防衛省技術研究本部から依頼を受け、2010年2月に「無人航走体構成要素（その1）の研究試作」、2011年2月に「無人航走体構成要素（その2）の研究試作」の研究を開始した。そのなかで無人水中航走体（UUV）と無人水上航走体（USV）を用いた水中リアルタイムデータ伝送システム（URCS）、および協制御を用いたUUVとUSVの並列航走技術（PaCTeCC）を開発した。本稿では2014年7月に実施した「UUVから遠隔の支援船にUSVを経由してソーナー画像をリアルタイムに伝送する試験」の結果について述べる。

We have developed the Underwater Real-time Communication System (URCS) and a method called Parallel Cruising Technology by using Cooperative Control (PaCTeCC). The URCS is a system that allows an Unmanned Surface Vehicle (USV) to relay information on the status of an Unmanned Underwater Vehicle (UUV) together with sonar images to a distant base in real-time. This research was conducted in phases 1 and 2 of the “Study of UUV Technology,” a research program carried out for Japan Ministry of Defense. A sea trial involving the real-time data transmission of sonar images from a cruising UUV to a distant support vessel via a USV was conducted in July 2014. In this paper, we describe the PaCTeCC method and report the experiment results.

1. 緒 言

近年、UUV（無人水中航走体）を使った海底調査がさまざまな場面で実施されている。観測地域の広がりに伴い、有人の支援船が接近できないような海域での観測も予想される。津波、海難事故、または航空機墜落の後の捜索では、発見した物体を直に見分ける必要がある。このような場面で、効果的な観測を行うためには、離れた基地へ情報を伝送することや、リアルタイムの情報を基に観測コースを変更することが必要になる。

離れた場所からUUVを操作する例として、浮上したUUVを衛星通信を介して遠隔で操縦する研究がJAMSTEC（国立研究開発法人海洋研究開発機構）吉田

ら⁽¹⁾によって報告されている。また、ASIMOVプロジェクトでは、オペレータが介在するUUVとUSV（無人水上航走体）の並列航走が開発されている⁽²⁾。さらにLBL（Long Base Line）ナビゲーションでUUVを追跡するUSVが開発されている⁽³⁾。

UUVを離れた支援船から操作し、水中を航走しているUUVから観測データをリアルタイムに取得することは非常に有効であるが、いまだその技術は開発されていない。そこで、筆者らはUSVを中継局として用いた水中リアルタイムデータ伝送システム（URCS）を開発した。このUSVは航走中のUUVのステータスや観測データを受信し、離れた支援船へ伝送することができる。観測データはリアルタイムに伝送される。USVは二つの音響通信器を

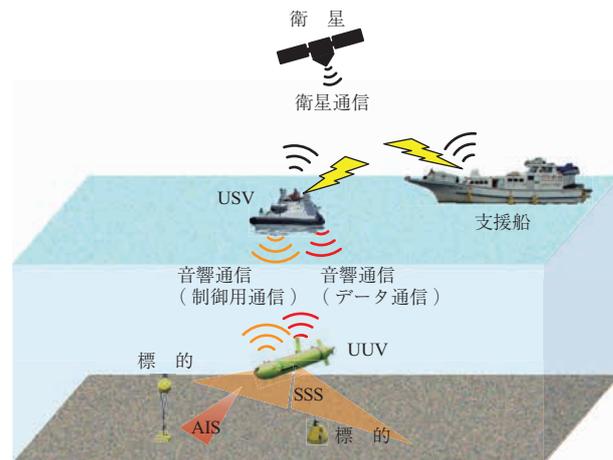
使って UUV と通信し、インマルサット（通信衛星による移動体通信を提供する民間企業）衛星通信（以下、衛星通信）を使って離れた場所と通信する。二つの音響通信器の一つは画像データを伝送する目的で使われる高速データ通信、他方はステータスやコマンドを伝送する目的で使われる制御用通信である。高速データ通信に使われるモデムは画像データを伝送するため制御用通信モデムに比べて伝送容量が大きいものを選定した。一般的に音響モデムを使ってデータ容量の大きい通信を行うためには電波と同じように高い周波数を使う必要があり、指向性が強くなる⁽⁴⁾、⁽⁵⁾。音波信号はスラントレンジ（センサから目標物までの直線距離）が大きくなればなるほど減少していく。この観点から USV は UUV の直上に保持するのがデータ伝送にとって効果的である。しかしながら、波・潮流・風などの外乱が多い海で UUV と USV の位置関係を保持することは困難である。そこで筆者らは協調制御を用いた UUV と USV の並列航走技術（PaCTeCC）を開発し UUV と USV に実装した。

筆者らは海で URCS と PaCTeCC の効果を確認するために UUV と USV を 1 台ずつ製作した。2014 年 7 月に USV を経由して、水中を航走する UUV から、ソナー画像を遠隔の支援船にリアルタイムデータ伝送する試験を実施し、その機能を確認した。

2 章では開発した URCS のシステムを詳細について、3 章ではシステム構成と機能の実装について説明する。4 章では試験結果について説明し、5 章では結論について述べる。

2. URCS

URCS の概念図を第 1 図に示す。はじめに UUV はサイドスキャンソナー（SSS：Side Scan Sonar）などのソナーを使って海底画像を取得する。次に UUV は画像データを USV に高速データ通信を使って伝送する。最後に USV がそのデータを離れた支援船に衛星通信を使って伝送する。UUV と USV はデータ伝送の間 PaCTeCC



第 1 図 URCS の概念図
Fig. 1 Schematic illustration of the URCS

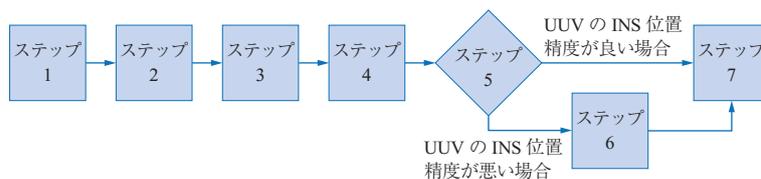
を使って並列航走する。リアルタイムデータ伝送を実現するために USV を常に UUV の直上に配置し続けることが効果的なためである。

選定した高速データ通信用のモデムは、45 度の指向性をもっている。これは我々が製作した UUV の制御深度のうち最も浅い 20 m の場合、水平偏差が 20 m 以内になるように USV を保持する必要があることを意味している。

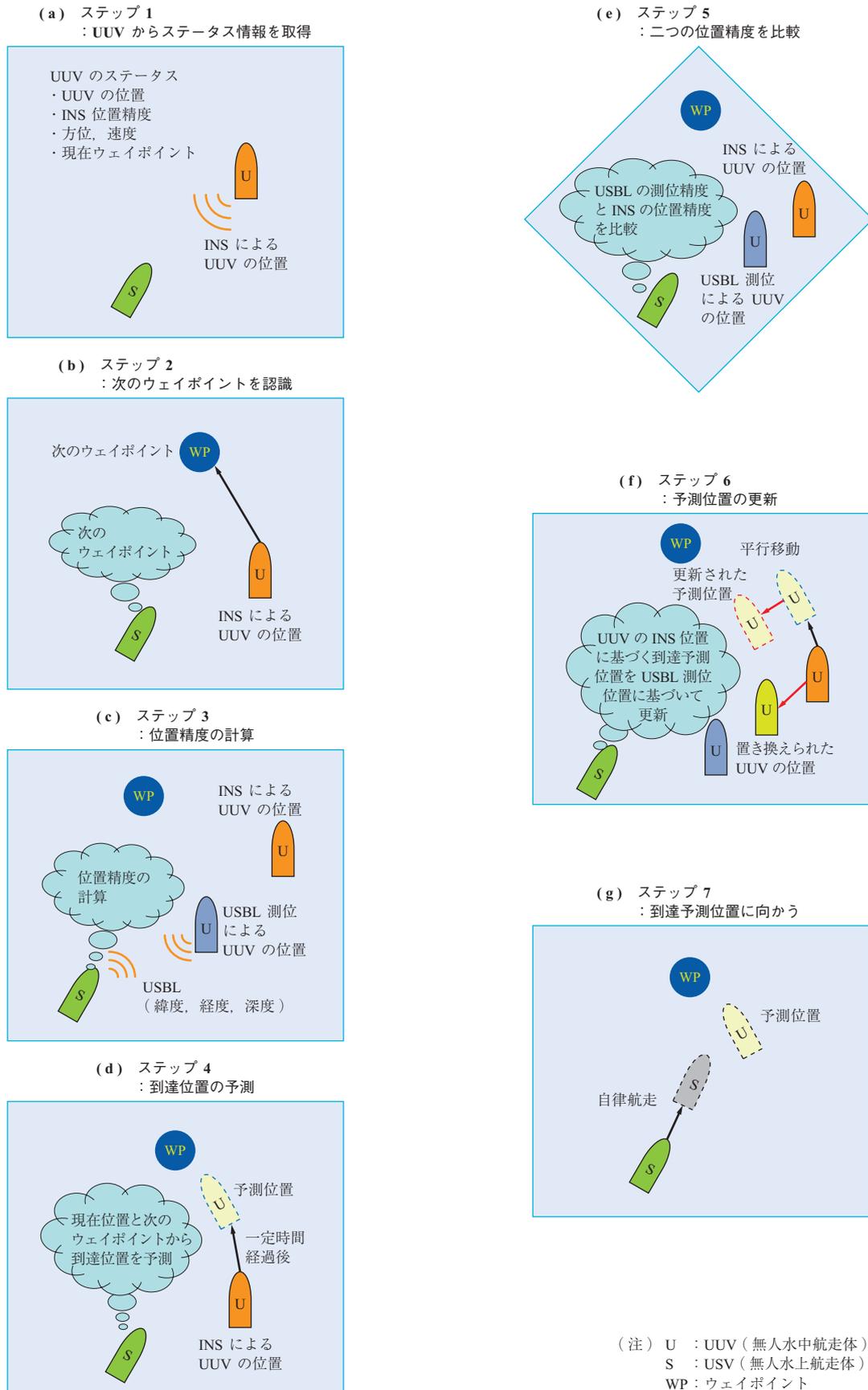
UUV マスター時の PaCTeCC の手順（ステップ）を第 2 図に示し、ステップ 1～7 の詳細を次に示す。PaCTeCC はステップ 1～7 を繰り返し実行する。

ステップ 1（第 3 図 - (a)）

USV は制御用通信を使って UUV のステータスを得る。ステータスには UUV の位置、INS（慣性航法装置）位置精度、方位、速度、現在ウェイポイント（水面からの深度もしくは海底からの高度と、緯度、経度およびウェイポイントを通過したとみなす範囲で表される通過点）などが含まれる。次のステータスや測位データが取得できない場合は前回取得した UUV のステータスを基に到達位置の予測をあらためて実施することで航走を継続することができる。



第 2 図 PaCTeCC の手順（7 ステップ）
Fig. 2 PaCTeCC procedure (7 steps)



第 3 図 PaCTeCC の手順 (ステップ 1~7)
Fig. 3 PaCTeCC procedure (steps 1-7)

ステップ2 (第3図 - (b))

USV はステータスデータから UUV が次に目指すウェイポイントを認識する。

ステップ3 (第3図 - (c))

USV は USBL (Ultra Short Base Line) で UUV の位置を取得し、USBL で測位した UUV の位置精度を計算する。

ステップ4 (第3図 - (d))

USV は UUV の INS 位置と次のウェイポイントを基に、一定時間後の UUV の到達位置を予測する。

ステップ5 (第3図 - (e))

USV は USBL の測位精度と UUV の INS 位置精度を比較する。

ステップ6 (第3図 - (f))

もし UUV の INS 位置精度が悪い場合は、USV は UUV の INS 位置に基づく到達予測位置を USBL 測位位置に基づいて更新する。

ステップ7 (第3図 - (g))

USV は自律航走機能によって到達予測位置に向かって制御される。

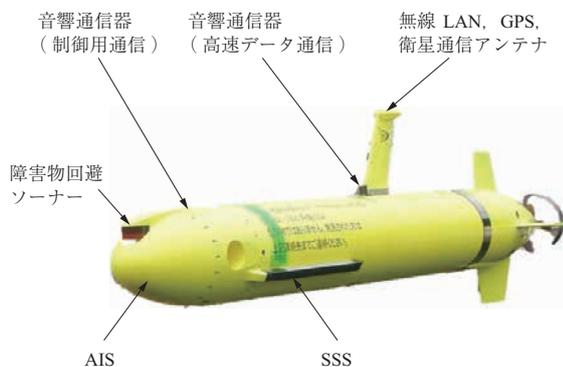
3. 機 材

URCS は以下の要素で構成されている。

3.1 UUV

UUV は、① 自律航走機能 ② 障害物回避機能 ③ 画像収集機能 ④ 画像情報処理機能 ⑤ 画像伝送機能、を有している。外観を第4図に、諸元を第1表に示す。UUV は海底画像のための SSS と、前方のための音響画像ソナー (AIS : Acoustic Imaging Sonar) を備えている。

通常、UUV は現在位置を INS から取得する。DVL (Doppler Velocity Log) がデータを取得できる海底高度を



第4図 UUVの外観
Fig.4 UUV overview

第1表 UUVの諸元
Table 1 UUV specifications

項目	仕様
全長	3.5 m
重量	350 kg (気中) -2.0 kg (水中)
最大深度	200 m
最大速度	7 kt
推進器	・プロペラ (主推進用 3 枚羽) ・サブスラスター (回頭用)
航走時間	12 時間 (5 kt 航走時)
センサ	・ INS ・ DVL ・ 深度圧器 ・ GPS ・ 障害物回避ソナー ・ SSS ・ AIS
通信	・ 無線 LAN ・ イリジウム衛星通信器 ・ 音響通信器 (高速データ通信) ・ 音響通信器 (制御用通信) ・ USBL 測位装置

航走しているときには INS は DVL データを参照する。しかし、この INS-DVL システムを用いると、時間が経過するにつれ位置誤差が蓄積する。そこで、誤差が期待値よりも悪くなる前に INS 位置を正確な計測値でアップデートする必要がある。UUV の位置は USV の USBL と GPS (Global Positioning System) によって計測され、音響通信で送られ、定期的にアップデートされる。そのため、UUV の位置誤差は限定的で、位置精度は良い。

ソナーで取得した音響画像データはデータ伝送の前に圧縮される。圧縮の品質は 10 段階で設定可能である。これは目標物の大きさや海域の通信環境に応じて設定する。一方、生データは UUV 内部のハードディスクドライブに保存され、UUV を揚収後にイーサネットを使ってアクセスすることができる。画像データの伝送に使用される音響モデムには、伝送レートが 32 kbps のものを採用した。

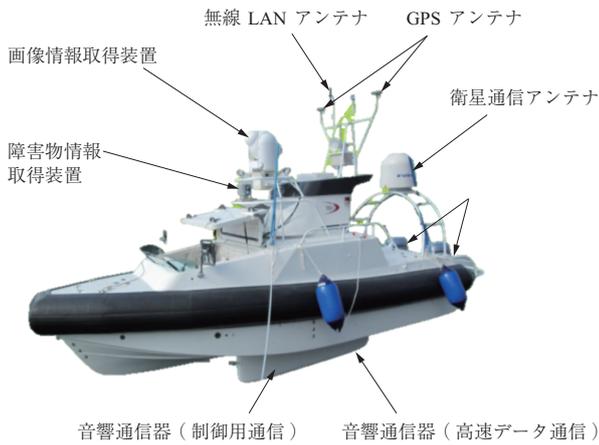
3.2 USV

USV は、① 自律航走機能 ② 障害物回避機能 ③ UUV 測位機能 ④ 画像情報取得機能、を有している。

USV の外観を第5図に、諸元を第2表に示す。

3.3 管制ユニット

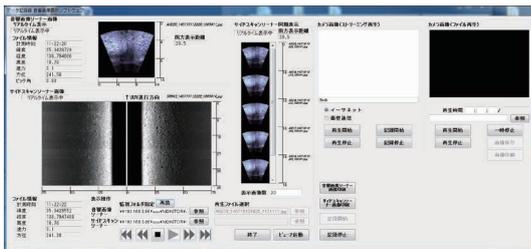
管制ユニットは 2 台のラップトップ PC、衛星通信装置、非常停止装置で構成されている。ラップトップ PC のうち 1 台はデータ表示に使われ、もう 1 台は UUV と USV の操作に使われる。操作画面のイメージを第6図にデータ表示器、第7図に操作画面を示す。データ表示用 PC はリアルタイムで通信された AIS 画像と SSS 画像を



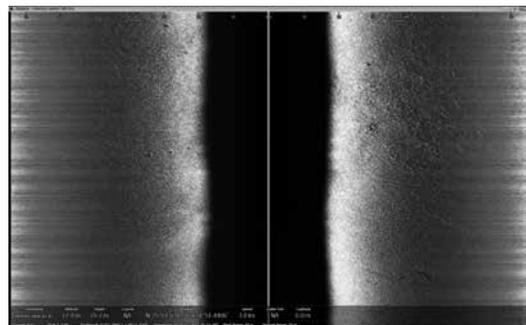
第 5 図 USV 外観
Fig. 5 USV overview

第 2 表 USV の諸元
Table 2 USV specifications

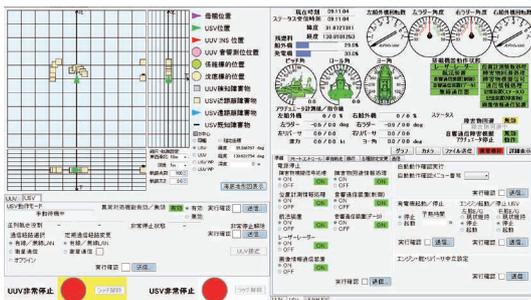
項目	仕様
全長	8 m
幅	2.85 m
高さ	4.8 m
重量	3 100 kg (気中)
最大速度	7 kt
推進器	ウォータージェット船外機 2 機
航走時間	12 時間 (5 kt 航走時)
センサ	<ul style="list-style-type: none"> ・ INS ・ USBL 測位装置 ・ GPS ・ 障害物情報取得装置 ・ 画像情報取得装置
通信	<ul style="list-style-type: none"> ・ 無線 LAN ・ インマルサット衛星通信器 ・ 音響通信器 (高速データ通信) ・ 音響通信器 (制御用通信)



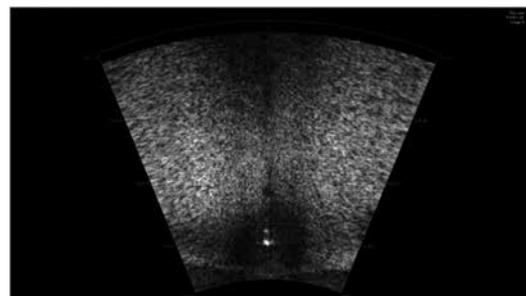
第 6 図 データ表示器
Fig. 6 Data viewer



第 8 図 SSS 画像
Fig. 8 Image of SSS data



第 7 図 操作画面
Fig. 7 Control console



第 9 図 AIS 画像
Fig. 9 Image of AIS data

表示することができる。SSS と AIS の画像を第 8 図と第 9 図に示す。操作用 PC はリアルタイムで UUV と USV のステータスを表示することができる。

UUV, USV および管制ユニットは LAN で接続されている。UUV や USV が海面で管制ユニットに近い場合は無線 LAN を使って操作することができる。無線 LAN 通信ができない距離の場合は衛星通信 (一般総称) を使った通信が可能である。UUV が水中にいるときは衛星通信または無線 LAN を使って USV にアクセスし、USV の制御用音響モデムを使って UUV と通信を行う。

データ伝送の音響モデムは一方向通信である。管制ユニットは画像伝送が成功したかどうかを監視し、失敗した場合は制御用通信を介して該当画像データを再送する指令を出してリアルタイムでの表示を優先させる。

遠く離れた管制ユニットと USV 間の通信のために、USV は衛星通信を採用している。伝送レートは 256 kbps である。衛星通信は帯域保障タイプもしくはベストエフォートタイプをセレクトすることが可能である。これらの衛星通信で UUV が取得した音響画像、USV が取得した周囲画像と USV および UUV のステータスが受信され、USV および UUV への指令が送信される。

4. 実海域試験

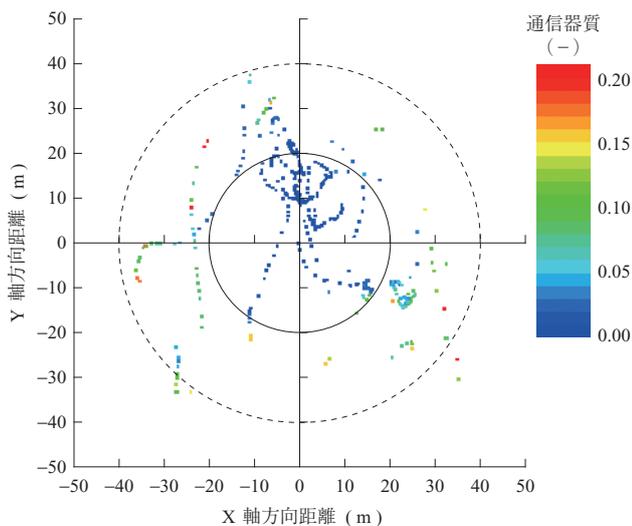
実海域試験は 2014 年 6 ~ 7 月に日本の駿河湾で実施された。

4.1 高速音響通信装置の性能確認

確認は駿河湾の水深 35 m のエリアで行われた。筆者らは、UUV が深度 20 m をくし型に自律航走している間に、USV を UUV と高速データ通信ができなくなるまで UUV から離すようにマニュアルで走らせた。音響通信可能範囲の確認結果を第 10 図に示す。この図は UUV を上から見た図である。原点は UUV の中心で、UUV の前方はこの図の上側になる。USV が UUV と通信成功した位置をプロットした。点の色は音響装置メーカーで規定した通信品質を意味する。低い（青い）方が良い。内側の円の半径は 20 m で、これは 45 度の指向性の範囲であり、UUV と USV が保持すべき水平偏差である。高速データ通信の音響装置は 45 度の指向角で適切に動作できることが確認された。仕様通りの性能である。さらに、45 度の指向角の範囲外においても通信できていることが分かる。

4.2 ソナー画像のリアルタイムデータ伝送試験

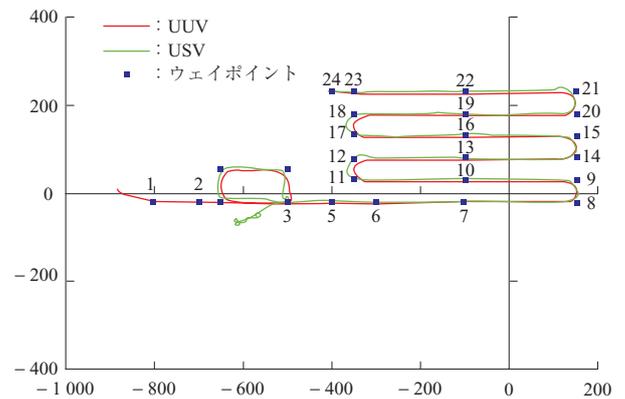
ソナー画像のリアルタイムデータ伝送試験は駿河湾の水深 35 m 前後のエリアで行われた。第 11 図に UUV と USV の航跡を示す。航走速度は 3 kt、航走時間は 46 分 20 秒、航走距離は 5.5 km であった。AIS の圧縮品質は 1（画像サイズ最小）とし、各 AIS 画像の圧縮後のサイズは 2 kB であった。AIS 画像の伝送周期は 5 s。SSS の



(注) 音響通信確認 (UUV 深度 20 m)

第 10 図 音響通信可能範囲の確認結果 (単位: m)

Fig. 10 Results for verification of coverage area for acoustic communication (unit: m)

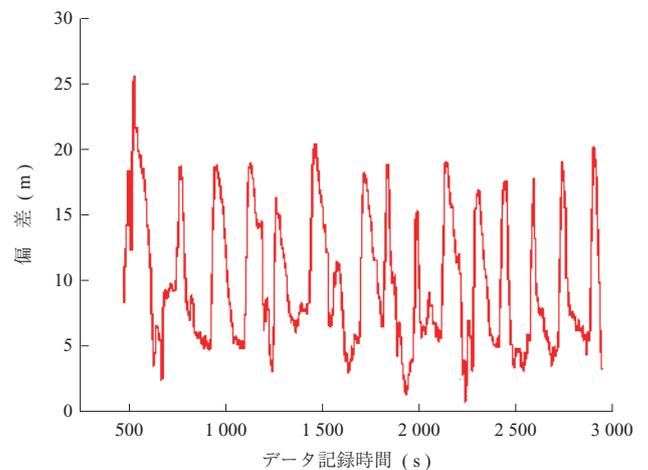


第 11 図 UUV と USV の航跡 (単位: m)
Fig. 11 Trajectories of UUV and USV (unit: m)

圧縮品質は 1（最小）とし、各 SSS 画像の圧縮後のサイズは 9 kB であった。SSS 画像の伝送周期は 30 s。USV は PaCTeCC で制御した。

試験中の UUV と USV の水平偏差を第 12 図に示す。縦軸は水平偏差を示し、横軸は試験区間での経過時間を示す。試験区間は第 11 図に示す 5 ~ 23 である。UUV と USV の水平距離はほぼ 20 m 以内を保っていたことが分かる。第 10 図に示したとおり、この距離であれば高速データ通信が可能である。

データ伝送の結果を第 3 表に示す。UUV は試験中に SSS の画像を 72 画像、AIS の画像を 348 画像送信した。USV は SSS 画像を 72 画像、AIS 画像を 339 画像受信した。伝送成功率は SSS が 100%、AIS が 97.4% であった。SSS の 11 画像と AIS の 45 画像が再送された。これより、高い成功率で画像を伝送できることが分かる。



第 12 図 UUV と USV の水平偏差

Fig. 12 Horizontal distance between UUV and USV

第3表 データ伝送の結果
Table 3 Data transmission results

項目	UUV 送信データ数	USV 受信データ数	再送信指令による USV 受信データ数	送信成功率 (%)
SSS	72	72	11	100
AIS	348	339	45	97.4

5. 結 言

筆者らは URCS と PaCTeCC の技術を開発した。そしてリアルタイムデータ伝送を実現した。その技術は UUV と USV を用いた実海域試験において証明された。これらの技術を用いることによって、より効果的に海洋研究が行われることが期待できる。さらに、複数箇所パトロールや海域のモニタリングにも適用できる。将来的にはこの技術を複数 UUVs システムに応用できる。

— 謝 辞 —

本研究は防衛省の「無人航走体構成要素の研究試作その1、その2」を基に、防衛省が「所内試験」を実施した結果を基にしています。

実海域試験においてサポートして下さった株式会社オキシーテックの関係各位に対して、ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

(1) K. Yoshida, K. Izumi, H. Yoshida, R. Miura and F. Ono : Demands on Reliable and Robust Wireless Communications under Land-Sea-and-Air Extreme Environments IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences Vol. E96-A No. 5 (2013. 5) pp. 844 - 852

(2) António Pascoal, Paulo Oliveira, Carlos Silvestre, Luis Sebastião, Manuel Rufino, Victor Barroso, João Gomes, Gerard Ayela, Pascal Coince, Marcus Cardew, Anne Ryan, Hugh Braithwaite, Nicholas Cardew, Jonathan Trepte, Nicolas Seube, J. Champeau, P. Dhaussy, V. Sauce, R. Moitié, Ricardo Santos, Frederico Cardigos, Marc Brussieux and Paul Dando : Robotic ocean vehicles for marine science applications: the European ASIMOV project OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition Vol. 1 (2000. 9) pp. 409 - 415

(3) Robert R. Williams : Design and Experimental Evaluation of an Autonomous Surface Craft to Support AUV Operations Massachusetts Institute of Technology (2007. 4)

(4) H. Ochi, T. Shimura, T. Sawa, Y. Amitani, H. Nakajoh, T. Hyakudome, S. Tsukioka, T. Murashima and T. Aoki : Underwater Acoustic Data Transmission System for AUV “URASHIMA” The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2004) CD-ROM Vol. 2 (2004. 5)

(5) H. Ochi, Y. Watanabe and T. Shimura : An Experiment of Short Range Underwater Acoustic Communication Using QPSK, ECUA2006 (2006. 6) pp. 849 - 854

再生医療の実現化に向けた、iPS 細胞自動大量培養装置の開発

Development of iPS Cell Automated Mass-Culture Machine for Regenerative Medicine

坂井 慎一	技術開発本部総合開発センター化学システム開発部 博士（工学）
石井 浩介	技術開発本部総合開発センター化学システム開発部 主査 博士（理学）
福地 泰彦	IHI ASIA PACIFIC PTE. LTD. Research & Development Centre, General Manager
藤田 穰	新潟トランス株式会社 技術・開発室交通技術部 マネージャー
谷口 英樹	横浜市立大学 大学院医学研究科 臓器再生医学 教授 医学博士

iPS 細胞の出現に伴い、再生医療の実現が期待されている。iPS 細胞は手作業で培養させているため、ミスやコンタミネーションが起りやすいという問題がある。また、作業が煩雑なために大量に培養できない。当社では大量培養技術と自動化技術を用いてヒト iPS 細胞の自動培養装置の開発を行い、この課題に取り組んでいる。大量培養に適した培養方式である浮遊培養を基軸に技術開発を行い、新規浮遊培養用リアクターとそれを用いた自動培養試験機の作製を行った。本稿ではこれらの取組みについて紹介する。

It is expected that the invention of iPS cells will lead to the realization of regenerative medicine. Because iPS cells are cultivated by hand, there are problems involving mistakes, contamination and the inability to culture the cells on a large scale. IHI is developing an iPS cell automated mass-culture machine to solve this problem by applying large-scale culture and automation technologies. We have developed a novel bioreactor for large-scale suspension culture and a test machine including the bioreactor. In this paper, we introduce these efforts.

1. 緒 言

当社は、グループ会社である株式会社 UNIGEN で動物細胞によるワクチン原薬製造事業、株式会社 IHI プラントエンジニアリングによる医薬品製造プラント事業を行うなど、医薬分野へ進出をしている。

今後、高齢化社会へ向かうなかで、大きな期待がもたれている再生医療分野に対して、産業機械などで培われた自動化技術やバイオ医薬生産のための培養技術などを用いて自動培養装置の開発を行っている。再生医療の普及に貢献するため、現在人の手で行っている培養操作の時間を低減させ、効率良く品質の良い細胞を大量培養できる技術を目指している。本稿では開発中の自動培養装置の要素技術について述べる。

2. 大量培養・自動培養の必要性

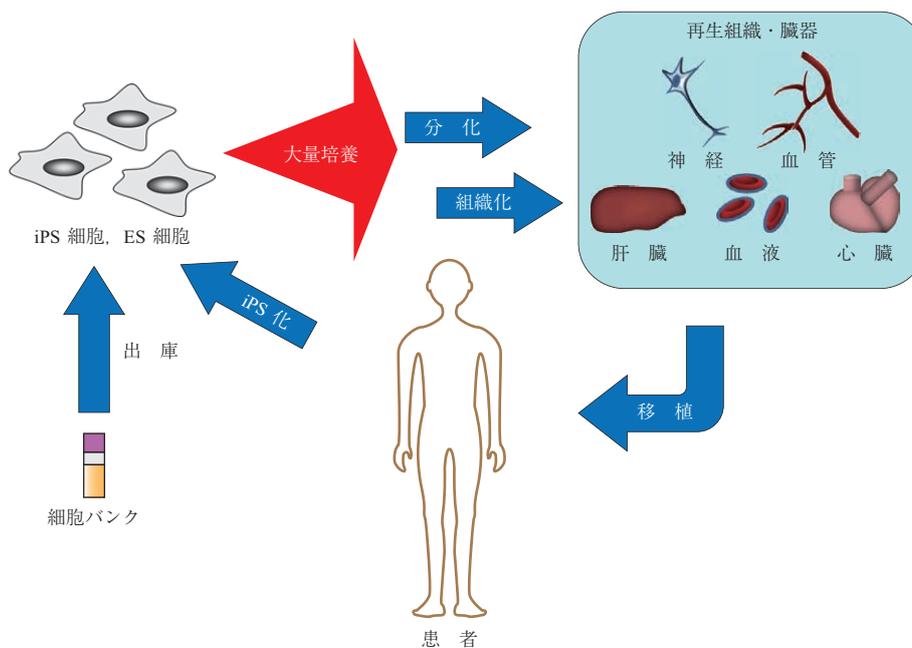
再生医療の工程は iPS 細胞や ES 細胞を培養し、分化させて、組織化し、機能不全な体の一部に再生させる。第 1 図に再生医療の基本的工程を示す。大型の臓器を作製するためにはそれらのソースとなる大量の細胞が必要になる。たとえば、肝臓は 2.50×10^{11} 個、心臓は $7.00 \times$

10^{10} 個、腎臓は 2.60×10^{10} 個の細胞から成り立っており⁽¹⁾、これらの臓器や細胞を作り出すためには、同程度の細胞数が必要になる。第 1 表に臓器を構成する細胞数を示す。

現在、細胞の培養はシャーレを用いて手作業で行われているが、前記の細胞数をシャーレで培養すると数千枚～数万枚以上が必要になる（第 1 表参照）。オペレーターが 1 日に操作できるシャーレが 100 枚程度であることを考慮すると、これだけの枚数のシャーレの維持培養は人の手では不可能である。また、人の手による培養は個人差や技量の差から細胞の品質に差異がでるおそれがある。再生医療の実現化には、大量かつ自動的に培養を行う装置が切望されていた。

3. 現在の培養方法

再生医療のソースとなる iPS 細胞や ES 細胞は付着性のある細胞であり、足場（コラーゲンなどのタンパク質）やほかの細胞に接着しないと生存・増殖できない。現在、再生医療研究の現場ではシャーレの底面を細胞接着マトリックスでコートし、その上で細胞を培養する方法^{(2),(3)}（平面培養）が主な培養方法として行われている。それに



第 1 図 再生医療の基本的工程
Fig. 1 Basic process of regenerative medicine

第 1 表 臓器を構成する細胞数
Table 1 Number of cells in body organs

臓器	重量 (g)	細胞数 (セル)	シャーレ換算 ^{*1} (枚)
血液	5 000 ~ 6 000 ml	2.50×10^{13}	2 500 000
肝臓	1 200 ~ 1 400	2.50×10^{11}	25 000
心臓	300 ~ 400	7.00×10^{10}	7 000
腎臓	150	2.60×10^{10}	260

(注) *1: $\phi 10$ cm シャーレで 1×10^7 セル培養と仮定した値

対して、細胞を塊の状態ですべて培地中に浮遊させて培養する方式（浮遊培養）も存在する。すでにスピナーフラスコを用いて iPS 細胞を細胞塊のまま攪拌培養した報告がある^{(4), (5)}。

大量培養に適した培養方式を増殖速度・未分化率・大量培養・技術的難易度の観点から比較した。

増殖速度について考えてみると、平面培養では培地中の栄養成分は拡散によって供給されるが、浮遊培養では対流によって栄養成分が供給されるため、増殖速度は浮遊培養の方が良くなると考えられる。

未分化率に関しては、細胞塊の状態ですべて培養する場合には、細胞塊が大きくなるにつれて細胞内部への未分化維持成分や栄養成分が届きにくくなり、細胞塊内部の細胞が分化または死滅してしまう可能性がある。浮遊培養では安定して培養できる細胞塊の径の制限があることが予想され、細胞塊が大きくなり過ぎないようにする技術が必要になる。

大量培養においては、平面培養はより多くの面積が必要になり、直径が大きなシャーレを使用するか枚数を多くする方法しかなく、大量培養への適性は低い。一方、浮遊培養は細胞の懸濁液として培養を行うため、培養容器を大きくすることで大量培養への適応が可能と考える。通常の攪拌培養では $1 \sim 2 \times 10^6$ セル / ml ほどの細胞が培養できる^{(4), (6)}。

浮遊培養は細胞密度の調整や培養する細胞塊径のコントロールなどが必要であることが予想されること、攪拌によって与えられるせん断応力が細胞にダメージを与える場合があるため、詳細な制御を行う必要があり、静置培養よりは技術的難易度が高い。

そのほか、細胞塊の浮遊培養とは別に担体表面に細胞を付着させて浮遊させる培養方法⁽⁷⁾（担体浮遊培養）がある。静置培養の利点と浮遊培養の利点を合わせた培養方式であるが、細胞を担体に安定的に付着させる技術は確立されていない。また、細胞を付着させる担体の径は $200 \mu\text{m}$ ほどであり、せん断応力の影響を受けやすいため、技術的難易度は高い。

以上の各培養方式の特長を第 2 表に示す。第 2 表から担体浮遊培養は最も良好な培養が行える可能性が高いが、技術的難易度も同時に高くなっていることが分かる。筆者らは、自動かつ大量に培養できる培養方式として浮遊培養を最初のターゲットとして技術開発を進めることにした。

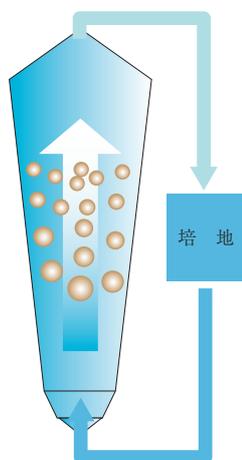
第 2 表 各培養方式の特長
Table 2 Characteristics of incubation methods

培養方式	増殖速度	未分化率	大量培養	技術的難易度
平面培養	△	○	△	低
浮遊培養 (細胞塊)	○	△	◎	中
浮遊培養 (担体付着)	○	○	◎	高

(注) ◎, ○, △: 適正度の評価

4. 浮遊培養のための新規リアクタ

浮遊培養では細胞へのせん断応力を抑えた培養を行うことが重要である。そこで今までに例のない新規培養リアクタを開発している。第 2 図に新規リアクタの概念図を示す。このリアクタは下方から上方へ培地を流し、その上昇流の中で細胞を培養する。リアクタ形状は上に行くほど径が大きくなっているため、上昇流は下部ほど速く、上部ほど遅い。管内を流れる流体は摩擦によって中心部の流速が速く管壁に向かうほど流速は遅くなるが、このリアクタにはそのような管内の流速勾配を緩和した均一な押し出し流れ（プラグフロー）を形成する工夫がされている。第 3



第 2 図 新規リアクタの概念図
Fig. 2 Conceptual diagram of new reactor



第 3 図 新規リアクタ内に形成されるプラグフロー
Fig. 3 Plug flow formed in new reactor

図に新規リアクタ内に形成されるプラグフローを示す。そのためこの流れの中では、細胞塊はその沈降速度が上昇流とつりあった位置に保持され、大きな細胞塊ほど下に小さな細胞塊ほど上に存在することになる。均一なプラグフローを作ることによって、リアクタ内の古い培地と下部から流入する新しい培地は混ざることがなく、培地交換がスムーズにできる。

このようにして細胞を培養すれば細胞にかかる力は軽減され、細胞にダメージを与えずに培養することができると考える。そのほかに、細胞がリアクタ内に保持されるため、培養を行う際に分離機構が必要なく、遠心分離や分離膜などの分離装置がいらないシンプルな培養系が可能になる。

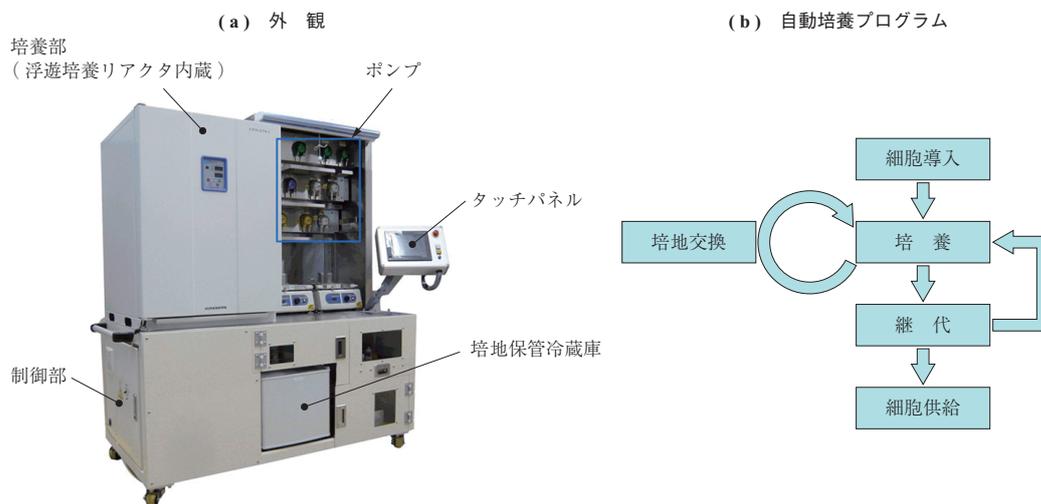
5. 要素試験機の開発

前記で述べたリアクタを内部に設置した自動培養装置の要素試作機を作製した。第 4 図に自動培養要素試験機を示す。この試作機は、① 培養リアクタを内蔵する CO₂ インキュベータ ② 培地などの保存のための冷蔵庫 ③ 制御部 ④ 操作用のタッチパネル ⑤ 培地や薬液を送液する多数のチューブポンプ、から構成され、これらをコントロールすることでさまざまな培養プロセスに対応できるように設計されている。ここで用いる培養槽や配管類は滅菌済みの密閉系を想定しており、滅菌殺菌機能を設けなくても微生物による汚染（コンタミネーション）の可能性を低減できる。最終的には自動で継代培養を行うことを目標としている。この要素試験機の設置面積はたたみ 1 畳ほどあり、現在は小型化を進めている。

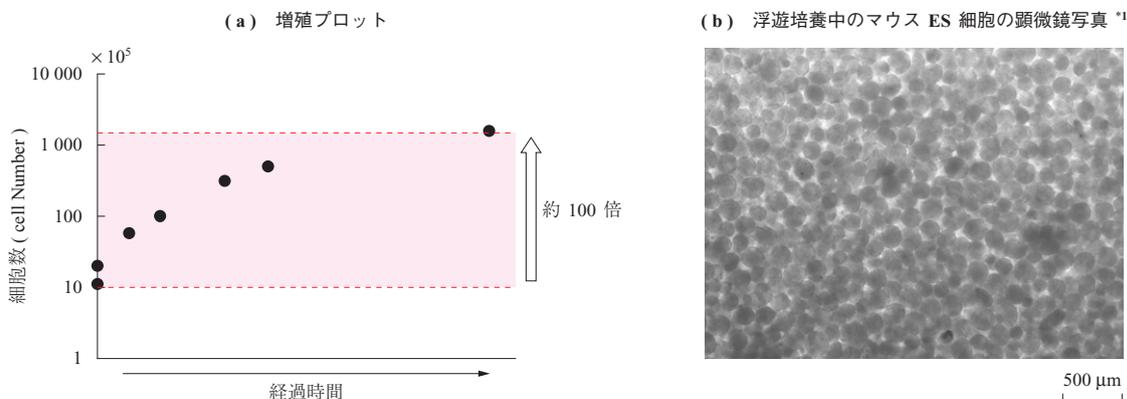
6. マウス ES 細胞の培養試験

ヒト iPS 細胞を用いて培養試験を行う前にマウス ES 細胞で試験した。ヒト iPS 細胞は倫理委員会の設置が必要になるなど、簡単に使用できないためである。加えて、マウス ES 細胞で得られた知見をヒト iPS 細胞での培養試験に活かすためである。

新規リアクタで培養すると 1 日後には細胞塊が形成された。そのまま培養を継続すると、マウス ES 細胞の細胞塊培養で 1×10^4 セル/ml から 1×10^6 セル/ml まで約 100 倍の増殖培養が可能であることが分かった⁽⁸⁾。第 5 図にマウス ES 細胞の培養試験を示す。培養したマウス ES 細胞の未分化性を免疫染色法で調べた結果、未分化性を示すマーカーである Nanog, Oct4, Sox2 が確認でき



第 4 図 自動培養要素試験機
Fig. 4 Test model of automated cell culture machine



(注) *1: マウス ES 細胞が数千個～数万個の塊の状態では培養されている。

第 5 図 マウス ES 細胞の培養試験
Fig. 5 Mouse ES cell culture test

た⁽⁸⁾。生物における試験はばらつきが多いので、今後は再現性やほかの手法による未分化性の確認を計画している。また、マウス ES 細胞を用いた浮遊培養は現在も開発中であり、さらに改善をする予定である。

7. ヒト iPS 細胞での培養試験

新規リアクタでマウス ES 細胞の培養が可能であることを確認した後、ヒト iPS 細胞の培養試験に取り組んだ。現在、横浜市立大学谷口英樹教授の指導のもと、ヒト iPS 細胞の培養試験を行っている。

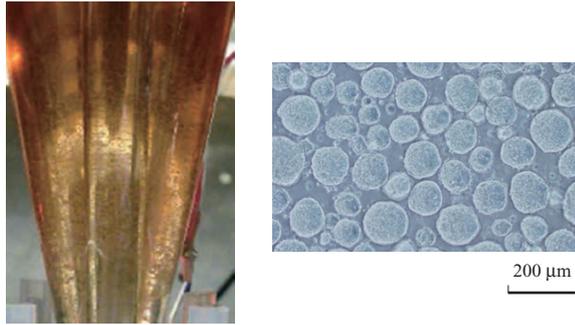
実施に当たり、ヒト iPS 細胞の平面培養での培養手順を参考に培養プログラムを作成して自動培養運転の実施に当たった。

まず、ヒト iPS 細胞をシャーレで培養する際の京都大学が推奨する培養手順⁽⁹⁾について紹介する。ヒト iPS 細

胞はラミニンと呼ばれる足場タンパク質をコートしたシャーレ上に接着して培養するが、iPS 細胞はシャーレから剥離、または細胞間の接着を解離させると容易に死滅する。単細胞へと分散させる際は Rock inhibitor と呼ばれる細胞死を抑制する試薬を添加する。この Rock inhibitor は細胞をシャーレに播種した 1 日後に取り除く。その後、培地交換を 1 日ごとに行い、約 7 日後には再びシャーレから剥離して、希釈してまた新たなシャーレへと播種する。このことを繰り返すのが iPS 細胞のシャーレ上での培養プロトコルである。

以上のプロトコルを当社で開発した要素試験機のポンプコントロールに適応させた培養プログラムを作成した。第 6 図にヒト iPS 細胞の培養試験を示す。このプログラムでヒト iPS 細胞を培養すると第 6 図-(a)に示すように、ヒト iPS 細胞を浮遊培養方式で培養することができた。

(a) 浮遊培養中のリアクタの様子^{*1} (b) 浮遊培養中のヒト iPS 細胞の顕微鏡写真^{*2}



(注) *1: 一つひとつの茶色の粒子が iPS 細胞の塊を示す。
*2: ヒト iPS 細胞が数千個~数万個の塊の状態に培養されている。

第 6 図 ヒト iPS 細胞の培養試験
Fig. 6 Human iPS cell culture test

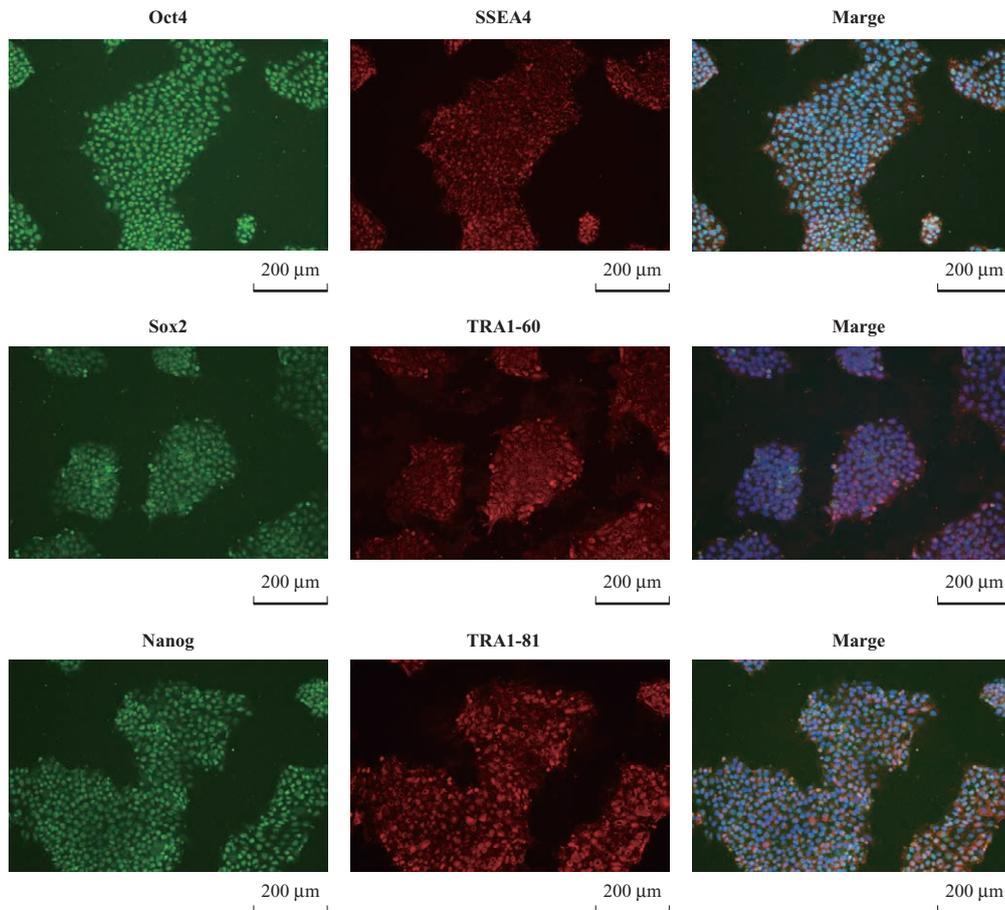
培養液を一部取り出し、顕微鏡で観察すると第 6 図 - (b) に示すように 50 ~ 150 μm の細胞塊の状態になっているのが分かる (ヒト iPS 細胞 1 個は 10 μm くらいの大きさであるが数千個~数万個の細胞が塊となっている)。

培養したヒト iPS 細胞の未分化性を免疫染色法で調べた結果、未分化性を示すマーカーである Nanog, Oct4, Sox2, SSEA4, TRA1-60, TRA1-81 が確認された (第 7 図)。

現在は培養プログラムの改良などを行い、新規リアクタでのヒト iPS 細胞の浮遊培養のさらなる向上を目指している。

8. 結 言

本稿では iPS 細胞自動大量培養装置の開発について、開発の経緯、コンセプトの策定、新規リアクタと試験機の要素技術、培養試験の結果について述べた。マウス ES 細胞やヒト iPS 細胞での培養試験の結果、培養された細胞は未分化性を維持していることが示唆された。今後は課題をクリアしていき、医療現場や研究所などで使うことのできる自動培養装置の製品開発を目指していく。



(注) 確認方法: ヒト iPS 細胞の未分化性を示すマーカータンパク質を免疫染色法で染色

第 7 図 免疫染色法によるヒト iPS 細胞の未分化性の確認
Fig. 7 Confirmation of iPS cell anaplasticity with immunostaining method

— 謝 辞 —

細胞での試験に当たっては、横浜市立大学の関根圭輔助教に多くの貴重なご助言をいただきました。ここに記して心から謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 賀喜白乙, 赤池敏宏 : ES/iPS 細胞のノンストレスで均質な大量培養システムを目指して 再生医療 Vol. 9 No. 3 2010年 8月 pp. 27 - 35
- (2) T. J. Rowland, D. O. Clegg, et al. : Roles of Integrins in Human Induced Pluripotent Stem Cell Growth on Matrigel and Vitronectin Stem Cells Development Vol. 19 No. 8 (2010. 8) pp. 1 231 - 1 240
- (3) M. Nakagawa, S. Yamanaka, et al. : A novel efficient feeder-free culture system for the derivation of human induced pluripotent stem cells Scientific Reports4 (2014. 1)
- (4) R. Olmer, R. Zweigerdt, et al. : Suspension Culture of Human Pluripotent Stem Cells in Controlled, Stirred Bioreactors Tissue Engineering Part C Vol. 18 Issue 10 (2012. 9) pp. 772 - 784
- (5) Y. Wang, L. Chengb, et al. : Scalable expansion of human induced pluripotent stem cells in the defined xeno-free E8 medium under adherent and suspension culture conditions Stem Cell Research Vol. 11 Issue 3 (2013. 11) pp. 1 103 - 1 116
- (6) R. Krawetz, D. E. Rancourt, et al. : Large-Scale Expansion of Pluripotent Human Embryonic Stem Cells in Stirred-Suspension Bioreactors Tissue Engineering Part C Vol. 16 No. 4 (2010. 7) pp. 573 - 582
- (7) S. M. Badenes, J. M. S. Cabral, et al. : Scalable Expansion of Human-Induced Pluripotent Stem Cells in Xeno-Free Microcarriers Stem Cells and Good Manufacturing Practices Volume 1 283 of the series Methods in Molecular Biology (2015) pp. 23 - 29
- (8) 石井浩介, 坂井慎一, 初谷智美ほか : 多能性幹細胞大量培養のための新規自動浮遊培養装置 第 14 回日本再生医療学会総会 プログラム・抄録 2015 年 3 月
- (9) 中川誠人 : プロトコル「フィーダーフリーでのヒト iPS 細胞の樹立・維持培養」京都大学 iPS 細胞研究所 CiRA

100 kW 級中型バイナリー発電装置「Heat Innovator®」による エンジン排熱の回収

Waste Heat Recovery of an Engine Using the 100 kW ORC “Heat Innovator®”

頼 泰 弘 技術開発本部インキュベーションセンター 博士（工学）
 柴 田 成 康 IHI プラント建設株式会社 プラント統括部設計部 課長
 和 田 大 輔 技術開発本部インキュベーションセンター
 三 好 一 雄 技術開発本部インキュベーションセンター 主査
 秋 吉 亮 技術開発本部インキュベーションセンター 主幹 工学博士

バイナリー発電は低沸点媒体によってタービン発電機などを駆動させ電力を得るシステムで、従来未利用であった工場排熱や地熱を利用した発電が可能である。当社はエンジン排熱を回収し発電するバイナリー発電プラントシステムを構築し、すでに半年以上の実証運転を実施してきた。発電装置は R245fa を媒体とし、磁気軸受の採用によって摺動部がなくメンテナンスフリーで駆動できる。本稿では、100 kW 級中型バイナリー発電装置「Heat Innovator」によるエンジン排熱発電システムの開発および性能評価結果について報告する。

The Organic Rankine Cycle (ORC) can utilize low-temperature waste heat from factories, engine systems and geothermal plants by using a low boiling point medium as the working fluid to drive a Rankine cycle. IHI has developed 100 kW ORC power plant that recovers waste heat from the exhaust gas of an engine. The use of magnetic bearings in the turbo-generator helps to reduce mechanical loss and avoid lubricant contamination. This article presents the results obtained from an evaluation of the installation of the 100 kW ORC “Heat Innovator” in an engine power plant.

1. 緒 言

CO₂ 削減の国際的な要求が高まるなか、工場の省エネ技術、再生可能エネルギーの導入が求められており、従来未利用であった低温（200℃以下）の排熱を利用できるバイナリー発電に注目が集まっている。なかでも有機ランキンサイクル（Organic Rankine Cycle：ORC）は、水と比べて沸点の低い代替フロンやペンタンなどの有機媒体を作用流体としてランキンサイクルを構成し、熱源からの熱によって蒸発した有機媒体を膨張機に導入し動力を得る手法である。国内においては 2014 年 5 月の電気事業法の省令改正など⁽¹⁾によって、第 1 表に示す全ての条件を満たせば、バイナリー発電設備にボイラー・タービン主任技術者を選任しなくてもよく、工事計画書の届出が不要など、設置に必要な手続きが大幅に簡略化された。そのため小規模な工場や温泉などにバイナリー発電を導入する際の障壁が低くなり、導入が急速に進んでいる。

当社ではこれまで 20 kW 級バイナリー発電装置「ヒートリカバリー（HR シリーズ）」を 2013 年 8 月から販売開始しており⁽²⁾、すでに温泉や工場での実績を積んでいる。

第 1 表 バイナリー発電に関する電気事業法規制緩和条件
Table 1 Deregulatory conditions stipulated under the Japanese Electric Utility Law that concern ORC

項 目	規 制 緩 和 条 件
全 般	熱源が熱水・蒸気
	作用媒体が不活性ガス
	一般公衆が窒息しない構造
バイナリー発電	出力が 300 kW 未満
	最高使用圧力が 2 MPa 未満
	最高使用温度が 250℃ 未満
	タービン駆動部が発電機と一体であり、きょう体に収納されていること
	タービン駆動部の破損時に、破片が設備外部に飛散しないこと

また、エンジン排ガスやジャケット冷却水の熱を利用するため、より大容量の装置として 100 kW 級のバイナリー発電装置について、Verdicorp 社（アメリカ）のタービン発電機と、当社のもつエンジニアリング力を活用し、排熱回収システム、プラントの基本・プロセス設計・施工など、プラント全体のお客さまへの提案から施工までを実施している⁽³⁾。

IHI グループで販売している事業用ガスエンジンは発電効率 47.8%（新潟原動機株式会社 18V28AGS）、ディーゼルエンジンは 46.0%（新潟原動機株式会社 18V28AHX）

を達成しており⁽⁴⁾、排ガスおよびジャケット冷却水を熱源としたバイナリー発電装置を導入すれば、総合効率が50%を超えるシステムを構築できる。

本稿では、有機ランキンサイクルを利用した100 kW級中型バイナリー発電装置のディーゼルエンジン排熱への適用、および実証試験結果について述べる。

2. フィールド実証試験

2.1 全体設計

第1図にフィールド実証試験場のフロー概略図、また第2表に100 kW級中型バイナリー発電装置「Heat Innovator」の仕様を示す。熱源はディーゼルエンジン（出力5 MW）の排ガスで、排ガスは脱硝装置、サイレンサ、煙突を経由して大気に放出される。今回、実証試験のために脱硝装置下流側の排ガスラインに排ガス温水ボイラを設置した。また、排ガスラインにはボイラを迂回するバイパスラインおよびそれぞれのラインにダンパを設け、ダンパ開度を調節することでボイラ、バイパスラインへの排ガス流量を調整し高温水温度を制御した。

高温水ラインは水温が100℃を超えるため加圧系（高温水圧力0.8 MPa）とした。ポンプによって高温水はボイラへと導入され、排ガスからの入熱によって加熱されたのち、蒸発器に導入される。蒸発器では高温水と冷媒とが熱交換し、冷媒を蒸発させる。蒸発器を出た高温水は再びポンプ吸入側に供給され、高温水ラインを循環する。

今回の実証試験では排ガスの熱のみを利用しているが、エンジンのジャケット冷却水からの排熱も利用できる。

2.2 ディーゼルエンジン

本実証試験において、熱源は16V32CXディーゼルエンジン（新潟原動機株式会社）の排ガスであり、排ガス温度は360℃である。本エンジンの排ガスからは1500 kW程度の熱が利用可能であり、バイナリー発電装

第2表 100 kW級中型バイナリー発電装置「Heat Innovator」仕様
Table 2 Specifications for the 100 kW ORC “Heat Innovator”

システム方式	有機ランキンサイクル
発電方法	磁気軸受式1段遠心タービン/永久磁石同期発電機
作動媒体	R245fa（不活性ガス）
熱源温度	80～200℃
最大発電出力	113 kW（発電機端）

置1台による回収熱量が約800 kWであることから、本エンジンからは100 kW機約2台分の熱量を確保できる。

2.3 排ガス温水ボイラ

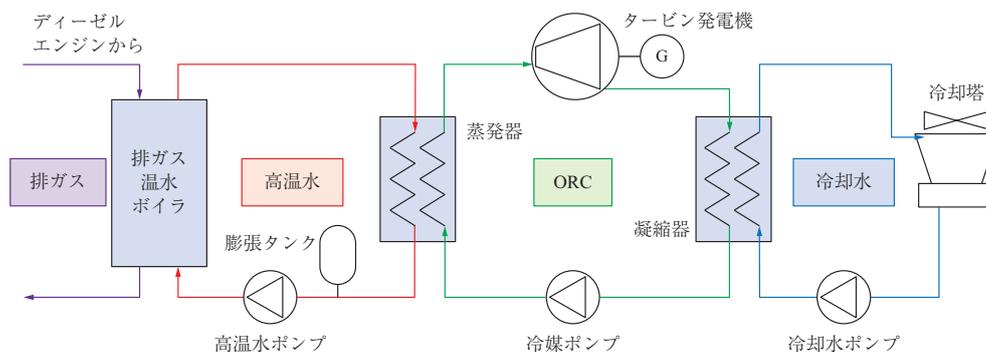
排ガスからの熱回収は排ガス温水ボイラ（株式会社IHI汎用ボイラ）を使用した（第2図）。ボイラは管寄せ、フィンチューブ、ケーシングから成り、高温水は下部管寄せを経て排ガス流内に挿入されているフィンチューブに入り、排ガスとの間で熱交換が行われる。

ボイラの設計では排ガス出口温度を酸露点以上とし、またエンジン背圧の許容値から排ガス側のボイラ圧力損失を1.5 kPa程度とし、フィンチューブの間隔や寸法を定めた。

また、ディーゼルエンジンからの煤や灰がフィンチュー



第2図 排ガス温水ボイラ
Fig. 2 Exhaust gas waste heat recovery boiler



第1図 フロー概略図
Fig. 1 Schematic of the system

ブの伝熱面に付着し伝熱性能が劣化するため、煤吹器（スートブロー）をボイラ内上下に2か所設置した。

2.4 バイナリー発電装置

バイナリー発電装置は、R245fa を冷媒として使用したランキンサイクルを構成しており、①冷媒ポンプ②蒸発器③タービン発電機④凝縮器、などから成る。第3図にバイナリー発電装置の外観を示す。タービン発電機は1段遠心タービンと永久磁石同期発電機が一体で構成されており、軸の支持には磁気軸受を採用したため摺動部がない。このため、タービンおよび発電機部が耐圧ケーシング内に収納されて、シール部はないことから冷媒の漏れがなく、オイルフリーでメンテナンス性に優れている。

タービン発電機を含むバイナリー発電関連機器は第4図に示すようなエンクロージャ内に格納した。このエンクロージャにはほかに動力盤、制御盤、トランスなどを収めた。

2.5 冷却塔

タービン発電機を通して圧力が低下した冷媒ガスは、凝縮器へ送られる。凝縮器には冷却塔から冷却水が供給されてお



第3図 バイナリー発電装置
Fig. 3 ORC power module



第4図 エンクロージャ
Fig. 4 Enclosure for the ORC and control system

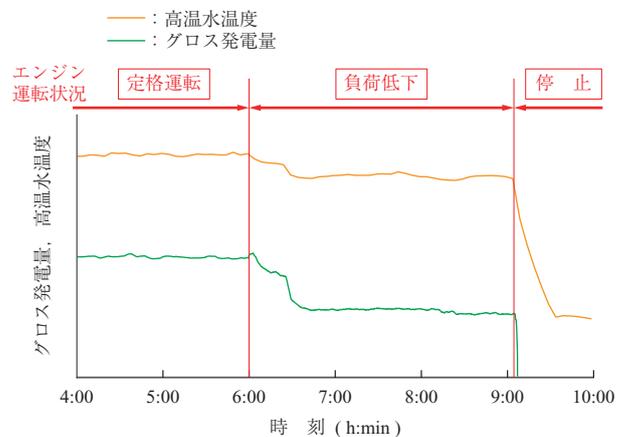
り、冷媒は凝縮したのち冷媒ポンプの吸入側へと送られる。

2.6 制御盤・リモート計測

上述のプラント全体の制御に関しては、ディーゼルエンジンを除き、すべてエンクロージャ内の制御盤から行っている。プラント制御には当社の制御ユニットを使用し、プラントを構成する各機器からの信号を一括管理できるようにした。収集したデータはインターネットを介してサーバにデータを蓄積し、蓄積したデータを Web ブラウザでモニタリング可能とすることで、不具合や異常を遠隔地から検知できるようにした。

また、バイナリー発電機は流入する高温水の温度や流量に応じて最適な冷媒ポンプ回転数、タービン回転数へと自動的に制御を行うため、例えばエンジンの負荷が変動した場合についても排熱から取り出せる最大の発電量を得ることができる。第5図にバイナリー発電装置のエンジン負荷変動による発電量変化を示す。エンジンの負荷が低下するとともに高温水温度が低下し、温水温度に応じて自動的に最適な冷媒循環量、およびタービン回転数に制御し、発電量を低下させる。さらに、エンジンが停止した瞬間、バイナリー発電装置も停止する。

ディーゼルエンジンに関しては独立した制御盤をもっているが、バイナリー発電装置の制御盤には、エンジン遮断器の開閉信号および排ガス温度・圧力などを入力することで、エンジンの稼働状況を常時監視しており、エンジン停止時も即時にバイナリー発電装置を自動停止できるようにした。また、エンジンが始動・復帰した際には自動的にバイナリー発電装置も再始動するよう、自動起動停止シーケンスも搭載した。前述のリモート計測と自動起動停止シーケンスを搭載することで、現場での操作を行うことなくバイナリー発電装置の運転を継続することができる。



第5図 エンジン負荷変動による発電量変化
Fig. 5 Power output variations resulting from changes to the engine load

3. 結果および考察

3.1 定格性能

第3表に今回のフィールド実証試験における代表的な安定性能結果を示す。発電機端でのグロス出力 113 kW であり、そこから冷媒ポンプ動力を差し引くとバイナリー発電装置としては約 100 kW を発電できることを確認した。第6図にグロスおよびネット発電量を示す。この際、排ガス温水ボイラからの入熱に対してグロス発電効率 13.9% となった。同等の温度レベルにおけるカルノー効率が約 25% であることから、本機の到達効率は高い。これは磁気軸受の低損失性能やプラント設計の妥当性によるものである。

発電量は季節変動し冬季の方が外気温が低いいため、凝縮温度を低く抑えることができる。このため、サイクル効率が増加し発電量が増加する。一方、夏季は外気温が上昇するため発電量は減少する。本システムにおいては夏季においてもグロス発電量 95 kW 程度を確保できることが確認できた。

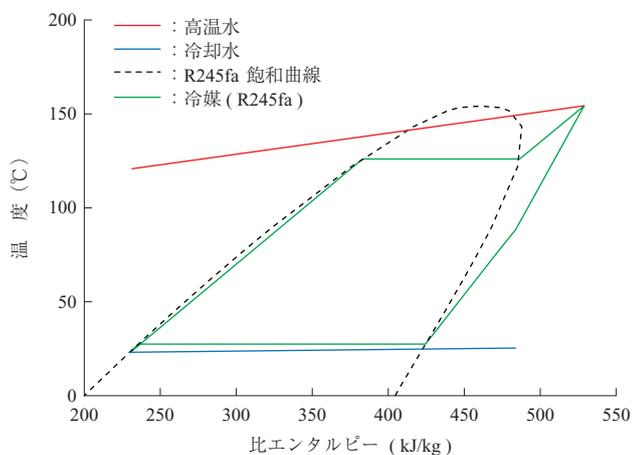
第7図に第3表に示す定格性能達成時の T-h サイクル

第3表 定格性能結果
Table 3 Performance test results

項目	単位	定格性能
排ガス温度	℃	396
高温水温度	℃	154 (入口) / 124 (出口)
冷却水温度	℃	23 (入口) / 26 (出口)
タービン回転数	rpm	36 530
発電機端電力	kW	113



第6図 グロスおよびネット発電量
Fig. 6 Gross and net power output



第7図 T-h サイクル線図
Fig. 7 T-h cycle diagram

線図を示す。今回のバイナリー発電装置ではタービン入口での冷媒の過熱度に余裕をもって運転している。これは運転中の熱源変動によるミスト混入を防止するためであるが、今後の運転においてさらに運転制御の最適化を行い、チューニングする予定である。

3.2 ボイラの経時変化

排ガス温水ボイラについてはスートブローを設置し、定期的にフィンチューブ上に堆積する煤や灰を除去している。ボイラの熱通過率はプラント立ち上げ時と比較して15%程度低下しているが、伝熱性能のこれ以上の劣化はみられずスートブローの有効性が確認できた。

4. 結 言

本稿では 100 kW 級中型バイナリー発電装置「Heat Innovator」の実証試験について、プラント設計・施工、および性能確認について紹介した。実証試験においては定格性能の確認とプラントの経時的な変化を監視・評価した。特にタービン発電機については磁気軸受を採用しているため、注油などの必要がなくメンテナンスフリーを実現できた。今回の実証試験においては、当社のこれまでのプラントにおける経験から、熱回収のための排ガス温水ボイラの設計・製作、プラント全体のプロセス・配管設計、制御ロジックの製作、メンテナンス体制の構築までを比較的スムーズに実施できた。また、本発電システムはエンジン排ガスだけでなく、エンジンのジャケット冷却水、温泉水、そのほかプラント排熱などにも適用可能であり、今後もさまざまなプラントへの適用を図るため、実証試験で見聞を得る予定である。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：電気事業法施行規則経済産業省告示 第百一十一号 2014 年
- (2) 高橋俊雄：小型バイナリー発電装置『ヒートリカバリー』“HR シリーズ”の概要 公益社団法人日本ガスタービン学会 Vol. 41 No. 6 2013 年 11 月 pp. 467 - 472
- (3) IHI プラント建設株式会社：“廃熱”から新たな電力を生み出す IHI 技報 第 55 巻 第 1 号 2015 年 3 月 pp. 18 - 19
- (4) 新潟原動機株式会社：アドバンスドガスエンジン 28AGS シリーズ カタログ 2012 年

海洋貯留モニタリングに向けた 溶存 CO₂ 検出技術に関する研究

Study on Aqueous CO₂ Detection to Monitor the Potential Leakage of CO₂ Stored in the Ocean

佐藤 裕 技術開発本部基盤技術研究所応用理学研究部 博士（薬学） 技術士（応用理学部門）
秋久保 一馬 技術開発本部基盤技術研究所応用理学研究部

大規模排出源から分離回収した二酸化炭素 (CO₂) の海洋貯留に向けて、CO₂ 漏洩^{えい}監視のニーズが将来高まると予想されている。現在、海水中の CO₂ 検出技術として塩濃度の変化や pH 変化を指標とした間接的な検出方法が提案されているが、直接検出することが可能になればより高感度な検出が実現でき、漏洩監視の精度も向上させることが期待できる。本研究では、電極表面に修飾したアミン分子を CO₂ 認識部位とする化学センサ電極を作成し、溶存 CO₂ の直接検出の原理実証を行った。実験の結果から溶存 CO₂ 濃度に依存した電極応答が得られ、水中の CO₂ を直接検出できることを確認した。

Carbon dioxide Capture and Storage (CCS) technologies have received considerable attention because of their potential application in preventing global warming by reducing the amount of greenhouse gases, in which carbon dioxide (CO₂) is regarded to be the main player. The storage of CCS must guarantee safety to the environment. In light of this, the technique for detecting CO₂, which exists in underwater environments, is one of the key component technologies for the practical application of carbon storage. In order to continuously monitor underwater CO₂ in ocean storage areas, indirect detection techniques — such as pH measurement — have been proposed. For practical application, however, a direct detection technique is required to ensure a more precise and sensitive method of monitoring underwater CO₂. In this study, electrochemical detection of CO₂ in a saline solution was performed using an amino group immobilized Au electrode. The oxidation and reduction currents related to the redox active compounds varied depending on the CO₂ concentration, suggesting that it is possible to directly detect aqueous CO₂.

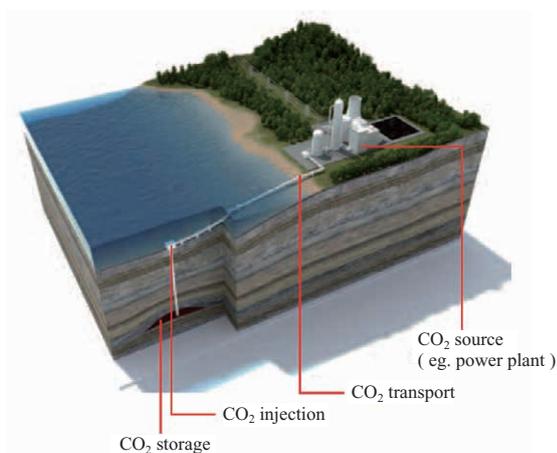
1. 緒 言

地球温暖化の原因とされる大気中の CO₂ 濃度の増加を抑えるため、CO₂ 分離回収・貯留技術 (Carbon dioxide Capture and Storage : CCS) の実用化が進められている^{(1), (2)}。第 1 図に示すように CCS は、① 分離回収

② 輸送 ③ 圧入 ④ 貯留、という 4 種類のプロセスから構成されているが⁽³⁾、そのなかで貯留プロセスは最も長い期間を要し、安全性確保のための漏洩^{えい}監視など、長期間のメンテナンスが必要とされる。貯留方法としては、地中の帯水層に CO₂ を圧入する地中隔離や高圧の深海に貯留する海洋貯留について、実証および研究が進められている。

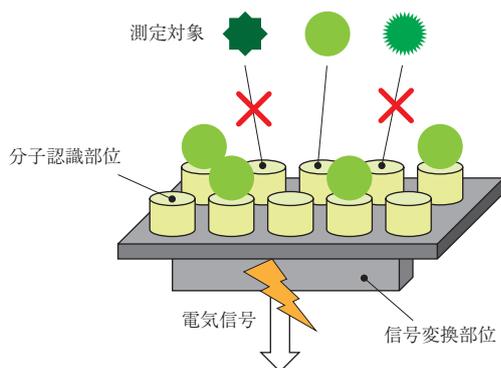
海底への地中隔離や海洋貯留における CO₂ の漏洩監視技術として、海水中のイオン種の変化や pH 変化⁽⁴⁾ を指標とした技術が提案されているが、いずれも間接的に CO₂ を測定する方法である。海水中で CO₂ 濃度を直接測定する手法が実現できれば、より高感度な検出が実現でき、漏洩監視の精度も向上させることが期待できる。

化学センサは、特定の対象物質に対する反応性（分子認識機能）を有する機能性有機分子を用いることで高感度な検出が可能となるセンサであり、医療や食品、環境モニタリングなど多くの分野に応用されている。化学センサの検出部位は、第 2 図に示すように機能性有機分子が測定対象を認識する部位（分子認識部位）と信号変換を行う部位（信号変換部位）から構成される。



(出 典 : IEA)

第 1 図 CCS の模式図⁽³⁾
Fig. 1 Schematic illustration of a CCS system⁽³⁾



第 2 図 一般的な化学センサの構成
Fig. 2 Configuration of a typical chemical sensor

信号変換部位に用いられる手法は、①電気化学②水晶振動子③表面プラズモン共鳴、などがあるが、電極表面への機能性有機分子の固定化が容易であることから、電気化学的手法を用いた化学センサが一般的である⁽⁵⁾。

本研究では、CO₂ と特異的に結合するアミンを電極表面に修飾することで、水中の CO₂ を検出できる化学センサの原理実証を行い、電極表面のアミンの X 線光電子分光分析 (XPS 分析) を行った。また、電気化学活物質の一つであるフェロセンをアミンと一緒に電極表面に修飾して化学センサ電極を作成し、CO₂ 濃度測定実験を行った。

2. 実験方法

分子末端にチオール基を有するアミノエタンチオールを用いてアミン修飾電極を作成し、電気化学活物質としてフェリシアン化カリウムを添加した測定溶液を用いて、化学センサの原理実証を行った。また、フェロセンのチオール誘導体である 6-(フェロセニル)ヘキサチオールを、アミノエタンチオールと同時に表面修飾することで化学センサ電極を作成した。

チオール基をもつ分子は、希薄溶液を調製して Au (金) 電極を浸せきすることで、自己集積単分子膜を形成することができる⁽⁶⁾。自己集積単分子膜は、電極表面への簡便な分子固定化手法として化学センサやバイオセンサの分野で広く利用されている^{(7), (8)}。

電極の作成は下記の手順で行った。

- (1) Au 電極 (直径 3 mm) をアルミナスラリー (粒径 1 μm および 0.3 μm) を用いて、それぞれ 10 分間ずつ研磨した。
- (2) 電極表面に付着したアルミナスラリーを取り除くため、Au 電極をイオン交換水中で 10 分間超音波洗浄した。

(3) アミン修飾電極の場合は 5 mmol/l アミノエタンチオール溶液 (溶媒: エタノール) に、アミンフェロセン修飾電極の場合は 2.5 mmol/l アミノエタンチオール / 2.5 mmol/l 6-(フェロセニル)ヘキサチオール溶液 (溶媒: エタノール) に浸せきし、電極表面に自己集積単分子膜を形成させた。

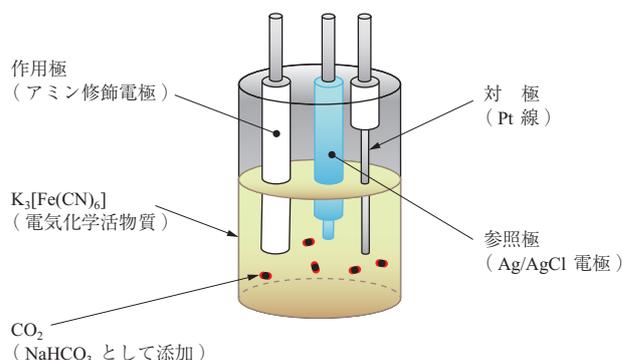
(4) 電極表面をエタノールおよびイオン交換水で洗浄し、測定までイオン交換水中で保存した。

電気化学測定は、作用極・対極・参照極を用いる一般的な三電極系を用いてサイクリックボルタンメトリー (電極電位をある範囲で往復させ、酸化還元電位を測定する方法) を行った。作用極としてアミン修飾電極またはアミンフェロセン修飾電極を使用し、対極として白金 (Pt) 線、参照極として銀/塩化銀 (Ag/AgCl) 電極を用いた。測定溶液として、海水中の塩濃度相当の 500 mmol/l 塩化ナトリウム (NaCl) 水溶液を調製し、CO₂ 濃度は炭酸水素ナトリウム (NaHCO₃) の添加によって調製した。測定溶液の CO₂ 濃度は、炭酸水素ナトリウムの水溶液中での解離平衡から理論的に求め、添加した炭酸水素ナトリウムの 0.28% が水溶液中で CO₂ 分子として存在しているとして計算した。また、作用極としてアミン修飾電極を用いた場合には、5 mmol/l K₄Fe(II)(CN)₆ を電気化学活物質として添加した。第 3 図にアミン修飾電極を用いた場合の測定系を示す。

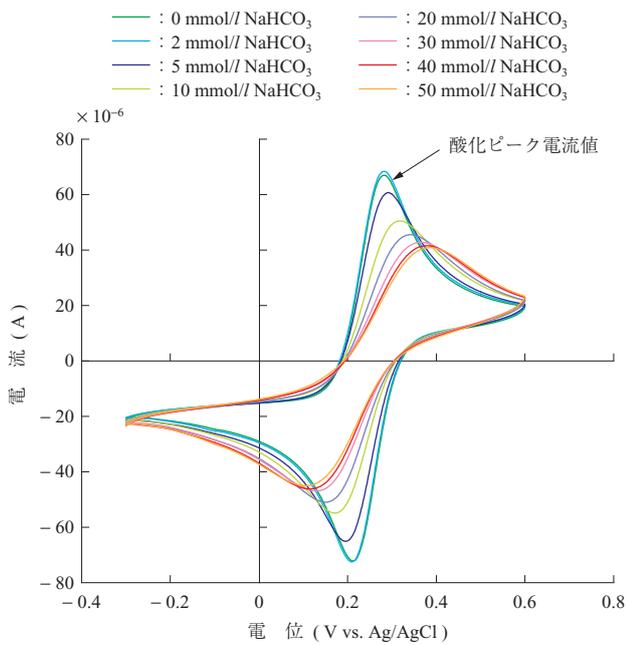
3. 結果と考察

3.1 アミン修飾電極による CO₂ 検出

作成したアミン修飾電極を用いて、測定溶液中のフェリシアン化物イオン [Fe(II)(CN)₆]⁴⁻ の酸化還元反応をサイクリックボルタンメトリーによって測定した。第 4 図に示すように典型的なサイクリックボルタモグラムが得ら



第 3 図 アミン修飾電極を用いた場合の測定系
Fig. 3 Measurement system for using the amine-modified electrode



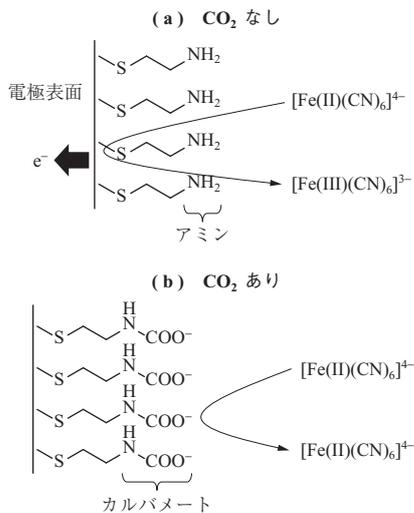
第4図 アミン修飾電極のサイクリックボルタモグラム
Fig. 4 Cyclic voltammograms for the amine-modified electrode

れ、フェロシアン化物イオン $[\text{Fe}(\text{II})(\text{CN})_6]^{4-}$ の酸化還元
に由来する応答電流が得られた。

炭酸水素ナトリウムを添加して測定溶液中の CO_2 濃度
を変化させると、濃度が増加するに従って応答電流値は減
少した。

これは、 CO_2 濃度の上昇によって電極表面に負電荷をも
つカルバメートイオンが生成し、静電的反発によって電極
表面へのマーカ分子の拡散を阻害したためと考えられる。

第5図に示すとおり、 CO_2 が存在しない場合は電極表
面のアミン ($-\text{NH}_2$) は中性または正電荷をもっている。

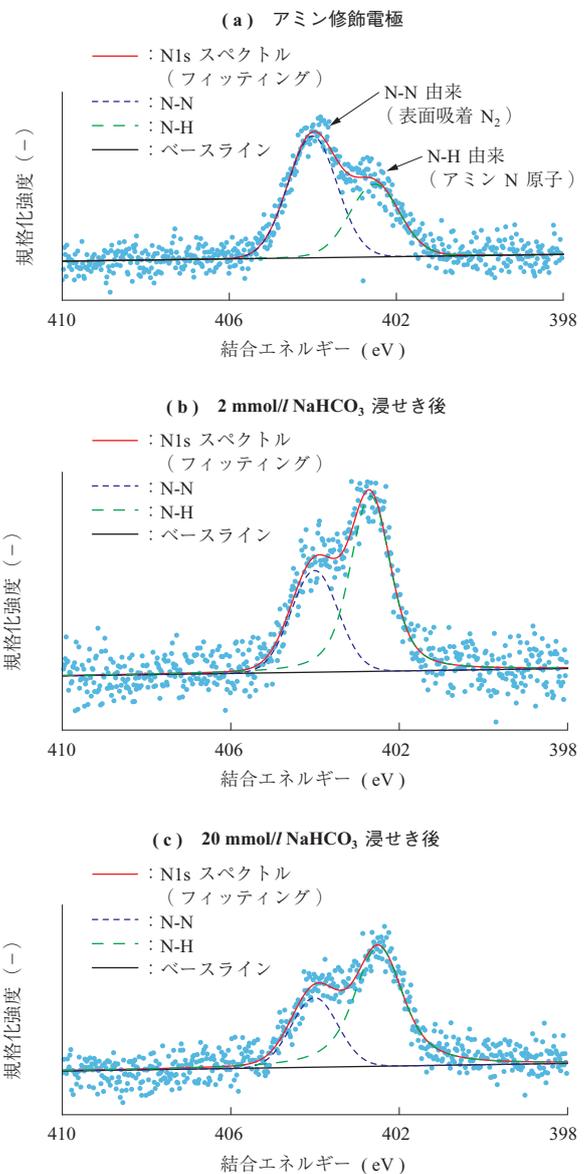


第5図 アミン修飾電極による CO_2 検出原理の模式図

Fig. 5 Schematic illustrations of CO_2 detection using the amine-modified electrode

そのため、測定溶液中の負電荷をもつフェロシアン化物イ
オン $[\text{Fe}(\text{II})(\text{CN})_6]^{4-}$ は容易に電極表面に到達し、電子の
授受を行うことができる(第5図-(a))。一方、 CO_2
が存在する場合は、電極表面のアミンは CO_2 と反応し、
負電荷をもつカルバメートイオンを生成する。このため、
負電荷をもつフェロシアン化物イオン $[\text{Fe}(\text{II})(\text{CN})_6]^{4-}$ は
静電的反発によって電極表面に到達できず、電子の授受は
起こらない(第5図-(b))。カルバメートイオンの生成
は平衡反応であることから、測定溶液中の CO_2 濃度
によって電極表面の負電荷の量が変わり、濃度に依存した
応答電流の減少が得られていると考えられる。

第6図にアミンを表面に修飾した Au 蒸着基板の XPS
分析結果を示す。 CO_2 が不在の場合である第6図-(a)と



第6図 アミンを修飾した Au 基板の XPS 分析結果(N1s)
Fig. 6 N1s XPS spectra for the amine-modified Au substrate surfaces

比較して、異なる CO₂ 濃度の測定溶液に浸せきした場合の - (b) および - (c) では、N-H 結合の結合エネルギーに由来するピーク強度が増加した。これは、第 5 図に示したように、電極表面のアミンと CO₂ が結合したためと考えられる。

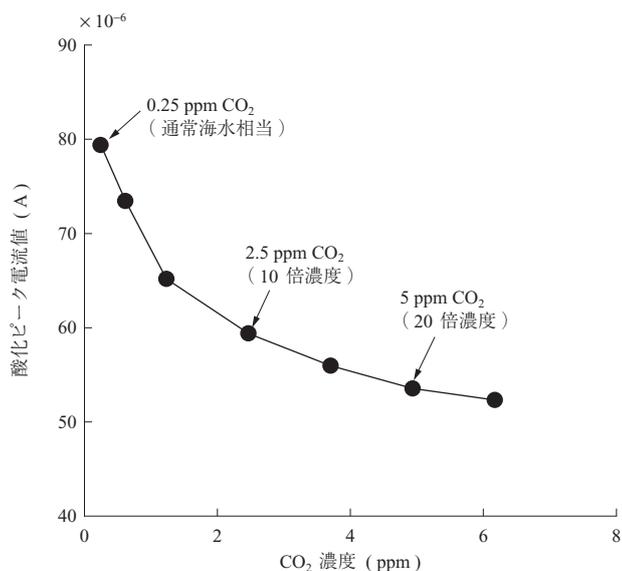
本研究では、原理実証を目的に CO₂ と強固に結合する 1 級アミンであるアミノエタンチオールを電極表面に修飾した。そのため、CO₂ 検出後にアミン修飾電極を再利用することは難しい。実用化に向けた可逆的な検出には、CO₂ との結合が弱いアミンを選定し、修飾することで可能になると考えている。

次に、得られた応答電流の変化から CO₂ 濃度に対する検量線を作成した。第 7 図にアミン修飾電極を用いて作成した CO₂ 濃度測定の検量線を示す。

今回作成したアミノ基修飾電極では、通常の海水中に含まれる CO₂ 濃度 0.25 ppm (海水中の炭酸塩濃度からの推定値) およびその 10 倍濃度、20 倍濃度まで、CO₂ 濃度に依存した電流変化が得られた。水への CO₂ 飽和濃度は約 1.5 ppm (25°C, 100 kPa) であり、炭酸水素ナトリウムの添加によって調製した通常海水中の 10 倍の CO₂ 濃度を検出できれば、漏洩検知として利用できると考えられる。

3.2 アミンフェロセン修飾電極による CO₂ 検出

実際に海水中で CO₂ 濃度を測定するには、電気化学活物質をアミンとともに電極表面に固定化する必要がある。電気化学活物質の一つであるフェロセンをアミンと同時に

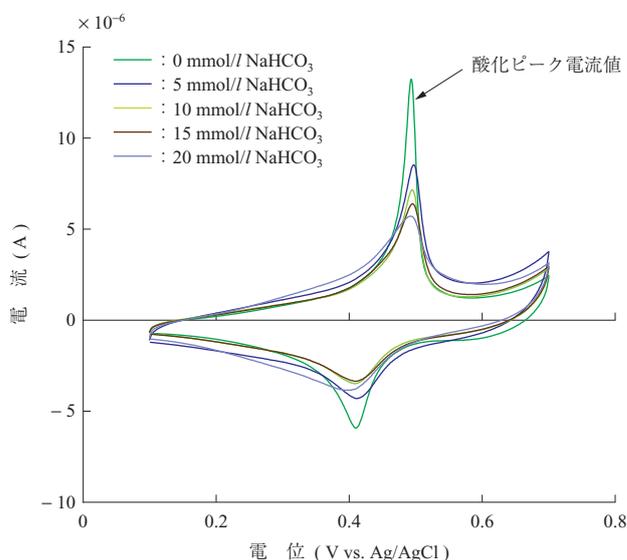


第 7 図 アミン修飾電極を用いて作成した CO₂ 濃度測定の検量線
Fig. 7 Calibration curve for CO₂ concentration using the amine-modified electrode

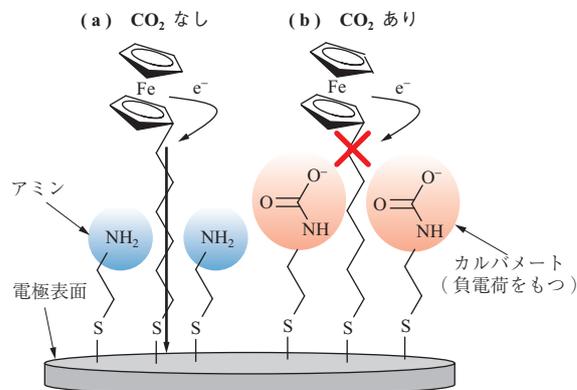
修飾した電極 (アミンフェロセン修飾電極) を用いて、電気化学測定を行った結果を第 8 図に示す。炭酸水素ナトリウム添加前のバックグラウンド電流として、電極表面に固定化したフェロセンの酸化還元に由来する応答電流が得られた。炭酸水素ナトリウムを添加して CO₂ 濃度を増加させた測定溶液では、フェロセンの応答電流 (酸化ピーク電流値) は減少した。

これは、第 9 図に示すように、アミノ基修飾電極の場合と同様に CO₂ 濃度の上昇によって電極表面に負電荷をもつカルバメートイオンが生成し、フェロセンの酸化反応 (フェロセン分子から電極表面へ電子が移動) が静電的反発により阻害されたためと考えられる。

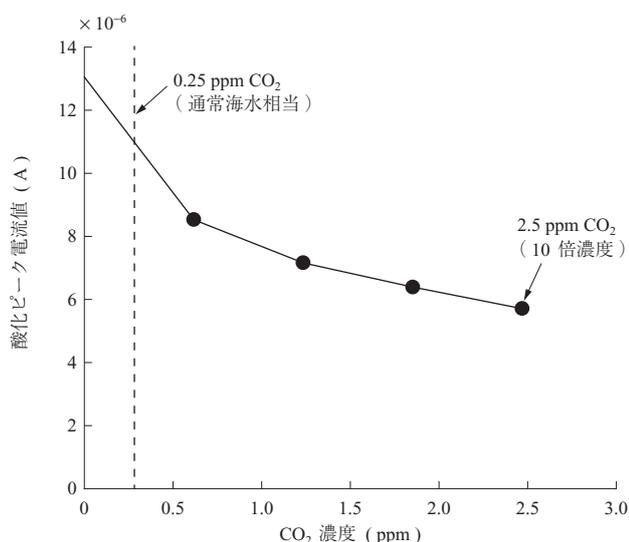
次に、得られた応答電流の変化から CO₂ 濃度に対する検量線を作成した。第 10 図にアミンフェロセン修飾電



第 8 図 アミンフェロセン修飾電極のサイクリックボルタモグラム
Fig. 8 Cyclic voltammograms for the amine/ferrocene-comodified electrode



第 9 図 アミンフェロセン修飾電極による CO₂ 検出原理の模式図
Fig. 9 Schematic illustration of CO₂ detection using the amine/ferrocene-comodified electrode



第 10 図 アミン-フェロセン修飾電極を用いて作成した CO₂ 濃度測定の見量線

Fig. 10 Calibration curve for CO₂ concentration using the amine/ferrocene-comodified electrode

極を用いて作成した CO₂ 濃度測定の見量線を示す。今回作成したアミン-フェロセン修飾電極では、通常の海水中に含まれる CO₂ 濃度 0.25 ppm (海水中の炭酸塩濃度からの推定値) およびその 10 倍濃度まで、CO₂ 濃度に依存した電流変化が得られた。

4. 結 言

本研究では、CO₂ と結合して負電荷をもつカルバメートイオンを生成するアミンと、電気化学活物質の一つであるフェロセンと一緒に電極表面に修飾 (固定化) することで、化学センサ複合電極を作成し、CO₂ 濃度に対する見量線を作成した。CO₂ 濃度に依存した応答性の確認として、測定溶液中の CO₂ 濃度の上昇によって応答電流が減少し、CO₂ 濃度変化の検出が可能であることを確認できた。

今回作成したセンサ電極では、通常の海水中に含まれる CO₂ 濃度 0.25 ppm (海水中の炭酸塩濃度からの推定値) およびその 10 倍濃度まで、CO₂ 濃度に依存した電流変化が得られた。今後は、地中貯留または海洋貯留の実証サイトへの適用を視野に、塩化ナトリウム以外の塩や有機物な

どの妨害物質の影響を考慮して実海水を用いた試験を実施していく。

参 考 文 献

- (1) G. T. Rochelle : Amine Scrubbing for CO₂ Capture Science Vol. 325 No. 5 948 (2009. 9) pp. 1 652 - 1 654
- (2) 高野健司 : 低炭素社会に適合した石炭火力発電の実現へ IHI 技報 第 55 巻 第 4 号 2015 年 12 月 pp. 32 - 35
- (3) OECD/IEA : Technology Roadmap : Carbon Capture and Storage 2009 (2009. 11) pp. 8 - 9
- (4) K. Shitashima, Y. Maeda and A. Sakamoto : Detection and Monitoring of Leaked CO₂ through Sediment, Water Column and Atmosphere in a Sub-Seabed CCS Experiment International Journal of Greenhouse Gas Control Vol. 38 (2015. 7) pp. 135 - 142
- (5) 日本生物物理学会シリーズ・ニューバイオフィジックス刊行委員会 : シリーズ・ニューバイオフィジックス ⑥ 生物のスーパーセンサー 共立出版 1997 年 7 月
- (6) R. Colorado Jr. and T. R. Lee : Thiol - based Self-assembled Monolayers - Formation and Organization Encyclopedia of Materials : Science and Technology (2001. 9) pp. 9 332 - 9 344
- (7) S. Takahashi and J. Anzai : Phenylboronic Acid Monolayer-Modified Electrodes Sensitive to Sugars Langmuir Vol. 21 (2005. 4) pp. 5 102 - 5 107
- (8) H. Sato and J. Anzai : Preparation of Layer-by-Layer Thin Films Composed of DNA and Ferrocene-Bearing Poly (amine) s and Their Redox Properties Biomacromolecules Vol. 7 (2006. 5) pp. 2 072 - 2 076

プレキャスト PC 床版を用いた床版取替工事 — 複雑な線形・形状を有する「綱木川橋」への適用 —

Replacement of Existing RC Slab with Precast Prestressed Concrete Slab

池 上 浩太朗 株式会社 IHI インフラ建設 PC 事業部 PC 技術部 課長
吉 原 直 樹 株式会社 IHI インフラ建設 PC 事業部 PC 工務部
井 野 耕 志 株式会社 IHI インフラ建設 PC 事業部 PC 技術部

「綱木川橋」は東北自動車道仙台宮城インターチェンジ～泉インターチェンジに位置する鋼 2 径間連続非合成鉄桁橋であり、1975 年の開通から 37 年が経過していた。今回の改良工事の対象である鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）は、経年劣化や大型車両の増加に加え、冬季の凍結防止剤の散布の影響で塩害劣化の進行が著しい状況にあった。そこで、抜本的な老朽対策として RC 床版取替を行うことになった。本稿では、綱木川橋床版補強工事の詳細設計および施工における課題とその対策について報告する。

The “Tsunakigawa Bridge,” which is a steel 2-span continuous plate-girder bridge located between the Sendai-Miyagi Interchange and the Izumi Interchange on the Tohoku Expressway, opened to traffic 37 years ago in 1975. The existing Reinforced Concrete (RC) slab had deteriorated significantly due to the effects of dispersing cryoprotectant during winter and the increased volume of large vehicles. Consequently, the existing RC slab was replaced with a precast prestressed concrete slab as an extreme measure to protect against further deterioration. This report describes the design and construction work in detail.

1. 緒 言

「綱木川橋」は東北自動車道仙台宮城インターチェンジ～泉インターチェンジに位置する鋼 2 径間連続非合成鉄桁橋であり、1975 年の開通から 37 年が経過している。今回の改良工事の対象である鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）は、経年劣化や大型車両の増加に加え、冬季の凍結防止剤の散布の影響で塩害劣化の進行が著しい状況にあった。これまでに、RC 床版の上面増厚（1998 年）や舗装の部分補修によって維持が行われてきた。しかし、近年その補修頻度が多くなってきたことから、抜本的な老朽対策として RC 床版取替を行うことになった。

本工事の実施に当たっては、上下線分離構造であることから、反対車線を対面交通規制しながらの RC 床版取替を実施した。また、本橋は近くにインターチェンジがあるため、追越車線のほか、加速・減速車線を有しており、斜角が小さく複雑な線形に対応できる取替用プレキャストプレストレストコンクリート床版（以下、PCa 床版）の形状を合理的に設定することが設計上の課題であった。

本稿では、綱木川橋床版補強工事の詳細設計および施工における課題とその対策について報告する。

2. 工事概要および RC 床版劣化状況

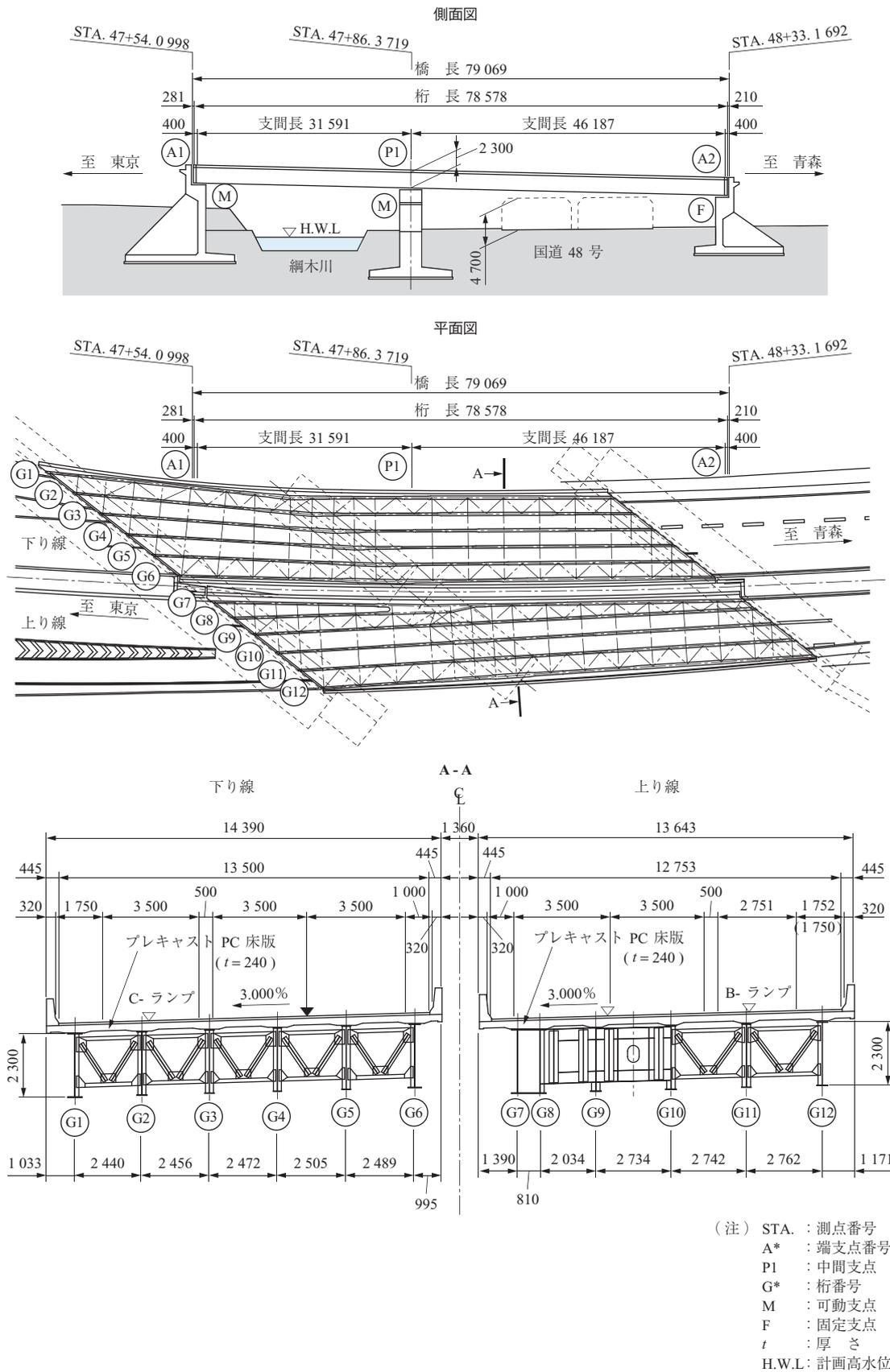
2.1 工事概要

「綱木川橋」の全体一般図を第 1 図に、本工事の概要および橋梁諸元を次に示す。

工事名	東北自動車道綱木川橋床版補強工事
発注者	東日本高速道路株式会社 東北支社
橋長	79.069 m
有効幅員	上り線 10.530 ～ 22.688 m 下り線 13.500 ～ 27.475 m
斜角	A1 支承線上 36° 11' 01" P1 支承線上 37° 59' 37" A2 支承線上 40° 38' 24"
構造形式	鋼 2 径間連続非合成鉄桁橋
工期	自 2012 年 8 月 22 日 至 2014 年 4 月 13 日

2.2 RC 床版劣化状況

本橋の RC 床版劣化状況の一例を第 2 図および第 3 図に示す。第 2 図は上面増厚部と既設 RC 床版の境界面に確認されたコンクリートが砂利化した状況である。この劣化は 1998 年の上面増厚補強後、本工事以前に実施された



第 1 図 全体一般図 (単位 : mm)
Fig. 1 General drawing (unit : mm)



第 2 図 RC 床版コンクリートの砂利化

Fig. 2 Gravel becomes dislodged from concrete in the RC slab



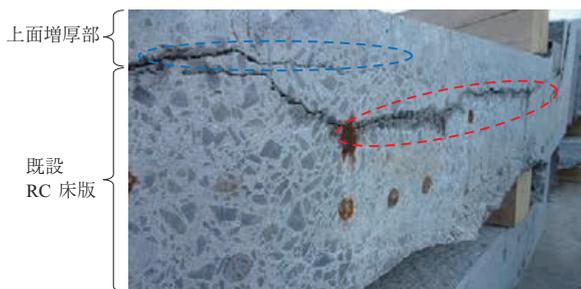
第 3 図 断面欠損した既設鉄筋と既設補強鉄筋

Fig. 3 Defect cross-section for existing re-bar

大規模舗装・RC 床版補修時に舗装切削後の既設床版面を打音による検査を行い、剥離したコンクリートや浮きの除去を実施した部分で確認された。

また、コンクリートの砂利化が確認された部位では、既設 RC 床版の上側鉄筋に著しい断面欠損が見られた（第 3 図参照）。これは、凍結防止剤散布による塩分の影響であると考えられた。さらに、RC 床版下面には遊離石灰を含む亀甲状のひび割れ、剥離、浮きが発生していた。

第 4 図に本工事で撤去した既設 RC 床版の断面を示す。既設 RC 床版と上面増厚部との境界面での剥離や、上側鉄筋位置での水平ひび割れが見られた。



第 4 図 既設 RC 床版の断面

Fig. 4 Cracks on cross-section of removed RC slab

3. 詳細設計

3.1 設計概要

床版の詳細設計は、設計要領第二集⁽¹⁾に基づき実施した。伸縮装置の近傍と、PCa 床版で対応が難しい桁端部の鋭角部（現場打ち施工部）は RC 床版として設計した。第 1 表に PCa 床版設計に用いるコンクリートの設計条件を示す。

本橋の場合、斜角が小さいことおよび桁端部付近まで PCa 床版を使用していることなど設計要領の規定のみでは設計を完結できない事項があった。以下、本橋における設計上の課題およびその対応について紹介する。なお、以下の報告では上り線を中心に述べる。

3.2 PCa 床版製作上の課題

本橋は近くに仙台宮城インターチェンジがあるため、第 1 図に示すように主桁の配置および平面線形が変化している。一方、PCa 床版を合理的に製作するという観点からは、可能な限り同一形状とすることが望ましい。また、本橋の RC 床版取替においては、交通規制期間の短縮および品質確保の観点から現場打ち部を少なくするため、桁端部にも可能な限り PCa 床版を使用するという設計計画とした。これらの課題に対して、以下の 2 ケースについて、

第 1 表 PCa 床版設計に用いるコンクリートの設計条件

Table 1 Design criteria for PCa slab

項	目	単位	制限値	備考
設計基準強度		N/mm ²	50.0	
プレストレス導入時圧縮強度		N/mm ²	36.0	
許容曲げ圧縮応力度	プレストレス導入直後	N/mm ²	21.0	
	設計荷重作用時	N/mm ²	17.0	
許容曲げ引張応力度	プレストレス導入直後	N/mm ²	$k1 \times -2.51^{(2)}$	方法 B
	死荷重作用時	N/mm ²		方法 C
	設計荷重作用時	N/mm ²	$k1 \times -3.12^{(2)}$	方法 B
	風荷重作用時	N/mm ²		方法 A
ヤング係数	プレストレス導入直後	N/mm ²	2.95×10^4	
	設計荷重作用時	N/mm ²	3.30×10^4	
クリーブ係数		-	3.0	
乾燥収縮度		-	20×10^{-5}	

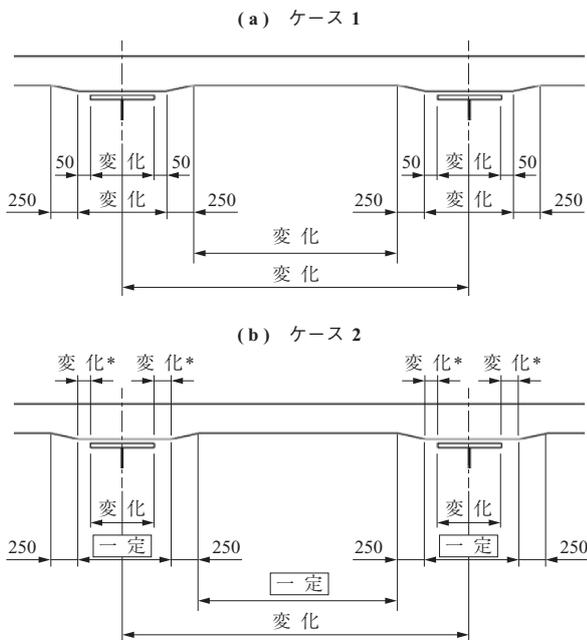
設計条件

- ・床版：PRC (Prestressed Reinforced Concrete) 構造（直角方向）とする。
- ・方法 A：コンクリートに生じる曲げひび割れを、ひび割れ幅の制限値まで許容する。
- ・方法 B：コンクリートに曲げ引張応力を発生させるが、曲げひび割れは発生させない。
- ・方法 C：コンクリートに曲げ引張応力を発生させない。
- ・ $k1$ ： $k_{0b} \cdot k_{1b}$ とする
 k_{0b} ：コンクリートの引張軟化特性に起因する引張強度と曲げ強度の関係を示す係数
 k_{1b} ：乾燥、水和熱など、その他の原因によるひび割れ強度の低下を表す係数

PCa 床版の形状および配置を検討した。

ケース 1

PCa 床版のハンチ（増圧部）幅を鋼桁上フランジ幅 + 100 mm（片側 50 mm）として、主桁形状に合わせて連続的に変化する（第 5 図 - (a)）。重量は最少となるが、すべての PCa 床版の形状が異なるため、製作は煩雑となる。



(注) * : 最小寸法 50 mm を確保

第 5 図 主桁間隔の変化への対応（単位：mm）

Fig. 5 Measure for dealing with variations in girder spacing (unit : mm)

ケース 2

PCa 床版のハンチ幅を大きくし、主桁間隔の変化に対応する（第 5 図 - (b)）。ハンチ幅が過大とならない範囲で PCa 床版をグルーピングすることで、製作コストと製作工程を圧縮できる。ただし、ケース 1 に比べて重量は増加する。

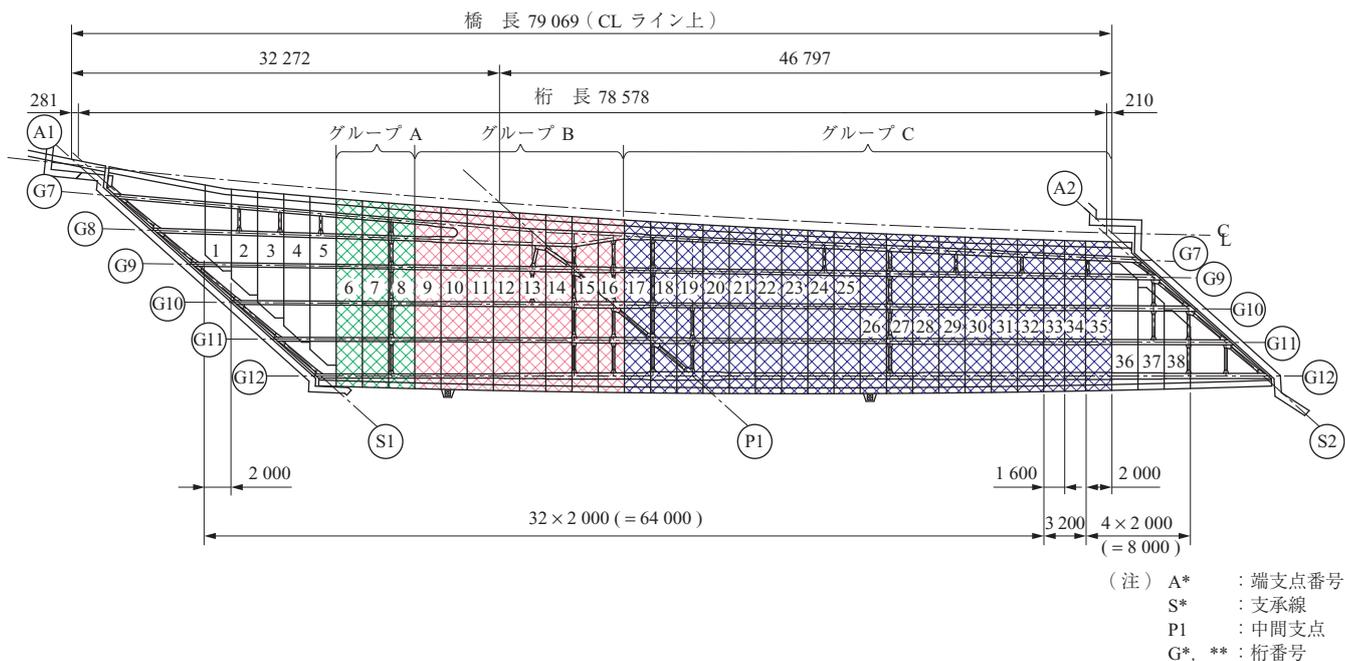
検討の結果、本工事ににおいてはケース 2 を採用し、PCa 床版の形状および配置を決定した。第 6 図に最終的に決定した PCa 床版のグループ、形状および配置（上り線）を示す。これらの方法によって、PCa 床版製作時における型枠基数および調整手間が削減され省力化が可能になった。また、形状を統一することに伴う PCa 床版の重量は形状統一前に比べ増加したが、鋼桁の応力照査の結果、問題ないことを確認できた。

3.3 設計上の課題およびその対応

3.3.1 主桁のたわみ差による、PCa 床版への負荷応力に対する検討

3.3.1.1 課題

本橋は、複雑な平面線形に対応するため、主桁間隔が変化する構造となっている（第 6 図参照）。また、支点部では斜角 36° 11' 01" (A1) ~ 40° 38' 24" (A2) を有しており、設計荷重作用時に生じる主桁のたわみ差によって、端支点および中間支点付近に付加的な引張応力の発生が懸念された。



(注) A* : 端支点番号
S* : 支承線
P1 : 中間支点
G*, ** : 桁番号

第 6 図 PCa 床版のグループ、形状および配置（上り線）（単位：mm）

Fig. 6 Grouping and arrangement of precast PC slab (unit : mm)

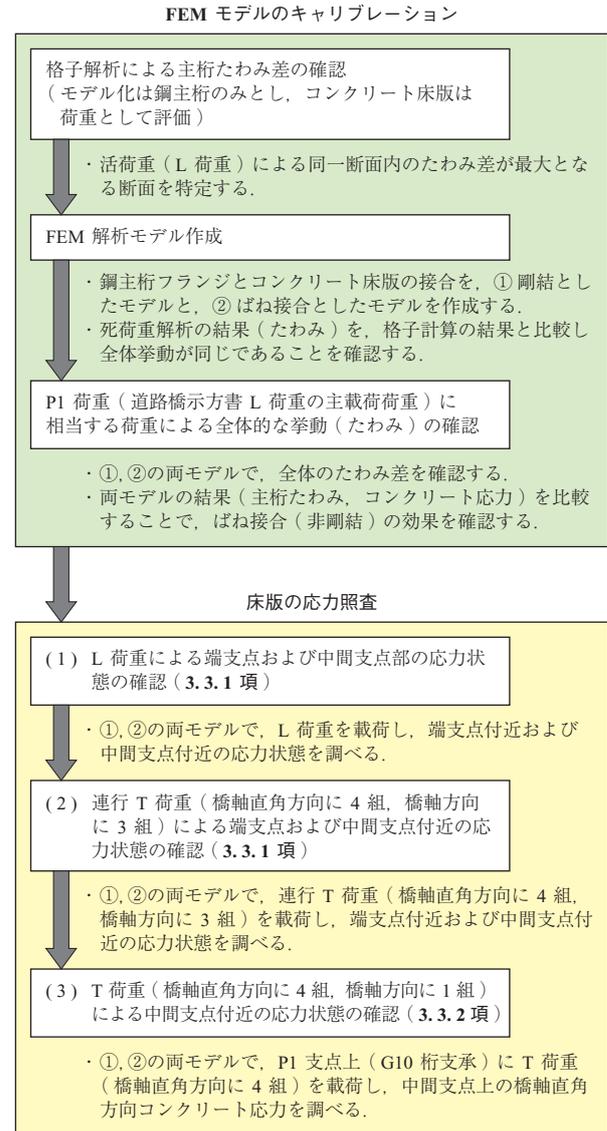
3.3.1.2 課題への対応

上記の技術的課題の設計手法として、主桁・横桁および床版をモデル化した三次元有限要素法（以下、FEM）解析を実施した。ここで、支付近の床版に活荷重によって生じる最大引張応力を確認することを目的として、第7図に示す手順で解析を実施した。第8図にFEM解析モデルを、第2表にFEM解析材料条件を、第3表にFEM解析拘束条件を示す。

本橋は非合成構造であるため、コンクリート床版と主桁を剛結させたFEMモデルでは完全合成構造となってしまう、実際とは異なる挙動を示すことが懸念された。そこで、床版と主桁をばねで接合することで非合成構造としての挙動を再現させることにした。ばね接合時、剛結時のそれぞれの主桁たわみを格子計算結果（床版の剛性は非考慮）と比較することで、ばね接合の効果を確認した（FEMモデルのキャリブレーション）。本橋の場合、 $\phi 19 \text{ mm} \times 2$ 本のスタッドを1m間隔で配置するので、フレキシビリティ定数(f)^{(3),(4)}は1.9となる。 $f=1.9$ 程度の場合、完全合成とした解析モデルの60%程度の応力が生じることが実験で確認されている^{(3),(4)}。ばね接合した本モデルでは、橋軸方向の応力レベルが剛結モデルの75%程度であったことから、床版の設計に対しては安全側であると判断し、主としてばね接合モデルで床版の応力を評価することにした。この結果、主桁たわみは格子検査に比べて小さくなった。

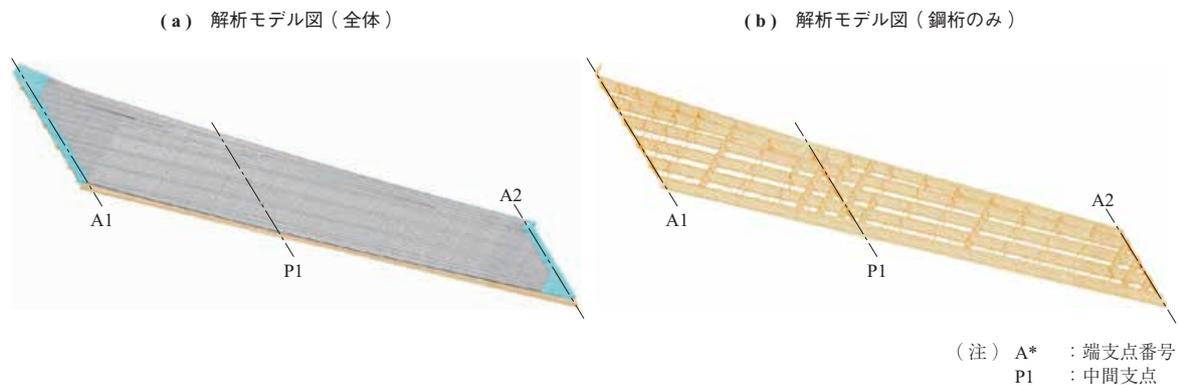
鋼桁と床版のばね接合は、複合構造標準示方書⁽⁵⁾から、頭付きスタッドのせん断力-ずれ変位関係を計算し、その結果からスタッド1本当たりのばね値を設定してFEMモデルに適用した。

断面内での主桁のたわみ差が最大となるよう、L荷重および連行T荷重の載荷位置を検討し、床版に生じる最大



第7図 FEM解析フローチャート
Fig.7 Flowchart for FE analysis

引張応力を確認した。本橋では、中間支点を境界に反対側の耳桁側に荷重が集中するよう載荷した場合の、主桁のそり上がりによる影響を考慮する必要があると考え、連行



第8図 FEM解析モデル
Fig.8 FE analysis model

第 2 表 FEM 解析材料条件

Table 2 Material conditions for FE analysis

項 目	設計 基準強度 (N/mm ²)	静弾性 係数 (N/mm ²)	ポアソン比 (-)	摘 要
プレキャスト コンクリート	50	33 000	0.167	ソリッド要素
現 場 打 ち コンクリート	50	33 000	0.167	ソリッド要素
主 桁	-	200 000	0.3	シェル要素
横 構 対 傾 構	-	200 000	0.3	シェル要素 ビーム要素

第 3 表 FEM 解析拘束条件

Table 3 Support conditions for FE analysis

支点 位置	TX (橋軸)	TY (直角)	TZ (鉛直)	RX (橋軸)	RY (直角)	RZ (鉛直)
A1	自由	固定	固定	自由	自由	固定
P1	自由	固定	固定	自由	自由	固定
A2	固定	固定	固定	自由	自由	固定

(注) TX : 橋軸方向変位 RX : 橋軸まわり回転
 TY : 橋軸直角方向変位 RY : 橋軸直角軸まわり回転
 TZ : 鉛直方向変位 RZ : 鉛直軸まわり回転

T 荷重による照査も行うことにした。第 9 図に床版コンクリートの応力度を示す。

第 9 図に示されるように端支点付近での最大引張応力度は、橋軸直角方向で 0.68 N/mm² および橋軸方向で 0.1 N/mm² 以下であった。これらの結果、当初懸念されていた端支点付近では主桁たわみ差によって PCa 床版に付加的に生じる引張応力度については、問題としないと判断した。斜角が小さいことからたわみ差に影響が懸念されたが、本橋の場合は幅員に対して主桁本数が多くその間

隔が狭いため、端支点付近では大きなたわみ差は生じにくく、有害な応力は発生しなかったと考えられる。

一方、第 9 図で注目すべきは中間支点上の橋軸直角方向の引張応力度である。橋軸方向の引張応力度は主桁と床版をばね接合しているため、合成作用によって PCa 床版に主方向の負曲げモーメントが作用し引張応力度が発生したものと考えられる。しかし、通常の PCa 床版設計では中間支点上では橋軸直角方向の曲げモーメントは発生しない。この理由について次項で詳述する。

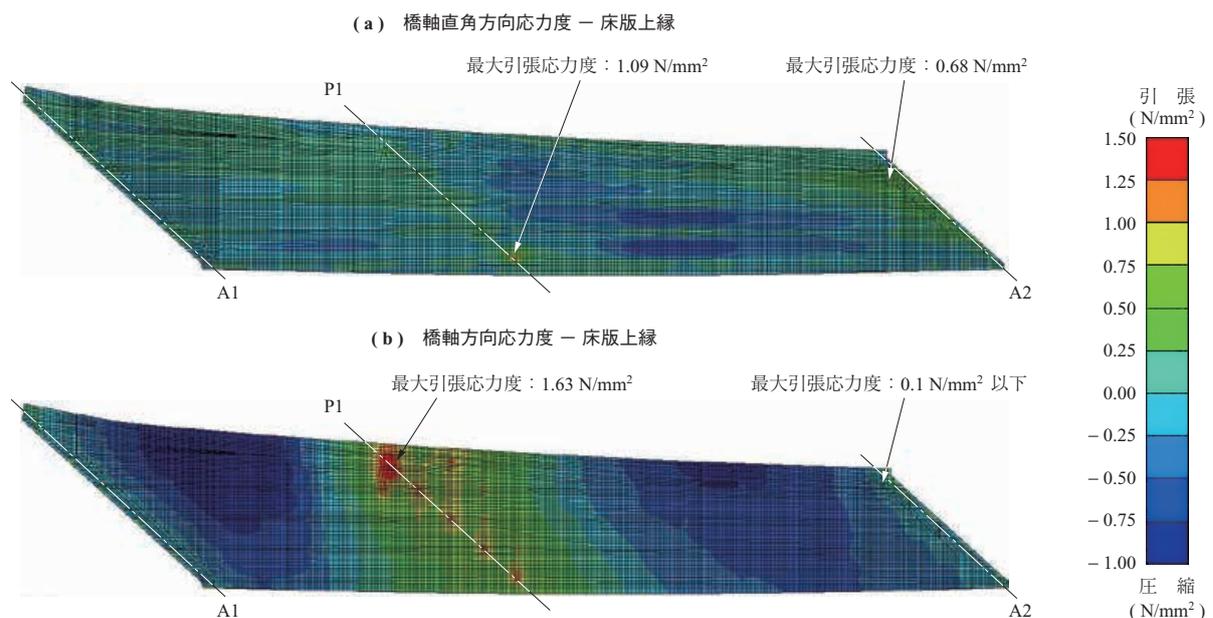
3.3.2 中間支点上の橋軸直角方向応力度の検討

3.3.2.1 課 題

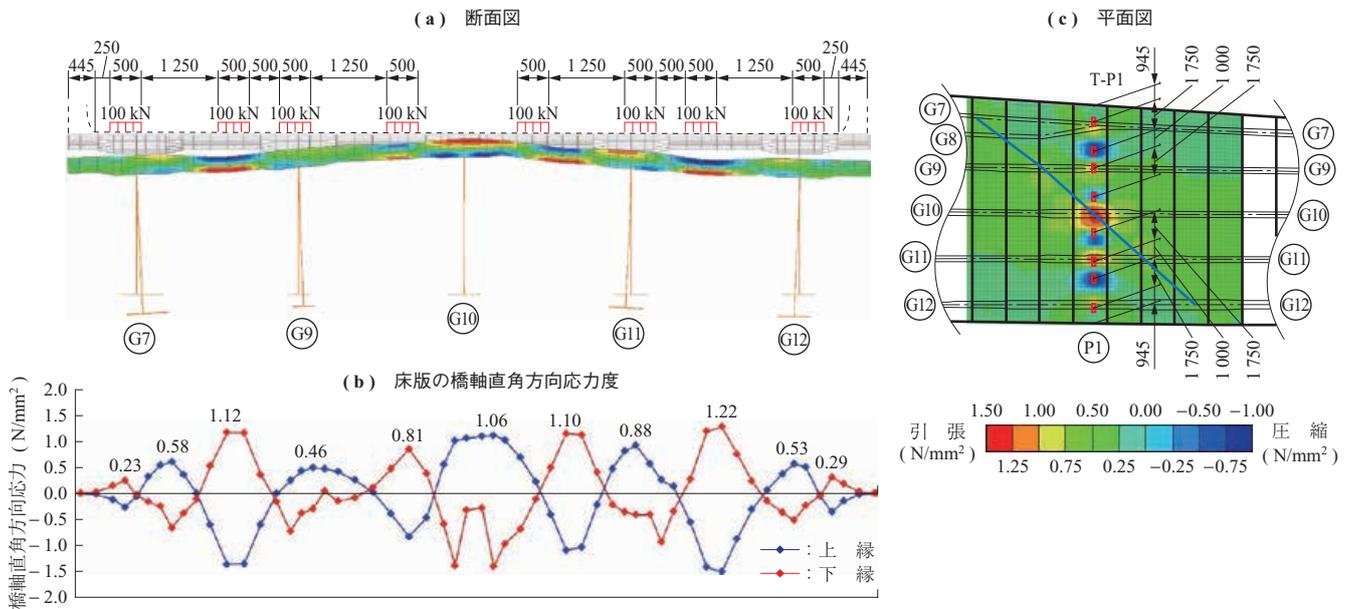
一般に床版の橋軸直角方向の設計は、主桁にたわみ差が生じないことを前提に行われる。本橋は斜角が P1 橋脚上で約 38°あるため、活荷重が第 10 図に示すように載荷された場合、中間支点上の G10 主桁と隣接する主桁にたわみ差が生じる。特に、本橋のような斜角が小さい場合は、この影響が大きく橋軸直角方向の PC 鋼材量の決定要因となることが懸念され、その設計方法が課題となった。

3.3.2.2 課題への対応

上記の課題への対策として、第 8 図に示す FEM 解析モデルに主桁間のたわみ差が大きくなり中間支点上の応力度が最大となるように、T 荷重を橋軸直角方向に 4 組載荷した。この載荷状態に対する主応力を第 10 図に示す。第 10 図に見られるように、中間支点上では橋軸直角方向に 1.06 N/mm² の引張応力の発生が見られた。さまざまな荷重状態に対して、FEM 解析結果による引張応力と道路



第 9 図 床版コンクリートの応力度
 Fig. 9 Maximum stress in concrete slab



第 10 図 中間支点上の T 荷重位置および橋軸直角方向応力度 (単位: mm)
 Fig. 10 Concrete stress in transverse direction at intermediate support (unit: mm)

橋示方書⁽⁶⁾式による曲げモーメントから算出される引張応力を比較した結果、道路橋示方書による結果は FEM 解析結果に対して十分安全側であることが確認されたことから、本橋の設計では、道路橋示方書に従った計算で各部位における必要な PC 鋼材量を算出し配置した。設計計算の結果、耳桁上での PCa 床版上縁において設計荷重時の応力度と、衝突荷重時のひび割れ幅が決定要素となった。

4. 施 工

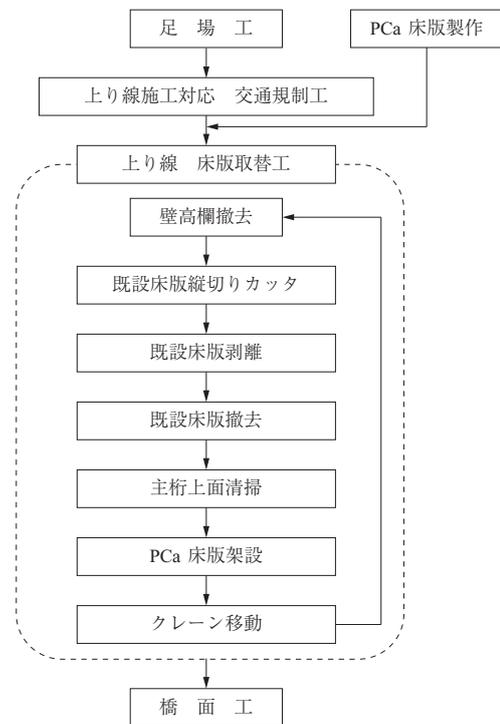
4.1 施工フローおよび交通規制計画

本工事の施工フローを第 11 図に示す。本工事は片側車線を交通規制するため昼夜施工可能であるが、交差する国道をまたぐため床版取替時は国道の交通規制の必要性があり、床版取替は夜間 (21:00 ~翌 6:00) のみで実施した。上り線の交通規制は第 4 表に示すとおりステップ 1 ~ 7 で実施した。第 12 図に上り線の PCa 床版取替時の交通規制 (ステップ 4) の様子を示す。対面交通規制時には、中央分離帯防護として警察および管理者との協議に従い完全分離型プレキャストコンクリート防護柵を設置した。また、インターチェンジ直近であるため仮設 B ランプを施工し交通運用を図った。

4.2 PCa 床版の施工

4.2.1 既設 RC 床版の撤去

既設 RC 床版は、中間支点上から両橋台方向に撤去を行った。第 13 図に剥離装置による既設 RC 床版の撤去を示す。本橋は非合成桁構造であるため剥離装置を用いて



第 11 図 施工フロー
 Fig. 11 Flowchart for construction work

実施した。撤去する RC 床版に吊り装置を設置し、所定の範囲をカットで切断・分離させた後、上フランジ上のスラブ止めを強制的に破断させ鋼桁から剥離させるものである。

4.2.2 新設 PCa 床版架設

PCa 床版の架設は、架設に要する工程を短縮する目的で 220 tf クレーン 2 台を用いて実施した。既設 RC 床版

第 4 表 交通規制ステップ
Table 4 Traffic control steps

ステップ	規制時間	規制箇所	主な作業
1	6:00 ~ 翌 16:00 (34 時間)	上り線 走行車線	仮設 B ランプの施工
2	1 日目 6:00 ~ 3 日目 6:00 (48 時間)	下り線 走行車線	路肩部段差修正工, 仮設防護柵設置工, 仮路面標示工ほか
3	3 日目 6:00 ~ 6 日目 6:00 (72 時間)	上下線 追越車線	車線シフト, 仮設 B ランプの施工, 仮設防護柵の設置ほか
4	6 日目 6:00 ~ 32 日目 6:00 (624 時間)	上下線 走行車線 追越車線	床版撤去工, 床版取替工, 壁高欄設置工, 伸縮装置撤去・設置工ほか
5	32 日目 6:00 ~ 34 日目 6:00 (48 時間)	上下線 追越車線	車線シフト, 仮設 B ランプ復旧, 仮設防護柵撤去ほか
6	34 日目 6:00 ~ 36 日目 6:00 (48 時間)	下り線 走行車線	路肩部段差修正工 (復旧), 非常駐車帯の復旧, 仮設防護柵の撤去ほか
7	6:00 ~ 翌 16:00 (34 時間)	上り線 走行車線	仮設 B ランプの復旧 (完了)



第 12 図 RC 床版取替時の交通規制 (ステップ 4)
Fig. 12 Traffic control during construction



第 13 図 剥離装置による既設 RC 床版の撤去
Fig. 13 Removal of existing RC slab

を中間支点部から両橋台側に向かって撤去後, 順次新設 PCa 床版の架設を実施した. PCa 床版の RC ループ継手部の鉄筋コンクリートあご部分が接触しないよう, 所定の高

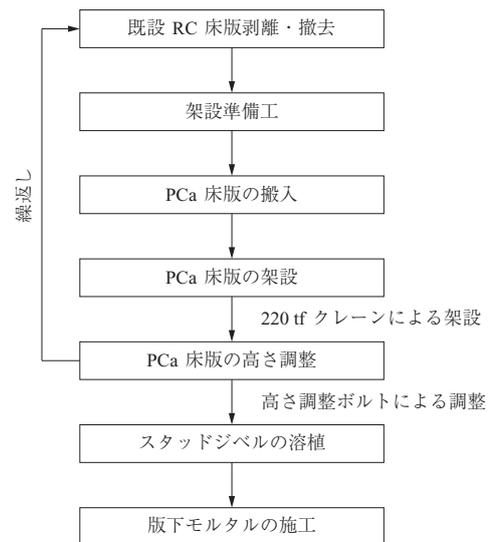
さ近くまで降ろした後, 水平 (橋軸) 方向にスライドさせて所定の位置へ設置した. 第 14 図に PCa 床版の架設フローを, 第 15 図に PCa 床版の架設状況を示す.

4.2.3 接合部および現場打ち PCa 床版部の施工

PCa 床版の接合は RC ループ継手を採用した. 継手部のコンクリートは, 収縮によるひび割れ防止のため膨張コンクリートとした. 使用したコンクリートの設計基準強度は, PCa 床版と同等とするため 50 N/mm² とし, 交通規制開放時には設計基準強度以上であることを確認した. また, 本橋は斜角を有しているため, 僅かの範囲ではあるが現場打ちコンクリート部がある. 現場打ち部のコンクリートは, 設計基準強度 50 N/mm² の超速硬コンクリートとした. 伸縮装置付近の桁端部の PCa 床版敷設状況を第 16 図に, 現場打ちコンクリート打設状況を第 17 図に示す.

5. 結 言

東北自動車道綱木川橋床版補強工事 (プレキャスト PC



第 14 図 PCa 床版架設フロー
Fig. 14 Flowchart for slab replacement work



第 15 図 PCa 床版の架設状況
Fig. 15 Installation of PCa slab



第 16 図 桁端部の PCa 床版敷設状況
Fig. 16 PCa slab and expansion joint at girder end

床版を用いた床版取替工事)について報告した。

本工事の設計では複雑な平面線形かつ 36 ~ 40 度の斜角に対応するため、床版に与える主桁たわみ差の影響を適切に評価することが課題であった。この課題に対しては FEM で全橋モデルの解析を行い、床版への影響を調べることで対応した。

高耐久かつ急速施工が求められる壁高欄では、PCa 床版の端部を立ち上げ、さらに架設前に地覆部を構築することで、耐久性の確保と施工の迅速化を実現できた。

高速道路の対面交通規制、交差道路との関係による工種の時間制限などの制約条件下で、過去に例のない斜角部も含めた PCa 床版による床版取替を行い、2014 年 4 月に無事竣工を迎えた。

本報告が、本橋のように床版形状が複雑な橋梁における PCa 床版による取替工事の今後の一助となれば幸いである。

最後に、集中工事ではあるが、交差道路との関係から、床版取替は夜間のみとなる制約のなか、工期内で床版取替を完了することができたことは、関係各位の努力の結果で



第 17 図 現場打ちコンクリート打設状況
Fig. 17 Pouring of CIP concrete at girder end

あり、ご助力いただいたすべての方に感謝を申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: 設計要領第二集橋梁建設編 7 章鋼橋 2012 年 7 月 pp. 30 - 47
- (2) 公益財団法人土木学会: 2007 年制コンクリート標準示方書 (2007 年制定) 設計編 2008 年 4 月 pp. 34 - 37
- (3) 一般財団法人高速道路技術センター: 第二東名高速道路 鋼桁の新技术に関する調査研究 少数主桁橋設計・施工指針 (案) フォローアップ検討報告書 2000 年 3 月 pp. 121 - 122
- (4) 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会: PC 床版 設計・施工マニュアル (案) 1999 年 5 月 pp. 28 - 29
- (5) 公益財団法人土木学会: 2009 年制定複合構造標準示方書 2009 年 12 月 pp. 60 - 64
- (6) 公益財団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 2012 年 3 月 pp. 284 - 285

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;">I H I 技 報</p> <p style="text-align: center;">第 56 卷 第 1 号 (通巻 第 305 号)</p> <p style="text-align: center;">平成 28 年 2 月 22 日 印刷 平成 28 年 3 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 IHI 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 http://www.ihico.jp/ 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>
--	---

株式会社 IHI

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
相生鋳造部	〒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 東京都昭島市拝島町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



IHI STAR Machinery Corporation

はじめりは馬一頭曳きの畜力用農作業機でした。
トラクター用の酪農畜産・水田・畑作向け農作業機を
作っている「IHIスター」と申します。



適応トラクター 80~140馬力
「トラクター用牧草反転機」
大型ジャイロテッタ, TGT12010



馬一頭曳き
「畜力用牧草反転機」
ヘーテッタ, HT6



馬一頭曳き
「畜力用牧草集草機」
ヘーレーキ, HR30



適応トラクター 40~80馬力
「トラクター用牧草梱包機」
中型カッティングロールペーラ, TCR2240AN



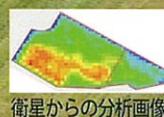
来る100周年に向かって、人と人、お客様と
“ものづくり”の力を結集し、より強固に
“つながる”ことを目指します。

農研機構 生研センターが実施する
「攻めの農林水産業の実現に向けた
革新的技術緊急展開事業」へ
参画しています。



GPS衛星から
位置情報を取得
作物の生育状況等に
基づく施肥マップ
によって、
ピンポイントで
最適な量の施肥作業
が可能に！！

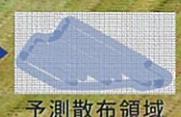
ポイント毎の最適施肥量を
リアルタイムで算出し、
化成肥料の散布を行う
精密可変施肥システム



衛星からの分析画像



施肥マップ化画像



予測散布領域

IHI GROUP
Realize your dreams

株式会社IHIスター

北海道千歳市上長都 1061 番地 2
Tel.0123-26-1122
http://www.ihistar.com