

IHI

Realize your dreams

IHI技報

Journal of IHI Technologies

2015
Vol.55 No.1

新技術・新製品・新事業特集号

ISSN 1882-3041

IHI技報 第55巻第1号 平成27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 伊東 章雄 1
 Message for the Special Issue of New Technologies, New Products and New Businesses

◆トップが語る Message for New Business

- 10 年後、20 年後の社会に大きく貢献する ……新事業推進・重点新事業領域担当 代表取締役副社長 石戸 利典 2
 ビジネスの芽をつかみ、新しい事業に展開する
 Grasp Opportunities for Future Business to Make a Great Contribution to the Society

◆センター長が語る Message

- 世界最高峰のフィールドで ……航空宇宙事業本部 副本部長 技術開発センター センター所長 金津 和徳 4
 航空エンジンの 30 年後を見据える
 In the Top Field of Engineering

◆てくのすこーぷ Techno Scope

- てくのすこーぷで見た内視鏡消毒機の発明……………知的財産部 8
 Invention of the Ozone Endoscope Disinfector

◆こんなビジネスが面白い Business

- 宇宙の視点から農業生産を支援する……………株式会社 IHI 10
 Field Touch : An Agriculture Information Service that Supports Farmers from Outer Space
 藻類バイオ燃料で持続可能な社会への貢献を……………株式会社 IHI 12
 Progress towards Commercialization of Algae Bio-Fuel
 バルブを配管に付けたまま透視して迅速点検……………株式会社 IHI 14
 PASS : Ultrasonic Valve Inspection System

◆我が社の看板娘 Products

- 建設機械の騒音を逃がさず消し去る消音器……………株式会社 アイ・エヌ・シー・エンジニアリング 16
 Active Silencer for Reducing Low-Frequency Exhaust Noise from Heavy Equipment
 “廃熱”から新たな電力を生み出す……………IHI プラント建設 株式会社 18
 HeatInnovator : The Effective and Simple Waste Heat Recovery System
 揺れに備え、揺れを凌ぐ……………明星電気 株式会社 20
 MAPS : The Earthquake Early Warning System and Seismic Intensity Meter

◆我が社のいち押し技術 Technologies

- 小型軽量インバーターで電動化を加速！！……………株式会社 IHI 24
 Development of High Power Density SiC Inverter which Realized 70 kW/!!

◆箸休め Essay

- 誰にあげる？……………技術開発本部 浜本 章 28
 What's Going on with Nihon Go? Part 2

◆技術論文および解説 Technical Papers

- 船用デュアルフューエル機関「28AHX-DF」の開発……………廣仲 啓太郎, 渡辺 孝一, 三村 敬久, 倉井 智広, 結城 和広 30
 Development of Marine Dual Fuel Engine “28AHX-DF”
 マイクロ波電力伝送技術の電動飛行機への適用……………小澤 雄一郎, 田中 直浩 34
 Study of Electric Aircraft Charged by Beamed Microwave Power
 PIV 技術の開発と実機への適用……………長尾 隆央, Chandra Shekhar, 高和 潤弥, 松野 伸介, 大内田 聡 39
 Development and Utilization of Particle Image Velocimetry Method
 酸素燃焼発電プラントの商用化への取組み……………山田 敏彦, 小牧 晃洋, 後藤 隆弘, 内田 輝俊, 藤原 直樹, 氣賀 尚志 50
 Efforts Aimed at the Commercialization of Oxyfuel Power Plants

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 伊 東 章 雄

国際情勢や経済、産業、技術の視点から 2014 年を振り返るとさまざまな出来事がありました。たとえば、国際的には、欧州・中東での地政学的なリスク増大、シェール革命以降の資源・エネルギー分野での勢力地図の変化と原油価格の急落、国内的には、日本経済のデフレ脱却の兆しと為替の円高から円安への転換による輸出競争力の改善です。一方、地球環境では、地球温暖化の加速と世界的な異常気象や大地震、火山噴火などの災害の増加がありました。私たちは、もしかしたら大きな歴史的な転換点に差し掛かっているかもしれません。



このように、私たちを取り巻く環境変化を切り拓くためには、大きなイノベーションが求められており、ビッグデータの活用や水素社会の実現、Industrie 4.0、ロボット活用、iPS 細胞関連など、新たな技術革新の動きが出ています。

ところで、皆さまは、バタフライ効果をご存じでしょうか？複雑なシステムにおいては、わずかな動きや変化（蝶の羽ばたき）が巡り巡って大きな変化を引き起こすとされています。IHI グループは「技術をもって社会の発展に貢献する」ことを経営の理念としており、この変革のうねりを「技術力」で切り拓かなくてはなりません。このイノベーションを進めるためには、皆で蝶の羽ばたきである時代・技術の変化を感じ、つなぎ、行動し、改善するスパイラルループを回すことで増幅することが重要です。また、多様な人材を活用する、いわゆるダイバーシティを取り入れることで、さまざまな知恵を入れ込むことができ、より普遍的なものになると思います。IHI では、お客さまと自由にアイデアを発想できるように工夫し、互いにより良い未来に向けて新しいビジネスを共創する場として、2014 年 10 月、横浜事業所に「つなぐラボ」を開設しました。お客さまと「つなぐラボ」を出発点に変革の海に漕ぎ出していきたいと思っています。

今年、2015 年の干支は「未（ひつじ）」です。未は『漢書』や『説文解字』によると「植物が鬱蒼^{うっそう}と茂って暗く覆うこと」や「果実が熟して滋味が生じた状態を表している」とされます。2015 年はグループ経営方針 2013 の仕上げの年です。その年を迎え、本号は新技術・新製品・新事業の特集号として、これから大きく茂っていく技術の芽、また熟した滋味豊かな果実をご紹介します。

例年 1 号は、新技術・新製品特集としてお届けして参りましたが、本号では特に、オープンイノベーションによる新事業開発についてもお紹介しております。また、その具体的な成果として藻からバイオ燃料をつくる事業や、農業情報サービス事業に関する取り組みを記事にしました。もちろん、これまでどおり各分野から最新の技術・製品も掲載しております。

私たちは、世の中の変化を感じ取り、それに技術革新で応え、新技術・新製品・新事業として世に発信することで、この変革のうねりを伝えたいと思います。本号でその一端を感じ取っていただけると幸甚です。

オープンイノベーションによる 新事業が次々と

IHI で“新事業”というとき、それには幾つかの異なる場面があります。まず、既存の事業領域「資源・エネルギー・環境」、「社会基盤・海洋」、「産業システム・汎用機械」、「航空・宇宙・防衛」では、それぞれに新しい事業の展開、技術開発を日々行っています。一方で 10 年後、20 年後のビジネスを見据えたとき、これら四つの事業領域に分けられないもの、あるいは間にあるもの、企画開発段階ではどこにつながるのか分からないものなどがあります。後者を検討し、IHI の技術としてどのように育てていくか、どう事業化するかを検討するのが私の担当となります。

新事業を育てるには、二つの流れがあります。一つ

は、社内公募およびベンチャーファンド経由の新事業です。新事業推進部は、広く社内（含む、グループ各社）から事業アイデアを公募しており、毎年 50 件ぐらいの応募があり、それを 3～4 件に絞り込んで、3 月に社長をはじめ幹部の前でプレゼンテーション、すなわち最終審査を行います。提案が通れば、次年度は予算がつき、提案者は必要に応じて新事業推進部に異動してチームを組み、実現に向けて動き出します。一方、ベンチャーファンド経由とは、ファンドに投資し事業・企画のマッチングをする仕組みを利用して、面白い案件が出てきたら紹介を受けて事業化を検討するというもの。いわばオープンイノベーション系です。これらの流れによって現在 10 件ほどの新規事業の検討が進行しており、先行事例として「インフルエンザワクチン製造」、「藻からバイオ燃料をつくる技術」（12 ページ）、「農

10 年後、20 年後の社会に大きく 貢献するビジネスの芽をつかみ、 新しい事業に展開する

社会的な諸問題を解決し、持続可能な社会を実現するために、IHI グループは常に新たな事業を創りだすべく挑戦している。特に既存の四つの事業領域と並列する形で新たな事業領域を打ち立て、「ライフサイエンス、食料、水」の三つのキーワードを柱に事業の展開を図っている。

新事業推進・重点新事業領域担当
代表取締役副社長

石戸 利典



業情報サービス」(10 ページ)などの新事業が生まれてきました。

新事業領域のキーワードは 「ライフサイエンス、食料、水」

もう一つの大きな取り組みは、既存の四つの事業領域と並び得るような新事業領域を確立しようという動きです。IHI グループは、その目指す姿として「21 世紀の環境、エネルギー、産業・社会基盤における諸問題を、ものづくり技術の中核とするエンジニアリング力によって解決し、地球と人類に豊かさと安全・安心を提供する」を掲げています。このビジョンに沿って、現代社会で顕在化しつつある長期的な課題を調べ、どのような解決が求められているかを調査して、IHI の DNA が活かせるものを考え合わせました。その結果、「ライフサイエンス、食料、水」に関わる領域を手掛けようとしています。

オープンイノベーションから出てきた「インフルエンザワクチン製造」は、まさに新事業領域のキーワード、ライフサイエンスに相当するものです。IHI には医薬プラントの製造実績があります。他方、株式会社 UMN ファーマが、従来鶏卵を用いて 6 か月掛かるワクチンを動物細胞培養によって 2 か月で製造する技術を導入しました。そこで、この会社と組み、原薬製造プラントを立ち上げることになったのです。我々が日本とアジアで製造販売する権利を手にし、高品質な工場でワクチンを作る仕組みができ、今年(2015 年)いよいよ量産を始めるところにきています。IHI のものづくりの実力を、ライフサイエンスの分野で活かすことができる好例です。

新しいものを生み出すには、 日頃の取り組み、リソースが重要

新しいことを考えたり、生み出したりするのは簡単なことではありません。しかし、幸いなことに IHI には優秀な技術者がいます。技術者の多くは面白いことをしたい、社会に役立つものをつくり出したいという思いが強

く、「いつかこれを形にしたい」とアイデアを温めている者も多いようで、社内公募の制度はそうした熱意のあるアイデアを吸い上げる良い仕組みとなりました。審査する立場としては、既存の事業や立場などに縛られず、純粹に面白いかどうかという目線で見えるようにしています。

組織として 10 年、20 年後の事業体の姿を描くことが大切です。毎日の業務をきちんと行いながらも、新事業について考える場や仕組み、リソースを確立・確保しておかないと、日常に流されてしまいます。我が社でも毎年秋口に事業戦略会議といった全社的なものからセクターごと、さらに部ごとでも、中長期のビジョンに向けて議論をし、IHI のものづくり技術、エンジニアリング力をどのように活かしていくかといった戦略・計画を作成するのが通例となっています。日常業務に加えての作業ですから熱意・労力が必要ですが、毎年行い、根気よく回していくことが新事業につながるのだと思います。ただ、これだけでは組織のピラミッドのなかでアイデアが固定化されがちなので、発想を変えるためにも、時折、若手グループが集まって会議をしたり、合宿を行ったりして、10 年、20 年先の自分たちの在り方を議論したり、戦略を練ったりということも大切だと思い、応援しています。

また、今回のように全社として重点新事業領域を定めて、外部の技術・リソースを活用することも前提にして検討することも大切です。

新事業領域で「ライフサイエンス、食料、水に積極的に取り組む」というと、「あの IHI が?」と驚かれることもあります。しかし振り返ってみれば、いまや IHI を代表する事業となったターボチャージャーや航空エンジンももともとはゼロから始まった新事業です。第二のターボチャージャー、航空エンジンになるようなビジネスの芽を見つけて育て、将来にわたって社会の発展に貢献したいと願っています。

世界最高峰のフィールドで 航空エンジンの 30 年後を見据える

株式会社 IHI
航空宇宙事業本部 副本部長
技術開発センター センター所長

金津 和徳



独自開発の新素材を採用した 次世代型エンジンが量産開始

航空エンジンのマーケットは大きく分けて、民間用と防衛用の 2 種類があります。マーケットが大きいのはもちろん民間用で、世界の航空輸送の需要は毎年 5% ぐらいずつ増えていくという見通しです。特に、ボリュームゾーンと言われる 150 ～ 200 席機（ボーイング 737 やエアバス A320）は、LCC（ローコストキャリア＝格安航空会社）が主に使用している機種で、1 年に 1 000 機ほどが生産されています。どちらも双発機ですので、エンジンはその 2 倍以上の数が出ることになります。

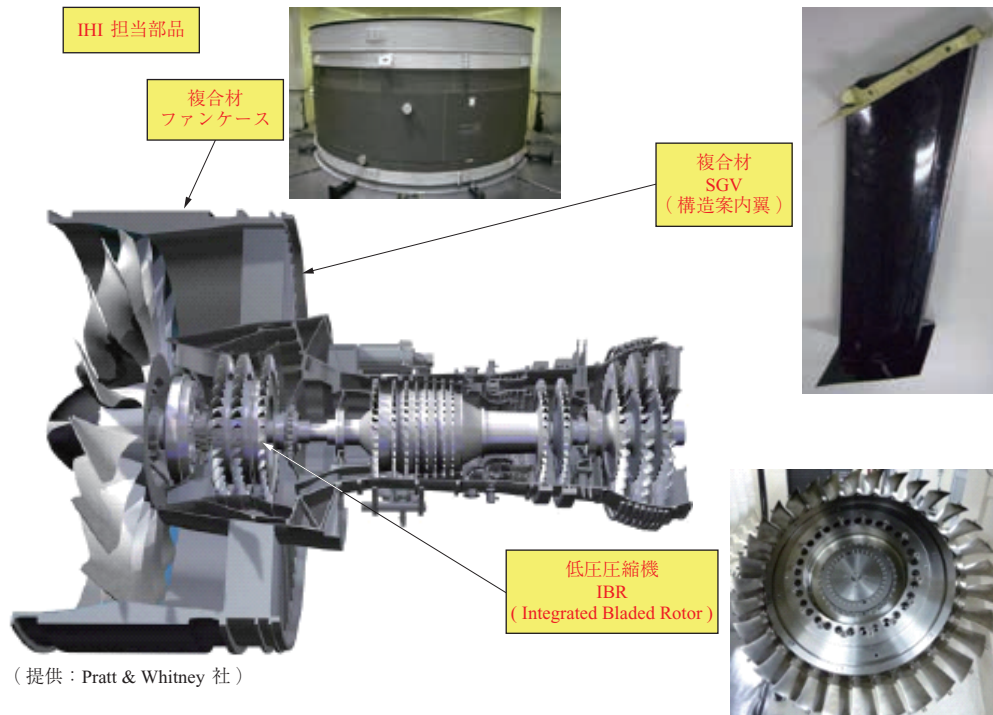
こうした環境のなかで航空会社が重視しているのは、第一に安全性、第二がコスト。特に強いニーズとして、航空会社のコストの相当な割合を占める燃料費

の削減があります。そのニーズに向けて現在のジェットエンジンの開発は進んでいると言ってよいでしょう。

エアバスの A320neo という新しい機種に搭載するエンジン（PW1100G-JM）では、一般財団法人日本航空機エンジン協会のメンバーとして、IHI が複合材ファンケース、複合材構造案内翼などの開発、製造を担当し、型式承認を 2014 年末に取得したところです。これから量産に入り、2015 年のうちには商用運用が開始される見通しです。

一方、防衛用のエンジンでは、防衛省からプライムとして受注した哨戒機 P-1 用の F7 エンジンの開発を完了し、現在は、将来戦闘機用エンジンに向けた技術開発を行っています。民間用、防衛用ともに航空エンジンのトレンド、マーケットを掴み、それらに先駆けて技術開発を行うのがこのセンターの重要な役割の一つです。

< 次世代民間機エンジン (PW1100G-JM) の開発 >

**30 年後の時代性にも即した
“よいもの”を盛り込む**

航空エンジンの技術開発では常にチャレンジしている壁が二つあります。まずは、「効率を追求する」ということ。流体力学や熱力学などを駆使してギリギリのところを攻めています。効率は限りなく 100% に近づけるのが望ましいのですが、それが今はかなり進んできていて、要素によっては 99.xx% のコンマいくつを削るという攻め方もしています。

もう一つは、これまでにない新しい技術を入れ込むことです。ジェットエンジンは開発を始めてから、飛行要件を満たしていることを証明する型式承認を得るまでに数年掛かり、実際に製品化されてから、開発費を回収し利益を次の開発費に回せるまでには 10 年 20 年と飛び続けなければなりません。つまり開発・設計の段階で何年か後に製品化された時点でも十分新規性があり、また使用開始から製品の寿命を迎える 30 年先の時代にも即した“よいもの”を仕込んでおかねばならないのです。これがジェットエンジン開発の面白さでもあり、難しさでもあります。

そうしたなか、民間用エンジンに関しては、燃費、騒音の低減に関わるバイパス比（エンジンが吸い込

む空気のうちファンを通過する割合）を高めることに注力しています。このためにはファン径を大きくする必要がありますが、結果として当然質量が増します。金属に替えて複合材の FRP (Fiber Reinforced Plastics) を用いれば径が大きくても軽くできます。一方で大きなファンを回すタービンも大きくせざるを得ない。しかも、こちらは高温の空気が流れるので FRP は使えません。そこで耐熱性があり軽い CMC (Ceramic Matrix Composites) というセラミック系の複合材を開発して採用を目指しています。このような新しい材料は、最初に開発を始めてから型式承認を得るまでに 20 年というような時間が掛かります。IHI だけでなく、複合材の繊維を製造する企業、繊維を織る企業、そういう方々と連携して作りあげていかなければなりません。

**新素材を生産につなげるには、製造技術、
検査技術などすべてのレベルアップが必要**

先ほどもお話ししたように、新素材で形を作るだけなら 20 年前にもできていました。しかしそれだけでは航空エンジンの部品としては空を飛ばません。強度を保つことができるか、内部の検査はできるか、新しい非破壊検査法を確立したい、あるいは、どのような

最近はシミュレーションによって、過渡状態を含めて相当広い領域で計算できます。その時々によつて最適なよう調整することができるようになり、トータルでの燃費低減にも寄与しています。

企画開発するため、学会に出掛けて世界のジェットエンジン技術の動向を掴んだり、また、大学や研究機関などの方々と連絡を密にしたりして、「5年先にはこのようなものが必要になる。30年後にはこんな

日本の知恵を結集して、産官学連携による研究開発を推進

る」といった意見交換も行います。航空機メーカー、エンジンメーカーの動向にも気を配り、「10年後にはこの機種がモデルチェンジするはずだから、エンジンにはこれが必要なはず、よってこのレベルのことができていないといけない」と逆算し、我々が今何をすべきかを考えて切磋琢磨^{せつさくたくま}しています。このときに大きな助けになるのが同じ航空宇宙事業本部の整備部門（整備事業部）です。どのような使い方をしたらどのようなところ^{ところ}に支障が出てくるのかという情報が定期的なオーバーホールや、修理、メンテナンスのときに入ってくるのです。防衛省向けのエンジンはすべてIHIが担当しているので、整備に関する情報も100%入ります。民間用は100%というわけにはいかないのですが、それでも、実際のエンジンを見ることで、どのような使い方をしたからこのように壊れたというフィードバックが入ります。エンジンを開発するときにはこの情報を基に、壊れにくく、かつ整備コストが掛からないものを作り、量産開始後もどんどん改良していけばよいのです。とはいってもそう簡単ではありませんが、

航空エンジンの世界に IHI スタンダードを確立したい

ジェットエンジンの製品としての寿命はおよそ30年。IHIが参画した最初の民間用エンジンV2500の型式承認を取ったのが1986年ですから、私たちもほぼ30年、ビジネスとしてはようやく最初の1周が終わり2周目に入るところです。スタート当初は、ヨーロッパでもなくアメリカでもない日本のメーカーであるIHIは、民間用エンジンにおける実績は何もありませんでした。ロールスロイス社やGE社（General Electric）といったメジャーなエンジンメーカーがいたからやってこられたというのがありますが、言い方を変えれば、彼らの設計やメンテナンスの仕方を標準とする必要がありました。けれども、これからはIHIのやり方で認証をとる範囲を拡げていこう、ということを目指しています。先に述べたA320neo用のFRP製ファンに関してはIHI自身の設計標準、規格で型式承認を取得しました。このことにより、IHIのエンジンメーカーとしての地位も向上しました。しかし油断はできません。設計、量産技術、整備技術も併せてレベルアップし、IHI方式をスタン

ダードとして確立させることが重要です。

いずれIHIブランドのエンジンを作り世界の空に飛ばすためには、何よりも高性能なものを競争力のあるコストで生産することが必要です。繰り返しになりますが、革新的なものを作るには、新しい材料やそれに合った設計、検査、製造方法、これらすべてをサプライチェーンとして総合的に機能させることが必要で、それこそが、価値を生み出す源泉です。IHIにはそれができます。それだけの人材がそろっていますし、優れたパートナーにも恵まれています。ぜひ世界を相手にチャレンジを続けていきたいものです。

てくのすこーぷで視た内視鏡消毒機の発明

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、オゾン水を用いて内視鏡を消毒する装置の特許について紹介します。

(特許第 3945222 号)



オゾン水内視鏡消毒機 OED-1000S

内視鏡を用いた病気の発見、検査、治療は胃や大腸などさまざまな臓器に適用されています。検査においては、がんなどの重大な疾病の早期発見に有効であり、治療においても患者の身体への負担が少ない方法として広く普及しています。一方で、内視鏡の不十分な洗浄・消毒は患者間の感染事故の原因となり、各種細菌に起因する感染が多数報告されています。このような状況を鑑み、一般社団法人日本環境感染学会、一般社団法人日本消化器内視鏡学会、一般社団法人日本消化器内視鏡技師会の三つの組織により、「消化器内視鏡の感染制御に関するマルチソサエティ実践ガイド」が策定されています。実践ガイドにおいては、すべての内視鏡を使用する医療機関に対して内視鏡室全体の感染対策が必須の要件である、と述べられており、その中核となる消毒装置が普及しています。

IHI グループの製品では医療関連機器は珍しいですが、株式会社 IHI シバウラ (ISM) が開発した内視鏡消毒機は、オゾン水を用いた装置としては唯一厚生労働省の薬事承認を受けた機器であり、病院、クリニックで広く使われています。

内視鏡消毒機

これまでの内視鏡消毒機では、消毒液として過酢酸、グルタールなどが使用されていましたが、過酢酸は内視鏡の材質を痛めやすい、グルタールは刺激臭が強いなどの問題がありました。

一方、IHI は放電によるオゾンの発生技術をもっており、この技術の内視鏡消毒機に適用することを考えました。オゾン (O_3) は、酸素原子 (O) が三つ結合した状態のものであり、強力な酸化能力をもつことから、殺菌・脱臭などに効力を発揮します。オゾンは自然界にも存在しますが、放電を用いることにより必要なときに必要な量だけ製造が可能であり、保管が不要です。オゾン自身は人体には有害ですが、酸化反応のときに酸素 (O_2) に戻り、消毒後に残らないので、安全な消毒が可能です。消毒機ではオゾンガスを水に溶け込ませたオゾン水を使い、機器の殺菌を行います。オゾンは短時間で無害な酸素になるため、オゾン水は使用後に特別な処理をすることなく排水ができます。

開発した内視鏡洗浄装置を業界で初めて 2002 年に



提供を開始しました。消毒機としては厚生労働省の薬事認可を得る必要があり、経験のない我々には大きなチャレンジで苦労の連続でした。認可申請を行う前に、オゾン水による消毒試験を十分に行い申請しましたが、消毒機としてオゾン水を用いた装置の実績がないため、厚生労働省は非常に慎重であり、さまざまな使用を想定した度重なる各種試験、データ提出などを経て、2008 年によりやく薬事認可を受けることができました。

オゾン水内視鏡消毒機の特徴

内視鏡消毒機 (OED-1000S) はオゾン水を用いたことで、清潔で安定した高い消毒効果を実現し、さらにコンパクト、高速処理可能、低ランニングコストを実現しました。この装置の基本となっているのが、特許第 3945222 号です。以前からオゾン水を用いての内視鏡の消毒は検討されていましたが、オゾン水製造時に発生する高濃度オゾンガスを含む気泡による内視鏡本体の腐食、オゾン発生機やオゾン水生成槽などの設置による装置の大型化などの課題があり、製品化には至っていませんでした。

この課題を解決するために、従来はオゾンガスを水に溶解させてオゾン水を生成する生成槽と、内視鏡を消毒する消毒槽を一つの容器で兼ねていたものを、容器に隔壁を設けてオゾン生成領域と消毒領域の二つに分けました。オゾン水生成領域で発生した高濃度オゾンガスは、気泡としてオゾン水表面に浮き上がってくるため、消毒領域に入らない点が発明の重要なポイントです。この構造にすることにより、高濃度オゾンガスを含む気泡はオゾン水生成領域水面から大気中に開放され、内視鏡消毒領域に達することがなくなりました。

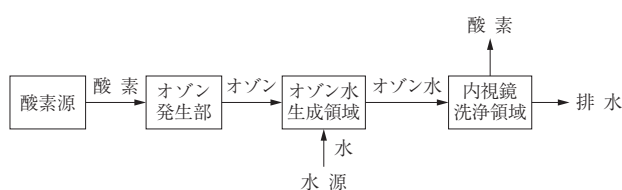
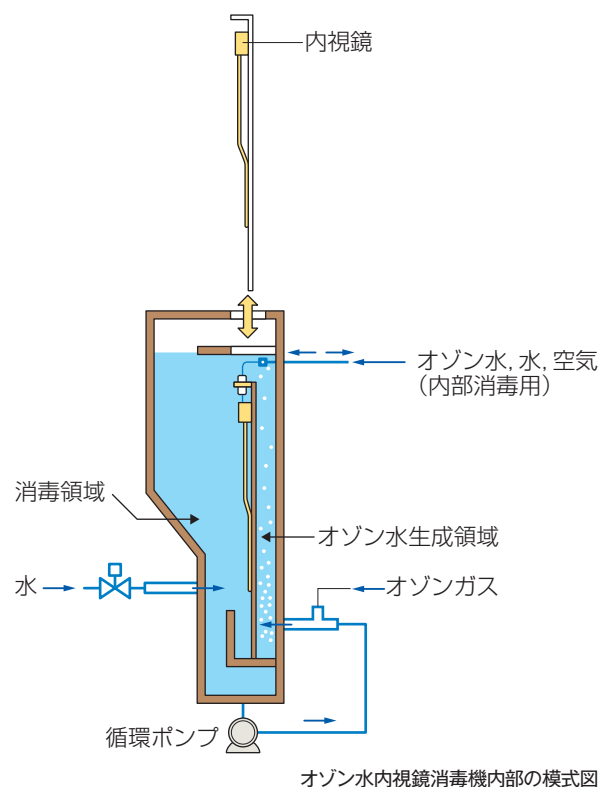
このように、オゾン水生成領域と消毒領域を分けると設置面積が大きくなりますが、この問題を解決するために内視鏡を薄板状のトレイに収納し、トレイごと

消毒領域に縦方向に挿入する構造とすることにより、コンパクトな装置構成を実現しました。これらの発明は、数回の改良によるバージョンアップを経て現製品に引き継がれており、獲得した権利は他社の参入を妨げる有効な障壁になっていると考えられます。

ISM のオゾン水を用いた内視鏡消毒機は世界唯一の装置です。国内ではすでに 3 000 台を超える利用実績がありますが、業界に先駆けてオゾン濃度管理機能や消毒履歴管理ソフトを付加するなど、さらなる製品改良を行っています。

すでにベトナムの病院に納入実績がありますが、今後はアジアを中心に海外への提供も視野に入れて事業展開を進めていきます。

(文責：知的財産部)



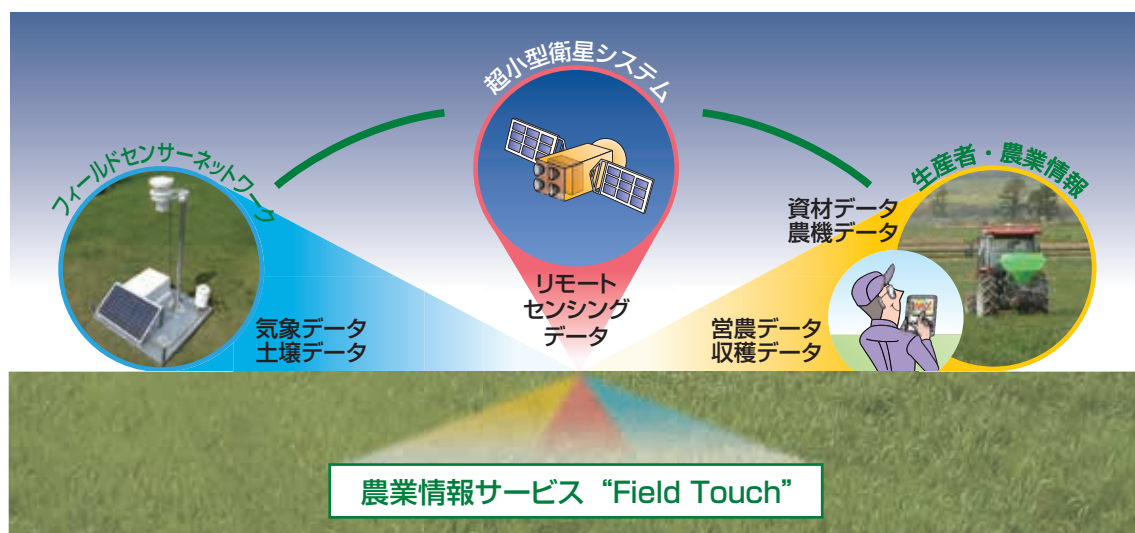
オゾン水内視鏡消毒機の基本構成

宇宙の視点から 農業生産を支援する

日本の農業を元気づける 農業情報サービス “Field Touch”

さまざまな問題を抱える日本農業の再生を目指して、「宇宙」と「情報」という視点から突破口を開こうとする取り組みを紹介する。

“Field Touch” が農産物の生育状況などを宇宙から見守り農業生産を支援する。



日本の農業が抱える課題

現在、日本の農業は、生産者の高齢化に起因する生産性の低下、農産物供給の不安定化などの難問に直面している。また、輸入食料の安全性に対する不安から品質の高い国産農産物への消費者ニーズが高まっている。さらに、離農や世代交代が進むに従って、農地が少数の農家に集約されて大規模化する傾向にあり、農業のあり方が変わってきている。

情報に支えられる農業

これまで農業は圃場（田畑）における生産活動を中心に考えられてきたが、「情報」を軸にして見直すという別の活動が視野に入ってくる。

農業生産に伴う「情報」には営農日誌に代表され

る「作業情報」、気象データのような「環境情報」、農産物の様子を示す「生育情報」などがある。これらの情報を収集・加工・提供して、一元的に農業を支援するサービスは、これまでになかったビジネス形態であり、農業問題解決への一つのソリューションとなる可能性がある。さらに、これらの情報は安全・安心で高品質な農作物であることを示すものであり、生産物の流通、販売において重要な情報となる。このような観点から IHI は農業情報サービス “Field Touch” を開発した。

宇宙の視点からのアプローチ

“Field Touch” の核となる「生育情報」は人工衛星で高空から俯瞰する方法、いわゆるリモートセンシングによって得られる。従来の地上での観察に比べて全

体を把握する方法としてはるかに優れており、農産物の生育状況を二次元分布として可視化することが可能になる。

農産物の成長度合いは NDVI（正規化植生指数）として数値化され、判断指標として用いられる。これによって成長度合いに応じた施肥量の調整が可能になり、圃場全体で一様な収穫量が得られるようになる。つまり、生育が遅いエリアに集中的に「挑戦的追肥」を施すことなどが可能になる。小麦の場合は成長しすぎると倒れて品質が低下する「倒伏^{とうふく}」が問題となるが、成長しすぎている部分の施肥量を減らす対策によって倒伏を防ぐことができるようになる。倒伏しないぎりぎりの量の施肥によって最大収量を得ることができる。

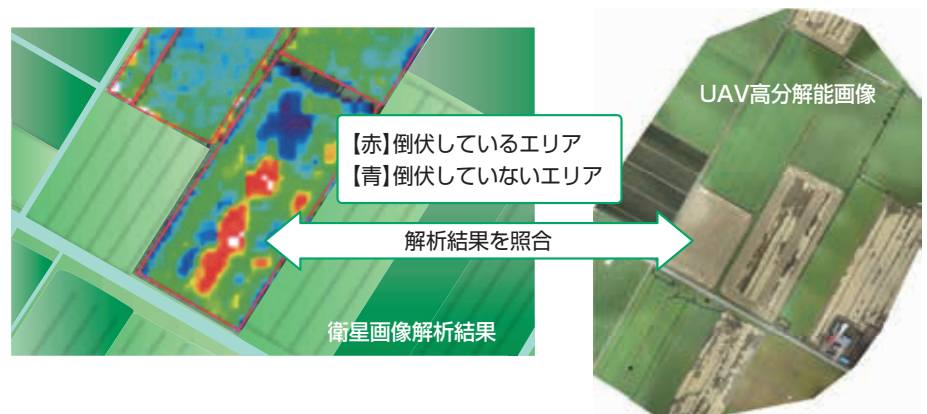
地上にも見張りの目

「環境情報」は気象衛星からも得られるが、局地的な気象情報は地上で収集の方が効率的である。明星電気株式会社の POTEKA に代表される気象観測システムによって、気温・湿度・気圧・日射・風向・風速・雨量などの気象データをリアルタイムで収集でき、ローカルな気象・土壌状態をモニターできる。

さらに、作業内容・収穫実績の「作業情報」はクラウドサービスを活用して記録でき、生産者と需要者の間で共有できる。データはスマートフォンなどによって生産現場でも手軽に記入や参照、検索ができて便利である。

十勝帯広地区でのトライアル

“Field Touch”は2011年度から北海道十勝帯広地区の農業生産者をモニターとしてサービスを試験提供し、生産を支援している。この地区には「環境情報」を取得するためのセンサーが36か所設置され、現地のライブ映像も確認できる。契約モニター農家300軒の方々と意見交換しながら、定期的にシステムのレベルアップを続けている。情報を活用して施肥量の分布を調整して倒伏を回避した例や、収穫量が2割増しになった例も報告されており、実績を重ねている。



小麦倒伏マップ

さらに広がる夢への挑戦

“Field Touch”の追加機能として「作物生育シミュレーション」を開発中である。この機能によって収穫時期や収穫量が日々の気象変化などを考慮して予測できるようになり、計画的な生産が可能になる。さらに、GPS機能を搭載した農業機械（肥料散布機）と“Field Touch”の生育状況情報を組み合わせた“GPS可変施肥システム”を株式会社 IHI スターと共同開発中であり、省エネ・省資源化のサポートを目指している。さらに、GPS搭載農業機械や環境情報収集機器とのインターフェースにはフレキシビリティをもたせ、生産者が今所有している機器を有効活用できるよう配慮している。

近年 UAV（無人航空機）の実用化が急速に進んでおり、2015年は「ドローン（UAVの別称）元年」とも言われている。人工衛星とは飛行高度や分解能など異なる点も多く、それぞれの特長を活かして“Field Touch”への導入を検討していきたい。

“Field Touch”を核に IHI グループの総合技術力（宇宙開発、気象観測、農業機械）を活かした製品を開発・提供して農業生産と経営の計画・実行・改善を図り、ひいては持続可能な食糧生産や食の安全・安心に貢献してゆく所存である。

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/

藻類バイオ燃料で 持続可能な社会への貢献を

進化を続ける藻が生産する油『MOBURA』

化石燃料に替わる将来のエネルギー源として、藻類バイオ燃料が注目されている。
生産コスト低減に資する藻の品種改良や 100 m² 規模の屋外培養試験プラントにおける
安定培養の実現などのステップをクリアし、1 500 m² の屋外大規模培養試験へと進む。



屋外培養試験プラント



MOBURA（油サンプル）
左：抽出直後、右：精製後

藻類バイオ燃料に高まる期待

化石燃料に替わる新たなエネルギー源の研究開発が世界各国で進められている。バイオ燃料はその一つであるが、そのなかでも藻類バイオ燃料が注目されている。従来のバイオ燃料は、とうもろこしやさとうきびなどの食用原料を糖化・発酵させてエタノールを生成するため、食糧との競合の課題がある。しかし、藻類バイオ燃料は非食用の藻の体内で生産される油分を回収・精製した燃料であるため、食糧と競合しない。また、藻が増殖する際には CO₂ を吸収することから、原油や食糧の価格高騰と地球温暖化を同時に解決するソリューションとして注目が高まっている。

コスト削減への挑戦

IHI は 2011 年 8 月、神戸大学発ベンチャーの有限会社ジーン・アンド・ジーンテクノロジー（G>）、株式会社ネオ・モルガン研究所（NML）と共同で IHI NeoG Algae（アイエイチアイ ネोजー アルジ）合同会社を設立、本格的な藻類バイオ燃料の開発に着手した。従前より生物培養に関する研究開発も行っていた IHI は、水処理施設や食品工場の排水設備などのバイオプラントにおいても多数の設計・施工実績があった。高い燃料生産能力をもつ高速増殖型ボツリオコッカス（^{えのもと}稷本藻）を発見した G>、微生物の育種・培養技術をもつ NML と共同で開発を開始したが、当時の藻類バイオ燃料の生産コスト試算は 1 l 当たり約 1 000 円。実用化のためには、コスト低減が大きな課題であった。

ブレイクスルーは藻の品種改良から

コスト低減の見通しに大きな役割を果たしたのは藻の品種改良であった。品種改良によって藻の粒径を大きくできたため、粗いフィルターによる分離回収が可能となった。また、浮上特性の付与により回収エネルギーの低減を可能とした。これらを遺伝子組み換えではなく品種改良により実現していることも本プロジェクトの特長である。

一般的なボツリオコッカスはその増殖において2週間に1回程度しか分裂しないが、高速増殖型ボツリオコッカスは2～3日に1回の頻度で分裂・増殖する。この特質によって品種改良のサイクルが早められ、開発期間が大いに短縮された。

功を奏したコラボレーション

本プロジェクトの成功要因の一つは3社の協力形態にあった。3社がそれぞれの分担範囲を守って活動するだけではなく、しばしば一緒になって考え、課題を解決してきた。例えば上述の「粒径を大きくして浮上特性を付与する」発想はプロセス設計を担当するIHIから生まれ、NMLが品種改良に成功して現実のものとなった。NMLにはないエンジニアリングからの発想であり、IHIにはない品種改良技術を用いた結果、この藻の特長を活かした独創的な分離機構のプロセスの開発が可能となった。3社の保有技術が足し算ではなく掛け算として活かされた好例である。

屋外での安定培養に成功

品種改良によって強化された藻を、2013年秋、IHI横浜事業所内の屋外培養試験プラントにて、100 m²規模で安定培養することに成功した。増殖に必要なエネルギー源として太陽光のみを利用し、ほかの藻類や雑菌に負けない屋外開放池での培養方法を開発したことで、含油率の高いボツリオコッカスを高濃度で安定的に高速増殖させることができる点に、世界的に見ても優位な特長がある。



建設中の屋外大規模培養試験設備

MOBURA の実用化を目指して

生産する油は「MOBURA：モブラ（藻＋油）」と命名し、ジェット燃料を中心とした実用化を目指しており、MOBURAを利用した燃料以外のさまざまな用途開発にも取り組んでいる。

実用化に向けた次のステップとして、プロセス改良によるさらなるコスト低減技術、例えば廃水の再生利用技術、曝気エネルギーの低減化技術の開発を進めている。また、鹿児島県内に屋外大規模培養試験設備を建設中である。事業化時の培養に適した条件を満たすプラント建設地の探索、検討も進めている。

持続可能な社会への貢献を

本開発は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業である「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業」の支援を得て進められている。今後ともNEDOをはじめ関係各位の協力をいただきながら開発を進め、事業化を目指し取り組んでいく。藻類バイオ燃料はエネルギーの多様化のなかで実用化への期待が高まっており、持続可能な社会の実現に向けさらなる挑戦を続け貢献していく所存である。

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/

バルブを配管に付けたまま 透視して迅速点検

最新の超音波技術でバルブ内部が見える “PASS”バルブ検査・診断システム

プラントの予防保全技術は効率的な稼働に欠かすことができない。
PASS バルブ検査・診断システムは高度な超音波データ計測によって
予防保全計画を強力にサポートする新たな検査手法と期待されている。



PASS バルブ検査・診断システム 検査キット

バルブの非開放点検

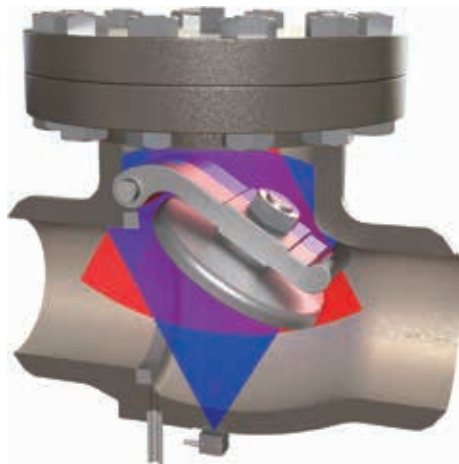
原子力発電所においては、発電所の安全な停止、停止状態の維持およびトラブル時の機器への影響を抑える目的で、多くのバルブが設けられている。それらの重要なバルブの一つにチェックバルブ（逆止弁）が挙げられる。

チェックバルブとは、配管内の流体の流れを一方向だけに制限し、逆方向の流れを自動的に遮断する機能をもったバルブである。アメリカの原子力発電所で使用される重要なチェックバルブに対しては、法令に基づき定期的な動作確認を実施し、機能の健全性を確認することが要求されている。そのため、発電所の運転／停止状態を問わず、バルブを通過する流れを変化させながら、バルブ内部の重要部品が正しく動作する

ことを実測データによって確認する必要がある。

現在はバルブの非開放試験としてアコースティックエミッションを用いてバルブ開閉時に可動部が本体内部で接触する音を受信する方法や放射線透過試験などが一般的に用いられている。一方、バルブの特性から非開放試験が有効でないと判断された場合は、バルブを開放して内部を目視検査する手法もとられている。

しかし、バルブを開放することは、時間的、コスト的なデメリットが大きい。特に原子力発電所では、バルブ内部の除染、放射線遮蔽シールドの設置、嚴重な異物管理といった作業が追加的に発生する。もともと正常に動作しているバルブを開放することは、再組み立てによるトラブルのリスクも懸念されるため、必要最小限にとどめることが望ましい。



PASS データ採取のイメージ

PASS システムとは？

PASS (Phased Array Sequence Scanning) バルブ 検査・診断システム (以下 PASS システム) は、IHI Southwest Technologies, Inc. (以下 ISwT : アメリカ・テキサス州) が開発して特許を取得した最新の非開放バルブ診断システムである。ISwT ではアメリカ国内を中心に南米やアジア地域において、主に超音波フェーズドアレイ (PA) 技術を用いた原子力発電所の圧力容器、ノズル、配管などの定期検査を実施してきた。これらの経験で培った超音波 PA 技術をチェックバルブ検査に特化して PASS システムを開発した。

システムはコンパクトな可搬ケースに収められているので発電所内の狭い場所にあるバルブでもスムーズにアクセスできる。超音波 PA プローブをバルブ外部に取り付けて、目標となるバルブ本体や内部主要部品に対して超音波を送信し、反射波を受信することで検査データが採取される。超音波のデータに加えバルブ近傍に設置する流量計のデータも合わせて連続的にデータを記録する。

PASS システムの特長は？

PASS システムで得られる超音波データの特長は、ほかの非開放試験に比べ、高精度で信頼性の高いデータである点である。前述のとおり PASS システムでは超音波と流量のデータを連続的に採取するので、開閉速度の確認や開閉動作中の内部部品の異常な振動も検出できる。従来のアコースティックエミッション法や放射線透過試験ではバルブの全開／全閉のような特

定の状態しか観察できないため、このような異常を検出することはできない。これらの動的なデータはバルブの健全性を定期的にモニタリングするうえで非常に有用なデータとなる。

これらのデータは同時に開発した PASS ビジュアライゼーションソフトウェアに取り込むことで、バルブの三次元 CAD データと統合した 3D 画像としてバルブ内部の状態を可視化することができる。超音波データと流量データを総合的に解釈するには高度な専門的トレーニングが必要であるが、このソフトを導入することで、専門家でなくても視覚的にバルブの状態を理解することが容易になる。ソフトにはデータベースの機能も組み込まれており、同一バルブや同型バルブを抽出してデータの比較分析もできる。加えて、トレンド分析機能もあり、バルブに異常な変化がないかを簡単に読み取ることができる。これらの機能により本来不要なバルブの開放検査を減らして、効率的な予防保全計画をするためのデータを得ることが可能となる。

今後の展開

PASS システムはすでにアメリカ国内の原子力発電所での適用実績もあり、従来の非開放試験に代わる新しい業界標準のバルブ検査手法として注目されている。

今後はチェックバルブ以外のバルブにも適用範囲を拡大し、さらに効率的なプラント運営に貢献していく。また、装置全体の小型化も行い、より簡単に短時間でデータ採取が行えるよう改良を進めていく。

ISwT は、これまで培ってきた高度な超音波 PA 技術を活かし、より安心安全なプラント運営を支える検査サービスを提供していく。

ミニ解説

超音波フェーズドアレイ (PA) 技術

複数の超音波振動子の発信と反射波の受信タイミングを電子的に制御することにより、超音波の伝搬方向や収束位置を任意にコントロールできる検査手法。

問い合わせ先

株式会社 IHI

原子力セクター 営業部

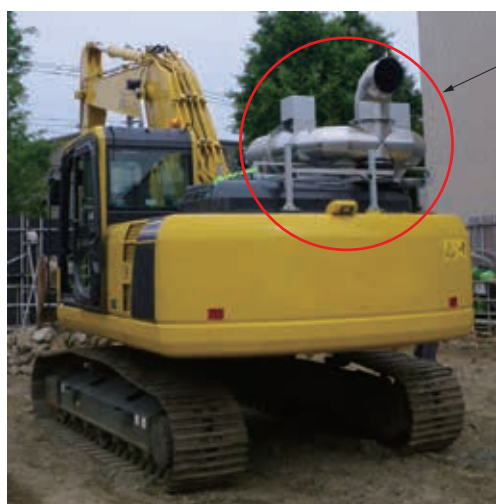
電話 (045) 759 - 2159

URL : www.ihico.jp/

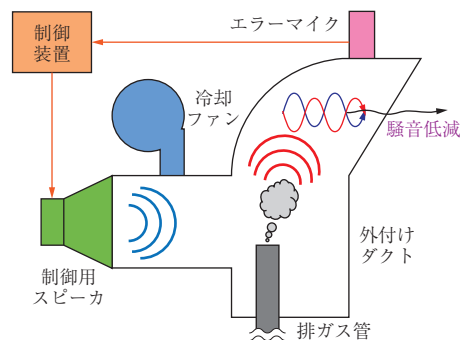
建設機械の騒音を 逃がさず消し去る消音器

重機の排気管からの騒音をノイズキャンセラーの 原理で劇的に低減 「アクティブ消音器」

市街地に隣接する建設現場で問題となっている建設機械の排気騒音を、既存のさまざまな建設機械に外付けが容易なアクティブ消音器によって低減し、近隣住民の方々への負担を軽減する。



アクティブ消音器の搭載状況（試作機）



アクティブ消音器の構成（試作機）

建設現場とアクティブ騒音制御

建設現場においては、土木工事や基礎工事、揚重（クレーンで資材などを必要な場所に引き上げること）作業などに用いられる大型工事機械（重機）から大きな騒音が発生し、近隣住民への負担を大きくしている。特に、市街地の建設現場においては騒音防止・低減が重要な課題となっており、ゼネコン各社においても盛んに研究開発が行われている。

騒音を低減する方法としては、遮音、吸音、ダンピング、振動絶縁などの受動的（パッシブ）な技術が一般的である。比較的高い周波数域に対してはパッシブな対策が有効であるが、建設機械の排気騒音のような低い周波数域に対しては低減策が少なく、対策が難しいとされてきた。

アクティブ騒音制御（ANC：Active Noise Control）は、低減したい騒音と正反対の強弱波形となる音波をスピーカーから放射して打ち消す技術であり、近年ではオーディオ用のヘッドホンなどにノイズキャンセラーとして採用され、身近な技術となりつつある。

ANCは低い周波数域に有効な騒音低減手段であり、株式会社アイ・エヌ・シー・エンジニアリング（INC）では防音塀の低減量を増強するシステム（製品名：スーパーノイズバリア）や、常設ディーゼル発電機の排気ダクトに設置するシステム（IHI 建造の浚渫船「白山」で採用）を実用化し、お客さまにご利用いただいていた。

防音塀タイプのANCはさまざまな建設現場で採用していただいております。INCはANC対策のトップランナーの座を誇ってきた。しかし、近年では建設機械用

の ANC を自社開発し、使用するゼネコンも現れて競争が激化している。

そこで、当社でも建設現場における ANC の競争力強化のため、さまざまな建設機械に適用でき、運用が容易な ANC システムの開発に取り組んだ。

建設機械用アクティブ消音器

建設機械は一般にディーゼルエンジンを原動機としており、エンジン回転数と気筒数によって定まる特定の周波数をピークとした騒音が排気管より放射され、しばしば苦情の原因となる。

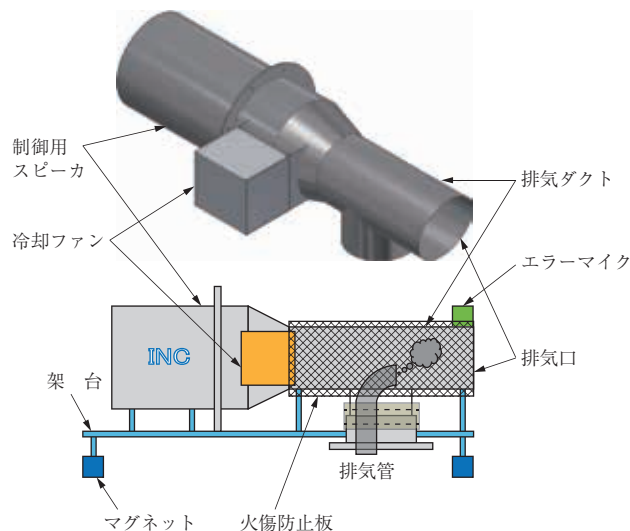
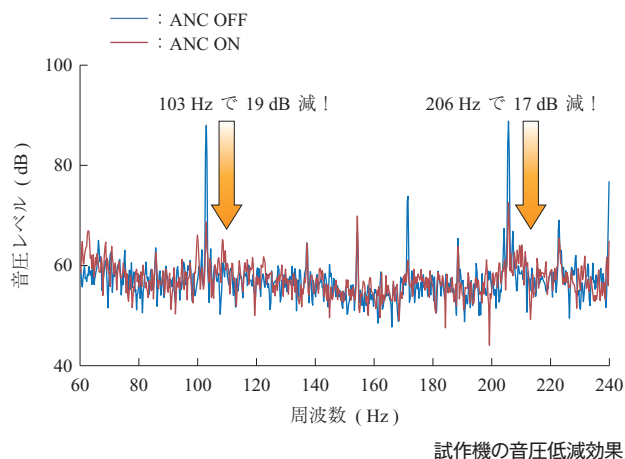
これまでの建設機械用 ANC システムは、排気管出口付近に制御用スピーカーを設置するものが多く、騒音が周囲に拡散してしまい、必ずしも効率的なシステムとはいえない。

本システムは、排気管を覆う外付けダクト、制御用スピーカー、冷却ファン、エラーマイク、制御装置で構成されており、以下の特長がある。

- (1) 排気管から放射された騒音を、大気中に拡散する前に外付けダクト内で効果的に低減
- (2) 建設機械のエンジン回転に起因する幅広い低周波数域の騒音を低減
- (3) 軽量、コンパクトで多機種の建設機械に短時間で装着可能

高温の排気ガスがダクト内を流れるため、これまでに INC が常設ディーゼル発電機用アクティブ消音器で培ってきた技術、経験を活かして、冷却ファンにより適切に冷却できる構造としている。

建設機械用アクティブ消音器の有効性を検証するた



製品イメージ
(上：3D モデル, 下：模式図)

め試作機を製作し、油圧ショベルに搭載して建設現場での実証試験を行った。

油圧ショベルのエンジン回転数最大条件のもとで ANC の制御対象周波数を 50 ～ 250 Hz に設定し、低減効果の確認を行った。排気騒音の基本周波数と推定される 103 Hz で 19 dB、その 2 倍周波数 206 Hz で 17 dB の音圧低減効果が得られた。これは、それぞれの周波数で音のエネルギーを約 1/100 に低減していることに相当する。

まとめ

建設機械に対して外付け（後付け）で設置できるアクティブ消音器を製品化し、2015 年度の市場投入を目指している。

本製品により、従来対策が難しかった建設機械の排気騒音を低減できるため、建設現場に隣接する住民の方々の負担を軽減できる。また、騒音源自体に直接対策ができることから、工事現場の仮囲いの規模縮小によるコスト削減も期待できる。多くの建設現場で使われる魅力ある製品としたい。

問い合わせ先

株式会社アイ・エヌ・シー・エンジニアリング

技術本部 環境技術部

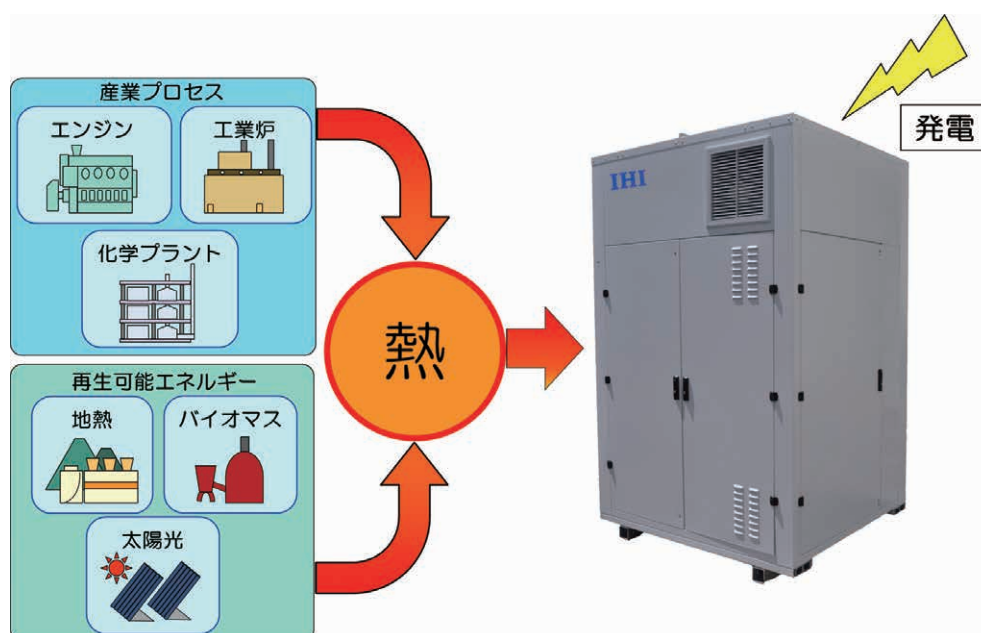
電話 (03) 3360-3227

URL : www.ihico.jp/inc/

“ 廃熱 ” から 新たな電力を生み出す

注目のバイナリー発電システムに 新製品「HeatInnovator」が登場

利用されずに捨てられている温水や工場廃熱などの熱源から新たなエネルギーを生み出す“バイナリー発電”。今注目を集めているこの発電システムに、このたび株式会社 IHI と IHI プラント建設株式会社から新たに 100 kW 級バイナリー発電装置が登場する。



100 kW 級バイナリー発電装置「HeatInnovator」イメージ

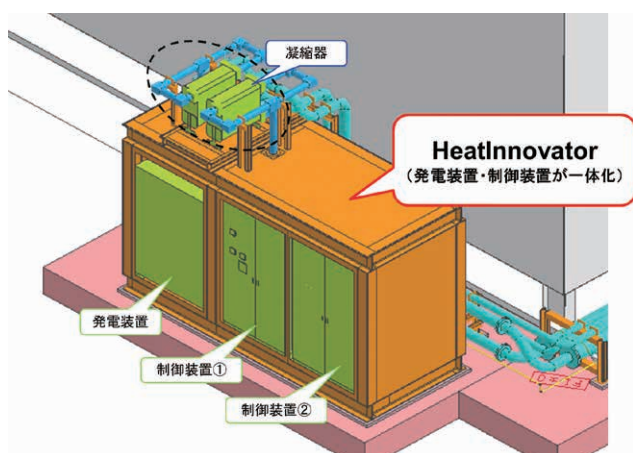
“ 廃熱 ” を効率良く使う

通常、熱エネルギーによる発電に用いられる水蒸気タービンでは、150℃以下の低温熱源を使うことは難しいとされている。しかし、“バイナリー発電”（ミニ解説参照）は沸点の低い有機溶媒を使うことで低温熱源の利用を可能にした。また、電気事業法の規制緩和により、熱の利用制限温度が100℃未満から高温域まで広がったことから、バイナリー発電はこれまで使い道なかった大量の“廃熱”から新たに電力を生み出すことができるシステムとして注目を集めている。

IHI では以前から産業プロセスなどで排出される熱の活用に注力しており、バイナリー発電についても技術開発を進めてきた。そして、2014年5月の規制緩和により発電事業化への道がより大きく開けたことを受け、新たに100 kW級のバイナリー発電装置「HeatInnovator」の販売が2015年4月よりスタートする。

「HeatInnovator」の特長

本装置は、欧米を中心に多くの販売実績をもつ Verdicorp 社（アメリカ）と OEM（Original Equipment



「HeatInnovator」の設置イメージ

Manufacturer) 契約を結び、国内・東南アジアにおける販売を IHI と IHI プラント建設株式会社 (IPC) が担当する。これにより、開発から製品化までのスピードアップと標準化による低コスト化を実現し、お客さまのニーズにお応えできるような製品になっている。本装置の3大特長を以下に挙げる。

(1) オールインワン設計で1台のパッケージに

本装置はコンパクトにモジュール化されており、省スペース化および現地工事量の削減が可能な構造である。そのため、本装置の適用が期待できる“廃熱”のある工場・発電所・ごみ焼却場・船舶から温泉地に地熱発電所、さらにはバイオマス発電事業者や林業組合に容易に設置が可能である。

(2) 発電機の回転部分に磁気軸受を導入

本装置では、発電機の回転部分に磁気軸受を導入している。わずかな磁石の力で軸受を浮上させて回転するため、潤滑油は必要なく摩耗もない。このため、メンテナンスが軽微となる。また、タービン発電機の作動媒体に潤滑油や摩耗粉によるコンタミネーション（汚染）がないため、作動媒体が劣化することもほとんどない。

(3) 安全なフロン系ガス

本装置では作動媒体としてフロン系ガスを使用している。沸点の低い媒体のなかでもフロン系ガスは化学的に安定であり、毒性は低く不燃性で安全性が高い。

このような特長をもつ「HeatInnovator」、各種“廃熱”の利用を検討しているお客さまにぜひお使いいただきたい。

お客さまのニーズに合わせて

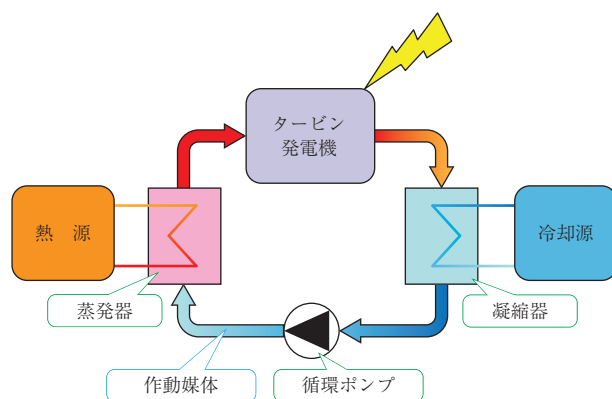
条件を満たす熱源があれば電力を生み出すことができる本装置は、太陽光発電や風力発電と比較し、常に安定した発電量と安価な設備で発電事業を進めることができる。したがって、発電事業者やエネルギーを消費する工場・プラントに対して、省エネルギーによるコスト競争力向上や CO₂ 排出量削減といったニーズに応えることができる。また IHI と IPC では、発電機単体販売ではなく、ソリューション／エンジニアリングによる総合サービスとして本装置を提供しており、これまでの豊富なプラント実績や経験を基に、お客さまのニーズに合わせた廃熱回収から発電までをトータルシステムとして提案できるという強みをもつ。

現在は、より大きな市場が予想される 100℃ 未満の低温でも作動可能な 100 kW 級バイナリー発電装置の開発を進めている。お客さまの“廃熱”をうまく利用したいという声に応えられるようなシステムを引き続き提供していきたい。

ミニ解説

バイナリー発電装置

工場排水や温泉など比較的低温の熱源を利用し、沸点の低い媒体を蒸発させてタービン発電機を作動させる装置。「熱源系統」と「作動媒体系統」という二つ (binary) の熱サイクルがあることから、バイナリー発電と呼ばれている。作動媒体温度などある程度の条件を満足する場合、簡単に届出にて発電設備としての利用が可能になっている。



サイクルシステム

問い合わせ先

IHI プラント建設株式会社
営業部
電話 (03) 4553 - 1007
URL : www.ipc-ihi.co.jp/

揺れに備え、揺れを凌ぐ^{しの}

地震発生前後の的確な情報入手と行動の判断基準を提供 地震対策システム“MAPS”

いざというときの避難指示や機器の緊急停止／再稼働の判断基準として、必要となる精度の高い地震情報を明星電気株式会社の地震対策システム MAPS が提供する。特に、MAPS は長周期地震動階級に準拠した唯一のシステムである。



はじめに

明星電気株式会社は 75 年以上にわたって地震や防災に関する研究・開発を続け、さまざまな機器やシステムを気象庁や自治体をはじめ、多くのお客さまに提供してきた。“揺れる前に知る”システムとしてよく知られた「緊急地震速報」は、明星電気の計測震度計が気象庁の全国 200 か所に配置されて実現したシステムである。ここでは、緊急地震速報と計測震度情報を統合して開発された地震対策システム MAPS を紹介する。

減災は正確な地震情報から

私たちは自宅以外のどのようなシチュエーションで地震に遭うことになるか分からない。不特定多数の人が訪れる商業施設や学校・病院などでは、人的被害を最小限に抑えるために適切な避難判断と指示が最重要である。工場やプラントなどの生産現場では従業員の安全確保はもとより、設備の緊急停止と再稼働の的確な判断と指示が求められる。高層ビルではエレベーターの再起動の判断が減災のポイントになる。いずれの場合も適切な判断と指示には正確かつタイムリーな地震情報が不可欠である。



計測震度計



緊急地震速報受信装置 S704



緊急地震速報受信ユニット S740

体感震度から計測震度へ

周知のように地震の強さは震度で表されるが震度は明治時代から 100 年以上気象庁の観測員の体感から決定されていた。その後、一般市民から「自分の体感と合わない」という疑問が多く寄せられるようになったことから、気象庁は 1985 年に震度観測検討委員会を発足させ、1991 年から震度計測用の機器である震度計の設置を始めた。この要求にいち早く対応し、気象庁と協力して計測震度計を開発した。この計測震度計が開発されるまで地震の客観的データは加速度計によって計測されてきた。計測震度を求めるには、加速度だけでなく揺れの周期を加味したやや複雑な計算が必要とされる。

計測震度計の機能と進歩

地震動には縦波（P 波：6 ～ 7 km/s）と横波（S 波：3 ～ 4 km/s）がある。P 波の立ち上がりが鋭ければ距離が近く、振幅は地震の大きさ（マグニチュード）に比例する。公益財団法人鉄道総合技術研究所と気象庁によって開発された「早期地震警報のための地震諸元推定方法（B-Δ 法）」というアルゴリズムは、強い揺れを予測して新幹線を止める早期地震警報システムに活用されている。このナウキャスト地震情報対応計測震度計は、P 波から S 波の予想震度と主要動到達予想時刻を計算する。S 波到達後は計測震度を算出し、これらをネットワークなどに出力する。

2004 年に気象庁はこのアルゴリズムを用いた多機能型地震観測装置を全国に展開し、独立行政法人防災科学技術研究所などの情報も合わせて、数秒以内に震源情報を発表する処理システムを構築した。ネット

ワーク情報は地震波よりはるかに早いので、揺れる前に自分の現在位置の揺れが予想できる。これが何秒後にどれくらいの地震動が来るか報知することができ、減災に役立つ緊急地震速報として展開されている。

揺れに備える（揺れる前）

地震発生の数秒前に注意喚起できる「緊急地震速報」は、地震発生前に避難行動を始めるために非常に有効である。明星電気が提供している「緊急地震速報受信装置」は、気象庁から配信された緊急地震速報を受信すると、推定震度と猶予時間を予測してお客さまの職場などにアラートとして発信する。これを受けて揺れに備えた避難体勢をとり、身の安全を確保できる。

しかしながら、地震予知にはまだ技術的限界があり、誤報の可能性も否定できないのが現状である。誤報に従って稼働中の設備を停止すると予想外の損害を被る可能性もあることから、企業の防災担当者などからは情報のさらなる信頼性向上への期待が大きい。

揺れを凌ぐ（揺れた後）

地震情報は予知情報も重要であるが、お客さまがいらっしゃるその場所で、実際にどのくらい揺れたのかを正確に知ることに対策を考えるうえで非常に重要である。明星電気はこのために気象庁仕様準拠した「計測震度計」を提供している。正確な震度情報が揺れの 1 分後に計測・表示される。この信頼できる情報に基づいて、工場の場合ならば機器・設備の停止／再稼働の指示や避難誘導指示が的確にできる。さらに、制御用地震計を設置すればプラントを自動的に停止したり、配管を遮断したりすることもできる。震度

計がない場合はテレビなどから得られる広域情報に頼らざるを得ず、情報はあいまいさや誤差を伴う。これによって判断を誤ったり遅れたりする恐れがあるが、このような事態はできるだけ避けなければならない。

地震対策システム MAPS

揺れに備えるための「緊急地震速報受信装置」と揺れを凌ぐための「計測震度計」を統合して地震対策システム MAPS を開発した。このシステムを導入することによって、気象庁の基準に準拠した信頼性の高い情報を入手できるようになり、適切な避難行動による減災が可能になる。本システムを明星電気だけが提供できるのは、気象庁のご指導のもと、長年の経験に基づく高い技術力と信頼の賜であると自負している。

MAPS の中核となる緊急地震速報受信装置“QCAST®”の主な特長は以下のとおりである (S740)。

- ・ 気象庁ガイドライン準拠
- ・ 推定震度と S 波到達の猶予時間を大型 LED で表示
- ・ 緊急地震速報利用者協議会の共通報知音の採用
- ・ 受信情報や推定結果を 10 000 件ログ記録

以下は S704 型受信装置の特長である。

- ・ P 波 S 波の動きを地図上にアニメーション表示
- ・ 受信した情報を最大 64 か所に再配信
- ・ 地震発生テストによる日常訓練が可能

長周期地震動とは？

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の折、震源から遠く離れた大阪市内の震度は 3 であったに

もかわらず、大阪港周辺の超高層ビルは大きくゆっくりとした揺れに襲われた。この高層ビルなどに特有の揺れを引き起こしたのが「長周期地震動」であり、高層ビルが多い都会で注目されている。

長周期地震動は大規模地震発生時に特に強く表れ、短周期の地震動に比べて減衰しにくく、遠地まで到達するのが特徴である。震源から遠距離の場合、地上での揺れは小さいにも関わらず、ビルの高層階を大きな揺れが襲い、多大な被害をもたらす可能性がある。東日本大震災では新宿区の高層ビルで最大 1 m を超す揺れが 10 分以上も続いたというケースもあった。

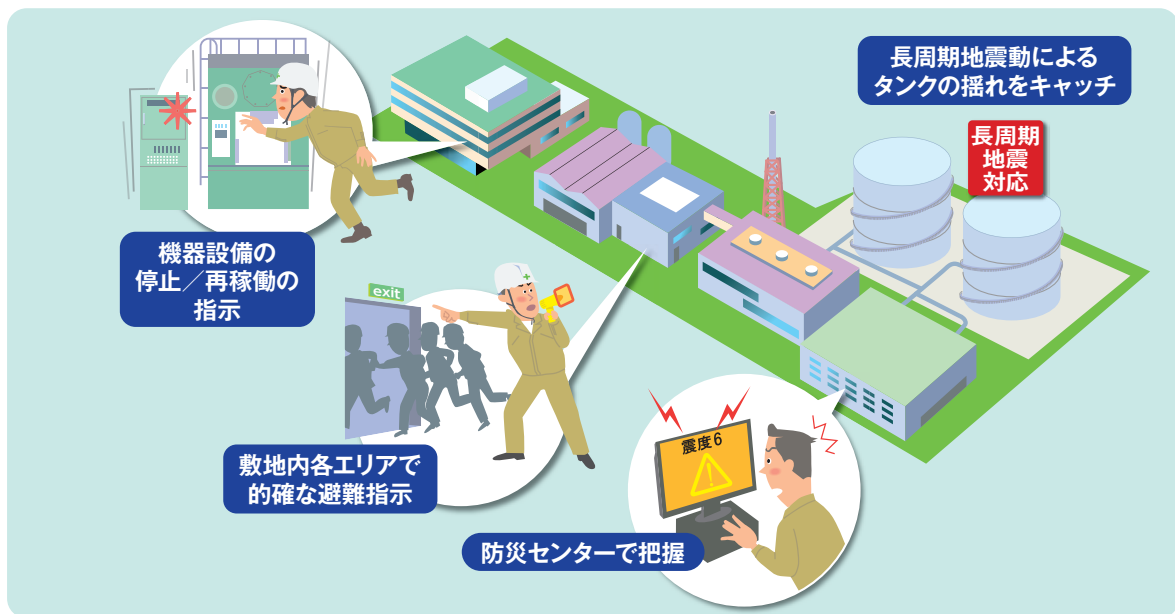
長周期地震動は地盤が比較的やわらかい平野部や埋め立て地のような軟弱地盤で起こりやすく、一般的に高層建築物では高い階ほど揺れが強くなる。また、長周期地震動に共振して揺れが大きくなる建築物・構造物は高層ビルだけではなく、最近では橋梁やタンクなどでも同様な注意が必要とされている。

長周期地震動への先進的取り組み

この東日本大震災での経験を踏まえて、気象庁は新たに「長周期地震動階級」を策定した。この長周期地震動を確実に捉える「長周期地震動階級対応計測震度計」のシステム化にいち早く対応した経緯から、現在気象庁に採用されているシステムは明星電気のみが提供している (2015 年 2 月現在)。この特殊仕様の震度計を用いれば、地震発生時に気象庁の長周期地震動階級を計算して、ビル高層階の揺れを予測できる。さらに、対象ビルの固有周期を考慮して各階の揺れの予測値を示す長周期地震動階級を表示して、適切



MAPS のシステム構成



MAPS による工場の地震対策

な避難誘導ができるようになる。

高層ビルの振動特性によって低層階と高層階の揺れが異なると、避難指示などの判断が難しくなる。しかし長周期地震動対応の MAPS を備えていれば、防災管理室などで全体の状況を把握することが可能になり、今、このビルの揺れがどのような状態なのかを把握できるため、正しい判断でエレベーターの再稼働や避難指示などをサポートすることができる。

現在東京都江東区の豊洲 IHI ビルにおいて「長周期地震動対応システム」の実証実験を行っている。実測された地震データを解析することによって予測精度を高めたり、高層階での揺れを予測したりする解析システムなどの研究・開発に取り組んでいる。

そのとき工場では

例えば工場で被災した場合、敷地内の震度を正確に把握できれば設備の停止や再稼働は防災マニュアルに則りスムーズに指示することができる。しかし、実際に地震が起きたとき現場ではテレビなどで速報が流れるまで震度がいくつなのかは分からない。しかも工場内のピンポイントの震度までは把握できない。

そこに発生する“あいまいさ”が判断のブレーキになっているとしたら、工場内に「計測震度計」を設置することが、最も精度の高い震度情報を確実に手に入れる方法だと考えられる。明星電気の計測震度計

は気象庁準拠の製品である。つまり気象庁が発表する震度情報と同じレベルの精度で工場の敷地内の震度が把握できることになる。

海外でも活躍する明星電気の防災技術

明星電気の震度計は、フィリピンのフィリピン火山・地震研究所の広域防災システムにも採用された。フィリピン全域の 40 か所に震度計を設置し、地震の早期検知、さらには、火山噴火の予知にも活用され、フィリピン全土の減災活動に大きな役割を果たすことになる。

おわりに

地震発生時に適切な情報に基づいて避難行動をとることは必ず減災につながる。明星電気はこれまで培ってきた技術と経験を基に、社会の安心・安全に貢献するため、今回紹介した地震対策システムをはじめとする気象・防災機器のスペシャリストとして今後も歩んでゆく所存である。

問い合わせ先

明星電気株式会社

気象防災事業本部 防災事業部 営業部

電話 (03) 6204 - 8254

URL : www.meisei.co.jp/

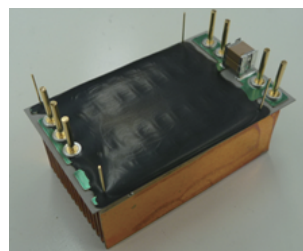
小型軽量インバーターで 電動化を加速！！

出力密度 70 kW/l, 50 kW/kg の 世界最小クラスのインバーターを開発

省エネ技術や温室効果ガス排出削減技術開発に期待が高まるなか、インバーターの役割が大きくなっている。さらなる効率化のためシリコンに代わる新しい半導体材料として SiC（Silicon Carbide：炭化けい素）に注目が寄せられている。ここでは、高効率性能と低ノイズ性能を両立させる IHI 独自の SiC 駆動技術と小型軽量インバーター技術を紹介する。

株式会社 IHI
技術開発本部 総合開発センター
電機システム開発部

山口 浩二



小型軽量インバーター（出力 35 kW, サイズ約 500 cc, 質量約 660 g）

インバーターがつくる世界

世界の電力需要は、近年の新興国の発展に伴い急激に増加している。また、世界の電力需要の 50% 以上はモーターを駆動するために使われているといわれている。産業分野においては、工場内の機器別使用電力をみると、およそ 60% の電力がコンプレッサーやポンプ、ファンなどの機器を駆動するモーターに使われ

ている。

インバーターとは直流電力を交流電力に変換する電力変換装置のことであり、モーターを効率良く駆動するための装置として広く利用されている。身近な例ではインバーターエアコンやインバーター冷蔵庫などの家電製品として、普段の生活のなかでも活躍している。

実は日本は省エネ大国である。同じ GDP を生み出すために排出される CO₂ の量はアメリカと比較して

およそ半分、中国と比較するとおよそ 1/10 と非常に少ない。その要因の一つとして、日本では家電のインバーター化が進んでいることが挙げられる。エアコンの消費電力は 20 年前のおよそ 1/4 にまで改善されており、インバーター技術の進歩による大きな成果といえる。

また、近年は太陽光発電や風力発電などの新しいエネルギー技術開発、普及が盛んに進められているが、これらの新エネルギーを交流電力系統に接続するためにもインバーターは必要不可欠な装置である。新興国においても経済、産業の発展に伴いモーター・インバーターの使用は増加傾向にあり、インバーター技術の果たす役割は拡大傾向にある。

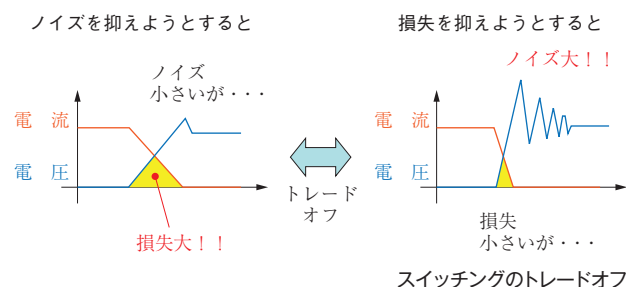
モーター・インバーターを活用したシステムの電動化技術開発も盛んになされている。電動化技術の身近な適用事例としてハイブリッドカーなど自動車の電動化がある。電動化による燃費性能向上、制御性能向上、情報通信技術と合わせたシステムのスマート化など、電動化によるメリットは非常に大きい。

ハイブリッドカーのように既存システムの電動化を検討する際、大きな障壁になるのが新たに加わる装置となるインバーターのサイズ・質量である。電動化によるシステムの付加価値アップを促進するためにもインバーターを小型軽量化することは重要な意味をもつ。

このように、これからのインバーターにはさらなる小型軽量化が求められている。インバーターの小型軽量化のためには、インバーターの損失削減と冷却性能向上の二つが必要である。インバーターで発生する損失を削減することができれば、ヒートシンクや冷却媒体用ポンプなどの冷却装置を縮小することができ、損失を発生する半導体素子自体を小さくすることも可能となる。また、冷却性能を向上することができれば、変換電力を維持したまま冷却装置を縮小することが可能となる。冷却装置や半導体素子サイズを縮小することでインバーターの小型軽量化を実現することができる。

半導体スイッチングのトレードオフ

インバーターなどの電力変換装置は、半導体デバイスをスイッチとして動作させ、オンオフを繰り返すことで効率の高い電力変換を実現している。その反面、スイッチングに伴い電圧、電流が急激に変化すること



で発生するスイッチングノイズが問題になることがある。

インバーター小型化のためには損失削減が重要であることは前述したとおりであるが、一般的に半導体デバイスのスイッチングにおいては、低損失性能と低ノイズ性能はトレードオフの関係にある。

図に示すように、ノイズを抑えようとしてゆっくりスイッチングすると、電流、電圧の変化が抑制されてノイズを小さくすることができる反面、スイッチング遷移期間での損失（電圧と電流の積に等しい）が大きくなってしまふ。損失の増大は、効率の低下、大型ヒートシンクや水冷装置など冷却装置の大型化、コストアップを招いてしまふ。

一方で、損失を抑えようとして速くスイッチングすると、電流、電圧の変化が激しくなり、スイッチングノイズが大きくなってしまふ。大きなノイズは信頼性を低下させ、ノイズフィルターやシールドなどのノイズ対策機器が必要となり、装置の大型化、コストアップを招いてしまふ。

インバーターの小型化のためには、損失とノイズのトレードオフを解消することが不可欠となる。

SiC のインパクト

シリコンに代わる新しい半導体材料として、SiC や GaN（ Gallium Nitride：窒化ガリウム）などのワイドバンドギャップ半導体が注目を集めている。GaN デバイスは新しい照明として普及の進む LED（発光ダイオード）としても利用されている。

従来のシリコン半導体と比較して SiC デバイスの主なメリットとして、次のような特長が挙げられる。

- (1) 損失が少ない
- (2) 高速スイッチングが可能
- (3) 耐高電圧化しやすい

SiC デバイスはシリコンデバイスと比較して損失が少ないことから、同じ電力を変換する際の発熱量が少ない。発熱量が少ないということは、ヒートシンクなどの冷却装置を小さくできるということであり、インバーターの小型軽量化を可能とする。

また、SiC デバイスは高速スイッチングが可能であるため、スイッチング周波数を高くして細かくオンオフを切り替えることにより、きめ細かい制御が可能となり、モーターの高速駆動、周辺装置の小型化などが可能となる。さらに、SiC は絶縁破壊電圧が高いことから高電圧デバイスを実現しやすいので、従来の高電圧システムの簡素化やさらなる高電圧化による効率改善が期待できる。

SiC デバイスの高速スイッチング特性を活かすためにもスイッチングノイズ対策が重要となる。

IHI はこの SiC デバイスのメリットをさらに有効活用するために、独自の SiC 駆動技術、SiC 小型パワーモジュールを開発し、インバーターの小型軽量化を検討した。

SiC 小型軽量インバーター

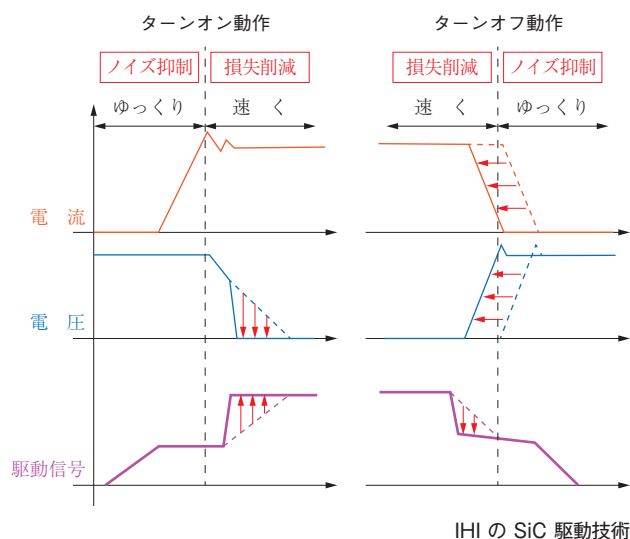
IHI はインバーターの小型軽量化を実現するために SiC デバイスを利用して、以下に挙げる二つのキーとなる技術を開発した。

- (1) 独自の SiC 駆動技術の開発
- (2) SiC 小型パワーモジュールの開発

はじめに損失削減のため IHI 独自の SiC 駆動技術を開発した。半導体における駆動技術とは、半導体デバイスのオンオフをコントロールする回路技術のことであり、より低損失でスイッチングするための駆動技術が求められる。次に冷却性能を高めた高熱伝導構造の小型パワーモジュールを開発した。このとき、これら二つの性能と低ノイズ性能を両立するようになければならない。

まず、IHI の SiC 駆動技術について紹介する。前述したように、半導体デバイスのスイッチングには損失とノイズのトレードオフがあるが、開発した駆動技術によれば低損失かつ低ノイズでのスイッチングが可能となり、スイッチングのトレードオフを解消することができる。

右上図に示すように、スイッチングの遷移期間の間



IHI の SiC 駆動技術

にスイッチングのスピードを適切に変化させることで、低損失かつ低ノイズのスイッチングを実現する。

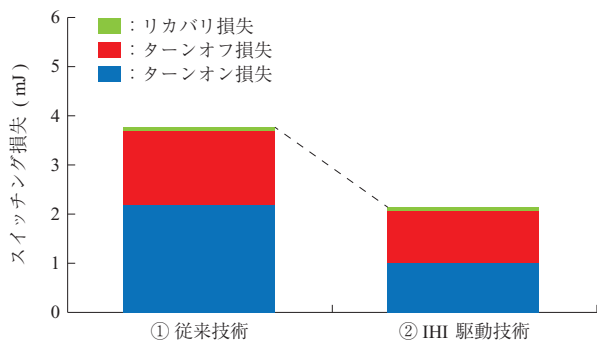
例えば、半導体スイッチをオフ状態からオン状態にするターンオン動作において、ノイズの発生しやすいスイッチング初期段階ではノイズ抑制のためゆっくりスイッチングを行う。また、ノイズ発生が少ないスイッチング後半部分では損失抑制のためにスイッチングを速くする。

次に、半導体スイッチをオン状態からオフ状態にするターンオフ動作において、電流電圧の変化が少なくノイズ発生リスクが少ないスイッチング初期段階では速くスイッチングをして損失を削減する。また、ノイズの発生しやすいスイッチング後半においては、ノイズ抑制のためにスイッチングスピードを緩めてノイズの発生を抑える。

このように、スイッチング遷移期間にスイッチングのスピードを調整することで、スイッチング損失とスイッチングノイズのトレードオフを解消し、低損失かつ低ノイズスイッチングを達成することが可能である。

次ページ左上図は、電圧 400 V、電流 100 A の条件において、SiC デバイスを 1 回スイッチングする度に発生するスイッチング損失を比較したものである。IHI 独自の駆動技術を適用することにより、従来駆動技術と比較してスイッチング損失をおよそ半分に削減できることが確認されている。

SiC デバイスと IHI 駆動技術の組み合わせにより、従来のシリコンデバイスに比べて、およそ 1/8 までスイッチング損失削減を達成した。



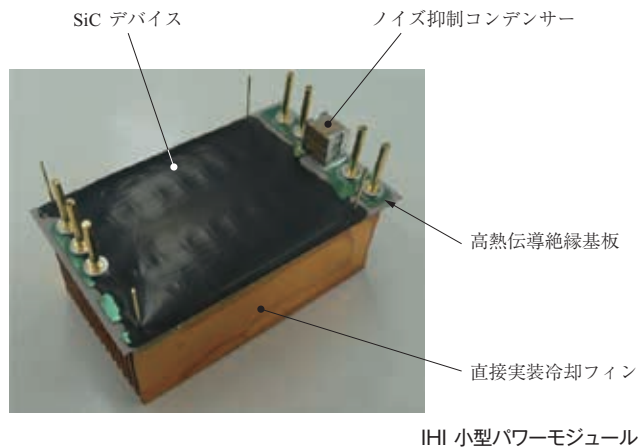
(注) 従来デバイスであるシリコン IGBT では約 18 mJ (IHI 評価による)

IHI 駆動技術の効果

下図は IHI の開発した小型パワーモジュールである。黒色の樹脂内部に SiC デバイスが実装されていて、ノイズ抑制のためのコンデンサを内蔵していることも特徴の一つである。SiC デバイスのすぐ近くにコンデンサを設置することでノイズ抑制効果を強化して、SiC デバイスの高速スイッチング特性を十分に引き出せるようにしている。

また、冷却性能を高めるために高熱伝導材を使用した絶縁基板に回路パターンを形成して、冷却用のフィンパワーモジュール裏面に直接実装した。これにより、SiC デバイスで発生した熱を効率良く放熱して、小さな冷却システムで大電力を変換することを可能にした。

右上図は開発した SiC 駆動技術と SiC 小型パワーモジュールを適用した小型軽量インバーターのスペックである。ここ数年の間に、各研究機関やメーカーから SiC デバイスを活用した出力密度 50 kW/l を超える小型インバーターの開発事例が報告されているが、



項目	SiC 小型軽量インバーター	従来インバーター
出力	35 kW	15 kW
サイズ	104 × 110 × 45 = 514 cc	約 5 000 cc
質量	660 g	約 6 kg
出力密度	70 kW/l, 50 kW/kg	3 kW/l, 2.5 kW/kg
効率	98%	96%
冷却	強制空冷	水冷

SiC 小型軽量インバーターと従来品の比較

本開発品も出力密度で 70 kW/l, 50 kW/kg と世界最小クラスの小型軽量インバーターを実現することができた。最大効率も 98% 以上と高効率を達成した。

ニーズに合わせたブラッシュアップ

本検討においては、インバーターがより小型軽量となるように開発を進めた。その過程において、低損失・低ノイズ駆動技術、高速駆動技術、高熱伝導パワーモジュール技術、小型実装技術の要素技術を獲得した。競争力ある製品開発につなげるためには、各要素技術をニーズに合わせてブラッシュアップする必要がある。

また、現状では SiC デバイスはシリコンデバイスに比べて高価であることから、システムのコストアップを心配することが多い。しかし、インバーターの小型化による周辺部材のコスト削減効果や、冷却システムのコスト削減効果（例：冷却水循環システムの省略）などで、半導体素子のコスト増加分を吸収することが可能である。また、SiC デバイスの高速駆動特性を活かすことでフィルターなどノイズ対策装置の簡略化も期待されている。このように、SiC デバイスの適用によりトータルシステムコストの削減効果を期待することも十分可能である。

さらなる省エネ社会を実現するため、新半導体デバイスと IHI の小型軽量インバーター技術を活かすことのできる製品・プロジェクトがあれば、ぜひ協力させていただきたい。

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/

これもまたいつごろからか社内や学会のプレゼンテーションの場で気になりはじめた。

前回（IHI 技報 Vol. 53, No. 2 pp. 26 – 27）本欄で「…になります」について書いた。発刊後何人かの方から共感のメールをいただいたが、社内で日ごろ聴くプレゼンテーションのなかで「…です」であって欲しい「…になります」は全然減っていないようにも思う。しかし、懲りずにもう一度、気になる言葉遣いを取り上げたい。

1996 年のアトランタオリンピックでマラソンランナー有森裕子さんが銅メダルを獲得したときのことである。レース直後のインタビューで有森さんは、

「初めて自分で自分をほめたいと思います」と語った、ということが随分話題になった。このシーンは今でも取り上げられることがある。話題になったというのは二つの意味でであった。一つはもちろんこの言葉に感動したというものだったが、もう一つはちょっとややこしい。このときの有森さんの言葉のある新聞が

「自分をほめてあげたい」と伝えた。そのため、この「自分をほめてあげる」

という言葉遣いについて火の手が上がったのである。

「ペットに餌をあげる」のも、
「（自分の）赤ん坊にミルクをあげる」
のもいけない、と言われたものである。ペットには
「餌をやる」

のである。そううるさく言われたのはいつごろまでだったのだろう。とにかく 20 年ほど前には、このことで火の手が上がった。

有森さんは
「自分をほめたい」と言ったのに

「自分をほめてあげる」とわざわざ直して書いた新聞もあった。ちょうど境目がこのころだったのかもしれない。このような事情で有森さんは、ご本人には何の非もなかったのに随分責められたように思う。

2014 年、卓球の石川佳純選手がある大会で中国選手を相手に窮地からの大逆転勝利を収めた後、

「中国選手を相手に粘った自分をほめてあげたい」と語ったという記事が新聞のスポーツ欄にあった。石川選

誰にあげる？

技術開発本部 浜本 章



手が「ほめてあげたい」と言ったのか、有森さんのときのように石川選手は「ほめたい」と言ったけれども記者が「ほめてあげたい」に直したのかは分からない。いずれにしても、今や新聞記者にも約 20 年前のエピソードの記憶はなく、また騒ぎにもならなかった。オリンピックの銅メダルと卓球の一国際大会では場面が違うので比べるのは無理があるかもしれないが、

以上は前置きで、ここからが本論である。プレゼンテーションの場で

「これを 2 倍してあげると」とか、

「この温度を上げてあげると」

という言葉遣いが聞かれるようになった。いつごろからかは分からない。今や

「自分をほめてあげる」

は目くじらを立てるようなことではないようではある。しかし、物に「してあげる」のと、自分に「してあげる」のとでは程度がかなり違うとも思う。

この「…してあげる」に関連してある記憶がよみがえってきた。40 年以上も前のこと、大学に入って受けた数学の講義で教官が

「こいつを積分してやると」

というような言葉遣いをしていたのである。大学の先生はこんな言葉遣いをするのか、と当時思っていたのだった。その後専門に進んでからもその言葉遣いをする教官がいた。この言葉遣い「…してやると」の「やる」では粗野に聞こえるので「…してあげると」になったものだろう。ただし、もともとここは「…すると」で済むところなので、プレゼンテーションのなかで「…してやると」とか「…してあげると」という表現を頻繁に聞くわけではない。使う人は限られているように思うので、わざわざ「…してやると」とか「…してあげると」を使うのは個人の癖のようなものだろう。話は違うが「趣味の園芸」というテレビ番組では、

「たっぷり水をやってください」

と言っている。

前回の「…になります」にしても今回の「…あげると」にしてもちょっと厄介なのは、多くの場合言っている本人がそういう言葉遣いをしているということに気が付いていないということである。こんな例がある。以前、私のそばの席で仕事をしていた若手がよく電話で



「もしもし、あのですねー」

と言ってから用件に入っていた。そこで、あるときそのことを指摘すると

「そんなこと言ってませんよー」

と答えたがしばらく経って掛けた電話で思わず

「もしもし、あのですねー」

そして私の方を見て

「すみません、言っていました。」

話し言葉と違って書き言葉では証拠が残るので素直に認めてもらえる。最近よくみられる誤用に

「…していただけますようお願い致します」

がある。ここは

「…していただけますよう…」

なのだが、多分

「…していただけますか」

との混同なのだろう。これをメールや書類で目にとると、つい指摘してしまう。そのため、

「けをきにする浜本さん」

と呼ぶ人がいる。頭髪の色にも量にも問題を抱える私のことを。

Development of Marine Dual Fuel Engine “28AHX-DF”

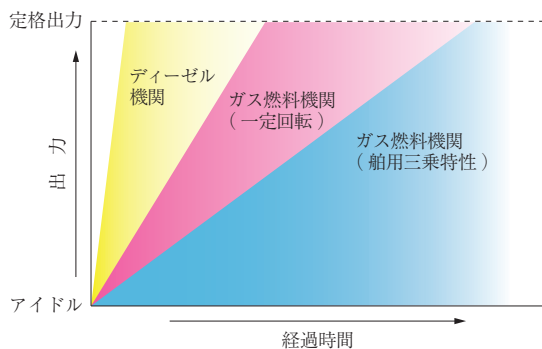
2. 技術的課題

ガス燃料機関を船用分野で使用するための最も大きな課題は過渡応答性の改善である。

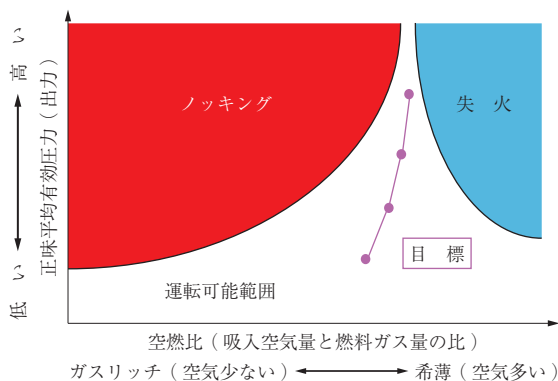
第2図に一般的なガス燃料機関の出力増加時間比較を示す。ディーゼル機関に比べ、ガス燃料機関の出力増加速度が遅いことが分かる。さらに、発電機運転や可変ピッチプロペラなどに適用する機関回転速度を一定とした運転に比べ、船用三乗特性での出力増加時間が長くなることが分かる。

また、無負荷状態からの負荷投入、ベースロードに対しての負荷投入いずれの場合においても、ディーゼル機関に比べガス燃料機関は負荷投入量が少なくなる。

技術的課題として重要なのは、ガス燃料機関の運転可能範囲である。第3図にガス燃料機関の運転可能範囲を示す。横軸は吸入空気量と燃料ガス量の比である空燃比で、右に行くほど燃料に対して空気の量が多く、左に行くと空気の量が少ないことを表す。縦軸は、機関の出力を表す正味平均有効圧力である。第3図に示すように空燃比が小さ過ぎると、ノッキングと呼ばれる異常燃焼が発生し機関の故障につながる。逆に、空燃比が大き過ぎると失火が発生



第2図 出力増加時間比較
Fig. 2 Comparison of transient speed up to rated output



第3図 ガス燃料機関の運転可能範囲
Fig. 3 Operational range of gas fueled engine

生し燃焼変動が大きくなる。さらに、出力を上げると空燃比の適正範囲は狭くなる。このため、ガス燃料機関では、この空燃比を適切に調整することが必要である。

しかし、急速に出力を増加させる場合は燃料ガスの増量に対して、過給機の応答遅れや空燃比制御の遅れによって空気量が不足し空燃比が小さくなることがあり、この場合ノッキングが発生し運転の継続ができなくなることがある。ディーゼル機関でも急速に出力を増加させる場合には空燃比が下がるが、この場合不完全燃焼による煤は出るものの運転継続は可能である。これが、ガス燃料機関の過渡応答性がディーゼル機関の過渡応答性に対して劣る理由である。

なお、本稿ではノッキングを燃料ガスと空気の混合気が火炎に押されて高圧になり、自己着火する現象と位置づける。また、ガス燃料機関はディーゼル機関に比べ複雑な制御が必要であることから、大幅な電子化が必要不可欠である。船用で用いる場合、いかなる場合も運転を継続することが求められており、大幅な電子化に対応する冗長性の確保も課題の一つである。

3. 開発機関

今回開発を行った船用デュアルフューエル機関「28AHX-DF」の仕様を第1表に、外観を第4図に示す。

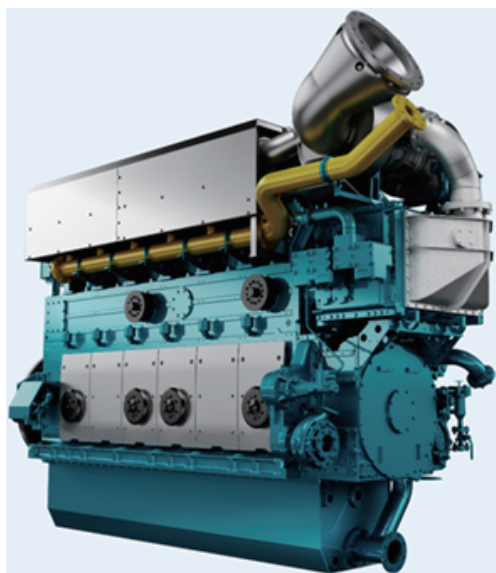
シリンダーヘッドには、従来のディーゼル機関と同じ燃料噴射弁を配置するとともに、マイクロパイロット用のコモンレール燃料弁も設置した。これによって、ディーゼルモード時にはディーゼル機関と同等の信頼性を確保するとともに、ガスモード時にはパイロット燃料の少量噴射による低 NO_x 性能と安定した着火性を実現させた(第5図)。

ディーゼルモードとガスモードは任意の出力で切り替えることが可能であり、すべての出力領域でのガスモード運転が可能である。また、ガスモード運転時における異常発生時には、瞬時にディーゼルモードに切り替え、運転を継続することで冗長性の確保を行った。

ガスモードにおいては、空気と燃料ガスの混合比を最適

第1表 「28AHX-DF」仕様
Table 1 Specification of "28AHX-DF"

項目	単位	仕様		
燃焼方式 (ガスモード)	—	直噴マイクロパイロット油着火希薄燃焼方式		
シリンダ数	筒	6	8	9
定格出力	kW	1 920	2 560	2 880
定格回転速度	min^{-1}	800	800	800
燃料ガス	—	天然ガス		
液体燃料	—	A 重油		



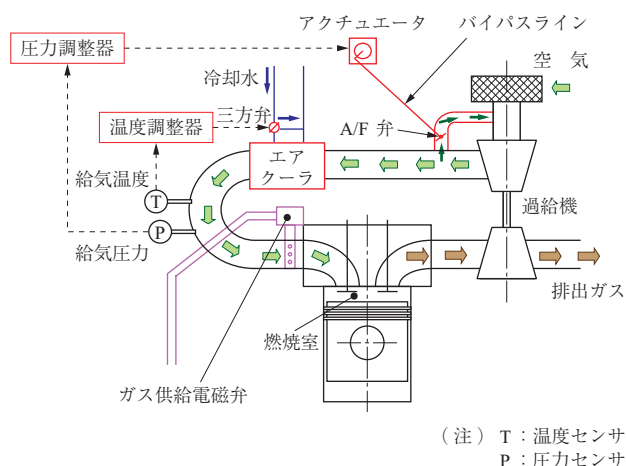
第 4 図 「28AHX-DF」外観
Fig. 4 Appearance of “28AHX-DF”

に制御するためのシステムとして、第 6 図に示すような給気温度制御と給気圧力制御が可能な装置を採用した。

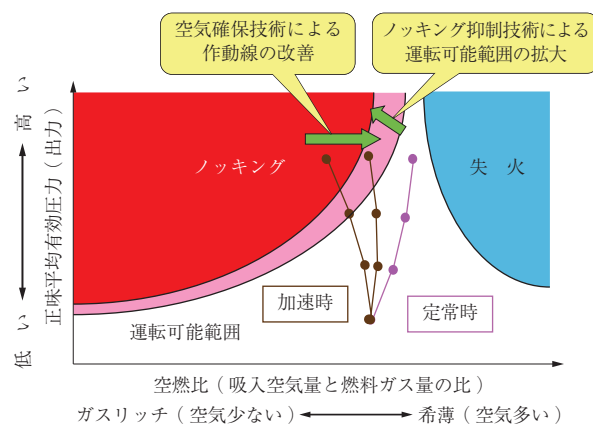
4. 機関運転性能

給気温度制御と給気圧力制御が可能な装置を採用したことによって、運転時・加速時に必要な空気量を確保した。また、ノッキング発生時にはコモンレールによる着火タイミングを適切に調整するなど、ノッキング抑制技術を採用した。これらの技術の組合せによって第 7 図に示すように、従来のガス燃料機関に比べ運転可能範囲を拡大し、大幅な過渡応答性の改善を実現した。

第 8 図に機関をアイドルから定格回転まで出力を上げた過渡応答性試験結果を示す。この試験は船用三乗特性で

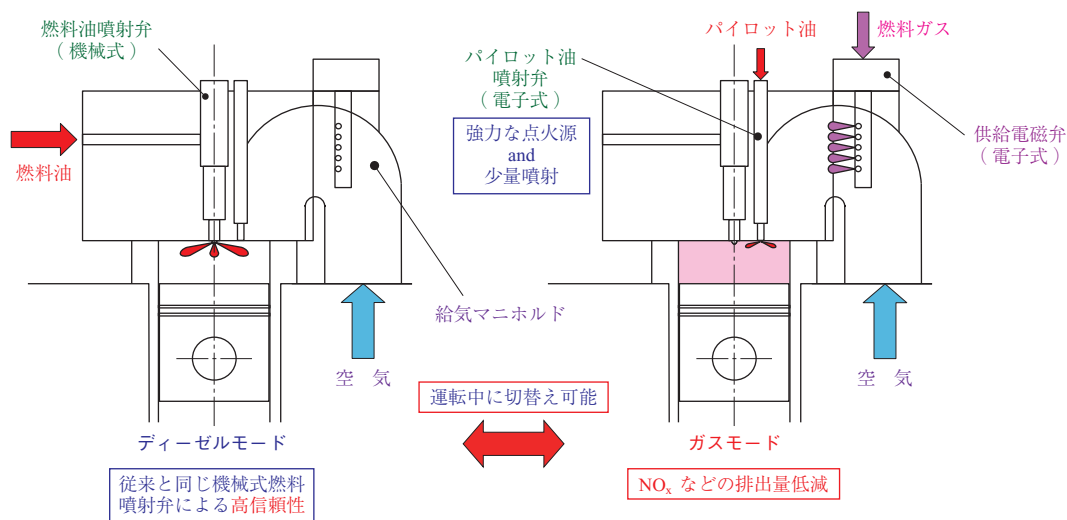


第 6 図 空燃比制御システム図⁽²⁾
Fig. 6 Systematic sketch of A/F control⁽²⁾

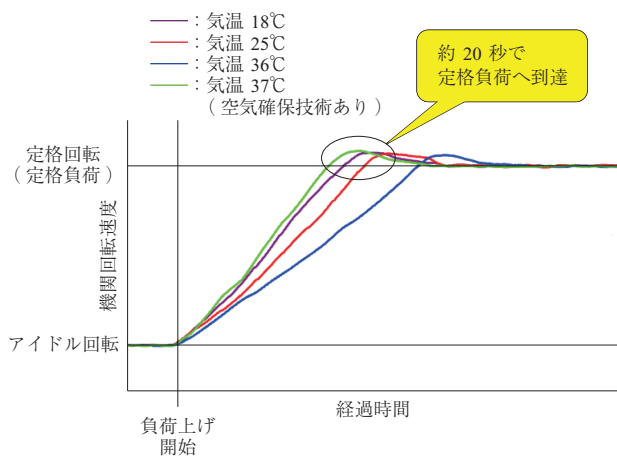


第 7 図 過渡応答性改善
Fig. 7 Improvement of transient performance

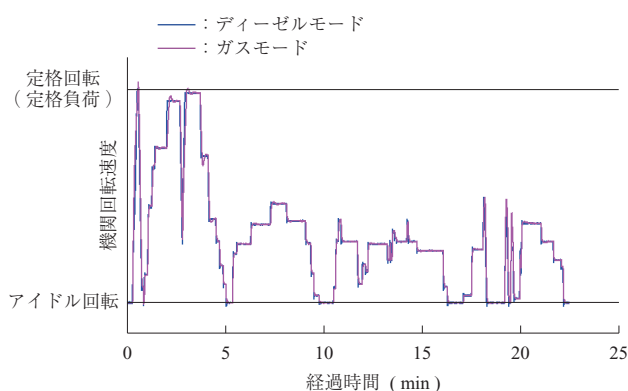
の操作であり、縦軸の回転速度における定格回転速度は定格出力である。設計仕様内の気温では約 20 秒の出力上昇時間を実現している。また、37℃という高い気温におい



第 5 図 デュアルフューエル機関におけるモード切替え
Fig. 5 Operational mode change of dual fuel engine



第 8 図 過渡応答性試験結果
Fig. 8 Test result of transient performance



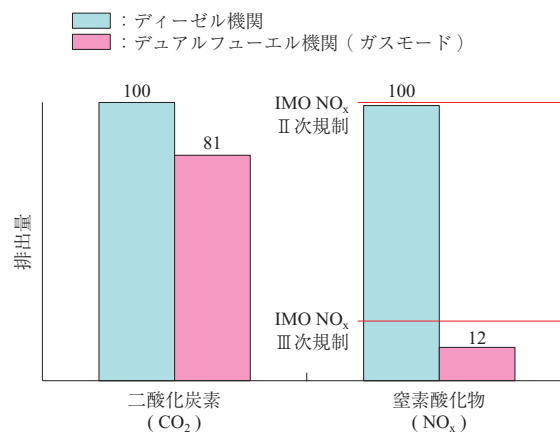
第 9 図 過渡応答性比較結果⁽²⁾
Fig. 9 Comparison of transient performance⁽²⁾

でも、追加の空気確保技術との組合せによって 15 秒の出力上昇時間を実現した。

さらに、従来のディーゼル機関と同等の過渡特性をもつことを確認することを目的として、実際のタグボートの操船を模擬した運転パターンを、ディーゼルモードとガスモードでテスト機関での運転確認を行った。第 9 図に過渡応答性比較結果⁽²⁾を示す。両モードの軌跡がほぼ一致していることから分かるように、従来のディーゼル機関に比べ遜色ない結果を得ている。

なお、これらの試験は固定ピッチプロペラの運転パターンを模擬したものであり、船用の分野において、ガス燃料機関が従来のディーゼル機関と同様の推進システムで使用可能であることを示した結果になる。

一方、環境面である機関からの排ガス特性を第 10 図に示す。ガスモードでは IMO の NO_x Ⅲ次規制を満足し、ディーゼルモードでは IMO の NO_x Ⅱ次規制を満足している。また、CO₂ に関しても、ガスモードにおいてはディーゼル運転に比べ、19%の低減を確認している。



第 10 図 排ガス特性比較
Fig. 10 Comparison of emission in exhaust gas

5. 結 言

今回の開発において、空気確保技術・ノッキング抑制技術により、ガスモードにおける過渡応答性が大幅に改善され、ディーゼル機関並みの過渡応答性を実現した。これによって、船用推進システムとして最もシンプルな、固定ピッチプロペラ直結を用いたガス燃料船への適用が可能であることが確認された。また、デュアルフューエル機関を採用することで、船用推進システムに求められる冗長性を確保するとともに、IMO NO_x Ⅲ次規制を満足することができた。

今回紹介した、「28AHX-DF」は、国内初となる天然ガスを燃料とする船舶（LNG 運搬船を除く）に採用された。

— 謝 辞 —

今回紹介した船用ガス燃料機関「28AHX-DF」には、国土交通省の「船舶からの CO₂ 削減技術開発支援事業」の補助対象事業、および一般財団法人日本海事協会の共同研究事業、公益財団法人日本財団の助成事業による一般財団法人日本船舶技術研究協会との共同研究として支援を受けて開発された要素技術の一部を使用している。

ここに記して心から謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 渡辺孝一，後藤 悟，橋本 徹：希薄燃焼ガスエンジンの負荷操作過渡時の燃焼改善 第 24 回内燃機関シンポジウム 論文 72 2013 年 11 月
- (2) 渡辺孝一：高過渡特性を有する DF 機関 第 84 回マリンエンジニアリング学術講演会 論文 139 2014 年 11 月

マイクロ波電力伝送技術の電動飛行機への適用

Study of Electric Aircraft Charged by Beamed Microwave Power

小 澤 雄一郎 株式会社 IHI エアロスペース 基盤技術部電子技術室
田 中 直 浩 株式会社 IHI エアロスペース 基盤技術部電子技術室 主幹

本研究では、無線電力伝送方式の一つのマイクロ波方式の最大の特長である長距離電力伝送可能という特性を活かし、電動飛行機の航続時間を改善してその有用性を拡大するため、電動飛行機へのマイクロ波電力伝送技術の適用を試みた。コンセプトの検討や設計条件の設定、要素試作を行い、5.8 GHz 帯レクテナとして世界最小の質量－出力電力比を実現した。また、この結果に基づいて必要な検討を行い、本システムの成立性を確認した。本稿では、これらの取組みとともに今後の計画について述べる。

The ability to wirelessly transmit power over long distances is one of the strengths of a microwave power transmission system. In this study, we applied microwave power transmission technology to the power supply system of an electric aircraft in order to extend the flight time. A partial prototype based on the concept of this system and its design conditions was manufactured. A rectenna that had a center frequency of 5.8 GHz achieved the world's smallest weight to power output ratio. On the basis of the trial results and further study, we confirmed the feasibility of this system. These efforts and our future plans are described in this paper.

1. 緒 言

これまでマイクロ波電力伝送技術の研究は、将来の宇宙太陽光発電システムの実現へ向け、宇宙から地上への長距離無線電力伝送基礎技術の確立を目的とした研究を中心に進められてきた。一方、近距離の非接触給電技術である電磁誘導や磁気共鳴は、より身近である電子機器や自動車への給電に応用した製品開発が近年盛んに進められるようになってきている。これに同調してマイクロ波電力伝送技術を応用した製品の開発例も少しずつではあるが出始めているものの、マイクロ波の特長を活かした製品例はほとんどない。

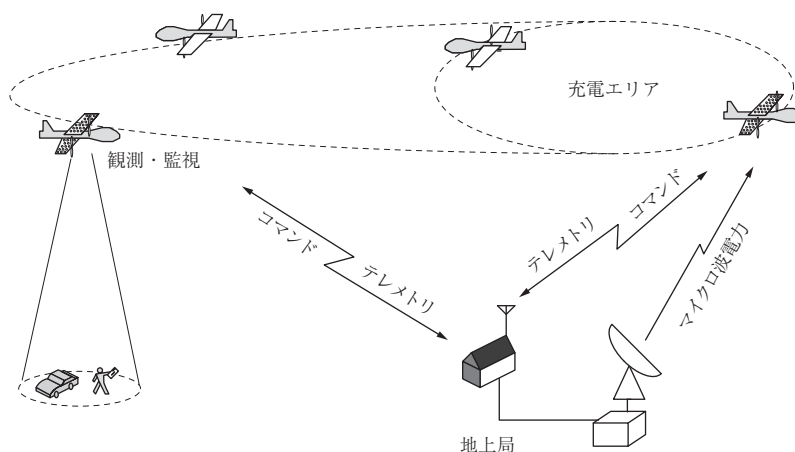
マイクロ波電力伝送技術の最大の特長は、長距離の非接触電力伝送が可能であることである。この特長を最大限活用するため本研究では、遠方の電力伝送対象として電動飛行機を取り上げ、マイクロ波電力伝送技術の適用を図った。電動飛行機は、その静粛性、安全性、整備性などから観測・監視などのさまざまな応用が考えられる。しかし、バッテリーに充電された電力のみでの航続時間はガソリン機と比べて非常に短く、利用範囲が限定される。そこで、飛行中に外部から電力を供給することができれば、航続時間の延長が可能になり、電動飛行機を用いたシステムの応用範囲をさらに拡大できると考えられる。

電動飛行機へのマイクロ波電力伝送技術適用の基礎実験として、20 年以上前に 2.4 GHz 帯のマイクロ波を用いて飛行中の電動飛行機に電力を供給する実験が行われた^{(1) (2)}。それらでは受電した電力が動力として利用可能であることは確認されているものの、飛行に必要な構造以外に受電用の構造を機体外部に取り付けたシステムや、地上の送電装置が飛行機下部を追尾して移動するシステムというレベルにとどまっており、その後の実用システムへの適用や製品化は行われていない。

そこで著者らは、これらの過去の研究と最新の技術動向を踏まえて、観測・監視機器などを搭載可能な、より実用的なシステムを実現するため、マイクロ波電力伝送技術の電動飛行機への適用に関する研究を行うことにした。

2. コンセプトの設定

無人飛行機の有用性が認識され、災害監視や犯罪監視、気象観測や放射線観測などさまざまな用途でそれが利用され始めている。しかし、これらの飛行機の航続時間はさまざまであるものの有限である。よって、燃料補給のために離着陸を必要とし、運用に手間が掛かるとともに、ミッション時間も限定される。そこで本研究では、「上空からの 24 時間 365 日連続観測・監視」をコンセプトとして設定した。第 1 図にコンセプトのイメージを示す。



第 1 図 コンセプトのイメージ
Fig. 1 Picture of concept

地上局上空の充電エリアで電動飛行機を巡回させながら、必要な電力を地上からマイクロ波で供給し、機体に搭載したバッテリーに充電する。充電された電力を用いて観測・監視エリアに飛行してミッションを遂行した後、電力が必要な場合には充電エリアに帰還する。必要に応じて複数機が飛行することで最低限の離着陸で常時監視可能なシステムが構築できる。

3. 主要構成と設計条件

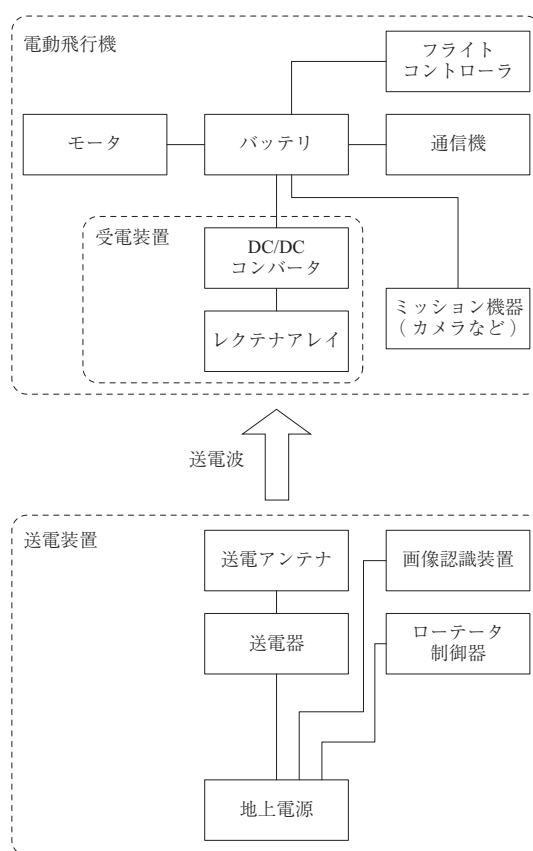
3.1 主要構成

コンセプトを実現するには電力供給系統がキーとなる。

第 2 図に電力供給系の主要構成図を示す。

本システムは主に地上に設置される送電装置、電動飛行機に搭載される受電装置、電動飛行機で構成される。送電器で発生したマイクロ波は、送電アンテナから電動飛行機主翼下面に搭載されたレクテナ（アンテナ + 整流回路）に向けて送電され、DC 電力に変換される。DC 電力は DC/DC コンバータで電圧変換され、バッテリーに充電される。電動飛行機はバッテリーに充電された電力を用いて必要なプロペラなどを駆動して飛行する。

電動飛行機への送電方向は画像認識によって決定し、アンテナ回転機構（ローテータ）を駆動することで送電アンテナを指向する。送電方向の決定方法としては、受電側からパイロット信号を送信し、その方向を検知する方法もある。しかし、使用する電波が増えることで無線局免許取得も必要になることから、将来の簡易なシステムの実現も視野に入れて、パイロット信号を用いない画像認識による方式を採用した。



第 2 図 電力供給系の主要構成図
Fig. 2 Configuration of power supply system

3.2 設計要求

サブシステムである送電装置、受電装置、電動飛行機の設計要求を第 1 表に示す。電力伝送に用いる周波数は、宇宙太陽光発電システムで使用する事が検討されている ISM (Industry-Science-Medical) 帯の 5.8 GHz 帯とした。

本システムにおける設計条件の特徴としては、受電装置の質量が軽量であること、および電動飛行機の巡回充電時

第 1 表 サブシステムの設計要求
Table 1 Design requirement of sub-system

区 分	項 目	単 位	設 計 条 件
送 電 装 置	送 電 周 波 数	GHz 帯	5.8
	送 電 電 力	kW	10
	送電アンテナサイズ	m	φ2 以下
	アンテナ指向精度	度	±0.5 以下
受 電 装 置	DC 出 力 電 力	W	160 以上
	質 量	kg	1 以下
電 動 飛 行 機	旋 回 半 径	m	30 (旋回充電時)
	飛 行 高 度	m	50 (旋回充電時)
	バ ン ク 角	度	0 (旋回充電時：無風)
	消 費 電 力	W	160 以下 (旋回充電時)
	寸 法	m	3×3 (約)
	搭 載 機 器 質 量	kg	1 以上

のバンク角（機体の左右軸と地面とがなす角）が 0 度であることである。まず受電装置については、地上で用いられるようなふっ素樹脂基板を使用したレクテナで構成する場合、レクテナのみでも 5 kg/m² 程度となる。一方、本システムの受電装置は飛行機に搭載することから軽量化が必要であり、レクテナ、DC/DC コンバータおよび配線を含め 1 kg 以下を設計条件とした。

次に、通常の飛行機が旋回する場合には、旋回中心に対して一定のバンク角をもたせることで揚力の水平成分を生じさせ、旋回を行う。本システムでは、旋回充電中にバンク角をもたせると主翼下面に搭載したレクテナに対するマイクロ波の入射角が大きくなり、レクテナのアンテナ高利得領域から外れていくことになる。この結果、必要な受電ができず、飛行を継続できなくなる可能性がある。この理由から、本システムの電動飛行機はバンクしないことを設計条件とした。なお本研究では試作機として、まずは送電エリア上空を旋回できるシステムの実現を目指すことにした。

4. 要素試作・検討

本システムでキーとなる電力供給系に必要な軽量レクテナおよびノーバンク電動飛行機の要素試作・検討を実施した。この結果、各々実現の目途を得ることができた。試作した軽量レクテナと電動飛行機の外観を第 3 図に示す。

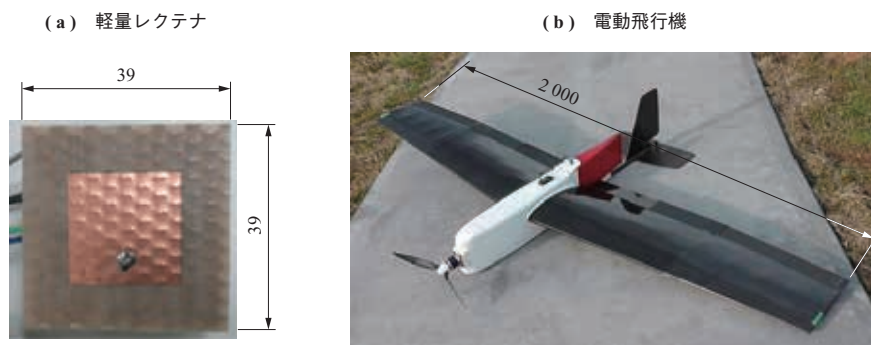
4.1 軽量レクテナ

効率良く送電波を受電するには、高い利得をもつ小型アンテナが必要であることから、アンテナはパッチアンテナとし、その背面の直近に整流回路を設ける表裏一体構造とした。また、市販品で入手可能な材料としてアラミドハニカム材を基板および構造部材として用いた。これによって、誘電体損が無視でき低損失、かつ 1 素子当たり約 2 g と軽量のレクテナを実現できた。この構造のレクテナに 5.8 GHz のマイクロ波を照射して出力電力を測定し、質量－出力電力比を算出した結果、5.8 GHz 帯で動作するレクテナとしては世界最軽量となる 1 g/W を実現した⁽³⁾。

この結果を基に、設計条件である 160 W の出力を得るために必要な受電装置の質量は、実際の送電波の受電面電力密度の濃淡を考慮して配置する軽量レクテナ、および DC/DC コンバータや配線などを含めて 1 kg 以下と見積もることができ、本軽量レクテナを用いた受電装置の実現性に目途を得ることができた。

4.2 電動飛行機

ノーバンク電動飛行機の検討を行うために、まずバンク角の低減を考慮していない電動飛行機を用いて現状の特性を確認した。この結果、旋回半径を約 40 m として無理なく旋回した場合でも、25～40 度のバンク角が必要となった。このことから、バンク角 0 度で旋回するには、バンクによって揚力の水平分力を発生させて旋回する一般的な方法を抜本的に変更する必要があることが分かった。これに対し、バンク角を低減する方法として以下の二つの方策



第 3 図 試作した軽量レクテナと電動飛行機（単位：mm）
Fig. 3 Appearance of light weight rectenna and electric aircraft (unit : mm)

を検討した。

(1) 左右の主翼に搭載するプロペラの推力差を利用する。

(2) 胴体を翼型とし、かつ胴体後方にラダーを設けて水平方向に揚力を生じさせる。

まず、左右のプロペラの推力差を利用する方法について、サブスケール試作機を使用して飛行試験を実施した。この結果、左右の推力差のバランスを取ることが非常に困難であり、正常な飛行ができなかった。

次に、胴体形状とラダーによる旋回について検討した。

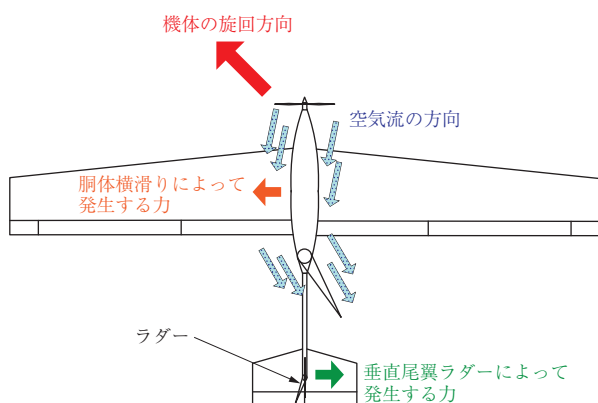
第4図に本方法によるノーバンク角旋回の原理図を示す。例えば図に示すように進行方向左側へ旋回する場合、まず垂直尾翼ラダーを旋回する方向に駆動する。これによって機体が横滑りして翼型胴体に迎角が発生し、旋回方向への力が発生する。さらに胴体後方のラダーを駆動させると旋回方向への力が増加する。この結果、機体はバンクせずに旋回することができる。今後本機体を試作し、飛行試験を実施する予定である。

5. システム成立性

4章に示した要素試作・検討結果を踏まえ、本システム成立性のキーとなる電力供給系について検討した。地上の送電アンテナから見て高度 50 m、旋回半径 30 m とすると、送電距離は 58 m となる。送電波を遠方界の平面波と考えて(1)式に示すフリスの公式を用いて受電電力の計算を行った。

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} A_e \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \quad \dots\dots\dots (2)$$



第4図 ノーバンク角旋回の原理
Fig. 4 Principle of circular flight

P_r : 受電電力

P_t : 送電電力

G_t : 送電アンテナ利得

A_e : 実効開口面積

G_r : 受電アンテナ利得

R : 送電距離

λ : 送電波の波長

(1) 式は翼面下部に取り付けたレクテナのアンテナ個々の受電電力であることから、この式にレクテナ整流回路の整流効率を考慮して全レクテナが出力する直流 (DC) 電力を表すと(3)式となる。

$$P_{DC} = \sum_{i=1}^n (P_r \cdot \eta_r)_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

P_{DC} : DC 出力電力

η_r : 整流回路の整流効率

(3) 式を用い、要素試作で確認した受電アンテナ利得を用いて DC 電力を算出した。ここでレクテナは地上送電部が正面方向となるように主翼内部に角度を付けて取り付ける構造とした。この結果、送電波の受電面電力密度の濃淡を考慮して DC 電力を算出すると 166 W となり、設計条件の 160 W 以上であることから、飛行中の電動飛行機に必要な電力が供給可能であることを確認できた。

今後、マイクロ波送電方向を制御するための画像認識による角度検出方法の検討、サブスケールモデルを用いた電動飛行機の飛行試験、実機サイズでの飛行試験、電波暗室内での送受電試験などを経て無線局免許手続きを行い、屋外において実際にマイクロ波で飛行中の電動飛行機に電力を供給する飛行試験を実施する計画である。

6. 結 言

本稿では、マイクロ波電力伝送技術の電動飛行機への適用について、コンセプトの設定、要素試作、システム成立性検討などを行った結果を述べた。また、本システム特有の軽量受電システムおよびノーバンク電動飛行機の実現の目途を得て、本システムの成立性を示した。

現在、小型の無人飛行機は日本国内では 150 m 以下の飛行であれば航空法に抵触せず、一部の場所を除いて飛行可能である。一方、無人飛行機の有用性が認められ、世界的にその活用が広がるとともに、安全性やプライバシーなどさまざまな問題が発生している。今後、安全性や各種法整備の動向を十分考慮しながら、各種試験を経て本システムの実現を目指す。

参 考 文 献

- (1) J. J. Schlesak and A. Alden : SHARP rectenna and low altitude flight tests Presentation IEEE Global Telecommunications Conference (1985. 12)
- (2) Y. Fujino, M. Fujita, T. Ito, H. Matsumoto, N. Kaya, T. Fujiwara and T. Sato : Driving Test of a Small DC Motor with a Rectenna Array and MILAX Flight Experiment Review of the Communications Research Laboratory Vol. 44 No. 3 (1998. 9) pp. 113 - 120
- (3) 小澤雄一郎, 田中直浩 : 5.8 GHz 帯軽量レクテナの試作 信学技報 WPT2014-24 2014 年 6 月 pp. 1 - 4

PIV 技術の開発と実機への適用

Development and Utilization of Particle Image Velocimetry Method

長 尾 隆 央	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部
Chandra Shekhar	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 博士（工学）
高 和 潤 弥	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部
松 野 伸 介	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 課長 博士（工学）
大内田 聡	技術開発本部総合開発センター原動機技術開発部

Particle Image Velocimetry (PIV) は、流体内に混入した指標となる粒子を光で照らし、粒子の動きを撮影することで流速分布を計測する手法である。IHI で行っている PIV 技術開発と、PIV を製品開発に直結する研究に適用した事例を報告する。現在、開発を進めている最先端技術として、空間上の三次元的な速度分布を計測可能にしたトモグラフィック PIV について紹介する。製品開発への適用としては、ジェットエンジン内部空洞を模した流路内の流動や、ターボ機械の旋回失速現象を計測した事例などを紹介する。

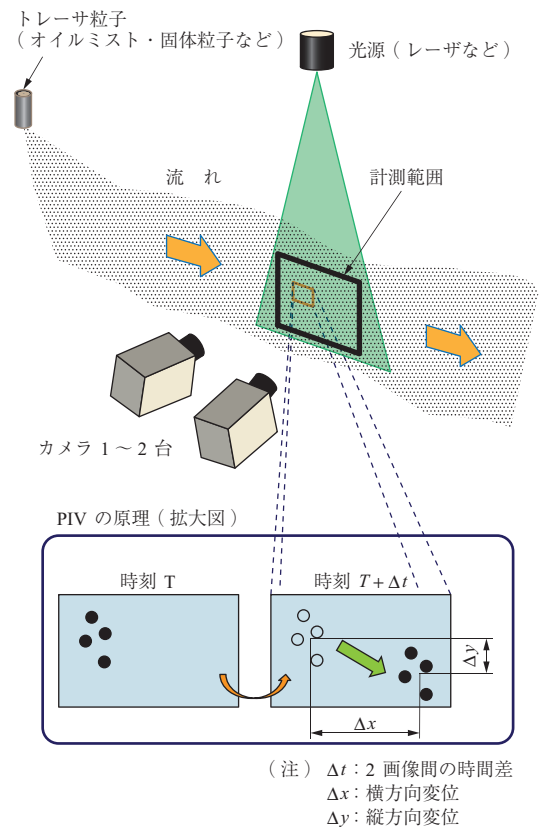
Particle Image Velocimetry (PIV) is a measurement method for velocity distribution of fluid flow. Laser light illuminates tracer particles in the fluid flow and the particle movement is captured by a camera and computer. In this report, the status of the latest PIV developments and examples of applications to product development are introduced, beginning with the development of the cutting-edge tomographic PIV method. This method makes it possible to measure velocity distribution in three-dimensional space. Actual cases of PIV measurement are also described, which include unsteady flow measurement in the rotating cavity of a jet engine using a time-resolved PIV system, and rotating stall in the vaneless diffuser of a centrifugal compressor.

1. 緒 言

Particle Image Velocimetry (PIV) は、第 1 図に示すように、流体内に混入した指標となる粒子（トレーサ粒子）にレーザなどの強い光を照射することによって、流れに追従して動くトレーサ粒子を可視化し、微小な時間差で撮影された 2 時画面像間の粒子の移動量を求めることで流速分布を求める計測手法である。

このような手法は、熱線流速計などの点計測と比較した場合、結果の空間情報量が多いので、複雑な流れの詳細構造の理解が容易であるうえに、定量的な値も取得できるという利点がある。PIV に相当する技術による最初期の計測とされている⁽¹⁾のは、1917 年に、Nayler と Frazer がフィルムに撮影した粒子画像から、手作業で移動量を追跡して流速分布を求めた例⁽²⁾がある。

しかし、一般的に実用化されたのは、レーザ光源や撮影機器、計算機の性能が発展した 1990 年代であり、2 時刻のデジタル画像の相互相関処理によって変位量を算出する Digital PIV⁽³⁾が発展してからである。現在では、撮影から速度分布計算、可視化までに掛かる時間は 1 時刻当た



第 1 図 PIV の概要と原理
Fig. 1 Illustrations of concept of PIV

り 0.1 s 以下の処理時間で可能になり、工業的な分野における製品開発でも日常的に利用されるようになってきている^{(4), (5)}。

現在、一般的に用いられている PIV は、レーザシート平面内の流速分布を計測するシステムであり、**第 1 図**に示すような構成で実施される。カメラを 2 台使用すれば Stereoscopic PIV⁽⁶⁾ (ステレオ PIV) 計測が可能になり、通常の面内の速度 2 成分に加えて、面に垂直な方向の速度成分を加えた速度 3 成分が計測できる。

最近では機器の発展によって、高速繰り返しパルスレーザと高速度カメラを用いることで、時間分解能の高い撮影が可能な Time Resolved PIV⁽⁷⁾ が現実的な費用で導入できるようになり、非定常現象の理解に重要な役割を果たしている。撮影画像から変位量を算出する部分においても、多数の計算機による並列化⁽⁸⁾ や、Graphics Processing Unit (GPU) を用いた高速演算⁽⁹⁾ を行うことによって処理速度のさらなる高速化が図られており、リアルタイムで流速分布の計測を行い、機器の制御を行うようなセンサ的な使用方法⁽¹⁰⁾ の実用化も期待される。

最新の流体計測における研究動向は、高速な計測を行う Time-Resolved 手法から、流れ場全体を三次元的に計測できる Whole-field 手法の研究、または両者を組み合わせたものへ変化しつつある⁽¹¹⁾。Whole-field の手法としては、流速計測手法では Tomographic PIV (トモグラフィック PIV) が有望視され、研究が精力的になされている。

本稿では、トモグラフィック PIV の開発について報告する。加えて、PIV をジェットエンジンやターボ機械などの製品開発へ適用した例を紹介する。

2. トモグラフィック PIV

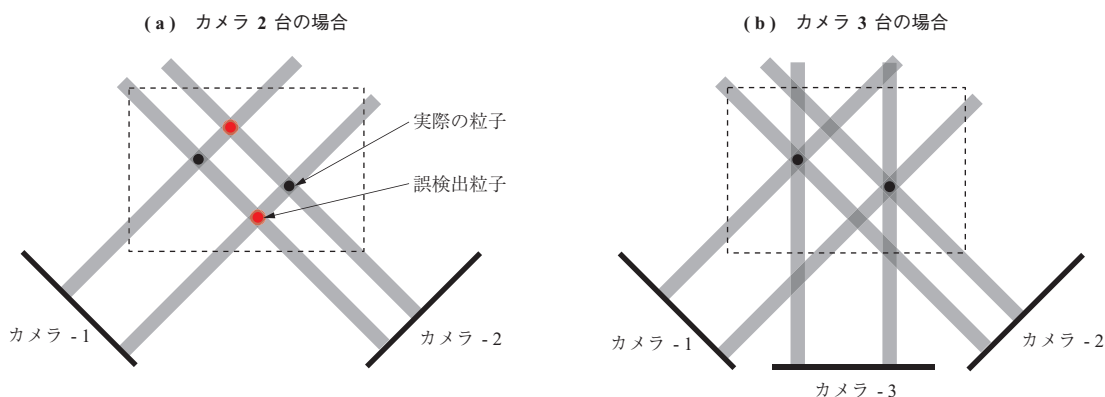
2.1 原 理

2.1.1 粒子再構築

トモグラフィック PIV は、3 台以上のカメラを用いて空間上の粒子を撮影することによって粒子の三次元分布を再構築し、2 時刻間の粒子移動の変位を求めることで三次元的な流速分布を計測する手法である。

第 2 図に三次元粒子再構築の原理を示す。ここで、粒子は撮像範囲内に 2 個存在すると仮定する。粒子を計測する場合、撮像された点の位置から撮像面に垂直に線を伸ばし、カメラ同士の線が交わるところに粒子がある。しかし、カメラが 2 台の場合、二つの線が交わる点は 4 か所あることになる (**第 2 図 - (a)**)。このまま粒子位置を再構築すると、実際には存在しない ghost 粒子が 2 個余計に現れてしまう。ここで、もう一つカメラを加えて 3 台にした場合を考えると (**第 2 図 - (b)**)、粒子の存在する位置は三つの線が交わる部分に確定でき、ghost 粒子の発生を抑制できる。実際の計測では粒子の数が多数となるので、粒子像の重なりなどが発生する。このため、カメラはできるだけ多い方が正確な粒子を再構築可能であるが、解析負荷はその分増加することになるので、通常は 4 ~ 6 台のカメラで実施される。

実際に再構築を行う際は、三次元空間を voxel という微小な単位に分割し、voxel の輝度を設定することで三次元粒子像分布を再現する。粒子像の再構築計算手法は、以前から医療用 Computed Tomography (CT) の画像再構築で用いられていた、Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique (MART)⁽¹²⁾ が一般的に用いられるが、医療用 CT と比較すると、トモグラフィック PIV では 1 枚当たりの撮影画素数が圧倒的に多いため、計算負荷を低減す



第 2 図 粒子再構築の原理
Fig. 2 Method for reconstruction of particle image

るための手法が検討されている⁽¹³⁾。

2.1.2 速度の算出

速度の算出には、三次元相互相関を用いて直接三次元 3 成分速度を求める手法と、平面状に粒子分布を抽出してからステレオ PIV 手法によって二次元 3 成分速度を求め、それを多段階で実施することで三次元分布を求める手法⁽¹⁴⁾がある。今回は前者の方法で速度を算出する。基本的には二次元の手法を三次元に拡張したものになるので詳細は説明しないが、二次元の手法は文献(1)に解説されている。

2.2 攪拌槽トモグラフィック PIV 試験

2.2.1 背景

医薬品製造設備において、細胞を培養して有用物質を生産するための培養槽が使用されている。効率的な培養を行うためには、供給される空気が全体に拡散され、細胞に与えるせん断応力を極力小さくする必要があり、内部流動を把握することは重要である。筆者らは、攪拌槽内部をトモグラフィック PIV で計測し、せん断応力や乱流の特性値などを算出する手法を開発しており⁽¹⁵⁾、本稿では、そのなかから一部を抜粋して紹介する。

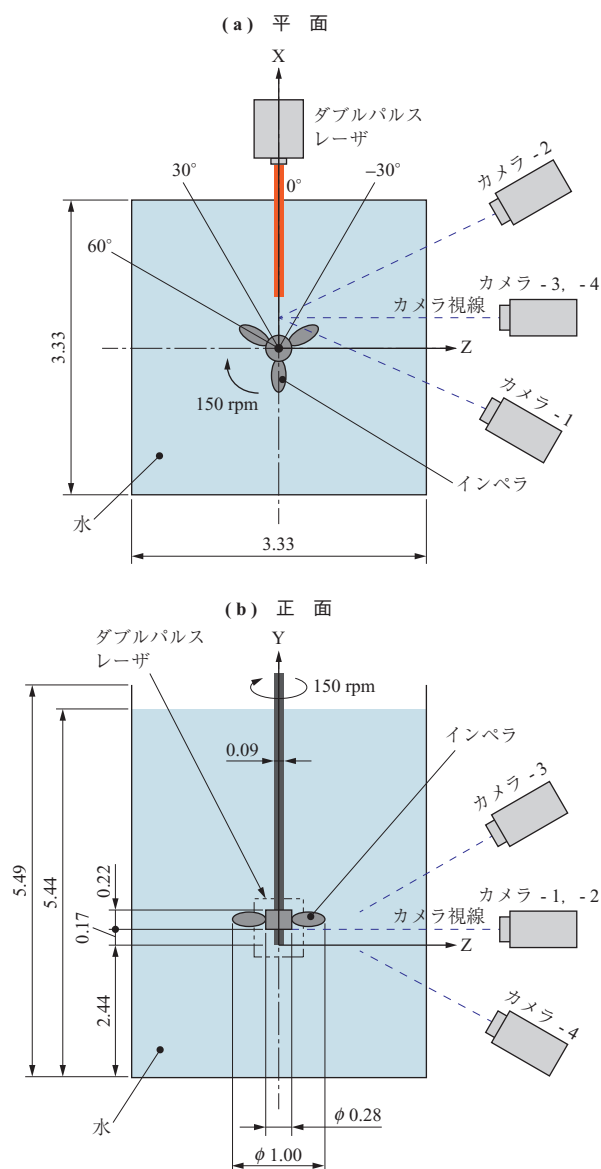
2.2.2 計測対象・計測手法

第 3 図に攪拌槽を示す。この攪拌槽は直方体の水槽であり、150 rpm で回転するインペラが備え付けられている。表記数字はインペラの直径で無次元化されている。

攪拌槽の一つの面から 7 mm 厚さの Nd : YAG レーザシート光 (30 mJ / パルス) を入射させ、その横の面から撮影を行う。十字配置で 4 台のカメラが設置されている。第 4 図に位相角 0° における撮影画像を示す。各カメラで撮影された粒子画像の例を示すように、インペラによって陰になる部分は計測することができない。撮影のタイミングは回転角度で制御され、-30, 0, 30, 60° (-60°) の断面の計測を行う。トレーサ粒子には 10 μm のナイロン粒子を用いた。

カメラ解像度は 1 600 × 1 200 であり、再構築される voxel は 1 600 × 1 200 × 144 とし、トモグラフィック PIV の検査体積は各辺 48 voxel の立方体とした。この場合の検査体積の寸法は 1 辺が 2 mm となる。検査体積とは三次元相互相関を行う際の単位体積である。

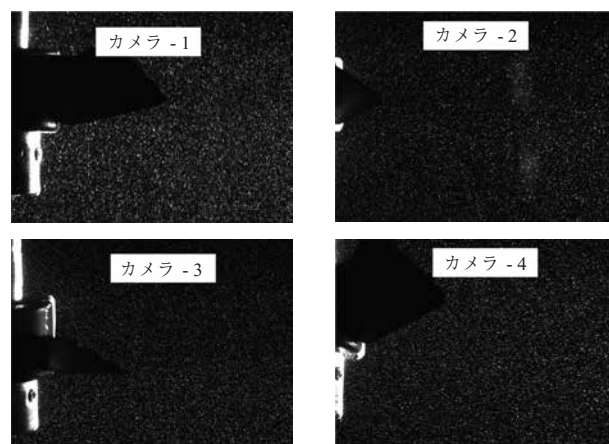
計算は GPU を用いて高速化するため、CUDA (Compute Unified Device Architecture) を用いて作成されたプログラムを使用した。1 時刻当たりの計算時間は NVIDIA GeForce GTX TITAN を用いた場合に 18 分で



(注) 数字はインペラの直径を基準とした比較値(無次元)で示す。

第 3 図 攪拌槽

Fig. 3 Schematic diagrams of the flow domain



(注) 位相角: 0°

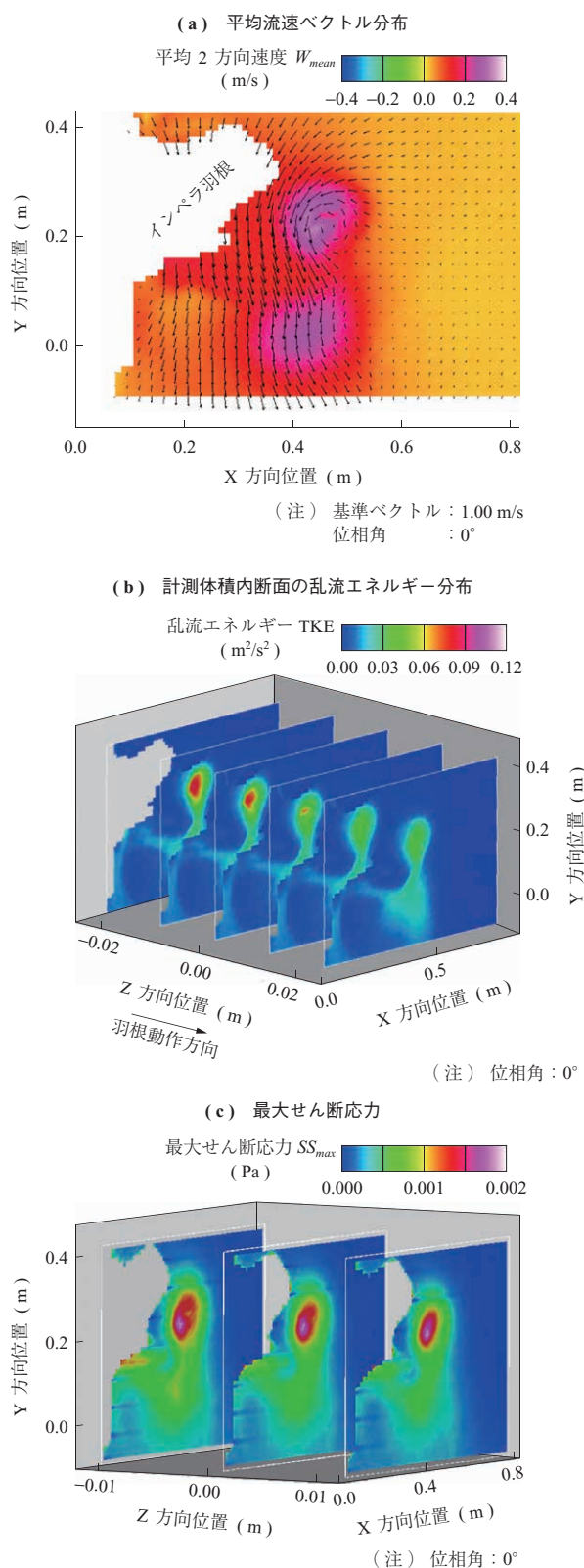
第 4 図 撮影画像例

Fig. 4 Sample particle images acquired by the four cameras

あった。

2.2.3 結 果

第 5 図にインペラ位相角 0° において、トモグラフィック PIV によって得られた代表結果を示す。撮影は 1 回に



第 5 図 トモグラフィック PIV 計測結果
Fig. 5 Result of tomographic PIV measurement

つき $3\,000 \times 4$ 対の画像を取得している。第 5 図 - (a) に平均流速ベクトル分布、第 5 図 - (b) に計測体積内断面の乱流エネルギー分布、第 5 図 - (c) に最大せん断応力を示す。各断面は 5 枚あり、断面間の間隔は 1 mm である。

第 5 図 - (a) から、流れ場を見ていくと、インペラによって下向きの流れが引き起こされている。また、インペラ外周部分において渦が発生しているが、これはインペラ先端部で発生した渦が下流まで残存しているものが計測されたものと考えられる。

第 5 図 - (b) に見られるように、インペラを起点とした上流から下流に向けて乱流エネルギーが減衰していく様子が確認でき、計測体積内部の値も問題なく計測できていることが分かる。

第 5 図 - (c) に、最大せん断応力分布を示す。せん断応力の算出には速度勾配が必要なため、三次元計測を行うことが必須となる。インペラの外周部でせん断応力が最大となることが確認できた。

2.2.4 ま と め

最新の流速計測法であるトモグラフィック PIV を実施し、三次元 3 成分の速度分布を計測し、せん断応力が算出可能なことを確認した。本手法は瞬時の三次元的な流れ場の特徴を計測可能であるため、攪拌槽をはじめとして、ジェットエンジンの翼周りや冷却空気の流れの計測、ファン騒音の現象解明などに役立つことが期待される。

3. PIV の適用事例

3.1 回転キャビティ内流動計測⁽¹⁶⁾

3.1.1 背 景

ジェットエンジンなどの回転機械には、周囲を回転壁と静止壁に囲まれた空間（回転キャビティ）が存在する。高速で回転する壁面に接しているため、流れは複雑になることが知られている⁽¹⁷⁾が、一般的に計測は点計測で行われており⁽¹⁸⁾、流れの全体構造を定量的に計測した例は少ない。

内部流は熱伝達率に強く影響を与えるため、構造物の温度分布を推定するうえで重要になる。このため、実機の流れ場を推定するため、Time Resolved PIV を用いて回転キャビティ内部の非定常流れを計測した。流れ場を特徴づける無次元数、 Re_ϕ （回転レイノルズ数）、 Re_z （軸流レイノルズ数）および Ro （ロスビー数）は、以下の (1) ~ (3) 式のようになり、適切な値を選ぶことで実機条件を

再現できる.

$$Re_{\phi} = \frac{\rho \Omega r^2}{\mu} \dots\dots\dots (1)$$

$$Re_z = \frac{2\rho W a}{\mu} \dots\dots\dots (2)$$

$$Ro = \frac{\text{Inertial Force}}{\text{Coriolis Force}} = \frac{W}{\Omega a} = \frac{\frac{1}{2} r^2 Re_z}{a^2 Re_{\phi}} \dots\dots (3)$$

ここで, ρ は密度 (kg/m³), Ω は回転数 (rad/s), r はキャビティの半径 (m), μ は粘性係数 (Pa・s), W は軸流空気平均速度 (m/s), a は軸流空気孔の径 (m) である.

3.1.2 実験・計測系

第 6 図に回転キャビティ試験装置を示す. 本装置で回転壁と静止壁に囲まれた空間を計測する. 静止壁の中心から軸流空気が流入し, 外周の隙間から流出する. PIV に用いるトレーサ粒子は軸流空気に混入させている.

高速繰り返し Nd:YAG レーザ 2 台と高速度カメラ 2 台を用いて Time-Resolved ステレオ PIV 計測を行った. 計測断面はキャビティ中心の軸垂直方向断面であり, 図の左側のアクリル樹脂面から撮影を行った. ただし, 視野を確保するために一部の実験はステレオで撮影していない. トレーサ粒子はセバシン酸ジオクチルを微粒化したものを用い, 粒径は約 1 μ m である.

3.1.3 結 果

(1) Ro に対する流れ場の変化

第 7 図に回転数 200 rpm, 軸流空気量 50 l/min (normal) ($Ro = 12.7$) 条件での PIV 計測

結果を示す. この条件は高ロスビー数条件であり, 相対的に軸流空気量による慣性力の影響が大きい条件である.

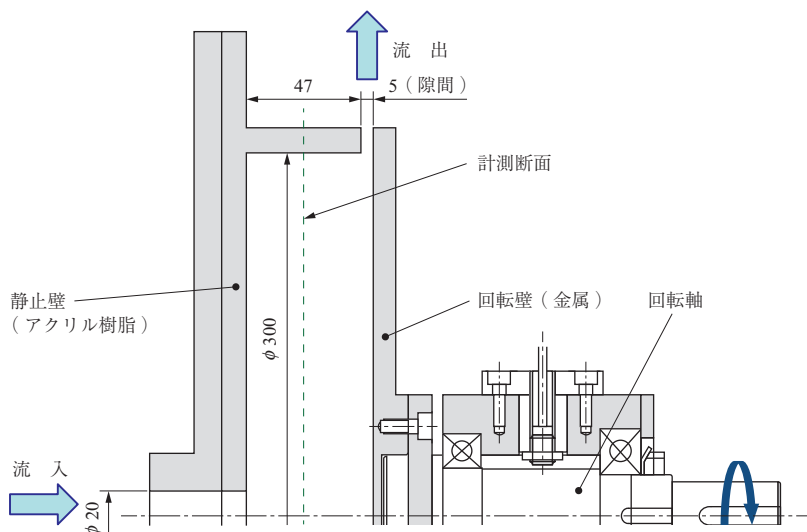
第 7 図 - (a) に, 時間平均周方向速度のカラーコンター (等高線) 図に面内ベクトルを, - (b) に, ある時刻での瞬時値のそれを示し, - (c), - (d) に, ある異なる時刻での速度変動絶対値を重ねて, 面内の速度変動ベクトルを示す. ここで, 速度変動とは, 瞬時速度から時間平均速度を除算したものを表す.

第 7 図 - (a), - (b) から, 旋回方向速度は外径側の速度よりも内径側の速度の方が大きいことが分かる. これは外径側で加速された流体は, 軸流空気量が多いために形成されるキャビティ内部での循環によって内径側に流れるためである.

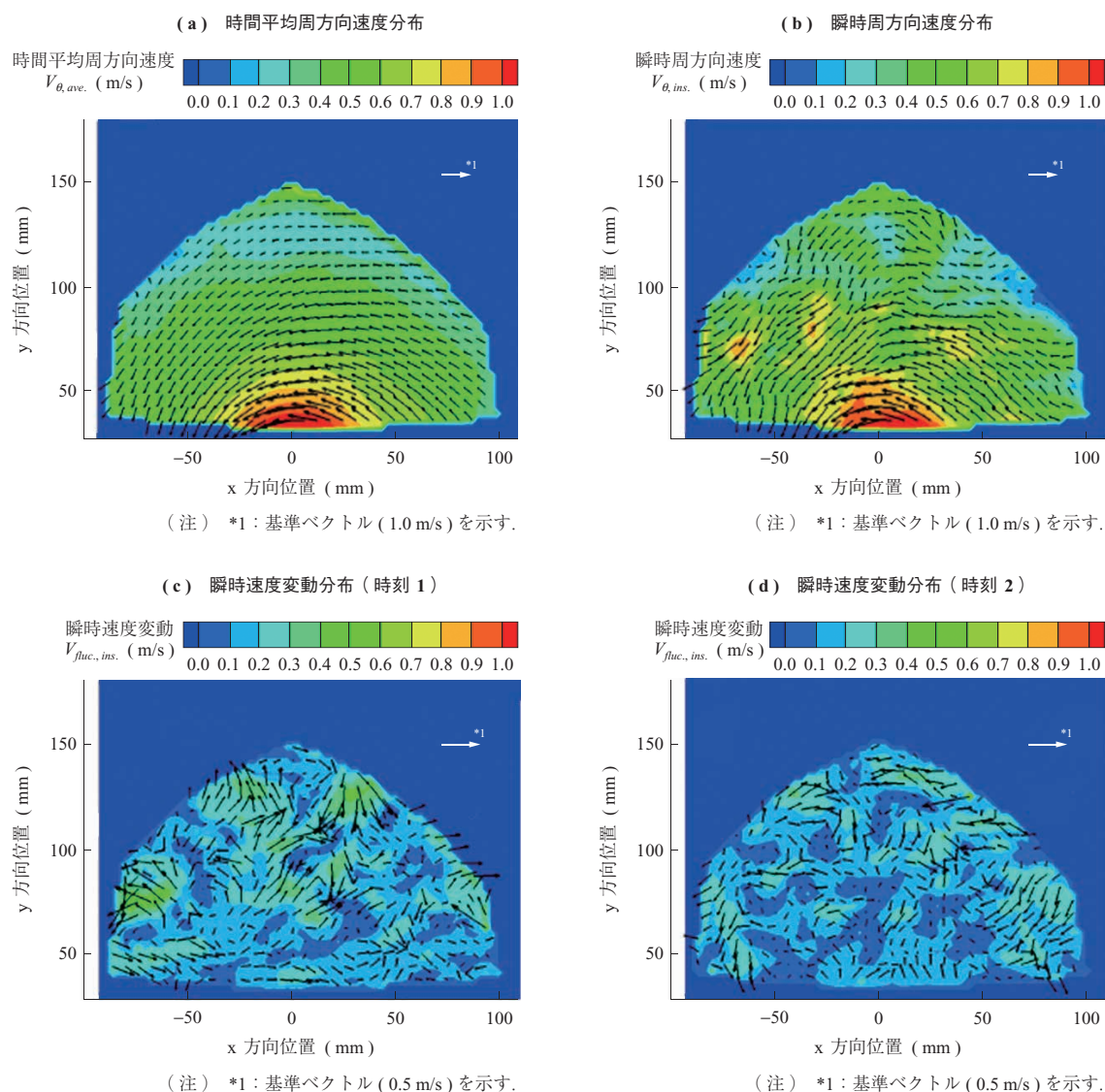
また, 第 7 図 - (c), - (d) から, この条件での流れ場は速度変動が小さく, ほぼ定常的で軸対称的な流れ場になっていることが分かる.

第 8 図に回転数 4 000 rpm, 軸流空気量 50 l/min (normal) ($Ro = 0.6$) 条件での PIV 計測結果を示す. この条件は低ロスビー数条件であり, 相対的に回転によるコリオリ力 (回転座標系で移動した際に, 移動方向と垂直な方向に働く見かけ上の力) の影響が大きい領域である. 第 8 図 - (a) ~ - (d) の図は第 7 図と同様である.

第 8 図 - (a) と - (b) の結果から, 高ロスビー数条件での結果と異なり, 高い径位置での旋回方向速度が高くなっていることが分かる. これは相対的に軸流空気の影響が弱まり, キャビティ内部に形成さ



第 6 図 回転キャビティ試験装置 (単位 : mm)
Fig. 6 Rotor-stator cavity (unit : mm)



第 7 図 回転数 200 rpm, 軸流空気量 50 l/min (normal) ($Ro = 12.7$) 条件での PIV 計測結果

Fig. 7 Flow field for 200 rpm, 50 l/min (normal) ($Ro = 12.7$)

れる上述の循環が小さくなったため、高い径位置での高回転速度をもつ流れを内径側に移動させていないためと考えられる。

また、第 8 図 - (c) と - (d) から、速度変動値が高ロスビー数条件での結果と比較して大きく、非定常性が高まっていることが分かる。さらに、第 8 図 - (c) と - (d) で、その速度変動値の高い部分が周方向に移動していることが分かる。

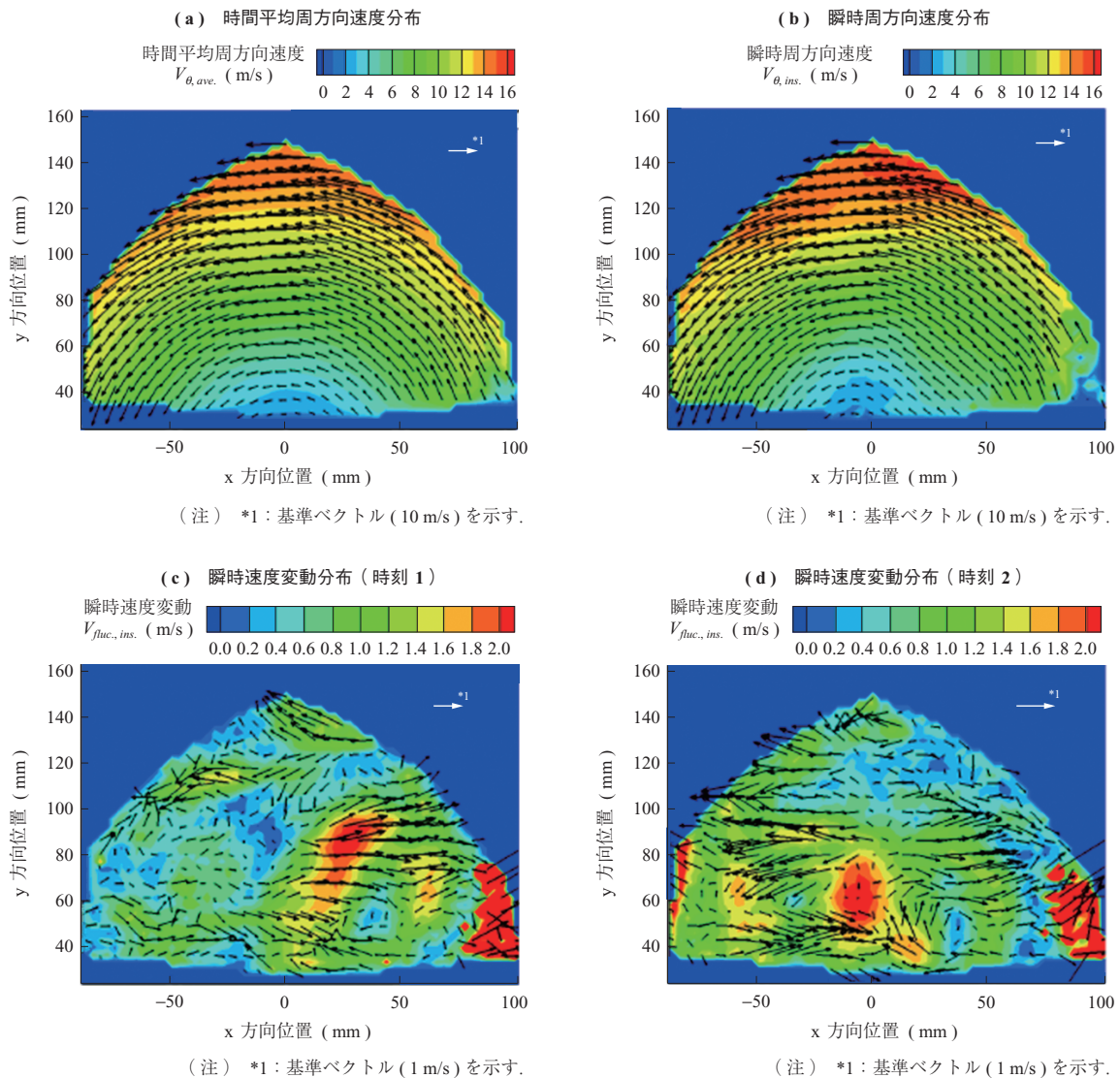
次項で低ロスビー数条件について詳細に流れ場を考察する。

(2) 低ロスビー数条件での非定常性の調査

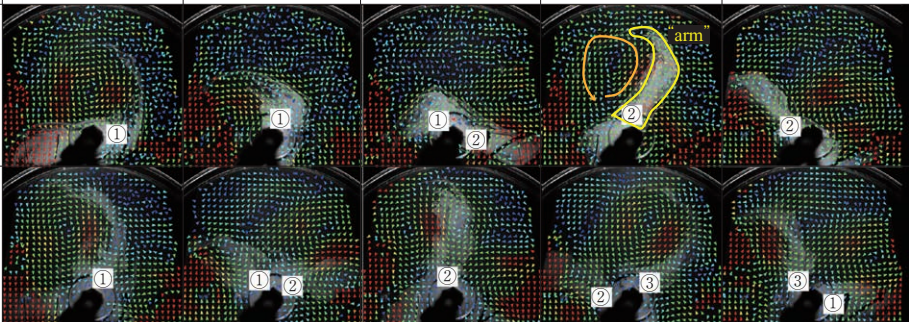
第 9 図に、低ロスビー数条件における流れ場の連続画像を示す。図は撮影画像に速度変動ベクトル（色は速度変動絶対値）を示す。T は各条件での非定常性の一周期である。第 9 図 - (a) はロスビー数

が 0.63 の条件の結果であり、- (b) は 1.27 の条件の結果である、ロスビー数 0.63 の結果を見ると、トレーサ粒子の濃い（白い）領域が腕状に形成されており、それに包まれるように循環渦がある。また、その腕状構造の領域は時間とともに回転方向に回転の速度と異なる速度で回転していることが明らかになった。さらに、この条件では、腕状構造は周方向に 2 か所存在することが分かる。

一方、ロスビー数が 1.27 の条件では、同様に腕状構造の領域が見られるが、それが周方向に 3 か所存在することが分かった。このように、ロスビー数条件によって腕状構造の領域の数が増減するなど、回転キャビティ流れに対してロスビー数を指標に流れ場の整理ができることが今回の計測結果から明らかになった。



第 8 図 回転数 4 000 rpm, 軸流空気量 50 l/min (normal) ($Ro = 0.6$) 条件での PIV 計測結果
 Fig. 8 Flow field for 4 000 rpm, 50 l/min (normal) ($Ro = 0.6$)

項 目	条 件			計 測 時 刻				
	回転数 (rpm)	空気量 (l/min)*1	ロスビー数 Ro (-)	t	$t + 1/5 T$	$t + 2/5 T$	$t + 3/5 T$	$t + 4/5 T$
(a)	4 000	50	0.63					
(b)	4 000	100	1.27					

(注) t : 特定の時刻
 T : 非定常現象の一周期
 ①～③: 各腕状構造に付与した番号
 (a) は 2 個, (b) は 3 個の腕状構造がある.
 *1 : normal 表示である.

第 9 図 低ロスビー数における流れ場の連続画像
 Fig. 9 Visualization of velocity fluctuation vectors

3.1.4 まとめ

ジェットエンジン主流内部に存在する回転キャビティ領域を模した供試体を製作し、回転数と軸流空気量を変化させた幾つかの条件で試験を実施し、内部の流動の変化を Time-Resolved ステレオ PIV 計測を行った。この結果、内部の流動はロスビー数が高い条件では定常的で軸対称的な流れ場になり、低い条件では非定常性の強い流れ場になることが分かった。

また、同じ低ロスビー数条件でもロスビー数によって流れ場の非定常性の様相が変化することが明らかになり、このロスビー数を指標に流れ場の推定ができる可能性が示唆された。

3.2 ターボ機械内部の流れ計測⁽¹⁹⁾

3.2.1 背景

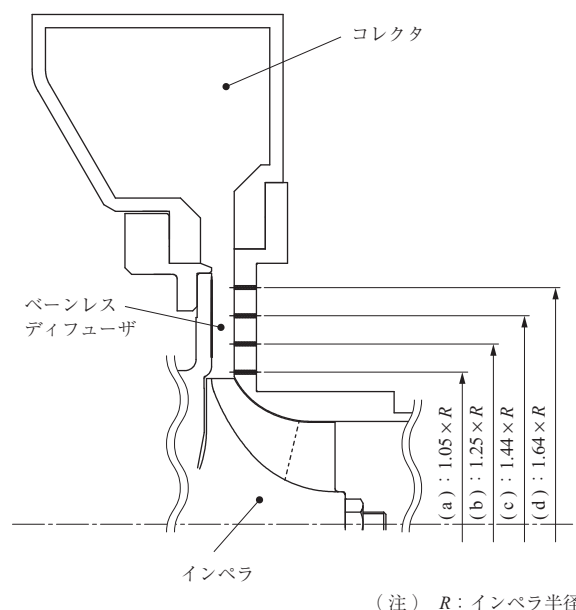
ターボ機械は、ロータの回転数と作動流体流量の組合せによっていろいろな運転条件に対応できるが、一般にその性能は運転条件が一つの仕様点から外れると低下する。なかでも、圧縮機を例にとると、運転条件が低流量側へゆくにつれて旋回失速やサージなどと呼ばれる不安定な流れの振動が発生し、ついには運転できなくなることが知られている。実際に圧縮機が運用される条件はさまざまであるため、少しでも運転可能な範囲が広いもの、つまり、極力不安定流れが発生しないものが望ましい。

最近では数値流体力学 (CFD) に重きが置かれるにつれて、機器開発過程での古典的な流体実験は頻度を減らしたが、計測技術自体は CFD と同じく進歩を続けている。本稿で主に扱う PIV を使えば、CFD と同じように瞬時・多点の流れの状態を把握することも原理的に可能である。つまり現状、設計ツールとして用いている CFD の不足を補うという観点や、また将来の数値解析技術開発に資する検証用データの取得という意味においても、実験による内部流れの把握は重要である。

本稿では、遠心圧縮機内部の不安定流れとして知られた羽根なしディフューザでの旋回失速を PIV で計測した事例を紹介する。この現象は、ディフューザを軸方向からみて周期的な分布をもつ圧力パターンが回転運動する現象として知られている⁽²⁰⁾。旋回失速が発生した際に生じる運用上の問題としては、ディフューザの本来の機能である静圧回復が低下すること、圧力振動が周期外力として機械に作用し悪影響を及ぼすことが挙げられる。

3.2.2 計測対象

第 10 図に今回の試験に用いた圧縮機を示す。ディ

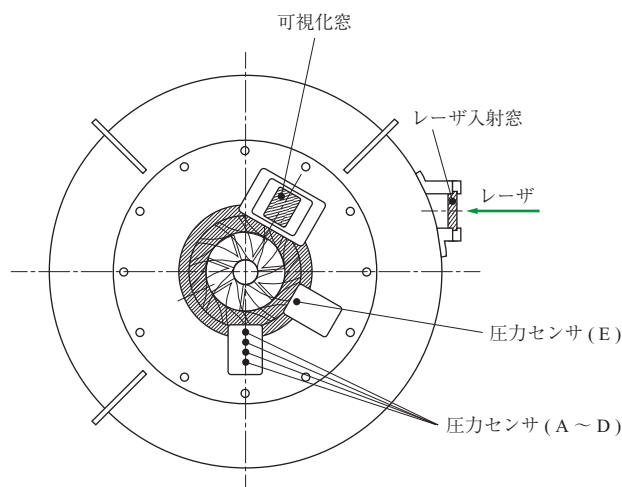


第 10 図 供試体断面 (圧縮機)
Fig. 10 Schematic of the flow path

フューザ流路の計測を容易にするため、本供試体では回転軸対称な形状をもつコレクタを使用している。第 10 図に示す (a) ~ (d) の位置には圧力トランスデューサが半径方向に一行に取り付けられており、瞬時の壁面静圧が計測できる仕組みになっている。

3.2.3 計測手法

第 11 図に PIV 撮影時の配置を示す。まず、ディフューザ壁の一部を加工して観察用のガラス窓を設け、窓の正面に置いた CCD カメラを使って流路内を撮影できるようにする。PIV の照明に用いるレーザ光は、ガイドアーム (中空で中に反射鏡が仕込まれている) を使ってレーザ発振器本体から供試体側面まで導き、供試圧縮機のケーシングに加工したガラス窓を介してレーザ光をディフュー



第 11 図 PIV 撮影時の配置
Fig. 11 PIV layout

ザ部に導入する。トレーサ粒子は圧縮機吸込部から霧状にした DEHS (Di-ethylhexyl sebacate) を導入する。旋回失速時の圧力変動に同期させてレーザを照射することで、位相同期撮影を行った。

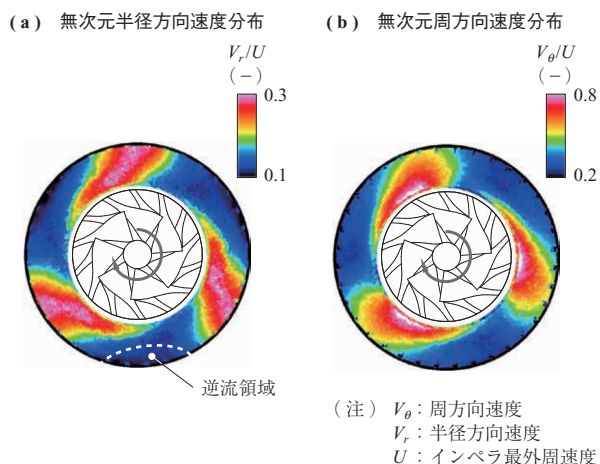
3.2.4 結 果

羽根なしディフューザの 50% 流路高さを計測断面として PIV 計測を行った流速分布の結果を第 12 図に示す。200 回の位相同期計測を実施し、さらに位相を周方向に 10° ずつ 36 回組み変えた条件（合計でディフューザ一周分、 200×36 回の計測）で同様の操作を行った結果を重ね合わせたものである。

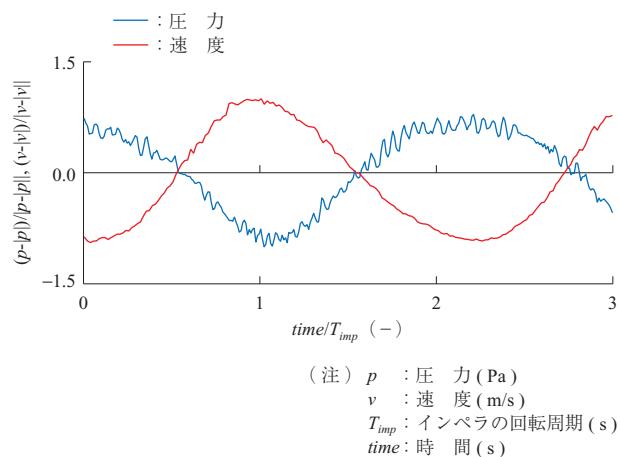
したがって、これは旋回失速が発生している際の瞬時速度分布を表すことになる。第 12 図から、圧力が大きく変動するのと同様に、速度も周方向にわたって高い部分と低い部分とが繰り返す様子が確認できる。速度の周方向にわたる分布は半径位置が小さいところでは強いが、ディフューザ出口に向かって弱く（一様）になる傾向を示す。

速度の絶対値と壁面静圧の時間変動を比較した結果を第 13 図に示す。第 13 図から分かるとおり、速度の高い時刻（もしくは速度の高い領域）では圧力が低く、速度の低い時刻では圧力の高くなる逆位相の関係がみられる。

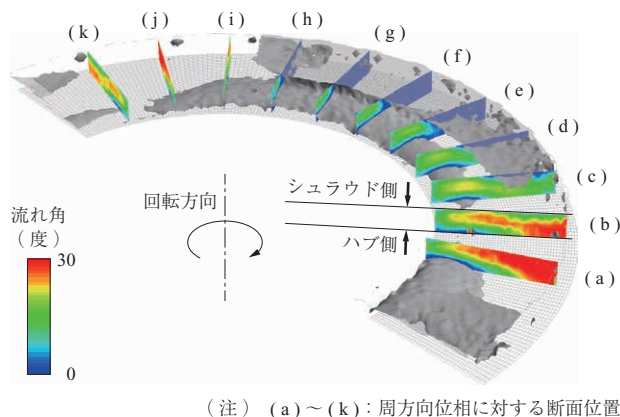
流路高さ方向の構造を明らかにするため、20, 34, 66, 80% の流路高さ断面についても同様に位相同期計測を行い、三次元分布として再構築した結果を第 14 図に示す。11 の周方向位相において流れ角の分布を表示し、はく離流れを可視化するため、流れ角 0° の等値面が灰色の表面として表されている。ハブからシュラウドへ向かう逆流は低流速の領域 ((e) ~ (h)) で見られる。反対に、高流速領域 ((b), (k) など) ははく離を起こしておらず、流



第 12 図 流速分布
 Fig. 12 Radial and tangential velocity



第 13 図 速度と圧力の比較
 Fig. 13 Pressure and velocity fluctuation at a fixed point



第 14 図 流れ角の三次元分布
 Fig. 14 Three dimensional flow angle distribution

れの向きは放射状になっている。高流速領域と低流速領域の中間 ((c), (d)) では、ハブとシュラウドそれぞれにおいて壁面上からはく離をもつ流れとなっている。

3.2.5 ま と め

遠心圧縮機に生じる不安定流動の一例として羽根なしディフューザの旋回失速を取り上げ、PIV によって速度場を可視化した結果を紹介した。旋回失速は古くから知られている現象で、実験的・理論的にもさまざまな研究が過去になされた分野ではあるが、実機に近い条件で速度場全体を可視化した例は比較的少ない^{(21), (22)}。取得した結果は実際の内部流れ場を理解する手助けになるとともに、将来的に CFD の予測精度を高めてゆくための検証用データとしても活用できると考える。

4. 結 言

当社で行っている最先端計測技術研究として、空間上の三次元的な速度分布を計測可能としたトモグラフィック

PIV についての事例を紹介した。また、製品開発への適用として、ジェットエンジン内部空洞をモデル化した回転キャビティ流れと、ターボ機械の旋回失速現象を計測した事例を紹介した。

今後も光源や撮像装置などの機器の技術革新に伴い、新たな計測手法の開発や発明が行われることが予想される。新たな計測技術をいち早く取り入れ、製品を開発するための手段として実用化していきたい。

— 謝 辞 —

回転キャビティ内部流れの計測については、2012 年度経済産業省補助事業「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」の一環として実施された。また、トモグラフィック PIV については、2013 年度、横浜国立大学の西野耕一教授との共同研究の一環として実施された。実施に当たっては、関係各位から、多くのご助言とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 可視化情報学会：PIV ハンドブック（第二版）
森北出版株式会社 2005 年
- (2) J. L. Nayler and B. A. Frazer : Preliminary report upon an experimental method of investigating, by the aid of kinematographic photography, the history of eddying flow past a model immersed in water Tech. Rep. Advisory Commit For Aeronau Vol. 1 (1917 - 18) pp. 18 - 25
- (3) C. E. Willert and M. Gharib : Digital particle image velocimetry Exp. Fluids 10 (1991) pp. 181 - 193
- (4) 金子 誠：エンジン燃焼計測技術の最前線 自動車技術 Vol. 65 No. 7 2011 年 7 月 pp. 26 - 31
- (5) 岩野龍一郎, 三浦誠二：最近のターボ機械流れ計測技術 水車の流れ計測 ターボ機械 Vol. 33 No. 11 2005 年 11 月 pp. 682 - 687
- (6) M. P. Arroyo and C. A. Greated : Stereoscopic particle image velocimetry Measurement Science and Technology Vol. 2 (1991. 12) pp. 1 181 - 1 186
- (7) O. Pust : Time Resolved PIV Solutions - PIV at 4 000 Frames per Second Proceedings of the Conference on Modelling Fluid Flow Budapest Ungarn (2003. 11)
- (8) M. A. Park and T. Hauser : Processing High-Speed Stereo Particle Image Velocimetry Data with an Integrated Cluster Supercomputer 45th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit AIAA (2007. 1)
- (9) T. Schiwietz and R. Westermann : GPU-PIV Proceedings of the Vision, Modeling and Visualization (2004. 11)
- (10) C. E. Willert, M. J. Munson and M. Gharib : Real-time particle image velocimetry for closed-loop flow control applications 15th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics (2010. 7)
- (11) 西野耕一：特集 機械工学年鑑 7.8 流れの計測・可視化 日本機械学会誌 Vol. 117 No. 1 149 2014 年 8 月 pp. 523 - 525
- (12) G. T. Herman and A. Lent : Iterative reconstruction algorithms Computers in Biology and Medicine Vol. 6 No. 4 (1976. 10) pp. 273 - 294
- (13) F. Scarano : Tomographic PIV -Principles and Practice- Measurement Science and Technology Vol. 24 (2013. 1)
- (14) T. Matsunaga and K. Nishino : Proposal of Tomographic Stereo Particle Image Velocimetry (TSPIV) 16th International Symposium on Flow Visualization 2014 (2014. 6)
- (15) C. Shekhar, K. Takahashi, T. Matsunaga and K. Nishino : Tomographic PIV Measurement of Turbulence Energy Budget Equation Terms in a Square Shaped Stirred Flow Mixer 17th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics (2014. 7)
- (16) J. Kouwa, T. Nagao, S. Matsuno, Y. Sasaki and K. Hisaeda : Time-Resolved Stereo PIV Measurements of Flow Fields Inside a Rotating Cavity Proceedings of ASME Turbo Expo 2014 GT2014-26503 Vol. 2D (2014. 6)
- (17) D. Bohn, J. Ren and C. Tuemmers : Investigation of the Unstable Flow Structure in a Rotating Cavity ASME Turbo Expo 2006 GT2006-90494 Vol. 3

- (2006. 5) pp. 1 433 – 1 442
- (18) T. Geis, J. Ebner, S. Kim and S. Wittig : Flow Structures Inside a Rotor – Stator Cavity International Journal of Rotating Machinery Vol. 7 No. 4 (2001) pp. 285 – 300
- (19) S. Ohuchida, T. Kawakubo and H. Tamaki : Experimental Study of Rotating Stall in Vaneless Diffuser of a Centrifugal Compressor Proceedings of ASME Turbo Expo 2013 GT2013-95468 (2013. 6)
- (20) Ronald H. Aungier : A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis Centrifugal Compressors ASME Press (2000. 2)
- (21) 林 信敬, 小山正晴, 佐野正利 : PIV による遠心羽根なしディフューザにおける旋回失速発生時の速度場計測 ターボ機械 Vol. 38 No. 4 2010 年 4 月 pp. 215 – 226
- (22) A. Dazin, G. Cavazzini, G. Pavesi, P. Dupont, S. Coudert, G. Ardizzon, G. Caignaert and G. Bois : High-speed stereoscopic PIV study of rotating instabilities in a radial vaneless diffuser Experiments in Fluids Vol. 51 No. 1 (2011. 7) pp. 83 – 93

酸素燃焼発電プラントの商用化への取組み

Efforts Aimed at the Commercialization of Oxyfuel Power Plants

山 田 敏 彦	エネルギー・プラントセクターエンジニアリングセンター開発部	主査
小 牧 晃 洋	エネルギー・プラントセクターエンジニアリングセンター開発部	
後 藤 隆 弘	エネルギー・プラントセクターエンジニアリングセンター開発部	
内 田 輝 俊	エネルギー・プラントセクターエンジニアリングセンター開発部	
藤 原 直 樹	エネルギー・プラントセクターエンジニアリングセンター開発部	主幹
氣 駕 尚 志	エネルギー・プラントセクター	技師長 博士（工学）

酸素燃焼技術を用いた発電プラントは、地球温暖化の主要因である CO₂ の大規模排出抑制方法の一つとして、商用化が待ち望まれている。現在、既設プラントに酸素燃焼を適用したカライド酸素燃焼プロジェクトに参画し、実証を推し進めている。この実証運転では酸素燃焼ボイラの特性に加え、発電プラントから CO₂ を回収し、プラント全体の運用性などを確認している。また、本実証技術をオーストラリアの 500 MWe 石炭火力発電所に適用した場合の性能や経済性について検討を実施し、商用化に向け取り組んでいる。

The oxyfuel power plant is one of the candidates for large-scale CO₂ capture as an economical measure to mitigate global climate change. IHI has been developing oxyfuel combustion technology since 1989, and is running the Callide Oxyfuel Project with partners in Australia and Japan. At present, results have been obtained for a 30 MWe plant and the operation characteristics of the oxyfuel boiler are confirmed. Almost pure CO₂ is produced in the power station and overall operation flexibility of the plant is also confirmed. At the same time, the feasibility of a 500 MWe oxyfuel power plant in Australia has also been studied, and the plant performance and costs have been evaluated in preparation for the commercialization of oxyfuel power plants.

1. 緒 言

酸素燃焼発電プラントは、石炭火力からの CO₂ 排出削減方法の一つとして、将来の切り札となることが期待されている。

地球温暖化あるいは気候変動などバランスの崩れた地球環境について、世界各地でさまざまな事象が発生しており、日常生活のなかに見いだされることが多々ある。この主要因として、温室効果ガスの主成分である大気中 CO₂ 濃度の増加が考えられている。現在、その濃度は年間約 2 ppm でコンスタントに上昇し、18 世紀産業革命以前の 280 ppm に比べ、2012 年には北半球で 400 ppm を初めて一時的に上回った。世界の平均気温を産業革命以前から 2℃上昇に抑えるには、大気中 CO₂ 濃度を 450 ppm 程度に抑える必要があるとの報告⁽¹⁾がある。そのためには、ここ 10～20 年のうちに大幅な CO₂ 排出削減を成し遂げなければならない。そして、1 ユニットで年間数百万 t と大規模に CO₂ を排出している石炭火力からの CO₂ 排出削減が急務であることは必然である。これに呼応するかのよう、アメリカやカナダでは、石炭火力から排出さ

れる CO₂ の原単位 (kg-CO₂/MW・h) を規制する動きがあり、石炭火力に対する強い CO₂ 排出抑制の社会的要求が始まろうとしている。

一方、石炭は世界的に埋蔵量も多く、経済的な燃料であるが、単位発電量当たりの CO₂ 排出量が多く、前述のとおり石炭燃焼後の CO₂ 排出が大きなマイナス要因となっている。

そこで、石炭火力からの CO₂ 排出抑制方法には、高効率化が有効な手段の一つであることに加え、さらなる CO₂ 排出削減のために、ニアゼロエミッション火力となる、CCS (CO₂ Capture and Storage) を付加した石炭火力の開発・実証が進められている。

当社では、石炭火力からの CO₂ 回収方法の一つである酸素燃焼技術を用いた、オーストラリアでのカライド酸素燃焼プロジェクトに参画するとともに、実証運転データを積極的に取得している。さらに、オーストラリアと共同で、酸素燃焼を適用した 500 MW プラントの FS (Feasibility Study) を実施し、本技術の商用化に向けて取り組んでいる。本稿ではこれらの概要を紹介する。

2. 酸素燃焼発電プラント

CCS は石炭火力から排出される CO_2 を回収して、地中に貯留するプロセスのことであり、酸素燃焼発電プラントはその有効な手法の一つとなっている。

第 1 図に酸素燃焼プロセス概念図を示す。酸素燃焼は、空気からあらかじめ N_2 を分離し、酸素で燃料（石炭）を燃焼させるもので、これによって、排ガス中 CO_2 濃度を理論的に 90% 以上まで高めることができ、その排ガスを圧縮・冷却することで CO_2 を容易に回収しようとするシステムである。以下に主な特長を示す。

- (1) 本酸素燃焼は、新設のみならず既設プラントへの適用が可能である。
- (2) 局所的に高濃度 O_2 雰囲気形成可能であり、燃焼改善が図れる。
- (3) システムからの排ガス量が空気燃焼に比べ少なく、熱損失が小さくなるため、ボイラ効率の向上が望める。
- (4) 再循環ガス中の NO_x が炉内火炎で還元されるため、プロセス外への NO_x 排出量が減る。また、

CO_2 回収装置 (CPU) 内でも NO_x が回収される。

(5) 脱硫装置は排ガス量が減ることから、小型化が可能である。

(6) N_2 の有効利用が可能である。

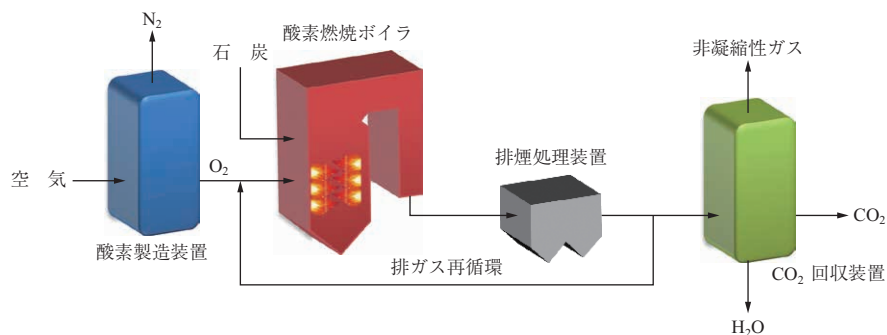
3. カライド酸素燃焼プロジェクト

現在、オーストラリア・クイーンズランド州で、カライド酸素燃焼プロジェクトが実施されており、世界初かつ世界で唯一の酸素燃焼発電プラントが実証運転されている。本プロジェクトは、日豪両政府およびクイーンズランド州政府からの支援を得、オーストラリア石炭協会および日豪民間 6 社で実施しているものである。

3.1 プロジェクト概要

本プロジェクトは 2008 年 3 月に開始した、ステージ 1 では第 2 図に示す既設のカライド A 発電所 4 号機（カライド A）に対して、酸素燃焼を適用した CO_2 回収の実証、ステージ 2 では、カライド A で回収された CO_2 を貯留サイトまで輸送し、地中への CO_2 注入を実施するものである。

ステージ 1 において、2015 年 2 月 1 日の時点で、酸



第 1 図 酸素燃焼プロセス概念図

Fig. 1 Concept of oxyfuel process for CO_2 capture



第 2 図 カライド A 発電所 4 号機

Fig. 2 Callide-A Power Station No.4 unit

素燃焼運転 10 000 h 以上を達成したところである。

3.2 カライド A 酸素燃焼プロセス

第 3 図に、カライド A に適用されている酸素燃焼プロセスフローを示す。また、CPU においては、ガス圧縮機前の脱硫装置で硫黄分はほぼ除去され、圧縮後、脱硝および脱水される。さらに、コールドボックス内で非凝縮性ガスである O_2 や N_2 が分離され、99%以上の CO_2 が回収されることになる。第 1 表には、酸素燃焼適用後のカライド A の概要を示す。以下に、特徴を示す。

- (1) 石炭の粉碎・乾燥を行うミルがプロセス内にある。
- (2) バーナは 6 本のうち 4 本が常用での運用となり、バーナパターンの違いによる特性を確認できる。
- (3) 排ガス冷却のため、ボイラ低圧給水との熱交換器が設置されている。
- (4) ミル出口などの低温部での腐食を避けるため、水分除去システムが導入されている。このシステムにはバイパスラインを設け、脱水運転と非脱水運転の両方を行える。
- (5) 押込通風機は空気燃焼時大気を吸い込む。また、酸素燃焼時は、排ガスを再循環する。
- (6) 酸素燃焼で酸素は再循環ガスと混合するが、供給酸素の一部は直接バーナ火炎部へ供給可能で、その特性を確認できる。
- (7) CPU には酸素燃焼時排ガスの約 10%が導かれ、ほぼ純粋な CO_2 を製造する。

カライド A は CO_2 回収を念頭に置いたプラントでないにもかかわらず、酸素燃焼の適用、改造を実施し、酸素

第 1 表 カライド A 発電所 4 号機 概要
Table 1 Outline of Callide-A Power Station No.4 unit

項 目	内 容
名 称	カライド A 発電所 4 号機 ・ 1969 年 運転開始 ・ 1998 年 改造および運転再開
出 力	30 MWe
石 炭	カライド炭
酸素製造プロセス	方 式 深冷分離法
	仕 様 330 t/day × 2 基 O_2 製造純度：98%以上
ボ イ ラ プロセス	ボイラタイプ 2 ドラムタイプ自然循環式
	蒸 気 条 件 (蒸 気 ター ビ ン 入 口) 流量：136 t/h 圧力：4.1 MPa 温度：460℃
	燃焼システム ピータタイプミル：3 台 バーナ：前面燃焼 6 本設置（内 2 本が IHI バーナ） O_2 供給ノズル設置
CO_2 回収 プロセス	通 風 方 式 平衡通風 押込通風機／誘引通風機：各 1 台
	仕 様 75 t/day CO_2 製造純度：99 vol%以上

燃焼発電プラントからの CO_2 回収を実現している。

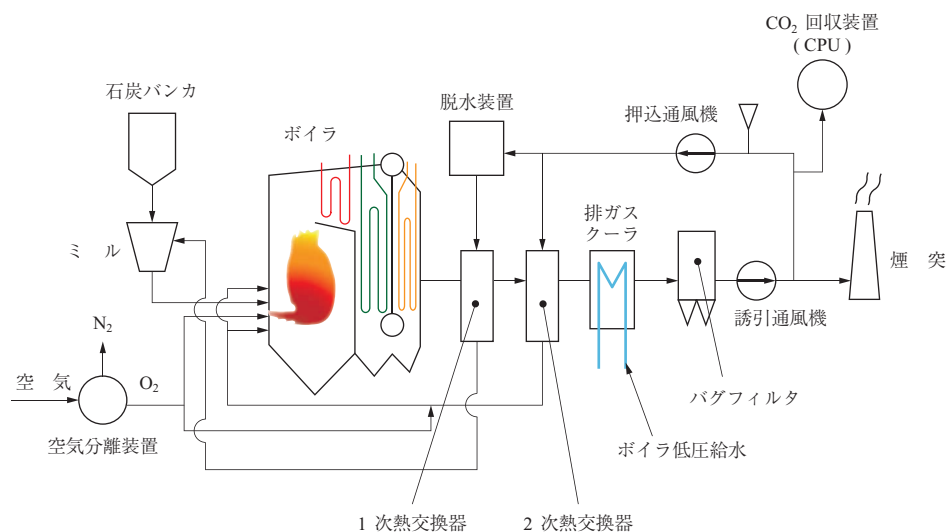
3.3 酸素燃焼運転状況

酸素燃焼運転は 2012 年 3 月から試運転を開始し、燃焼モード切替、トリップ時対応などの安全運転をまず確認した後、順調に運転が継続されている。

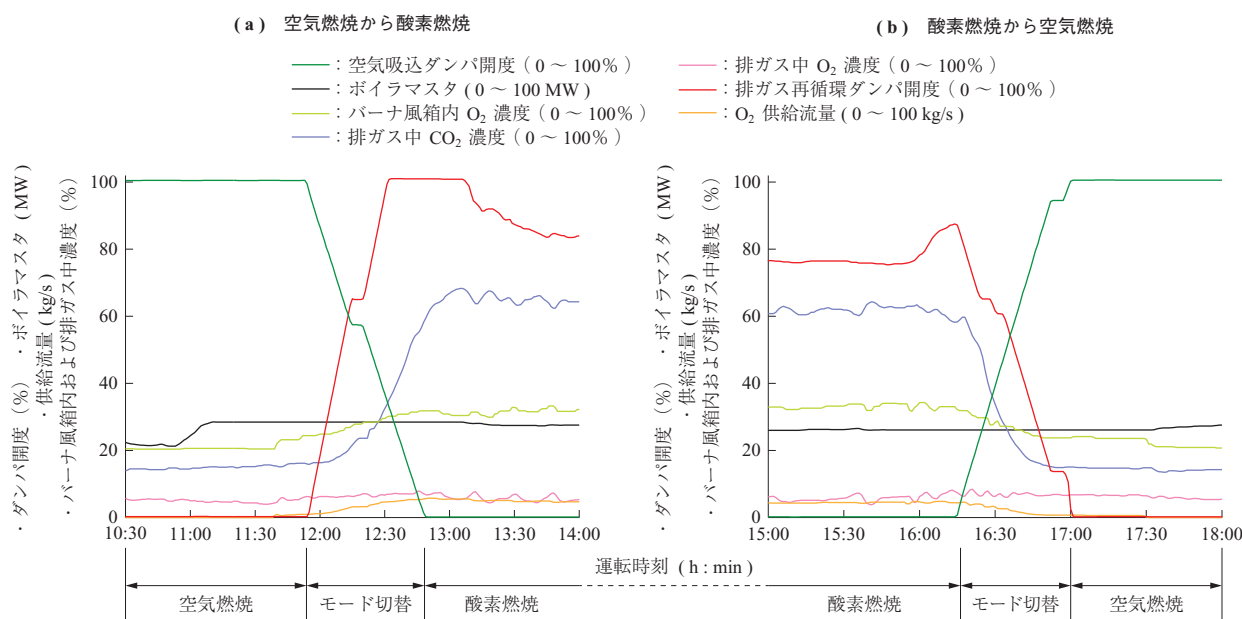
3.3.1 酸素燃焼発電プラント運転・安全性

(1) 燃焼モード切替

本プラントは起動時空気燃焼で起動し、ある一定負荷に到達後、酸素燃焼に切り替えられる。第 4 図に燃焼（空気燃焼 ⇒ 酸素燃焼 ⇒ 空気燃焼）モード切替運転時の挙動を示す。燃焼モード切替については、切替時間の短縮など今後のさらなる改善の余地



第 3 図 カライド A 発電所 4 号機 酸素燃焼プロセスフロー
Fig. 3 Callide-A oxyfuel process flow



第 4 図 燃焼モード切替運転時の挙動
 Fig. 4 Trend data during combustion mode transition

があるが、安定して実施できている。

(2) 燃料緊急遮断など安全停止

酸素燃焼発電プラントの運転は初の試みであり、緊急時に安全に停止することが必須であり、CPU を含めて試運転を通じ安全停止することを確認した。

(3) 空気および酸素燃焼の 30 MWe 運転比較

カライド A の酸素燃焼化改造の設計段階において、空気燃焼および酸素燃焼で、定格の 30 MWe 運転を実現することになっていた。運転の結果、両条件で定格負荷での運転を実現しているとともに、酸素燃焼時の火炉収熱割合は、ほぼ空気燃焼時の火炉収熱と同割合であることを確認した。この結果から既存の空気燃焼ボイラ火炉を改造することなく、酸素燃焼運転ができることを実証した。

また、酸素燃焼時は排ガスの熱をボイラ低圧給水で回収していることから、蒸気タービン抽気量を減らせ、結果として発電端プラント効率が空気燃焼に比べ、向上していることも確認できた。

3.3.2 排ガス特性

(1) CO₂ の排出挙動

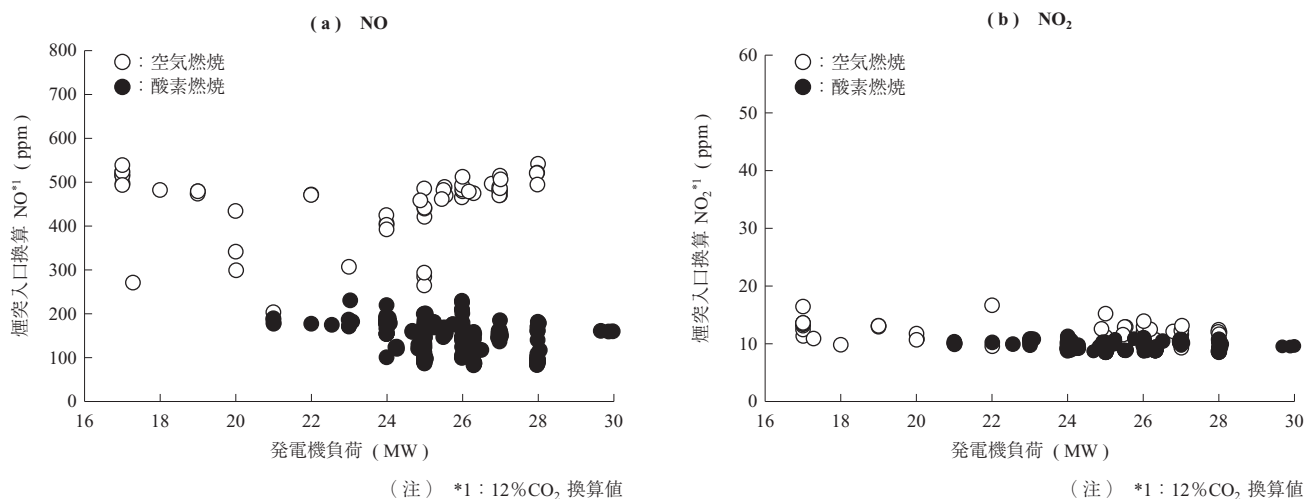
カライド A は 1960 年代に建設されたものであり、各所からのプロセス内への空気吸い込みが避けられない。そこで、カライド A での空気燃焼試験結果から、酸素燃焼での目標を CO₂ 濃度 55 wet% (約 70 dry% : CPU 入口) と設定した。

実証運転の結果、30 MWe 定格負荷において本目標を達成することを確認した。そして、CPU では、最終的に純度 99.9% 以上の CO₂ を製造していることを確認した。

(2) NO および NO₂ 排出挙動

ボイラプロセス内においては、当社 (相生工場) パイロットプラントでの試験結果⁽²⁾ から、NO_x 排出量が約 1/3 に減ることが知られている。第 5 図に NO_x 濃度 (12% CO₂ 換算) を示す。本図内では排出量を空気燃焼と酸素燃焼で比較するため、CO₂ 濃度を 12% に換算した場合の NO_x 濃度で示す。カライド A での NO_x 排出特性を確認した結果、当社 (相生工場) パイロットプラントでの試験結果と同様に、空気燃焼に比べ約 1/3 の換算 NO 濃度となることが確認された。一方、NO₂ については空気燃焼と同等の換算 NO₂ 濃度になっており、生成後の NO₂ は還元されていないことが確認された。

一方、CPU 内に流れる NO_x は、圧縮冷却の過程で、NO が NO₂ に酸化され、大部分はドレン水と一緒に回収されることが確認できている。また、圧縮後に残った NO₂ においても、圧縮下でのスクラバ (洗浄塔) および分離塔を通じて、製造 CO₂ 内の NO_x 濃度は ppm オーダとなっている。



第 5 図 NO_x 濃度
Fig. 5 NO_x concentration at stack inlet

(3) SO₂ および SO₃ の排出挙動

煙突入口（ボイラプロセス出口）における SO₂ 濃度（12% CO₂ 換算）、ボイラプロセス内の各所における SO₃ 濃度、SO₃ 挙動計測結果を第 6 図に示す。

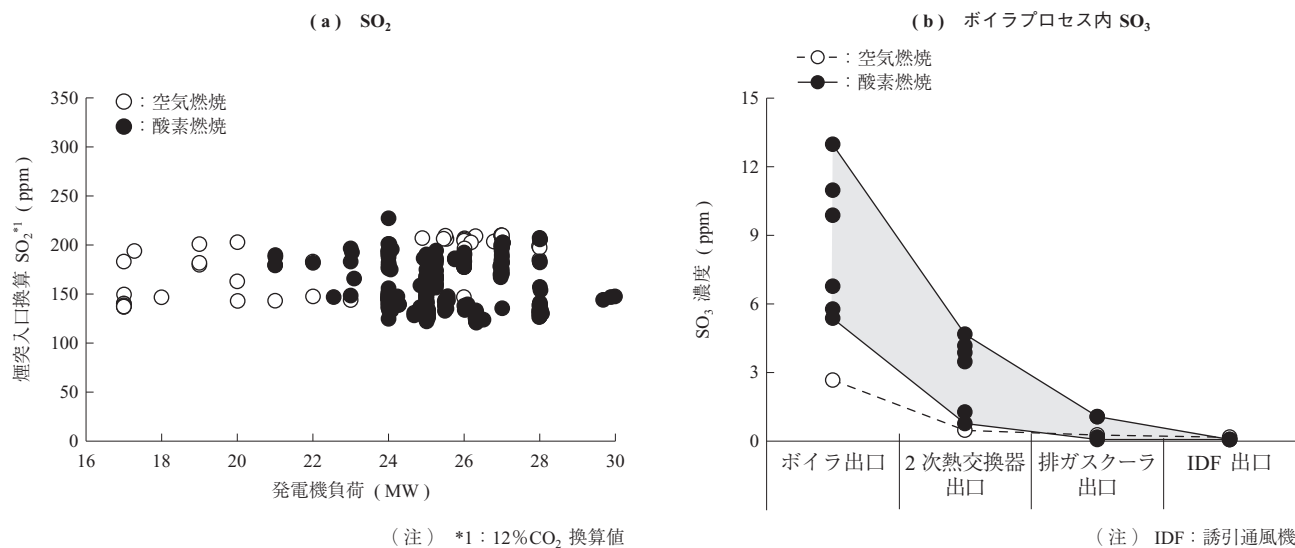
換算 SO₂ 濃度は、空気燃焼と酸素燃焼で大きな違いはない。SO₃ 濃度は酸素燃焼時ボイラ出口では空気燃焼時より高いものの、後流に進むに従い低下傾向にあり、誘引通風機出口では 1 ppm 以下となっており、ほぼ空気燃焼と同レベルとなっていることが確認できた。これは排ガス中 SO₃ が石炭灰中アルカリ分へ吸着されたものと考えられる。

最終的に SO₂ は CPU 内のガス圧縮機前に設置されている脱硫装置で、ほぼ完全に除去される。

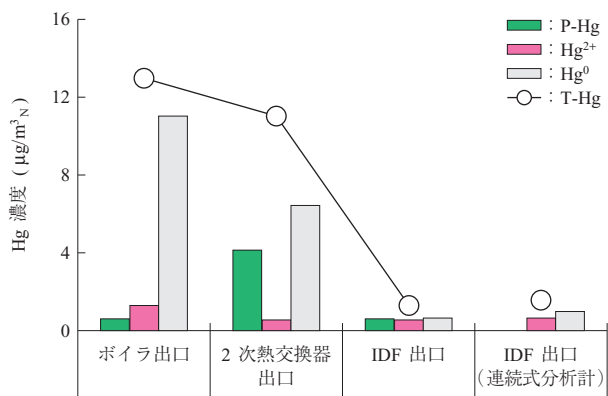
(4) 水銀の挙動

ボイラプロセス内の各所において、SO₃ および形態別水銀の計測を行った。第 7 図にボイラプロセス内水銀 (Hg) 挙動を示す。本図ではオンタリオハイドロ法で計測したものに加え、誘引通風機出口では連続式水銀分析計でも計測した値を示す。

水銀は酸素燃焼時ボイラ出口では、0 価水銀 (Hg⁰) が多く濃度が高いものの、後流に進むに従い、ガス温度の低下とともに低下傾向にあり、誘引通風機出口では全水銀 (T-Hg) が約 1 μg/m³_N となる。灰中の未燃炭素に吸着されたものと考えられる。また、CPU に流れた水銀は、圧縮・冷却の過程でほぼ完全にドレン中に除去されることが確認されている。



第 6 図 SO₂ 濃度と SO₃ 挙動
Fig. 6 SO₂ concentration at stack inlet & SO₃ behavior in boiler process



第7図 ボイラプロセス内水銀 (Hg) 挙動
Fig. 7 Hg behavior in boiler process

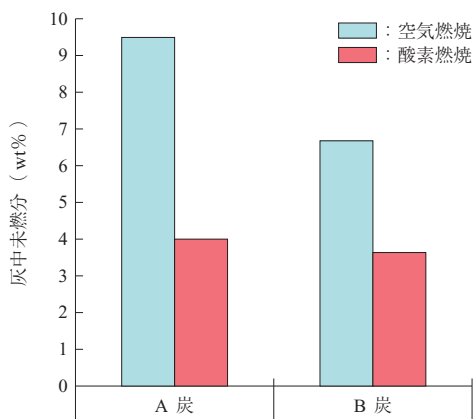
(5) 灰中未燃分

ボイラプロセス内にある計 13 個のホッパから灰をサンプルし、分析を行った。第8図に石炭ごとの灰中未燃分の質量平均した値を示す。その結果、当社（相生工場）パイロットプラントでの試験結果⁽²⁾と同様、酸素燃焼での灰中未燃分は空気燃焼に比べほぼ半減することが確認できた。

3.3.3 運用性の向上

(1) ボイラ入口 O₂ 濃度変化時の特性確認

酸素燃焼では再循環ガス流量を変化することで、



第8図 灰中未燃分
Fig. 8 Carbon residue in ash

ボイラ入口 O₂ 濃度が変わり、結果として火炎温度およびボイラ特性が変化することが知られている。

カライド A において、ボイラ入口 O₂ 濃度を 24 ~ 30% の範囲で変化することによって、火炎形状の変化およびボイラ出口蒸気温度調整用スプレ流量の変化が予想どおり確認できた。そのときの火炎の様子を第9図に示す。本図からはボイラ入口 O₂ 濃度が増加するに連れ、火炎がバーナスロート部に近づいてきているのが確認できる。

(2) 最低負荷運用の拡大

当初の設計段階において、カライド A の低負荷での運用について火炎保持およびミル周り熱バランスの懸念があったことから、24 MWe をプラント運用の下限としていた。しかし、実証運転を進めていくなかで、これらの懸念が薄れてきたのと商用機の運用を考慮すれば、より低負荷への運転範囲拡大は不可避であることから、最低負荷確認試験を実施した。

その結果、酸素燃焼において 15 MWe (50% 負荷) の安定運転を確認することができ、運用範囲が大きく改善された。

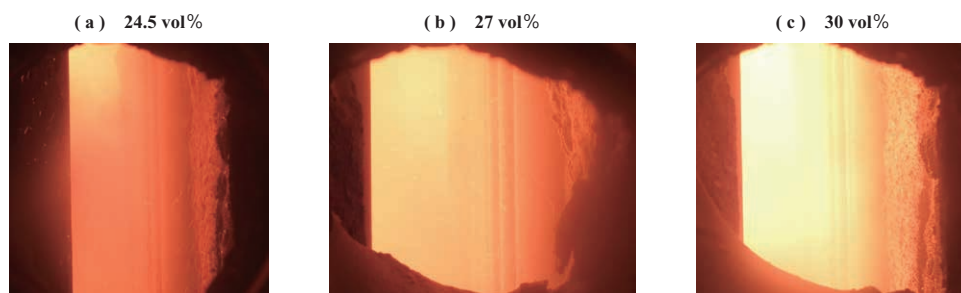
3.4 今後の試験予定

カライド A は 2015 年 3 月初頭までの運転を予定しており、継続して商用機に必要な運転データの取得を行っているところである。以下に現在取り組んでいる主な試験項目を示す。

- (1) 炭種変化による特性確認
- (2) バーナ火炎への直接酸素供給による効果確認
- (3) 燃焼モード切替の最適化
- (4) 機器耐久性確認およびボイラ管材の酸素燃焼雰囲気下曝露試験

4. 500 MWe 酸素燃焼発電プラントの実現可能性検討

オーストラリア・クイーンズランド州のプラントを対象



第9図 ボイラ入口 O₂ 濃度変化時の火炎の様子
Fig. 9 Oxyfuel flame at various boiler inlet O₂ concentrations

に、本酸素燃焼を適用した場合の性能および経済性検討を実施した⁽³⁾。本検討は発電所内に新設の酸素燃焼発電プラントを建設し、CO₂を140 km 搬送した後、貯留することを想定したものである。

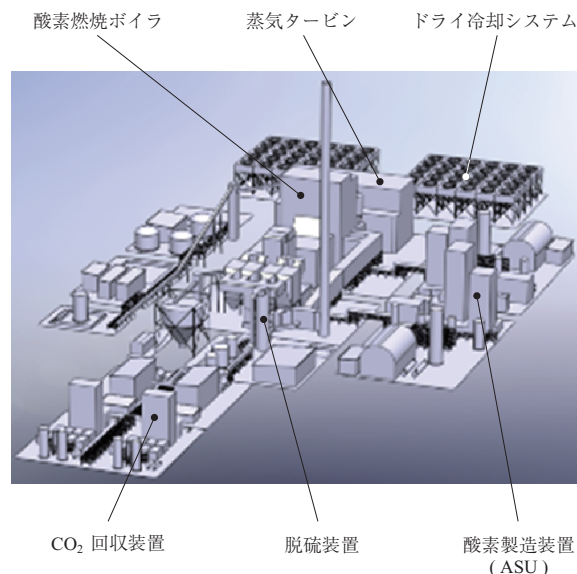
第2表にCO₂回収型500 MWe 酸素燃焼発電プラントの検討条件を示す。出力500 MWeを空気燃焼および酸素燃焼の両方で維持すること、ボイラは最新鋭超々臨界圧プラントで使用されている600℃級蒸気条件、また、内陸部であるため発電用タービンなどに用いる冷却水の冷却にクローズ式のドライ冷却システムを採用している。

酸素製造装置は現状最大級の容量である200 t/hのものを2基、CPUも270 t/hのものを2基とし、回収率98%以上を条件とした。また、ボイラでの排煙処理システムは、カライド A プロセスと同様、脱硝および脱硫装置は設置しない。その結果、想定したエリア内にプラントが配置された。第10図に500 MWe 酸素燃焼発電プラントの全体図を示す。

第3表に本プラントの性能検討結果を示す。酸素燃焼ではボイラプロセスでの熱損失が少なくなるのと、ボイラ給水による熱回収によって、空気燃焼に比べ発電端での効率は上昇し、燃料消費量は減ることになる。

また、CO₂排出量は20 g/kW・hとなる。酸素製造装置およびCO₂回収の動力が必要となり、送電端での出力は345 MWe、効率は31.5%まで低下する結果となった。

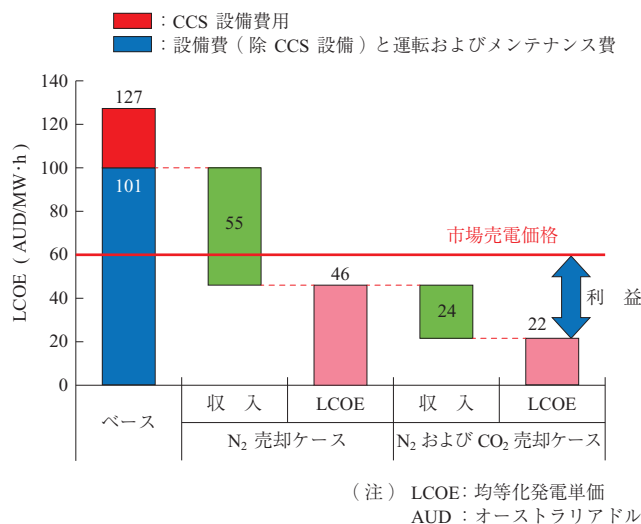
このときの経済性検討結果を第11図に示す。AUD127/MW・hが発電設備およびCCSを含めた設備の発電単価となる。このとき、もしCCS設備に対し補助金などを受け



第10図 500 MWe 酸素燃焼発電プラント
Fig. 10 500 MWe oxyfuel power plant

第3表 500 MWe 酸素燃焼発電プラント性能
Table 3 Plant performance of 500 MWe oxyfuel power plant

項 目	仕 様
燃 焼 状 態	酸素燃焼 空気燃焼
発電端／送電端出力 (MW)	500/345 500/473
発電端／送電端効率 (%)	45.7/31.5 42.1/39.9
所 内 必 要 動 力 (MW)	155 27
正 味 CO ₂ 排 出 量 (g/kW・h)	20 740
石 炭 消 費 量 (t/h)	196 212



第11図 経済性検討結果
Fig. 11 Cost evaluation

た場合を想定すると、AUD101/MW・hまで減ぜられる。またここで、酸素燃焼プロセスではCO₂の売却に加え、N₂の売却が考えられ、単純にほぼ全量とともにAUD25/tで売却・利用可能であれば、発電単価はAUD22/MW・hまで減らせ、市場売電価格より安くなり経済的に成立する。

第2表 500 MWe 酸素燃焼発電プラント検討条件
Table 2 Study condition of 500 MWe oxyfuel power plant

項 目	内 容
サ イ ト	オーストラリア・クイーンズランド州
発 電 プ ラ ン ト	発 電 端 出 力 500 MWe (空気燃焼, 酸素燃焼とも) 石 炭 瀝青炭 水 冷 却 方 式 クローズ式ドライ冷却方式 ボイラ蒸気条件 主蒸気圧力: 25.0 MPa 主蒸気温度: 600℃級
酸素製造装置	形 式 深冷分離方式 容 量 200 t/h × 2 基 製 造 O ₂ 純 度 96.5%以上
CO ₂ 回収装置	容 量 270 t/h × 2 基 入口主ガス成分 H ₂ O 8.1 vol% / CO ₂ 72.8 vol% 製 造 CO ₂ 液体 CO ₂ (16 MPa (abs) / 45℃) 純 度 99.9 vol%以上 CO ₂ 回 収 率 98%以上
貯 留 サ イ ト	位 置 発電所から 140 km を想定

以上のように、酸素燃焼プロセスでは CCS 設備を付加することで、高価となった発電単価を CO₂ に加え N₂ を売却することによって、相殺もしくはメリットに代えて建設できる可能性があることを示している。

5. 結 言

本稿では、カライド酸素燃焼プロジェクトの実証運転結果概要と 500 MWe 実現可能性検討結果を紹介した。本技術について、1989 年に酸素燃焼に関わる研究開発を開始してから約 25 年を経て、現在、酸素燃焼発電プラント (30 MWe) の実証運転完了が間近に控え、商用化 (200 MWe 以上) に向けた検討を開始しているところである。

発電方式は時代に合わせ、常に最新鋭のものを目指し発展してきたものであるが、近い将来石炭火力から CO₂ 排出の弱みをなくすことで、継続的な主燃料として使用され続けることであろう。そのなかで本酸素燃焼システムのメリットを創出し、経済的に成立させ早期商用化を目指していく。

— 謝 辞 —

本稿で述べたカライド A での実証および調査検討内容は、経済産業省資源エネルギー庁、オーストラリア連邦政府およびクイーンズランド州政府、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、カライド酸素燃焼プロジェクトメンバである CS Energy 社、電源開発株式会社および三井物産株式会社および一般財団法人石炭エネルギーセンターをはじめとする日本、オーストラリアの多数の関係者の協力を得て実施したものである。ここに記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) Summary for Policymakers : IPCC Fifth Assessment Synthesis Report IPCC (2014)
- (2) 山田敏彦, 石井 徹, 高藤 誠, 磯 良行: 酸素燃焼技術を用いた CO₂ 回収型石炭火力発電ボイラの実証に向けた検討 IHI 技報 第 49 巻 第 4 号 2009 年 12 月 pp.192 - 199
- (3) NEDO 成果報告書: 豪州における高効率石炭火力 CCS プロジェクトの案件発掘調査 2013 年 7 月

お知らせ

・本文中の商品名やソフトウェア名は一般に各社の商標または登録商標です。

I H I 技 報 第 55 巻 第 1 号 (通巻 第 301 号) 平成 27 年 2 月 20 日 印刷 平成 27 年 3 月 1 日 発行 年 4 回発行 定価 1 部 350 円 (本体 324 円) [無断転載を禁じます。]	発行責任者 宮 原 薫 発 行 所 株 式 会 社 I H I 技術開発本部管理部 〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1 番地 電 話 (045) (759) 2 2 1 8 http://www.ihl.co.jp/ E-mail : TY9776@ihl.co.jp 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) 8 4 2 2 F A X (03) (6204) 8 8 7 7
--	---

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
首都圏支社	〒231-0015 神奈川県横浜市中区尾上町1-8(関内新井ビル)	電話(045)664-4501 FAX(045)664-4590
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	〒745-0037 山口県周南市栄町2-31(徳山興産ビル)	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
砂町工場	〒136-0075 東京都江東区新砂2-3-43	電話(03)3648-1511 FAX(03)3644-1804
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
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
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
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

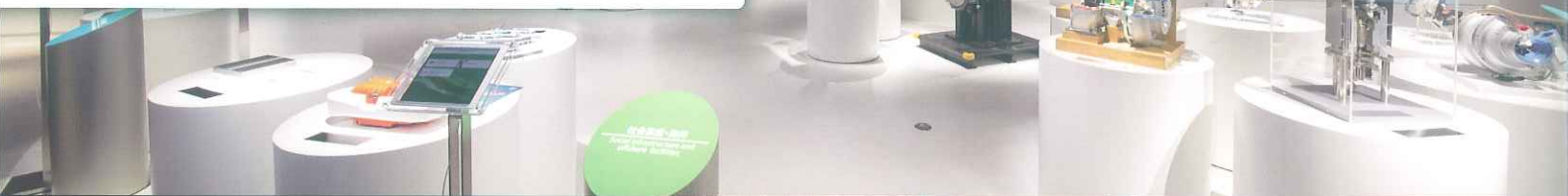
海外事務所・海外支社

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



つなぐラボ
IHI Innovation Centre

2014年10月28日OPEN



共想から共創へ

IHIグループは、お客さまと共に成長していくことを目指しています。
IHIつなぐラボは、技術と技術、人と人、想いと想いをつないで
お客さまと新しい価値を創出する共創の場です。
IHIをもっと知ってください。そして一緒に未来を創りましょう。

IHI
Realize your dreams

株式会社IHI IHIつなぐラボ 〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1番地 横浜エンジニアリングセンター 2号館1F www.ihl.co.jp/itl/

This document is provided by JAXA.