特集:水素エネルギー利用社会への歩み、ガスタービンと燃料電池の最新情報

「水素エネルギー利用社会への歩み, ガスタービンと燃料電池の最新情報」に寄せて

栗山 信宏^{*1} KURIYAMA Nobuhiro

卷

頭

言

平成7年の環境白書に古代からの文明の盛衰と環境や 資源との関係がまとめられている⁽¹⁾。古代文明の衰退は, 燃料や家や船などの生活材としての森林の減少が一因と なっているとのことである。また,西欧文明においても 14世紀から15世紀に人口拡大と寒冷化に伴う森林減少に よって危機を迎えたが,新大陸への進出と石炭の利用に よって衰退を免れるばかりか,西欧近代文明への発展に つながった。即ち,石炭をエネルギー源とした18世紀後 半からの産業革命である。

さらに、20世紀に目を向けると、石油が活用されるようになって、石油化学産業がプラスチック等の生活材を 生み出し、石油系燃料による電力供給や自動車・船・飛 行機が産業と生活の利便性を飛躍的に発展させた。20世 紀後半からは、天然ガスも燃料として多量に消費され、 原子力発電とも併せて地球全体に広がった現代文明を支 えている。

古代から現代までの燃料の単位質量あたりの発熱量を 縦軸にして、その大量採掘が始まったときから今後可採 年数⁽²⁾先の未来まで、いわばその資源の「利用期間」で 図1に表してみた。非常に大雑把な整理ではあるが、薪 (森林資源)から石炭、石炭から石油、石油から天然ガ スとより質量エネルギー密度の高い燃料が使われ始め た時期が、文明が飛躍的に発展した時期とほぼ一致して いる。我々の豊かな生活は、高いエネルギー密度の化石



Fig. 1 Gravimetric energy densities of fuels and their "Periods as key fuels"

原稿受付 2016年5月23日

*1 (国研) 産業技術総合研究所 電池技術研究部門 〒563-8577 池田市緑丘1-8-31 燃料を利用することによって実現されてきたことがうか がわれる。一方で,数十年から数百年のうちには化石燃 料が枯渇することが懸念されている。資源開発の進展に よって可採年数は延びているが,次第に採掘に高度な技 術が必要とされるようになり,日本のような資源小国は, 枯渇の前の段階で資源価格の上昇と変動に翻弄されるこ とは避けられないのではないかと考えられる。

本号では、水素エネルギー技術及び燃料電池技術が特 集されているが、水素を図1に書き入れようとすると化 石燃料の2倍以上の質量エネルギー密度(121MJ/kg) であるため枠外に出てしまう。乱暴な類推をすれば、飛 躍的な文明変化を引き起こしそうなほどの違いである。

当然これだけで水素が未来のエネルギーと確信するこ とは出来ないし、そもそも水素は他の一次エネルギー源 から製造される二次エネルギーである。しかし、見方を 変えれば再生可能エネルギーを含めた多種多様な一次エ ネルギー源をまとめるエネルギーキャリアの性格を持っ ているということである。また、効率の問題はあるもの の、電力と水素との間の相互変換が容易であることも他 の燃料にはない特質であり、再生可能エネルギーの一時 貯蔵といった未来の可能性を期待させる。

質量エネルギー密度が高くても、天然ガスは自動車の 主たる燃料とはなっていない。これは、天然ガスが、常 温で気体であるために可搬性に劣ることが理由である。 水素も常温で気体であり、同様な使い勝手の悪さを抱え ている。水素の製造・利用においても、機器のコスト高 の問題や水素脆化は常に指摘されている。しかし、水素 のエネルギーキャリアとしての特質を考えると、化石燃 料に振り回されず社会を発展させるために、上記の課題 を少しでも解決して上手に水素を利用し、エネルギー源 の選択肢を広げることがこれからの人類の発展ために必 要ではないだろうか。

引用文献

- 環境省「平成7年度版環境白書」(1995) 第1章
 https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/hakusyo. php3?kid=207>(参照2016年6月10日).
- (2) 資源エネルギー庁「平成27年度エネルギーに関する年 次報告(2015)第2部第2章<http://www.enecho.meti. go.jp/about/whitepaper/2015html/>(参照2016年6月 10日).

-1-

特集:水素エネルギー利用社会への歩み、ガスタービンと燃料電池の最新情報

日本における水素エネルギー関連技術の歩みと現状

笹倉 正晴^{*1} SASAKURA Masaharu 福田 健三^{*1} FUKUDA Kenzo

論説◆解説

キーワード:水素/酸素燃焼タービン,水素社会,WE-NET, IAE 構想研究, CO₂フリー水素供給チェーン Hydrogen/Oxygen Combustion Turbine, Hydrogen Society, WE-NET, IAE Concept Study, CO₂-free Hydrogen Supply Chain

はじめに-我が国の水素エネルギー技術開発の歴史 概観

水素エネルギー技術については、歴史的に何回かの浮 き沈みがあった。将来のエネルギーシステムにかかわる 技術は、研究開発から実用化までのリードタイムが長期 にわたるため、国による戦略的な技術開発支援が重要で ある。水素エネルギー技術も例外ではなく、我が国が本 格的な技術開発に取り組んだ最初は、1973年のオイル ショックを契機に開始された通商産業省(当時)のサン シャイン計画(1974~1992年)においてであった。我 が国の水素エネルギー関連技術開発の流れ(概要)を図 1に示す。

○第1次高揚期(1973~1980年代中期)

サンシャイン計画の一テーマとして取り上げられた時 から,我が国の水素エネルギー技術開発の第1次高揚期 が始まった。サンシャイン計画では,高温ガス炉の熱を 利用する熱化学水素製造技術の開発が中核であった。製 造技術のほかには,水素吸蔵合金の開発,金属材料の水 素脆性の研究,水素エンジン自動車の開発などが取り上 げられた。熱化学水素製造技術の開発は、ほぼ同じ時期 に世界的な盛り上がりを見せ、世界全体で150を超える 熱化学サイクルが提案され、基礎研究が行われた。しか し、熱化学水素製造技術は、技術としての成立性の点で さまざまの困難に直面し、ほぼ10年で世界的に潮が引く かのように衰退していってしまった。現在まで研究開発 が継続されているのは、原子力研究開発機構(現在)の IS法のみである。

○ 第1次停滞期(1980年代中期~1993年)

1980年代中ごろになると、当初大きな危機感のもとに 提唱された石油代替エネルギー開発の理念も、北海油田 の稼働開始などに伴う石油事情の好転も手伝って、当初 の危機感は大幅に減衰した。サンシャイン計画の中の水 素エネルギー技術開発も、地道な基礎研究は継続された ものの、全体としては停滞に近い状況に陥ってしまった。 ただし、燃料電池の開発は、1980年代初期からサンシャ イン計画とは別のムーンライト計画(省エネルギー技術 開発プログラム)の枠組みの中で取り上げられ、開発が 進んでいた。





原稿受付 2016年4月26日

 *1 (一財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 〒105-0003 港区西新橋1-14-2

223

我が国の水素エネルギー技術開発が停滞状況にある中 で、世界的には驚くべき新しい構想で水素エネルギーの 開発が始められていた。その代表的プログラムが、EC (当時)とカナダ・ケベック州電力公社との共同研究 の形で開始された、EQHHPP(Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project)(1986~1998年)であった⁽¹⁾。 これはカナダ・ケベック州の水力発電電力を水素に変換 して、北極海航路を通って海上輸送し、ヨーロッパ各国 で利用するという構想であった。ドイツでは、水素の用 途として燃料電池自動車(FCV: Fuel Cell Vehicle)が 注目を集め、ダイムラー社を筆頭にFCVの開発が精力 的に展開された。

EQHHPPは,水素をエネルギーキャリヤーとする再 生可能エネルギー供給・利用のグローバルシステムの実 現を目指した世界初の試みであったが,資金不足のため, カナダ・ヨーロッパ間の水素輸送を実証することなく, 1998年に終了した。

我が国では、福田らが、海外再生可能エネルギーを水 素の形で我が国に輸送する長距離エネルギー輸送構想⁽²⁾ について、サンシャイン計画室の支援のもとで、1989 ~1992年にわたり調査研究を実施して、来るべきWE-NETプロジェクトの基本構想をまとめた。同構想にお ける水素利用技術は、未来の大規模発電技術としての水 素/酸素燃焼タービンを取り入れた。

○第2次高揚期(1993~2000年代前期)

地球温暖化問題の顕在化などの社会的諸状況の変化に 対応して,1993年通商産業省(当時)はサンシャイン計 画とムーンライト計画を統合してニューサンシャイン計 画を立ち上げた。このニューサンシャイン計画の中核と なったのがWE-NETプロジェクトであった。同プロジェ クトでは、カナダ政府と連携して、カナダの水力発電電 力を水素に変換して日本に輸送し、日本では水素を燃料 とする水素/酸素燃焼ターピン発電に利用するというシ ステムモデルを作り、その実現に必要な要素技術を開発 することとした。システム実証は2020年ごろと想定した。 また、水素の用途として、水素/酸素燃焼タービン発電 のほかに、FCVや家庭用定置型燃料電池(のちに開発 メーカー共通の名称としてエネファームと称されるよう になった)も視野に入れた。

1988年に第1回IPCCが開催され,また1997年には COP3(京都)で京都議定書が採択されるなど,地球温 暖化問題への取り組みが強化されてきた社会情勢を背景 に,WE-NETへの期待は大きくなり,海外でも非常に 高い評価を得た。

2000年を迎えるころになると, 燃料電池関連技術の進 展が目覚ましく, FCVやエネファームの実用化への期 待が急速に高まった。ここで国の施策は一挙に, FCV とエネファームの早期実用化の方向にシフトして行った。

資源エネルギー庁長官の諮問機関であった燃料電池実 用化戦略研究会が2004年に発表した燃料電池関連技術の 実用化シナリオでは、2005年からFCV市場導入が始ま り、2005年にはFCV5万台、水素ステーション500か所、 2020年にはFCV500万台、水素ステーション3,500か所と いう目標が示された。

当時の小泉首相が, 官邸に納入されたFCVを前に, FCVの3年以内実用化を宣言したのも, 期待の高まり に拍車をかけたと思われる。ところが, 期待は間もなく 裏切られ, FCVは実証走行には成功したものの, 商用 化のためには, 解決すべき課題が多く残されていて, そ う簡単には商用化はできないことが明らかになった。燃 料電池関連技術実用化重視の方針の下で, WE-NETは 厳しい評価にさらされた。水素/酸素燃焼タービンの開 発は中止の指示を受け, 1998年度のWE-NET第 I 期計 画終了(1998年度)とともに研究開発は中断させられた。

WE-NET第Ⅱ期(1999~2002年)では、水素ステー ション開発など、FCV実用化サポートに力点を置いた 研究開発を実施し、水素ステーション実証研究では、そ の後のステーション設計の基礎となる成果を収めた。し かし、水素ステーション開発での草分け的成果とは裏腹 に、WE-NETが提示したグローバルエネルギーシステ ム構築のための努力は、2002年度でのWE-NET中止の 政策判断により、むなしく宙に浮く状態となってしまっ た。これ以降、水素供給チェーン構想に基づく研究開発 はしばらく鳴りを潜める結果となった。

○第2次停滞期(2002~2014年ごろ)

この時期の水素供給問題は、どちらかといえば、 FCV用の燃料供給問題に特化された感があった。一方、 FCV, エネファームの研究開発は民間中心に着実に進 展した。燃料電池関連技術は着実な進展を示した一方で、 水素供給チェーン構築などの水素インフラ関連の技術開 発はほとんど冬眠状態という、二極分化状態の時期で あったと言えるであろう。

○第3次高揚期(2014年ごろ~現在)

2002 ~ 2013年に及ぶFCV 実証試験及び2005 ~ 2009 年に及ぶエネファームの実証試験を経て、これら燃料電 池関連技術は2014年末トヨタ自動車㈱による初の商用車 発売が実現し、エネファームは2016年1月末時点で約15 万台が導入されており、いよいよ普及段階に入った。

一方で、炭酸ガス排出抑制の要請が一段と強まる情勢 を受けて、再生可能エネルギー導入の動きも活発になっ てきた時期である。とりわけ、東日本大震災による福島 第一原発事故以降、再生可能エネルギー導入拡大は国民 の広範の支持を得るようになった。

水素エネルギーは,再生可能エネルギーを利用するに 際して最適のエネルギーキャリヤーの一つであることは 広く認められているところから,再生可能エネルギー導 入拡大の社会的要請と軌を一にして水素エネルギー導入 への期待が再び大きくなった。

政府は2014年4月策定のエネルギー基本計画で,水素 社会実現の方向を明確に打ち出し,これを受けて資源エ ネルギー庁は、2014年6月に水素・燃料電池戦略ロード マップを公表した。このロードマップによれば、短期的 にはFCV,エネファームおよび水素ステーションの普 及拡大を重視しつつ、中・長期的にはCO₂フリー水素供 給チェーンの構築と水素発電の実用化を目指すことを国 の戦略としている。

WE-NETプロジェクトで手掛けながらも、途中で中 断の憂き目を見た水素/酸素燃焼タービン発電技術が 再び注目の的になりつつある。前掲第2次停滞期の間、 WE-NETは失敗だったとの評価が蔓延したが、今日の 状況を見ると、むしろWE-NET理念は脈々と受け継が れていると言えよう。WE-NET理念を一段と精緻化し て、来るべき水素社会の姿を鮮明にしてゆくことが求め られている。

2. WE-NETとはなんであったか

2.1 WE-NETの基本的コンセプト

WE-NETの概念図を図2に示す。WE-NETの基本的 コンセプトは、世界各地に賦存する再生可能エネルギー を利用して電気分解により水から水素を製造し、製造し た水素を輸送可能な媒体に変換してエネルギー消費地に 輸送し利用する、という世界的規模のネットワーク構築 を目指すことであった。

実際の研究計画では、カナダの余剰水力発電電力を液 体水素の形で我が国に輸送し、水素/酸素燃焼タービン 発電に利用するシステムをモデルとして中核的要素技術 の開発とシステム設計等を総合的に推進した。カナダ連 邦政府・天然資源省も積極的な協力を惜しまず、水力発 電サイトとして、ケベック州のほかサスカチュワン州の 適地を推奨した。



Fig. 2 Concept of WE-NET

昨今のCO₂フリー水素供給チェーン構想では、川崎重 工業㈱が豪州褐炭などの未利用化石燃料資源を現地CCS と組み合わせて水素源として利用するコンセプトも加 わって、WE-NET構想が今日的広がりを見せている。

2.2 WE-NETの年次展開(当初計画)

WE-NETの年次展開(当初計画)を図3に示す。 2020年システム実証(または実用化)を目的とした長 期構想であったが,実際には,2003年度で終了予定の第

1993	1998	1999	(予算約100億円)	2003	2004	(2020)
第Ⅰ期			第Ⅱ期		第Ⅲ期	以降

Fig. 3 Time-schedule of WE-NET (original plan)

Ⅱ期計画を1年繰り上げて2002年度で終了の措置が取られた。WE-NETは2020年度システム実証を目指して、 第Ⅲ期以降の計画も検討していたところだったので、こ の中断措置は、関係企業を始め多方面に大きなマイナ ス・インパクトを与えた。ただし、2015年2月のNEDO フォーラム資料⁽³⁾や、2016年3月に改訂された資源エネ ルギー庁の水素・燃料電池戦略ロードマップ等で展開 されている戦略は、WE-NET構想の発展的継承と理解 できるところも多いことから、FCVやエネファームの 実用化促進に力点を置く政府方針の下で、WE-NETは 2002年度でひとまず中断したと理解するのが妥当であろ う。

2.3 WE-NETの技術・研究開発項目

WE-NETの技術開発項目を図4に,WE-NETの第Ⅰ 期研究開発計画(1993~1998年),第Ⅱ期研究開発計画 (1999~2002年)を各々,表1,表2に示す。

筆者らが所属する(一財)エネルギー総合工学研究所 は、第Ⅰ期、第Ⅱ期を通して研究開発全体の統括の役割 を担った。

表1と表2を比べて明らかなように, 第Ⅱ期では FCVとエネファーム実用化重視の国の方針に従い, FCV関係の課題が設定された。このうち, 顕著な成果



Fig. 4 Technology development items of WE-NET

Table 1 R&D scheme of WE-NET phase I

TASK	研究開発項目	内容
1	全体システム	各種水素輸送媒体での全体システム概念設計を
		行い、最適輸送媒体を選定する。
2	国際協力	国際的情報交換、国際協力の方策検討
3	安全対策	水素の安全性に関する調査研究
4	水素製造技術	PEM 水電解技術開発:セル効率 90%以上
5	輸送·貯蔵技術	高効率水素液化システムの検討
		液体水素輸送タンカー、液体水素タンク開発
		水素吸蔵合金の開発:100℃以下で 3wt%以上
6	低温材料技術	液体水素温度における材料特性研究
7	水素利用技術	水素ディーゼル、純水素燃料電池の開発
8	水素タービン	水素燃焼タービン:タービン入口温度 1700℃、
		発電効率 60%(HHV)、66%(LHV)以上
9	革新的技術	水素製造、輸送・貯蔵、利用技術の調査研究

- 4 -

Table 2	R&D	scheme	of WE-	NET	phase I
(Re	d letter	s: FCV-	related	them	les)

-		
TASK	研究開発項目	内容
1	システム研究	各種水素源を利用するシステム評価
2	安全対策	水素の拡散・爆燃実験による安全性検証
3	国際協力	国際標準化活動、情報交換
4	動力発生	100kW 単筒水素ディーゼルエンジン開発
5	水素燃料タンク	自動車の燃料系システム要素研究
6	純水素燃料電池	30kW PEM 燃料電池システムの実証
7	水素ステーション	水素ステーションの開発、実証
8	水素製造技術	2,500cm ² 電極使用の積層電解スタック
9	輸送·貯蔵技術	水素製造、輸送・貯蔵、利用技術の調査
10	低温材料	溶接法と溶接材料の低温特性への影響
11	水素貯蔵材料	有効貯蔵量 3wt%以上の合金開発
12	革新的技術	水素関連の革新的技術の調査
		(磁気冷凍法水素液化技術の基礎研究など)

が30Nm³/hの水素供給能力を持つ水素ステーションの 実証であった。水素ステーションのタイプは、四国総研 構内で実施された固体高分子電解質水電解(PEM)型 オンサイトステーションと大阪ガス(株構内で実施された 都市ガス改質型オンサイトステーションであった。

WE-NETでの水素/酸素燃焼タービン開発の経 緯と到達点

水素の特徴を最高に発揮できる(理想的な)発電技術 は、水素/酸素燃焼タービンである。タービン作動媒体 がスチームであることから、ガスタービンとスチーム タービンを直結出来、さらに作動媒体であるスチームを 循環させるクローズドサイクルが可能となるので高効 率が期待できる。サーマルNOx生成がゼロなので材料 の耐熱性の限界までタービン入り口温度を高められる。 タービン入り口温度の目標1700℃に対応できる耐熱材料 の開発や、1700℃のスチームを安定に作り出すための水 素/酸素燃焼器の開発、タービン翼冷却技術の開発等多 くの革新的技術の研究開発が行なわれた。最適タービン サイクルは設計コンペにより選定されることとなり、4 方式が提案され、設計コンペの結果トッピング再生サイ クル(図5)が選定された。

トッピング再生サイクルの期待される性能は以下の通りであった。



Fig. 5 Topping extraction cycle

①出力	500 MW
②発電効率	61.8 % (HHV)
	68.5 % (LHV)
③タービン入口ガス温度	1700 °C
④タービン入口圧力	4.75 MPa

タービン翼用耐熱材料は次の5種類が候補となり,第 I期終了時点では、いずれも約5cmφ程度の試験片を 作成し、1700℃スチーム下での耐熱性評価の予備段階ま で到達したが、そこで中断の措置を受けた。

- ・単結晶(SC)超合金+繊維強化セラミックス(FRC)
 のハイブリッド冷却翼
- ・耐熱超合金冷却翼用遮熱コーティング(TBC)
- ・セラミック基複合材料(CMC/長繊維)
- ・セラミック系多重構造材料(CMC/表面部+中間部
 +芯部)
- ・C / C及び弱冷却部品用CMCの3次元織繊維複合 材料

4. 水素社会構築への展望

1項で触れたように、2013年後半ごろから国の主導で 本格的水素社会の実現を目指した戦略議論が活発となっ た。その一つの集約点が、2014年6月に策定され、2016 年3月に改訂された、水素・燃料電池戦略ロードマップ



Fig. 6 Strategic road map for hydrogen and fuel cells (revised in March 2016)⁽⁵⁾

である^{(4),(5)}。水素・燃料電池戦略ロードマップ(2016年 3月改訂)の要点を図6に示す。

2016年3月の改訂のポイントは、①家庭用燃料電池の 将来的な価格目標が明確化されたこと、②燃料電池自動 車の普及目標が設定されたこと、③水素ステーションの 整備目標が設定されたこと、④水素発電に関し、昨年度 とりまとめられた資源エネルギー庁の「水素発電検討 会」報告書を反映し、記載が具体化されたこと、⑤再生 可能エネルギー由来水素の利活用に関し、技術面・経済 面の具体的課題についてワーキンググループ立ち上げの 検討を行い、2016年度中に結論を得る旨が記載されたこ と、等である。このように、従来の技術開発であるエネ ファーム、FCV、水素ステーションに加え、海外から の大規模水素供給チェーン、発電事業用水素発電の本格 導入、そして最終的に、トータルでのCO₂フリー水素供 給チェーン等に関する展開が具体化されている。

5. 水素エネルギー実用化に向けた主な技術開発の 現状

5.1 大規模(CO₂フリー)水素供給チェーンの開発・ 実証

海外からの大規模(CO₂フリー)水素供給については, 有機ハイドライドによる供給チェーンと液化水素による 供給チェーンの開発・実証研究が進められている(図7)

川崎重工業(株)は、同社を主幹事とし、岩谷産業(株)、電 源開発(株) (Jパワー)、シェルジャパン(株)の体制で「技 術研究組合CO₂フリー水素サプライチェーン推進機構: HySTRA」を2016年2月に設立し、NEDO「未利用褐 炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事 業」の活動を本格化させている(図8)⁽⁶⁾。

HySTRAは、「褐炭ガス化技術」のパートと、「液





Fig. 8 Promotion organization for CO2-free hydrogen supply chains: $HySTRA^{(6)}$

化水素の長距離大量輸送技術」および「液化水素荷役 技術」の2つのパートで構成され、2020年度までに各 パートにおける技術実証と、商用化に向けた課題の抽 出を行うことを目的としている。褐炭ガス化で副生す るCO₂は、豪州政府とビクトリア州政府が推進している "CarbonNET" プロジェクトと連携して貯留の実証計画 が進められており、ビクトリア州ラトロブバレーの炭田 から約80kmの沿岸にある枯渇ガス田に移送・貯留され, 褐炭ガス化ガスはCO2フリー水素となる。液化水素関連 技術については、川崎重工業㈱は世界のフロントラン ナーであり、水素液化に関しては、同社播磨工場内に5 トン/日の実証設備を設置し、試験中である。液化水素 を海上輸送する専用タンカーの開発にも取り組んでいる。 まずは内航船規模の2500m³の液化水素を運べるパイオ ニア船(試験船)を2020年までに建造する計画で、すで に世界で初めて液化水素格納設備(タンク)の公的な基 本認証を取得している。将来的には、16万m³の専用タ ンカーの実用化を目標にしている。液化水素の貯蔵・陸 上輸送では、JAXA種子島宇宙センターにあるロケット 燃料用水素貯蔵タンクと、そこに水素を運ぶ専用コンテ ナの実績を有している(7)。

安倍総理大臣とターンブル豪州首相が、-特別な戦略



Fig. 7 Large-scale hydrogen supply chains by organic chemical hydride and liquefied hydrogen⁽⁵⁾

的パートナーシップの次なる歩み:アジア,太平洋,そ してその先へ-と題して,平成27年12月18日に共同声明 を出し,その中で,両首脳は,「水素社会」を実現する ための水素サプライチェーン事業等のプロジェクトへの 支持を表明している⁽⁸⁾。

5.2 水素燃焼発電技術

(1)水素燃焼タービンの技術開発の現状

水素燃焼発電におけるガスタービンは、主に、天然 ガス・水素混焼タービン、水素/空気燃焼タービン、水 素/酸素燃焼タービンに分けられる。資源エネルギー 庁が作成した、水素燃焼タービンの現状と課題を図9 に、CO₂フリー水素燃焼発電の目指すべき形態、過渡期 の形態を図10に示す。現状、天然ガス・水素混焼タービ ン、水素/空気燃焼タービンについて取り組まれており、 川崎重工業(株)は、コジェネ用を目的に、8 MW級の水噴 射型水素ガスタービン、30MW級ドライ追炊型混焼水素 ガスタービン(水素混焼率60Vol%)は開発済で、さらに ドライ型水素ガスタービンを開発中である⁽⁹⁾。これらは、 いずれも空気燃焼であり、その延長に究極の革新的技術 である水素/酸素燃焼タービンがある。

(2)革新的水素燃焼タービン

革新的水素燃焼タービンである,水素/酸素燃焼ター ビンの概念図(クローズドサイクル)を図11に示す¹⁰。 3項で示した利点(高効率・サーマルNOx生成ゼロ等) に加え,液化水素供給チェーンの場合は液化水素の冷熱



Fig.11 Concept drawing of hydrogen/oxygen combustion turbine (closed cycle)⁽⁰⁰⁾

	既存ガ	新規開発ガスタービン	
	拡散燃焼方式 (水・蒸気噴射型)	予混合燃焼方式 (ドライ型※)	新方式 (ドライ型※)
水素混焼	国内においても導入多数	5%程度まで可(実例なし	、) 一部メーカーで開発中
水素専焼	イタリアで実証例あり	× (不可)	未開発
	多様な燃料に対応 水素燃焼の実績多数	水・蒸気の噴射がなく 効率が低下しない	水・蒸気の噴射を行わずに 水素リッチガスに対応した ガスタービンの開発が必要
	水・蒸気の噴射により 効率が低下	多様な燃料種への 対応は困難	※ドライ型(Dry Low NOx:DLN)は燃焼時の NOx排出量を低減する技術で、水や蒸気等の 噴射によらず燃焼温度を低く制御することが可能。
			「出曲」資源エネルギー庁作用

Fig. 9 Current status and issues of hydrogen combustion turbines⁽⁵⁾

	目指すべき形態	過渡	朝の形態
発電方式	ガスタービンコンバインドサイクル発電		8 -
燃料種の数 (専焼/混焼)	水素専焼方式	水素	昆焼方式
燃焼方式	予混合燃焼方式·新方式	予混合燃焼方式	拡散燃焼方式
特徵·理由等	 ・熱効率が高い ・プラント設置スペースが小さい 	•熱効率が高い •技術的ハードルが低い(低濃度)	・高濃度水素にも一定程度対応 ・技術的ハードルが低い
	・負荷変動対応の柔軟性が高い ・インフラコストの低減が可能 ・燃料制御の複雑性を回避 ・エネルギーセキュリティに資する	 ・既存火力発電所に水素供給設備を付設することで建設コストを抑制可能 ・大規模水素発電のオペレーションを試行可能 ・専焼発電の導入初期に必要なLNG供給バックアップに向けた課題等の 知見を蓄積可能 	
			[出典] 資源エネルギー庁作成

Fig.10 Types of CO₂-free hydrogen-fired power generation in the future and transition periods⁽⁵⁾

(マイナス253℃)を利用して深冷式空気分離による酸素 製造ができる等の利点がある事から,究極の革新的熱 機関として開発を推進するに値する技術であろう。WE-NETでは,正にこの革新的技術,すなわち,深冷式空 気分離による酸素製造設備を含めた水素/酸素燃焼ター ビン発電設備について,システム設計,要素技術開発に 加えて,設備費を概算し,経済性検討も実施した。

6. おわりに

我が国はWE-NET構想という形で,世界に先駆けて 水素エネルギーに関する壮大な長期計画を立ち上げた。 現在,再生可能エネルギー/未利用エネルギーを水素に 変換して需要地に輸送・利用するための,地球規模での 水素エネルギーシステム構築が現実の課題として議論さ れている。そこでは,WE-NETが掲げた基本構想が継 承され,活かされている。長期構想のもとに,幅広い領 域で研究開発に取り組みながらも,一方でFCV実用化 をサポートするために,水素ステーション技術の開発等 への課題の絞込みも行い,多くの成果をあげた。水素安 全,国際標準など社会基盤関連課題にも取り組みがなさ れた。これらの成果はエネファーム,FCV,水素ステー ションの実用化・普及および水素関連規制見直し等に多 大の貢献をした。

水素燃焼発電に関しても、国の水素・燃料電池戦略 ロードマップが着実に実行に移され、WE-NETで蓄積 された研究開発成果の継承も含めて、水素燃焼発電技術 開発が本格的に展開されることを期待する。

7. 引用文献

 Hydro-Québec, Ludwig-Bölkow-Striftung, Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project Phase II Feasibility Study Final Report, Volume I (March 1991).

- (2) 植田稔,福田健三,化学媒体による海外電力の輸送,サンシャインジャーナル, Vol. 11, No. 1 (1990), PP. 7-12.
- (3) 橋本 道雄,水素社会の実現に向けて ~ 50年の大計~
 < http://www.nedo.go.jp/nedoforum2015/program/pdf/ ts4/michio_hashimoto.pdf>(参照2016年4月20日).
- (4) 水素・燃料電池戦略協議会,水素・燃料電池戦略ロードマップ(2014年6月23日)
 http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/2
 0140624004-2.pdf>(参照2016年4月20日).
- (5) 水素・燃料電池戦略協議会,水素・燃料電池戦略ロードマップ(2016年3月22日改訂)
 http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160322009/2
 0160322009-c.pdf>(参照2016年4月20日).
- (6) 「技術研究組合 CO₂フリー水素サプライチェーン推進機構」を設立 水素エネルギー社会の実現に向けて活動を本格化 <https://www.khi.co.jp/news/detail/20160401_1.html> (参照2016年4月20日).
- (7) 見えてきた"Hydrogen Road" ~水素社会の未来を拓く~<https://www.khi.co.jp/knews/backnumber/bn_2015/pdf/news177_02.pdf>(参照2016年4月20日).
- (8) 安倍総理大臣とターンブル豪首相共同声明-特別な戦略的パートナーシップの次なる歩み:アジア,太平洋,そしてその先へ-(平成27年12月18日)
 http://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000120556.pdf>(参照2016年4月20日).
- (9) 吉村健二, CO₂フリー水素の導入を目指して ~水素発電 技術~
 http://www.nedo.go.jp/content/100569149.pdf (参照2016年4月20日).
- (10) 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発 評価委員会、ニューサンシャイン計画「水素利用国際ク リーンエネルギーシステム技術(WE-NET)研究開発・ 第 I 期」 最終評価報告書(平成11年12月), pp. 169.



特集:水素エネルギー利用社会への歩み、ガスタービンと燃料電池の最新情報

水素サプライチェーンと水素発電

西村 元彦^{*1} NISHIMURA Motohiko **餝 雅英***2 KAZARI Masahide



キーワード:水素,極低温技術,液化水素,ガスタービン Hydrogen, Extreme Low Temperature Technology, Liquefied Hydrogen, Gas Turbine

1. 緒言

第四次エネルギー基本計画の閣議決定以降,中長期的 視野に立ったエネルギー戦略の見直しが進んでいる。将 来エネルギーの選択基準に,エネルギー安全保障,経済 性,環境性および安全性(いわゆる3E+S)を据えて現 在も多くの議論が続いている。その様な中で,水素・燃 料電池戦略ロードマップ^{(1),(2)}が,産学官の知見を集約し て策定され,将来エネルギーを模索する視点に,インフ ラ整備の順序と時間軸を加え,目指すべき方向が示され ている。

本稿では,該ロードマップのフェーズ2が示す,海外 からの水素供給および水素発電の実現を目指して,ク リーンエネルギーの本命として有望視されている水素を 大量安定に供給し,CO₂削減に寄与する構想と技術開発 について紹介する。

2. CO₂フリー水素の導入

再生可能エネルギーによる発電と水の電気分解とを組 み合わせることで、CO₂フリー水素を製造できる。しか しながら、余剰かつ安価な水力・風力発電等が存在する 海外の一部地域を除いて、現状では経済性と安定供給性 に課題が多い。そこで、化石燃料から水素を製造し、副 生物のCO₂をCCS(Carbon Dioxide Capture Storage) 処理してCO₂排出を削減する。これにより大量安定に水 素を供給できるようになり、水素インフラの整備が可能 となる。すなわち、化石燃料由来の水素でインフラを整 備し、量的進展に数十年オーダーの長期を要する再生可 能エネルギー由来水素をこのインフラに徐々に流して増 して行くことが考えられる。

化石燃料由来の水素については,原料が安価であるこ とが極めて重要である。そこで当社は、国際取引の無い,



Fig. 1 Concept of CO2 free hydrogen supply chain

原稿受付 2016年5月12日

- *1 川崎重工業㈱ 技術開発本部 水素チェーン開発センター
- *2 川崎重工業㈱ 技術開発本部 技術研究所

〒673-8666 明石市川崎町1-1



(a) Hydrogen Production Plant



(b) Liquefied Hydrogen Loading Base



(c) Liquefied Hydrogen Carrier Ship (160,000 m³)

Fig. 2 Feasibility study on CO2 free hydrogen supply chain

いわゆる未利用資源の一種である褐炭から水素を製造し、 その水素を日本に輸送して利用する構想を2010年に打ち 出し⁽³⁾,その実現に向けて取組んでいる。

褐炭は、水分が多いため輸送効率が低く、乾燥すると 自然発火し易いため、採掘地近傍で発電に利用されるに 留まっている。世界に賦存する石炭の半分は褐炭であ る、特にオーストラリアのビクトリア州には莫大な量が 存在する。褐炭をガス化し精製すると水素が得られるが、 精製過程でCO₂を副生する。このCO₂を現地でCCS処理 することで、CO₂の大気排出を伴わない、いわばCO₂フ リーの水素が得られる。豪州連邦政府およびビクトリア 州政府は共同してCCSプロジェクト「CarbonNet」を推 進しており、ビクトリア州は褐炭とCCSを同時に利用で きる適地となっている⁽⁴⁾。こうして得られたCO₂フリー 水素を、豪州から日本まで運んで利用する一連を、サ プライチェーンになぞらえ、「CO₂フリー水素チェーン」 と称している。この構想の基本的な事業性を評価するた めに、商用化を想定して概念設計を行い(表1、図1、 2)、設備費、運営経費を見積もって経済性評価(FS) を実施した。商用チェーンの水素供給規模は、燃料電池 自動車300万台あるいは水素ガスタービンコンバインド サイクル発電所100万kW1基が消費する水素量に相当 する。

Table 1 Specifications of CO2 free hydrogen supply chain

Brown Coal Demand	4.74 Mton/An
Hydrogen Production (CIF)	0.764 MTOE/An
Hydrogen Production	2.51 GNm ³ /An
(CIF)	225,500 ton/An
CO2 Inventory Sequestrated	4.39 Mton/An
Liquefied Hydrogen Carrier Ship	160,000 m ³ ×2 vessel

FSの結果, CIF(運賃・保険料込み渡し)コスト29.8 円/Nm³となる良好な結果を得た。原料である褐炭およ びCO₂貯留のコストに占める割合は約12%である。CO₂ 貯留のコストは「CarbonNet」のCO₂引き取り費用であ り, CO₂の分離回収費用は水素製造に含まれる。水素製 造および液化がコストに占める割合は, 夫々, 29%およ び33%と大きいことから, これらプロセスの効率向上お よびシステムの合理化が重要である。

CO₂フリー水素チェーンの特徴を纏めると次になる: ・未利用の化石燃料から水素を製造

- ⇒ 大量・安定確保が可能
- ・水素製造時のCO2は現地で分離・貯留

⇒ 使用時の環境性良好

・水素を扱う技術力・産業力が必要

```
⇒ 産業競争力が向上
```

・高価な天然資源を単に買うのではない

⇒ 国富流出を抑制

このように、CO₂フリー水素は、将来のエネルギーに求められる条件に適合している。

なお、当FSはNEDO国際プロジェクトとして実施し たものであり、日豪両政府から、その成果を認めて頂い ている。すなわち、褐炭からのCO₂フリー水素は安価で 大量に安定して調達可能なエネルギーとして期待されて いる。

3. 水素の輸送・貯蔵

3.1 液体水素(LH₂)と液化システム

水素キャリア(媒体)として、LH₂、CGH₂(圧縮水素 ガス)、吸蔵合金、化学媒体があるが、商用レベルにあ るLH₂は大量輸送貯蔵に適し、脱水素時のエネルギーを 必要としない。LH₂の密度(70.8kg/m³)はLNG(443kg/ m³)より軽いが、大気圧水素ガスの約800倍で容積効率 が高い。LH₂沸点(20.3K)はLNG(112K)より約90℃ 低く、容積当りの潜熱が小さく高効率の液化技術と高度 な断熱技術が課題となる。

製造した水素ガスを液化するには、ガスを圧縮、膨張 するプロセスが必要となる。液化に要する最小仕事(理 想仕事,エクセルギ)は、プロセスの始点(大気圧,室 温ガス)と終点(LH₂)の状態量から熱力学的に決まり、 約3.90 kWh/kg(0.35 kWh/Nm³)である。実際の液化 仕事は、プロセスの機械損、摩擦損等の不可逆性により 最小仕事より必ず大きくなる。液化プロセスの一つであ るクロードサイクルでは、冷熱を発生するリサイクル系 と原料水素を供給するフィード系から構成される。リサ イクル系の冷熱は、圧縮された冷媒ガスの膨張仕事によ り発生する。原料ガスは、リサイクル系で冷却され、絞 り弁で膨張液化する。実際の液化仕事は、約1kWh/ Nm³程度で、液化効率(最小液化仕事/実際の液化仕 事)は約30%程度である。

図3に当社が開発した国産初の大型5トン/日クラス の水素液化機の外観を示す。本機は、膨張機にガス軸受 膨張タービンを採用し高効率を目指している。現在、試 運転を行いながら構成機器の評価試験を行っている。商 業チェーンでは、液化機を大型化し液化効率を高めるこ とでLH2製造コストの低減が重要となる。



Fig. 3 Hydrogen liquefaction system

3.2 液化水素の輸送・貯蔵

LNGタンクの断熱構造には常圧の固体断熱(ウレタ ンフォーム等)を適用するが、低沸点のLH2では、侵入 熱の大幅低減の要求から真空断熱を採用する。図4に 当社が建設した JAXA(航空宇宙研究開発機構)種子 島宇宙センター向けの国内最大LH2タンクの外観を示す。



Fig. 4 Liquefied hydrogen storage tank

本タンクは低温真空断熱のパーライト真空断熱を採用した二重殻式球形タンク形式で,蒸発率は0.18%/日以下である。水素チェーンのパイロット,実証チェーンでのLH₂タンクの容量は夫々,約2000~3000m³,約5万m³ クラスを計画している。

LH₂海上輸送として,2020年頃にパイロットチェーン 用小型LH₂ 運搬船(容量2500m³)を,2025 ~ 3030年頃 には実証チェーン用大型LH₂運搬船(容積16万m³)を 計画している。小型LH₂運搬船のイメージを図5に示す。 運搬船は,LNG内航船をベースとして蒸発ガスをタン ク内に蓄圧する蓄圧式シリンダー型真空断熱方式タンク (容量1250m³)を2基搭載する。

LH₂運搬船は世界に例がないが,設計はLNG船に適用 されるIMO(国際海事機関)のIGCコード「液化ガスの ばら積み輸送のための船舶の構造及び設備に関する国際 規制」がベースとなる。



Fig. 5 Pioneer carrier ship for liquefied hydrogen

当社は日本海事協会(NK)から世界初となる小型 LH₂運搬船に搭載する貨物格納設備の基本認証を取得し た(2013年末)^{(5),(6)}。取得には,IGCコードに加えLH₂物 性を考慮した船型,材料,安全基準等の要件の提案,及 びHAZID解析を用いたリスク評価を行った。図6に示 す格納設備のLH₂カーゴンクは,内槽と外槽からなる横 置式シリンダー型二重殻タンクで,断熱層に真空断熱, 内槽支持構造にGFRPを採用し断熱性能の向上を図って いる。

IGCコードに規定されない貨物(LH₂)は荷出し国



Fig. 6 Cargo contain system for liquefied hydrogen

(豪州),受入れ国(日本),及び旗国(日本)で承認した基準があれば条約整備までの暫定措置として輸送が認められる。現在,両国政府間で安全基準の協議が進められ,またIMOの貨物運送小委員会でも両国が共同提案した安全要件が検討されている。

4. 水素ガスタービン発電

CO₂フリー水素が大量に輸入され水素発電に利用され るとCO₂削減へのインパクは非常に大きい。ここでは, 当社が取り組む水素ガスタービンの開発でもっとも重要 な燃焼器の試験結果を紹介する。

発電用ガスタービン(図7参照)は、その構造上、性 状の異なる種々な燃料を扱うことが可能であり、水素を 燃料とすることも十分可能であるが、以下に示す技術課 題を克服できる水素特有の燃焼特性に対応した燃焼技術 の開発が必要である。



Fig. 7 Gas turbine power generator

4.1 燃焼器の技術課題

4.1.1 燃焼器壁面の高温化

水素は天然ガスに比べ,最大燃焼速度が速く,消炎距 離も小さいことから燃料ノズルなどの燃焼器部品に水素 火炎が近づき,高温化を起こす可能性が高いため,水素 火炎が燃焼器部品の近傍に近づかないような燃焼技術の 開発が必要である。

4.1.2 窒素酸化物(NOx)の増加

図8に燃焼器内での天然ガスと水素の混合気の火炎の 様子を示す。天然ガス燃焼時は、火炎が燃料ノズルから 離れた場所に形成されるのに対し、水素割合の増加に伴





Natural Gas :80% Hydrogen :20%

Natural Gas Hydrogen

:5% :95%

Fig. 8 Combustion flame



Fig. 9 NOx generation with hydrogen in the mixture-fuel

い,火炎の発生が燃料ノズル直下で安定するようになる。 このような反応域の変化及び局所的な火炎温度の上昇 により,水素火炎ではNOx(窒素酸化物)の発生量が 天然ガスに比べて,約2倍に増加する。図9に燃焼器出 口でのガス温度を一定に保ち,水素割合を変化させた場 合のNOxの変化を示す。

4.2 水素燃焼方式

これらの技術課題を克服し、水素を安定かつ低NOx で燃焼させるための3種類の燃焼技術の開発を実施しお り、以下にそれぞれの技術内容を示す

4.2.1 天然ガスと水素の混焼

図10に最新の天然ガス用の低環境負荷型燃焼器(ドラ イ低NOx燃焼器:空気と燃料ガスを予め混合してから 燃焼させる希薄予混合燃焼による低NOx燃焼.NOxの 低減に水や水蒸気を用いないためドライ方式と称され る)の構造を示す。パイロットバーナ,低NOx燃焼方 式のメインバーナ及び追焚きバーナの三つのバーナで構 成する。

追焚きバーナには上流のメインバーナ部で燃焼した後 の高温・低酸素な燃焼ガスが供給されるため、追焚き燃 料ガスの燃焼反応が緩やかとなり、広い運転範囲で低 NOx燃焼が可能である。

この燃焼器の追焚きバーナのみに水素を供給する事に



Fig.10 Dry low NOx emission combustor for natural gas fuel

よって天然ガスと同様に低NOx燃焼が可能である。水 素投入量は、燃料ガス全体の60体積%(熱量ベースで約 30%)まで可能である。

図11に追焚きバーナで天然ガスと水素を燃焼したとき の燃焼器出口ガス温度とNOx排出量の関係を示す。破 線は設計点相当を示す。追焚き燃料ガス出し始めは、天 然ガス、水素ともNOx排出量に変わりは無い。高負荷 側でのNOx排出の立ち上がりが水素の方が早く生じる ものの、設計点相当でのNOx排出量の差は僅かであり、 天然ガスと変わらずエンジンでNOx排出量 25ppm保証 (残存酸素15%換算)が可能である。



Fig.11 NOx generation dependence on fuel at supplemental burner

4.2.2 水素専焼(ウェット方式低NOx化)

現在, ガスタービンの燃料として高濃度の水素の様な 反応性の高い燃料ガスで発電する場合, 火炎の安定性に 優れる拡散燃焼方式が使われる場合が多い。この燃焼方 式では, 安定性に優れる反面, NOxの排出量が多大と なる。このため, 燃焼ガス中のNOxを低減する手法と して, 水や水蒸気を噴射するウエット方式が用いられる。 これは, 火炎の高温部で発生するNOxに対し, 燃焼器 内に水や水蒸気を噴射し, 局所的な高温箇所を無くすこ とによりNOx排出を抑制する手法である。

図8及び図9に示したように、燃料ガス中の水素割合

により火炎形成位置,火炎形状,高温発生域が変化し, NOx排出量が増加する。天然ガス燃焼時と同じ水噴射 量で,NOx排出量を抑制するのは難しくなる。水素の 火炎形成位置,高温発生域に合わせ,水素と水や水蒸気 の分布を一致させる,もしくは水素と燃焼用空気の混合 域に水や水蒸気を供給する必要がある。

図12に水素用燃料ノズルの一例を示す。水素の分布と 水の分散を一致させるため、燃料噴射弁内の水素の高速 流れに水を噴射し、水素の流れにより水を細かく微粒化 し、水素と混合した後に燃焼器内に投入する。





Fig.12 Hydrogen-natural gas flexible fuel burner with water injection for NOx reduction dependence on fuel at secondary burner

図13に試作燃料ノズルでの水噴射試験時の水噴射量と NOx排出量の関係を示す。水素と水を別々に噴射した 場合,NOxの低減が緩やかで,規制値レベルに届かない。 噴射弁内で水素と水を混合してから燃焼器に投入する場 合,水燃比1程度で現行の天然ガス+水噴射と同程度ま でNOxの低減を図ることができている。ここで水燃比 は,水燃比=水・蒸気の質量流量 / 燃料ガス質量流量 である。

4.2.3 水素専焼(ドライ低NOx燃焼)

天然ガス用のドライ低NOx燃焼器では予混合燃焼に より低NOx燃焼を実現しているが、水素では反応性が 高いため、予混合燃焼をすると逆火(混合気に火炎が遡 る現象)が発生し、燃焼器部品の焼損が生じる。そのた め、水素用ドライ低NOx燃焼器では予混合燃焼を採用 することは困難である。

そのため、当社では水素用ドライ低NOx燃焼器として、微小な水素火炎を用いた燃焼器の開発をSIP(戦略 的イノベーション創造プログラム)エネルギーキャリア のプロジェクトとして実施してきた。図14に微小な水素 火炎を用いた低NOx燃焼器の概念図を示す。



 0
 1.0
 2.0

 Water/Fuel Mass Flow Ratio
 0

Fig.13 NOx emission reduction with water injection



Fuel Burner

Fig.14 Dry low NOx emission hydrogen combustor

この燃焼器を用いた実機ガスタービンと同等の条件 (圧力,温度)での燃焼試験をアーヘン工科大学の燃焼 試験設備で実施しNOxの排出量が大気汚染防止法を大 きく下回る40ppm保証(残存酸素15%換算)となること を確認している。

5. 結言

「CO₂ フリー水素エネルギーチェーン」構想,および 関連する技術開発,特に発電用水素ガスタービンの状況 を述べた。これら技術の実用化は水素社会の実現に大き く貢献すると考える。 その実現に向けて,当社は,水素源となる資源からの 水素製造,輸送・貯蔵,利用に至るチェーンで必要と なる技術確立と実証を主目的とし,技術研究組合「CO₂ フリー水素サプライチェーン推進機構(HySTRA)」を, 岩谷産業(株),電源開発(株およびシェルジャパン(株)と共同 で設立した。この取組は,NEDOの補助事業「未利用褐 炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事 業」に採択され,2020年の実証試験開始を目指して,現 在,基本設計を進めている。

大量水素の導入とエネルギー利用には,技術開発のみ ならず,経済性と安全性を両立した大型インフラに関連 する規制・基準の整備も重要であり,技術研究組合およ び関係各所と連携して,世界標準の構築に寄与していき たい。

6. 引用文献

- (1) 資源エネルギー庁,水素・燃料電池戦略ロードマップ
 http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/2 0140624004-2.pdf>(参照2014年6月24日).
- (2) 資源エネルギー庁,水素・燃料電池戦略ロードマップ 改訂版 http://www.meti.go.jp/press/2015/03/2016032
 2009/20160322009-c.pdf>(参照2016年3月23日).
- (3) 川崎重工業(株) 中期経営計画(2010~2012年度)
 http://www.khi.co.jp/ir/pdf/presentation_1004_2.
 pdf>(参照2010年4月28日).
- (4) Kenji Inoue, Yasushi Yoshino, Shoji Kamiya, Eiichi Harada, Feasibility study of CO2-free hydrogen energy supply chain utilizing Australian brown coal linked with CCS, Proc. of CRYOGENICS 2012 IIR International Conference, (2012), pp.183-187.
- (5) 海事プレス,液化水素船の貨物タンクの開発, (2014年2月7日), p. 14.
- (6) 川崎重エプレスリリース,川崎重工,液化水素運搬船 用貨物格納設備の基本承認を日本海事協会より取得
 https://www.khi.co.jp/news/detail/20140106_1.html
 (参照2014年2月6日).

日本ガスタービン学会入会のご案内

日本ガスタービン学会は、「エネルギー」をいかにして効率よく運用し、地球規模の環境要請に応える かを、ガスタービンおよびエネルギー関連分野において追求する産学官民連携のコミュニティーです。

会員の皆様からは,「ガスタービン学会に入会してよかったと思えること」の具体例として次の様な声 が寄せられています:

- タテ(世代)とヨコ(大学,研究機関,産業界)の交流・人脈が広がった。
- ・学会誌が充実しており、学会・業界・国外の専門分野の研究動向や技術情報が効率的に得られた。
- ガスタービンに熱い思いを持った人達と、家族的雰囲気で階層を意識せず自由な議論ができ、専門家の指導を得られた。

学会の概要(2015年3月現在)

会員のメリット

個人会員(正・学生会員):

学会誌無料配布(年6回),学術講演会の論文発表・学会誌への投稿資格,本会主催の行事の参加 資格と会員参加費の特典,本会刊行物の購入資格と会員価格の特典,調査研究委員会等への参加 賛助会員:

学会誌の無料配布,学会誌広告・会告掲載(有料),新製品・新設備紹介欄への投稿,本会主催行 事参加および出版物購入について個人会員と同等の特典

入会金と会費

会員別	入会金	会費 (年額)	後期入会時 会費(初年度のみ)
正会員	500円	8,000円	4,000円
正 会 員 (65才以上*)	500円	5,000円	2,500円
学生会員	500円	2,500円	1,250円
賛助会員	1,000円	一口 70,000円とし,一口以上	一口 35,000円
дыд	1,0001 1		

※当該年度3月1日現在

後期・・・9月1日~翌2月末まで

会

入会方法

学会ホームページにて入会手続きができます(http://www.gtsj.org/index.html)。 学会事務局にお電話いただいても結構です。申込書を送付致します。



〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13 第3工新ビル402 電話番号:03-3365-0095 E-mail: gtsj-office@gtsj.org

- 100 -

昨年も7月号のアソシエイトエディターを担当させて いただきました。本号の編集後記を書くにあたり,あれ から既に一年が経過してしまったことを気づき,時の流 れをますます速く感じるようになっていることで自らの 歳の蓄積を再認識します。個人的にはこの一年は国際学 会に参加する機会が多い一年でした。虎の門ヒルズでの IGTC,早稲田でのAICFM,ソウルでのAJK2015など国 内あるいはアジアでの国際学会に参加させていただくこ とで,ガスタービンを含めターボ機械の最新技術動向を 知り,技術の進歩を多く感じることができました。

さて、今月号の学会誌は「水素エネルギー利用社会へ のあゆみ、ガスタービンと燃料電池の最新情報」を特集 しました。近年、究極のクリーンエネルギーとして、特 にわが国では化石燃料を輸入に頼らざるを得ない状況の 中でCO₂フリーの代替エネルギーである水素エネルギー 技術が再び脚光を浴びてきているように感じます。我が 家でもそろそろ燃料電池にしようか、と夕飯の話題にな るなど家庭においても水素が身近になりつつあります。

本特集では、サンシャイン計画に始まり40年以上にお よぶわが国の水素エネルギー技術開発のこれまでの歩み から振り返り、最近の水素エネルギーチェーン開発、家 庭用ならびに事業用燃料電池や燃料電池車、航空用への 燃料電池応用、ガスエンジンへの水素燃料利用技術、燃 料電池とマイクロガスタービンのハイブリッド発電、さ らには革新的低炭素石炭火力発電など解説をいただきま した。このような水素関連のトピックスの広がりを知り、 基礎的な技術開発から始まり、国際的な社会情勢の変化 にも影響されて決して成功ばかりではなかったわが国の 開発プロジェクトの下でもその成果は着実に国内に蓄積 されていき、今日の日本は世界をリードする水素エネル ギー利用関連技術を持つに至っていることがわかります。 製品として世の中に出し、利益を上げるまでには非常に 長い期間が必要である水素エネルギー技術分野での挑戦 を粘り強く継続されている方々に心から敬意を表します。 技術を花開かせるまでにはやり通すことが大切であるこ とを感じました。今後、日本ならびに世界の水素エネル ギー関連技術がどのように発展していくのか、将来水素 社会がどのように実現されていくのか、楽しみに感じま す。

最後に,この場をお借りいたしまして,お忙しい中本 号記事を執筆いただきました皆様に熱く御礼申し上げま す。 (渡邉啓悦)

 7月号アソシエイトエディター 渡邉 啓悦(荏原製作所)
 7月号担当委員 石川 揚介(東芝ジーイー・タービンサービス) 北條 正弘(宇宙航空研究開発機構)

(表紙写真)
今回の表紙については、【論説・解説】の著者より流用
およびお借りしています。
詳細については,下記記事をご参照ください。
・「水素を用いた自立型エネルギー供給システム」
(P.235 \sim 240)
・「燃料電池車MIRAI,水素社会の実現に向けて」
····· (P.265 ~ 270)
・「航空機用燃料電池技術の最新研究状況」… (P.271 ~ 276)



先月, ASME Turbo Expo 参加のため, ソウルに行っ てきました。国際会議場のある「COEX」は, ホテルや 地下鉄の駅2駅が直結し, また, 都心空港ターミナルや ショッピングモール, レストラン街が併設されており, とても便利な場所でした。都心空港ターミナルは, 金浦 空港や仁川空港に行く前に, その場で出国手続き, 搭乗 手続きができ, スーツケースも渡してしまえるので, そ れから搭乗時間まで身軽に自由に行動できるという便利 なシステムで, 私も最終日には早めにスーツケースを預 け, 近くのデパート同様, おいしそうな洋菓子やパン やお惣菜が並んでいて, その横の韓国海苔のコーナーで は, その場で海苔に自家製ごま油を塗って袋詰めしてい る海苔屋さんもあり,思わず,海苔を買ってしまいまし た。フードコートもメニューが充実していて,どうして もっと早く気がつかなかったのだろうと後悔。今度は観 光で訪れてゆっくり食べ歩きたいと思いました。

Turbo Expoの展示会場では、今年も日本ガスタービ ン学会のブースを出し、大勢の方々に立ち寄っていただ きました。日本留学中にガスタービン教育シンポジウム に参加していた中国人の方が中国の大学のProfessorに なってブースを訪れ、私のことを覚えていて声を掛けて くれたり、海外在住の会員の方が「僕も会員ですよ」と 話しかけてくれたりと、今回もまた嬉しい出会いがたく さんありました。

(中村優美)

学会誌編集および発行要領(抜粋)

2015年4月23日改定

- 1. 本会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 依頼原稿:学会誌編集委員会(以下,編集委員 会)がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原 稿。執筆者は本学会会員(以下、会員)外でもよい。
 - B. 投稿原稿: 会員から自由に随時投稿される原稿。 執筆者は会員に限る。
 - C. 学会原稿:本学会の運営・活動に関する記事(報 告,会告等)および会員による調査・研究活動の成 果等の報告。
- 2. 依頼原稿および投稿原稿は、論説・解説、講義、技 術論文,速報(研究速報,技術速報),寄書(研究だ より,見聞記,新製品・新設備紹介),随筆,書評, 情報欄記事の掲載欄に掲載することとし、刷り上がり ページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説、講	6ページ以内	
技術論文	技術論文投稿要領に	よる
速報	4ページ以内	
寄書,随筆	3ページ以内	
書評	1ページ以内	
情報欄記事	1/2ページ以内	

- 3. 依頼原稿の執筆者は、本会誌の原稿執筆要領に従っ て原稿を執筆し、編集委員会事務局(以下、編集事務 局)まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記1 に示す。
- 4. 依頼原稿は、編集委員会の担当委員が、原稿の構成、 理解の容易さ等の観点および図表や引用文献の書式の 観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づい て、執筆者への照会、修正依頼を行う。
- 5. 投稿原稿のうち技術論文以外のものは、編集委員会 が審査し、本会誌への掲載可否を決定する。
- 6. 投稿原稿のうち技術論文の審査, 掲載については, 技術論文投稿要領に従う。
- 7. 依頼原稿の執筆者には、本学会の事務局(学会事務 局)から原則として謝礼(図書カード)を贈呈する。
- 8. 依頼原稿および投稿原稿の執筆者には、抜刷を10部 贈呈する。
- 9. 本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本 学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについて は別途定める著作権規程による。
- 10. 他者論文から引用を行う場合,本会誌に掲載するた めに必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところ とする。

付記1 原稿提出先および原稿執筆要領請求先(編集事務局) ニッセイエブロ(株) 企画制作部 学会誌担当:山田 衿子 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4 TEL: 03-5733-5158 FAX: 03-5733-5167 E-mail : eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領(抜粋)

2015年3月10日制定

- 1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件 を満たすものであること。
 - 主たる著者は本学会会員であること。
 - 2) ガスタービン及びエネルギー関連技術に関連する ものであること。
 - 3) 原稿執筆要領に従って執筆された、モノクロの日 本語原稿であること。
 - 4) 一般に公表されている刊行物に未投稿であること。 ただし、以下に掲載されたものは未投稿と認め技 術論文に投稿することができる。
 - •本学会主催の学術講演会・国際会議のプロシー ディングス
 - ・特許および実用新案の公報,科学研究費補助金等 にかかわる成果報告書
 - 他学協会の講演要旨前刷,社内報・技報,官公庁 の紀要等の要旨または抄録
- 2. 原則として刷り上がり8ページ以内とする。ただし、 1ページにつき16,000円の著者負担で4ページ以内の 増ページをすることができる
- 3. 著者がカラー1ページあたり50,000円を負担する場 合には、カラー印刷とすることができる。
- 4. 投稿者は、原稿執筆要領に従って作成された印刷原 稿または原稿電子データを、所定の論文表紙および英 文アブストラクトとともに学会誌編集事務局に提出す る
- 5. 投稿された論文は、論文査読に関する内規に従って 査読を行い、論文委員会が掲載可否を決定する。
- 6. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
- 7. 本技術論文の著作権に関しては、学会誌編集および 発行要領(抜粋) 9.および10.を適用する。

日本ガスタービン学会誌 Vol.44 No.4 2016.7

発行日 2016年7月20日 公益社団法人日本ガスタービン学会 発行所 編集者 吉田 英生 発行者 久山 利之 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13 第3工新ビル402 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387 郵便振替 00170-9-179578 銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店 (普) 1703707 印刷所 ニッセイエブロ(株) 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4 Tel. 03-5733-5158 Fax. 03-5733-5167

©2016, 公益社団法人日本ガスタービン学会

複写をご希望の方へ

本学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著

年春協会に委託しております。 本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、一般社団法人学術著 作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目 的の複写については、当該企業等法人が公益社団法人日本複写権セン ター(一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を 再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあって は、その必要はございません(社外頒布目的の複写については、許諾が 必要です)。

 一般社団法人 学術著作権協会
 〒107-0052 東京都港区赤坂 9 - 6 - 41 乃木坂ビル 3 F 権利委託先 FAX : 03-3457-5619 E-mail : info@jaacc.jp

複写以外の許諾(著作物の引用,転載,翻訳等)に関しては、(社学術 著作権協会に委託致しておりません。直接,本学会へお問い合わせくだ さい。

- 102 -

特集:水素エネルギー利用社会への歩み、ガスタービンと燃料電池の最新情報

水素を用いた自立型エネルギー供給システム

中島 良^{*1} NAKAJIMA Ryo

論説◆解説

キーワード:水素,再生可能エネルギー,自立型エネルギー供給,電力貯蔵,燃料電池 Hydrogen, Renewable Energy, Autonomous Energy Supply System, Energy Storage, Fuel Cell

1. 緒言

世界に先駆けて2009年に日本で商用販売が開始された 家庭用の燃料電池コージェネレーションシステム「エネ ファーム」や、2014年以降に一般販売が開始された燃料 電池自動車などが先導する形で、国がエネルギー基本計 画の中に明記して実現を目指している水素社会に向けた 動きが活発化している。過去にも国内で水素エネルギー 関連の大型プロジェクトが進められた例があるが、昨今 の水素利用側の燃料電池の技術、特に耐久性や低コスト 化における技術開発の進捗は著しく、水素社会実現に向 けたロードマップもリアリティが増してきているものと 思われる。

東芝は、これまでエネファームに代表される燃料電 池の技術や、高効率の水素製造システム、あるいは系 統制御を含めてエネルギーを高効率に扱うエネルギー マネージメントシステム(EMS)等の水素社会を支え る技術開発に長年取り組んで来た。現在、これらコアと なる技術を統合して、水素社会に向けたシステム製品、 ソリューション及び技術開発を進めているところであ る^{(1),(2)}(図1)。

本稿では東芝の水素関連の取組の中から,再生可能 エネルギーにより水電解して得られた水素を,地産地



Fig. 1 Hydrogen solutions that Toshiba is aiming

原稿受付 2016年5月10日

*1 (㈱東芝 次世代エネルギー事業開発プロジェクトチーム 〒212-8585 川崎市幸区堀川町72-34 消で様々な用途向けに電気や熱として効率的に利活用 する自立型のエネルギー貯蔵・供給システム(商品名 H2One[™]) について中心に述べる。このシステムは, 2015年の4月から川崎市で,非常時の防災用(BCP対 応)向けとして実証を開始しており,横浜市の港湾施設 におけるBCP対応システムや、佐世保市にあるホテルの エネルギー100%自給自足可能な自立型水素エネルギー 供給システムとして、それぞれ2016年3月から運用が開 始されている。またこのシステムをトラックに搭載して 移動可能としたモデルや、さらに同様のシステムを鉄道 の駅に設置する計画も進められている。いずれのシステ ムも、太陽光発電等の再生可能エネルギーを一次エネル ギー源として、変動する発電量を平準化して一旦水素の 形でエネルギーを貯蔵し、純水素型燃料電池で、電気 とお湯を必要な時に施設に供給することができるCO2フ リーのシステムである。

以下,それぞれのシステムのコンセプト,開発実例, 今後の展開や課題等について述べる。

2. 再エネ水素を利活用する自立型エネルギーシス テム(H2One™)

2.1 自立型エネルギーシステムのコンセプト

資源の少ないわが国においては,輸入される化石燃料 への依存を低減してエネルギーセキュリティを確保する ことや,脱化石燃料によるCO₂の削減等が重要と認識さ れている。この対応の一つとして再生可能エネルギーの 導入を進めることが急務となっているが,これらは天候 等に大きく左右される自然エネルギーであり,天候状 況に伴い電力の出力も大きく変動するため,再生可能エ ネルギー由来の電源が増えてきた昨今,電力会社の系統 への接続が制限される状況が生じている。このような不 安定な電力を有効かつ十分に利活用するためには,その 貯蔵・利用技術が鍵となっている。東芝ではそのエネル ギー貯蔵・利用方法の一つとして,水素エネルギーの活 用に着目している。

図2にその利活用の仕方のイメージを示す。例えば 太陽光発電(PV)システムのみ装備した場合,電力需 要とPV発電量には不一致が生じるので,PVで発電した 電力を一旦エネルギー貯蔵する必要がある。一般的に は蓄電池の利用が行われているが、蓄電池の利用に加え て、一旦水素にエネルギーを変換することで、一週間以 上の長期にわたってもエネルギーを保存でき、かつ負荷 に応じて出力することができる。水素としてエネルギー を貯蔵する点の大きなメリットは、蓄電池と異なり、省 スペースでかつ大容量を貯めることができ、更に水素容 量は減衰しないことから、長期間に渡って貯蔵できる点 にある。後で述べるリゾートホテル向けの例では、夏季 の豊富な日照によるPV発電のエネルギーを水素で貯蔵 し、冬季に燃料電池で発電して利用する季節間の「エネ ルギータイムシフトTM」を実現している。



Fig. 2 "Energy time-shift" to match the PV power generation and electricity demand

東芝でのエネルギーの貯蔵・利用のコンセプトとしては,

- 1) 再生可能エネルギーの直接利用
- 2) 蓄電池による電力の貯蔵・利用
- 3) 水素エネルギーによる電力の貯蔵・利用

の要素から構成されている。これらの構成要素に対して, 水素EMSを用い,全体を制御可能であることが本コン セプトの特長である。このコンセプトに基づいて,需要 側における電力利用状況に応じて,システム全体でのエ ネルギー利用の最適化を図る自立型水素エネルギー貯 蔵・供給システム(H2OneTM)を開発している。

H2One[™]を構成する主な装置は下記の5つである。 (図3)

- 1) 再生可能エネルギー(太陽光,風力等)発電装置
- 2) 蓄電池
- 3) 水電解式水素製造装置
- 4) 水素貯蔵タンク
- 5) 燃料電池

再生可能エネルギーにて発電した電気を直接利用する だけでなく、余剰の電力を蓄電池へ貯蔵する、あるいは その余剰電力を用いて水を電気分解することで、水素を 発生させる。その水素をタンクに貯蔵し、需要側に応じ て水素を燃料電池へ送り、電気と温水を供給できるモデ ルである。また、これら構成装置のスペックはユーザー 毎の利用状況に応じたカスタマイズが可能である。



Fig. 3 Basic system diagram of hydrogen-based autonomous energy supply system H2OneTM

2.2 H2One[™] BCPモデル

2011年の東日本大震災における未曾有の大災害は、巨 大地震や長期間の余震、大津波、火災や土砂災害と多様 でかつ広域に渡って発生した。人的被害を最小限にする ためには、広域にて点在する避難所でのエネルギー供給 が重要であり、東日本大震災では系統電力の脆弱性も浮 き彫りとなった。また、非常用発電機を装備している 施設でも、保管していた燃料を使い切ってしまった後に、 数週間にわたり燃料の補給が途切れるといった事態も発 生した。その結果、各コミュニティレベルにおいて非常 用電源をいかに確保するかが重要と認識された。その解 決策として注目され、期待されているのが再生可能エネ ルギーの利用であるが、前述のように日々の変動が大き く、天候にも左右されるため、災害時における直接利用 の観点から未だ大きな課題を有している。そこで、災害 時での電力貯蔵、更に熱の利用も実現することを目的 として、H2OneTMのBCPモデルの開発を行った。なお BCP (Business Continuity Plan) とは、災害等の緊急 事態においても、事業の損害を最小限となるように継続 できる,あるいは早期復旧が可能であるよう,平常時に 実施すべき取組を取り決めておく計画のことである。

本BCPモデルにおいて平常時には、水素EMSを用い て、水素の製造量、蓄電量、発電量などを最適に制御し、 電力のピークシフトおよびピークカットに貢献している。 いざ災害が発生した時には、ライフラインが寸断された 場合においても、貯蔵している水素からエネルギーを供 給でき、更に太陽光発電も稼働できるため、自立して電 気と温水を供給することができる。川崎にて実証してい るシステムでは、300名の避難者に対し、約7日間分の 電気と温水を供給することが可能である。加えて本モデ ルは20ftコンテナ3台にパッケージングされているため、 トレーラーでシステム自体を被災地に輸送することも可 能という特長を有する。

本モデルは川崎市臨海部の公共施設「川崎市港湾振興 会館および東扇島中公園」(以下,川崎マリエン)内に 設置して,2015年4月20日より実証運転を開始している。 図4(a),(b)に外観写真を示す。



Fig. 4 (a) Outlook of H2OneTM BCP model (from side)



Fig. 4 (b) Outlook of H2OneTM BCP model (from top)

また表1に実証モデルの概要を示す。本実証運転においては、災害時に周辺地域の帰宅困難者の一時滞在施設 として指定されている川崎マリエンにて、水素BCPシス テムおよび平常時の水素エネルギーマネジメントシステ ムの有効性を検証している。またシステム全体の高効率 化も進めるべく各モードでの詳細な試験を実施している。

実証試験の一例を図5に示す。これは、水素タンクに 貯蔵された270m³ (Normal)の水素で、避難所生活で 消費される負荷を抵抗器で模擬的に与え、EMSで発電 量と蓄電池の充放電や、水素製造、燃料電池発電などを 最適に運用した時のデータである。7日後にも水素は約 40m³ (Normal)残っており、また蓄電池も残量を50% 以上残したままで自立できることを実証できた。

また,H2One[™]の特徴として,常時は無人運用が可能としている。これは水素の貯蔵圧力を0.8MPaと比較

Table 1 Specification of BCP demonstration model

システム	水素製造量	1m ³ (Normal)/h
仕様	水素消費量	2.5m ³ /h
(最大値)	水素貯蔵量	$33\mathrm{m}^3$, 0.8 MPa, $(270\mathrm{m}^3~(\mathrm{Normal}))$
	温水供給量	75L (40°C)
	太陽光発電量	30kW
	燃料電池出力	3.5kW
	電力貯蔵量	350kWh
	燃料電池効率	95% (発電55%, 温水40%)



Fig. 5 Example of demonstration result of the one-week standalone operation

的低圧にしており,高圧ガス製造にかかわる有資格者の 常駐を不要にしたことで実現した。一方で,水素を扱う システムであるので,安全対策には万全を期している。 図6に図示するように,水素安全においては(1)漏らさな い,(2)検知する,(3)溜めない,の3点を守って構成され ている。



Fig. 6 Safety-conscious design of H2OneTM

このBCPモデルの商用一号機となったのが,2016年3 月に運用を開始した,横浜市港湾局向けの横浜港流通セ ンターに設置のH2OneTM(図7)である。このシステ ムでは、コンテナが2つのパッケージで,川崎マリエン のモデルよりも水素貯蔵量が少ないが,災害発生後に72 時間の情報伝達などに必要な電力をセンターに供給する 能力を有している。

さらに、東芝ではJR東日本からJR南武線武蔵溝ノ 口駅に設置するBCP対応のH2One[™]を受注しており、 2017年春からの稼働予定で製作中である。この例では、 非常時には太陽光発電で製造し貯蔵しておいた水素を、 駅舎の照明などに供給することが計画されている。

237



Fig. 7 H2One[™] BCP model installed at the city of Yokohama's port & harbor bureau

2.3 H2One[™] リゾートモデル

リゾート地においては,豊かな自然環境が基盤となっ ており,CO2の削減や再生可能エネルギーの積極的な導 入等,環境に高く配慮した取り組みが国内外で精力的に 推進されている。東芝ではホテル・リゾート施設内のエ ネルギーを100%自給自足できるCO2フリーの自立型水 素エネルギー供給システムH2OneTMリゾートモデルを 開発した。これはエネルギーインフラが十分整っていな い地域においても,CO2フリーでかつ自立型で設置でき るエネルギー供給システムとなっている。

前述のBCPモデルと異なる点は、年間を通じて大量の 水素を貯蔵し、かつ長期間に渡って有効に水素を利用で きる技術が必要なことにある。省スペースで大容量、か つ安全で長期間水素を貯められる方法としては、水素吸 蔵合金が有効である。東芝における水素吸蔵合金の開発 は古く、1984年に水素吸蔵合金を電池として利用する研 究を世界に先駆けて報告し、ニッケル水素電池の商用化 を実現して、1994年にはトップシェアを獲得した。更に 2000年には超格子構造を有する全く新しい水素吸蔵合金 である"LaMgNi系「超格子合金」"の合成に成功し、こ れは現在のニッケル水素電池に広く採用されている。水 素吸蔵合金は体積当たりの水素貯蔵量が多く、また吸蔵 後は水素化物へと変化するため、低圧においても水素を 高容量で安全に貯めることができる魅力的な材料である。 ニッケル水素電池以外の水素吸蔵合金の利用用途として、 水素吸蔵合金タンクが有望であり、水素エネルギーシス テムには非常に適していると言える。

今回開発したH2OneTMリゾートモデルは、この水素 吸蔵合金タンクを水素貯蔵方法として採用し、新たな水 素吸蔵合金タンクを設計・開発した。前項のBCPモデル にて採用していた低圧水素ガスタンク(0.8MPa)の体 積を約1/10サイズにまで小さくすることができ、ホテル のような敷地面積が限られる場所への設置が可能となっ た。更に水素化物として水素を貯蔵するため、安全性も 向上するメリットがある。図8にリゾートモデルのシス テム構成図を示す。前記の川崎市に設置したBCPモデル



Fig. 8 System diagram of an $H2One^{TM}$ resort model

のタンク6台(36m)分を3.6m幅まで省スペース化を実 現している。

また年間の需要電力量を全て賄うことができるCO₂フ リーの完全自立水素システムを構築するには、太陽光発 電が生み出すエネルギーをいかに年間通じて効率良く貯 蔵・利用していくかが大きな鍵となる。そこで、当シス テムでは次のように運用している。

1)朝から夕方は、太陽光発電にて発電した電気は最 大限に直接利用する。余剰電力は蓄電池へ貯蔵し、更に 余剰となる電力で水素を製造し、水素吸蔵合金タンクへ 貯蔵する。

2) 夜から朝にかけては、太陽光パネルからは電気が 供給されないため、蓄電池から電力を供給し、更に燃料 電池からは電力と温水を供給する。

図9にこのモデルの年間のエネルギー収支のシミュ レーション結果を示す。



Fig. 9 Annual balance of amount of PV power generation and hydrogen energy

最大の特徴は,

1) 夏季に太陽光発電の余剰電力を水素に変換して, その水素を水素吸蔵合金内に蓄えておく,

2)冬季には日照量が減って太陽光発電の出力が下 がってくるため、夏季に貯蓄した水素を利用して発電す る、ことにある。このように、太陽光発電からの電力を 夏季から冬季までシーズンシフトすることができるのは 水素ならではの技術であり、これを蓄電池で構築するこ とは困難と思われる。 本モデルはハウステンボスが様々な最先端技術を導入 し、環境にも配慮したスマートホテル「変なホテル」第 二期棟に設置され、2016年3月にオープンした(図10)。 ホテル1棟分(12室)の電力量をCO₂フリーで年間を通 じて供給することができるリゾートモデルである。今後 は更なる水素備蓄機能の強化による、完全地産地消型の エネルギー供給システムとしての展開を予定している。



Fig.10 H2One $^{\rm TM}$ resort model installed at "Henn-na Hotel" in the Huis Ten Bosch theme park

2.4 H2One[™] 車載モデル

これまで紹介した定置用のH2OneTMシステムは,い ずれも12ftあるいは20ftの標準サイズのコンテナに収容 することで高い可搬性を有している。この定置モデルか らさらに小型化することで機動性を高め,災害時等の迅 速なエネルギー供給を実現するために,図11に示す車載 モデルも開発した。

H2One[™]車載モデルは、4トントラック2台で構成 されており、トラックには水素製造装置、水素貯蔵タン ク、蓄電池、純水素燃料電池を搭載している。水素貯蔵 タンクには、水素を高密度で貯蔵できる水素吸蔵合金を 採用し、従来のBCPモデルの貯蔵能力を維持しながらも



Fig.11 H2OneTM truck model

小型化することで,機動性を高め,災害時には被災地に 短時間で移動し,電気とお湯の供給を行う電源車として 活用できる。また,騒音や振動がほとんど発生しない純 水素燃料電池で発電するため,夜間の使用にも適してい る。

2.5 さらなる展開

今後のさらなる展開としては、上記リゾートモデルの 面展開として、H2One[™]離島モデルの構築を目指して いる。離島地域では本土からの系統から切り離されてい る所が多く、その大半はディーゼル発電に頼っているた めに、発電のエネルギーコストが高い。電力自由化に 向けて、離島における電力コストの高さは、今後大きな 課題となると予想される。燃料油の輸送・貯蔵コスト やCO2の排出量増大,非常時における対応等を総合的に 鑑みると、再生可能エネルギーの利用促進が急務であり、 エネルギーセキュリティの観点からも水素エネルギー利 用のメリットは大きいものとなる。上記リゾートモデル を離島地域へ面的展開するメリットとしては、再生可能 エネルギー源として、太陽光発電以外にも、風力、地熱, 水力,波力,潮力,バイオマス等々,様々なエネルギー 源が豊富にある地域が多く、更に限られた地域での電力 利用・融通が期待できることにある。

また別の展開としては、ビル・事業所等向けに H2One[™]を設置して、常時はFCVやFCフォークリフト などの水素燃料を供給し、また災害発生時にはBCP対応 に適用することも考えられる。これらを発展させると、 EMSによりエネルギーが最適運用される水素タウンの 実現も視野に入ってくる。(図12)

開発した自立型水素エネルギー供給システムの H2One[™]はBCPモデル,リゾートモデル,離島モデル などを中心として,水素地産地消型のソリューションと して展開し,更に様々な技術開発を推進していき,水素 の製造から利活用までを高効率で実現する水素関連事業 へ注力していく。



Fig.12 Further variations deployment of H2OneTM

3. 結言

以上述べたように、東芝は再生可能エネルギー由来に よるCO₂フリーでクリーンな水素を利活用する各種の技 術開発、実証試験を開始している。国がロードマップで 描いている本格的な水素社会の実現に向けては、大規模 な社会インフラの整備により、水素サプライチェーンを 整備して、エネルギーコストを従来の化石燃料なみに引 き下げていく取組みが必要と思われる。一方で、本稿に 示した東芝の水素エネルギーシステム構築の取組みは、 地産地消型で水素を利活用し、新たな付加価値をもつク リーンエネルギー源としての利用の可能性を今すぐに社 会へ提供可能という点で、意義あるものと考えている。

東芝は、太陽光・風力・水力発電など再生可能エネル ギーを利用した発電システム、水電解装置、燃料電池な ど、水素社会の実現に必要な技術を社内に併せもつ企業 として、グループ内の技術を融合し、今後も水素の製造 から利活用までを実現する水素ソリューションの開発を 積極的に展開していきたい。

4. 参考文献

- (1) 中島良,山田正彦,水素製造や燃料電池など水素社会に 向けた技術への取組,電気評論, Vol. 99, No. 11 (2014), pp. 38-42.
- (2) 吉野正人,松永健太郎,中島良,高効率な水素電力貯 蔵システム,東芝レビュー,Vol. 70, No. 5 (2015), pp. 8-11.

(注) エネルギータイムシフト, H2Oneは株式会社 東 芝の商標です。

- 20 -

特集:水素エネルギー利用社会への歩み、ガスタービンと燃料電池の最新情報

大崎クールジェン酸素吹IGCC実証プロジェクトの概要 及び進捗状況

江草 和也^{*1} EGUSA Kazuya **椎屋 光昭**^{*1} SHIIYA Mitsuaki

論説◆解説

キーワード:石炭ガス化, コンバインドサイクル, 酸素吹き, 二酸化炭素, EAGLE Integrated Coal Gasification, Combined Cycle, Oxygen-blown, CO₂, EAGLE

1. 緒言

2014年4月に決定された「エネルギー基本計画」に 定められた通り、これからのエネルギーには、安全性 のS(Safety:安全性)を前提とした上で、3E(Energy Security:安定供給、Environment:環境への適合、 Economy:経済性)の同時達成が求められている。

石炭は、供給安定性及び経済性に優れたエネルギー資 源で、安全性についても長年にわたる実績を有しており、 2015年7月に決定された「長期エネルギー需給見通し」 においては、石炭火力の高効率化を進め、環境負荷の低 減と両立しながら活用することで、2030年の石炭火力の 比率を26%程度とする方向性が示され、引き続き重要な ベースロード電源と位置付けられた。また図1に示す通 り、世界の電源別発電電力量においても、石炭火力は約 4割を占める重要な電源である。





一方で、石炭は他の化石燃料に比べ発電電力量あた りのCO₂排出量が大きいため、高効率なクリーンコー ルテクノロジー開発の重要性は非常に高い。中でも高 効率な石炭ガス化複合発電(IGCC, Integrated Coal

原稿受付 2016年5月16日

*1 大崎クールジェン(株) 総務企画部 研究企画グループ 〒725-0301 豊田郡大崎上島町中野6208-1 Gasification Combined Cycle) については, 超々臨界圧 (USC, Ultra Super Critical) よりもなおCO2排出量を 低減可能な技術として有望視されている。ここで図2に は, 世界のCO2排出量について示す。



Fig. 2 Trend of world CO_2 emission by type $^{(1)}$

前述の通り,石炭火力は将来的にも重要なベースロード電源であり,図3に示す通り運転開始後40年でリプレースされるものと仮定すると2020年以降の30年間で約3,400万kWの石炭火力がリプレース時期を迎えることとなり,その一部はIGCCにリプレースされるものと想定される。



Fig. 3 Envisioned replacement demand for coal-fired thermal power plants in Japan ⁽²⁾

このような状況下,大崎クールジェンプロジェクト はIGCCに燃料電池を組込んだ究極の高効率発電技術で ある石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC, Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle) とCO₂分 離・回収を組合せた革新的低炭素石炭火力発電の実現を 目指して2012年に経済産業省の補助事業として開始し, 2016年度から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)の助成事業へと移管されている。 本稿では,大崎クールジェンプロジェクトの概要及び進 捗状況について紹介する。

2. 石炭ガス化技術

2.1 石炭ガス化技術の開発経緯

我が国におけるIGCCの研究開発は、図4に示す通り、 石炭火力発電の高効率化を目指し1970年代から本格的に 技術開発が行われている。酸素吹石炭ガス化方式は、高 温ガスタービンの適用とIGFCへの発展による更なる高 効率化が期待できる。その中で高効率化に加えて幅広い 石炭が利用できる多炭種対応性の高い石炭ガス化技術と してEAGLE炉の研究開発が進められた。



Fig. 4 Main development of coal gasification and IGCC technology in Japan

2.2 EAGLEパイロット試験

EAGLEパイロット試験は、電源開発㈱がNEDOとの 共同研究事業として北九州市の若松研究所において進め てきたもので、石炭使用量150t/日のパイロット試験設 備によって、これまでに石炭ガス化性能、ガス精製性能、 多炭種対応性等を確認するとともに、石炭ガス化発電シ ステムにおける石炭ガス化ガスからのCO₂分離・回収技 術としての化学吸収法及び物理吸収法の検証が実施され た。大崎クールジェンプロジェクトは、このEAGLEパ イロット試験に続く商用化を目指した大型実証試験に位 置付けられる。

EAGLE炉は、1室2段旋回型噴流床方式のガス化炉 であり、ドライフィード給炭方式、水冷耐火壁構造であ る。特徴は1室のガス化部に上下2段に石炭バーナが配 置されている点と、更に上段バーナからも酸素を供給で きる方式を採用している点にある。この方式により、下 段で石炭灰を溶融させた溶融スラグが安定的に下部のク エンチ部へ排出できる高温雰囲気を作りながら、全体の 酸素供給量をコントロールすることができ,最適なガス 化状態を形成しやすい特徴がある。

またバーナ噴出方向をガス化炉中心部よりずらして接 線方向へ石炭を投入することで、炉内でガスと粒子が旋 回流を形成する方式としている。この効果により粒子の 炉内滞留時間,すなわちガス化反応時間を十分に確保す ることができ高いガス化性能を得ることができる。この 特徴を活かすことで灰溶融点が高い石炭でも比較的高い ガス化効率で運転することができ、幅広い炭種に対して 適合性を有するガス化炉である。図5にEAGLE炉構造 概要およびガス化部断面イメージ図を示す。



Fig. 5 Schematic cross-section of EAGLE gasifier

EAGLEプロジェクトでは、パイロット試験規模において、冷ガス効率82%と高いガス化効率を達成している。また、多炭種対応性においては、図6のEAGLEパイロット試験適用炭種に示す通り、石炭ガス化に適している灰溶融点の比較的低い石炭から従来の微粉炭火力に用いられている石炭まで幅広い石炭に対応可能であることが確認された⁽³⁾。



3. 大崎クールジェンプロジェクト

3.1 会社概要

大崎クールジェン株式会社は、国のクリーンコール政 策に則り、革新的低炭素石炭火力発電の実現を目指す目 的で、中国電力(株)と電源開発(株)の共同出資によるプロ ジェクト実施事業主体として2009年7月に設立された。 社名には、国のクリーンコール政策である「Cool Gen 計画」を実現し、広島県の大崎上島から世界に発信する ことを目指すという主旨が込められている。

3.2 プロジェクト計画

大崎クールジェンプロジェクトは、石炭火力発電から 排出されるCO₂を大幅に削減させるべく、究極の高効率 発電技術であるIGFCとCO₂分離・回収を組合せた革新 的低炭素石炭火力発電の実現を目指す目的で実証試験を 実施するものである。実証試験は図7のプロジェクト全 体計画に示す通り3段階に分けて計画しており、第1 段階ではIGFCの基盤技術である酸素吹IGCC実証試験を 実施し、第2段階では酸素吹IGCCにCO₂分離・回収設 備を付加したCO₂分離・回収型IGCCの実証試験を実施 し、そして最終段階として燃料電池と組み合わせたCO₂ 分離・回収型IGFCの実証試験を計画している。なお、 CO₂輸送・貯留については、本プロジェクトでは実施し ないこととしている。

3.3 主要設備計画



CO2 transportation and storage are outside of the Osaki Coolgen Project.

Fig. 7 Overall plan of the Osaki Coolgen Project

図8にIGCC実証試験の概略図,表1に主要設備概要 を示す。

主要設備の構成は,ガス化設備,ガス精製設備,空気 分離設備,排水処理設備,複合発電設備となっている。



Fig. 8 Process flow of IGCC demonstration system

Table 1 Outline of the main unit

Main Unit	Spec		
Coal Gasification Unit	Oxygen-blown single-chamber two-staged spiral-flow entrained bed Coal feed : 1,180t/day		
Gas Clean up UnitDesulfurization unit : Methyldiethan amine (MDEA) Sulfur recovery unit : Limestone wet s			
Air Separation Unit	Pressurized cryogenic separation Oxygen : 30,000m ³ N/h Nitrogen : 50,000m ³ N/h Oxygen purity : 95%		
Combined Cycle Unit	Dual shaft gas turbine :1300°C Class Reheat & condensing Steam turbine : 170MW class		
Wastewater Treatment Unit	stewater tment Unit High-strength wastewater		
Existing Equipments	Wastewater treatment unit :Low-strength wastewater Stack :200m Indoor coal storage :45,000t Coal conveying system :300t/h ※partially new construction House boiler :Natural circulation boiler (21t-steam/h) Cooling water intake :Deep water intake		
	Cooling water discharge :Underwater discharge Coal berth : 6,000DWT		

3.4 実証試験設備の設計計画・規模の考え方

実証試験設備として、EAGLEパイロット試験炉から 10倍以内のスケールアップ(石炭使用量1,500t/日以内) をした場合の生成ガス量(ガスタービン燃料量)を考慮 し、既存のガスタービンの中から最適なガスタービン (同出力規模で最高効率、低NOx性)を選定した。また このガスタービン(1,300℃級)に必要となる燃料ガス 量に見合うガス化炉の大きさを検討し、石炭使用量を 1,180t/日と決定した。

ガス精製設備,空気分離設備はガス化炉の規模に応じた設備規模,排熱回収ボイラ(HRSG)はガスタービン の排ガス量に応じた設備規模,蒸気タービンはガス化炉 とHRSGの発生蒸気条件に対し最適な型式を選定した結 果,実証試験設備の発電出力は166MWとなった⁽⁴⁾。

各設備のスケールアップ方法として、ガス化炉は HYCOL(石炭使用量50t/日),EAGLEパイロット試 験(石炭使用量150t/日)の成果に基づき構築したガス 化炉設計アルゴリズムを用いており、ガス精製設備は、 EAGLEで得られた成果を踏まえ、化学プラントで培わ れた塔槽類のスケールアップ手法を踏襲した。

また、複合発電設備には、既存のLNGコンバインド 発電技術をベースに、中カロリー石炭ガスと第2段階で のCO₂分離・回収実証試験を考慮し、H₂リッチガスに対 応可能なマルチクラスタ燃焼器を適用した。なお、詳細 については次項に記載することとする。 排水処理設備については、IGCCからの排水は微粉炭 火力の処理対象の濃度と異なること、石炭ガス化特有の 物質も含まれることから、厳しい排水基準が要求される 瀬戸内海水域の適合基準に対応可能なシステムを適用し た。

3.5 マルチクラスタ燃焼器

石炭ガス化ガスをはじめとする水素含有燃料は,燃焼 速度が速く,火炎の逆流リスクが非常に高いため,国内 外共に従来のIGCCでは,燃焼室の手前で燃料と空気を 混合させる予混合燃焼方式ではなく,燃料と空気を別々 に供給し燃焼室以外では火炎の逆流リスクのない拡散燃 焼器が採用されていた。一方拡散燃焼器では,燃料と空 気の混合が不十分となる箇所において,局所的に高温度 領域が発生し,比較的高いNOxが発生するため,窒素 などの不活性ガス(希釈剤)を投入することで対応して いたが,発電効率の低下といった課題があった。そこで 本プロジェクトでは,燃料ガスと空気の急速混合による 希薄燃焼と噴出方向調整による火炎浮上技術を組み合わ せたマルチクラスタ燃焼器を適用し,低NOx化と高効 率化の両立を図った。図9にマルチクラスタ燃焼器の概 要図を示す。



Fig. 9 Schematic of Combustor (5)

3.6 酸素吹IGCC実証試験の目標

第1段階では、EAGLEパイロット試験で検証された 個別プロセスをスケールアップし、連係されたトータル 発電システムとして、性能、信頼性、制御性等の実証を 行う。表2に酸素吹IGCCの実証試験目標を示す。

基本性能である送電端効率は40.5%(HHV)で17万 kW級規模としては世界最高レベルの性能であり,実証 試験規模で40.5%が達成できれば,1,500℃級ガスタービ ンを採用した商用機においては,次世代火力発電に係る 技術ロードマップ(2015年7月中間とりまとめ)のうち 火力発電の高効率化で掲げるIGCCの送電端効率46%を 実現できる見通しが得られることになる。環境性能は, 新規微粉炭火力と同等レベルであり,我が国の厳しい環 境規制にも対応可能な環境特性を有することを検証する。 多炭種適合性に対してはEAGLEパイロット試験と同 様の特性があることを確認するため,基本性能確認のた めの石炭に加えて多炭種対応を確認する石炭による試験 を計画している。

設備信頼性としては、石炭火力として求められる微粉 炭火力と同等の信頼性を目標に、長時間耐久試験によっ て検証する。

プラント制御性・運用性についても設備信頼性と 同様に微粉炭火力と同等の制御性・運用性を目標に, EAGLEパイロット試験で構築したガス化設備とガス タービンを連携させた制御システムに,蒸気タービンを 含めたIGCCプラントとしてのトータル制御性を確認す る。

Table 2 Targets for Oxygen-blown IGCC demonstration

Item	Target		
Efficiency	40.5% (HHV) The highest efficiency on 170MW class in the		
Efficiency	world.		
Emission Louol	SOx : 8ppm, NOx : 5ppm,		
Emission Lever	Particulate : 3mg/m ³ N as 16% O ₂ equivalent		
	Confirmation of coal range for gasification.		
Cool Variaty Compatibility	To be expanded from low ash fusion temp.		
Coal variety Compationity	coal, which are poorly compatible with PCF		
	to high ash fusion temp. coal.		
B aliahilita	To obtain the prospect that plant availability		
Renability	will be more than 70%/year.		
	Load change rate : 1-3%/min.		
Operability	To obtain controllability equivalent to		
	commercial operations.		
	To obtain the prospect that the generating cost		
Economy	in the commercial stage will be the same or		
	less than PCF.		

3.7 CO₂分離・回収型IGCC実証試験

第2段階では、第1段階の酸素吹IGCCにCO₂分離・ 回収装置を追設したCO₂分離・回収型IGCCの実証試験 及び低温作動型サワーシフト触媒実証研究を計画してい る。図10には、第2段階設備の概要図を示す。

CO₂分離・回収方式については、EAGLEプロジェク トで実施された化学吸収法と物理吸収法の成果に基づき 電源開発(㈱)と中国電力(㈱)がNEDO委託事業として比較・ 評価した結果から物理吸収法を採用することとし、石炭 ガス化ガスの約17%を導入しIGCCプロセス全体で発生 する炭素成分の15%相当量を分離・回収出来る規模の装 置を設置し、CO₂分離・回収装置でのCO₂回収率を90% 以上とする計画としている。

第2段階の実証試験ではCO₂分離・回収装置の性能以 外にIGCCとの連係も含め火力発電システムとしての運 用性,経済性,環境性能,CO₂分離・回収装置の追設に よる発電効率への影響等を検証する計画としている。

3.8 CO₂分離・回収型IGFC実証試験

第3段階としては、最終目標であるCO₂分離・回収型 IGFCの実証試験を計画している。現時点では、IGFCに 適合できる石炭ガス化ガスを燃料ガスとする大型の燃料 電池及び燃料電池に対応するためのガス精製技術につい



Fig.10 Schematic of second step (tentative)

て開発段階のため,燃料電池の開発状況等の成果を注視 しながら,最適なIGFCシステム構築の検討を行ってい くとともに実証試験実施段階で適用可能な燃料電池を選 定する計画である。

なお,第3段階に移行するにあたっては,燃料電池の 開発状況を十分踏まえたうえで実証試験の事業評価・実 施の可否の判断を行い,次の段階に進む予定である。

4. 第1段階実証事業の進捗状況

第1段階実証事業は、2013年3月に土木建築工事が着 工し、5月にガス化設備の工場製作を開始し、2014年6 月には機械設備,電気設備据付工事が本格的に着工した。 実証試験発電所を構成する大型機器類は、2014年5月の 排熱回収ボイラ(HRSG)先行搬入を皮切りに、海上輸 送にて建設現場へ搬入している。

2014年9月・10月にガスタービン(GT),発電機およ び蒸気タービン(ST)車室,11月・12月に熱回収ボイ ラ(SGC),ST車軸他,ガス化炉本体およびガス精製設 備,2015年1月には空気分離設備の搬入,据付を実施し, 大型設備の搬入,据付を完了した。図11に,ガス化炉搬 入,図12に,ガス精製設備搬入時の現場状況写真を示す。

各設備ともに、品質向上・工程短縮の観点から可能な 限り工場でのモジュール化を進め、現地据付においては、 現場状況に応じた最適据付工法により工程短縮を図った。 具体的には、GTおよび発電機については、メガベント 工法(ドーリーに設置したメガベント(折りたたみユ ニット構造の四角塔)上にて水切りした後、タービン建 屋まで運搬し、レベル調整後パワーリフターにより各機 器を所定の位置に設置する工法)によるタービン建屋レ ベルへの運搬・据付を行った。図13に、GTおよび発電



Fig.11 Transportation of gasifier



Fig.12 Transportation of Gas cleanup unit

機の搬入時の現場状況写真を示す。

また,SGCおよびガス化炉についてはジャッキアップ 工法(ガス化炉架構上部より,油圧ジャッキを用いて SGC・ガス化炉の上端を引上げ,同時にドーリーにて下 端を水平移動させながら架構内に据付ける工法)による ガス化炉架構への据付を行った。図14には,ジャッキ アップ工法の概要図を示す。

HRSGについては、MHPSフィリピン工場で製作 し、高温部と低温部にモジュール化した後、海上輸送し、 ドーリーにて水切り・搬入を実施した。図15に、HRSG の搬入時の写真を示す。



Fig.13 Transportation of GT and generator



Fig.14 The jacking up method



Fig.15 Transportation of HRSG

大型機器類の搬入と並行して、補機や各機器の配管の 取付けやケーブル布設工事を実施し、2015年7月には主 要配管水圧試験、11月には受電を完了した。現在は、各 機器の単体試運転及び系統試運転を順次行うとともに、 2016年4月から総合試運転を開始し、2017年3月からの 実証試験に向け、社員一丸となって邁進している(図 16)。



Fig.16 Equipment work site of March 2016

5. まとめ

本稿では、大崎クールジェンプロジェクトの概要と現 在建設工事が進む第1段階の実証事業の進捗状況につい て主に説明した。

現在プロジェクトの実施地点においては,建設工事及 び単体試運転が順調に進捗している。2017年3月の実証 試験開始に向け,今後も安全・品質・環境の確保を第一 とし,工事を進めていく所存である。

最後に、本プロジェクトは、NEDO共同研究の 「EAGLEパイロット試験」、「燃料電池対応型石炭ガス化 複合発電最適化調査研究」の成果を反映しここに至るも のであり、経済産業省、NEDO、その他多数の関係各位 のご支援、ご指導に深く感謝の意を表すとともに、引き 続きご支援、ご指導をお願いしたい。

6. 引用文献

- IEA PUBLICATIONS, World Energy Outlook 2015, (2015), pp. 584-585
- (2) 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部編,電源 開発の概要,(2010), pp. 252-255,奥村印刷(株)
- (3) NEDO成果報告書『平成16年度~平成21年度成果報告書 多目的石炭ガス製造技術開発(EAGLE)パイロット試 験設備による研究およびゼロエミッション化技術に関す る研究』, pp. 59-86
- (4) NEDO成果報告書『平成22 ~平成23年度成果報告書 ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト 燃 料電池対応型石炭ガス化複合発電最適化調査研究』, pp. 258-394
- (5) NEDO事業原簿『ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト/ゼロエミッション石炭火力基盤技術/革新的ガス化技術に関する基盤研究事業/石炭ガス化発電用高水素濃度対応型低NOx技術開発』、(2013)、N-2

特集:水素エネルギー利用社会への歩み、ガスタービンと燃料電池の最新情報

MHPSにおけるSOFC-マイクロガスタービンハイブリッド システムの開発状況

富田 和男*1 TOMIDA Kazuo 北川 雄一郎^{*2} KITAGAWA Yuichirou

論説◆解説

キーワード:固体酸化物形燃料電池,円筒形セルスタック,複合発電システム,マイクロガスタービン, ハイブリッドシステム

> Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs), Segmented-in-series Tubular Type Cell-stack, Combined Cycle System, Micro Gas Turbine, Hybrid System

1. 緒言

増加の一途を辿る世界の人口に対し人類が継続的に発 展するには、世界経済を発展させながら、増加し続ける 炭素排出量を抑制し地球環境負荷を低減させる必要があ る。我が国においても、火力発電等の集中電源により構 築された高度な電力網に、高効率な分散電源や再生可能 エネルギーを安全性、供給安定性、経済性、環境性の何 れもが成立するように導入し、適切なエネルギーミック スを確立する必要がある。また、地球資源保全のために も化石燃料の徹底した有効活用が重要となる。

三菱日立パワーシステムズ (MHPS) はSOFC (固体 酸化物形燃料電池: Solid Oxide Fuel Cell) とGT (ガス タービン)を組み合わせた複合発電システムの開発を 1983年より進めてきた。これはSOFC複合発電システム が,小容量の発電設備から大規模な事業用電源に至るま で,あらゆる出力レンジにおいてエネルギーの高効率利 用が可能なためである。

経済産業省が2014年6月に策定した水素燃料電池戦略 ロードマップ(2016年3月改定)に業務・産業用燃料電 池の2017年度市場投入が明記された。MHPSもSOFCと MGT(マイクロガスタービン:Micro Gas Turbine)を 組み合わせたハイブリッドシステムを2017年度から市 場に投入すべく開発を加速している。本論文ではSOFC-MGTハイブリッドシステムの開発状況を報告すると共 に低炭素社会並びに水素社会の実現に向けたSOFC複合 発電システムの活用計画についても紹介する。

2. SOFC複合発電システムの特徴

燃料の持つ化学エネルギーを直接電気に変換できる燃 料電池は、単体でも高い効率で発電することが可能であ

原稿受付 2016年6月3日

 *1 三菱日立パワーシステムズ(株) 燃料電池事業室 〒850-8610 長崎市飽の浦町1番1号

*2 三菱日立パワーシステムズ㈱ 燃料電池事業室 〒220-8401 横浜市西区みなとみらい3-3-1 る。電解質がセラミックスで構成されるSOFCの特徴を 図1に示す。

高温で作動するSOFCはGTと連接することで, 燃料 のカスケード利用と高温排熱のボトミング利用が可能と なり, 高い発電効率を実現可能である。

GTと複合発電システムを構成することにより, SOFCはGTと同じ運転圧力で作動することになる。即 ち加圧下で運転することになる。図2に示すように SOFCは加圧することにより電池性能が向上する。これ は、加圧することでOCV(平衡起電力:Open Circuit Voltage)が向上すると共に、抵抗が低減することによ る。図3に図2の*I-V*特性の傾きから求めたASR(面積 比抵抗:Area Specific Resistance)の圧力依存性を示す。 圧力の向上と共にASRが低下しているが、主に電池反 応に関与する活性化過電圧が低下することによる^{(1),(2)}。

この電池性能の向上も発電効率の向上やコンパクト化 などに寄与させることができることも、複合発電システ ムを構成することの利点の一つである。

燃料となるメタンの水蒸気改質反応は吸熱反応である。 低温作動の燃料電池は改質に必要な熱源を得るために, 外部に設置した改質器で燃料を燃焼すると共に水蒸気を 供給してメタンの改質を行う。一方, SOFCは高温で作 動するため, 白金などの貴金属触媒を用いずにSOFCの アノードに使用するNiで燃料の改質が可能である。更 に, 排燃料を再循環することで改質に必要な水蒸気も自



Fig. 1 The main features of SOFC.

- 27 -



Fig. 2 *I-V* characteristics of segmented-in-series tubular cellstack using a synthesis fuel of reformed methane with steam (S/C = 4) under pressurization. The Cathode of cell-stack is (LaSrCa)MnO₃, the cathode interlayer is (Sm, Ce)O₂.



Fig. 3 ASR change of the segmented-in-series tubular cell-stack shown Figure 2 as a function of test pressure.

給可能となる。即ち改質に必要な"熱"と"水蒸気"を 自前で供給できるため、天然ガスを直接供給して電気を 発生するシステムを構築できる。熱と水蒸気を自給でき る内部改質は、エクセルギー再生の究極の実用例といえ る。

SOFCは固体高分子形燃料電池と異なりCOによる被 毒を受けないため、燃料中のCO含有を許容するだけで なく、燃料として有効利用できる。このため、天然ガス だけでなく、石炭ガス化ガス、消化ガス等も燃料とする ことが可能であり、燃料多様性にも優れる。 更に,SOFCは電解質が固体のため,電解質の散 逸による構成材料の腐食は生じない燃料電池であり, Siemens Westinghouse社が,1990年代には単セルで約 7万時間の耐久試験を実証したことから⁽³⁾,耐久性にも 優れることが期待されている。

円筒形セルスタックを適用したハイブリッド システムの構成

構成材料が全て固体であるSOFCは設計の自由度が高く、複雑な形状のセルも製作できるため、コンセプトに応じて実に様々な形状のSOFCが提案、開発されている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。我々が採用している円筒形SOFCの構造を図4に、システム構成を図5に示す。

高強度のセラミックス製の構造部材である基体管の外 表面に,発電反応を行うセル(燃料極/電解質/空気極 の積層部)を形成し,電子導電性セラミックスのイン ターコネクタで隣接するセルを直列に接続している。こ れによりセルスタック1本当りの電気出力を低電流,高 電圧で効率よく取り出すことができる。このセルスタッ クを束ねて数+kWの電気出力とし,支持部材,燃料と 空気の供給と排出,電流の取り出しの機能を持たせて カートリッジを構成している。カートリッジを必要な容 量だけまとめて圧力容器の中に入れたものがモジュール であり,このような階層構造を採ることで,据付けやメ ンテナンス性まで考慮したシステム化を実現している。

SOFC-MGTハイブリッドシステムの系統を図6に示 す。SOFC は、MGT 燃焼器の上流の高圧部に設置され る。燃料の都市ガスはまずSOFCに投入され、燃料の化



Fig. 4 Appearance of segmented-in-series tubular type SOFC and the cross section structure.



Fig. 5 Configuration of SOFC-MGT hybrid system using segmented-in-series tubular type cell-stack.



Fig. 6 Flow diagram of SOFC-MGT Hybrid system.

学エネルギーがSOFCで直接電力に変換される。その後, 残燃料はMGT燃焼器に供給される。一方,空気はMGT 圧縮機で0.23MPaG程度まで昇圧されてSOFCに供給され, 酸化剤として酸素の一部が使用された後,高温排熱とと もに再びMGTに送られ,空気の持つ顕熱や圧力もエネ ルギーとして下流のMGT側で電力に変換される。燃料 排ガスを再循環することにより改質用の水蒸気も自給で きるシステムとしている。なお,排ガス系統に排熱回収 設備を設置することで,蒸気,温水を同時に供給する コージェネレーションシステムとすることも可能である。

4. ハイブリッドシステムの開発状況

4.1 要素技術開発,並びに耐久性・信頼性の向上

SOFC-MGTハイブリッドシステムの性能を検証する ため、まず初めにMHPS長崎工場に設置した06式と称し たシステムで発電効率52.1%-LHVを確認した。2011~ 2014年度には、引き続き開発した10式システムを東京ガ ス㈱千住テクノステーションに設置し、図7に示す通 り、計画停止までの間、4.100時間超の連続運転を行っ た。夏場の重負荷期も含めて定格負荷一定条件において 経時劣化は見られず、電圧低下率0%/1,000hで安定し て運転できることを確認した。また、常時監視の規制を 緩和するため、起動停止、負荷変化、システムの異常 時を想定した緊急時対応等の運転データを取得し、シス テムの信頼性・安全性を実証した。東京ガスでの運転試



Fig. 7 Long term behavior of 10 model hybrid system installed at Tokyo Gas Co., Ltd.'s Senju Techno Station.

験においてシステム安全性を検証できたことから,合計 出力300kW未満,圧力1MPa未満までのSOFC発電所は, 2015年12月に常時監視の規制が緩和され,設置者の負担 が軽減した。

4.2 ハイブリッドシステム実証機の開発

SOFC-ハイブリッドシステムの競合機種となるガス エンジンと伍していくには、10式システムよりもコンパ クト化を図る必要があった。モジュールのコンパクト化 を図るためにセルスタックの性能向上とカートリッジの 高密充填化について取り組んだ。

06式、10式、15式セルスタックの比較を図8に示す。 10式セルスタックでは直列セル数を48から85まで増加さ せ、かつ、インターコネクタ組成の最適化や空気極の改 良により抵抗を低減した。15式セルスタックでは更なる 高性能化に取り組み、電極と電解質の界面等を改良し、 抵抗を低減した。燃料にH₂/N₂=70/30、酸化剤に空気を 使用し、900℃で燃料利用率60%、空気利用率20%で計 測した*I-V*特性を図9に示す。*I-V*特性の傾きから求めら れるASRは06式が0.48Ωcm²、10式が0.41Ωcm²、15式が 0.33Ωcm²であり、06式に対し10式で約14%、10式に対 し15式で約20%の抵抗低減を図り、セルスタックの性能 を向上させた。更にカートリッジの単位体積当たりの出 力を高めるため、15式ではセルスタックを小径化した。 これは単位体積当たりのセルスタックの表面積を高める ことがカートリッジ性能の向上になるためである。



Fig. 8 Appearance comparison of model 06, model 10 and model 15 cell-stack.

カートリッジ構造を図10に示す。カートリッジは、図 10に示すようにスタック中央の発電部、上部/下部の集 電用リード部から構成され、燃料はセルスタック内側を 上から下へ、空気はチューブの外側を下から上へ流れる。 上下のリード部には断熱ボードが設置され、上部リー ドでは供給燃料の改質を行うと共に、発電に使用された 高温の排空気とセルに供給される低温の燃料が熱交換す る。反対に、下部リードではセルに供給される低温の空 気と発電に使用された高温の排燃料が熱交換することで、 発電部の温度を高く保っている。カートリッジはセルス タックの小径化、密充填化に伴い発熱密度が増加するた め、カートリッジの伝熱・冷却特性を適切に設計し、発 電部及び発電部前後の熱交換部での伝熱量を確保した。

NEDOプロジェクトにてセルスタックの耐久性を(一 財)電力中央研究所にて評価した変遷を図11,セルス タック仕様の比較を表1に示す。平成17年度から実施



Fig. 9 *I-V* characteristics of segmented-in-series tubular cellstack. ■ is model 06, ▲ is model 10, ● is model 15.



Fig. 10 Schematic diagram of cartridge.

Table 1 Specification of segmented-in-series tubular cell-stack applying durability tests in Central Research Institute of Electric Power Industr (CRIEPI).

	Type 1	Туре 2	Type 3 (model 06)	Type 5	Type 6 (model 10)
Cathode interlayer	(LaSr)MnO ₃ -YSZ		(CeSm)O ₂		
The number of series cells	34	48 85		85	



Fig.11 Comparison of long-term durability among different cathodes in segmented-in-series cell-stack in performance with/without Cr contamination.

しているが、プロジェクト開始当初はカソード中間層 (Type1とType2)に(LaSr)MnO₃-YSZ(LSM-YSZ) を適用しており、その電圧低下率はNEDO目標値の 0.25%/1000h以上であった。耐久性を向上するため、プ ロジェクト参画機関であるMHPSと(一財)電力中央研 究所において電圧の低下要因を電気化学的に解析し、耐 久試験後のセルスタックを国立研究開発法人産業技術総 合研究所、九州大学、京都大学、東京大学、東北大学、 ならびにMHPSを含めて解体分析し電圧低下要因を推定 するということを繰り返した。

Type1とType2の主な電圧低下要因は電気化学解析 の結果、カソード過電圧の増加であった。解体分析の結 果、カソード過電圧の増加は、電解質/カソード界面の カチオンの移動が原因であり、粒界拡散と元素濃集、相 変態と再析出、シンタリング、緻密化等が関係してい ると推定された。空気極中間層部での陽イオン移動の 抑制を図るため、中間層材料をLSM-YSZからSmCeO₂ (Type3からType6)に変更し耐久性を高めた⁽⁷⁾。図11 のType6が10式のセルスタックであり、同一のセルス タックを適用した東京ガス千住テクノステーションの10 式システムにおいても、図7に示す通り、同様の傾向が 得られたことから、同一品質のセルスタックを安定して 量産できていることを確認できた。

更に性能を向上させた15式セルスタックの耐久性を図 12に示す。12,000時間経過し、電圧低下率は0.1%/1000h 以下であり、安定した特性を示している。

カートリッジ,モジュール,システムのコンパクト化 を図ることで図13に示す通り,設置面積を10式では06式 の1/2,15式では円筒形セルスタックを細径・長尺化す るとともにカートリッジの充填密度を高めることで,設 置面積を40パーセント強小さくすることに成功した。

九州大学の伊都キャンパスに設置された15式システム を図14に示す。ハイブリッドシステムの先進性を既存発 電設備にはないデザインで可視化することで、地球環境 対策への取組みを人々に伝え、更には人々への環境技術 への意識や関心を高めることを狙った。尚、本システム は公益財団法人日本デザイン振興会が主催する2015年度 グッドデザイン賞を受賞した。



Fig.12 Long-term behavior of model 15 cell-stack.



Fig.13 Comparison of the cartridge, the module and the system on the model 06, model 10 and model 15.



Fig.14 Appearance of model 15 SOFC-MGT hybrid system installed at the Next-Generation Fuel Cell Research Center (NEXT-FC) in Kyushu University.

九州大学の15式システムは、SOFCの本格普及につな げる産学連携の推進を目的に設立された「次世代燃料電 池産学連携研究センター(NEXT-FC)」における、グ リーンアジア国際戦略総合特区「スマート燃料電池社会 実証」に供されており、業務産業用燃料電池を核とした 水素社会の実現に向け実証運転に取り組んでいる。

2015年3月に納入し、試運転後、各種調整を行った上 で発電運転を開始した。負荷上昇試験、停止・ホット状 態からの再起動試験等を実施するとともに、完全自動化 のためのデータを取得し、同年9月の九州大学構内の電 気設備点検のための停電に併せて計画停止した。

その後,再起動し,2015年5月時点で累積発電7,500 時間以上を経過し安定に運転を継続している。初めての 屋外設置の中,台風,落雷,積雪,季節による寒暖差, 熊本地震等を経験した。途中,落雷に伴う瞬間停電での 非常停止もあったが,異常を検知し安全かつ確実に停止 でき,SOFCの損傷はなく即日再起動している。

5. 低炭素社会・水素社会に向けた展開

先進的な低炭素社会・水素社会におけるSOFC複合 発電の燃料電池の適用事例を図15に示す。

SOFC-MGTハイブリッドシステムは、都市ガス、天 然ガスを燃料として、SOFC内部で水素と一酸化炭素に 改質し、発電することを特徴としている。その特徴を生 かし、電気、熱を取り出すコージェネレーション運用に 加えて、水素も取り出せるトリジェネレーションを構成 することも可能である。また、下水処理場由来の消化ガ ス、食品・飲料工場由来のバイオマスをメタン発酵させ たバイオガスを燃料とすることで、再生可能エネルギー としての利用も可能である。これに、水素を取り出す運 用を適用することで、CO₂フリーの水素供給も実現する。 さらに、余剰な再生可能エネルギーによる水の電気分解 などで生成した水素(Power to Gas)を発電に利用す ることも可能である。

これらのことから、SOFC-MGTハイブリッドシステムは、低炭素社会・水素社会に大きく貢献することが期待できる。

6. おわりに

MHPSではSOFC複合発電システムによる高効率化を 当面の地球温暖化対策,省エネルギー化の切り札の一つ と位置付け,技術開発により実用化を進め,安全で持続 可能なエネルギー環境社会の構築に貢献していきたいと 考えている。

そのためにも九州大学での運転を継続すると共に, NEDO助成事業である"円筒形SOFC-マイクロガスター ビンハイブリッドシステムの市場投入に向けた技術実 証"にてユーザーの評価を頂きながら商品力を向上させ, 経済産業省の水素・燃料電池戦略ロードマップに明記さ れた2017年度からの市場投入を目指す所存である。



Fig.15 Study example of advanced applications on SOFC combined cycle systems for the realization of a lowcarbon society and a hydrogen society.

MW級のハイブリッドシステムの開発も並行して推し 進め市場投入を果たしていくと共に,更に大型のGTFC (ガスタービン燃料電池複合発電)並びにIGFC(石炭ガ ス化燃料電池複合発電)へ繋げていきたいと考えている。

謝辞

本論文は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)の共同研究等の成果を含んでおり, 関係各位に感謝を申し上げると共に,15式システムの設 置から試験に至るまで多大なる御指導を賜りました九州 大学,東京ガスの関係各位に心より謝意を表します。ま た,加圧型燃料電池発電所の常時監視の規制緩和にお いて多大なる御指導を賜った一般社団法人日本ガス協会, 一般社団法人日本電機工業会,燃料電池実用化推進協議 会の関係各位に深謝すると共に,今後とも一層の御支援 をお願い申し上げます。更に,御指導,御助言を賜って おります大学,研究機関,並びに開発・検証に御指導頂 いております電力,ガス事業者,メーカー等,全ての関 係各位にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

参考文献

(1) Tomida, K., Hisatome, N., Kabata, T., Tsukuda, H. and Yamazaki, Y., Structural modification of segmentedin series tubular SOFCs using performance simulation on the generation characteristics under pressurization, Electrochemistry, Vol. 77, No. 10 (2009), pp. 865-875.

- (2) Tomida, K., Hisatome, N., Kabata, T., Tsukuda, H., Yamashita, A. and Yamazaki, Y., Optimization of segemented-in series tubular SOFCs with an (La, Sr)CoO3 system cathode and the generation characteristics under pressurization, Electrochemistry, Vol. 77, No. 12 (2009), pp. 1018-1027.
- (3) EG&G Technical Services Inc., Fuel Cell Handbook, seventh edition, US Department of Energy, WV (2004), pp. 8-21.
- (4) Mizusaki, J., Electrochemistry, Vol. 80, No. 3 (2012), pp. 144.
- (5) Ujiie, T., in Solid Oxide Fuel Cells X, K. Eguchi, S. C. Singhal, Yokokawa, H. and Mizusaki, J., Editors, The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ (2007), PV07-07, pp. 3.
- (6) Agnew, G. D., Collins, R. D., Jorger, M., Pyke, S. H. and Travis, R. P., in Solid Oxide Fuel Cells X, Eguchi, K., Singhal, S. C., Yokokawa, H. and Mizusaki, J., Editors, The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ (2007), PV07-07, pp. 105.
- (7) Kobayashi, Y., Tomida, K., Tsukuda, H., Shiratori, Y., Taniguchi, S. and Sasaki, K., Durability of a segmentedin series tubular SOFCs with a (Ce, Sm)O2 Cathode Interlayer: Influence of Operating Conditions, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 161, No. 3 (2013), pp. F214.



特集:水素エネルギー利用社会への歩み、ガスタービンと燃料電池の最新情報

家庭用及び業務用燃料電池の最新動向

越智 一喜^{*1} OCHI Kazuyoshi **川端 康晴***1 KAWABATA Yasuharu 藤木 広志^{*1} FUJIKI Hiroshi

キーワード: 燃料電池,水素,エネファーム,固体酸化物形燃料電池, コージェネレーション Fuel Cell, Hydrogen, ENE-FARM, SOFC, Cogeneration

1. はじめに

ガスコージェネレーションシステム(以下, CGSとす る)は、ガスのエネルギーを利用して発生させる電気と 熱をオンサイトで効率よく利用できるシステムであり、 省エネルギー化やCO2排出量の削減が実現できる。また、 施設や地域ごとに最適な容量の分散型電源を設置するこ とでエネルギーセキュリティを向上させることも可能で ある。

東日本大震災を始めとした昨今の国内外エネルギー情 勢の変化を踏まえ、2014年4月に「エネルギー基本計 画」が新たに閣議決定された。その中で、燃料電池や蓄 電池技術等による分散型エネルギーシステムの普及拡大 が重要政策の一つとして位置づけられ、その存在価値が 高まりつつある。燃料電池は高効率分散型CGSを実現す るキーテクノロジーであり、省エネルギー化の推進と環 境負荷低減、エネルギーセキュリティの向上などの重要 課題を同時に解決しうる切り札として期待されている。

燃料電池CGSは、1990年代にリン酸形燃料電池が業務 用として商品化されたのを皮切りに、2009年には固体高 分子形(Polymer Electrolyte Fuel Cell = PEFC)の家 庭用燃料電池CGS「エネファーム」が、2011年には固体 酸化物形(Solid Oxide Fuel Cell = SOFC)の家庭用燃 料電池CGS「エネファームtype S」が商品化された。現 在は普及拡大に向けて、低コスト化やオプション仕様の 充実が進められている。

さらに,高い発電効率が特長の固体酸化物形燃料電池 の業務用途への適用拡大も期待されており,2017年度の 商品化を目指して開発が進められている。

今回は家庭用燃料電池の最新動向と,現在開発が進められている業務用燃料電池(SOFCタイプ)の開発動向 を紹介する。

2. 燃料電池の概要

2.1 燃料電池の種類

燃料電池は、電気化学反応により直接電気エネルギー

原稿受付 2016年5月17日

*1 東京ガス(株) ソリューション技術部 〒105-8527 港区海岸1-5-20 を生成するため、熱や運動エネルギーを介するエンジン、 タービン方式と比較して高い発電効率が実現できる。さ らに、駆動部が少ないため騒音・振動が小さく、NOx やSOxがほとんど排出されないという利点もある。

電池の構成は,燃料極(アノード)と空気極(カソー ド)を電解質で隔てたセル(電池)から成り,電解質の 違いにより,固体高分子形や固体酸化物形などに分類さ れる(表1参照)。

_						
燃料電池の種類		固体高分子形 PEFC	固体高分子形 PEFC BOFC PAFC リン酸形 PAFC		溶融炭酸塩形 MCFC	
電解質		陽イオン交換膜 (フッ素樹脂系)	セラミック	リン酸	リチウム・カリウム炭酸塩 リチウム・ナトリウム炭酸塩	
媒体イオン		H^+	02	02 ⁻ H ⁺		
作動温度		80~120°C	600~1000°C	190~200°C	600~700°C	
使	用可能燃料	都市ガス、LPガス、メタノール、石炭ガス、純水素、等				
反応式	燃料極	${\rm H_2} \rightarrow 2{\rm H^+} + 2e^{-}$	$\mathrm{O_2} + \mathrm{H_2} \rightarrow \mathrm{H_2O} + 2\mathrm{e}\text{-}$	${\rm H_2} \rightarrow 2{\rm H^+} + 2e^{-}$	$CO_3^{2-} + H_2$ $\rightarrow H_2O + CO^2 + 2e^{-}$	
	空気極	$\begin{array}{c} 1/2\mathrm{O}_2 + 2\mathrm{H}^+ + 2e^- \\ \rightarrow \mathrm{H}_2\mathrm{O} \end{array}$	$1/2O_2 + 2e^{} \rightarrow O_2^{}$	$\begin{array}{c} 1/2O_2+2H^++2e^-\\ \rightarrow H_2O \end{array}$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e^-$ $\rightarrow CO_3^{2-}$	
	全体	$H_2 + 1/2O^2 \rightarrow H_2O$				
主な用途		 家庭用 (小規模発電) 携帯、可搬用 車載用 	 家庭用 (小規模発電) 業務・産業用 事業用 (大規模発電) 車載用 	 家庭用 (小規模発電) 業務・産業用 非常電源用 	 家庭用 (小規模発電) 業務・産業用 非常電源用 	
卷雷効率 %IHV		22~14	45~60	$40 \sim 48$	44~66	

Table 1 The types and characteristics of fuel cells⁽¹⁾

2.2 燃料電池の政策動向

前章で述べたように、「エネルギー基本計画」におい て燃料電池の普及拡大が重要政策として掲げられたのち、 経済産業省の水素・燃料電池戦略協議会にて、「水素・ 燃料電池戦略ロードマップ」が2014年6月に策定され、 水素社会実現に向けた取り組みとして家庭用燃料電池の 更なる普及拡大及び業務・産業用燃料電池の2017年度市 場投入目標が明記された(図1参照)。

2016年3月の改訂版において、家庭用では2020年度 140万台を導入目標とし、目標価格80万円(PEFC型) を目指して更なる低コスト化を進めていくこと、業務・ 産業用では2017年度の市場投入と自立的な普及拡大を進 めていくことが記されている。

ロードマップの実現に向け,業務・産業用燃料電池の 早期実用化を目指した技術開発や実証試験が,新エネル ギー・産業技術総合開発機構(以下,NEDOとする)の プロジェクトで進められている。これまでに5社が採択 され,その他開発メーカーも含めると現在計6社が業務 用SOFCの開発を進めている(表2参照)。


Fig. 1 The strategic roadmap for hydrogen and fuel cells \sim stationary fuel cells $\sim^{\scriptscriptstyle (2)}$

発電容量/種類	メーカー名	備考
3kW/SOFC	京セラ (株)	開発中
A 2HW/SOEC	一法 丁 夹 (扑)	NEDOプロジェクト
4.2KW/SOFC	二冊工業(体)	(2013~)
51-WWW ISOFC		NEDOプロジェクト
SKW 极/SOFC	テンソー (休)	(2015~)
2014W - /SOEC		NEDOプロジェクト
20KW~/SOFC	口立垣桁(杯)	(2014~)
501AW年/SOEC	宮上電機 (批)	NEDOプロジェクト
JUKW RX/SOFC	· 由⊥ 电 1残 (1木)	(2014~)
250LW/2/7 11.1 SOEC	三菱日立パワーシステムズ	NEDOプロジェクト
250KW///1/ JUN SOFC	(株)	(2012~)
(参考)100kW/PAFC	宣十雷機 (株)	商品化溶
(Shi Jiook W/IIII C	田工电饭 (小)	[1] 111 [L 1/A
(参考)200kW/SOFC	Bloom Energy Japan㈱	モノジェネシステム
(\$ 5)2000000000000000000000000000000000000	Dioom Lifergy bupan (iii)	商品化済

Table 2 The list of commercial fuel cells

3. 家庭用燃料電池CGSの最新動向

現在,家庭用燃料電池CGSにはPEFC型とSOFC型の 2種類が販売されており,表3に示したようにPEFC 型はパナソニックと東芝の2社が製造している。一方, SOFC型は現在アイシン精機のみが製造している。

製造	メーカー			
		ハナソニック	果之	「インン棺機
燃料	電池の種類	PEFC	PEFC	SOFC
定格	発電出力	700W	700W	700W
貯湯	量	140 ^{1/2} ^{1/2}	200 ⁹ / _{F #}	28¦%(FCユニット内蔵)
貯湯	温度	約60℃	約60°C	約70°C
74h (70)	定格発電	39%-LHV	39%-LHV	52%-LHV
幼平	定格総合	95%-LHV	95%-LHV	87%-LHV

Table 3 The latest list of commercialized residential fuel cells as of March 2016

3.1 家庭用燃料電池CGSエネファーム(PEFC)の動向⁽³⁾ 「エネファーム」は2009年に世界に先駆けて日本国内 で販売が開始されてから、その高い省エネ性とCO₂削減 効果を特長とした次世代のエネルギーシステムとして一 般家庭への普及が進み,図2の通り2015年末時点で累計 15万台が市場に導入された。

メーカー各社はコストダウンや集合住宅設置仕様の開 発をはじめとする設置性の向上に加え,停電時発電機能 の追加,海外展開など,普及拡大に向けた多角的な取り 組みを実施してきた。今回は集合住宅設置仕様と停電時 発電機能の2点を紹介する。

都心部の半数以上の世帯が集合住宅であることから, 東京ガスはエネファームの更なる普及拡大に向け,パナ ソニックと共同で集合住宅向けエネファームの開発を行 い,2014年4月より販売を開始している。本システムは, 図3に示すようなマンション開放廊下側のパイプシャフ ト内への設置を目指し,機器本体の気密性を向上させ, さらに高所設置に対応する耐震性や耐風性も確保し,地 上100m以上の超高層マンションへの設置も可能となっ ている。2014年4月から発売が開始された集合住宅向け モデル(新型機)と2013年4月から販売開始している戸 建モデル(従来機)の各商品仕様を表4に示す。

耐震性を高めるために機器本体をアンカー固定する脚 部の強度を向上させ、一般財団法人日本建築センターに おける超高層ビル屋上の耐震クラスBに相当する1.0Gに 耐える設計となっている。また、機器内部への風圧の影 響を低減させるため、燃料電池ユニットの給排気部を集 約して30m/sの強風時でも運転継続可能な耐風性を確保 している。

また、東日本大震災以降、停電時でもエネファームの 電力を使用したいというニーズを受け、「停電時発電機 能」を備えたオプション品(オプションA,B)が開発 された(表5参照)。オプションAは、停電発生時にエ ネファームが運転している場合に限り、発電電力の継 続供給が可能な機能である。オプションBは、停電発生 時にエネファームが停止していても、電源ユニットの電 力を用いてエネファームを起動することで、電力供給 が可能となる。なお、停電時の出力は、オプションAは 700Wであるが、オプションBは蓄電池からの供給分も 合わせると最大1,200Wの電力が使用可能である。加え て、都市ガスと水道が使用できない場合でも、蓄電池に 貯めた電力を最大500W使用することもできる。



※2009~2014 年度は、補助金交付決定ベース (資源エネルギー庁作成データ)。 ※2015 年度は、2015 年 12 月 18 日時点での補助金交付決定ベース (一般社団法人 燃料電池普及促進協会集計)。

Fig. 2 The trend of the spread number of ENE-FARM⁽⁴⁾



Fig. 3 Residential fuel cell installed in the pipe shaft

Table 4 Comparison of specifications between the new PEFC model for condominiums and previous one

		従来機	新型機
	出力		←
	秋 雨山上	39.0%LHV/	
		35.2%HHV	←
	教同収益索	56.0%LHV/	,
hu ar	杰回収効率	50.6%HHV	
化生用色	磁入动素	95.0%LHV/	<u>~</u>
		85.8%HHV	<u>`</u>
	タンク容量	147L	\leftarrow
	耐風性能	15m/sec	30m/sec
	耐震性能	0.4G対応	1.0G対応
		H 1850mm	H 1750mm
	燃料電池	W 400mm	W 399mm
		D 400mm	D 395mm
「」法		H 1850mm	
	貯湯ユニット	W 560mm	\leftarrow
		D 400mm	
千日	燃料電池	90kg	00kg
里重 (ユニット	JOKg	JJKg
(+4)*/	貯湯ユニット	55kg	54kg

Table 5The specifications of two option units for power
generation function during a blackout

停電時発電機能		オプションA	オプションB
			(1)自立起動用電源ユニット
			H350mm, W605mm, D155mm
		発電継続用切替ユニット	(14kg)
4	法(質量)	H325mm, W485mm, D155mm	
	は(良生)	(13kg)	(2)自立起動用切替ユニット
			H325mm, W485mm, D155mm
			(20kg)
	広 早	191-0	(1)20kg
	貝里	IJKg	(2)14kg
Ē	设置場所	屋内壁掛け設置	屋内壁掛け設置
	発電継続	0	0
	自立起動	×	0
	蓄電容量	×	1000Wh
	最大使用 電力	700W	1200W
	発電継続 可能	700Wまでの使用:最長約4	700Wまでの使用:最長約4日
LIL AR	時間の目安	日間 (96時間)	間 (96時間)
性能		○停電時専用コンセント (100V)	○停電時使用可能コンセント
		(100V) ※信雪畦の五届田司	(100V) ※通覚・信雪時とた毎日可
	停電時のエネ	○時退コーット	○茲雪油玄雪
	ファーム電力	○月初ニーシー	○雷电池元电
	供和冗		○バックアップ劫酒地
			○ハックノッノ恐腐機
			○非吊灯 (10₩)

3.2 家庭用燃料電池CGSエネファームtype S(SOFC) の動向⁽⁵⁾

アイシン精機は、大阪ガス、京セラ、長府製作所、ト ヨタ自動車と共同で固体酸化物形燃料電池(SOFC)タ イプのコージェネレーションシステム(エネファーム type S)を開発し、2012年4月より販売している。

本システムの最新機が2016年4月より販売開始されて いる。最新機は、発電時の熱損失を低減することで従来 機より5.5ポイント発電効率を向上させ、家庭用クラス では世界最高となる52%(都市ガス13A)を実現してい る。さらに、発電効率の向上による廃熱回収量の低下を 考慮した貯湯タンクの容量変更を行い、現行品の90Lか ら28Lに小型化することで、本体サイズが大幅に縮小さ れている(表6参照)。

Table 6 Comparison of specifications between the new residential SOFC model and previous one

		従来機	新型機
	発売日	2014年4月1日	2016年4月1日
	発電出力	通常時:50~700W	通常時:50~700W
		自立時:350W	自立時:700W
性能	定格発電効率	46.5%LHV	52.0%LHV
	定格総合効率	90.0%LHV	87.0%LHV
	貯湯タンク容量	90L	28L
	貯湯温度	約70℃	<i>—</i>
	燃料電池 ユニット	H935mm, W600mm, D335mm	H1195mm, W780mm, D330mm
「法	セット用 熱源機	H1760mm, W740mm, D310mm	H750mm, W480mm, D240mm
重量	燃料電池 ユニット	96kg	106kg
(乾燥)	セット用 熱源機	91kg	38kg
設置スペース		約1.9m ²	約1.4m ²
ガス種		都市ガス、LPガス	
定期交換部品		5.5年目に交換	10年間交換不要

4. 業務用SOFCの開発動向

2項で述べたように、2017年度の商品化に向けて、国 内の各メーカーが業務用SOFCの開発を進めている。こ こでは、小型SOFC開発を行っている京セラと三浦工業、 大型SOFC開発を行っている三菱日立パワーシステムズ の動向を主に紹介する。

4.1 業務用小型SOFCの開発動向

4.1.1 京セラにおける小型SOFC開発 京セラは、3 項で述べたエネファームtype Sのセルスタックを製造し ているメーカーであり、SOFCセルスタックの技術・製 造に関し強みを有している。その強みを活かし、2017年 度の商品化を目標に3kW級の業務用SOFC開発を進め ている。

開発中の3kW級SOFCシステムの目標仕様を表7に 示す。発電効率50%以上,総合効率80%以上を目指して おり,既存機器のラインナップがない小出力帯における 高効率CGSとして期待される。

東京ガスを含めたガス4社(大阪,東邦,西部)は 2017年度の商品化に向け,本システムの実証評価に協力 している。東京ガスの社内実証では、システムの連続耐 久性の評価を行い、1万時間超においても発電効率50% 以上,発電出力3kW以上という安定した運転実績を得 ている。社内における最新の実証機の外観を図4に示す。 さらに、2015年度には業務用分野のお客様先における実 証評価も開始し、実環境下での省エネ性、環境性の評価 を進めている。

項目	目標仕様	備考
AC定格発電出力	3kW	
AC定格発電効率	50%-LHV以上	
総合効率	80%-LHV以上	
寸法	W1150×D670× H1700mm	キャスター除く
重量	450kg	乾燥時

Table 7 The target specifications of 3kW-class SOFC system



Fig. 4 Field test of 3kW-class SOFC system at Tokyo Gas

4.1.2 三浦工業における小型SOFC開発⁽⁶⁾ 三浦工業 は住友精密工業と共同で、5kW級の業務用SOFCシス テムを開発している。三浦工業は、国内トップシェアを 誇るボイラに加え、水処理や食品機の販売、さらにはそ のメンテナンスなど、多岐に渡る事業を展開している。 これまでに培ってきた燃料ガス・廃熱の高度利用技術、 システム化ノウハウを活用し、小型SOFC開発に取り組 んでいる。

開発中の5kW級SOFCシステムの目標仕様を表8に 示す。SOFCシステムは、発電効率が高い一方で熱損失 が小さくなるため、廃熱回収量が相対的に小さくなる。 目標仕様から熱電比を計算すると、0.88と1を下回り、 既存の5kW級CGS(熱電比1.9)と比べてかなり小さい ことがわかる。そのため、これまで普及が進まなかっ た事務所ビルやコンビニエンスストアなどに代表される 熱電比が1以下の業務用施設への適用拡大が期待される。 特に、その高い発電効率と総合効率は、業務用分野にお ける一次エネルギー消費量及びCO₂排出量の削減に大き く貢献できると考えられる。三浦工業の試算では、将来 の市場ストックが5kW級・15万台とした場合、年間の 一次エネルギー削減量が約86万kL(原油換算)、CO₂削 減量が約196万t-CO₂と報告されている。

また、本SOFCシステムはコンパクトな設計を目標 にしている。一般的なSOFCコージェネレーションシ ステムは、発電ユニットと貯湯ユニットから構成され るが、発電ユニットの目標寸法は500mm×1,000mm× 1,500mmを目指している。都心部の小規模店舗などでは、 設置スペースが限られる場合が多いことから、このよう なコンパクトなCGSの開発が期待される。

本開発は、NEDOの「固体酸化物形燃料電池を用いた 業務用システムの実用化技術実証」(以下,NEDO実証 事業と記載)の助成を受けており,2013年度からシス テムの実証評価を進めている。2013年度は5サイトに て長期耐久性の確認を行い、2014年度の後半には上記5 サイト中4サイトにて改良型試験機に入れ替えて評価を 開始した。さらに、2015年度はより商品機に近づいた新 型機の評価も開始した。東京ガスを含めたガス3社(大 阪,東邦)は本実証に協力しており,各社試験場におい て実証機を設置し評価を実施した。千住試験場に設置し たSOFCシステムの外観図を図5に示す。本システムに おいて8000時間超の安定した運転実績を得ている。

また、本システムは大成建設のZEB(ネット・ゼロエ ネルギービル)実証棟にも設置されており、ZEB棟のエ ネルギー供給を構成する重要な要素として運用され、検 証が行われている。SOFCシステムは、その高い発電効 率と総合効率により、ZEB棟に代表される将来の民生用 分野における省エネ、省CO₂の実現に向けて幅広く活用 されることが期待される(図6,7参照)。

項目	目標仕様	備考
燃料使用量	8.80kW	都市ガス
発電量 AC	4.20kW	
発電効率 AC	48.0%-LHV	
排熱回収量	3.70kW	
排熱回収効率	42.0%-LHV	
総合効率	90.0%-LHV	
寸法	$\texttt{W500}\times\texttt{D1,000}\times\texttt{H1,500mm}$	
耐久性	4万時間以上	初期性能10%低下

Table 8 The target specifications of 5kW-class SOFC system



Fig. 5 Field test of 5kW-class SOFC system at Tokyo Gas



Fig. 6 The demonstration of ZEB by Taisei Corporation





4.2 三菱日立パワーシステムズにおけるSOFCハイブ リッド発電システムの開発動向^{(7),(8)}

三菱日立パワーシステムズは、タービンをはじめとす る大型発電設備に関する実績が豊富にあり、非常に高 い火力発電技術力・環境技術力を有している。その知 見を活かし、省エネ・省CO₂を実現するシステムとして、 SOFCハイブリッド発電CGSの開発を進めている。

本システムの最大の特徴である「ハイブリッドシステム」とは、SOFCとマイクロガスタービン(MGT)の 2段階発電システムのことである。図8にシステムの系 統図を示す。燃料である都市ガスをSOFCに投入し、排 出される燃料オフガスと空気をマイクロガスタービンへ 投入する。燃料オフガス中に含まれる未反応の燃料(水 素等)をマイクロガスタービンで使用することで、燃料 利用率を向上させ、発電効率を55%まで高めるシステム として開発を進めており、目標仕様は表9の通りである。

本システムは、2011 ~ 2012年度に設計・開発を行い、 2012年度からNEDO実証事業の助成を受け、発電実証を 行うとともに2017年度商品化に向けた課題抽出を行った。 本実証機は東京ガスの千住テクノステーションに設置さ れ、長期耐久性の検証や安全性の検証が行われた。長期 耐久性検証試験では、この出力帯では世界初となる4,100 時間の長期耐久試験を行い、システムの性能低下が無い ことが確認された(図9参照)。また、停電等によるシ ステム異常を想定したインターロックの検証も行い、シ ステムの安全性も確認されている。また、本検証データ はSOFCの規制緩和に活用され、本システムも該当する 合計出力300kW未満、圧力1 MPa未満までのSOFCは常 時監視の対象から外れた。

上記実証試験で得られた成果を反映させ、さらに省ス ペース化・高性能化を目指して電極と電解質の界面等を 改良したセルスタックを用いた新型機の開発が進められ ている。セルスタックの小口径化によるシステム小型化 のイメージを図10に示す。円筒形セルスタックを小口径 化することで充填密度が高まり、設置面積が約4割削減 される見通しが得られている。最新の実証機は、九州大 学の伊都キャンパスを実証フィールドとした「スマート 燃料電池社会実証」において,業務産業用燃料電池を核 とした水素社会の実現に向けた取り組みの一環として評 価が進められている(図11参照)。



Fig. 8 The system flow image of 250kW-class SOFC-MGT Hybrid System

Table 9 The target specification of 250kW-class SOFC-MGT Hybrid System

項目	商品化時目標
AC発電出力	250kW
AC発電効率	55%-LHV
総合効率	730/ I HV
※廃熱は温水利用	/ <i>J</i> %-LIIV



Fig. 9 Stable operation more than 4,000 hours of 250kW-class SOFC-MGT Hybrid System at Tokyo Gas



Fig.10 The downsizing plan of Hybrid System by the new small caliber cell-stacks "15ver. model"



Fig.11 Field test of the new model 250kW-class SOFC-MGT Hybrid System at Kyushu University

5. 終わりに

化石燃料への依存度が増している昨今,省エネルギー と環境負荷低減に貢献し,将来の水素社会実現の第一歩 となりうる燃料電池CGSへの期待は高まっている。

家庭用燃料電池CGSは,2009年の販売開始から7年を 経て,省エネ・省CO₂を実現する次世代機器としての認 知が進むとともに,お客様ニーズを的確に反映した様々 なオプションの提供により,着々とその普及台数を伸ば してきた。また,業務用燃料電池CGSも,2017年度商品 化という目標に向けて官民一体となった取り組みが進め られ,実環境下での実証評価が行われる等,商品化に向 けた最終段階に入りつつある。

東京ガスは、家庭用及び業務用燃料電池CGSの普及拡 大を通じて、「快適な暮らしづくり」と「環境に優しい 都市づくり」に貢献していきたいと考えている。

6. 引用文献

- 一般社団法人 日本電機工業会
 https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/fuel/about.html>(参照2016年5月17日).
- (2) 経済産業省<http://www.meti.go.jp/press/2015/03/
 20160322009/20160322009.html>(参照2016年5月17日).
- (3) 渡邉崇之,小笠原慶,小林広介,関根大輔,山田浩一郎,佐野晃,平子俊哉,普及拡大に向けた新型エネファームの開発,第21回燃料電池シンポジウム講演予稿集(2014), PP. 8-11.
- (4) エネファームパートナーズ<www.gas.or.jp/user/ comfortable-life/enefarm-partners/common/ data/20151221_web.pdf>(参照2016年5月17日).
- (5) アイシン精機 プレスリリース < http://www.aisin.
 co.jp/news/2016/010405.html>(参照2016年5月17日).
- (6) 井上一信,徳永幸博,田中靖国,山本英貴,竹本真典, 5kW級 業務用SOFCシステムの開発と実証評価について,第22回燃料電池シンポジウム講演予稿集(2015), PP. 54-55.
- (7) 小林由則, 安藤喜昌, 西浦 雅則, 冨田和男, 岸沢浩, 眞 竹徳久, 三菱重工技報 Vol. 50 No. 3 (2013), PP. 62-66.
- (8) 岩田光由,大澤弘行,森龍太郎,樋渡研一,西浦雅則, 岸沢浩,安藤喜昌,冨田和男,小林由則,北川雄一郎, 分散型電源としての高効率SOFC発電システムの開発状 況,第22回燃料電池シンポジウム講演予稿集 (2015), PP. 50-53.



特集:水素エネルギー利用社会への歩み、ガスタービンと燃料電池の最新情報

りん酸形燃料電池の適用事例

大内 崇*1	吉岡 浩 ^{*1}	堀内 義実 ^{*1}	黒田 健一 ^{*2}
OUCHI Takashi	YOSHIOKA Hiroshi	HORIUCHI Yoshimi	KURODA Kenichi

キーワード: りん酸形燃料電池,バイオガス,純水素,低酸素空気供給,火災予防 PAFC, Biogas, Pure-hydrogen, Low-oxygen Exhaust Air, Fire Prevention

1. 緒言

燃料電池は環境適合性に優れたコージェネレーション 装置として位置づけられるとともに,東日本大震災以降 災害時のバックアップ電源として病院等の重要負荷に給 電を継続できる災害対応型の分散型電源としても注目さ れている。

また,水素発電の一つである燃料電池は電気を貯める "電池"とは異なり,水素と酸素を供給することで電気 を発生させる発電システムであり,水素社会を実現する ための水素エネルギー利活用ツールの一つとして期待さ れている。現在,家庭用燃料電池(エネファーム)や燃 料電池自動車の形で着実に普及が進み,発電装置として の燃料電池の認知度は一層高まってきている。

一方,定置用燃料電池の普及促進において家庭用燃料 電池より単機容量が大きい業務・産業用燃料電池への水 素利活用の期待も大きくなってきており,実用化に向け た開発が各社で活発となってきた。

当社は長年にわたる基礎研究や90台を超えるフィール ドテストを経てりん酸形燃料電池の開発に成功し,現在 100kW燃料電池コージェネレーション(100kW燃料電 池)を販売している。都市ガスに加え,カーボンニュー トラルなバイオガスや副生水素等,発熱量の異なるさま ざまな燃料に対応可能である。本報では、りん酸形燃料 電池の適用事例を中心とした当社の水素事業への取り組 みに関して紹介する。

2. 100i装置の開発

2.1 燃料電池の特徴と種類⁽¹⁾

燃料電池は,従来の内燃機関による発電方式と異なり, 機械エネルギーに変換することなく直接電気エネルギー を取り出すことができる。このため,小容量でも高い発 電効率が得られるだけでなく,非燃焼な発電方式のため, 排気ガス中のNOxはりん酸形の場合で5ppm以下と非

原稿受付 2016年5月9日

Alter Holzhafen 15 D-23966 Wismar

常にクリーンである。ピストンのような駆動部分もない ため、振動や騒音も非常に小さい。

燃料電池の発電の仕組みとして、一般的に水の電気分 解の逆の反応と説明される。図1に燃料電池の発電原理 を示す。具体的には燃料ガスと空気中の酸素を直接反応 させるのではなく、電解質を介して正極と負極で別々に 酸化還元反応を起こさせ、正極および負極に接続された 外部回路に電子を引き出すことで電気エネルギーを取り 出すものである。"電池"の名称がついているが、燃料 ガスと酸素を供給し続ける限り電力を取り出すことがで きるいわば化学発電装置であり、二次電池のように充電 はできない。一つの単電池(セル)で発生する直流電圧 は1V以下と小さいため、セルを直列に積層して直流電 圧を昇圧している。燃料電池本体を"セルスタック"と 称するのは、セルを積層(スタック)した構造であるこ とに由来している。



Fig. 1 Generation principle of PAFC

燃料電池の電解質膜には、イオン電導性があり、蒸発 しにくく、燃料ガスと酸素が直接反応しないためのガス 遮断性が求められる。この要求を満足するものとして固 体高分子膜、リン酸溶液、溶融炭酸塩、固体電解質など が採用されている。それぞれの電解質は、イオン電導性 を発揮する温度が異なり、その特性に応じて用途が住み 分けされている。

たとえば、自動車用では常温からの始動が要求される ため、100℃以下で発電可能な固体高分子形燃料電池が

^{*1} 富士電機㈱ 燃料電池技術部

^{〒210-9530} 川崎市川崎区田辺新田1-1 *2 Fuji №2telligence GmbH

採用されている。温度が低いことから安価材料を使用で き,起動停止や出力変更がしやすいメリットがある。

また,発電事業用では,反応速度をあげられる高温型 の溶融炭酸塩形(650℃)や固体酸化物形(1,000℃)が 採用されている。発電効率を高くすることができるメ リットがあるが,材料に対して高度な耐久性が要求され ること,ヒートサイクルによる損傷を回避するため起動 停止や出力変更が難しいなどの課題がある。

一方,中温型のりん酸形(200℃)は、材料として一般的な工業用カーボン材を使用することができるため、 新たな材料開発は不要で耐久性も確認済みである。また、 排熱として90℃の温水を取り出すことができるため、吸 収式冷温水器を利用して空調用の冷水も供給可能である。 出力変更も容易なため、顧客デマンドにあわせて昼夜で 出力を変えるパターン運転の他、停電時の顧客施設特定 負荷への独立給電運転にも対応可能である。さらに、負 荷遮断も可能なため、系統異常発生時には系統から即時 に解列して燃料電池内部補機にのみ給電を行う待機運転 に移行し、系統復帰後に再連系して短時間で送電を再開 することが可能である。

このように、りん酸形は柔軟な出力変更が可能で、排 熱も空調や温水利用できる使い勝手の良い発電装置であ るといえる。

2.2 開発経緯^{(1),(2),(3)}

図2に、富士電機におけるりん酸形燃料電池の開発経 緯を示す。販売中のりん酸形燃料電池は、1973年に開発 に着手し、オンサイト用として50kW、100kW、500kW の燃料電池による90台以上のフィールドテストを行い、 1998年から経験とノウハウを反映させた100kW商品機 (FP-100E)の販売を開始した。発電容量は、比較的エ ネルギーコストが割高な中小規模の施設にターゲットを 絞り、100kWに特化して調達や生産、エンジニアリン グの効率化を図ってきた。セルスタックの長寿命化や設 置性向上にも取り組み、2009年に周辺設備を含めオール インワンパッケージ化したFP-100i商品機を開発した。

燃料に関しては改質器や脱硫器を自社開発している強 みを活かして、インフラが整備されている都市ガスの他、



Fig. 2 Development process of PAFC

再生可能エネルギーとして注目されている下水消化ガス でも発電が可能である。さらに、次世代のインフラとし て期待され、より高い発電効率が得られる水素ガス専用 機もラインアップしている。FP-100i商品機は2009年度 「日経優秀製品・サービス賞 優秀賞」を受賞した。

図3に商品機(FP-100i)の外観,表1に,燃料電池の代表機種における主な仕様を示す。



Fig. 3 The appearance of 100kW PAFC (FP-100i)

Table 1 PAFC specification

Fuel	City gas	Biogas	Hydrogen gas
Output	AC 105kW		
Rated voltage, frequency	210V (50/60Hz)		
Efficiency	42% (LHV)	40% (LHV)	48% (LHV)
Thermal output	123kW	116kW	99kW
Total efficiency	91% (LHV)	85% (LHV)	93% (LHV)
Main dimensions	2.2m(W) x 5.5m(L) x 3.4m(H)		
Weight	14 ton 13.5 ton		

次に、現在の100kW機のオプション対応を表2に示 す。JIS適合の国内仕様機に加え、CEマーキング適合の EU仕様機もラインアップしている。EU仕様機では、ド イツの系統連系規格の認証も取得している。

Table 2 PAFC option list

Trmo	Fuel	Function			
1 ype	ruei	CHP	Grid independent	Fuel switch	Low Oxigen
JIS	City gas	0			
	(Emergency use)	0	0	0	
	Biogas	0			
	Hydrogen gas	0			
CE	City gas	0			
	(Fire prevention)	0			0
	Hydrogen gas	0			

オプションとしては、国内(JIS)仕様機では独立給 電機能とバックアップ燃料(LPガス)との燃料切替機 能を有する災害対応型⁽⁵⁾,EU仕様機では低酸素空気供 給機能を有する火災予防対応型⁽⁶⁾等がある。

2.3 100kW燃料電池の概要

燃料電池のマーケットとして有望な欧州や東アジアでの普及拡大を念頭に, FP-100i商品機では寒冷地対応や

設置性の向上を図っている。

図4に、100kW燃料電池の構造図を示す。 1)オールインワン パッケージ

100kW燃料電池は,現地での据付けが容易なパッケージ構造を採用しており,トラック輸送を考慮して横幅を 2.2m,高さを2.5m(据付時は3.4m)としている。従来, 別置であった窒素設備,水処理設備の付帯設備もパッ ケージに内蔵するとともに,排熱処理用の空冷式ラジエー ターを天井に設置する構造としたため,現地での配線配 管工事の大幅削減と設置面積の半減化を実現している。





Fig. 4 The structural drawing of 100kW PAFC

2) 寒冷地対応

従来機では、気温が-5℃を下回る寒冷地では屋内設置としていたが、FP-100i機ではパッケージ内に隔壁を設けて凍結防止が必要なエリアを区画化し、そのエリアが0℃を下回らないように機器放熱と給排気量を最適制御することで、気温-20℃~+40℃の環境でも屋外設置できる設計とした。また、環境試験室における運転試験を実施し、上記温度範囲で運転継続可能なことを確認した。図5に環境試験室の外観を示す。

これにより,日本だけでなく,熱需要の高い欧州への 拡販を可能とした。

3) 耐震性の向上

耐震性の向上を図るため,計画段階から装置架台と燃 料電池スタックの強度解析を実施し設計へ反映させた。 さらに実機を振動試験機に搭載し,新潟中越地震相当の 地震波による振動試験を行い,振動試験完了後に装置が 問題なく発電できることを確認した。図6に耐震試験状 態を示す。



Fig. 5 The appearance of the environmental test room



Fig. 6 Appearance of the earthquake-resistant examination

3. りん酸形燃料電池の用途開発^{(2),(3)}

100kW燃料電池は、従来都市ガスを燃料とするコー ジェネレーション用途がほとんどであったが、さらなる 普及拡大を目指して、燃料電池の特徴を活かしたアプリ ケーションの開発に取り組んできた。図7に用途開発の 状況を示す。当社では、使用できる燃料種の拡大と、燃 料電池の特長を活かした機能追加を進めている。



Fig. 7 The use expanding of 100kW PAFC

3.1 バイオガス(下水消化ガス)利用への取り組み

100kW燃料電池には,脱硫器・改質器・CO変成器で 構成される燃料改質装置が内蔵されており,改質装置の 仕様を一部見直すことで多様な燃料に対応できる。富士 電機は,改質装置を自社開発している強みを活かして, 燃料として都市ガスやバイオマス由来の下水消化ガスに 対応した100kW燃料電池を販売している。

3.2 災害対応への取り組み

地震等で都市ガスが停ガスした場合には、瞬時にバッ クアップ燃料(LPガス)に切替えて発電を継続すると ともに,重要負荷に電力を供給できる災害対応型を販売 している。

図8に災害対応型燃料電池の通常時と災害時の電源供 給方法と燃料切替え方法を示す。⁽³⁾



Fig. 8 The power supply method of 100kW PAFC

3.3 水素利用への取り組み

水素社会の実現に向けて,水素製造,水素利用,水素 貯蔵,水素輸送など水素サプライチェーンの技術開発が 加速している。燃料電池は水素と酸素から電気化学反応 により直接電気を取り出せる水素利用に最適な発電シス テムである。

1) 水素仕様燃料電池^{(2),(4)}

水素利用への取り組みとして、純水素を装置へ供給し て発電を行う水素仕様100kW機をラインアップしてい る。燃料の水素を直接燃料電池スタックに供給し、燃料 電池の燃料極から排気される未利用水素をエゼクタリサ イクル方式により再循環させて発電に有効利用すること で、発電効率は都市ガス仕様機の42%に対して48%と高 めている。また純水素を直接供給して発電できるため複 雑な改質装置や改質蒸気が不要となり、都市ガス仕様機 と比べより多くの高温排熱を取り出すことができる。

図9に、都市ガス仕様機と水素仕様機のシステムフ ローを示す。



Fig. 9 System flow comparison (CHG & Pure-H2)

水素仕様100kW機は, 高効率な燃料電池として水素 エネルギー時代の有効な水素利活用手段となる。燃料を 水素とすることで, 燃料電池のポテンシャルをより引き 出せ, 高効率化できることから, 今後水素仕様100kW 機の海外展開に取り組んでいく。また, 燃料電池開発で 培った改質技術の活用し, 水素製造についても検討して いく。

4. 納入・適用事例

過去5年間の納入台数を図10に示す。近年はバイオガ ス仕様燃料電池の出荷台数が増加している。実用化当初 は,燃料電池の先進性や環境性の高さで注目されること が多かったが,燃料電池の特性を活かした独自用途への 展開を進めている。

以下に国内と海外の納入・適用事例について紹介する。



4.1 国内の適用事例

1) バイオガス仕様燃料電池^{(1),(2)}

下水処理場向けでは、2012年7月に施行された再生可 能エネルギー電力固定価格買取制度(FIT)が追い風と なっている。カーボンニュートラルである下水消化ガス で発電した場合,発電した電力を1kWhあたり39円で 20年間売電することができる。図11にバイオガス(下水 消化ガス)システムの導入効果を示す。



Fig.11 Introduction effect of the biogas system (FIT)

262

- 42 -

発電効率の高い燃料電池は、同規模の他方式の発電装 置と比較して、より多くの電力を発生させることがで き、ライフサイクルコストの点から、バイオガス仕様燃 料電池が選択される事例が増えている。2014年度に10台、 2015年度に8台を納入している。

2) 災害対応型燃料電池^{(2),(5)}

国内のコージェネレーション市場は, 燃料価格の高騰 により2004年から徐々に減少傾向にあったが, 2011年3 月の東日本大震災以降は電源セキュリティへの関心が高 まり, 回復傾向にある。

平常時は都市ガスで発電し、地震など災害発生時に停 電時には都市ガスで発電して重要負荷に電気を供給する とともに、さらに都市ガスが遮断した場合でも燃料を瞬 時にLPガスに切り替えて重要負荷に独立給電できる電 源セキュリティが高い災害対応型燃料電池を開発した。

2012年より当社川崎工場で実証運転を行い,災害発生 時の拠点となる公共施設や病院に納入してきた。LPガ ス切替時の出力は70kWに制限されるが,50kgボンベで 約3時間の給電が可能である。

3)植物工場併設燃料電池

図12に2016年3月当社東京工場内の植物工場に併設した100kW燃料電池を示す。燃料電池からの電気,熱を利用するとともに,炭酸ガス濃度の調整機能を有する未来型農業施設となっている。



Fig.12 100kW PAFC for emergency use and vegetable plant

4.2 海外の適用事例^{(1),(3)}

海外では、家庭用に先行して業務用燃料電池の導入が 進んでいる。富士電機は2010年に海外向けに出荷を開始 し、これまでドイツ、韓国、南アフリカ、アメリカの4 ケ国に合計10台の100kW燃料電池を納入している。

ドイツは、2022年までに国内の原子力発電所17基を全 て停止することを決定したが、太陽光、風力、バイオマ ス発電等の再生可能エネルギーの導入が進むにつれ、電 力系統の不安定化が問題となってきている。これを緩和 する手段として、出力調整が容易なコージェネレーショ ンに期待が寄せられている。

1) CEマーキング適合EU仕様機⁽³⁾

EUで販売される製品には、製品分野別で対象となる EU指令に定められる必須要求事項に適合したことを示 すCEマークの貼付が義務付けられている。各指令には 必要最低限の基準が記載されているだけで、製品の技術 的要件の詳細はEN規格を参照する仕組みとなっている。

燃料電池は、電気と機械が一体となった一種の化学プ ラントであり、対象となる指令も多岐にわたる。さら に、燃料電池のCEマーキング適合の前例がなかったた め、第三者認証機関の協力のもと、2012年には天然ガス 燃料の火災予防対応型の適合を完了した。また、ドイツ の系統連系規格VDE4105に関しても、第三者認証機関 による適合認証を取得済みである。

2) 低酸素空気供給 防火型燃料電池(6)

あらたな付加価値としてドイツで普及しつつある室内 を低酸素化して火災を予防するシステムへの燃料電池の 適用に取り組んでいる。従来の空気を膜分離して窒素を 得る方法では,設備費や電気料金の高さが課題となって いた。燃料電池の空気極で酸素が消費された後の副生さ れた低酸素空気を利用して,室内の酸素濃度を低減する ことによりITセンターや倉庫等の火災を予防するシス テムを納入している。

図13に燃料電池を利用した低酸素供給防火システムの 概要を示す。



Fig.13 Fire prevention with Low-oxygen exhaust air

3)韓国,南アフリカ向け燃料電池(3)

韓国は、再生可能エネルギー義務割当制度(RPS)や 新規建屋への再生可能エネルギーの導入義務化等の政策 が追い風となり、業務用燃料電池の導入が拡大している。 当社は、2014年から韓国向けに出荷を開始し、これまで に商業ビルとデータセンターに納入した。

南アフリカは、「BRICS」の一角として成長が期待される一方,発電施設の老朽化等で電力不足が深刻化している。企業では,防衛手段として自家発電の導入を積極的に進めている。当社は、2014年に南アフリカのオフィスビルに燃料電池を納入した。平常時は系統連系してビル内に送電し,計画停電時には重要負荷に電力を供給する独立給電機能を有している。

図14に海外の設置事例を示す。



Fig.14 The delivery results (Overseas export)

4) 遠隔監視システム(1)

燃料電池の稼働率向上には予防保全技術と速やかな故 障診断が有効となる。仮想専用線サービスを利用した遠 隔監視システムを開発し,海外設置機の運転データ監視 による異常検出や故障解析,更に保守パソコンによるソ フトウェアの遠隔更新を可能とした。また本システムと は別に緊急時24h連絡可能なコールセンターを開設して いる。図15に遠隔監視システムの概要を示す。



Fig.15 Summary of the remote monitoring system

4.3 固体酸化物形燃料電池(SOFC)の開発事例

当社は、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)の助成を受け、50kW級固体酸 化物形燃料電池(SOFC)を2018年度上市に向け、いま まで述べたりん酸形燃料電池(PAFC)製品化の経験・ ノウハウを投入し鋭意開発中である。図16にSOFCの外 観イメージを、表3にSOFCの主な仕様を示す。



Fig.16 The image of 50kW SOFC

Table 3 SOFC specification

Output	AC 50kW (grade)
Electrical efficiency	55% (LHV)
Thermal efficiency	30% (LHV)
Total efficiency	85% (LHV)
Main dimensions	$0.2 m^2/kW$

5. 結言

りん酸形燃料電池の納入・適用事例を中心に,燃料電 池特有の用途開発事例と海外への展開の現状について紹 介した。水素は,旧来の化石燃料を中心としたエネル ギー消費社会から,再生可能エネルギーを中心とした持 続可能な社会に転換するための革新的なエネルギーにな ると期待されている。当社は,長年培った燃料電池技術 を活用し各種アプリケーションの適用拡大を図ると共に, 水素仕様燃料電池をはじめとする水素利活用機器の製造, 開発を通して「水素社会の実現」に向けて貢献していく 所存である。

これまでの関係機関およびユーザー各位のご指導,ご 協力に感謝するとともに,今後ともなお一層のご理解と ご支援をお願いするものである。

6. 参考文献

- (1) 黒田健一, 燃料電池, 電設技術, 12月号 (2015), pp. 84-88.
- (2) 千田仁人, 堀内義実, 黒田健一, 吉岡浩, PAFCのポテンシャリティと導入実績, 燃料電池, vol. 9 (2010), pp. 11-17.
- (3) 黒田健一,吉岡浩,堀内義実,武内信義,富士電機りん酸 形燃料電池の市場展開,第22回燃料電池シンポジウム講 演予稿集,(2015), pp. 1-4.
- (4) 黒田健一, 富士電機の水素事業への取組み, 電機, vol. 778 (2015), pp. 32-35.
- (5) 堀内義実, 吉岡浩, 停電時対応燃料電池について, クリーンエネルギー 1月号 (2012), pp. 21-25.
- (6) 岡 嘉弘, 低酸素濃度供給燃料電池発電設備について, 電機, vol. 760 (2013), pp. 41-44.



燃料電池車MIRAI,水素社会の実現に向けて

渡部 麻美子^{*1} WATANABE Mamiko 小島 康一^{*1} KOJIMA Koichi

論説◆解説

キーワード: CO₂ゼロ, 燃料電池, 燃料電池車, コスト低減, FCバス, 水素社会 CO₂ Zero, Fuel Cell, Fuel Cell Vehicle, Cost Reduction, FC Bus, Hydrogen Society

1. はじめに

トヨタ自動車は、環境問題を最重要課題のひとつとし て、新しいモビリティ社会のあり方を常に考え、困難な 課題に真正面からチャレンジしてきた。近年、地球温暖 化、資源の枯渇、生物多様性の劣化など、環境問題は広 範囲に渡り、一層深刻化している。これからも地球環境 と共生し続けるためには、20年、30年先の世界を見据え た新たなチャレンジが必要である。

1.1 環境チャレンジ2050

トヨタ自動車は『ゼロの世界にとどまらないプラス の世界も同時に目指すTOYOTA ENVIRONMENTAL CHALLENGE 2050』として、図1に示す6つのチャレ ンジを掲げた。



Fig. 1 Toyota environmental challenge 2050

その中の一つに工場ゼロチャレンジがある。既にトヨ タブラジル工場では、風力・バイオマス等の電力を再生 可能エネルギー事業者から購入することにより、2015年 から100%再生可能エネルギー利用を達成している。

さらに、国内工場において2020年頃に風力発電等を導入し、現在未利用の排熱を地域の会社などと融通しあい、未利用エネルギーの活用にも積極的に取り組み、燃料電池車(Fuel Cell Vehicle以下、略してFCV)生産ラインでのCO₂ゼロ化を目指す。(図2)



Fig. 2 Use of the renewable energies

図3,4に示すように、今後、工場でのエネルギーの 使用量を徹底的に減らし、さらに再生可能エネルギーや 水素の利用を進める。これらの取り組みを世界各地の新 設工場、既存工場へ展開する事により、2050年にはCO₂ ゼロのクリーンな工場を目指す。



Fig. 3 Plant CO₂ zero challenge in 2050

原稿受付 2016年4月28日

^{*1} トヨタ自動車(株) FC技術・開発部 豊田市トヨタ町1



Fig. 4 Demonstration of hydrogen utilization for 2020 FCV production line

従来よりトヨタ自動車は、CO₂削減に資する燃費改善 を最重要課題と位置づけ、エンジン、トランスミッショ ン、シャシー、ボディなど、全ての開発領域で技術を磨 き、新しい技術を普及させることに努めてきた。そこ で『新車CO₂ゼロチャレンジ』では、図5に示すように 新車から排出される走行時のCO₂排出量を、2050年には 2010年に比べて、90%削減するという目標を掲げた。



Fig. 5 Vehicle CO2 zero challenge in 2050

1.2 環境対応車の棲み分け

次に、色々ある次世代環境対応車の中でのFCVの位 置付けについて述べる。図6はそれらの棲み分けイメー ジを示している。電気自動車(以下,EV)は航続距離 が短いため、短距離用途が中心となり、小型車や自動二 輪車などが適していると考えられる。一方、FCVは中 長距離以上をカバーできるため、小型から大型までの適 用可能性を持っている。

しかしながら、EVもFCVもまだシステムコストが高 い。また、インフラの課題も大きく、本格普及には相応 の時間が必要である。そのため、現時点では短距離走行 時はEV走行が可能で、電池がなくなると通常のハイブ リット車(HV)として機能するプラグインハイブリッ ド車(以下、PHV)が次世代環境対応車の本命である。 一方ゼロエミッション車としてはFCVの技術開発が進 むことによって、徐々にFCVが普及していくものと予 想される。



Fig. 6 Powertrain map with fuel diversification

1.3 FCVの5つの利点

FCVの5つの利点を図7に示す。燃料の水素は様々 な一次エネルギーから製造が可能である。太陽光や風力 などの再生可能エネルギーを活用して,水からも生成が 可能である。水素は電気に比べてエネルギー密度が高く, 貯蔵・輸送も容易である。FCVは走行時,車両からCO2 や環境負荷物質を排出しない。そして,静かでかつ低速 からのレスポンスの良い加速などの楽しい走りは,大き な魅力である。さらに,実用でも500km以上の航続距離 や低温始動走行性,3分程度の水素充填時間など,次世 代環境車でありながら,現状のガソリン車と同等の利便 性を兼ね備えている。

加えて,非常時(災害時)などでの家庭や避難所への 電源供給に新たな期待が集まっている。給電時間は当然 水素の残量によって変わるが,水素が満タンと仮定する と,FCVでは一般家庭へ1週間以上,また,FCバスで は避難所と想定される体育館に約5日程度給電ができ, 水素を補充すれば更に長期間の給電が可能である。

エネルギーの多様化		ゼロエミッション
・水素は多様な 一次エネルギーから製造	可能	・走行中のCO。排出ゼロ
走りの楽しさ		使い勝手の良さ
 モーター駆動ならではの 滑らかな走りと静粛性 発進~低・中速域の 加速の良さ 		 航続距離(ガソリン車並み) 水素充填時間(3分程度)
	Strate and all the design of the	
	•供給能力大	

Fig. 7 Advantages of MIRAI

2. 燃料電池とは

図8にFCV用に使用されている固体高分子形燃料電 池の原理を示す。水素を燃料電池のマイナス極に供給す ると、水素はマイナス極の触媒で活性化され電子を放出 する。水素から離れた電子は、マイナス極から反対のプ ラス極に流れることで、電気が発生する。その際に、電 子を放出した水素は水素イオン(プロトン)となり、マ イナス側から高分子電解質膜を通ってプラス側へ移動し、 プラス極の触媒上で、酸素及び電子と結合して水となる。 理論的には水素が持っているエネルギーの83%を電気エ ネルギーに変換出来るため、内燃機関に比べ効率が良い。



Fig. 8 Principle of Polymer electrolyte fuel cell

FCVのしくみを図9に示す。FCVは燃料の水素と空 気中の酸素を燃料電池で化学反応させて発電し、その電 気でモーターを駆動し、走行する。燃料電池は発電の際, 水以外は排出しないため、ゼロエミッションのパワート レーンである。FCVは駆動用バッテリーを搭載したハ イブリッド車のため、加速時には駆動用バッテリーで 電力アシストし、減速時にはモーターで回生した電力を 駆動用バッテリーに充電する。このハイブリッド技術に よって、FCVは高い効率を実現している。



Fig. 9 Principle of FCV operation

3. トヨタ自動車のFCV

3.1 FCV開発の歴史

図10に示すように、トヨタ自動車では1992年から燃料 電池の開発に着手し、2002年12月には世界に先駆けて日 米で「トヨタFCHV」の限定販売を開始した。以後改良 を重ね、2008年の「FCHV-adv」では、主要技術課題で あった航続距離,氷点下始動性を解決。2014年12月,世 界初の量産FCV「MIRAI」を日本で販売開始し、続い て欧州では2015年9月,アメリカでは2015年10月より販 売を開始した。



Fig.10 Toyota's FCV development history

3.2 量産FCV「MIRAI」の開発

能や静粛性に一段と磨きをかけるという高い目標を掲げ, システム・ユニット共に全てを大幅に刷新し、図11に示 すトヨタフューエルセルシステム (TFCS) を完成させた。

FCV商品化のための大きな課題であったFCシステム

のコスト低減に加え,同時に従来から定評のある走行性



Fig.11 Toyota fuel cell system (TFCS)

3.3 FCスタック⁽¹⁾

新型FCスタックの最大出力は従来の90kWから114kW に27%アップ、セル当たりの出力は36%アップしてい る。一方セルの体格は、高電流密度化(2.4倍)及び薄 型化(20%低減)により24%縮小した。また、セパレー タ流路の材質をステンレスから比重の小さいチタンにし て、セルの質量を39%低減した。

スタックの締結構造に関しては、セルの積層を従来 の2列から1列化して締結プレートを1/2に縮小し、ま た、スプリングによる定圧締結からセルの内部バネ性を 活用した定寸締結によりスプリングを廃止した。更にス タックケースは、プレス品からアルミ鋳造品にすること で締結強度部材としての機能を兼ね備え、締結部品点数 を削減し、体格を42%低減(64→37L, 108→56kg)した。 以上,高性能化と小型軽量化により出力密度を従来比2 倍以上の3.1kW/Lまで向上させた。(図12)



Fig.12 FC Stack comparison with 2008model

3.4 高圧水素タンク⁽²⁾

図13に高圧水素タンクの構造を示す。高圧水素タンク は最内層の水素ガスを封入する機能の樹脂ライナー. そ の外側の内圧に対する強度を受け持つ炭素繊維強化プラ スチック層、その外側の耐衝撃性を確保するガラス繊維 強化プラスチック層からなる。樹脂ライナーの両端には, バルブとの締結のためのアルミ製口金を有している。

この新型高圧水素タンクでは、炭素繊維強化プラス チック層の構成の革新により軽量化を実現し、世界最高 レベルの貯蔵性能5.7wt%を達成した。



Fig.13 High pressure hydrogen tank

4. コスト低減⁽³⁾

図14はFCシステムコスト低減をイメージで表したも のである。TFCSでは、設計・材料・生産技術の改良に より前モデルのFCHV-advに比べ、2014年の量産開始ま でに1/20程度までシステムコストの低減を図ることがで きた。コスト低減の方策を下記に述べる。



Fig.14 Fuel cell system cost reduction

4.1 部品の簡素化・廃止

燃料電池の電解質膜のイオン電導には水分が必要であ り、一般的に吸入空気に湿度を与えて運転している。そ のため、燃料電池システムには、加湿器が必要なことが 知られている。しかし、加湿器は大変高価な部品のため、 取り除くことを考えた。そして、発電の際に生成される 水をFCスタック内部で循環させることで、外部加湿器 を廃止することができた。

4.2 量産部品の流用

FCHV-advではモーターなどもFCV専用に開発された 部品を使用していたため、高コストとなっていた。その ため、量産ハイブリッド部品の流用を検討した。FC昇 圧コンバーターを用いることにより、量産ハイブリッ ドのモーター、2次電池、PCU等の流用が可能となり、 コスト低減に繋がった。(図15)



Fig.15 Use of existing hybrid units

4.3 材料費の低減

燃料電池は貴金属のPt触媒や高圧水素タンクのカーボ ンファイバーに代表される高価な材料を多く使用してい る。Ptの使用料低減にはPtの有効利用率を向上させるこ ととFCスタックの出力密度を向上させることが有効で ある。TFCSのFCスタックでは、セル流路構造及び電 極の革新により小型・軽量化と高性能化を達成し、従来 比で触媒Pt量を1/3に低減している。

高圧水素タンクに関しては、従来の4本搭載を2本に 削減した。また、カーボンファイバーの巻き方の最適化 とその生産技術の改良により、使用量を低減し、タンク 貯蔵性能を従来のタンクに比べ、25%向上させた。また、 前モデルでは航空機に使用されている高級グレードの炭 素繊維を採用していたが、高圧水素タンクの原価は炭素 繊維が大半を占めるため、TFCSでは炭素繊維の低コス ト化に取り組んだ。炭素繊維メーカーの協力により、汎 用グレードの炭素繊維を改良して、強度を航空機グレー ド並に高めることにより、材料コストを低減した。

5. FCバス, FCフォークリフト 5.1 FCバス開発の歴史

3.1 FUハス開発の歴史 図16にテオトネに トヨタ

図16に示すように、トヨタ自動車では日野自動車と連 携し、2001年からFCバスの開発を行っている。2003年 8月~2004年12月まで都バスとして日本で初めて営業 運行を実施し、2005年の愛知万博では会場間のシャトル バスとして運行した。その後も各空港にて実証試験を実 施してきた。現在は、愛知県豊田市にて市内を循環する 路線バス「とよたおいでんバス」として運行している。 FCバスの実用化に向け、公共交通である路線バスの営 業運行による実証試験を通じて、FCバスの実用性や有 用性を検証し、着実に研究開発を進めている。

2020年の東京オリンピック・パラリンピックでは選手 村や会場への輸送手段として100台以上のFCバスを投入 する予定である。



Fig.16 Toyota's FC bus development history

5.2 FCフォークリフト

図17に示すように、トヨタ自動車は、2016年3月より 神奈川県、横浜市、川崎市、岩谷産業、東芝と京浜臨海 部における再生可能エネルギーを活用した低炭素水素サ プライチェーンモデルの構築を図る実証プロジェクトを 開始した。本実証プロジェクトでは、横浜市風力発電所 (ハマウィング)敷地内で風力発電を利用し、水を電気 分解してCO₂フリーの水素を製造し、貯蔵・圧縮するシ ステムを整備する。さらに、ここで製造した水素を、簡 易水素充填車により輸送し、横浜市内や川崎市内の青果 市場や工場・倉庫等に導入するFCフォークリフトで使 用するといったサプライチェーンの構築を目指す。この 実証を通じて、将来の普及展開モデルを見据えた、コス ト試算やCO₂削減効果等を検証していく。



Fig.17 Public-Private Partnership to Test Demonstrate Hydrogen Supply Chain

これらに加えて、アイシン精機による家庭用燃料電池 など、トヨタ自動車だけでなく、トヨタグループをあげ て水素利用に取り組んでいる。(図18)



Fig.18 A broad range of initiatives in the Toyota Group

6. 普及拡大に向けた取り組み

6.1 トヨタ自動車の取り組み

今後FCVが普及するためには、2020年以降は本格普 及期としてグローバルで年間3万台以上を目指す必要が ある。これは2017年の生産規模である約3,000台に対し て、10倍程度の大幅なレベルアップである。そのために 更なるFCVのコストダウンに取り組む。

FCV導入初期段階においては普及を優先し,開発・ 市場導入を進める自動車メーカーや水素ステーション整 備を進めるエネルギー会社などと協調した取り組みが重 要であるとの考えに基づき,2015年1月,トヨタ自動車 が保有する約5680件のFCV関連特許実施権の無償提供 を発表した。(図19)

FCV関連のトヨタ特許(約5680件)

	無關鍵的特別主要	AR OF MILLIO	5,600 MINESTAN
FCスタック	約1970件		The second
高圧水素タンク	約290件	2020年末まで	*
FCシステム制御	約3350件		-
水素ステーション	約70件	無明限	1月6日CESにて発表 THS SVP Bob Carter

FCV普及に向け特許実施権を無償化

Fig.19 FCV patents for free use

6.2 水素ステーション整備促進に向けて

FCVの普及のためには、魅力ある商品の提供はもと より、水素ステーションの整備が重要である。政府の支 援の下、現在、インフラ事業者による取り組みが進めら れている。政府やインフラ事業者だけではなく、自動車 メーカーとしても水素ステーションの整備促進に取り組 むことがお客様への利便性の向上につながり、FCVの 新たな需要創出につながると考えている。これまでトヨ タ、ホンダ、日産は、官民で時間軸を明確にしながら、 どのような役割分担で水素社会を実現していくかを検討 し、自動車メーカーの関わりや協力の方向性について認 識を共有してきた。

FCVの新たな需要創出活動の一環として,水素ステーションの運営費用の補助,水素充填環境作りに関し,自動車メーカー3社が共同で取り組むことで,FCVの普及を後押しすることを発表した。(図20)



Fig.20 Hydrogen station operation support

- 49 -

6.3 水素・燃料電池ロードマップ

産学官の有識者で構成される水素・燃料電池戦略協議 会にて、2014年6月に策定した「水素・燃料電池戦略 ロードマップ」が2016年3月に改訂された。「水素・燃 料電池戦略ロードマップ」では水素社会の実現に向けて、 「水素利用の飛躍的拡大」、「水素発電の本格導入/大規模 な水素供給システムの確立」、「トータルでのCO₂フリー 水素供給システムの確立」の3つのステップで産学官の 取り組みを進める。

FCVの普及目標は2020年までに4万台程度,2025年 までに20万台程度,2030年までに80万台程度。水素ス テーションの整備目標は2020年度までに160箇所程度, 2025年度までに320箇所程度としている。

2014年には量産FCV「MIRAI」が市場投入され, 2015年3月にはホンダの「クラリティ Fuel Cell」もリース販売を開始した。日本には81箇所の水素ステーション が設置され,水素社会の幕開けを迎えた。

日本の燃料電池分野の特許出願件数は,世界1位で2位 以下と比べて5倍以上と諸外国を引き離しているなど, 日本が強い競争力を持つ分野である。水素社会の実現に 向け今後も産学官で積極的に協力し,世界に先行する水 素・燃料電池分野の世界市場をリードしていきたい。 (図21)



Fig.21 METI Hydrogen and Fuel cell initiative roadmap

7. おわりに

2014年12月の量産FCV「MIRAI」の発売からおよそ 1カ月の受注台数が約1500台に達するなどご好評頂いて いる。2015年9月から欧州で,2015年10月からは米国で 販売開始している。今後は2016年には年間2000台程度, さらに2017年には年間3000台程度と生産台数を拡大する 計画である。

FCV「MIRAI」の量産化・商品化は協力会社の方々, 水素ステーション整備を進めるエネルギー会社の方々を 含め,NEDO事業の成果やDOEプロジェクトの成果も 活用するなど,多くの関係者の多大なサポートと尽力に より,成し遂げることができたと考えている。

今後の水素社会の実現には、今後も継続して燃料電池 車の開発を続けていくと共に、産学官の連携により基礎 から応用まで幅広い研究開発をお願いしたい。

引用文献

- Mizuno. S, Nakaji.H, Yoshikawa.H, Development of High Performance and Low Cost Fuel Cell Stack, Toyota Technical Review vol.61, 2015, pp,20-25.
- (2) Kondo. M Yamashita. A, Goto. S, Taki. M,Ogami. N, Kobayashi. T, The High-Pressure Hydrogen Storage System for the Mirai FCV, Toyota Technical Review vol.61, 2015, pp.26-31.
- (3) Kizaki.M, Asai H, Yumiya.H, Advancing into the Future with the Mirai Fuel cell system Toyota Technical Review vol.61, 2015, pp,12-14.



航空機用燃料電池技術の最新研究状況

岡井 敬一*1 OKAI Keiichi **渡辺 紀徳**^{*2} WATANABE Toshinori

論説◆解説

キーワード:電動航空機,航空機電動化,固体高分子型燃料電池,固体酸化物型燃料電池 Electric Aircraft, More Electric Aircraft, Polymer Electrolyte Fuel Cell(PEFC), Solid Oxide Fuel Cell(SOFC)

1. 緒言

昨今の環境負荷低減を目的としたCO₂排出削減に向け た取り組みは,発電設備・地上輸送機関だけでなく,航 空機にも及んでいる。航空機のシステム電動化の視点で は,ボーイング社のB787やエアバス社A380等で電動化 度の向上が実現している。こうした機体はMEA(More Electric Aircraft)と呼ばれている。航空機のシステム 動力は油圧・高圧空気・電気によっており,それらいず れもがエンジン由来である。航空機システムの電動化度 の向上については,エンジンのシステム電動化促進⁽¹⁾を はじめ研究開発が活発になされている。より長期的視 点にたてば,NASA^{(2),(3)}(N+3,N+4とされる世代)や EU⁽⁴⁾の航空機の環境負荷低減目標が従来技術の延長で は達成することが困難であるため,航空エンジンの推進 動力電動化に踏み込んだ検討や提案が積極的になされつ つある^{(5),(6),(7)}。

図1には、これらの電力使用の規模の概要を示す。高 効率化・低エミッション化・低騒音化等の観点から、航 空用動力源として電力の割合が増大しつつあり、またそ のうちの部分または全部において燃料電池を用いる構想 が各所で示されている。周知のとおり、航空機へ搭載さ せるためには、安全性・信頼性の確保とともに、比出力 (単位質量あたりの動力)、エネルギー密度(単位質量あ たり発生エネルギー)を高く設定する必要がある。燃料 電池には様々な種類があるが、航空用途として、小規 模・中期展望としては低温型の固体高分子型燃料電池 (PEFC)が、大規模・高効率・長期展望としては高温 型の固体酸化物型燃料電池(SOFC)が有望とされてい る⁽⁸⁾。

本稿では,これらの状況を背景に,航空機に搭載する 動力源としての燃料電池の検討研究事例を紹介し可能性 と技術課題についてまとめる。

原稿受付 2016年5月11日

*1 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門

〒182-8522 調布市深大寺東町7-44-1 *2 東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻

出力レベル 10-1	100 推力アシスト震荡	101 [MW]
機内動力・電 ・機体システム電源 /補助電源装置	源 ・ターボファンモータアシスト ・釉動力転換アシスト ・境界層吸い込みファン駆動	主推力電源 •電動推進主電源



2. 航空適用が有望視される燃料電池の特性・比較

航空機に適用が期待される燃料電池の代表は、PEFC とSOFCである。

PEFCはすでに自動車産業各社が市販する燃料電池自 動車用動力源としていることからもわかるように、水素 と取込空気(酸化剤)を用いて比較的効率の高い、水の みを生成物とする静粛な電源であるといえる。SOFCに 比較すると負荷変動に対する応答性も良い。この駆動に はセル内で適切に湿潤した水の分布が必要であり、水マ ネジメントが重要な課題となる。酸素を酸化剤とした場 合,図2に示されるような、水の電気分解反応による 水素・酸素生成の逆反応と考え、PEFCと水電解装置の 組み合わせにより、水素・酸素と水の間でエネルギー 抽出・貯蔵のやりとりをする装置を構成することもで きる。これを再生型燃料電池(Regenerative Fuel Cell = RFC)と呼ぶが、RFCとしての検討・実証事例を本 稿で紹介する。これらの特性をも踏まえ、システム動力 源・補助電源代替などを主なターゲットとして研究開発 がなされている。

(補助)電源装置,推進動力源としての高い効率を求 める場合,技術課題は多いが,ガスタービンと組み合 わせ排熱を利用することが出来,高い効率を得ること



Fig. 2 A schematic of regenerative fuel cell.

^{〒113-8656} 文京区本郷7-3-1

が可能なSOFCが注目されている。以下,次章以降では, PEFC,SOFCの適用研究事例について述べる。

3. 固体高分子型燃料電池(PEFC)の航空適用

PEFCを用いた航空向け技術実証としては、Boeing、 DLRによる燃料電池を推進動力源とした小型有人機 の飛行試験、IHI/IAとBoeingによる再生型燃料電池 (RFC)の飛行試験⁹等がある。

システム(補助)電源代替としてPEFCを適用する事 例について以下に述べる。

3.1 燃料電池による補助電源代替

PEFCの効率は、ガスタービンに比べて向上させるこ とが出来るが、効率向上の度合いはSOFCに比べ限定的 である。PEFCの利点としては、ガスタービンに比べ高 温部を持たないこと、低騒音性、主構成要素に回転部を 持たないことによるメンテナンス性が挙げられる。航空 機の補助電源装置は、推進用エンジンに比べて効率が小 さいことが一般的であり、地上で推進用エンジンを用い ない際には、地上電源の導入や、より効率の高い補助電 源装置の導入、推進用エンジンによらない常時電源の導 入が有望視されている。

従来のガスタービンによる補助電源の代替として PEFCを用いる際の課題は、酸化剤である空気をどのよ うに導入するかということである。

Eelmanらの検討¹⁰⁰では,空気を大気中から導入し圧縮 機で加圧している。PEFCでは,常圧もしくは若干の加 圧条件での運転が好ましいが,PEFCの運転のための圧 縮機の導入は,PEFCの出力の減少となり,PEFCの導 入に見合う圧縮動力,圧縮機の効率が求められる。

導入空気として, 機内向け空気(一般にエンジン抽 気)を用いる場合には, 高空で地上より低い圧力での 供給となるため, PEFCの性能低下が見込まれる。また, B787で電化が進む際にダクトを排することが利点とし て掲げられている潮流にも反している。PEFC用に, 機 内空調とは別途高圧空気をエンジンから導入することも 考えられるが, 構成を複雑にする。B787で導入されて いる電動圧縮機に相当する圧縮空気を導入することが有 効である。

非常用電源(Ram Air Turbine = RAT)のPEFCへ の変更も有望である。RATは高度速度に生成動力が依 存するが、PEFCは高度速度への依存性は相対的に少な い。

3.2 動力需給のバランスに寄与する再生型燃料電池適用

PEFCの特徴の一つは、燃料が水素であるということ であり、航空機に水素を搭載することの安全性・搭載容 積の観点で課題がある⁽¹¹⁾。一方で酸素と組み合わせるこ とで新しい利用法も考えられる。先に示した再生型燃料 電池の構成により、発電と消費の不均衡を解消すること が可能となる。これが先に図2で示した再生型燃料電 池の航空機搭載時の利用価値である⁽⁹⁾。航空用のシステ



Fig. 3 Typical energy density of RFC and Li-ion Battery.



Fig. 4 System weight of RFC and Li-ion battery.

ム動力は,主に油圧・高圧空気・電力からなるが,その いずれもほとんどが推進用エンジンから供給されている。 エンジンからの動力抽出は,エンジンの回転数に依存す るため,機体システムが必要とする電力とは一致しない。 この不一致を,再生型燃料電池は解消させることが可能 である。

IHI/IAは、この再生型燃料電池の航空機適用実証を、 2012年10月のBoeingによるecoDemonstratorで実施した⁽⁹⁾。この試験では、実際に運用される旅客機(アメリカン航空用B737)に水素燃料を搭載した試験としても 重要である。この試験によって飛行環境下での再生型燃料電池の充放電、電力利用が確認された。再生型燃料電 池は二次電池的な利用がされているので、実用に向けて は、Li-Ion電池のような二次電池が競合相手となる。

図3に再生型燃料電池とバッテリのエネルギー密度の 運用時間における比較例⁽⁰⁾を示す。燃料・酸化剤・水の タンクの携行は運用時間が短い際には不利になるが,運 用時間が長い場合には,有利となる。同様に図4には, システム重量⁽⁹⁾比較を示す。再生型燃料電池は,このよ うに閉鎖系のエネルギー貯蔵装置とみなすことが出来, 空気でなく酸素を酸化剤源としてタンク内に充填する。

こうした視点で,利点と課題を以下に列挙する: 【利点】

・燃料電池と水電解装置の組み合わせの観点で高い燃料 密度を達成可能である。

・エネルギーバッファとして、オフピーク化、システム
 軽量化に寄与する。

・酸化剤が酸素であるため、空気の場合に比べてカソー

Electrolyte current density Pressure distribution on anode side(s)
Pattern A [Serpentine(A)-Parallel(C)] [A/m²]



Fig. 5 Current density and pressure distribution.

ドの性能向上を期待できる。

・外気を吸い込む空気吸い込み式の場合に比べ,周囲 (飛行)環境の影響を受けにくい。

【課題】

・機器の搭載重量と体積が制約条件となる。

・カソードの流れに窒素がないため、水の排出が空気を
 酸化剤にする場合に比べて困難になる。

・循環システムであることから,水の適切な回収を行う 必要がある。

以上から,航空適用における再生型燃料電池の実用化 に向けた課題の一つとして,簡潔な形で水の適切な管理 を行うことであることがわかる。

こうした観点で、著者らは複数のチャンネル形状で のPEFCの特性比較を数値的に行い、傾向調査をした¹²²。 図5には、アノードチャンネルをSerpentine型 (パター ンA), 平行流型 (パターンB), カソードチャンネルを 同一の並行流とした場合の電解質電流密度分布とセル 圧力分布のチャンネル形状が異なる場合の比較例を示 す。計算例では、2つの形状 (AとB) でアノード、カ ソードの流量が一致するように定めた。アノード流路が Serpentine型の方が, 圧力損失が多少大きいものの, 同 一流入条件で高い電流密度分布を示していることがわか る。実際の運転にあたっては、たとえば利用率が70%と すると、利用された分を追加供給することになる。燃料 電池の運転上, 排気流が水飽和状態に近いと考えると, 循環分(ここでは30%)が飽和状態で、無加湿運転の場 合乾燥空気が導入されることになる。この条件下でも, カソード側で生成される水の適切な浸透で水の不足によ る著しい性能低下を避けることが可能と示唆された。

実際の試験においては、直接把握できる特性は限られ るため、こうした解析の結果を検証込みで用いることは、 開発試験の加速のために有用であると考えられる¹³。

4. 固体酸化物型燃料電池(SOFC)の航空適用

SOFCは(熱機関やPEFCに比べ)高い効率を期待で きるため、長期的視点にたっては、まず前節で対象とし た補助電源装置としての適用が有望視された。設計例⁴⁴



Fig. 6 SOFC/GT core separated fan propulsion (image).

も既に出ている。最近では新鋭機向きに具体的なシステム検討,設計例を与えるものもある¹⁵⁵。SOFCの利点は, 燃料を水素に限らないことである。動作温度が高い場合 には,自己改質により炭化水素燃料の適用が可能である。 SOFCを用いる場合には,高温排気を利用したガスター ビンとの複合化が一般的である。SOFCの作動には,高 温・高圧での作動が効率の観点で有効であるため,圧縮 機での高圧化,ガスタービン排気を利用した昇温などが 地上設備を中心としてなされている。

これまで推進動力として燃料電池を用いた実証例は, 前述のようにPEFCを採用している。これは小型機推進 動力規模に適切であること,飛行高度を限定しているこ と,搭載が簡便であることなどによる。しかし,これら 実証をした当事者にとって,PEFCを用いた試験結果を もってこのシステムが市販される航空機推進動力として 適用されるとは捉えず航空機システム動力への適用を目 指して飛行環境試験を実施することに重きをおいている。

その一方で、最近では、推進動力の一部もしくは全部 にSOFC燃料電池を用いる検討が活発化している。以下 では、推進動力としてSOFCを用いた検討例ならびに利 点と課題について示す。

著者らは、推進動力電動化の一形式としてコア分離 ファン形態を想定して検討を行っている¹⁶⁶。図6にコア 分離ファン機体搭載イメージを示す。現在亜音速機で多 用されている高バイパス比ターボファンエンジンは、バ イパス比の増大により低騒音化と低燃費化を図っている。 しかし、ファン径の増大の限度、ダイレクトドライブで の低圧系動力伝達の困難などの課題から、バイパス比を 大きく増大させることは困難である(制約の一部を緩和 させるものがギア付ターボファンエンジンである)。こ うした観点から、著者を含む複数の研究グループは、推 進ファンと動力生成部(コア)を分離させたコア分離 ファンエンジン形式の検討を行ってきている^{(5),(6),(7)}。こ の場合、ファンの分散化、Blended Wing Body (BWB)



Fig. 7 A schematic of FC/GT hybrid core.

機体などの)機体上面や従来形態機体の胴体尾部に境界 層吸い込みファンを設けることで推進効率の向上を図る ことが出来る。一方,コアエンジンに相当する発電機構 は,超電導の活用による付加的な損失低減は見込めるも のの多くの検討はターボシャフトエンジンによる発電を 想定しており,熱効率の観点から熱機関の制約を受ける ものである。

Boeingが提案するSugar-IIにおける一案⁽³⁾として,ター ボファンエンジンの圧縮機出口と燃焼器の間にSOFCを 設け生成電力を胴体尾部の境界層吸い込み電動ファンに 供給するというシステムがある⁽³⁾。自己改質を前提とし ているものの,このサブシステムは約4kW/kgの軽量化 が出来るものと想定している。

著者らは、熱効率向上のため、コア発電機として SOFCとガスタービンの複合システムを想定している。 SOFCの航空適用にあたっては、地上から高速で飛行す る高高度にいたるまで環境要件が地上発電用設備と大き く変わるため、従来の設計思想によるSOFCの航空機搭 載は困難であるとの指摘もされてきている。SOFCの視 点から見た航空適用の課題として、主要なものは以下で ある:

①安定した(急変動しない)運転が必要であるが飛行状態・環境条件の変わる空気吸い込みエンジンでは入口条件の安定確保は困難である。

②熱交換器を利用した燃料電池の入口温度の昇温は重量 過大・制御・整備性の低下をもたらし得る。

以上の視点で航空適用に適したSOFC/GTハイブリッドシステムの例として、図7に示されるようなSOFC/GTの構成を提案している^{III}。このシステムは以下のような構成をしている:

・SOFC自体が、メインのガスタービンではなく、圧縮 機出口または中段出口からの空気の分流を取り込んだサ ブシステムの内部に存在する。

・サブシステムにおいて、メインの圧縮機出口空気を圧 縮機でさらに圧縮し、SOFC入口に適切な温度と圧力条 件となるようにする。システム構成により、熱交換器を



Fig. 8 A schematic of SOFC combustor.

備える場合とサブシステム圧縮機のみで良い場合がある。 ・SOFCの燃料は、水素や炭化水素を選択しうるが、高 い制御性という視点で水素を用いることが好ましい。 ・SOFC内での未使用燃料と必要な付加燃料をサブシス テム燃焼器で燃焼させ、タービンを駆動させる。

・タービンは、ガスタービンとして燃焼器出口排気による駆動と、選択的に付加される電動モータで駆動され、 SOFCの入口流入条件の変動を緩和する。

以上のような構成をしたハイブリッドシステムを用い ることで、上記の2つの課題を解決することが可能であ る。

上述のサブシステム付の構成・従来のようにSOFCの 下流に余剰の燃料を燃焼させる燃焼器を加える場合のい ずれにおいても,要素としての燃料電池システムを軽量 化することは容易ではない。燃焼器と燃料電池をともに 燃料を導入する反応容器と考え,図8に示されるように 一体化することが制御性向上と重量軽減に寄与する可能 性がある^[19],19]。

燃焼器との組み合わせは、熱防御・逆火防止、空気 流路との組み合わせ等課題はあるが、複合発電機の比 出力増大の視点では有望なアプローチの一つである。 Shimizuら²⁰は、こうした反応器に向けた検討を目的と した円筒型SOFC製作・試験研究の一例である。

地上向けのSOFCは、重量や容積の制約がないため、 大きな圧力容器の中に燃料電池を並べる方式が高圧下 で作動させる場合一般的であり、この場合の比出力は 1kW/kgをこえることはなく非常に小さい。先に示した NASAの例では、モジュールで約4kW/kg(2040年代 技術)を想定している。これは自己改質機能を含むこ とを踏まえると、SOFCとしてのモジュールの比出力は、 ~5kW/kg程度が長期目標と考えられる。燃焼器と機 能を一体化したSOFCコンバスタとして、燃焼器に付加 的な重量となる場合は、より大きな比出力が期待出来る。 以上のように、電動化要素の性能向上と出力密度の効果 を見通すことは非常に重要である。電気駆動システム としての設計空間を示す検討の一例を紹介する。図6下 に一般化したコア分離ファンエンジンの構成要素を模式 的に示している。発電用コア、電気駆動システム・推進 ファンに分けており、ここではコアは単純なターボシャ フトを想定している。Jansenら²²¹は,図中枠に囲まれた 電気駆動システムの性能(効率 η elec)と比出力(Sp_{ED}) が、システム全体の実現性・有用性のカギを握るパラ

メータであるとして解析を行った。機体と推進系(コア とファン部)の技術進展の効果を,ベースラインからの 比として次のように記した:

$$\frac{(L/D)}{(L/D)_{EAC}} \left(\frac{\eta_{therm}}{\eta_{thermEAC}}\right) \left(\frac{\eta_{prop}}{\eta_{propEAC}}\right)$$

この比の要件で、Breguetの式に基づいた損益分岐評価を行った電気駆動システム効率と比出力の関係図から電動推進システムの導入が有効となる領域を提示した。図9には機体・推進系(コア+ファン)の技術進展の効果を小・中・大の3通り仮定した場合の関係を示す。元の図では、ターボエンジン部分(η therm)には向上がない(比が1)ものとしている。この図から、現状の機体・エンジンのベースラインに近い条件(Min. case)では、グラフの範囲で有効となる領域が見いだせないことがわかる。推進システムの電動化・コア分離化には、親和性の高い機体システムの導入で有効性を高められる。中期(Med. case)、長期(Max. case)では、電動ドライブ比出力Spedがそれぞれ、10[kW/kg]、5[kW/kg]以上の領域で有効な領域が得られることがわかる。

この図の考え方を、コア部分構成要素がFC/GTとな る場合に適用すると、燃料電池付与の影響を、熱効率の 向上と(図の領域内で評価される)電動ドライブの比 出力Spedの変化と読み替えることで、単純ターボシャフ トの場合と比較することが出来る。図9には、熱効率を 4%、10%向上させた場合(先の解析評価で検討した条 件⁽⁷⁾)を機体・推進系の効果を最大見込むケース(Max. case)に合わせて追記した。そこから、燃料電池導入で 見込む熱効率向上の効果(有効範囲の拡大)は比較的大 きく見込めることがわかる。図7に見られるSOFC/GT ハイブリッドコアでのターボシャフト・燃料電池双方の 出力分配にもよるが、5[kW/kg]以上の電動ドライブ全 体としての比出力を確保することが出来れば、推進シス テムとして有効であるといえる。

燃料電池を推進動力とする実証はこれまでPEFCの みであると述べた。最近の報告では、NASAがSOFCを 推進動力とした小型機の実証を準備中である²⁰。NASA LangleyのLancair Columbia 300を原型機としたエンジ ン換装で出来るだけ従来技術を用いた飛行実証をしたい としている。燃料も、炭化水素燃料からの改質を想定し ている。ここでは、飛行高度などを制限し、先の従来の SOFCが持つ課題については抵触しない飛行条件範囲で の運転を想定しているようである。とはいえ、こうした 試験から得られるデータや設定要件は、今後のSOFCの 航空適用に向けて有用なデータを提供するものと期待さ れる。

著者らが想定するSOFC/GTハイブリッド発電機について、地上設備用との相違点等についていくつかここで付言する。従来のSOFCは、排熱を有効利用するために タービンと組み合わせボトミングサイクルとしてシステ



Fig. 9 NASA's Key Performance Parameter break-even curves for a range of benefits²² (two lines showing the effect of themral efficiency change are added from the original article).

ムの効率を向上させている。こうした観点からは,発電 量としては,SOFCが主,タービンが従の関係である。

しかし,推進用,あるいは推進用ターボファンに付随 したSOFC発電機は,重量・容積・運転条件の制約から, 発電量の主従が逆転する。そのため,効率向上の程度に は予め制約がある。また,送電に常電導(カーボナノワ イヤ等適用)で高圧送電するか,超電導で低中圧送電す るかによっても仕様は異なるが,SOFCそのものの使わ れ方としては,比較的低電流負荷高効率点での作動を想 定することが好ましいとされる。以上のように,コア分 離型ファンエンジンのコアとしての発電機は,地上用発 電機に求められる特性に近いが,航空機の運転条件,重 量・容積の制約から大きく異なる点もある。こうした要 件のもとで,物理的に達成可能なシステムを検討してい くことが必要である。

5. まとめ

本稿では,将来的な搭載が期待される航空機動力源と しての燃料電池について,システム動力補助電源,推進 用主動力電源として検討されている構成例をまとめた。

システム動力向け電源としてPEFCの例を挙げた。こ こで示された課題は、酸化剤の導入の方法、水の管理の 方法である。再生型燃料電池の飛行実証例と関連技術課 題の検討状況を紹介した。

推進動力向け燃料電池は、技術課題が多いものの より高い効率を望むことが出来るSOFCが有望である。 SOFCの航空適用には課題があり、主要な課題を克服す るために著者らが提案する手法を紹介した。

燃料電池の地上利用,自動車向け利用について我が国 は世界をリードしている。航空機のシステム電動化度向 上が世界の潮流となっている中で,航空機電動化度の向 上に貢献する燃料電池を核とした技術の発展が望まれる。

謝辞

276

本稿で紹介した内容は,東京大学将来航空推進システム技術創成社会連携講座第1期(2012年12月~2016年3月)における研究会での議論や検討内容をもとにしている。研究会に参加し,議論やご教示をくださった関係諸氏に感謝いたします。また,SOFC技術適用性については,東北大学大学院環境科学研究科橋本真一准教授との議論で多くの有益な示唆を得た。記して謝意を表す。

6. 引用文献

- Seki, N., Development of Motor-Driven Fuel System for More Electric Engine, AJCPP2016-167, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2016, Takamatsu, Japan, March 2016.
- (2) Bradley, M. K. and Droney, C. K., Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report, NASA/CR-2011-216847, April 2011.
- (3) Bradley, M. K. and Droney, C. K., Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase II: N+4 Advanced Concept Development, NASA/CR-2012-217556, 2012.
- (4) Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation, European Commission, 2011.
- (5) Kim, H. D., Felder, J. L., Tong, M. T., Berton, J. J. and Haller, W. J., Turboelectric distributed propulsion benefits on the N3-X vehicle, Aircraft Engineering and Aerospace Technology 86/6 (2014) 558-561.
- (6) Koyama, D., How the More Electric Aircraft is influencing a More Electric Engine and More! EU-Japan Symposium on Electrical Technologies for Aviation of the Future, March 2015.
- (7) Okai, K., Himeno, T., Watanabe, T., Nomura, H. and Tagashira, T., Investigation of FC/GT Hybrid Core in Electrical Propulsion for Fan Aircraft, AIAA 2015-3888, AIAA Propulsion and Energy Forum 2015, July 2015.
- (8) 岡屋俊一,将来型航空機用燃料電池の研究開発動向について、1C7,第49回飛行機シンポジウム、2011年10月.
- (9) Okaya, S., Arastu, A. H and Breit, J., Regenerative Fuel Cell (RFC) for High Power Space System Applications, AIAA 2013-3923.
- (10) Eelman, S., Pozo del Poza, I. and Krieg, T., Fuel Cell APU' s in Commercial Aircraft - An Assessment of SOFC and PEMFC Concepts, 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2004.
- (11) 水素燃料航空機検討調査会,水素燃料航空機の国内外検 討調査,JAXA-SP-08-005,宇宙航空研究開発機構特別 資料,2008年9月.

- (12) Okai, K., Himeno, T., Watanabe, T., Yachi, Y. and Shinozaki, N., Numerical Investigation of PEM Fuel Cell Performance in an Aircraft Oxygen-Gas Oxidizer System, AIAA 2016-0495, AIAA SciTech 2016, January 2016.
- (13) 谷内雄作,航空機搭載用再生型燃料電池に関する研究開発,第3回東京大学将来航空推進システム技術創成オープンワークショップ,2016年3月.
- (14) Steffen, Jr., C. J., Freeh, J. E. and Larosiliere, L. M., Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Cycle Technology for Auxiliary Aerospace Power, NASA/ TM-2005-213586.
- (15) Whyatt, GA and Chick, LA, Electrical Generation for More-Electric Aircraft using Solid Oxide Fuel Cells, US Department of Energy, PNNL-21382, 2012.
- (16) 岡井敬一,姫野武洋,渡辺紀徳,野村浩司,田頭剛, コア分離ファン電動ファン推進系の初期サイジングと 性能評価,B11,日本航空宇宙学会第46期年会講演会, 2015.4.
- (17) 岡井敬一,姫野武洋,渡辺紀徳,野村浩司,田頭剛,西 沢啓,旅客機へ適用する電動推進に関する概念検討, 1A02,第53回飛行機シンポジウム,2015.11.
- (18) Okai, K., Fujiwara, H., Nomura, H., Tagashira, T. and Yanagi, R., Performance Analysis of a Fuel Cell Hybrid Aviation Propulsion System, AIAA 2012-4238, 2012.
- (19) Roberts, R. A. and Therkelsen, P., Aircraft Engine Electrical Power Generation with a SOFC Combustor, GT2014-27106, Proceedings of ASME Turbo Expo 2014, June 2014.
- (20) Shimizu, D., Nomura, H., Okai, K., Tagashira, T. and Nishizawa, A., Fabrication of Lab-scale Tubular Solid Oxide Fuel Cell for Basic Research on Fuel Cell-Gas Turbine Combined Electric Generator for Airplane, AJCPP2016-106, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2016, March 2016.
- (21) Borer, N. K., Nickol, C. L., Jones, F. P., Yasky, Woodham, K., Fell, J. S., Litherland, B. L., Loyselle, P. L., Provenza, A. J. and Kohlman, L. W., Overcoming the Adoption Barrier to Electric Flight, AIAA 2016-1022, January 2016.
- (2) Jansen, R. H., Brown, G. V., Felder, J. L. and Duffy, K. P., Turboelectric Aircraft Drive Key Performance Parameters and Functional Requirements, AIAA 2015-3890, AIAA Propulsion and Energy Forum 2015, July 2015.
- (23) 岡井敬一,渡辺紀徳,航空機エンジン電動化の最新研究 状況,日本ガスタービン学会誌,Vol. 43, No. 3, pp. 184-189, 2015.5.

- 56 -

論説◆解説

特集:水素エネルギー利用社会への歩み、ガスタービンと燃料電池の最新情報

CO₂フリー水素を用いるマルチ燃料燃焼エンジン技術

辻村 拓^{*1} TSUJIMURA Taku **鈴木**泰政^{*1} SUZUKI Yasumasa 古谷 博秀^{*1} FURUTANI Hirohide

キーワード: CO₂フリー水素,マルチ燃料燃焼,有機ハイドライド,ディーゼルエンジン,再生可能エネルギー CO₂-Free Hydrogen, Multi-Fuel Firing, Organic Chemical Hydride, Diesel Engine, Renewable Energy

1. 緒言

2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画⁽¹⁾で は、東日本大震災以降のエネルギー政策の原則を見直し、 基本的視点である3E+S(エネルギーの安全保障,経済 性、環境性、安全性)を確認した。一次エネルギーや電 源構成における再生可能エネルギー比率をこれまでの2 倍以上に高め、将来の二次エネルギーとして電気と熱に 加え、水素が中心的役割を担うことを期待し、水素燃料 電池の普及だけでなく水素発電等の新たな技術の実現を 着実に進めていくことが記されている。

世界各国の再生可能エネルギーの導入比率⁽²⁾を見ると 図1のように,世界平均では約20%が再生可能エネル ギー(原子力除く)で占められている。EUや,中でも スペイン及びドイツでは太陽光や風力など出力変動が激 しいとされる再生可能エネルギーの導入比率が高いのが 特徴である。一方,我が国では変動する再生可能エネル ギーは僅かに2~3%に留まる。エネルギー自給率が極 めて低い我が国において再生可能エネルギー比率を高め ることは,エネルギーの安全保障と環境性を同時に満た す手段であり,後述するように,エネルギーの貯蔵・輸 送を担う水素を積極的に利用促進することが重要となる。 本報では,水素貯蔵技術の一つである有機ハイドライド を使う水素発電技術について紹介する。



Fig. 1 Power source in each country



*1 (国研)産業技術総合研究所再生可能エネルギー研究センター 〒968-0298 郡山市待池台2-2-9

2. 水素エネルギー貯蔵・利用

CO2フリー水素とは、再生可能エネルギー発電により 得た発電電力を用いて水電解により製造する水素、及び 褐炭等の化石資源を基にCO2貯留を伴って製造する水素 を指す。前述のように、太陽光や風力等の変動を伴う発 電電力は周波数変動の誘発など電力系統へ影響する。電 力貯蔵手段として, 図2のように, 発電規模と充電(貯 蔵)規模によって適切な手段がある。1日程度の短時間 であればキャパシタや蓄電池で充放電するのが望ましい が,1日以上の規模になると揚水,圧縮空気,及び水素 として貯蔵するのが望ましいと考えられる⁽³⁾。水素は分 子量が小さく、可燃性が高いことから化学変換により安 定した高エネルギー密度の物質として貯蔵することが望 ましく,図3のように様々な形態が考えられ、有機物に 水素を化合する有機ハイドライドは、体積・重量エネル ギー密度、安全性、流通インフラ整備等の点から有望な 水素キャリアの一つである。



Fig. 2 Electricity storage technologies





有機ハイドライドには幾種類もあるが、トルエン/ メチルシクロヘキサン(MCH)系有機ハイドライドは、 毒性の低さ、流動点の低さ等から利便性が高い。図4の ように、トルエン/MCHの水素化・脱水素反応では205 kJ/molのエンタルピー変化を伴い、トルエンヘ水素を添 加してMCHとする際は発熱反応であり、MCHを脱水素 してトルエンと水素に分離する際は吸熱反応である。さ らに図5のように、反応熱だけでなくMCHの加熱、蒸発、 平衡温度までの過熱にも熱エネルギーが必要である。し たがって、化学変換を伴って貯蔵・利用されるMCH等 の水素キャリアにおいて、総合的なエネルギー変換効率 を高める上で熱マネージメントは非常に重要となる。

Hydrogenation / Dehydrogenation



Fig. 4 Hydrogenation/dehydrogenation of toluene and MCH



Fig. 5 Required energy for vaporization, heating, and dehydrogenation reaction, and enthalpy of hydrogen produced by dehydrogenation of MCH

本研究では、図6のように、MCHの脱水素に係る種々 の熱エネルギーを、エンジン発電機等の熱機関の排気エ ネルギーから賄うことをコンセプトとする。すなわち、 再生可能エネルギー発電電力を基に水電解により水素を 製造し、その水素とトルエンを水素化反応により化合し てMCHとして貯蔵する。エンジン発電機等の分散型電 源において排気エネルギーを回収しながら脱水素ガスで ある水素とトルエンを発生させ、トルエンと分離した水 素をエンジンへ供給する。したがって、エンジンでは軽



Fig. 6 Conceptual model on storing renewable energy as MCH, and utilization of MCH with wasted heat recovery

油等の従来燃料と水素を混焼することになる。本報では, ディーゼルエンジン発電機を対象に,軽油と水素の混焼 特性について実験的に調べた結果等を紹介する。

3.水素/軽油デュアルフューエルエンジン燃焼 3.1 機関諸元及びエンジン実験装置

供試機関は、125 kW級エンジン発電機であり、表1 のように、排気量5.2 Lの直列4気筒ディーゼルエンジ ン(圧縮比:17.5)である。図7のように、エンジン実 験装置はエンジン単体を動力計に接続し、各種排気分析 計により排出ガス中の代表成分や未燃水素などを計測す る。本実験では、水素の性状が明らかなボンベガス水素 を用い、複数のガス噴射弁を搭載できるマニホールドを 介して吸気管へ供給する。エンジン実験では先に軽油に より運転を始めた後、ガス噴射弁の開弁期間や開弁周波 数等によって水素供給量を調整すると同時に軽油噴射量 を減量して所定の水素/軽油割合に設定する。以下で表 する水素割合とは、水素と軽油の低位発熱量の合計に対 し、供給する水素が有する低位発熱量の割合を指す。エ ンジン回転数は1500 rpm, 軽油噴射圧力は約100 MPa で一定とし, 軽油噴射時期は水素供給の有無に拘らず, 軽油のみ噴射した場合に調整された噴射時期である。

Table 1 Specifications of multi-cylinder test engine

Type of engine	4 stroke, inline-4
Bore × Stroke mm	115 × 125
Displaced volume L	5.2
Compression ratio	17.5 : 1
Fuel	Hydrogen (port injection) Diesel fuel (direct injection)
Measurement of exhaust gas components	CO2, CO, THC, NOx, H2, Soot



Fig. 7 Schematic diagram of engine test apparatus

- 58 -

3.2 水素/ディーゼル混焼特性⁽⁶⁾

水素/軽油デュアルフューエルエンジン燃焼の一例と して、出力40 kWにおいて水素割合を0~83 %まで変 化させた際の筒内圧力等を図8に示す。ここではEGR を適用せず軽油の噴射時期を固定した。また本実験では、 過給機の弁開度を固定しており、吸気管への水素供給量 に応じて過給した新気が導入せず、水素割合を高いほど 圧縮行程での筒内圧力が低下する。熱発生率について、 ここでは軽油を、パイロット噴射とメイン噴射の二段階 で供給したが、水素割合が20 %程度では0%に比べて熱 発生率に大きな変化が見られない。一方、50 %以上に なると軽油の燃焼に水素の燃焼が加わる形で、0%の場 合には見られなかったプレ噴射とメイン噴射の間にも熱 発生する。これは水素が所定の供給量あるいは濃度以上 になると、プレ噴射された軽油を着火源として水素が火 炎伝播を始めたためだと考えられる。

図9には水素割合とエンジン特性の関係を示す。上述 のように,水素供給量が増加するにつれて過給圧力が低 下し,吸気マニホールド圧力も低下する。これは供給し た水素によって新気導入が妨げられたことによるが,同



Fig. 8 Temporal histories of in-cylinder pressure, temperature, and apparent rate of heat release



Fig. 9 Effect of H₂ rate on engine performance

時に吸気マニホールドにおける酸素分率も低下する。酸素分率の低下は窒素酸化物(NOx)の生成にも関係し, 水素割合を80%程度まで高めてもNOxが微増に留まっ たと考えられる。水素割合の増加に応じてCO2排出量を 削減できるが,それに加えて水素割合が高いほど正味熱 効率が40%を超えるほど向上しており,軽油と水素を 混焼することにより軽油の削減効果以上にCO2削減効果 があることが示された。

次に水素/ディーゼル混焼においてEGRを適用した例 を示す。図8,9ではEGRを適用しなかったため、NOx は3g/kWh程度の高レベルで排出したが、ここでは EGR率30%程度まで適用して排気や効率への影響を調 べた。水素割合を55%とし、図10の熱発生率のように、 EGR率の増加によりパイロット噴射した軽油の着火特 性が変化するが、これに後続する水素と軽油による熱発 生はEGR率によって大きく影響されず、熱発生率ピー ク前から燃焼終了までEGR率によらず熱発生率はほぼ 一致している。これは水素の燃焼性の良好さがEGR適 用時の水素/ディーゼル混焼の悪化を抑制したと考えら れ、図11のように、燃焼重心時期の変化が小さく熱効率 の悪化も少ないにも拘らず, NOxを1g/kWh未満に削 減できた。ただし、EGR率29%においてはSootの排出 が著しい。これは軽油のパイロット噴射の燃焼に起因し て水素燃焼が始まり、その水素火炎中に二段目の軽油噴 射が行われ、燃焼室内に極めて酸素不足となる領域が形 成されると推察する。さらに過給機の弁開度を固定した ことでEGR率の増加により過給圧力が低下し、さらに 酸素不足を招いた。



Fig.10 Combustion characteristics with EGR



Fig.11 Effect of EGR rate on engine performance

- 59 -

3.3 水素/ディーゼル混焼の課題

水素は可燃範囲が広い,最小点火エネルギーが小さい,燃焼速度が速いなど,炭化水素系燃料とは著しく燃 焼性が優れる。一方でそのことがエンジン等の熱機関に おいて水素の扱いを困難にしている。特に本研究のよう に,水素を空気と予混合してエンジンへ供給する方式 では,逆火,過早着火,アフターファイア等の異常燃 焼による課題がある⁽⁷⁾。本報では,図12のように,エン ジン出力や水素割合によって水素の可燃範囲を十分に超 えた領域で水素/ディーゼル混焼を実施した。その結果, 様々な異常燃焼を経験し,特に過早着火や燃焼変動が課 題となった。



Fig.12 Hydrogen concentration operated in this study

図13は各エンジン回転数において、水素割合と吸気 中の水素濃度と過早着火の関係を示し(左図),また排 気中の水素割合との関係(右図)を示す。水素割合が80 %程度では吸気中の水素濃度は10 vol.%程度に達するた め、過早着火が発現する。また異常燃焼は高回転ほど発 生しやすく、エンジン燃焼室壁面などの温度と関係する と考えられる。一方、エンジン排気に含まれる水素濃度 と供給した水素との関係から水素の未燃率(Rub(H2)) がわかり、水素割合が小さいほどRub(H2)が大きくな ることがわかる。したがって、水素を高濃度で供給する と過早着火のような異常燃焼が発現するが、一方、過度 に低濃度で供給すると未燃焼率が高まり、排気管におい てアフターファイアを起こすなどの可能性が高まる。



Fig.13 Relationship between hydrogen fraction and abnormal combustion

また本研究では多気筒エンジンを使って水素/ディー ゼル混焼特性を調べたが、図14のように、所定の水素割 合にまで水素供給量を増加すると、気筒間でのバラツキ が大きく表れた。気筒間バラツキは、吸気導入管内での 水素の不均質分布に起因すると考えられ,今後はエンジ ンへの水素供給方式について見直す必要がある。



Fig.14 Example of cylinder-by-cylinder variation

4. まとめ

本研究では、CO₂フリー水素の活用例として、分散型 エンジン発電機において、水素/ディーゼル混焼特性を 多気筒エンジン実験により調べた。中負荷運転域におい て、水素割合50%程度であれば、EGRの適用等により 高効率・低NOxな水素/ディーゼル混焼が成立した。ま た、水素割合が高まると過早着火や気筒間バラツキ等の 異常燃焼が課題となるため、それらの対策が必要であ る。

謝辞

本報の内容の一部は、「福島県再生可能エネルギー次 世代技術開発事業(平成25~27年度)」に関連して実施 したものであり、関係各位に謝意を表す。

5. 引用文献

- 経済産業省資源エネルギー庁<http://www.enecho.meti. go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf>(参 照2016年5月11日).
- (2) International Energy Agency, Energy Balances of OECD Countries 2013, (2013)
- (3) International Energy Agency, Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells < https://www.iea.org/ publications/freepublications/publication/TechnologyR oadmapHydrogenandFuelCells.pdf>(参照2016年5月 11日).
- (4) 市川勝,水素エネルギーがわかる本水素社会と水素ビジネス (2007), p.109,オーム社.
- (5) Ishimoto, Y., Fukuda, K., and Sakata, K. Evaluation and Comparison of Intercontinental Renewable Energy Transportation System, J. Japan Institute of Energy, Vol. 94 (2015), pp. 1337-1342.
- (6) Suzuki, Y, and Tsujimura, T., The Performance of Multi-Cylinder Hydrogen / Diesel Dual Fuel Engine, SAE Paper, No. 2015-24-2458 (2015).
- (7) 古濱庄一,未来をひらく水素自動車 (1992), p.26-34, 東 京電機大学出版局.



司 *1



-C-章 (続き)

[英語] : a wild goose chase

{意味} :「めくらめっぽうな追求」,「当てにならない 探求」

【説明】: 16世紀の末、イギリスで奇妙なスポーツが流行っていたようです。先ず乗馬したグループの人達が、広い原野の中央で、横一列に並びます。原野にはあちこちに藪もあり、林も見えます。次に、その中央にいる騎手がリーダーとなって、原野のどの方向でも、彼(恐らく女性はこのスポーツには参加していなかったでしょう)の思いのままの方向に、突然走り出すのですが、渡り鳥の鴨が組む編隊と同様に、隣の騎手達に対して少しずれ、間隔を一定に保ったまま、同じ方向に、同じ速度で走り続けねばなりません(参考資料1)。そして、前にどんな障害があっても、それを無視せねばならないのです。この無茶苦茶さが、このスポーツの醍醐味だったそうです。

この熟語は、このスポーツに由来しています。リー ダーの気紛れで方向が決められ、他の騎手達は、何が起 こるか考えもせず、盲目的にリーダーに追従する事から、 この言葉、今日では「めくらめっぽうな追求」とか「当 てにならない探求」という意味に使われます。

この言葉の使用例を一つ。新しいパソコンが欲しい, としましょう。理に長けた人なら,インターネットで性 能から値段まで調べ上げ,何処の店へ行けば良い,と結 論してから出掛けるでしょう。また,人によっては,町 の中心まで行けば店が沢山あるし,何トカなろう,と出 掛ける人もいるでしょう。でも,この人に付き合って 大きな町の中をここあそこと彷徨するのは,疲れるもの です。とうとう相棒が不満を漏らしました。「何だよー。 どこで売ってるのか,知らないのかよー。こんなめくら めっぽうな事,俺はもう疲れ果てて,付いて行けねー よ。」この終わりの部分,英語で,"This is really a wild goose chase. I am done!"となるでしょうか。この表現, 職場での仕事のやり方に対しても使えます。

{英語} : with flying colo(u)rs

(意味) :「大成功で」,「上手く行って」

{説明} : 読者諸氏の中で,英語圏の人達とのミーティングでこの言葉を聞かれた方が多いかと思います。この言葉,会話だけでなく,業界誌にも見られます。

原稿受付 2016年3月23日

使用例を一つ挙げましょう。或る会議での発表者が, 「このパラメーターについて, 仮定Aを使ってこのソフ トをランすると, 解が収束しません。しかし, 仮定Bを 使うと非常に良い収束を示し, 予測通りの解が得られま す。」と報告しました。上の文の後ろ半分を英語にすると, "However, if we assume B for this parameter, the run converges with flying colo(u)rs, and the result is in a good agreement with our prediction." となります。

吉中

YOSHINAKA Tsukasa

この言葉の由来は、昔の軍隊のしきたりにあったそ うです(参考資料4)。戦争の前線で、或る部隊が敵 に攻撃を掛け、敵陣を奪ったとき、背後にいる連隊長 に攻撃成功を知らせるために、占領地の一番高い所に 連隊旗をあげたそうです。それを双眼鏡で見た連隊長 は、「オゥ、我が連隊旗がひるがえっておる。攻撃は成 功じゃ。」と言うでしょう。つまり、"Oh! A flag with our regimental colo(u)rs is flying. The attack was successful." です。

- {英語} : be set in concrete
- **(意味)**:「最終的な決断をする」

{説明} : この言葉のを訳せば、「コンクリートに固め こむ」でしょうか。一旦コンクリートに固められると、 もう形を変える事は出来ません。この意味合いから、こ の言葉、「最終的な決断をする」という場合に使われます。

例えば、或る決定をせねばならないにも拘らず、グ ループの間で討論が尽きず、明快な結論に達する事が出 来なかったとしましょう。そこで、討論された中から案 を一つ選び、暫定的な決定とする事になりました。中に は、それに反対する人達がいましたが、グループのまと め役が、「いや、これはあくまで暫定的なもので、最終 的な決定に至るまで、将来、討論を続ける。」と約束し ました。これを英語に簡約すると、"No, the decision is not set in concrete. We will continue to discuss it."と なるでしょう。

これと同じ意味合いの言葉で, "be carved (or set, or written) in stone"があります。

参考資料(参考資料は本連載を通した番号で示しています)

- Robert Hendrickson, QPB (Quarterly Paper Book Club) Encyclopedia of Word and Phrase Origins, Second Edition (2004), Facts on File,, Inc.
- John Ayto, Oxford Dictionary of English Idioms, Third Edition (2009), Oxford University Press.

^{*1} 独立コンサルタント

┫技術論文 ┣━

流体構造連成とシステム同定による複合モード翼列フラッター解析手法

Multimode Cascade Flutter Analysis Based on Fluid-Structure Interaction Simulation and System Identification

立石 敦*1 TATEISHI Atsushi **渡辺 紀徳***2 WATANABE Toshinori **姫野 武洋**^{*2} HIMENO Takehiro

ABSTRACT

A new framework of aero-structure integrated analysis is presented for the prediction of cascade flutter. The proposed analysis method considers effects of the airflow on blade vibration such as change in frequency and mode-shape based on a fluid-structure interaction (FSI) simulation and system identification technique. The aeroelastic system of vibrating cascade is identified from the free response of blade vibration obtained from a time-domain FSI simulation. Aeroelastic eigenmodes, which describe blade frequency, damping rate, and modeshape in the airflow, are obtained directly from an eigenanalysis of identified aeroelastic system. The approach is validated through comparison with semi-analytical reference solutions obtained by LINSUB program. The comparison of aeroelastic eigenmodes shows that the proposed approach is capable of obtaining flutter characteristics accurately even under the presence of aerodynamic coupling among structural modes.

Key words : Aeroelasticity, Cascade Flutter, Light-weight structure, Fluid-structure interaction, System identification

1. 緒言

高バイパス比ターボファンエンジンは,推進効率を高 めるためにバイパス比が上昇する傾向にあり,ファン外 径は増加の一途を辿っている。更なるバイパス比向上を 実現するためには,ディスクやファンケースの強度に対 する要求を緩和するために,動翼の軽量化が不可欠であ るといえる。そのため中空加工や複合材料の使用,薄肉 化といった技術が実機エンジンに適用されている⁽¹⁾。

フラッターは翼の振動に伴い生じる空気力により翼振 動が増幅される自励振動で、一般に複数の構造振動モー ド間での空気力による連成が存在する。しかし、翼列の 場合は、慣例的に翼構造が十分剛であるという仮定の もと、翼振動モード間の空力的な連成は無視されてき た。そのため、今後いっそう翼構造の軽量化が進んだ場 合に生じうる翼振動形態は全く調査されていない。ま た、1980年代に精力的に研究されたAdvanced Turbo Propeller や Unducted Fan と呼ばれる高速プロペラ、 およびオープンロータ⁽²⁾では、作動中の翼振動特性が気

原稿受付 2015年12月25日 校閲完了 2016年6月30日 *1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙専攻 日本学術振興会 特別研究員PD 〒113-8656 文京区本郷7-3-1 *2 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙専攻 流の影響で真空中のものから大きく変化し,曲げモード とねじりモードが連成する複合モードフラッターが生じ る⁽³⁾。この場合の振動特性の検討には,流体・構造連成 解析 (FSI) が必須となる。

振動特性が流れの影響を強く受ける場合のフラッター に関する先行研究として、古くは花村による曲げねじ りフラッターの研究⁽⁴⁾, 1980年代のAdvanced Turbo Propeller / Unducted Fan に対する研究^{(3),(5)-(6)},近年の 類似研究にはClark⁽⁷⁾のものがある。これらでは空気力 モデルに揚力面理論が用いられているため初期検討や感 度解析には有効だが、近年主流のCFDに基づくフラッ ター解析と比較すると、流れ場が理想的な場合に限られ、 詳細な検討には適さない。近年Mayorca®は翼構造にグ ヤン縮退を用いた自由度縮小型有限要素モデルを採用し、 各自由度に対する空気力データベースを非定常CFDに より構築した後、振動方程式の固有値問題を近似的に解 く汎用性の高い手法を提案している。しかし、1つの作 動点に対する解析でも代数的空気力モデルの構築に「構 造モデル自由度数×翼間位相差数×無次元振動数ケー ス」という膨大な非定常CFDの解析ケースが必要なの が実用上の欠点である。このように、複合モード翼列フ ラッターの検討でかつて用いられてきた古典的手法を現 代的な数値解析で代替する実用的な手法は現状として存 在しない。

以上のような研究状況から,空気力と翼振動の相互作 用という原理に立ち返り,長い年月を経て発展してきた 数値解析手法の長所を取り込みながら,軽量構造に対す る新たな翼振動解析手法を確立することの意義は大きい。

本研究では、まず、気流と翼振動の相互作用を的確に 模擬するための数値解析手法である双方向のFSIに着目 し、手法の構築を行った。加えて、FSIを用いてフラッ ターのような自励振動を解析する際に重要な概念となる 「空力弾性モード」を連成解析結果から算出する手法を 提案する。実用的な系への応用を念頭に置き、本報では、 空力弾性モード同定の原理、数値解析手法の概要、理論 解との比較を通じた検証に関し報告する。

2. 翼振動の解析手法

2.1 翼列・多重モードの空力弾性方程式

流れ中における翼振動は,変動流体力を含む翼振動の 運動方程式である空力弾性方程式に支配される。フラッ ターは一般に低次の振動モードが関わるため,翼構造の みから定まる下位 N_f 個の構造振動モードに振動自由度 を取ると,運動方程式は一般に以下の形で表せる。

$$\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{q} = \boldsymbol{f}_{FR} + \boldsymbol{f}_{SE} \tag{1}$$

行列A, ベクトルqはそれぞれ構造振動モード剛性行 列, モード変位ベクトルである。モード質量行列は単位 行列となるよう規格化されている。右辺は変動空気力の モーダル力ベクトルであり, 翼の運動に由来して生じな い成分である強制空気力freと, 翼の運動によって生じ る成分である自励空気力fseに分類される。また, ここ では単純化のため構造減衰を0とする。構造振動モード の導入により左辺は対角化されているため,構造振動 モード間の連成は右辺の自励空気力を介してのみ生じる。

フラッターは自励空気力と翼振動の連成で生じる現象 であるため、*f*_{FR}を無視し、*f*_{SE}のみを考慮する。ここで は翼振動を微小振幅として取り扱う。*f*_{SE}は自励空気力 であるため、翼振動変位・速度、自励空気力係数行列*A*、 *B*を用いた線形結合、

$$\boldsymbol{f} = A\boldsymbol{q} + B\dot{\boldsymbol{q}} \tag{2}$$

で表す。自励空気力として全ての翼の運動を考慮に入れ, 翼列中の全ての翼に対して運動方程式を立てると次式が 得られる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{q}}_1 \\ \vdots \\ \ddot{\boldsymbol{q}}_{Nb} \end{bmatrix} + \operatorname{diag}(\boldsymbol{A}) \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{q}_{Nb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{q}_{Nb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{q}}_1 \\ \vdots \\ \dot{\boldsymbol{q}}_{Nb} \end{bmatrix}$$
(3)

Eq. (3) が翼列全体に対する自由振動の振動方程式で あり、N_bは翼枚数である。なお、ここでは問題を簡略 化するために、以下の仮定を置いている。

1. 翼は十分剛なディスクに植え付けられており、ディ スクやシュラウドを介した自由度間の連成は無い。

- 2. 全ての翼は同一形状で同一の機械的性質を持つ。
- 3. 全ての翼は同一の流れ状態下にある。
- 4. 自励空気力係数行列A, Bは時不変な量である。

仮定1はEq.(3)がディスクの変位や剛性行列の非対 角成分を含んでいないこと、仮定2はモード剛性行列お よびモード形状行列が全ての翼で等しいことで反映され ている。また、仮定2、3より、自励空気力係数行列*A*、 *B*は翼列周方向に回転対称性を持つため、Eq.(4)に示す ブロック巡回行列として表現される^(9-t0)。

$$[A_{ij}] = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \cdots & A_{N_b} \\ A_{N_b} & A_1 & \cdots & A_{N_b-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_2 & \cdots & A_{N_b} & A_1 \end{bmatrix}, [B_{ij}] = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & \cdots & B_{N_b} \\ B_{N_b} & B_1 & \cdots & B_{N_b-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_2 & \cdots & B_{N_b} & B_1 \end{bmatrix}$$
(4)

2.2 翼列の空力弾性モード

気流中における翼列の自由振動は、Eq. (3)の自由振 動解で表現され、その安定性は固有値問題の解より判定 できる。 λ を固有値、 ψ を固有ベクトルとし、Eq. (3)を 固有値問題にするとEq. (5)となる。

$$\lambda \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi} \\ \lambda \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O & I \\ -\operatorname{diag}(\Lambda) + [A_{ij}] & [B_{ij}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi} \\ \lambda \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix}$$
(5)

Eq. (5) を解くことで、複素固有値λ、複素モード形状 ψ が全自由度数 N_bN_f 個求まる。Eq. (3) の固有モードは 自励空気力を考えない構造振動モードとは異なり、空力 弾性モードと呼ばれる。 λ は自由振動解における時間方 向の情報を表す。空力弾性モード減衰率 μ_{AE} ,モード振 動数 f_{AE} は、 λ の実部、虚部からEq (6) で求まる。 μ_{AE} の 符号が負の際、翼振動は負減衰となり自励振動であるフ ラッターが生じる。また、 ψ の各成分は解の空間方向の 情報を表し、自由度間の振幅比・位相差(例えばたわみ モードとねじりモードの間)を求めることができる。

$$\mu_{AE} = -\operatorname{Re}(\lambda) \quad , \quad f_{AE} = |\operatorname{Im}(\lambda)| / 2\pi \tag{6}$$

なお、塩入⁽⁸⁾が述べているように、仮定2,3のもとで は運動方程式は周期対称性をもち、隣接翼との振幅・位 相差が一定の複素モード形状が固有方程式の解となるた め、単一構造振動モードの解析においては一自由度振動 系に帰着する。しかし、モード間の空力的連成やミス チューニングを含む場合には固有値問題を解く必要があ る。

Eq. (3) からわかる通り,空力弾性モードの算出には 自励空気力係数*A*, *B*が必要である。しかし,これらは非 定常CFDを行う前にはわからない。そのため,何らか の方法を用いて*A*, *B*を決定する必要がある。

2.3 翼列全体の空力弾性システムの同定

翼列に対する実験的な自励空気力の計測には,決まっ た翼間位相差や振動モードで翼を強制加振した際の空気 力応答を計測し,自励空気力係数を取得する強制振動法 が用いられる。同様のアプローチはCFDを用いた自励 空気力の算出においても一般に用いられている。 しかし、複数の構造振動モードを考える際には、少な くとも考慮する構造振動モードの数だけのCFD解析が 必要となり計算コストが大きい。また、*A*,*B*は翼の振動 数に依存するため、CFD解析で与える翼振動数と、流 れの影響により変化した翼振動数の差にも注意する必要 がある。そのため、いかに効率よく空力弾性方程式 Eq. (3)を非定常CFD結果から構築し、翼列全体の自由振動 特性を得るかが、実用的な系で多自由度のフラッター解 析を行う上での鍵となる。そこで本研究では、既往研究 にみられる翼強制加振時の空気力応答計測ではなく、流 体・構造間の相互作用が自動的に考慮されるFSIと、シ ステム同定の考え方に基づく新たな翼列フラッター解析 手法を提案する。

数値解析においては, Eq. (3) における未知項は自励 空気力係数*A*, *B*のみである。また仮定4に挙げたように, 時間平均流れが過渡的に変化しないような短い時間を考 えた場合, *A*, *B*は時不変であるとみなせる。そのもとで は翼振動がEq. (3) に支配されることから, FSIで得た翼 振動の時間履歴を用いて*A*, *B*を決定する手続きを考える ことができる。

まず翼変位履歴が既知という状況で*A*, *B*を未知ベクト ルとして再定義すると, Eq. (3) 右辺の自励空気力変位 同期項はEq. (7), Eq. (8) のように書き換えられる。

$$\begin{bmatrix} A_{1} & A_{2} & \cdots & A_{N_{b}} \\ A_{N_{b}} & A_{1} & \cdots & A_{N_{b}-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{2} & \cdots & A_{N_{b}} & A_{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_{1} \\ \boldsymbol{q}_{N_{b}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{1} & Q_{2} & \cdots & Q_{N_{b}} \\ Q_{2} & \cdots & Q_{N_{b}} & Q_{1} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ Q_{N_{b}} & Q_{1} & \cdots & Q_{N_{b}-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{1} \\ \vdots \\ A_{N_{b}} \end{bmatrix}$$
$$= \widetilde{Q}_{A} \boldsymbol{A}$$
(7)

$$A_{i} = \begin{bmatrix} A^{11}A^{12}\cdots \\ A^{NfNf} \end{bmatrix}_{i}^{T} , \quad Q_{i} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_{i}^{T} & & \\ & \boldsymbol{q}_{i}^{T} & \\ & & \ddots & \\ & & & \boldsymbol{q}_{i}^{T} \end{bmatrix}$$
(8)

ここで,部分ベクトルA_i,部分行列Q_iはそれぞれi番 目の翼振動変位に同期する自励空気力係数行列を1次元 のベクトルとして再定義したものと,その係数である*i* 番目翼のモード変位を成分とする行列である。また,翼 振動速度変位同期成分についても同様の変形を施す。さ らに見通しの良い定式化を得るために,慣性力・弾性力 の総和であるEq. (3)の左辺をEq. (9)のようにベクトル**R** と再定義する。

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\ddot{q}}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\ddot{q}}_{Nb} \end{bmatrix} + \operatorname{diag}(\boldsymbol{\Lambda}) \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{q}_{Nb} \end{bmatrix}$$
(9)

するとEq. (8), Eq. (9) を用いて, Eq. (5) の運動方程式 はEq. (0)の形に書き換えられる。ここでXは任意時刻の モード変位・速度を成分とする行列, *∂***F**は未知量であ る自励空気力係数行列である。

$$\begin{bmatrix} \widetilde{Q}_{A} & \widetilde{Q}_{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} \\ \boldsymbol{B} \end{bmatrix} = \boldsymbol{R} \Leftrightarrow X \partial \boldsymbol{F} = \boldsymbol{R}$$
(10)

この形式を基にして自励空気力係数を決定する。図1 は翼振動のFSIによって翼のモード変位がサンプルされ る様子を表している。時刻 $t = t_1$ から $t = t_{Kd}$ のKd個の時 刻において,全ての翼に対してモード変位,速度,加速 度のサンプルを行う。すると各時刻でX,**R**が求まるの で, ∂ **F**が時不変であるという仮定の下に, Eq. (11)の過 剰決定連立一次方程式が導ける。

$$\begin{bmatrix} X(t_1) \\ X(t_{K_d}) \end{bmatrix} \partial F = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(t_1) \\ \vdots \\ \mathbf{R}(t_{K_d}) \end{bmatrix} \Leftrightarrow \hat{X} \partial F = \hat{\mathbf{R}}$$
(11)

上式に基づき,サンプルされた翼変位データを最も良 く説明する自励空気力係数行列を,最小二乗法を用いて Eq.(12)で求める。求まった係数行列を用い固有値解析 を行うことで,翼列における空力弾性モードを算出する ことができる。

$$\partial \boldsymbol{F} = (\hat{\boldsymbol{X}}^T \hat{\boldsymbol{X}})^{-1} \hat{\boldsymbol{X}}^T \hat{\boldsymbol{R}}$$
(12)

なお、実験的手法で用いられるシステム同定手法とし てはカルマンフィルタを応用したものや、ランダムデッ ク⁽¹¹⁾により生成された自由振動波形を用いる方法がある。 本研究では翼振動の信号が連成シミュレーションによっ て生成されることから、最もシンプルだと考えられる、 最小二乗法を用いたものを採用している。

2.4 空力弾性モードの同定不確かさに関する指標

ここまで展開した空力弾性モードの同定過程において は最小二乗法が用いられていることから,同定結果の質 に対して常に配慮するのが望ましい。同定結果の質を考



Fig. 1 Sampling of blade vibration from time history obtained by FSI

える際に、まず同定結果の自励空気力係数行列を $\partial \overline{F}$ と 表す。 $\partial \overline{F}$ を用いた際に生じる、 $t_1 \sim t_{Kd}$ までの全時刻に 対する運動方程式の残差として、誤差ベクトル ε がEq. (13) と定義できる。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \hat{\boldsymbol{R}} - \hat{\boldsymbol{X}} \partial \overline{\boldsymbol{F}} \tag{13}$$

最も単純な最小二乗法結果の品質を表す指標は,決定 係数R²値である。これは同定結果から生じる運動方程式 残差をEq. (11) 右辺で規格化したもので, Eq. (14) で表せ る。R²は0から1の値を取り,1に近いほどシグナル に用いた翼振動履歴より求めた同定結果が,想定してい る線形化自励空気力モデルを用いた運動方程式に当ては まっていることを示している。

$$R^{2} = 1 - \boldsymbol{\varepsilon}^{T} \boldsymbol{\varepsilon} / \hat{\boldsymbol{R}}^{T} \hat{\boldsymbol{R}}$$
(14)

次に、同定した空気力係数の分散共分散行列∑²は、誤 差の伝播に対する検討を単純化するために、誤差ベクト ルの各成分に平均0,無相関であることを仮定する。こ のとき、誤差ベクトルの各成分に対する分散をσ²として、 次式で求められる¹²。

$$\Sigma^{2} = (\hat{X}^{T} \hat{X})^{-1} \sigma^{2}$$
 (15)

最小二乗法に起因して生じ、同定した空力弾性モード 固有値に伝播した不確かさを評価する際には、固有値問 題の求解過程が含まれるため、線形変換で不確かさの伝 播を考えることができない。したがって、平均∂F、分 散共分散∑2の多次元正規分布として∂Fの不確かさをモ デル化し、この不確かさでばらつく自励空気力係数を用 いて多数回の固有値解析を行う、モンテカルロ法によっ て同定された空力弾性モードの統計的不確かさを求めた。 以降、特に断らない限り、同定結果の固有値分布には 99%信頼区間幅を合わせて示している。

3. 流体-構造連成解析

前述の時間領域空力弾性モード同定手法は,流体構造 連成解析により算出された翼振動の時間履歴に適用され ることから,本節では連成解析の手法に加え,物理的に 妥当な振動解析を行うためのFEM/CFDソルバ間での流 体力・構造変位の受け渡しについて述べる。図2に,時 間領域の流体構造連成解析において1時間ステップを進 める際のフローチャートを示す。まず求まっている最新 の固体壁上の空気力を構造ソルバにマッピングし,解析 対象時刻(新時刻)の翼変位を求める。ここで得られた 変位を流体ソルバに転送し,新時刻における流体の諸 量を求める。流体・固体双方で新時刻の量が求まった ら,両者が十分収束したかを確認し,次のステップに進 む。連成解析は,このように内部反復を繰り返し新時刻 の量を逐次更新する漸近的強連成によって行われる。

3.1 流体・固体の数値計算手法

本研究では、マルチブロック有限体積法による圧縮性



Fig. 2 Flowchart of FSI computation

流体解析と,翼の微小振動の運動方程式を組み合わせた 連成解析コードを使用する。流体の解法は翼振動を模擬 するためArbitrary Lagrangian - Eulerian型の支配方程 式を使用し,有限体積的な移動格子法を導入した。非 粘性流束はSHUS^{III}により評価する。時間進行法として, 定常流れ解析ではEuler陰解法による局所時間刻み法を, 翼振動解析では陰的な二次精度三点後退差分法を3回 の内部反復と組み合わせて用いる。陰解法は圧力,速 度,温度の基本変数に対して構築し,Red-Black Gauss-Seidel法により線形反復の圧力残差が初期の1/10になる まで反復する^{III}。翼振動の解析は,各構造振動モードの 運動方程式を解き変位を重ねあわせるモード合成法を用 いる。

3.2 仕事保存型の流体力受け渡し法

以上の解析枠組みで解析のロバストさや複雑な系の扱いやすさを決定するのが,離散化の位置や量の定義が異なる固体ソルバと流体ソルバを結びつける手法である。 また,特にフラッター解析では空力仕事の総和により翼振動の減衰・発散が決まるため,空気力による仕事が保存するような空気力/構造変位の転送手法⁽⁵⁾⁻⁽⁶⁾を用いた。

仕事保存型のデータ転送手法は、仮想仕事原理に基き、 流体格子上の変位・空気力を*u_a*, *F_a*, 構造モデル上の変 位・空気力を*u_s*, *F_s* と表すと、両モデル上で仕事の一致 する条件、

$$(Work) = \boldsymbol{u}_a^T \boldsymbol{F}_a = \boldsymbol{u}_s^T \boldsymbol{F}_s \tag{16}$$

に基く。ここで,流体格子上の変位*u*aが構造モデル変 位に対し行列*G^T*を用い線形に内挿されるとき,仕事の 保存関係から,流体力も同じ行列*G*を用いて

$$\boldsymbol{u}_a = \boldsymbol{G}^T \, \boldsymbol{u}_s \,, \quad \boldsymbol{F}_s = \boldsymbol{G} \boldsymbol{F}_a \tag{17}$$

と算出すればよい。この関係を満足する定式化で,かつ 離散化位置や格子密度の不一致に対してロバストな手法 として,本研究では移動最小二乗法⁽³⁷⁾を採用した。

3.3 移動最小二乗法による構造変位の受け渡し

図 3 に移動最小二乗法 (Moving Least Squares, MLS)の模式図を示す。MLSでは、周辺の値の距離に

応じた重みつき最小二乗法によって内挿を受ける点における値が定まる。内挿係数は最終的に,基底関数ベクト ルp,内挿位置と周囲の点との距離rによって決まる重み 関数w,N個の周辺の点を用いてEq.(18)~(20)で算出される。 ここで,重み関数wには、メッシュレス法で物理量再構 築に用いられる重み関数の1つであり,Eq.(20)で表わさ れる4次スプライン関数を用いた。また,重み基準半径 r₀として構造モデルの最大格子幅を用いた。

$$G^{T} = \boldsymbol{p}(\boldsymbol{x}_{f})^{T} (\boldsymbol{P}^{T} \boldsymbol{W} \boldsymbol{P})^{-1} \boldsymbol{P}^{T} \boldsymbol{W}$$
(18)



Fig. 3 Mapping of blade displacement by moving least squares interpolation



(a)Typical CFD and FEM grids for aeroelasticity simulations



(b)Interpolated blade displacement of 1T mode. Solid line: interpolated displacement on the CFD grid, dashed line: displacement on the FEM grid (Source)

Fig. 4 Comparison of mapping methods of the blade displacement (MLS and Linear-CVT)



図4に、本研究で用いるMLS法と、Sadeghiらが提 案する線形内挿法の一種であるLinear-CVT¹⁶⁶を用いた 動翼1次ねじりモード変位の内挿結果を比較して示す。 Linear-CVT 法は近傍3点を用いる局所的な内挿手法で あり、CFD格子上の前縁・後縁で微小な凹凸が生じて しまう。一方、MLS法を用いると等高線がずれること なく滑らかに補間されており、本手法による変位マッピ ング手法によって3次元的なFEMモデル・CFD格子間 のデータ交換がロバストに実現されていることがわかる。

4. 半解析解との比較による検証

本研究で提案する空力弾性モードの同定に基づくフ ラッター解析手法が気流中における翼列の振動特性を的 確に捉えられるかを検証する。「空力弾性モード」は複 数のモードが干渉しあう場合のフラッター解析において 重要な概念であるが、検証として参照できるデータは存 在しない。そのため本研究では同定された空力弾性モー ドの評価に際して構造モデルや流れ条件の違いに伴う一 切の不確かさを排除するために、半解析解の存在する空 力弾性問題を参照解として設定する。検証は、同定され た各空力弾性モードに対して振動数、減衰率、モード形 状を参照解と比較することによって行う。

4.1 系の設定

検証に供する解析モデルとして,非粘性の亜音速流中 に迎角0で弾性支持された平板翼列を考える。翼列の仕 様と一様流の範囲を図5と表1に示す。この系では,一 様流速を上げていくと次第に減衰率が低下し,ある流速 で負減衰に転じフラッターが発生する。一様流速は上流 の全圧・全温が一定に保たれている,ブローダウン型の フラッター試験を想定し変化させた。

この平板翼列系に対する半解析的な自励空気力のモデ ルとして、Whiteheadにより開発されたLINSUBプログ ラム¹⁸⁸を用いた。LINSUBは二次元の揚力面理論によっ て、一様流中で0迎角まわりに平板翼列が振動したとき の自励空気力の微係数を算出する。LINSUBの入力パラ メタは、ピッチコード比s/c、スタガ角θ、無次元振動数 k、翼間位相差IBPA、一様流マッハ数Maである。

4.2 構造モデル

図6に検証に供した構造モデルを示す。各平板翼は 翼弦中央に重心をもち、重心まわりのねじり運動αと重 心の翼弦垂直方向の並進運動hが振動自由度として与え られている。この系では並進運動とねじり運動の慣性的 な連成はなく、空力的にのみ両自由度は連成する。表2 に構造モデルのパラメタを示す。これらのパラメタは, *Ma* < 0.5の範囲でフラッターが生じるように予め試行錯 誤によって定めた。

この構造モデルに対応する運動方程式は次で表せる。

$$\begin{bmatrix} m_b & 0\\ 0 & I_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{h}\\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_h & 0\\ 0 & K_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h\\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L\\ M \end{bmatrix}$$
(21)

右辺は平板に作用する揚力Lおよびヒンジまわりの モーメントMを表している。*mb*, *Ib*, *Kh*, *Ka*はそれぞれ 翼質量, ヒンジまわり慣性モーメント, 並進およびね じりばね定数である。空力弾性モードを求める際には, LINSUBによって得られた特定の無次元振動数翼間位相 差に対する無次元自励空気力係数を次式





Fig. 5 Flat plate cascade configuration

Table 1 Flow condition of flat plate case

Pitch/Chord	s/c [-]	1
Stagger angle	£[deg]	45
Inlet total temperature	T_t [K]	288.15
Inlet total pressure	P_t [Pa]	101325
Range of inlet velocity	<i>u</i> [m/s]	0~166
Range of inlet Mach No.	Ma [-]	0~0.5



Fig. 6 Configuration of flat plate mechanical model

rable - rarameters or meenamear mode	Table 2	Parameters	of	mechanical	model
--------------------------------------	---------	------------	----	------------	-------

Span length	<i>l</i> [m]	0.05
Chord length	c = 2b [m]	0.05
Blade mass	$m_b [\mathrm{kg}]$	0.02
Inertia of momentum	I_b [kgm ²]	4.167×10 ⁻⁶
Heaving stiffness	K_h [N/m]	3350
Pitching stiffness	K_{a} [Nm/rad]	10.3
Heaving natural frequency	f_h [Hz]	65.1
Pitching natural frequency	$f_a[\text{Hz}]$	250

で表わされる有次元の複素自励空気力係数に直し, *p*-*k* 法によって反復的固有値問題を解いた。

4.3 フラッター解析方法の概要

流体構造連成解析においては、全翼枚数が有限でなく てはならないことから、全翼枚数をN_b = 8とし、ピッチ 方向上端と下端は周期境界条件として接続した。この場 合には、ねじり運動・並進運動が連成した8つの異なる 翼間位相差(-135, -90, -45, 0, 45, 90, 135, 180[deg])が 空力弾性モードに現れ、全空力弾性モード数は翼列全体 の全自由度数に等しい16個となる。

CFDの条件を設定する際には、LINSUBと極力等しい 流れ条件となるよう、CFDでは非粘性のEuler方程式を 解き、翼面上は断熱のすべり壁として扱った。翼振動 時には流入・流出境界における擾乱の反射を防ぐため、 Gilesの準一次元無反射条件¹⁰⁰を用いた。また、翼厚みの 効果を可能な限り小さくするために、翼弦長に対する翼 厚みの比を0.001とした。図7に連成解析に用いた平板 翼列のCFD格子を示す。流入部・流出部にはH型格子を 配置し、平板翼はO型格子に包まれている。格子点数は 翼弦方向に88点、ピッチ間に78セルである。なお、翼の 番号はある翼に対して負圧面側に位置する翼の番号が大 きくなるように定められている。

翼振動計算の初期条件には、ねじり・並進両モードに 対して微小なモード速度(最大振幅で2×10⁻⁴c相当)を 与えた。その際、ねじりモードに対しては1番の翼に, 並進モードに対しては2番の翼に与えた。翼振動のデー タサンプリングとして、ねじり振動2周期目から10周期 目までの360サンプルを用いた。

4.4 自励空気力解析の検証

連成解析による検証に先立ち、LINSUBで想定する状況が本研究で用いるCFD手法を用いて正しく再現されることを示す。CFDで振動数固定, 翼間位相差一定の 翼振動解析を行い, Eq. (23) に示すねじり・並進両運動 に対する自励空気力の空気力係数を, 翼変位に対する実 部と虚部にわけて取得する。ここでa, h はそれぞれね じり, 並進運動の振幅である。



Fig. 7 Eight blades flat plate cascade configuration and CFD grid. Coloured cells are on the block boundary.

- 67 -



Fig. 8 Comparison of unsteady aerodynamic force coefficients between LINSUB (reference) and CFD results



Fig. 9 Examples of free response of the flat plate cascade

$$C_{l\alpha} = \frac{L}{\rho u^2 c l \overline{\alpha}}, \quad C_{m\alpha} = \frac{M}{\rho u^2 c^2 l \overline{\alpha}},$$

$$C_{lh} = \frac{L}{\rho u^2 c l (\overline{h} / c)}, \quad C_{mh} = \frac{M}{\rho u^2 c^2 l (\overline{h} / c)}$$
(23)

図8に, f_{α} =250Hz の加振条件について, LINSUBと CFDで得られた空気力係数に対する比較を,代表とし て $C_{l\alpha}$, $C_{m\alpha}$ を選んで示す。Ma = 0.3 の条件に対しては全 8つの翼間位相差を,また流速を変化させた際の感度と して Ma = 0.2, 0.4については翼間位相差90[deg]を表 示している。翼間位相差・流速の変化ともにCFD結果 は参照解と良好に一致している。そのため、これ以降連 成解析結果を参照解と比較評価する際、空気力モデルに 起因する差はほとんど無く、空力弾性モードの同定に関 連して生じていると考えて良いといえる。

4.5 翼の自由振動応答

連成解析によって得られた翼列の自由振動応答を図 9に示す。図9(a)はMa = 0.20 で翼振動が安定な場合で あり,計算開始時に与えた初期擾乱が他の翼に伝わる ものの激しい振幅の増大は見られない。一方,図9(b) は Ma = 0.50 でフラッターが発生する場合である。こ の場合には初期擾乱として1番翼に与えたねじり振動が 振幅の増大を伴いながら他の翼に伝わっていることがわ かる。増幅されている成分は,翼番号n = 1の波形とn = 2の波形を比べるとn = 2のほうがおよそ90deg程度位 相進みの状態にあるので,翼間位相差90度のTraveling wave modeであるといえる。また,並進自由度には元々 の並進振動モードに近い長周期の振動に加えて,ねじり 自由度に由来する短周期の振動が重畳していることから, ねじり・並進自由度は完全に独立ではなく,自由度間の



Fig. 10 R^2 values obtained at every simulation conditions

空力的な連成が存在し,振動特性が空気力の作用しない 場合から変化している。

このように、シミュレーション結果としての波形から 空気力による振動特性変化を確認できるが、空力弾性 モードを同定することで定量的な比較を実施する。

4.6 同定精度の確認

図10に, *Ma* = 0.2から*Ma* = 0.5の流れ場における同 定時に算出された決定係数*R*²値を示す。低いマッハ数 側の点である*Ma* = 0.2 では他の点よりわずかに低い値 をとっているものの,全ての計算点で*R*²値は0.96以上と なっており,自励空気力係数が翼振動の時間履歴を用い て十分よく説明されていることがわかる。したがって, 結果としての空力弾性モードも精度よく求まっているこ とが期待される。

4.7 空力弾性モードとフラッター境界の比較

図11に、一様流マッハ数をスイープした際に、各空 力弾性モードがどのように変化するかを、LINSUBによ る参照解と連成解析からの同定結果を比較して示す。翼 列系の空力弾性モードは計算で導入した全構造自由度数 と等しい。したがって本検証の場合には16個が現れる が、全てを表示し議論するのは冗長である。そこで、こ こでは代表としてStanding waveであるIBPA = 0, 180 [deg],フラッターに突入するモードであるIBPA = 90 [deg]の3つに対し、ねじり自由度由来の空力弾性モー ドであるPitching branchと、並進自由度由来の空力弾 性モードであるHeaving branchを合わせて表示してい る。

図11(a)に,空力弾性方程式の固有値から求まるIBPA = 0,90,180[deg] に対応する振動数と減衰率を示す。ま ず各翼間位相差で減衰率が異なっており,基本的な周期 翼列系の空力減衰に関する性質を満足していることがわ かる。また流速を増加させるとIBPA = 90[deg] は不安 定化しフラッターが生じること,他2つでは空力減衰が 増加し安定となる挙動が観察される。

フラッターは参照解,連成解析でそれぞれ*Ma* = 0.318, *Ma* = 0.312で生じ,参照解と数値解析結果は良好に一 致している。さらに,フラッターが生じるマッハ数より 少し高い*Ma* = 0.35まではどの翼間位相差でもPitching branch, Heaving branchともに良好に参照解のトレン ドを捉えている。以上より,フラッターが生じない範囲 (サブクリティカル)からフラッターの発生点に近い不 安定条件までの減衰率は,提案手法で的確に算出するこ とができるといえる。

図11(a)より空力弾性モードの振動数を見ると、減衰率 と同様に翼間位相差によって異なっている。参照解と同 定結果は $Ma \leq 0.35$ の範囲で良好に一致している。よっ て、減衰率のみならず揚力傾斜や付加質量効果に起因し て生じる、気流中における翼振動の周波数変化に対して も、隣接翼の及ぼす効果を含めて提案手法は正しく予測 できるといえる。

続いて,同定結果の空力弾性モード形状に対しても参 照解との比較を行う。ここで,本対象における空力弾性 モード形状は次式で表現される。

$$\begin{bmatrix} h \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{\text{AMP}} e^{i\Delta\theta} \\ \alpha_{\text{AMP}} \end{bmatrix}$$
(24)

Eq. 24 中でモード形状を決定するパラメタは、並進・ ねじり自由度振幅比 h_{AMP}/ba_{AMP} と、ねじり自由度に対 する並進自由度の位相差 $\Delta \theta$ である。

図11(b)にMaを変化させた際のこれら2つのパラメタ の変化を、参照解と同定結果を比較して示す。グラフよ り、並進・ねじり自由度振幅比と並進・ねじり間の位相 差は共に参照解とよく一致している。特に、フラッター に突入するIBPA = 90[deg]のPitching branchの空力 弾性モード形状を見ると、一様流速度の増加に伴い単調 に並進・ねじり自由度振幅比が増加している。また、フ ラッター速度付近のMa = 0.3 ~ 0.35では、ねじり振動 の最大振幅に対しておよそ10%の並進振幅が誘起されて おり、フラッター時のモード形状はもはや構造振動モー ドのそれではなくなっている。

図11(a)において、フラッター境界以降のMa = 0.4以上 ではHeaving branchの減衰率に参照解との若干のずれ が認められる。このずれの原因として、同定に用いたサ ンプル数の不足, または同定に用いた信号の質の2点 が原因として考えられる。図12に、フラッター境界以降 のHeaving branch, IBPA = 180[deg] について、サンプ ル数に対する減衰率の同定結果の変化を、代表として Ma = 0.3, 0.40, 0.45 について示す。どのケースもサンプ ル数を増やすと一定の結果に近づき,360サンプルで十 分収束した結果が得られている。従ってこのずれは、サ ンプル数の不足ではなくフラッター境界以降で生じる翼 振動履歴に原因があると考えられる。フラッター境界よ りさらに流速を増した場合,図9(b)で示したように不 安定モードが非常に急速に増幅されるために, Heaving branchの振動に関する情報がPitching branchに比べて相 対的に小さくなっていることが原因である可能性がある。


(b)Aeroelastic modeshape (amplitude ratio and phase difference between heaving and pitching degrees of freedoms)

Fig. 11 Comparisons of identified aeroelastic eigenvalues and eigenvectors from the free responses obtained by FSI simulations to the reference solutions obtained by LINSUB and p - k method



Fig. 12 Convergence history of identified aeroelastic damping rates around and after the flutter boundary (Heaving branch, $IBPA \,=\, 180 \ [\rm deg])$

4.8 自由度間の連成の感度について

振動モード形状の変化がトータルの空力減衰へ与える 影響として、減衰率の推移をねじり1自由度の場合と比 較して図13に示す。参照解ではねじり1自由度の場合は ねじり・並進連成の場合よりもフラッター速度が12%程 度高く、この感度が同定結果でも正しく捉えられている。 このように振動モード形状に気流の影響が現れる場合に



Fig. 13 Comparison of aeroelastic damping rate between pitching- heaving 2DoF model and pitching-only 1DoF model (flutter mode, IBPA = 90deg)

も,提案手法によって得られた結果はその効果が適切に 反映されている。

5. 結言

本研究では、自励空気力と構造振動間の空力的な連成 に起因して翼振動の自由振動数や振動モード形状が変化 する現象に着目し、気流と翼振動の相互作用を的確に模 擬するための数値解析手法である流体構造連成解析に よって得られた翼振動履歴から空力弾性モードを同定す る手法を開発した。本手法の特色は, 翼列フラッター解 析で標準的に用いられてきた, エネルギー保存の考え方 に基づいた空力仕事の評価ではなく, システム同定の考 え方に基づき, 空力弾性方程式を直接モデル化すること にある。また, 代数的空気力モデルの構築のために複数 回のCFDを実施する必要はなく, たった1回の連成解 析結果によって解を得ることができる。

亜音速流れ中の平板翼列に生じるねじり・並進フラッ ターについて翼1枚あたり2自由度のメカニカルモデル を設定し、LINSUBによる空気力モデルを用いた空力弾 性解析結果を信頼できる参照解と位置づけ、開発した手 法を評価した。提案手法により同定された空力弾性モー ドは、フラッターが生じない範囲またはフラッターが生 じるが増幅率があまり大きくない範囲では、振動数、減 衰率、モード形状、フラッター速度のいずれも正しい結 果が得られることを示した。加えて、本解析手法によっ て自由度間の連成に起因する空力弾性モードの不安定化 が的確に捉えられた。このことから、通常翼列フラッ ターで想定される単一構造振動モードの場合のみならず、 構造振動モード間の連成がフラッター特性に影響する場 合においても、提案手法が有効であることが明らかと なった。

本研究で提案する手法は、ファン・圧縮機・タービン に対する単一振動モードの解析だけでなく、高速プロペ ラやオープンロータといった、先進的な推進器における フラッター解析にも適用できると考えられる。

謝辞

本研究はJSPS科研費14J10312の助成を受けた。ここ に記して謝意を表する。

参考文献

- Rolls-Royce (著),日本航空技術協会(翻訳),"ザ・ジェット・エンジン",(2011),日本航空技術協会,pp. 101-105
- (2) Stapelfeldt, S. C., Parry, A. B., and Vahdati, M., "Investigation of Flutter Mechanisms of a Contra-Rotating Open Rotor", Journal of Turbomachinery, Vol. 138, No. 5, (2016), 051009
- (3) Mehmed, O. and Kaza, K. R. V., "Experimental Classical Flutter Results of a Composite Advanced Turboprop Model", (1987), NASA Technical Memorandum 88792
- (4) 花村庸治,田中英穂, "翼列における2 自由度連成フラッタ第2報,フラッタ速度と翼列条件との関係",日本機械学會論文集Vol. 33, No. 247, (1967), pp. 377-389
- (5) Kaza, K. R. V., Mehmed, O., Narayanan, G. V., and Murthy, D. V., "Analytical Flutter Investigation of a Composite Propfan Model", NASA Technical

Memorandum 88944, (1988)

- (6) Ducharme, E. H., "Velocity Scaled Aeroelastic Testing of an Unducted Fan", Massachusetts Institute of Technology Ph. D thesis, (1987)
- (7) Clark, S. T., Kielb, R. E., and Hall, K. C., "The Effect of Mass Ratio, Frequency Separation, and Solidity on Multi-mode Fan Flutter", Proceedings of the 12th international symposium on unsteady aerodynamics, aeroacoustics and aeroelasticity of turbomachines ISUUAAAT12, (2009), I12-S3-2
- (8) Mayorca, M. A., Vogt, D. M., Mårtensson, H., and Fransson, T. H., "Prediction of Turbomachinery Aeroelastic Behavior from a Set of Representative Modes" Journal of Turbomachinery Vol. 135, No. 1, (2012), 011032
- (9) 塩入淳平, "ガスタービン翼の振動の研究(第3報)一軸
 流機翼列翼のフラッタの一般理論—",機械試験所所報
 第9巻 第6報, (1955), pp.230-233
- (10) 塩入淳平, "ガスタービン翼の振動の研究(第5報) 般理論に対する補遺—"機械試験所所報 第10 巻 第1 報, (1956), pp.4-6
- (11) Cole, H. A. Jr., "On-Line Failure Detection and Damping Measurement of Aerospace Structures by Random Decrement Signatures", NASA CR-2205, (1973)
- (12) 東京大学教養学部統計学教室(編), "基礎統計学III 自然
 科学の統計学", (1992), pp.49-51, 東京大学出版会
- (13) Shima, E., and Jonouchi, T., "Role of computational fluid dynamics in aeronautical engineering No. 12: Formulation and verification of uni-particle upwind schemes for the Euler equations," NAL-SP-27, (1994), pp. 255-260
- (14) 嶋英志, "圧縮性CFD による低マッハ数流れ計算のための新しい陰的時間積分法", 第25 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (2009), C02-4
- (15) Hounjet, M. and Meijer, J., "Evaluation of elastomechanical and aerodynamic data transfer methods for nonplanar configurations in computational aeroelastic analysis", NLR-TP-95690 U, National Aerospace Laboratory NLR, (1995)
- (16) Sadeghi, M., Liu, F., Lai, K. L., and Tsai, H. M., "Application of Three-Dimensional Interfaces for Data Transfer in Aeroelastic Computations", AIAA Paper 2004-5376, (2004)
- (17) Lancaster, P. and Salkauskas, K., "Surfaces Generated by Moving Least Squares Methods", Mathematics of Computation, Vol. 37, No. 155, (1981), pp.141-158
- (18) Whitehead, D. S., "AGARD Manual on Aeroelasticity in Axial-Flow Turbomachines Vol. 1: Unsteady Turbomachinery Aerodynamics, Chapter III: Classical Two-Dimensional Methods" AGARDograph No. 298, Vol. 1, (1988)
- Giles, M. B., "Nonreflecting Boundary Conditions for Euler Equation Calculations", AIAA Journal Vol. 28, No. 12, (1990), pp. 2050-2058

┃技術論文 ┣━

遷音速ファンの部分回転数時に失速点近傍で生じるフラッターのFSI解析

FSI Analysis of Transonic Fan Flutter under Part-speed, Near-stall Operating Conditions

立石 敦^{*1} TATEISHI Atsushi **渡辺 紀徳**^{*2} WATANABE Toshinori

青塚 瑞穂*3 AOTSUKA Mizuho **姫野 武洋**^{*2} HIMENO Takehiro

室岡 武^{*3} MUROOKA Takeshi

ABSTRACT

This paper presents an application of an aero-structure integrated approach developed by authors for cascade flutter simulation. Transonic stall flutter experienced in a rig test was simulated over a wide range of part-speed operating conditions. The flutter boundary obtained by the present simulations agreed well on high rotational speed lines. However, the simulations for low rotational speed cases could not reproduce the flutter boundary. Detailed observation of the flowfield and local aerodynamic work revealed that the flutter boundary on the low speed lines was governed by the strong excitation force produced by the detached shock wave on near-stall operating points. An additional sensitivity study on the turbulence model showed the possibility of transonic buffet which caused flutter suppression in the low speed range. The accuracy in identified aeroelastic damping was also discussed in detail.

Key words : Fan, Aeroelasticity, Stall flutter, Fluid-Structure Interaction, Transonic flow

1. 緒言

前報⁽¹⁾にて,筆者らは軽量・低剛性なファン翼や高速 プロペラのフラッター解析を可能とすべく,異なる振動 モード間の干渉や気流による振動数変化といった空力・ 構造間の相互作用効果を詳細に模擬するために,流体構 造連成解析とシステム同定手法を統合した新しい振動解 析手法を提案し,気流中における翼列の空力弾性モード を正しく算出できることを示した。

最近の高バイパス比エンジン向けファンでは、様々な 種類のフラッター⁽²⁾の中でも、特に部分回転数のサージ 線近傍で生じる遷音速失速フラッターが重要な問題と なっている。図1にマップ上での典型的な発生領域を示 す。このタイプの発生領域はサージ線近傍から作動線に 向かって鋭く食い込むという特徴があるが、ファンの仕 様としてバイパス比の上昇に伴い最適な圧力比が低下す るため、背圧の高い地上静止状態では、部分回転数にお いて作動線がフラッター発生領域に近づきやすい。その

原稿受付 2015年12月25日 校閲完了 2016年6月30日 *1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙専攻

- 日本学術振興会 特別研究員PD 〒113-8656 文京区本郷 7 - 3 - 1
- *2 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙専攻
- *3 IHI



Fig. 1 Typical flutter boundary of transonic stall flutter in a fan map

ため,作動線からのマージンの予測手法や回避のための 設計指針の確立が求められ続けている。

しかし、これまで失速フラッターの発生を予測するこ とは困難であった。1970年代にF100エンジンファンの 失速フラッターに関する検討を行ったJeffersらは、当時 失速点付近の剥離を含む流れ場に使用できる流体力モデ ルが存在せず、予測が困難なことを指摘している⁽³⁾。

近年のフラッター解析における流体力モデルの多くは 数値流体力学(CFD)に基づいている。これまでCFD による検討によって,詳細な流れ場を考慮し翼振動への 影響を分析する^{(4)-(6)など}のみならず,ファンダクトが翼振 動への影響因子であることが発見される⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾など,振動 現象の理解と,それに基づく予測モデルの構築に関する 重要な知見が得られてきた。

本報では,前報で構築・検証した解析手法を用いて, リグ試験で経験された失速点付近で生じるフラッターの 再現を試みる。得られたフラッター境界および流れ場の 評価を通じて,フラッター発生状況の特徴とそこから導 かれた予測精度向上の指針,ならびに本研究のアプロー チで空力弾性モードが適切に求められる条件を議論する。

2. 翼列フラッターの解析手法

2.1 振動系の記述と空力弾性モードの同定

本研究のフラッター解析手法は、システム同定に基き、 翼の振動方程式中の自励空気力を翼振動の時間履歴を用 いて直接モデル化し、流体と構造が連成した状態におけ る振動モードである「空力弾性モード」を求める。得ら れる翼振動のパラメタは、空力弾性モードの振動数、減 衰率、モード形状である。本手法は以下の2つの手続き からなる。

(1)流体構造連成解析を実行すると、計算で取り込んだ全 ての翼(翼枚数N_b)の全ての構造振動モード(モード 数N_f)に対して翼振動の変位,速度,加速度の時間履 歴が求まる。そのため、十分な数のサンプル数を用いれ ば,翼列全体の運動方程式

$$\begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{q}}_1 \\ \vdots \\ \ddot{\boldsymbol{q}}_{N_b} \end{bmatrix} + \operatorname{diag}(\boldsymbol{\Lambda}) \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{q}_{N_b} \end{bmatrix} = \boldsymbol{A} \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{q}_{N_b} \end{bmatrix} + \boldsymbol{B} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{q}}_1 \\ \vdots \\ \dot{\boldsymbol{q}}_{N_b} \end{bmatrix}$$
(1)

における未知項である自励空気力係数行列を連成解析結 果に基き同定できる。Eq. (1) で, q_i は各翼の構造振動 モード変位ベクトル, Aは構造振動モード剛性行列で対 角行列である。また, A, Bは翼の運動に対し線形に表現 した自励空気力の係数行列で非対称密行列であり, 最小 二乗法によって同定される。

(2)自励空気力行列*A*, *B*を用い, λを固有値, ψを固有ベクトルとして, 運動方程式の固有値問題が

$$\lambda \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi} \\ \lambda \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O & I \\ -\text{diag}(\Lambda) + A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi} \\ \lambda \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix}$$
(2)

と書ける。固有値問題Eq, (2) を解き,空気力と翼振動 が連成した振動モードを求める。すると,翼列全体の振 動方程式に対する固有値分布と振動モード形状が総自由 度の数だけ得られる。固有値は振動に関する時間の情報 を含んでおり,実部,虚部はそれぞれ空力弾性モードの 減衰率µAE,振動数fAEと以下のように対応する。

$$\mu_{\rm AE} = -\text{Re}(\lambda) , f_{\rm AE} = |\text{Im}(\lambda)|/2\pi$$
(3)

また,モード形状からは翼列周方向のモード形状である 翼間位相差や,どの構造振動モードが支配的な空力弾性 モードかといった情報が得られる。

同定誤差は, 翼振動のシグナルと同定結果間に生じる 残差に基き, 各固有値の誤差を統計的に求め評価した。



Fig. 2 Meridional view of the CEFS1 fan

Table 1 Specificati	ons of CEFS1 fan
---------------------	------------------

Number of blades	18
Aspect ratio	1.6
Relative Mach number at tip	1.4
Blade material	Ti-6Al-4V
Range of flutter region and structural modeshape	80%N, 82.5%N (1F mode)

自励空気力行列の同定過程,および同定誤差の評価法に ついては前報⁽¹⁾を参照されたい。

2.2 フラッター境界の決定方式

前項の手法を用いて様々な作動点で求められた空力弾 性モードに基づいて、ファン特性マップ上におけるフ ラッター発生点(以下、フラッター境界)が求められる。 ある2つの作動点A、Bの間で、それぞれの点におけ るモード減衰率の最小値が(μ_{AE})_A > 0(正減衰:安定)、 (μ_{AE})_B < 0(負減衰:不安定)であったとする。このとき、 最低の減衰率が0となる空力弾性モードが存在する作動 点はA点、B点の間にあると考えられる。したがって、フ ラッター境界上の作動点における圧力比 π_F 、流量 m_F をA 点、B点における減衰率に基いた内挿係数*s*を用い、流 量 m_A , m_B , 圧力比 π_A , π_B から

$$s = (\mu_{\rm AE})_{\rm A} / [(\mu_{\rm AE})_{\rm A} - (\mu_{\rm AE})_{\rm B}]$$
(4)

- $\pi_F = (1-s)\pi_{\rm A} + s\pi_B \tag{5}$
- $m_F = (1-s)m_{\rm A} + sm_{\rm B} \tag{6}$

と、線形補間して求める。

3. 解析対象

3.1 CEFS1 ファン

本報における解析対象はIHI社において高効率・高 比流量を実現すべく研究開発されたCEFS1ファン⁽⁸⁾であ る。子午断面流路を図2に,仕様を表1に示す。ファン は18枚の翼をもち,64チタンのブリスクで作成されて いる。また,CEFS1はリグ試験において設計回転数比 80%N,82.5%N(Nは回転数を表す)の失速側作動点で, 動翼一次たわみモードのフラッターが発生した。



Fig. 3 Campbell diagram of CEFS1 and the range of flutter simulation

3.2 翼構造のモデル化と構造解析

フラッター解析に用いる翼形状および構造振動モード をTotal-Lagrange法による非線形有限要素解析⁽⁹⁾により 求めた。なお、ディスクは十分剛であるとし、翼根の全 自由度を固定し翼部のみの計算を実施した。図3に得ら れたキャンベル線図と低次5モードのモード形状を示 す。フラッター解析の対象とする回転数域は70% Nから 85%Nの範囲で、特性マップ上の高流量側からサージ線 間の範囲を網羅的に2.5%N刻みで行う。フラッター解析 には図に示した低次5モードを取り込む。なお、解析対 象範囲ではモードの縮退は見られず、翼のモード形状に 大きな変化はない。

3.3 流体構造連成解析

全ての解析は自作の流体構造連成解析コードにより行われた。本コードは、マルチブロック有限体積法による 圧縮性流体解析と、翼の微小振動の運動方程式を組み合 わせたものである。流体の解法は翼振動を模擬するため Arbitrary Lagrangian-Eulerian型の支配方程式を使用し、 有限体積的な移動格子法を導入した。非粘性流束と粘性 流束はそれぞれSHUS^{III}と二次精度中心差分により評価 した。乱流モデルには、一方程式型のSpalart-Allmaras モデル^{IIII}を基本に、f₂項を0とし全域乱流として用いた。 時間進行法として、定常流れ解析ではEuler陰解法によ る局所時間刻み法を、翼振動解析では陰的な二次精度 三点後退差分法を3回の内部反復と組み合わせて用いた。 陰解法は圧力、速度、温度の基本変数に対して構築し^{III}、 Red-Black Gauss-Seidel法により線形反復の圧力残差が 初期の1/10になるまで反復した。

翼振動の解析は各構造振動モードの運動方程式を解き 変位を重ねあわせるモード合成法を用いた。計算された FEMモデル上の変位は移動最小二乗法によって流体格



(a)Passage view (CFD)



(b)Half-annulus domain for the flutter analysis (FEM) Fig. 4 CFD grid and FEM model

子表面にマッピングされる。一方FEMモデル節点上の 空気力は、仮想仕事原理に基づき、仕事保存型のマッピ ング手法で算出した。

3.4 解析格子と境界条件

本解析の範囲は回転数に15%Nの幅があることから, 80%Nの翼形状で格子を作成し,有限要素法による格子 モーフィングを用いて,回転数別にそこでの翼形状を反 映した格子を生成した。図4(a)に用いた格子を示す。格 子点数は翼弦,ピッチ,半径方向にそれぞれ120,108, 120セルを配置し,1流路当たりおよそ230万点である。 翼端間隙内は23セルで模擬されている。なお,入口・出 口境界はそれぞれ,翼端部で前縁,後縁から軸コード長 の3.5,4.75倍を確保した。

定常流れ解析においては、単流路のみを解析領域に とった。また翼振動解析では、図4(b)に示すようにファ ン半周を取り込んだ。このとき、偶数の節直径(ND = 0, ±2, ±4, ±6, ±8)が空力弾性モードに現れる。

境界条件として、ファン入口では軸方向流入とし全 温・全圧を固定した。出口では単純半径平衡より静圧分 布を求めた。固体壁面上では断熱・粘着条件を与えた。 また、翼振動解析の際は、入口・出口にGilesの準一次 元無反射境界条件¹³を用いた。



Fig. 5 Characteristic map of CEFS1 fan



Fig. 6 Relationships of mass flow rate and minimum aeroelastic damping rate on each speed line

Table 2	R^2 values	of	least-square	identification	on	each	operating poi	ints
							- F O F -	

OP/Speedline	70.0%N	72.5%N	75.0%N	77.5%N	80.0%N	82.5%N	85.0%N
A'	0.998	-	0.998	-	-	-	-
А	0.996	0.994	0.993 (F)	0.998	0.998	0.998	0.998
В	0.975	0.974	0.973 (F)	0.995 (F)	0.998	0.998	0.998
С	-	0.869 (†)	0.720 (†)	0.972 (F)	0.998 (F)	0.998 (F)	0.998

(F): operating points where negative damping mode was detected,

(†): operating points where the stability of blade vibration could not be distinguished due to large uncertainty, dashed line: flutter boundary, dotted line: inception of accuracy deterioration in the modal identification.

4. ファン特性マップとフラッター境界

4.1 各回転数における定常流れ解析結果

フラッター解析に用いる定常流れ場を得るため,単流 路の定常流れ解析を行った。図5に得られたファン特性 マップのリグ試験結果との比較を示す。解析ではどの回 転数でも高流量側で圧力比が大きめに算出されたが,回 転数変化・流量変化に対する感度が適切に捉えられてお り,定性的には妥当な結果が得られたと判断した。フ ラッター解析は太線丸で示した22点に対して行い,これ らの点は図5中に示すように,各回転数で高流量側から 低流量側に向かってA',A,B,Cと呼ぶことにする。

4.2 各回転数における空力弾性モードの同定精度

各作動点で同定された空力弾性モードについて,まず 同定精度がフラッター境界を求めるために十分である範 囲について議論する。表2に,各作動点において同定時 に得られた決定係数R²値を示す。表中(F)は負減衰の モードが存在しフラッターが生じる作動点,(†)は同 定結果の不確かさが大きく安定性の判定が困難であった 作動点である。フラッター境界前後ではR²>0.97であり 十分大きいため,空力弾性モードの同定結果は適切であ るといえる。しかし,低回転数側の72.5%N,75%N C点 では他の作動点に比べR²の著しい低下が生じており,同 定結果は十分な精度を有さないことが示唆される。

各作動点で得られた空力弾性モードから最小減衰率を抽 出し,各回転数についてファン流量を横軸に,減衰率を 縦軸にプロットし図6に示す。誤差棒は統計的な同定誤 差解析より得られた減衰率推定値の99%信頼区間で,同 定された減衰率の不確かさを示す。誤差は特に77.5%N 以下の低流量側で大きく,著しいR²値の低下がある作動 点と対応している。しかし,フラッター境界の零減衰点 は誤差棒の小さい領域に位置しているため,精度よく求 まっていることが高いR²値と併せて確認できる。

4.3 フラッター境界

図6の流量-減衰率の関係より,連成解析では75%Nから82.5%Nに零減衰点や負減衰点となる作動点が存在し, フラッターが生じている。これらの回転数では,零減衰 付近で流量を絞った際に減衰率が急激に落ち込んでい る。しかし,72.5%N以下ではフラッターは生じず,流 量を絞った際も減衰率の低下は緩和される傾向にあり, 75%N以上で見られる急激な変化は見られない。このよ うに,特定の回転数域における低流量側作動点での減衰 率の急激な落ち込みが本対象におけるフラッター境界近 傍の変化の特徴であるといえる。

フラッター境界の作動点を求め、マップ上に図示しリ グ試験結果と比較したものを図7に示す。リグ試験結果 で生じた80%N,82.5%Nのフラッター境界は連成解析で も定性的に再現されている。なお、青塚らによる非連 成の解析結果¹⁴¹でも同様の結果が得られていることから、 この対象では連成解析を用いても得られるフラッター境 界は大きく変化しないと考えられる。しかし、試験では フラッターが起こらないはずの低回転数側の75%Nから 77.5%Nでもフラッターが生じ、数値解析結果は部分的 に試験結果から逸脱する結果となった。

以上の結果における疑問点は次のようにまとめられる。



Fig. 7 Characteristic map of CEFS1 and obtained flutter boundary by rig testing and FSI simulations



(a)72.5% speed line, point A (out of flutter)



(c)80.0% speed line, point B (out of flutter)



(e)85.0% speed line, point B $\ (out \ of \ flutter)$

(1)低回転数側におけるフラッター境界の差異
 (2)低回転数失速側作動点での著しい同定精度悪化
 以下の章では、これらについてフラッターの発生状況
 に対する分析を交えながら、原因と考えられる事項について議論したい。

5. フラッター境界近傍の流れ場

まず,フラッターが起こる流れ場と起こらない流れ場の間にどのような共通点・相違点が見られるかを調べた。図8に,代表的な回転数として,試験でも解析でもフラッターの発生しない72.5%N(作動点A,B),85%N(作動点B,C)と,フラッターが発生する80%N(作動点B,C)におけるフラッター境界付近の翼負圧面上限界流線と85%翼高さ位置の相対マッハ数場を可視化して示す。



(b)72.5% speed line, point B (out of flutter)



(d)80.0% speed line, point C (in-flutter)



(f)85.0% speed line, point C (out of flutter)

Fig. 8 Limiting streamline on the suction surface and relative Mach number field on the 85% span height. Shaded area shows axially-reversed area on the blade surface.



Fig. 9 Comparison of local aerodynamic work distribution on the suction side of the blade across the flutter boundary

翼面上の影付き部は軸方向の逆流域を示している。

まず,これら4つの作動点で共通する流れ現象を列挙 すると、①:翼根からMidspanにかけて生じる前縁剥離, ②:①の前縁剥離により生じた逆流域・低運動量流体に 生じる半径方向二次流れ、③:Midspanから翼端にかけ て存在する前縁付近の離脱衝撃波、④:②の低速領域と ③の離脱衝撃波との干渉、とまとめられる。

しかし、①から④の挙動は回転数によって異なっている。フラッターが生じない72.5%Nでは、作動点AからBの変化で前縁剥離が90%翼高さほどまでせり上がり、A点で前縁付近に位置していた離脱衝撃波は消失する。

一方,フラッターが生じる80%Nでは,作動点BからC の変化で衝撃波は前縁側に移動するが,依然として前縁 付近に位置している。また,壁面上では,低スパン位置 から移流してきた低運動量流体との干渉②により衝撃波 下流に大きな剥離領域が生じていると同時に,衝撃波の 足元が前縁側に強く押し出されている。

回転数を上げ85%Nになると、最も失速側に位置する 作動点Cでも35%翼高さ以上の前縁は付着流になってい る。加えて、前縁剥離下流の二次流れと離脱衝撃波の干 渉は低回転数側に比べ小さく、翼間マッハ数分布にも 80%Nのような衝撃波の剥離域による前進は見られない。

以上のように、フラッター境界付近の流れ場は、回転 数変化に敏感な遷音速流れ場において、異なる翼高さ位 置における流れ現象が壁面付近で相互干渉することで衝 撃波位置やその足元の剥離部の大きさが決まっているこ とが推察される。



Fig. 10 Summation of aerodynamic work on the suction and pressure sides

6. フラッターに寄与する翼励振力と流れ場の関連

衝撃波のフラッターに対する役割を理解するために, 連成解析の結果から空力弾性モードに対応する変動圧力 を再構築し, Eq. (7)のように翼振動1周期の平均から 翼面上の局所的な空力仕事分布LWを求めた。なお,空 力仕事が正の部分は励振力,負の部分は減衰力としての 自励空気力の作用を意味する。

$$LW = \frac{1}{T} \int_{t}^{t+T} -p\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{v} \, dt \tag{7}$$

図9に各回転数におけるフラッター境界前後での負圧 面上の空力仕事分布を示す。負圧面上の離脱衝撃波足元 はどの回転数でも強い励振力として作用している。また, 前縁剥離部分は直接的には励振力に寄与していない。

フラッターが生じない72.5%Nでは作動点AからBの

間における衝撃波の消失と同時に励振力も消失してい る。一方で、数値解析でフラッターが生じた75%Nから 82.5%Nまでは、流量を絞っても衝撃波が翼面上に位置 し励振力も失われていない。よって、低回転数側のフ ラッター境界を決定づける流動現象は、「離脱衝撃波が 前縁剥離に切り替わり消失すること」であるといえる。

離脱衝撃波の状態と空力仕事変化をより明瞭に対応づ けるために,図10に負圧面・正圧面それぞれの空力仕事 積分値を流量と共に示す。正圧面ではどの回転数でも流 量に対し空力仕事が増加する。一方負圧面で空力仕事が 流量に対し減少している部分は,衝撃波の入射域が小さ くなることに対応している。また,回転数を増加させる と負圧面の曲線が全体的に不安定側にシフトしていくの は,衝撃波の強さが増し励振力の寄与が大きくなったた めだと考えられる。

以上より,試験と解析の間のフラッター境界の差異は, 翼高さ方向に前縁剥離と離脱衝撃波が切り替わる前縁付 近の流れ場,特に励振力として作用する衝撃波足元に関 し,CFDと実際の流れ場との間で生じる差異に由来す るものと推察される。

7. 離脱衝撃波の不安定性と乱流モデルの影響

今回の連成解析で用いたSAモデルには元来,乱流遷 移点を操作するための「トリップ項」が含まれており, 壁面付近の生成項・消散項を修正しコントロールするf₁₂ という制御関数がある。壁面を「全域乱流」として取り 扱うには,f₁₂=0 とすればよいが,f₁₂項を有効にすると 「全域乱流」としても前縁付近にごく短い層流領域(Rex ~1×10⁵程度)が生じる¹⁵⁵。以下では,

・ $f_{l2}=0$ とした全域乱流のモデル (Without ft2)

・f₂項を含めたモデル(遷移点の指定なし,With ft2) の2つのモデルを用い、フラッター境界の差異が見られ た75%N作動点Aで生じる流れ場について述べる。

Without ft2 では全ての作動点で定常解が安定に求 まっていたが,With ft2 では75%N点Aで衝撃波足元が 振動し始めたため,時間二次精度のTime accurateな解 析を行った。このとき翼は固定させていたため,生じて いる非定常流れは純粋に流れ起因のものであるといえる。

図11に、この解析で得られた衝撃波の振動の様子を示 す。図11(a)は翼負圧面の圧力のRMS値であり、翼高さ 60%~85%で最大入口全圧10%の非常に強い変動が生じ ている。最も強い変動が見られた75%翼高さの前縁付近 (x/c=3.3%, 4.6%, 7.3%) における圧力変動の時間履歴を 図13(b)に示す。横軸は振動周期Tb = 450Hz で規格化し ている。圧力波形は平坦な圧力の低い部分と、スパイク 状の間欠的な圧力上昇で特徴づけられ、それぞれサンプ ル点上が超音速・亜音速である時間に対応している。類 似の圧力波形はLepicovskyらによるNASAの翼列風洞 における高インシデンス状態の翼列試験6%にて確認され ており、数値的のみならず実際の流れ場でも生じうる現 象であるといえる。図11(c)は1サイクル中の衝撃波振動 を前縁付近の相対マッハ数分布で示しており、剥離領域 と衝撃波位置が自励的に振動する遷音速バフェットが発 生していると考えられる。

遷音速バフェットは前縁近傍の時間平均流れ場に対し て多大な影響を与える。図12に,75%翼高さのCp分布 と前縁付近のマッハ数分布を示す。Without ft2のモデ ルでは衝撃波による不連続な圧力上昇が明瞭に認めら れるのに対し,With ft2 では衝撃波が消失したような 分布になる。2モデル間のマッハ数分布を比較すると,



(c)Instantaneous Mach number distribution on the leading edge at 75% span height

Fig. 11 Unsteadiness of the detached shock obtained by a time-accurate CFD simulation at the operating point A on the 75.0% speed line with SA turbulence model including f_{f^2} term



(b)Time-averaged Mach number distribution

Fig. 12 Effect on the unsteady shock motion on the time-averaged flowfield at 75% span height



Fig. 13 Convergence history of aeroelastic damping rate at the operating points on the 75.0% speed line

Without ft2 では翼面に直接衝撃波が入射しているのに 対し, With ft2 では剥離点が上流に移動し, マッハ数 分布も空間的に拡散している。

低回転数側におけるフラッター境界の差異の原因とし て、「試験環境では遷音速バフェットの発生に起因して 衝撃波が時間平均流れ場から消失し、離脱衝撃波足元に おける励振力も同時に消失し、フラッターが抑制されて いる」可能性がある。しかし、本章のように乱流モデル のたった1つの項の有無でも発現する流れ現象が変わっ てしまうように、本対象のバフェットには非常に大きな モデル依存性がある。したがって、フラッターを正しく 予測するためには実際に発現している流れ現象をより詳 しく知ったうえで、その特徴を反映したCFD並びに翼 振動解析が今後必要になってくると考えられる。

8. CFDで生じる流れ場の非定常性と空力弾性モー ド同定の適用限界について

最後に、72.5%N、75%N作動点Cにおける著しい空力

弾性モード同定精度の悪化について取り上げ,空力弾性 モード同定の適用限界について議論する。図13(a)には, 75%Nの解析でモード同定に用いた翼振動履歴のサンプ ル数に対する同定結果の減衰率の依存性を示しており, エラーバーは99%信頼区間である。本研究では1F振動1 周期中におよそ100サンプルを行っている。作動点A'か らBまではサンプル数を増やしていくと同定結果の変化 は小さくなっていくが,作動点Cでは誤差棒が非常に大 きくまた平均値も落ち着かない。

図13(b)には誤差棒の半幅をサンプル数に対してプロットしている。最小二乗同定を用いているためどの作動点でも誤差棒はおよそサンプル数の1/2乗に反比例している。しかし、C点では初期値として非常に大きく、他の作動点と同程度(1[1/s])まで不確かさを落とすためには1Fモード500周期に対応するおよそ50000Sampleが必要となる。

この高い不確かさはCFDで発現している流れ場に直 接起因している。図14(a)に,75%N作動点Cの95%翼高



Fig. 14 Unsteady flow observed at point C on the 75.0% speed line

さ位置における変動圧力を示す。図中異なる時間のもの が水平方向に並べられ、点線は低圧部分の移動を示す補 助線である。この作動点では、Time-accurateな解析を 行うと低圧部分が2~6流路にわたりクラスタリングし、 大きさを変えながら動翼回転方向と逆に旋回(動翼相対 系で見ると)するといったような、旋回失速様の非定常 性が生じる流れ場になっている。

図14(b)に,翼に作用している軸方向空気力を周波数解 析し全翼の平均をとったものを,同定精度に問題のない 80%N作動点Cと精度悪化のある75%N作動点Cで比較し て示す。80%N作動点Cではスペクトルに翼構造振動モー ドに対応するピークのみが確認でき,CFDにおいて自 励空気力成分のみが発現していることがわかる。一方で 75%N作動点Cでは自励空気力成分の他に,旋回失速様 の成分が高周波数側に確認できる。また,1F~1Tモー ド振動数部分でも翼振動数以外の部分で増加している。 翼振動数成分以外の変動成分は主に流れの不安定に起因 して自発的に生じ,翼振動とは無関係である成分である と考えられる。

このように,自励空気力に加えそれに無相関な成分が 重畳すると,自励空気力に無相関な成分は自励空気力を 同定する際にノイズとなるため,統計的な観点からは, このノイズの影響が十分小さくなるようなサンプル数 を取らねばならない。しかし,前述のように不確かさ1 [1/s] まで減らすためには1Fモード500周期の解析が必 要である。本研究では1作動点に対し高々10周期程度し か計算できていないため,この時間スケールを扱うのは 計算時間の観点からは不可能に近い。したがって,本研 究でとったアプローチである「空力弾性モードの同定」 が使用できる条件に関し,

・旋回失速のように流れ場が自発的に変動する場合に は、同定の不確かさを統計的に減らせないため使えない。

 ・流れ場が自発的に変動しない安定な流れ場のもとでは、フラッター境界の決定に差し支えない不確かさで減 衰率が求まる。

とまとめることができる。

9. 結言

流体構造連成解析とモード同定法を組み合わせたフ ラッター解析手法によって,遷音速ファンのリグ試験に おいて部分回転数失速点近傍で経験されたフラッターの 発生領域の再現を試みた。解析結果のフラッター境界は 部分的に試験結果を再現したが,低回転数側で試験結果 との差異が生じた。流れ場と翼面上空力仕事を詳細に観 察しフラッター発生状況を整理した後,低回転数側の差 異の原因となる流れ現象とモード同定の適用できる条件 について議論した。得られた知見は以下である。

(1)フラッター境界近傍では,前縁剥離,剥離による低速 流の二次流れ,前縁付近の離脱衝撃波が干渉しあう複雑 な流れ場が見られる。フラッターが生じない回転数では 低流量側作動点で離脱衝撃波が消失するが,フラッター が生じる回転数では衝撃波足元が翼面上にある。

(2)翼負圧面の前縁付近に位置する離脱衝撃波の足元は励 振力への寄与が大きいことから、回転数を下げた際、低 流量側の作動点において離脱衝撃波が前縁剥離に切り替 わり消失するタイミングが、低回転数側のフラッター境 界を決定づけている。

(3)低回転数側におけるフラッター境界の差異の原因とし て、75%翼高さ付近で遷音速バフェットが生じ、時間平 均流れ場から衝撃波が見かけ上消失し、衝撃波足元の励 振効果が失われている可能性がある。なお、数値解析に おいてはバフェットの有無は乱流モデル依存性が非常に 大きい。

(4)空力弾性モードはCFD中で流れ場が安定に求まる場 合にのみ精度良く求まる。自励空気力以外の変動空気力 成分が生じる不安定な流れのもとでは使えない。

謝辞

本研究は、JSPS科研費14J10312、および、経済産業 省の航空機・宇宙産業イノベーションプログラム基本計 画による「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」 の一環として独立行政法人新エネルギー・産業技術総合 開発機構からの助成により実施した。ここに記して謝意 を表する。

参考文献

- (1) 立石敦,渡辺紀徳,姫野武洋,"流体構造連成とシステム同定による複合モード翼列フラッター解析手法",日本ガスタービン学会誌,掲載予定
- (2) Platzer, M. F. and Carta, F. O. E., "AGARD Manual on Aeroelasticity in Axial-Flow Turbomachines Volume 1: Unsteady Turbomachinery Aerodynamics", AGARDograph No. 298, Vol. 1, (1988)
- (3) Jeffers, J. D. and Meece, C. E., "F100 Fan Stall Flutter Problem Review and Solution", Journal of Aircraft, Vol. 12, No. 4, (1975), pp.350-357
- (4) Isomura, K. and Giles, M. B., "A Numerical Study of Flutter in a Transonic Fan", Journal of Turbomachinery, No. 120 (3), (1998), pp.500-507
- (5) Shibata, T. and Kaji, S. "Role of Shock Structures in Transonic Fan Rotor Flutter". Proceedings of the 8th International Symposium of Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachinery, (1998), pp. 773-747
- (6) Vahdati, M. and Cumpsty, N. A., "The Mechanism of Aeroelastic Instability in Transonic Fans", Proceedings of the 13th international symposium on unsteady aerodynamics, aeroacoustics and aeroelasticity of turbomachines ISUUAAAT13, (2012), ISUAAAT13-I-5
- (7) Vahdati, M., Smith, N. H. S., and Zhao, F., "Influence of Intake on Fan Blade Flutter", Journal of Turbomachinery, No. 137 (8), (2015), 081002
- (8) Murooka, T., Goto, S., Mizuta, I., and Kodama, H., "New Concept Design and Development of an Advanced Transonic Fan Rotor", IGTC2007 Tokyo, (2007), TS-053

- (9) 久田俊明,野口裕久,"非線形有限要素法の基礎と応用", (1996),丸善
- (10) Shima, E. and Jounouchi, T., "Role of Computational Fluid Dynamics in Aeronautical Engineering (No.12)
 Formulation and Verification of Uni-Particle Upwind Schemes for the Euler Equations". Proceedings of the 12th NAL Symposium on Aircraft Computational Aerodynamics, NAL-SP 27, (1994), pp.255-260
- Spalart, P. R. and Allmaras, S. R., "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows", Recherche Aerospatiale, No. 1, (1994), pp. 5-21
- (12) 嶋英志,"圧縮性CFD による低マッハ数流れ計算のための新しい陰的時間積分法",第25 回数値流体力学シンポジウム講演論文集,(2011), C024
- Giles, M. B., "Nonreflecting Boundary Conditions for Euler Equation Calculations", AIAA Journal Vol. 28, No. 12, (1990), pp. 2050-2058
- (14) Aotsuka, M. and Murooka, T., "Numerical Analysis of Fan Transonic Stall Flutter", ASME Paper GT2014-26703, (2014)
- (15) Rumsey, C. L., "Apparent Transition Behavior of Widely-used Turbulence Models", International Journal of Heat and Fluid flow, Vol. 28, (2007), pp. 1460-1471
- (16) Lepicovsky, J., McFarland, E. R., Chima, R. V., Capece, V. R., and Hayden, J., "Intermittent Flow Regimes in a Transonic Fan Airfoil Cascade", NASA TM-2002-211375, (2002)

2015年ガスタービン及び過給機生産統計

ガスタービン統計作成委員会は、関係各社の協力を 得て2015年1月から12月の間におけるガスタービン及 び過給機の生産状況を調査・集計し、生産統計資料を 作成した。資料提供を、陸舶用ガスタービンは14社、 航空用ガスタービンは3社、過給機は9社に依頼し、 提供を受けた範囲で生産統計資料を纏めた。なお、過 給機はすべて排気タービン方式のターボチャージャー であり、機械駆動によるものではない。

I. 概要

- 1. 2015年陸舶用ガスタービン生産統計概要
- (1) 生産台数および出力(図1)をみると、台数は前年の342台に対し385台で、前年に比べて43台(13%)の増加となった。出力区分別の前年との比較では、小型が8台、中型が44台の増加となり、大型は9台の減少となった。また、出力では前年の4,958MWに対し4,922MWと、前年から36MW(0.7%)の減少となった。出力区分別の前年との比較では、小型が2MW、中型が286MWの増加、大型が323MWの減少となっている。最近6年間では台数では2番目に多いが、出力では5番目となっている。2012年以降3年連続して減少していた台数・出力について、台数は増加に転じたものの、出力は僅かとはいえ、引き続き減少となっている。
 - ア)小型(735kW以下)は前年と比べて、台数は8%、 出力は4%の増加で、それぞれ112台、49MWと なった。
 - イ) 中型(736~22,064kW)は前年と比べて,台数は21%,出力は62%の増加で,それぞれ252台, 749MWとなった。
 - ウ) 大型(22,065kW以上) は前年と比べて, 台数は 30%, 出力は7%の減少で, それぞれ21台, 4,124MW となった。
- (2) 用途別(表1,図2,図3)にみると、ベース ロード発電用(BL),非常用発電用(EM),艦艇用 (MM),およびその他(MC)の用途向けで占められ ている。台数で最も多いのは非常用発電用(EM)の 316台(82%),出力で最も多いのはベースロード発電

ガスタービン統計作成委員会

用(BL)の4.265MW(87%)である。前年同様ピー クロード発電用(PL)は実績なしとなった。艦艇用 (MM)は前年実績なしであったが、今年は8台となっ た。また、前年3台実績があった実験用(XP)は今 年実績なしとなった。それ以外の全体的な構成は例年 と大きく変わっていない。

- ア)非常用発電用(EM)は前年と比べて、台数は45 台(17%)増加の316台、出力は68MW(16%)増 加の486MWとなった。出力区分別にみると、小型 は台数・出力ともに10%の増加、中型は台数で20%、 出力で17%の増加となった。今年は小型・中型とも に台数・出力いずれも前年より増加となっている。
- イ)ベースロード発電用(BL)は前年と比べて、台数は7台(13%)減少の47台、出力は223MW(5%)減少の4.265MWとなり、台数・出力ともに減少した。出力区分別にみると、前年実績があった小型は今年実績なし、中型は台数で13%、出力で70%の増加、大型は台数で28%、出力で6%の減少となっている。前年は小型が増加し、中型・大型は台数は変わらず、出力は減少していたが、今年は小型が実績なし、中型は台数・出力ともに増加、大型は台数・出力ともに減少となっている。1台あたりの出力を前年と比べると、小型:前年180kW/台、今年なし、中型:前年3.6MW/台 今年5.4MW/台、大型:前年152MW/台 今年196MW/台となっており、今年実績のない小型は別として、中型・大型ともに前年より大出力化が見られる。
- ウ) 艦艇用(MM)は、前年実績なしであったが、今年は中型で8台、165MWとなった。
- エ) その他用途向け(MC)は前年と比べて,台数は 増減なしの14台,出力は2 MW(25%)減の7 MW となっている。
- (3) 燃料の種類別(表2,図4,図5)にみると,台数ではガス燃料が前年から19%増加の68台,液体燃料が前年から11%増加の317台となっている。出力ではガス燃料が前年から5%減少の4,314MW,液体燃料が前年から45%増加の608MWとなっている。台数はガス燃料・液体燃料とも前年より増加し、出力はガス燃料が減少,液体燃料は増加している。構成比率は、台数

[※]文中の前年との差異や増加率などの出力に関する数値は、 後に示す数表に基づきkW単位で算出している。

ではガス燃料が全体の18%に対し液体燃料が82%,出 力ではガス燃料が88%に対し液体燃料が12%で,この 比率は前年から大きく変わらないものの,ガス燃料の 割合の減少,液体燃料の割合の増加がみられる。

- ア)液体燃料では、台数・出力ともに最も多いのが 重油1種(H1)で、台数は198台で燃料全体の51%、 出力は265MWで燃料全体の5%をそれぞれ占めて おり、前年と比べると台数は2%の増加、出力は 2%の減少となっている。台数でみると、次に多 いのは灯油(T)の65台で、前年と比べると20%の 増加となっている。最も少ない軽油(K)は54台で, 前年と比べると46%の増加となっている。出力でみ ると、軽油(K)が240MW、灯油(T)が103MW となっており、前年と比べると、軽油(K)は5倍 近い大幅な増加、灯油(T)は7%の増加となっ ている。前々年から大幅な減少傾向にあった軽油 (K) が一転して台数・出力ともに増加となり,特 に出力では大幅な増加となっている。前年増加して いた灯油(T)は今年も台数・出力ともに増加して いる。
- イ)ガス燃料では、台数が最も多いのは天然ガス (GNG) の33台で, 燃料全体の9%を占めている。 出力でも天然ガス (GNG) が最も多く2,304MWで 全体の47%を占めている。台数でみると、次に多 いのは都市ガス(GTW)の22台,以下は液化天然 ガス(LNG)の13台となっている。出力で次に多 いのは液化天然ガス(LNG)の1,959MW,以下は 都市ガス(GTW)の51MWとなっている。前年は 台数では天然ガス (GNG), 出力では液化天然ガ ス(LNG)が最多であったが、今年は台数・出力 ともに天然ガス (GNG) が最多となっている。また, 今年のガス燃料の実績はこの天然ガス (GNG)、液 化天然ガス (LNG),都市ガス (GTW)の3種で構 成されており、前年実績のあった高炉ガス (GBF), 液化石油ガス (LPG),石油プラントガス (GOG). 石炭(ガス化)ガス(GCG)は、今年は実績がな かった。
- ウ)燃料別比率を出力区分別にみると、台数の上位3 種は、小型が重油1種(61%)、灯油(22%)、軽油 (15%)、中型が重油1種(52%)、灯油(16%)、軽 油(15%)で、大型は天然ガス(71%)、液化天然 ガス(29%)の2種のみとなっている。全体では重 油1種(51%)、灯油(17%)、軽油(14%)となっ ている。出力の上位3種は、小型が重油1種(63%)、 灯油(25%)、軽油(9%)、中型が軽油(31.4%)、 重油1種(31.2%)、天然ガス(15%)で、大型は天 然ガス(53%)、液化天然ガス(47%)となっている。 全体では天然ガス(47%)、液化天然ガス(40%)、

重油1種(5%)となっている。

- エ) 2種類以上の燃料が使用できるものは、全体で50台、251MWであった。
- 注:燃料の集計にあたっては,2種類以上の燃料を使え る場合は,納入時点で最も多く使用する燃料で集計 している。
- (4) 納入地域別(表3)でみると、台数では国内向け が前年に比べて36台増加の342台、輸出向けが7台増 加の43台となった。出力では国内向けが前年に比べて 672MW減少の1,952MW、輸出向けが636MW増加の 2,970MWとなっている。
 - ア)国内向けは総台数の89%,全出力の40%を占めて おり、全体に占める割合を前年と比べると、台数で は変わらず、出力では13%減少となっている。また 前年から台数で12%増加した一方,出力では26%減 少となっている。出力区分別に台数・出力を前年と 比べると、小型で8台、2MWの増加、中型で34台、 194MWの増加,大型で6台,867MWの減少となっ ており、前年は大型の出力のみ増加したが、今年は 小型・中型で台数・出力ともに増加、大型は台数・ 出力ともに減少となっている。さらに国内の地域別 にみると、台数では、増加したのは東北(6台増)、 関東(20台増),中部(4台増),中国(7台増), 四国(1台増),九州(3台増),沖縄(2台増)で, 減少したのは北海道(5台減),近畿(10台減)で あった。出力では、増加したのは中部(3MW増), 九州(321MW増)で,減少したのは北海道(8 MW 减), 東北 (647MW減), 関東 (40MW減), 近畿 (107MW减), 中国 (327MW減), 四国 (2 MW減), 沖縄(30MW減)であった。地域別の構成比率は台 数、出力ともに関東が最も多く、それぞれ国内全体 の台数の41%,出力の63%を占めた。また,前年実 績がなかった舶用主機向けは8台,165MWの実績 となった。
 - イ)輸出は総台数の11%,全出力の60%を占めており、前年と比べた全体に占める割合は台数では変わらず、出力では13%増加となっている。前年より台数は7台、出力は636MW、それぞれ増加している。出力区分別に台数・出力を前年と比べると、小型は前年同様今年も実績なし、中型で10台、92MWの増加、大型で3台の減少、544MWの増加となっており、出力は中型・大型ともに増加している。輸出先別にみると、台数ではアジア(67%)、北米(9%)、大洋州、欧州、ロシア・NIS諸国(それぞれ7%)、中東(2%)となっている。出力ではアジア(64%)、ロシア・NIS諸国(21%)、北米(9%)、

大洋州(5%),中東(0.8%),欧州(0.2%)となっ ている。台数・出力ともにアジア向けが最も多く なっているのは例年どおりである。アジア向けは前 年と比べて,台数は15台,出力は42MW,それぞれ 増加となっている。

- (5) 被駆動機械別(表4,図6,図7)では、これまでと同様に、台数・出力とも発電機(G)がほとんどを占め、全体に占める割合は台数で96%、出力で97%であった。発電機(G)について出力区分別にみると、小型・中型では台数・出力ともに前年に比べて増加しているが、大型では台数・出力ともに減少している。それぞれ前年と比べると、台数では小型が9%、中型が19%の増加、大型が28%の減少である。出力では小型が5%、中型が27%、の増加、大型が6%の減少となっている。水ポンプ(W)は全体で、前年に比べて3台、0.7MWの減少となっており、出力区分別にみると、小型は1台、0.3MWの減少、中型が2台、0.4MWの減少となっている。その他の被駆動機械では、前年実績がなかった推進機または回転翼(PRR)が中型で8台、165MWの実績となった。
- (6) 出力区分別(表5)を前年と比べると、小型は全体 で台数・出力ともに増加している。さらに詳細な区 分別 $(0 \sim 146 \text{kW}, 147 \sim 367 \text{kW}, 368 \sim 735 \text{kW})$ にみると、0~146kWでは3台の増加、0.1MWの減 少, 147 ~ 367kWでは3台, 0.4MWの増加, 368 ~ 735kWでは2台, 2MWの増加となった。中型も全 体で台数・出力ともに増加したが、さらに詳細な区 分別(736~4,412kW, 4,413~10,296kW, 10,297 ~16,180kW, 16,181~22,064kW) にみると, 736~ 4,412kWでは18台、4 MWの増加、4,413~10,296kW では17台, 98MWの増加, 10,297~16,180kWでは台 数は変わらず, 0.6MWの減少, 16,181~22,064kW では9台,184MWの増加となった。大型は全体で台 数・出力ともに減少し、さらに詳細な区分別(22,065) ~ 44,129kW, 44,130kW以上) にみると, 22,065~ 44,129kWで10台, 315MWの減少, 44,130kW以上で は、1台の増加、8MWの減少となった。台数の多 い順では、736~4,412kW、368~735kW、4,413~ 10,296kWとなっており、1・2番目は前年から変わっ てないが,前年は6番目だった4,413~10,296kWが今 年は3番目に多くなっている。また出力の多い順では 44,130kW以上, 736 ~ 4,412kW , 22,065 ~ 44,129kW, となっており,前年とは2番目と3番目が入れ替わっ ている。
- (7) 発電用ガスタービン(表6)の台数と出力を前年 と比較すると、事業用は、国内では4台、1,297MW となり、前年と比べて3台、706MWの減少となった。 輸出では8台、319MWとなり、前年と比べて4台、

1,555MWの減少となった。自家用は、国内が316台, 483MWとなり、前年と比べて30台の増加、86MWの 減少となった。輸出は35台,2.651MWとなり、前年 と比べ11台,2,191MWの増加であった。事業用は国 内外とも前年に比べて減少している。自家用は国内で は台数は増加したものの、出力では減少し、輸出は台 数・出力ともに増加が顕著であった。

- (8) 陸舶用ガスタービン向けモジュールは,前年に引き 続き2015年も実績がなかった。
- (9) ここ数年続いていた台数の減少傾向は止まったものの、出力は微減であった。一方で海外自家用が今年度 増加となっている。

2. 2015年航空用ガスタービン生産統計概要

- (1) ターボジェットエンジン/ターボファンエンジンの 新規製造状況については、昨年と同様にP-1固定翼哨 戒機用のF7-10のみであり、製造台数は6台、合計推 力は344kNであった。製造台数は昨年の9台から減少 した。その他に国内で開発されたターボファンエン ジンとして、HondaJetに搭載されているHF120があり、 2014年に製造が開始されている。HF120エンジンは米 国GEホンダ・エアロ・エンジンズ社製であり、米国 内で製造されているため、本統計には含まれていない。 (表7,図8参照)
- (2) 前年同様にターボプロップエンジンの新規製造は 無く、ターボシャフトエンジンの新規製造状況は、 MCH-101(掃海輸送用ヘリコプター)およびCH-101 (南極輸送支援ヘリコプター)用のRTM322が9台、 SH-60J/K、UH-60J/JA、およびAH-64D用のT700が 10台で、合計台数は19台、合計出力は30,571kWであっ た。(表8、図9参照)
- (3) 民間航空機用エンジン向けモジュールの新規製造 状況については、過去5年間、航空輸送需要の回復 に伴い増加傾向にあり、2015年は1,767台となり過去 最高を更新した。従来機種用モジュール(V2500およ びCF34)が高い生産台数を維持しているだけでなく、 新機種用モジュール(Trent1000およびGEnx)の量 産が順調に増えている。また2014年のA350用エンジ ンであるTrentXWBの燃焼器モジュールの製造開始 に続き、2015年はV2500の後継機種として開発された A320neo用PW1100G-JMエンジンのファンモジュール と低圧圧縮機モジュールの製造が開始された。(図10 参照)
- (4) 日本の航空用ガスタービン生産全体の動向としては、 近年防衛省向けエンジンの製造台数はあまり変化がないが、将来開発プロジェクトとしてXF5が開発されており、ステルス性能を持った先進技術実証機「X-2」 に搭載され、2016年4月に初飛行を終えた。一方民間

航空機用エンジン向けモジュールの製造台数につい ては、増加傾向にあり、今後世界的な航空機需要の増 加⁽¹⁾に伴い、Trent1000, GEnx、新機種のTrentXWB, PW1100G-JMのモジュール製造、部品製造が本格化 することが予測される。更にビジネスジェット機で あるGlobal7000及びGlobal8000に搭載されるPassport 20(2016年5月にエンジン型式承認を取得)や次世代 大型民間輸送機B777Xシリーズに搭載されるGE9X等、 新機種エンジンの国際共同開発が複数行われている状 況⁽²⁾であり、今後も民間航空機用エンジン関連の占め る割合が増加する傾向は続くと見られる。

- 出典(1): (財)日本航空機開発協会「民間航空機の需要 動向予測」
- 出典(2):一般社団法人 日本航空宇宙工業会「平 成28年版 日本の航空宇宙工業」, ISSN 0910-1527

3. 2015年過給機生産統計概要

(1) 生産台数(表9)については、主に自動車向けに 使用される圧縮機翼車外径100mm以下のClass1過 給機の生産台数は2010年以降増加を続ける世界自動

Ⅱ. 統計

1. 陸舶用ガスタービン



(2) 生産型式数(表10,図11)は2015年には新規追加及び型式廃止がなく、昨年同様の183型式(全Class含む)であった。これは昨年までに追加された新型式によってIMO NOx第三次規制への対応が一段落した為と考えられ、新型式の生産台数も増加傾向にある。今後も各種規制に合わせて高度な環境技術を持つ日本メーカー製品の過給機のラインアップは変化していくと考えられる。



- 85 -

区分 S		小型 Small Unit ~735kW		中型 Medium Unit 736~22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW~		全 出 力 Total	
用 途 Application	コード Code	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)
ベースロード発電用 Generator Drive for Base Load	BL	0	0	26	140,738	21	4,124,320	47	4,265,058
ピークロード発電用 Generator Drive for Peak Load	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
非 常 用 発 電 用 Generator Drive for Emergency	EM	100	45,238	216	440,320	0	0	316	485,558
商 船 用 Merchant Marine	М	0	0	0	0	0	0	0	0
艦 艇 用 Military Marine	MM	0	0	8	164,864	0	0	8	164,864
石油化学プロセス用 Oil Refinery and Chemical Process	OR	0	0	0	0	0	0	0	0
その他のプロセス用 Miscellaneous Chemical Process	PR	0	0	0	0	0	0	0	0
実 験 用 Experimental	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
空調用 Air Conditioning	ACD	0	0	0	0	0	0	0	0
その他 Miscellaneous	MC	12	3,433	2	3,120	0	0	14	6,553
合 計 Total		112	48,671	252	749,042	21	4,124,320	385	4,922,033

表1 2015年用途別生産台数及び出力(kW)



図 2 2015年用途別生産台数割合(%)



図3 2015年用途別出力割合(%)

<u>م</u>		分 Size	小型 Small Unit ~735kW		中型 Medium Unit 736~22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW~		全 出 力 Total	
燃料種 Kind o	類 f Fuel	コード Code	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)
ガ	液化天然ガス Liquefied Natural Gas	LNG	0	0	7	29,200	6	1,930,200	13	1,959,400
ス 燃 料	天然ガス Natural Gas	GNG	0	0	18	109,658	15	2,194,120	33	2,303,778
Gaseous	高炉ガス Blast Furnace Gas	GBF	0	0	0	0	0	0	0	0
Fuel	都市ガス Town Gas	GTW	2	1,200	20	50,000	0	0	22	51,200
	液化石油ガス	LPG	0	0	0	0	0	0	0	0
	石油プラントオフガス	GOG	0	0	0	0	0	0	0	0
	石炭(ガス化)ガス	GCG	0	0	0	0	0	0	0	0
	ガス燃料 小計 Sub Total		2	1,200	45	188,858	21	4,124,320	68	4,314,378
液体	灯油 Kerosene	Т	25	12,105	40	91,300	0	0	65	103,405
燃料	軽油 Gas Oil	K	17	4,580	37	235,134	0	0	54	239,714
Liquid Fuel	重油1種 Heavy Oil No.1	H1	68	30,786	130	233,750	0	0	198	264,536
	液体燃料 小計 Sub Total		110	47,471	207	560,184	0	0	317	607,655
Ν	その他 Miscellaneous Fuel M		0	0	0	0	0	0	0	0
	合 計 Total		112	48,671	252	749,042	21	4,124,320	385	4,922,033

表 2	2015年燃料别生産台数及75出力	(kW)
124	2013平然们加工座口数及0 田刀	$(\mathbf{n} \mathbf{v})$



図4 2015年燃料別生産台数割合(%)



図5 2015年燃料別出力割合(%)

	区分 Size	小型 ~	Small Unit 735kW	中型 Medium Unit 736~22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW~		全 出 力 Total	
地域 Locatio	on	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)
	北 海 道 Hokkaido	5	2,638	3	4,000	0	0	8	6,638
国	東 北 Tohoku	6	2,600	16	22,930	0	0	22	25,530
内 向 け	関 東 Kanto	36	15,628	102	233,110	3	975,000	141	1,223,738
	中 部 Chubu	26	11,878	26	39,580	0	0	52	51,458
Domestic	近 畿 Kinki	12	5,390	43	98,420	0	0	55	103,810
	中 国 Chugoku	11	4,470	10	18,600	0	0	21	23,070
Use	四 国 Shikoku	8	2,568	0	0	0	0	8	2,568
	九 州 Kyushu	7	2,900	14	18,200	1	321,800	22	342,900
	沖 縄 Okinawa	1	600	4	6,400	0	0	5	7,000
	艦 艇 用 Military Marine	0	0	8	164,864	0	0	8	164,864
	国内向け 小計 Sub Total	112	48,671	226	606,104	4	1,296,800	342	1,951,575
	北 米 North America	0	0	3	4,670	1	268,760	4	273,430
	中 南 米 South Central America	0	0	0	0	0	0	0	0
輸	アジア Asia	0	0	19	125,808	10	1,769,620	29	1,895,428
山 向 け	大洋州 Oceania	0	0	0	0	3	137,040	3	137,040
For	欧 州 Europe	0	0	3	5,070	0	0	3	5,070
Export	ロシア・NIS諸国 Russia・NIS	0	0	1	7,390	2	627,400	3	634,790
	中 東 Middle East	0	0	0	0	1	24,700	1	24,700
	アフリカ Africa	0	0	0	0	0	0	0	0
	輸出向け 小計 Sub Total		0	26	142,938	17	2,827,520	43	2,970,458
	合 計 Total	112	48,671	252	749,042	21	4,124,320	385	4,922,033

- 88 -

表 3	2015年地域別納入台数及び出力	(kW)
10		(\mathbf{r}, \mathbf{v})

	区分 Size	小型 ~	Small Unit 735kW	中型 736~	Medium Unit 22,064kW	大型 22,0	Large Unit 65kW∼	全	出力 Total
被駆動機械 Driven Machinery	コード Code	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)
発電機 Electric Generator	G	106	45,308	242	581,058	21	4,124,320	369	4,750,686
水ポンプ Water Pump	W	6	3,363	2	3,120	0	0	8	6,483
推進機または回転翼	PRR	0	0	8	164,864	0	0	8	164,864
合 計 Total		112	48,671	252	749,042	21	4,124,320	385	4,922,033





図6 2015年被駆動機械別生産台数割合(%)





200		о µуу (ш)	.,
出力 U	区分(kW) nits Output	台数 Units	出力 Output (kW)
	0~146	6	70
小型	$147 \sim 367$	24	5,448
Small Unit	368~735	82	43,153
	小計 Sub Total	112	48,671
	736~4,412	213	371,040
中型 Modium Unit	4,413~10,296	28	165,898
736~22,064kW	10,297~16,180	1	10,400
	16,181~22,064	10	201,704
	小計 Sub Total	252	749,042
大型	22,065~44,129	6	207,120
Large Unit	44,130~	15	3,917,200
22,065kW~	小計 Sub Total	21	4,124,320
合	計 Total	385	4,922,033

表5 2015年出力区分別生産台数及び出力(kW)

表 6 2015年発電用ガスタービン用途別生産台数及び出力(kW)										
	X	分 Size	小型 S ~7:	mall Unit 35kW	中型 M 736~2	ledium Unit 2,064kW	大型 I 22,06	.arge Unit 5kW∼	全 T	出 力 otal
	用 途 Application	コード Code	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)
国	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	4	1,296,800	4	1,296,800
日本	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
耒用	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
Domes 国内	stic/Public Use 列事業用 小 計 Su	ub Total	0	0	0	0	4	1,296,800	4	1,296,800
国	ベースロード発電用	BL	0	0	10	34,200	0	0	10	34,200
自会	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>家</i> 用	非常用発電用	EM	100	45,238	206	403,920	0	0	306	449,158
Domes 国内	stic/Private Use 时自家用 小 計 Si	ub Total	100	45,238	216	438,120	0	0	316	483,358
国内	內合計 Domestic Use	Total	100	45,238	216	438,120	4	1,296,800	320	1,780,158
輸	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	8	319,460	8	319,460
山事	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
^兼 用	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
For Ex 輸出	xport/Public Use 計事業用 小 計 Su	ub Total	0	0	0	0	8	319,460	8	319,460
輸	ベースロード発電用	BL	0	0	16	106,538	9	2,508,060	25	2,614,598
自	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>家</i> 用	非常用発電用	EM	0	0	10	36,400	0	0	10	36,400
For Ex 輸出	xport/Private Use 出自家用 小 計 Si	ub Total	0	0	26	142,938	9	2,508,060	35	2,650,998
輸	出合計 For Export T	`otal	0	0	26	142,938	17	2,827,520	43	2,970,458
串	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	12	1,616,260	12	1,616,260
■ 単 業 田	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
Л	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
Public	Use 事業用 合 言	- Total	0	0	0	0	12	1,616,260	12	1,616,260
占	ベースロード発電用	BL	0	0	26	140,738	9	2,508,060	35	2,648,798
日家田	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
Л	非常用発電用	EM	100	45,238	216	440,320	0	0	316	485,558
Private	e Use 自家用 合 言	r Total	100	45,238	242	581,058	9	2,508,060	351	3,134,356
ที่	総 計 Grand To	tal	100	45,238	242	581,058	21	4,124,320	363	4,750,616

Note : Code Explanation BL : for Base Load PL : for Peak Load EM : for Emergency

2. 航空用ガスタービン





表7 2015年ターボジェットエンジン/ターボファン・エンジン 生産台数及びスラスト合計(kN)

生産台数 6 スラスト合計**1 Thrust 344
--

※1 海面上静止最大スラスト Maximum Thrust at Sea Level Static Condition

表8 2015年ターボシャフトエンジン/ターボプロップ・エンジン 生産台数及び出力(kW)

区 分 Size	0~1	0~735kW 736kW~ 刍		736kW~		出力
用 途 Application	台数 Units	出力 ^{**2} Output (kW)	台数 Units	出力 ^{*2} Output (kW)	台数 Units	出力 ^{**2} Output (kW)
固定翼機 Fixed Wing Aircraft	0	0	0	0	0	0
ヘリコプタ用 Helicopter	0	0	19	30,571	19	30,571
補助機関駆動用 Aux. Drive Units	0	0	0	0	0	0
合 計 Total	0	0	19	30,571	19	30,571

※2 海面上静止常用出力

Normal Output at Sea Level Static Condition



311

— 91 —

3. 過給機

表9 クラス別の年間生産台数

区 2	分 Size						
Class	E縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
Class 1	0~ 100	約345万	約354万	約365万	約395万	約413万	約441万
Class 2	101~ 200	37,723	45,680	32,774	29,930	35,294	35,810
Class 3	$201 \sim 300$	482	643	538	574	641	668
Class 4	301~ 400	134	111	265	260	310	183
Class 5	$401 \sim 500$	110	57	73	74	161	214
Class 6	$501 \sim 600$	231	294	221	195	255	241
Class 7	601~ 700	282	362	274	150	232	184
Class 8	701~ 800	50	55	58	33	46	35
Class 9	801~ 900	150	214	130	94	81	11
Class 10	901~1000	0	0	0	0	0	0
Class 11	1001~	3	24	0	0	0	0
合計 T	otal ^{**4}	39,165	47,440	34,333	31,310	37,020	37,346

Class 1 の台数が多いため、Class 2 ~ 11の合計を示す。

As the Production number of Class1 is too many, Total number only includes Class 2 to 11.

2012年,2013年に追加となったClass 9 の型式を誤ってClass 8 として集計していたことが判明した為、今回の集計より訂正致しました。

表10 クラス別の型式数

<u>ک</u>	分 Size						
Class	圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
Class 1	$0 \sim 100$	62	64	64	64	55	55
Class 2	101~ 200	29	29	29	29	29	29
Class 3	$201 \sim 300$	16	18	18	18	18	18
Class 4	$301 \sim 400$	16	15	17	18	18	18
Class 5	$401 \sim 500$	12	10	16	14	16	16
Class 6	$501 \sim 600$	12	14	15	15	16	16
Class 7	$601 \sim 700$	14	17	18	15	17	17
Class 8	$701 \sim 800$	6	5	7	5	5	5
Class 9	801~ 900	11	8	10	10	9	9
Class 10	901~1000	0	0	0	0	0	0
Class 11	1001~	2	1	1	0	0	0
合計 Te	otal	118	117	131	124	128	128



図11 2015年過給機生産台数及び型式数



第1回日本ガスタービン学会女性参画推進イベント開催報告

日本ガスタービン学会では、ガスタービンおよび関連 技術に携わる女性技術者が互いに支え、刺激し合える ネットワークを作ることを目的として今年度「女性参画 推進委員会」を立ち上げました。その第1回目の活動と して、2016年5月24日(火)に、第1回日本ガスタービン学 会女性活躍推進イベントが㈱IHI本社ビルにて開催され ました。参加者は29名で、女性24名のほか、男性5名の 方にもご参加いただきました。テーマは「GT業界の各 社における女性活躍推進の取り組み紹介と意見交換」で す。取り組み紹介では、参加者全員の自己紹介のあと、 川崎重工業㈱葉狩智子さん、三菱日立パワーシステムズ (㈱森川朋子さん、国立研究開発法人物質・材料研究機構 川岸京子,(㈱本田技術研究所 川澄郁絵さん,(㈱)東芝猪 亦麻子さんら女性技術者から各ご所属機関での制度の紹 介やワークライフバランスに関するご自身の体験談等を ご講演いただきました。その後、(株IHI人事部 三樹あ ずささんに㈱IHIでの女性活躍推進に関する取組につい て具体的な事例を挙げながらご紹介いただきました。幅 広い年代の講演者による話題に共通した課題として、女 性の絶対数が少ないがために有用な情報が得られない.

川岸 京子 KAWAGISHI Kyoko

先輩のモデルケースがない,などの状況の中,いかに情 報を入手し制度を利用するかという問題があり,これを 解決するためのネットワーク作りへの取り組みが紹介さ れました。また,支援システムの整備ばかりでなく本人 の意識改革が必要であるという意見もありました。職場 は違っても共通する問題も多く,それぞれご自身の立場 での気づきが得られたようです。参加者の方々にとりま して有意義な意見交換の場となっておりましたら幸いで す。

講演会の後は、会場を移動し、立食パーティ形式での 懇親会を催し、参加者同士の交流を深めました。時のた つのも忘れて話しに花が咲き、楽しいひと時となりまし た。

女性活躍推進イベントは、今年度は第2回を関西で開 催する予定です。今後も会社の枠を超えた女性技術者の ネットワークを作っていけるよう、委員会にて企画・検 討していきたいと考えております。

最後に、会場の提供及び懇親会についてご協力を頂い た(株)IHIの関係者各位に深く感謝いたします。

(女性参画推進委員会委員)



講演会の様子



懇親会の様子

訃 報

ご逝去の報に接し、謹んで哀惜の意を表すとともに、ご冥福をお祈り申し上げます。

名誉会員・元会長 酒井 俊道 氏 2016年4月6日逝去(享年79歳) [本会関係略歴] 入会 1972年6月 理事 (9,10,13,14,16,17,19,20,25期副会長,26期会長) 監事 (28,29期) 評議員(3,4,11,12,15,18,21,22,23,24期) 2007年4月名誉会員 [略歴] 1959年3月 慶應義塾大学工学部機械工学科卒業 慶應義塾大学大学院博士課程機械工学専攻修了 1964年3月 慶應義塾大学助手 1964年4月 工学博士 (慶應義塾大学) 1968年9月 1970年1月 東京理科大学助教授 1978年4月 東京理科大学教授 同大定年退職 2003年3月 2003年4月 同大嘱託教授 2003年11月 東京理科大学名誉教授 悼 追

酒井俊道先生を偲んで

酒井俊道先生は,昭和34年3月に慶応義塾大学工学部 機械工学科を卒業され,その後大学院博士課程を修了され,引き続き,昭和44年12月まで助手を務められました。 昭和45年1月に東京理科大学工学部機械工学科に助教授 として赴任し,平成14年3月に定年を迎えるまで32年間 にわたり奉職されました。先生は、学生時代に日本ガス タービン学会元会長であられた故渡部一郎先生の御指導 を受け、東京理科大学では、東京工業大学を定年退職さ れ理科大学へ移られた草間秀俊先生と共にターボ機械の 研究に取組まれ,晩年には英国バース大学のWhitfield 先生と斜流圧縮機とディフューザの流動に関する共同研 究を進められました。このように、生涯、ターボ機械の 研究に携わりました。

併せて,日本機械学会はじめ日本ガスタービン学会な どで学会活動をされました。特に,日本ガスタービン学 会では,評議員,理事,監事,そして,副会長ならびに 会長職を務め,学会の活動に精力的に取組まれました。 生涯,ターボ機械の研究開発を通して,この分野ばかり

原稿受付 2016年6月29日

*1 東京理科大学名誉教授

本阿彌 眞治*1

でなく多くの分野に優れた人材を送り出しました。

小生にとって,先生は慶応義塾大学渡部研究室の先輩 であり,東京理科大学では機械工学科の教員仲間の先輩 でした。日本ガスタービン学会でも,講演会や委員会で ご一緒し,50年の長きにわたるお付き合いをさせて頂き ました。ですから,先生には,渡部研究室のゼミ合宿や 学会出張の折,研究面でのお話や日々の生活に関するこ とまで,多くのことを教えて頂きました。併せて,お祖 父様から日々,漢文の論語を素読するよう指導を受けた 幼少期の御話などもお聞きしたことがあります。

先生は、弦楽器のビオラを演奏され、音楽仲間と合 奏も楽しまれました。又、釣り仲間と魚釣りに出掛け、 釣った魚を3枚に下ろし、皆と一緒に日本酒を楽しむ一 面もありました。このように多くの研究仲間、音楽仲間、 釣り仲間に恵まれた先生でした。

先生の訃報に接して,先生の穏やかな語り口と柔和な 笑みを思い起こしました。先生の御冥福を謹んでお祈り 申し上げます。 合掌

会

第44回日本ガスタービン学会定期講演会(酒田)・見学会のお知らせ(予告)

第44回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会を以下のように開催します。プログラム他詳細は、決まり次第、学 会ホームページに掲載いたします。また、9月号にも掲載予定です。

- 主 催:公益社団法人 日本ガスタービン学会
- 協 賛:協賛団体は日本ガスタービン学会ウェブサイト(http://www.gtsj.org/)をご覧ください。

開催日:

- ·講演会 2016年10月26日(水), 27日(木)
- ·見学会 2016年10月28日金

開催場所:

 ・ホテルリッチ&ガーデン酒田 山形県酒田市若竹町1-1-1
 http://www.richgarden.co.jp/ Tel: 0234-26-1115

講 演 会:

- ・一般講演:空力, 燃焼, システム, 伝熱, 材料, タービン等
- ・企画講演:系統安定化対応先進ガスタービンの実現に向けたシミュレーション技術開発の最前線(予定)
- ·特別講演:講師選定中

参加登録費(税込):

- ・会員・協賛団体会員 14,040円 (ただし、学生は論文集有りで4,320円、論文集無しで1,080円)
- ・会員外 19,440円(ただし、学生は論文集有りで7,560円、論文集無しで4,320円)

宿 泊:

会期中のご宿泊は、講演会場である「ホテルリッチ&ガーデン酒田」を推奨します。 参加者向け特別価格での予約方法は、学会ウェブサイト(http://www.gtsj.org/)でご案内しております。

懇親会:

・第1日目の講演会終了後,講演会場(ホテルリッチ&ガーデン酒田)にて懇親会を開催いたします。 懇親会参加費(税込):3,240円(予定)

学生による優秀発表の表彰:

 ・学生による「研究報告」で、講演申込時にエントリーがあったものの中から、特に優秀な発表に対して 表彰を行います。

見 学 会:

- ・日時 :10月28日金)
- ・見学先:酒田共同火力発電(株)等の見学を予定しています。
- ・定員 :45名程度,先着順,講演会参加登録者に限ります。
- ・参加費:6,480円(予定)

参加申込方法:

・プログラム等詳細決定次第、学会ウェブサイト(http://www.gtsj.org/)に掲載いたします。 ウェブサイトから登録されるか、9月号掲載の参加申込書に必要事項をご記入の上、学会事務局宛にお申込み下さい。 参加登録は、受付の混乱を避けるため、事前登録をお願いします。講演者も参加登録をお願いします。

関連情報:

・講演会の前日(10月25日(火))にガスタービン市民フォーラム(会場:鶴岡市先端研究産業支援センター,共催:鶴岡工 業高等専門学校)を計画しています。参加自由・無料の予定です。 こちらも併せてご予定ください。

会

2 3

第28回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

近年、ガスタービン技術の発展にはめざましいものがあり、航空機用ジェットエンジンをはじめ大規模発電やコジェ ネレーション用や船舶用エンジンとして幅広く用いられています。ガスタービンは高出力・高効率であることやNOx排 出を抑えることが比較的容易であることから、環境に優しい原動機として今日の人類のエネルギー問題に寄与する大変 重要な役割を担っております。また、将来の地球温暖化防止に向けてガスタービンの更なる高効率化・大容量化が強く 求められており、多岐にわたる研究・開発分野で若い技術者の活躍が期待されます。この様な背景から、学生及びガス タービン開発に携わる新人技術者を対象とした標記シンポジウムの開催を計画しました。会員・非会員を問わず積極的 にご参加下さい。

1. 日時: 2016年9月8日(木), 9月9日(金)

2. 場所: 川崎重工業株式会社 明石工場	; 新総合事務所1F ホール1(明石市川崎町1番1号)
3. プログラム: 8日(木) 9:30-	受付 (新総合事務所1F ホール1)
10:00-10:10	開会の挨拶
10:10-11:40	「ガスタービン概論」 石坂浩一(三菱重工業)
11:40-13:00	昼食 (新総合事務所1F ホール1)
13:00-14:30	「ガスタービンと流体工学」 坂元康朗(三菱重工業)
14:40-15:30	特別講演「川崎重工業におけるガスタービンの開発」(仮題)
	武 浩司 (川崎重工業)
15:30-17:15	明石工場 GT組立工場見学(官学参加者,予定)
	明石工場 エネルギーセンター見学(企業参加者,予定)
17:30-19:00	懇親会 (西食堂)
9日(金) 9:00-	受付 (新総合事務所1F ホール1)
9 : 20-10 : 50	「ガスタービンと伝熱工学」 葉狩智子(川崎重工業)
11:00-12:30	「ガスタービンと燃焼工学」 小田剛生(川崎重工業)
12:30-13:30	昼食 (新総合事務所1F ホール1)
13:30-15:00	「ガスタービンと材料工学」 上村好古(三菱日立パワーシステムズ)
15:10-16:40	「ガスタービンと制御工学」 佐藤 毅(川崎重工業)
16:40-16:50	アンケート記入
16:50-17:00	閉会の挨拶
注:都合により講演順番が入れ替わる場合も	ございますので,最終プログラムはホームページにてご確認下さい。

4. 定員: 60名

- 5. 対象者:大学,大学院,高等専門学校在籍者,ならびに技術者(ガスタービン初心者)
- 6. 参加費(税込):学生(会員:¥4,320, 非会員:¥7,560), 社会人(会員:¥10,800, 非会員:¥19,440)
- 7. 懇親会:参加費 無料
- 8. 受講証の発行: 2日間の講義を受講された方には、「ガスタービン教育シンポジウム受講証」を発行します。
- 9. 申込方法:下記の申込書に必要事項を明記し、学会事務局宛に、郵便、ファクシミリ、電子メールのいずれかによ り2016年8月24日(水)(必着)までに、お申し込み下さい。学会ホームページからも申込ができます。
- 10. 参加費の支払:当日支払いですが,事前の支払いも受け付けます。事前に支払う場合は,その旨を学会事務局に ファクシミリ、電子メール、電話等でお知らせ下さい。
 - 注:開催場所案内図及び詳細については当学会ホームページをご覧下さい。(http://www.gtsj.org/)

○参加費には、テキスト(ガスタービン工学)代金が含まれております。

- ○交通:JR「西明石駅」東改札口を出て南側へ徒歩8分程度で明石工場西門,西門から徒歩2分程度で新総合事務所 に到着します。明石工場西門へはJRのご利用が便利です。また、駐車場はございませんので、公共交通機関 をご利用下さい。
- ○明石工場見学の際、歩いて移動する箇所が含まれており、雨天時には傘をお持ち下さい。また、安全のため、ヒール の高い靴を履いての明石工場入場はご遠慮下さい。
- ○明石工場見学にはカメラおよびカメラ付携帯電話の持込は出来ませんので予めご了承下さい。
- ○昼食:実費弁当申込を承ります(飲物付きで700円程度です)。



○当日の事務局での電話の取り次ぎはいたしません。緊急の用件が発生した場合,学会事務局の所持携帯(TEL:080-1066-8938)まで連絡をお願いします。

○ご欠席の場合は必ず事前に学会事務局までご連絡下さい。(TEL:03-3365-0095)
 ○学会事務局:(公社)日本ガスタービン学会 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13-402
 ○振込先:銀行(みずほ銀行新宿西口支店 普通預金1812298) 郵便振替(00170-9-179578)



Rolls-Royce Trent1000 (新総合事務所1Fにて展示)



Kawasaki L30A カットモデル (新総合事務所1Fにて展示) Kawasaki S1A-01 (新総合事務所2Fにて展示)

会

第28回ガスタービン教育シンポジウム参加申込書

(2016年9月8日,9月9日)

公益社団法人日本ガスタービン学会 行

FAX: 03-3365-0387 TEL: 03-3365-0095 E-mail: gtsj-office@gtsj.org

氏名				性別		男	•	女
所属			学年,入社年度					
連絡先	Ŧ							
TEL		FAX	[
E-mail		G' (No	TSJ会」 o.	員番号)		非会	員	
懇親会	出・欠	昼食申	込		8日	• 91	1	

注)外国籍の参加者には、申込書に記載した情報の他に別途、パスポート番号などを伺うことがございます。 詳しくは、申込受付後にご連絡いたします。

申込締切日: 2016年8月24日(水)(必着)

会



主催学協会	会合名	共催 /協賛	開催日	会場	詳細問合せ先
日本機械学会	2016年度計算力学技術者 (CAE技術者) 資格認定 事業(固体力学分野の有 限要素法解析技術者・熱 流体力学分野の解析技術 者・振動分野の有限要素 法解析技術者)	協賛	2016/9/10,9/17, 12/10	東京工業大学, 名古屋大学, 近畿大学, 金沢大学, JR博多シティ会議室	日本機械学会 事業企画G 石澤 caenintei@jsme.or.jp
日本燃焼学会	第54回燃焼シンポジウム	協賛	2016/11/23-25	仙台国際センター	URL:http://www.combustionsociety. jp/sympo54/
日本液体微粒化 学会	第25回微粒化シンポジウム	協賛	2016/12/19-20	富山国際会議場大手町 フォーラム	URL:http://www.ilass-japan.gr.jp

▶ 入 会 者 名 簿 ◁

〔正会	員〕						
手塚	津奈生(IHI)	田中	雄飛(IHI)	丸山	晃平(IHI)	山下	誠二(川崎重工業)
井上	暢(川崎重工業)	鍋島	大毅(川崎重工業)	佐々木	、 怜(川崎重工業)	上野	豪(キグチテクニクス)
坂本	祐麻(キグチテクニクス)	栗岡	義紀(神戸製鋼所)	小林	直樹(小林製作所)	鈴木	雅人(産業技術総合研究所)
糟谷	宏樹(東芝)	松平	雄策(新潟大学)	小幡	茂男(防衛大学校)	藤田	豊(三菱重工業)
宮崎	洸治(三菱重工業)	柚木	啓太(三菱日立パワ-	ーシステムズ)		
C. 336 - 11							
〔字生	会員」						
上田	翔太(金沢工業大学)		赤見坂	祐輔(金沢工	業大学)	玉田 -	岳洋(金沢工業大学大学院)

上田	翔太(金沢工業大学)	赤見坂	祐輔(金沢工業大学)	玉田	岳洋(金沢工業大学大学院)
秋野	一輝(首都大学東京大学院)	大橋	健史(首都大学東京大学院)	櫻井	勇也(首都大学東京大学院)
古田	洋一郎(早稲田大学大学院)				

次号予告 日本ガスタービン学会誌2016年9月号(Vol.44 No.5) 特集「ガスエンジン、ディーゼルエンジンとガスタービン」 巻頭言 塩路 昌宏 (京都大学) レシプロエンジンとガスタービンの違いと特徴 高崎 講二(九州大学) 産業用ガスエンジンの開発動向 安枝 信次(GDEC) ガス・ディーゼルエンジンのコージェネレーションシステム 飯泉 昌幸(コージェネレーション・エネルギー 高度利用センター) ガスコージェネレーション設備における原動機選定事例紹介 速川敦彦(東京ガスエネルギーソリューションズ) 離島(内燃力)発電所のディーゼル発電について 大嶺 吉光 (沖縄電力) ガスエンジン 江口 知孝(日立造船/バルチラ 高効率大型ガスエンジンの開発と実用化 堀江 尚(川崎重工業) 三菱リーンバーンミラーサイクルガスエンジンの最新開発概要 高井 淳(三菱重工業) ガスエンジンの再生エネルギー利用 西田 和生 (ヤンマー) 高効率大型ガスエンジンの国内導入と木質バイオマスガス化発電用ガスエンジンについて 坂本 謙一, 弓田孔 生(日立パワーソリューションズ) エコウィルコージェネレーションユニットの技術と進化 戸川 一宏,渡邉 生,中川 義徳(本田技術研究所) 高効率V型中速ディーゼル機関の開発と実用化 永澤 秀明(新潟原動機) 船用ガス焚きディーゼル機関「ME-GI」の紹介 渕上 孝, 哈 強, 田渕 隆平(三井造船) 見聞記「2016年ASME国際ガスタービン会議」 |執筆者…船﨑 健一(岩手大学)/浅子 知昭(I H I)/高田 和正(三菱日立パワーシステムズ)/壹岐 典彦(産業 技術総合研究所)/三浦 聡允(川崎重工業)/松沼 孝幸(産業技術総合研究所)/坂口 大作(長崎大学)/青塚

技術総合研究所)/三浦 聡允 (川崎重工業)/松沼 孝幸 (産業技術総合研究所)/坂口 大作 (長崎大学)/青塚 瑞穂 (IHI)/武石 賢一郎 (徳島文理大学)/林 茂 (法政大学)/森岡 典子 (IHI)/鈴木 健太 (三菱重工業) /妹尾 茂樹 (三菱日立パワーシステムズ)/柚木 啓太 (三菱日立パワーシステムズ) ※タイトル,執筆者は変更する可能性があります。 319

2016年度役員名簿

会長 久山 利之 (川崎重工)

副会長 船崎 健一 (岩手大)

- 法人管理担当執行理事 今成 邦之(IHI),太田 有(早大)(兼 務),木下 康裕(川崎重工),安田 聡(MHPS),渡辺 紀徳 (東大)
- 公益目的事業担当執行理事 太田 有(早大),小森 豊明(三菱重 工),西澤 敏雄(JAXA),野崎 理(高知工科大),藤井 智晴 (電中研),細川 哲也(JALエンジニアリング),山根 秀公(防 衛装備庁),吉田 英生(京大),輪嶋 善彦(本田),渡辺 紀徳 (東大)(兼務)
- **理事** 渋川 直紀 (東芝),田尻 敬次 (荏原エリオット),松沼 孝幸 (産総研),原田 広史 (物材研),松崎 裕之 (酒田共同火 力)
- 監事 坂田 公夫 (SKYエアロスペース研),渡辺 康之 (IHI)

2016年度委員名簿(順不同)

2016年6月20日現在 〇は委員長

- 倫理規定委員会 ○木下 康裕 (川崎重工),今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大),西澤 敏雄 (JAXA),安田 聡 (MHPS)
- 自己点検委員会 ○木下 康裕 (川崎重工),今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大),西澤 敏雄 (JAXA),安田 聡 (MHPS)
- 運営委員会 ○今成 邦之(IHI),太田 有(早大),木下 康裕 (川崎重工),酒井 義明(東芝),塚原 章友(MHPS),西澤 敏 雄(JAXA),原田 純(川崎重工),松沼 孝幸(産総研),森岡 典子(IHI),安田 聡(MHPS),吉田 英生(京大),渡辺 紀 徳(東大)
- 企画委員会 ○太田 有(早大),伊東 正雄(東芝),今成 邦之 (ⅠHⅠ),木下 康裕(川崎重工),塚原 章友(MHPS),西澤 敏雄(JAXA),安田 聡(MHPS),吉田 英生(京大),輪嶋 善彦(本田),渡辺 紀徳(東大)
- 国際委員会 ○渡辺 紀徳 (東大),井上 智博 (東大),太田 有 (早大),岡井 敬一 (JAXA),小森 豊明 (三菱重工),谷 直 樹 (IHI),葉狩 智子 (川崎重工),福田 雅文 (高効率発電シ ステム研),船崎 健一 (岩手大),松田 寿 (東芝),三好 市朗 (MHPS),山根 敬 (JAXA),山本 誠 (東京理科大)
- 学術講演会委員会 ○西澤 敏雄 (JAXA),小熊 英隆 (三菱重工), 酒井 英司 (電中研),武田 淳一郎 (富士電機),玉井 亮嗣 (川 崎重工),富永 純一 (東芝),浜辺 正昭 (IHI),姫野 武洋 (東大),平野 孝典 (拓殖大),藤原 仁志 (JAXA),堀内 康広 (MHPS),松沼 孝幸 (産総研),渡邊 裕章 (九大)
- 集会行事委員会 ○輪嶋 善彦(本田),金澤 直毅(川崎重工),木 村 武清(元 川崎重工),澤 徹(東芝),瀬川 武彦(産総 研),手塚 津奈生(IHI),西江 俊介(三井造船),西村 英 彦(MHPS),平野 篤(防衛装備庁),細川 哲也(JALエンジニ アリング),泰中 一樹(電中研),藤井 達(日立),松沼 孝幸 (産総研),山形 通史(富士電機),吉田 征二(JAXA)

ガスタービン技術普及委員会 ○藤井 智晴 (電中研),石田 克彦 (川崎重工),賀澤 順一 (JAXA),齊藤 大蔵 (東芝),中村 恵子 (IHI),花井 直人 (JALエンジニアリング),檜山 貴志 (三菱重工),福山 佳孝 (JAXA),村田 章 (東京農工大),屋 □ 正次 (電中研),山本 誠 (東京理科大),横山 喬 (MHPS), 渡辺 紀徳 (東大)

会

- 学会誌編集委員会 ○吉田 英生(京大),荒木 秀文(MHPS),壹 岐 典彦(産総研),石川 揚介(東芝GEタービンサービス),加 藤 千幸(東大),齋木 正則(中部電力),阪井 直人(川崎重 工),佐藤 哲也(早大),渋川 直紀(東芝),杉本 富男(三井 造船),高橋 俊彦(電中研),田尻 敬次(荏原エリオット),辻 田 星歩(法政大),寺澤 秀彰(東京ガス),寺本 進(東大), 中野 賢治(IHI),中野 剛(JALエンジニアリング),新関 良樹(東芝),野崎 理(高知工科大),野原 弘康(ダイハツディー ゼル),原 浩之(MHPS),原田 広史(物質・材料研),松崎 裕之(酒田共同火力),北條 正弘(JAXA),山下 一憲(荏原), 山根 喜三郎(防衛装備庁),吉野 展永(IHI)
- 論文委員会 ○山根 敬 (JAXA),青塚 瑞穂 (IHI),壹岐典彦 (産総研),小田 剛生 (川崎重工),柴田 貴範 (MHPS),田頭 剛 (JAXA),寺本 進 (東大),中谷 辰爾 (東大),姫野武洋 (東 大),山本 武 (JAXA),山本 誠 (東京理科大),吉岡洋明 (愛 媛大)
- ガスタービン統計作成委員会 ○小森 豊明 (三菱重工),恵比寿 幹 (三菱重工),坂倉 季彦 (MHPS),澤 徹 (東芝),野村 藤樹 (ターボシステムユナイティッド),原田 純 (川崎重工), 宮川 歩 (川崎重工),山上 舞 (IHI),山上 展由 (MHPS), 吉田 知彦 (MHPS),米田 幸人 (ヤンマー)
- 產官学連携委員会 ○渡辺 紀徳(東大),赤城 正弘(防衛省), 壹岐 典彦(産総研),岡崎 正和(長岡技科大),金津 和徳(I HI),岸部 忠晴(MHPS),幸田 栄一(電中研),佐々木 隆 (東芝),武 浩司(川崎重工),福泉 靖史(三菱重工),藤岡 順三(物質・材料研),二村 尚夫(JAXA),古川 雅人(九大), 吉田 英生(京大)
- 広報委員会 ○山根 秀公 (防衛装備庁), 荒木 秀文 (MHPS), 酒 井 義明 (東芝), 姫野 武洋 (東大), 村田 章 (東京農工大), 山根 敬 (JAXA), 吉田 征二 (JAXA)
- 表彰委員会 ○船崎 健一(岩手大),太田 有(早大),木下 康 裕(川崎重工),児玉 秀和(IHI),西澤 敏雄(JAXA),野崎 理(高知工科大),吉田 英生(京大)
- 将来ビジョン検討委員会 ○寺本 進(東大),小田 豊(関西大), 賀澤 順一(JAXA),柴田 貴範(MHPS),柴田 良輔(本田),
 高橋 徹(電中研),仲俣 千由紀(IHI),姫野 武洋(東大),
 森澤 優一(東芝),山崎 裕之(東北電力)
- **女性参画推進委員会** ○仲俣 千由紀(IHI), 猪亦 麻子(東芝), 川岸 京子(物質・材料研), 葉狩 智子(川崎重工), 森川朋子 (MHPS)
- **ACGT2016実行委員会** ○山根 敬 (JAXA), 仲俣 千由紀 (IHI), 葉狩 智子 (川崎重工), 松田 寿 (東芝), 三好 市朗 (MHPS)