

特集：航空分野の脱炭素化へ向けたサステナブル航空燃料（SAF）普及の取り組み

サステナブル航空燃料普及の課題と期待

Challenges and Expectations for Spread of Sustainable Aviation Fuel



橋本 公太郎^{*1}
HASHIMOTO Kohtarō

キーワード：持続可能な航空燃料，ジェット燃料，脱炭素，バイオ燃料，ASTM認証

Key Words：Sustainable Aviation Fuel, Jet Fuel, Decarbonation, Biofuel, ASTM Certification

SAF (Sustainable Aviation Fuel, サステナブル航空燃料) は、ここ5年間で一般の人も耳にする言葉として定着するようになった。2018年までは、IATA (International Air Transport Association) においても、まだ "Alternative Fuel Symposium" という名称で SAF のシンポジウムを開催していたが、2019年からは "Sustainable Aviation Fuel Symposium" と変更している。そして、SAF の認識はどんどん広まっており、日本の一般のニュースにおいても SAF という言葉をそのまま使われるケースも出てきた。

このように、SAF が大きく注目されてきたのは、航空領域での CO₂ 排出削減において、SAF に対する期待と依存が大きいことが挙げられる。それは、CO₂ 排出削減手段として電動化は容易ではなく、燃料による低炭素化が必要であるからである。国際民間航空に関するルールを制定する ICAO (International Civil Aviation Organization) により、CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) という国際民間航空の CO₂ 排出削減の枠組みが決められ、2021年より運用が開始された。CORSIA のスキームにおいては、カーボンオフセットとともに、SAF の使用による CO₂ 排出削減が必要となるため、SAF の普及が重要になっている。CORSIA のスキームでは、SAF について CO₂ 削減の規定に適合していると言う CEF (CORSIA Eligible Fuels) 認証を取得する必要がある。

一方で、SAF の普及のためには、いくつかの課題がある。まずは、SAF のコストである。民間航空領域においてコストに占める燃料費の割合は小さくない。従って、SAF の普及のためには、今の航空用燃料の価格に近づけるための方策が必要となる。また、SAF の生産

量の増大のためには、原料の確保も課題となる。現在流通されている SAF の大部分は HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids, 脂肪酸エステルを水素化した燃料) であり、CO₂ 削減などの観点から原料には主に廃食油が使われている。ただし、廃食油の量には限界があり、他のバイオマスを利用した SAF の生産・流通が必要となる。再生可能電力からのグリーン水素と、空気中の CO₂ を原料とした e-fuel の生産も期待されているが、グリーン水素の価格、空気中の CO₂ を回収する DAC (Direct Air Capture) の技術開発など、課題も多い。さらに、新しい製造法の SAF の普及においては、ASTM 認証も課題となる。SAF は、ASTM D7566 で規格が定義されており、その規格に掲載されていない製造法については、新たに ASTM 認証を受ける必要がある。本特集記事に詳細は記してあるが、安全を担保しつつ迅速に認証していく取り組みが、今後必要となってくる。

普及への課題が多い SAF であるが、今までの化石エネルギー依存からの脱却の第一歩として、新しい産業や技術創出のチャンスとの見方もできる。SAF の普及から、輸送用液体燃料の脱炭素化が進むと、将来のカーボンニュートラル達成への道筋が描ける。そのためにも、日本国内で、SAF の原料から製造、流通、販売、利用のトータルで、官民連携での普及推進が重要である。本号の特集「航空分野の脱炭素化へ向けたサステナブル航空燃料（SAF）普及の取り組み」では、日本における SAF の取り組みについて、SAF 普及を推進する政府、SAF 製造に関わる会社、SAF を使用する航空会社、SAF のルール作りなどの普及に関わる会社から、多面的に解説していただいている。本特集から、日本における SAF の取り組みの状況を理解していただき、日本で SAF の普及推進の一助になれば大変ありがたい。

原稿受付 2023年8月21日

*1 (株)本田技術研究所 先進パワーユニット・エネルギー研究所
先進エネルギー研究開発室
〒351-0193 和光市中央1-7-1
E-mail: kohtarō_hashimoto@jp.honda

特集：航空分野の脱炭素化へ向けたサステナブル航空燃料（SAF）普及の取り組み

航空分野の脱炭素化実現に向けた政府の取組 ～持続可能な航空燃料（SAF）導入の促進～

Government Activity to Realize Decarbonization in Aviation Sector

～Promotion for Utilizing Sustainable Aviation Fuel (SAF)～



杉原 晶雄^{*1}
SUGIHARA Akio

キーワード：政策，国際民間航空機関，ICAO，持続可能な航空燃料，SAF，ガスタービン，ジェットエンジン

Key Words：Policy, International Civil Aviation Organization, ICAO, Sustainable Aviation Fuel, SAF, Gas Turbine, Jet Engine

1. はじめに

世界的に気候危機の甚大な被害を最小限に抑えるべく，脱炭素化に向けた動きが加速している。我が国においても，2050年カーボンニュートラルの実現を2020年10月に宣言し，その後，地球温暖化対策の推進に関する法律に基づく地球温暖化対策計画において2030年度の温室効果ガス排出量を2013年度比で46%削減，さらには50%削減の高みに向け挑戦を続けていくことを宣言している⁽¹⁾。

航空分野においても国内外で脱炭素化の機運が急速に高まっている。国内航空では，地球温暖化対策計画において2030年度までの排出原単位を16%改善する目標が設定された⁽¹⁾。また，国際航空では，国際民間航空機関（ICAO）において，グローバル削減目標として2020年以降総排出量を増加させないことが採択されている。さらに，長期的な脱炭素目標として，2050年までのカーボンニュートラルを目指すことが2022年10月に採択された⁽²⁾。

他国に目を向けると，環境意識の高まりにより欧州においては「飛び恥」として航空機利用を避ける動きが起きているが，一方で島国である我が国においては，航空機は欠かすことのできない重要な交通手段である。また，新型コロナウイルス感染症の影響により，航空需要は一時的に減少しているが，現在は回復基調にあり，加えて長期的には航空需要はさらに増加していくことが予想される⁽³⁾。航空需要の増加に伴ってCO₂を始めとする温室効果ガス（Greenhouse Gas: 以下GHG）排出量も増加するため，航空ネットワークの維持・発展の観点からも，

我が国の航空分野における脱炭素化の取組は必要不可欠である。

国土交通省航空局としては，航空分野の脱炭素化を航空機運航分野，空港分野に大別し，取組を進めているが，本稿では航空機運航分野のうち「SAF（Sustainable Aviation Fuel：持続可能な航空燃料）」の導入促進に向けた取組を紹介する。

2. 航空運送分野でのGHG排出の現状

世界の航空分野以外も含んだGHG排出量（CO₂相当）と国別の排出割合をFig. 1に示す⁽⁴⁾。各国の国内航空による排出については各国の内数に含まれており，各国にて対策を進めることになる。一方，二国の間を飛行する国際航空については，これらとは別に国際航空として整理されており，そのGHG排出量（CO₂相当）は6.2億トン，世界の排出量の1.8%にあたる。これはドイツや韓国一国分に相当する量であり，国際航空としても応分の責任を果たさねばならないという認識の下，国際民間航空機関

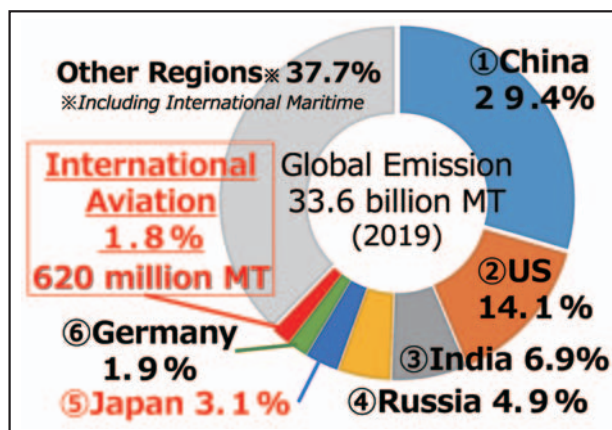


Fig. 1 Breakdown of GHG Emission (CO₂ Equivalent) in the World

原稿受付 2023年 7月10日

* 1 国土交通省航空局
カーボンニュートラル推進室
〒100-8918 千代田区霞が関 2-1-3
E-mail: sugihara-a2w3@mlit.go.jp

(International Civil Aviation Organization : ICAO) にて対策が議論されている。

日本国内でのCO₂排出量をFig. 2に示す⁽⁵⁾。運輸部門の日本国内の総排出量に占める割合は18.6%，運輸分野のうち国内航空が占める割合は5.1%となっており，日本国内の総排出量からみると国内航空の排出割合は約1%となる。これも決して少ない量とはいえず，着実に脱炭素化の対策を講じていく必要がある。

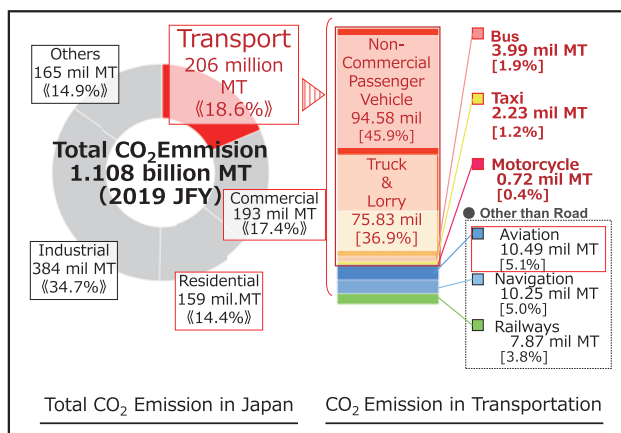


Fig. 2 Breakdown of CO₂ Emission in Japan

前述の通り，国際航空の脱炭素施策はICAOで議論されているところであるが，具体的にはCORSIA（コルシア）と呼ぶ排出削減スキームによって，2035年までの短中期目標と具体的な削減手段を定めている。締約国に所属する各エアラインにおいては，低燃費機材を含む新技術の導入，運航方法の改善，SAFの導入といった手段によってCO₂排出量削減を図り，削減目標（ベースライン）に到達しなかった分については炭素クレジットによりオフセットすることが求められる。これに係わる大きな動きとして，2022年10月に開催されたICAO総会において，2050年までのカーボンニュートラル達成に加え，2024年以降のベースラインを2019年比の85%とすることを決定した（Fig. 3）。この決定により，エアラインとしては2024年を境にSAF導入を含めた排出削減策を実行に移す必要があり，我が国としても環境整備と支援策の検討促進が求められるところとなった。

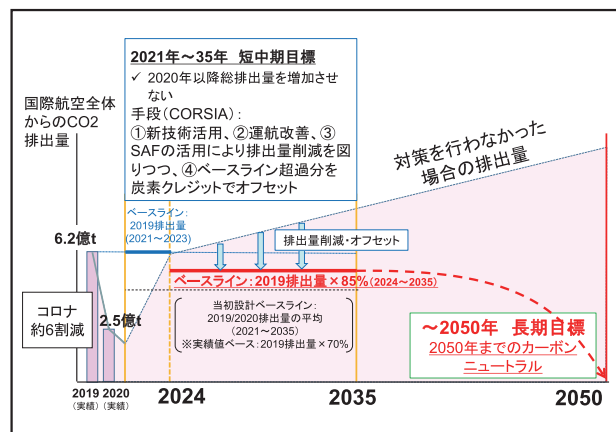


Fig. 3 Decarbonization Target of ICAO in International Aviation Sector ⁽⁶⁾

3. 持続可能な航空燃料（SAF）

SAFは，航空分野の脱炭素化を進めるために大きな鍵を握っている。新型コロナウイルス感染症の影響を受ける前の2019年度において，本邦エアラインが使用するジェット燃料の消費量から算出されるCO₂排出量は国際航空で約1500万トン，国内航空で約1000万トンである⁽⁶⁾。CO₂排出量を削減するために，化石由来のジェット燃料の代替燃料として大きな注目を集めているのがSAFである。SAFは，廃食油，サトウキビ，木質バイオマス，都市ゴミなどの様々な原料から作られ，製造から使用までのライフサイクル全体でCO₂排出量を約60～80%軽減することができると言われており，航空業界からの期待が大きい。しかし，現在のSAF供給量は極めて少なく，2020年時点で世界全体のジェット燃料供給量のうち，SAFの供給量はわずか0.03%となっている⁽⁷⁾。従来の化石由来のジェット燃料と比較して，原料の調達や製造の手間から価格が高くなってしまっているのが大きな課題となっており，今後，我が国でも安定的に，且つ国際的にも競争力のある価格で供給できるよう取り組んでいく必要がある。我が国で開発が検討されている製造プロセスの例を原材料別に整理したものをFig. 4に示す。

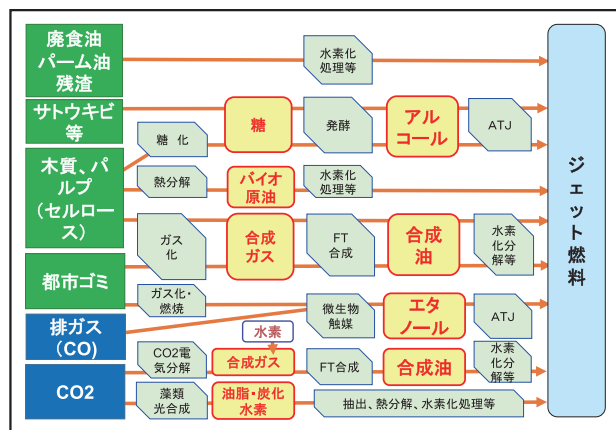


Fig. 4 Major SAF Production Pathways ⁽⁶⁾

4. 日本政府の取組

4.1 航空法の改正

我が国の航空分野の脱炭素化に向けた重要な動きとして、航空法の改正がある。2022年6月に航空法を改正し、目的規定に脱炭素化の推進を位置付けるとともに、国が今後の航空分野における脱炭素化の基本的な方向性を示す航空脱炭素化推進基本方針を策定し、当該方針に基づき航空会社や空港が脱炭素化推進計画を作成する制度的枠組を導入した (Fig. 5)。

同年12月には、改正航空法に基づき、航空分野における脱炭素化の推進の意義や目標、政府や関係者が構すべき措置を示した基本方針を策定したところであり、航空の脱炭素化に向けて国が先頭に立ち大きく舵を取った。当該基本方針には、航空機運航分野、空港分野がそれぞれ取り組むべき事項を定めており、SAF導入に関してもこれが重要な位置づけであることを盛り込んでいる。合わせて、2030年時点の本邦航空運送事業者による燃料使用量の10%をSAFに置換えることも目標として定めている (Fig. 6)⁽⁸⁾。今後は、航空会社や空港による脱炭素化推進計画の作成を支援するとともに、計画の進捗状況をフォローアップすることで、航空分野の脱炭素化を着実に進めていく。

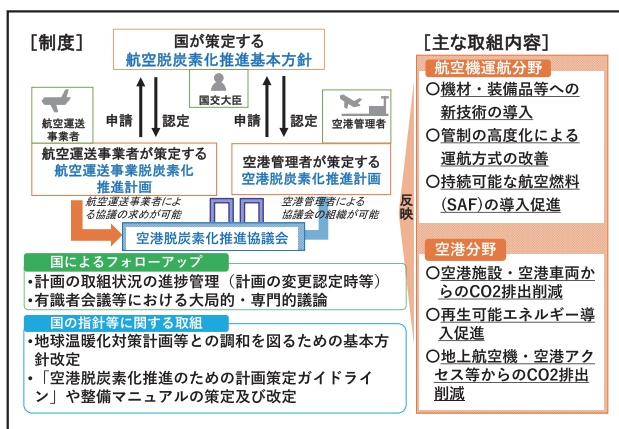


Fig. 5 Legal Framework for Promoting De-carbonization in Aviation Sector ⁽⁶⁾

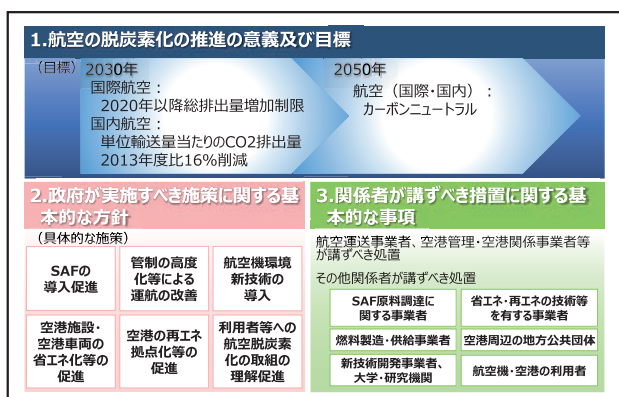


Fig. 6 Outline of Policy for Promoting De-carbonization in Aviation Sector ⁽⁶⁾

4.2 CO₂削減検討会やSAF官民協議会等の設置

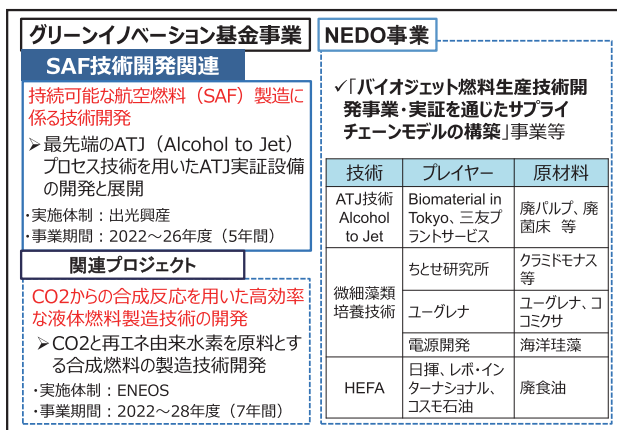
航空法の改正に先立って、2021年3月に有識者等で構成される「航空機運航分野におけるCO₂削減に関する検討会」を立ち上げた。SAFの導入促進、管制の高度化等による運航の改善、機材・装備品等への環境新技術の導入に対する3つのアプローチについて取り組むこととしており、同年12月に航空機運航分野の脱炭素化推進に係る工程表をとりまとめている⁽⁹⁾。SAFについては、「2030年の本邦航空会社の燃料使用量の10%をSAFに置き換える」という目標を設定した。これは前述の、航空脱炭素化推進基本方針にも反映されている。

さらに、取組を着実に進めるための実務的な検討の場として2022年4月、国土交通省航空局および資源エネルギー庁が合同で事務局を務める「持続可能な航空燃料(SAF)の導入促進に向けた官民協議会 (SAF官民協議会)」を立ち上げた⁽¹⁰⁾。それまでは、SAFの利用側である航空会社と供給側である石油元売り会社および関係省庁が一同に会して議論する場がなかったが、この1年、SAFの安定的な供給利用に向けた課題について意見交換し、供給側と利用側それぞれの事情を踏まえた戦略的な対応について議論を深めている。また、SAF導入に向けては、製造・供給・流通、全ての側面でこれまでのジェット燃料とは異なる課題を持っており、様々な課題に取り組む必要がある。そのため、2022年7月に、前述のSAF官民協議会の下に、製造・供給と流通のそれぞれの側面から専門的に議論を行う場として、2つのワーキンググループを設置した^{(11),(12)}。

4.3 SAF製造促進の取組

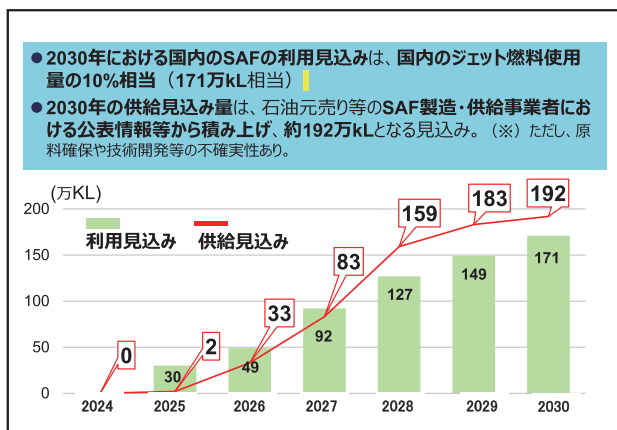
前述したとおり、国内外での脱炭素化の機運の高まりに加え、国際航空ではICAOで定められた排出削減スキーム (CORSIA) によって、各航空会社が基準を超えた排出量をオフセットすることが義務付けられている。特に高いCO₂削減効果が期待されるSAFは各国・各航空会社で取り合いとなることが予想される。そのため、早急に国産SAFが国際競争力のある価格で安定的に供給できるような環境を整える必要があり、前述のワーキンググループにおける議論の他、現在、国内事業者において、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のグリーンイノベーション (GI) 基金等を通じた研究開発が進められており、社会実装に向けてSAFの開発・製造に係る多面的な取組が進められている (Fig. 7)。

一方、前述のSAF官民協議会の下に設置された製造・供給ワーキンググループでは、大規模なリソースやアセットへの投資が必要となるSAF製造の具体化のためには利用量の見込みを立てる必要があるとの問題提起をうけ、国内空港におけるSAFの利用量見込みの検討、およびSAF供給可能量の検討をワーキンググループ構成員の協力を得ながら進めてきた。その結果、国内におけるSAF製造・利用は、2030年において171万kL以上に

Fig. 7 Activities to Support SAF Production Development ⁽⁸⁾

なると見込んでいる（Fig. 8）⁽¹⁰⁾。

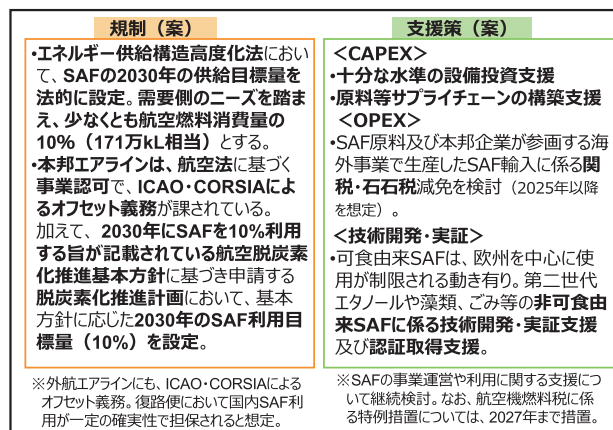
このようなSAF市場の形成・発展に向けて、供給側にて必要十分なSAFの製造能力や原料のサプライチェーン（開発輸入を含む）を確保し、国際競争力のある価格で安定的にSAFを供給できる体制を構築していく必要がある。市場が未成熟な段階において初期投資が大きい設備等を必要量確保するためには、SAFの利用・供給目標を法的に設定するとともに、政府による積極的な支援を検討することが有効との認識に立ち、「SAFの利用・供給拡大に向けた『規制』と『支援策』のパッケージ」を取りまとめた（Fig. 9）⁽¹⁰⁾。今後この案に基づいて施策を具体化していく。

Fig. 8 Forecast of SAF Demand and Supply in Japan ⁽¹⁰⁾

4.4 SAF流通促進の取組

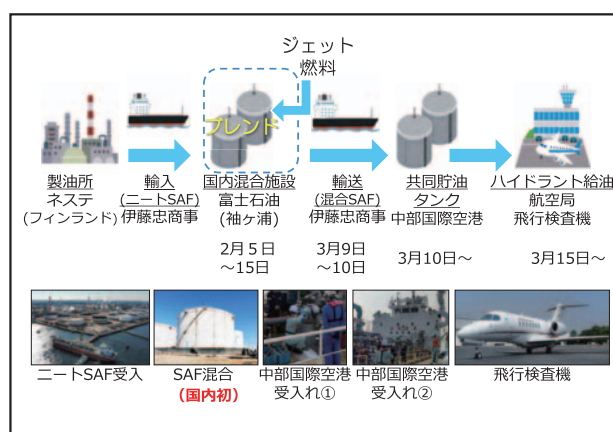
国産SAFの開発・製造は、我が国の国際競争力の強化やエネルギー安全保障の観点から特に重要であるが、十分に供給されるまでの間は、国外からの輸入にも頼らざるをえないのが実情である。

SAFは、既存の化石由来のジェット燃料とブレンドして使用することが国際規格で求められており、SAFの利用にあたっては、化石由来ジェット燃料とブレンドした状態で輸入して利用する方法と、ブレンド前の

Fig. 9 Plan on Regulations and Supports to Promote SAF Supply and Utilization ⁽¹⁰⁾

SAFの“原液”であるニートSAFを輸入した上で、国内において既存の化石由来ジェット燃料とブレンドして利用する方法が考えられる。後者の方法のほうが、輸送コストの抑制や、大量輸送のし易さに繋がると考えている。

しかし、ニートSAFを輸入し、国内でブレンドして使用した実績がこれまで我が国には無かった。そのため、2022年度、国内で初めてニートSAFを実際に輸入し、国内でブレンドしたものを航空局が所有する飛行検査機に給油する実証実験を行い、品質管理、通関や保税、取扱の安全性等について、従来のジェット燃料と比較してどのような対応が必要かを確認・整理した（Fig. 10）^{(10),(13)}。こうした取組から得られた知見をワーキンググループの場も活用して関係者と共有することで横展開し、SAFの輸入・使用が円滑に行えるように環境整備していきたいと考えている。

Fig. 10 Pilot Project for Neat SAF Import ⁽¹⁰⁾

また、SAFを国際航空におけるCO₂排出削減手段として使用可能とするためには、使用するSAFが、ICAOが環境適合性をもつと認めた、CORSIA適格燃料（CORSIA Eligible Fuel: CEF）の認証を得ていなければならない。

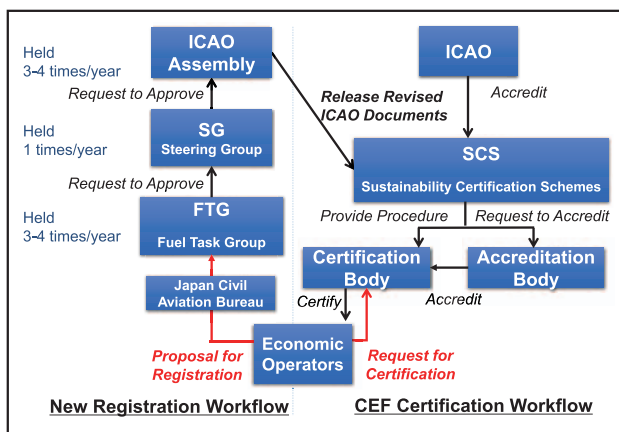


Fig. 11 Workflow to be Registered/Certified as CORSIA Eligible Fuels

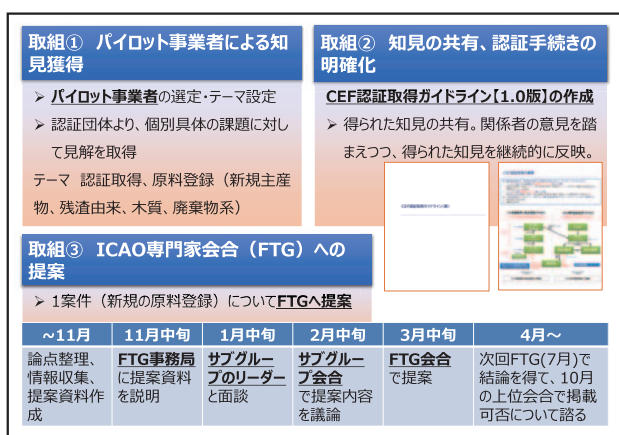


Fig. 12 Activities of SAF Certificate Task Group in 2022 Japan Fiscal Year ⁽¹⁰⁾

前述のとおりSAFは様々な原料やプロセスを経て製造されるが、基本的には、事前に原料及び製造プロセスごとにライフサイクル全体でのCO₂排出量を評価されて登録されている必要がある。また製造にあたっては、登録された原料やプロセスに沿って製造している旨の第三者認証を受ける必要がある。登録・認証の流れをFig. 11に示す。Fig. 11の図中左側が登録されていない原料や製造プロセスの登録を申請し評価を受けるための「新規登録プロセス」、Fig. 11の図中右側が登録された原料・プロセスに沿って製造されていることの認証を受ける「CEF認証取得プロセス」を示す。

しかしながら、現在国内においてSAF製造事業者として認証を取得した実績が無く、登録・認証に関わる手続き方法、検討内容等の知見に乏しい。そこで、CORSIA適格燃料の認証取得を検討しているいくつかの事業者をパイロット事業者として、登録・認証に向けた実務的な取組に航空局も伴走し、我が国としての知見の蓄積や関係者間での共有を図る取組を開始した (Fig. 12) ⁽¹⁰⁾。

2022年度は、SAFの新規原料登録をICAOの専門家会合であるFuel Task Groupに我が国として初めて提案す

るところまでこぎつけた。今後は、得られた知見や明らかにした認証手続きをガイドとしてまとめ、関係者に横展開するとともにガイドを継続的にアップデートし、国産SAFのCORSIA適格燃料認証取得が円滑に行われる環境を整備していきたいと考えている。

4.5 理解促進

SAFの導入に向けては、航空利用者への理解促進に向けた環境づくりも重要である。SAFの製造には追加的なコストが発生するのは避けられず、航空利用者をはじめ国民にこうした脱炭素化の取組を理解して頂き、コストを分担する環境整備が必要である。

例えば、SAF製造会社、航空会社、自治体が枠を超えて国産SAFの商用化や普及・拡大に向けて取り組む有志団体「Act For Sky」が設立されている⁽¹⁴⁾。また、全日本空輸株式会社による各企業が出張や輸送・配送におけるCO₂排出を削減するためのプログラム「SAF Flight Initiative」の創設、日本航空株式会社による低燃費機材やSAFを使用する運航「サステナブルチャーターフライト」の実施等、民間企業も様々な取組が進んでいる^{(15),(16)}。

政府としても、2023年2月に「空のカーボンニュートラル」シンポジウムを開催したところであり、民間企業の取組を後押ししながら、引き続きSAF利用の理解促進に向けて様々な取組を行っていきと考えている⁽¹⁷⁾。なお、シンポジウムの様子は航空局カーボンニュートラル推進室が開設したYouTube「『ソラカボ』チャンネル」(<https://www.youtube.com/@aviation-strategies-channel>)で閲覧可能であるのでご覧頂きたい。

5. 今後の課題

脱炭素の切り札として注目されているSAFの普及に向けて、前述したような課題は解決しなければならない多くの課題の一部に過ぎないが、その中でも供給量が圧倒的に少ないことや、製造コストが高いことは特に大きな課題となっている。

これまで化石由来の原油は輸入に頼っていたが、化石資源が乏しい我が国において、様々な原料から複数のプロセスを経て製造されるSAFの国産化は、我が国のエネルギー安全保障の確保のみならず、大きなビジネスチャンスにもなり得る。我が国においてSAFの安定的な供給確保や価格低減を実現することは航空ネットワークの国際競争力の維持発展の観点からも重要であり、関係省庁や事業者と協力しながら確実に進めていきたい。

参考文献

- (1) 環境省、地球温暖化対策計画<<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/211022.html>> (参照日 2023年6月22日)。
- (2) ICAO ニュースリリース <<https://www.icao.int/Newsroom/Pages/States-adopts-netzero-2050->

- aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx>（参照日 2023年6月22日）。
- (3) 国土交通省，第9回交通政策審議会航空分科会資料<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/kouku01_sg_000261.html>（参照日 2023年6月22日）。
- (4) IEA, “Green House Gas emissions from fuel combustion” (2021)
- (5) 国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィス，日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2019年度）確報値
- (6) 国土交通省，航空機運航分野におけるCO₂削減に関する検討会第1回資料 <https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk8_000004.html>（参照日 2023年6月22日）。
- (7) ATAG Waypoint 2050 <<https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/>>（参照日 2023年6月22日）。
- (8) 国土交通省，航空脱炭素化推進基本方針<<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001573999.pdf>>（参照日 2023年6月22日）。
- (9) 国土交通省，航空機運航分野におけるCO₂削減に関する検討会第4回資料 <https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk8_000004.html>（参照日 2023年6月22日）。
- (10) 国土交通省，持続可能な航空燃料（SAF）の導入促進に向けた官民協議会<https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk8_000008.html>（参照日 2023年6月22日）。
- (11) 国土交通省，持続可能な航空燃料（SAF）の導入促進に向けた官民協議会 SAF流通ワーキンググループ<https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk8_000009.html>（参照日 2023年6月22日）。
- (12) 資源エネルギー庁，持続可能な航空燃料（SAF）の導入促進に向けた官民協議会 製造・供給ワーキンググループ <https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/saf/seizo_wg/index.html>（参照日 2023年6月22日）。
- (13) 国土交通省，輸入ニートSAF実証事業<https://www.mlit.go.jp/report/press/kouku08_hh_000043.html>（参照日 2023年6月22日）。
- (14) ACT FOR SKY<<https://actforsky.jp/>>（参照日 2023年6月22日）。
- (15) 全日本空輸，SAF Flight Initiative<<https://www.ana.co.jp/ja/jp/brand/ana-future-promise/saf-flight-initiative/>>（参照日 2023年6月22日）。
- (16) 日本航空，サステナブルチャーターフライト<<https://www.jal.com/ja/sustainability/sustainableflight221118/>>（参照日 2023年6月22日）。
- (17) 国土交通省，第1回「空のカーボンニュートラル」シンポジウム <https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr8_000016.html>（参照日 2023年6月22日）。
- (18) 日本ガスタービン学会，第51回ガスタービンセミナー パネルディスカッション「航空輸送を持続可能にするために～Sustainable Aviation Fuel（SAF）社会実装に向けての取り組みと課題～」国土交通省航空局 配布資料

特集：航空分野の脱炭素化へ向けたサステナブル航空燃料（SAF）普及の取り組み

FT合成によるSAF製造の取り組み

SAF Production Approach Utilizing FT Synthesis Technology



寺井 聡^{*1}
TERAI Satoshi

キーワード：FT合成，持続可能な航空燃料，マイクロチャンネル反応器，LCA

Key Words：FT Synthesis, Sustainable Aviation Fuels, Microchannel Reactor, Life Cycle Assessment

1. はじめに

2022年10月に開催された国際民間航空機関（ICAO）第41回総会において「2050年までに国際航空からのCO₂排出量を実質ゼロにする」野心的な目標が採択されたが，航空分野の温室効果ガス（Greenhouse Gas, GHG）排出削減切り札として持続可能な航空燃料（Sustainable Aviation Fuels, SAF）が注目されている。国際航空運送協会（IATA）では，2050年までにGHG排出量を正味ゼロとする目標（Fly Net Zero 2050）に対して，SAFの貢献割合は65%と最も高く，2050年までに4億5千万kLものSAFが必要と推計している⁽¹⁾（Fig. 1）。わが国でも2030年時点の本邦航空運送事業者による燃料使用量の10%をSAFに置き換ええるとの目標が設定されており，2030年時点で本邦及び外国エアラインが国内給油で必要とされるSAFは171万kL（国交省試算⁽²⁾），2050年時点では，最大2,300万kL必要（全日本空輸株式会社/日本航空株式会社⁽³⁾）との試算が公表されている。

SAFの品質については，米国のASTMが事実上の世界標準となっている。ASTM D7566は石油代替合成燃料規格として準備されているもので，必ずしもSAF専用規格という訳ではないが，ASTMが各国に先んじて試験を行い，技術的に支障の無いことが確認された原料と製造法の組合せが，その要求品質と共にD7566に規定されており，ニートSAF（バイオマス等カーボンニュートラルな原料から製造されたSAFであり，化石由来燃料と混合前の燃料）も該当するAnnexの品質規格を参照している。Annexの品質を満足したニートSAFは，従来の化石由来のジェット燃料と定められた比率以下で混合の後，D7566 Table1規定の品質を満たすことで，従来の航空燃料規格であるASTM D1655規定の燃料と同等に取り扱うことができる。各国規格はASTMを追認す

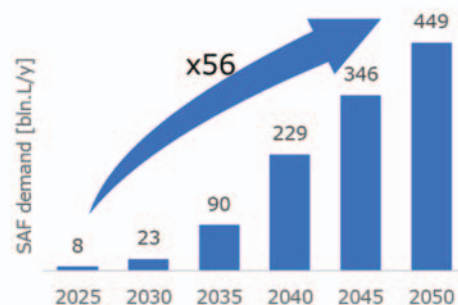


Fig. 1 Expected SAF required for 2050

る形式でSAFを容認しているのが現状である。SAF製造技術体系をFig. 2に示す。

この内，Fischer-Tropsch合成（FT合成）を利用する製造パスとしては，H₂とCOを主成分とする合成ガスを直接の原料と規定するD7566 Annex1のFT-SPK（FT Hydroprocessed Synthesized Paraffinic Kerosene）と，これに非化石原料由来の芳香族成分を添加したAnnex4のFT-SPK/A（FT Synthesized Paraffinic Kerosene plus Aromatics）であり，既存のジェット燃料と最大50vol%まで混合することが認められている。この他，米国では，FT粗油を既設の製油所設備で石油系原料と一緒に処理して，従来ジェット燃料規格であるASTM D1655 Annex1定義のJet A-1を直接得る方法（D1655 Annex1 Co-processing, Max.5vol%）も認められている。

様々な原料・製造法がある中，現時点でICAO/CORSIA（Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation）でGHG削減効果を認められたCORSIA適格燃料（CORSIA Eligible Fuels, CEF）として承認されているのは，Annex1のFT-SPKと，Annex2のHEFA-SPK，Annex3のSIP，Annex5のATJ-SPKに限られている。また，現に市場に出回っているのは既存製油所設備の改造等で対応可能で比較的，製造側の導入ハードルが低いAnnex2のHEFAのみであるが，廃食油などから製造するHEFAは，資源量に制約があり，膨大な需要を賄う事は難しい状況である。今後，予測さ

原稿受付 2023年 6 月26日

* 1 東洋エンジニアリング(株)次世代技術開拓部
〒275-0024 習志野市茜浜 2-8-1
E-mail: Satoshi.terai@toyo-eng.com

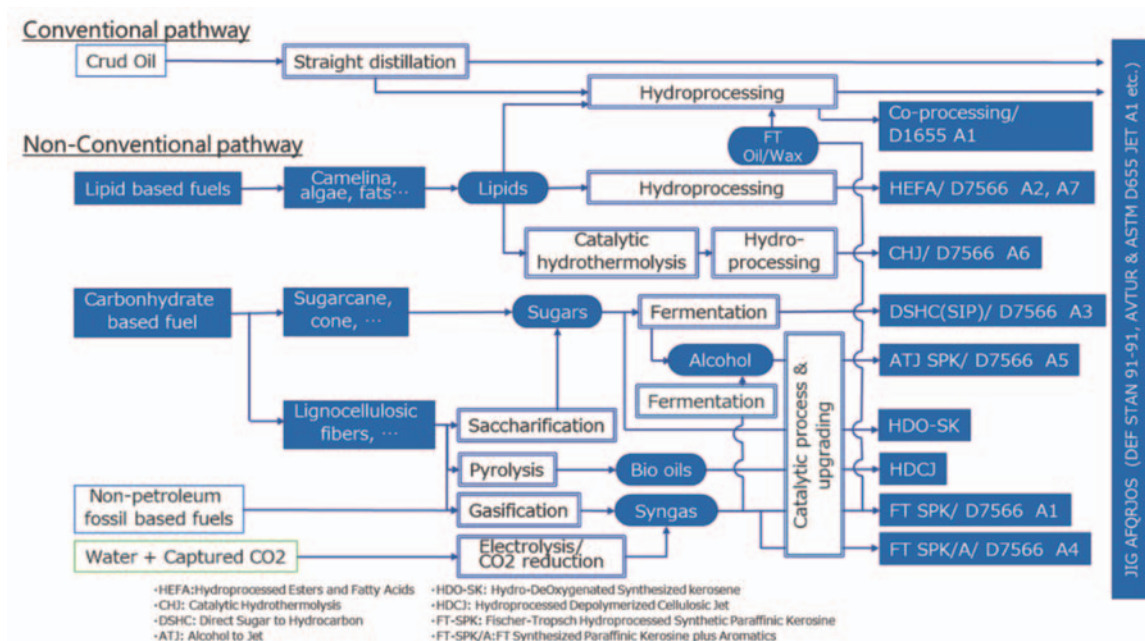


Fig. 2 Various SAF Production Pathway

れるSAFの需要に応えるためには、それぞれの地域特性に適合した原料・製造法の組合せで対応していく必要がある。その中で、FT合成技術は合成ガスを直接の原料とする汎用技術であり、合成ガスはバイオマス等のガス化や、CO₂を再エネ由来H₂等で還元しても得られることから一次原料の自由度が高く、今後の導入拡大が期待されている。

加えて、SAF導入促進のためには、資源量賦存の観点だけでなく、社会的な制度設計も重要となっている。現状でSAF製造プロジェクトの計画が多いのは、社会的にSAF導入促進のための制度設計が進む欧米が主であるが、これは、SAFは既存ジェット燃料に比べて、一般的に製造の手間が追加されるため、コストが高くなることが背景にある。今後、化石資源由来の燃料にはカーボンプライシング等が加味され、SAFとの値差は小さくなる方向になっていくとは予想されているものの、特に初期においてSAF導入のためのインセンティブ付与も重要となっている。

2. FT合成技術を用いたSAF製造

2.1 FT合成技術概要

FT合成技術は、1920年代にドイツKaiser-Wilhelm研究所のFranz FisherとHans Tropschによって、石炭から得られる水性ガスを原料に液体燃料を得るために開発された技術で、式(1)で表される約157kJ/mol-COもの大きな発熱を伴う重合反応である。原料はH₂とCOからなる合成ガスで、原料H₂/CO化学量論比は約2であり、炭化水素の生成と共に消費したCOと等モルの副生水が生じる。



生成炭化水素の大部分は直鎖飽和炭化水素であり、重合反応速度論から、生成物は式(2)で表されるAnderson-Schulz-Flory (ASF) 分布に従う連続留分になることが知られている。連鎖成長率 α と炭化水素の炭素数分布の関係を示したのがFig. 3となる。炭素数が大きいほど高沸点の留分となるが、例えば炭素数19の直鎖飽和炭化水素n-C₁₉H₄₀の常圧における沸点と融点はそれぞれ約330℃と約33℃となり、沸点範囲は軽油レンジであるものの、室温では流動性がなくなる。そのため液体燃料として利用するためには、FT反応後に、直鎖の炭化水素を異性化する等で側鎖を付与して流動性を高める改質処理(Upgrading)が必要となる。

$$W_n = (1-\alpha)^2 n \alpha^{n-1} \quad (2)$$

n: 炭素数

α : 連鎖成長確率

W_n: 炭素数n 成分の重量分率

FT合成は、200～230℃レベルの低温型と330～350℃レベルの高温型に分類することが出来るが、現在主流のCo系の触媒を用いる低温型は、高連鎖成長率を達成できるため、硫黄分など不純物を含まない高品質な潤滑油基材として有用な合成ワックスを含む連続留分(FT粗油)が得られる。このワックス留分を含むFT粗油中の長鎖の炭化水素を水素化分解にて適宜切断・異性化することで、室温でも流動性がある留分へ改質し、高セタン価かつ低温流動性を改善した灯軽油留分などの高付加価値な中間留分を多く得ることが出来る(Fig. 4)。低温型プロセスは、1990年代後半から2010年代前半までに大型のGTL (Gas to Liquid) プラントがカタールなどで建設・稼働しているが、当時、石油価格に比べて天然ガスが安価であったこともあり、大規模ガス田におい

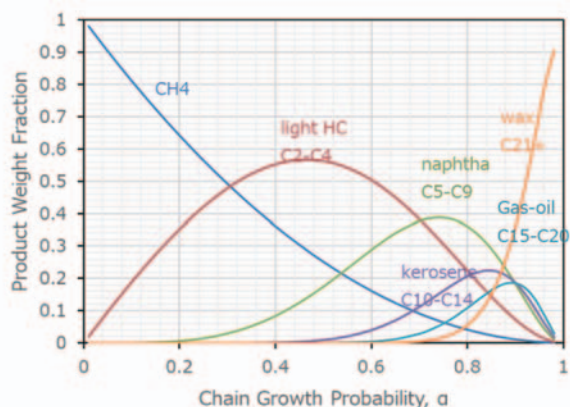
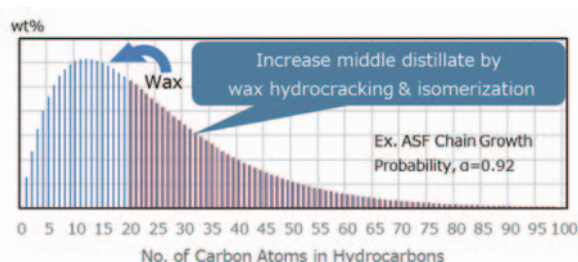


Fig. 3 Anderson- Schulz-Flory Distribution

Fig. 4 ASF Distribution at $\alpha=0.92$ and FT-wax Hydrocracking Image

てスケールメリットを生かしてGTL由来の灯軽油を大量生産することで、石油由来の燃料に対しても経済性が見込めた事が背景となっている。

Fe系触媒を用いる高温型は、Feがシフト反応活性も有するため、石炭ガス化由来など、 H_2/CO 比率の低い合成ガスの場合でも、COの一部を式(3)で表される水性ガスシフト反応にて H_2 に転化することで、FT反応の量論比 $H_2/CO=2$ 付近のガスに調整ができ、FT反応が進行しやすいが、一方で、連鎖成長率は小さいため、軽質なナフサ留分が主となる特徴がある。高温型の商業プロセスは、南アフリカ共和国でのみ稼働していて他所への展開は現在のところ無いが、これは、同国のアパルトヘイト政策時代の石油禁輸対策として、同国内に豊富にあった石炭資源から液体燃料を得る代替手段として建設されたという特殊な事情が背景にある。



前述の様に、FT合成では、高連鎖成長ほど高付加価値な中間留分を得ることが出来るため、Co系触媒を中心とした触媒改良が行われてきた。触媒開発に加えて、大きな発熱を伴うFT反応は効率的に反応熱除去を行わないと、暴走反応を引き起こすことから、高活性な触媒性能を生かすことが出来る除熱性能に優れ、かつ経済性に優れた大型反応器の開発も進められてきた。

現在大型のGTLプロセスとして代表的な2つのプラントは、大規模ガス田を有するカタールにて運転中であるが、製品がコモディティな燃料であるがため、どちらもスケールアップメリットで経済性を追求した結果、そ

の反応器タイプは、固定床多管式反応器（Shell SMDS法/ Pearl GTL）と、スラリー床式反応器（Sasol法/Oryx GTL）となっている。

固定床多管式反応器は反応器シェル内に配置された多数のチューブ内に触媒が充填されており、チューブの外側にボイラ水を流通させ沸騰時の相変化にて反応熱を除熱している。構造がシンプルな半面、伝熱面積がチューブ表面に限られるため、除熱量の限界からワンパス転化率を抑えて未反応原料のリサイクル比率を大きくすることで対応しているとみられる。一方でスラリー床型反応器は、反応器内に除熱用ボイラ水の流れるチューブが設置されており、その外側に生成液相が触媒粉と原料ガスとともに流動攪拌されたスラリー相を形成している。スラリー相は除熱チューブ外壁と混合接触するため境界が小さく温度制御性は比較的良好になるが、混合特性が複雑なため、反応器のスケールアップは容易ではない他、製品油中に懸濁した触媒の分離が難しいなど、運転面では熟練が必要となるとみられる。

これらは、大型のガス田向けにスケールメリットを追求する形で反応器も大型に特化して開発されてきた経緯があるが、全く別のコンセプトとして、東洋エンジニアリングでは米国Velocys社と技術提携し、FPSO（浮体式石油・ガス生産貯蔵積出設備）上でのフレアガス削減向けや、大型プロセスでは経済性が出にくい中小ガス田開発ツールとしての中小型GTL技術開発を行ってきた⁽⁴⁾。SAF製造の場合、かさ高なバイオマス原料の大量輸送は余計なCO₂排出増加につながるため、LCA（Life Cycle Assesment）的な見地からはバイオマス輸送距離の少ない地消型が好ましく、そのため中小型向けのFT技術はSAFに適した技術となる。Velocys社のマイクロチャンネルFT合成反応器（Fig. 5）は、反応流路と冷却流路を交互に密に組合せて効率的に反応熱を除去し、同社の高活性FT触媒との組み合わせで反応率を高めることで、従来技術に比べて反応容積を約1/10に小型化できる特徴がある。そのためプラント自体も小型化できる他、反応器のモジュール化で現地建設期間の短縮も可能となる。

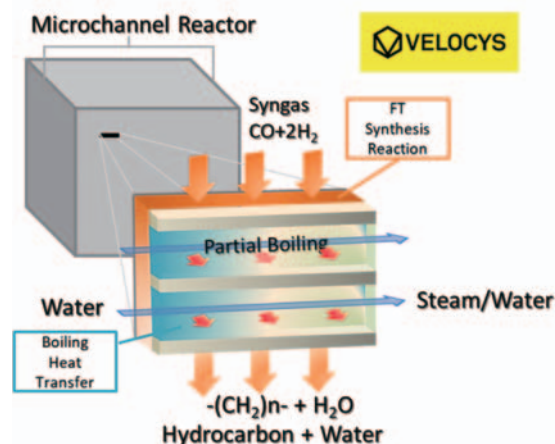


Fig. 5 Velocys' Microchannel Type FT Synthesis Reactor

2.2 FT合成技術を用いた液体燃料製造技術

FT合成技術を利用した液体燃料製造プロセスは、大きく分けて3つの工程から構成される (Fig. 6)。すなわち原料となる合成ガスを得る工程と、得られた合成ガスをFT合成反応にて主に直鎖炭化水素からなるFT粗油を得る工程、FT粗油を水素化分解・異性化してナフサや灯油、軽油留分といった連続留分からなる合成原油を得た後、蒸留で最終製品を得る工程から構成される。合成ガスを得る工程は原料によって種々の方法があるが、FT合成以降の工程は同じであるため、FT合成は汎用性のある技術として知られている。原料の違いによって合成ガスの製造工程と原料由来の触媒毒を除去・精製する工程にそれぞれ違いが生じ、総称としてXTLとも呼称される。

なお、再エネ由来の H_2 と回収 CO_2 からなるPTL (Power to Liquid, 又はe-fuelとも呼称) では、既存のFT合成では CO_2 はFT反応に直接寄与しないため、事前にCOに還元する必要がある。図中では逆シフト反応 (Reverse Water Gas Shift Reaction, RWGS, 式(3)の逆反応) が記載されているが、同反応は高温ほど有利な平衡反応であり、 $800^\circ C$ レベルの熱を供給したとしても、 CO_2 全量をCOに変換させることは平衡制約上、困難な事が分かる (Fig. 7)。RWGS法で CO_2 還元を行う場合、吸熱反応を促進させるための反応器と高温でのシタリング劣化を防止した触媒の開発が必要となる。加えて平衡制約に囚われない電気化学的な手法として、 CO_2 電解法や水と CO_2 を同時に電解する共電解といった方法の開発が国内外で進められている。また、Fe系などシフト活性のある触媒を用いて、 H_2 と CO_2 の逆シフト反応からCOを得た後、直ちにFT反応にてCOを消費することで、疑似的に逆シフト平衡をずらす、Direct FT合成反応の開発も行われている^{(5),(6)}。

木質バイオマスを原料としたBTLのブロックフロー例をFig. 8に示す。木質バイオマスは乾燥や粉碎等の前処理を経た後、空気より分離した酸素及びスチームを酸化剤としてガス化炉にてガス化され、必要に応じ副生タールの除去や、COシフト反応などと組み合わせて、 $H_2/CO=2$ 付近に調整する。その後、原料由来の H_2S

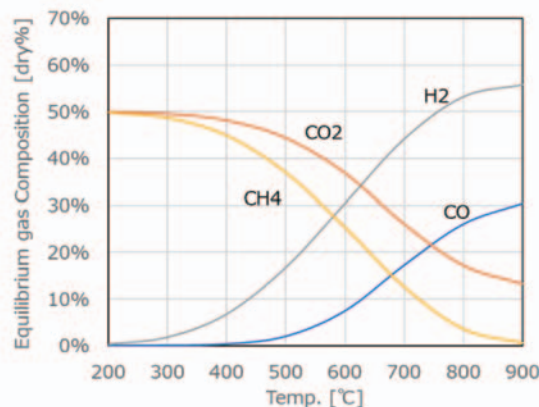


Fig. 7 Equilibrium Gas Composition for $P=1MPaA$, $H_2/CO_2 = 2$

等、触媒毒となる不純物成分や、必要に応じてFT反応でイナータとなる CO_2 を除去後、FT合成を行う。FT合成で生成したFT粗油は水素化分解・異性化・蒸留を経て、ジェット燃料などの製品を得る。FT合成反応は副生水による触媒酸化等の劣化を避けるため、CO転化率は高くても70～80%程度までで留めるのが一般的であり、FT反応器出口のテールガス中には、未反応の H_2 が含まれる。この H_2 を一部分離して水素化分解工程に用いることで外部からの水素供給を不要とすることが可能な他、ガス化炉にリサイクルすることで収率を上げることが出来る。

同技術を用いたSAF製造の実証として、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) 委託事業 (2017～2021年) にて、株式会社JERA、三菱パワー株式会社 (現・三菱重工業株式会社 (MHI))、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、東洋エンジニアリングでは、木質バイオマスのガス化からニートSAFまでの一貫製造実証を実施した。MHIの高性能噴流床ガス化技術とマイクロチャンネルFT技術を組み合わせ一貫製造したニートSAFはすべてD7566 Annex 1に合致すること、および製品燃焼試験の結果、排気ガス中の粒子状物質 (PM) は、既存ジェット燃料の場合の排気ガスより少なく、環境負荷が小さい特徴以外は、燃焼性やエンジン出力特性等は既存燃料と同等であることを確認した。製品の一部は、既存燃料と混合して羽田-新千歳間の商業フライトに供し、燃料供給までの手順確認とともに、運用に問題ないことも確認した^{(7),(8)} (Fig. 9)。この結果を受け、引き続き、商業化に向けた検討を実施中である。

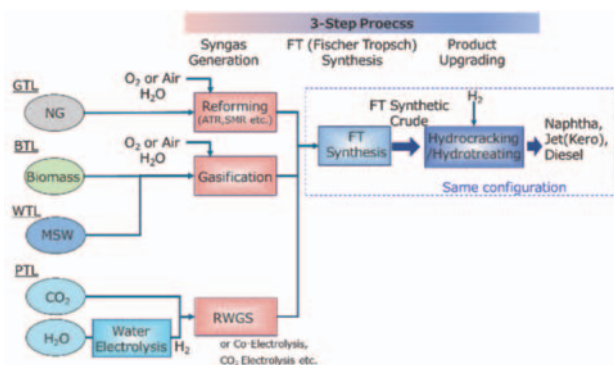


Fig. 6 XTL Process Configuration

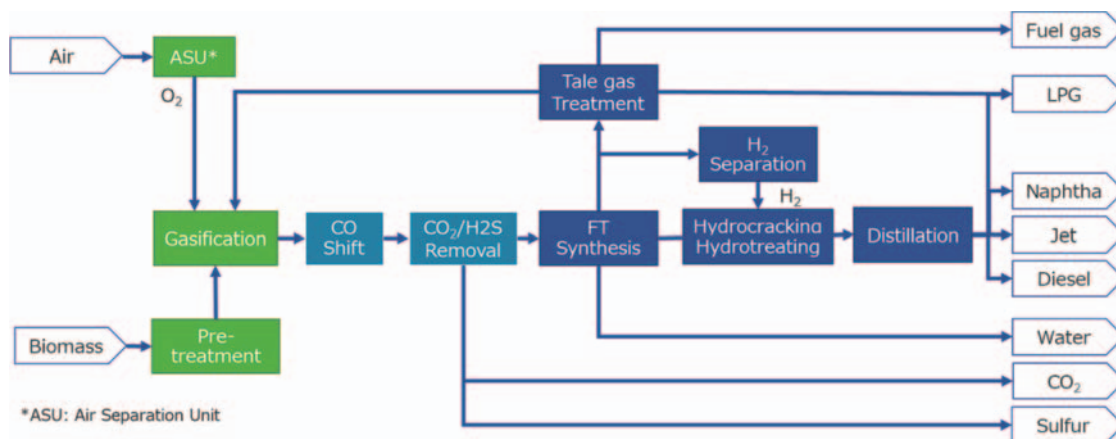


Fig. 8 Typical BTL Process Block Flow



Fig. 9 NEDO Biojet Fuel Production Technology Development Project

3. FT合成技術を用いたSAFのLCA評価

ICAO/CORSIAのルールでのGHG削減量は、式(4)で計算されることが決められている。燃料製造者はCEFのライフサイクルでの排出値 (LS_f) を航空会社に提出し、航空会社はCEFによるCO₂排出削減量 (ER_y) を算出する。航空会社は自社CO₂排出量のモニタリング結果をレポートにまとめ、検証機関による検証を受けた後、国に提出し、各国政府が取り纏めてICAOに報告することが定められている。CEFとして認められた原料・製造法の一部はICAOが定めた LS_f のデフォルト値が公表されている⁽⁹⁾(Fig. 10)。燃料製造者はこのデフォルト値を使うか、またはICAOが定める方法論を基に算出した実測値⁽¹⁰⁾を利用する2つの方法がある。

FT合成由来のSAFは他の製造法に比べてCO₂削減効果が高い (LS_f が小さい) 傾向があり、加えて、システム構成上、CO₂回収が技術的に容易である。そのため、バイオマスガス化由来のFT-SPKでは、CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) と組み合わせた所謂BECCS (Bio-energy with Carbon dioxide Capture and Storage) とすることで、LCAをマイナスとし、より環境付加価値が高いSAFを製造することが可能である。

$$ER_y = FCF \times [\sum MS_{fy} \times \{1 - (LS_f / LC)\}] \quad (4)$$

ER_y : 西暦y年におけるCORSIA適格燃料の活用によるCO₂換算GHG排出削減量 [ton]

FCF : 従来型航空燃料の排出係数

Jet A/A1 : 3.16 [kg-CO₂/kg-fuel]

AVGas/Jet B : 3.10 [kg-CO₂/kg-fuel]

MS_{fy} : 西暦y年において活用するニートのCORSIA適格燃料の総重量 [ton]

LS_f : CORSIA適格燃料のライフサイクル排出量値 [g-CO₂e/MJ]

LC : 従来型航空燃料のベースラインのライフサイクル排出量

ジェット燃料: 89 [g-CO₂e/MJ]

航空ガソリン: 95 [g-CO₂e/MJ]

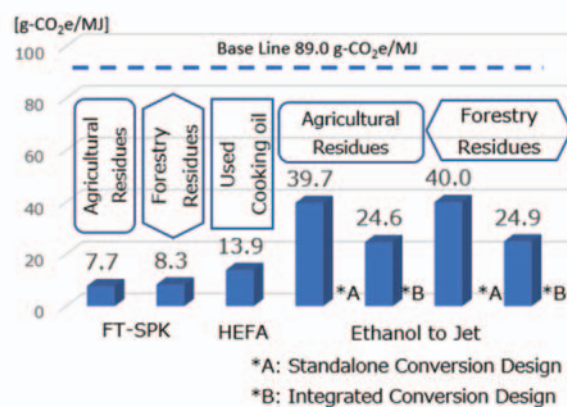


Fig. 10 Example of Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels (CEF)

4. おわりに

航空分野のGHG排出削減対策として、航空機の電動化や水素利用等の開発も行われているが、燃料のエネルギー密度の観点から、中長距離線への代替は困難であり、従来燃料にドロップイン可能な液体燃料であるSAFは最有力な手段と位置付けられている。

国内でもSAF導入量の目標が定められたものの、SAFの種類によってGHG削減効果は異なるため、本質的には、SAF導入量に、それぞれのGHG削減効果を掛け合わせたGHG削減量を目標設定する必要がある。既に2027年以降、ICAO/CORSIAでのGHG削減義務化は各国合意済みであるため、日本国として戦略的にGHG削減効果の高いSAFを確保していくことが、ますます重要になる。

理論的には、GHG削減効果が2倍高いSAFは、同じ効果を半分の量で賄えるため、2倍の価格でも環境付加価値的には同じと判断しても良いところだが、現実には、2倍高いSAFを導入するよりもカーボンクレジット等でGHG削減効果を補った方が安価であるという状況である。

SAF製造設備の導入には数年のリードタイムが必要であるが、環境付加価値に見合ったインセンティブが働かない中では、HEFAなど比較的設備導入ハードルが低いSAF（ただし原料の廃油は既に争奪戦状態）以外のSAF製造設備は投資決定を判断し難い状況が続くことになる。GHG削減効果の高いSAFの市場への導入促進のためには、低環境負荷（品質）を製品価値とした市場の構築と共に、検討が進められている“SAFの利用・供給拡大に向けた事業支援政策”の積極的な展開など投資価値向上の環境醸成が強く期待されている。

本稿紹介の一部は、NEDOの委託業務（JPNP17005）の結果得られたものである。

参考文献

- (1) IATA Our Commitment to Fly Net Zero by 2050, <<https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/>>（参照日 2023年6月5日）
- (2) 航空機運航分野におけるCO₂削減に関する検討会（第6回, 令和5年3月30日）航空局資料
- (3) 全日本空輸株式会社, 日本航空株式会社 共同レポート「2050年 航空輸送におけるCO₂排出実質ゼロへ向けて」, 2021年10月8日
- (4) Kojima, Y., “Smaller scale GTL -an Update of its Technology and Industrial Deployment”, Asian Nitrogen+Syngas proceedings, (2014).
- (5) 東洋エンジニアリング(株), 2021年8月24日発表,<<https://www.toyo-eng.com/jp/ja/company/news/?n=3523>>（参照日 2023年6月5日）
- (6) 資源エネルギー庁資料：「CO₂等を用いた燃料製造技術開発」プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性（案）, 2021年12月
- (7) 東洋エンジニアリング(株), 2021年6月18日発表,<<https://www.toyo-eng.com/jp/ja/company/news/?n=3540>>（参照日 2023年6月5日）
- (8) NEDO 2017-2021年度成果報告書, バイオジェット燃料生産技術開発事業「一貫製造プロセスに関するパイロットスケール試験, 高性能噴流床ガス化とFT 合成による純バイオジェット燃料製造パイロットプラントの研究開発」, 2021年7月
- (9) ICAO document, “CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels”, 3rd Edition, November 2021
- (10) ICAO document, “CORSIA Methodology for Calculating Actual Life Cycle Emissions Values”, 2nd Edition, March 2021

特集：航空分野の脱炭素化へ向けたサステナブル航空燃料（SAF）普及の取り組み

航空分野の脱炭素化へ向けた廃食用油を原料とする バイオジェット燃料「SAF」普及の取り組み

Efforts to Promote SAF, a Bio-Jet Fuel Made from Used Cooking Oil, Toward Decarbonization of the Aviation Sector



谷利 駿^{*1}
TANIKAGA Shun



東 裕一郎^{*1}
AZUMA Yuichiro



佐藤 干城^{*1}
SATO Tateki



松永 興哲^{*1}
MATSUNAGA Kotetsu



越川 翔生^{*1}
KOSHIKAWA Shoi

キーワード：SAF, LCA, バイオ燃料, 接触水素化分解, 廃食用油, ジャトロファ

Key Words : SAF, Life cycle assessment, Biofuel, Catalytic hydrocracking, Used cooking oil, Jatrophia

1. 緒言

産業革命以降からの化石燃料使用により大気中のCO₂濃度は増加し、世界各地で異常気象や気候変動が現われている。気候変動の例としては地球規模の平均気温上昇・海面上昇・生態系への影響等が、世界中様々なところで観測されている。こういった気候変動対策などを考えるうえで、CO₂削減は地球温暖化の進行を食い止める為に効果的とされており、2015年国連気候変動枠組条約締約国会議にて採択された「パリ協定」や、同じく2015年の国連サミットにて採択された「持続可能な開発目標（SDGs）」といった国際的目標が掲げられ、温室効果ガス削減及び持続可能な循環型社会形成に向けて具体的な取り組みが世界中で進められている。

世界の主要な温室効果ガス排出源はエネルギー部門であり、その内石油が占める割合は2020年度時点で31.0%である。石油の用途は主に輸送用であり、石油消費全体の61%を占めている⁽¹⁾。その為、陸運・海運・航空の各分野においても温室効果ガス削減目標が定められると共に、再生可能エネルギーの導入が進められている。中でも運輸部門においては再生可能エネルギー由来の水素や電気が注目されている。しかし、エネルギー密度の観点からすると比較的短距離の移動であり、こまめな燃料補給や充電が可能な車両等の陸運とは異なり、長距離の移動を行う海運や航空では水素・電気の導入が困難とされている。その理由の一つとしては燃料のエネルギー密度の問題である。現状使用されている化石燃料のエネルギー密度は高く、航空分野で使用されているケロシン

（化石燃料由来ジェット燃料）を例に挙げると、重量当たりエネルギー密度はリチウムイオン電池の約60倍、体積当たりエネルギー密度としては液体水素の約3倍⁽²⁾となる。つまり、現状の運用のまま航空機の動力を電気へと変更する場合には電池重量が60倍となり、液体水素の場合は燃料タンクが3倍の大きさになることとなる。それに加え、電気の場合は出発段階と到着段階で燃料重量の差（減少）がないことや液体水素保存の為にタンク仕様変更に関する検討・技術開発等が必要となる。その為、航空分野での電気・水素の導入の可能性は国内線等の比較的短距離の移動に限られるのが現状であり、ケロシンの高いエネルギー密度を代替する燃料が求められている。また、航空においては燃料を使用する環境は上空1万mの極寒の環境である為、使用する燃料の品質としても高い低温流動性が求められる。

こういった背景のもと、温室効果ガスの削減・持続可能な社会形成の為に、再生可能エネルギーの一つとしてバイオ燃料への期待が大きく高まっている。現在流通しているバイオ燃料は主にバイオエタノール・バイオディーゼルであり、どちらも陸運分野等での使用は可能であるが、バイオエタノールはエネルギー密度の観点から、バイオディーゼルは（比較的温和な条件で使用される海運分野での使用は可能であるが）既存の軽油と同様に主に低温流動性の観点から航空分野での使用が難しい為、従来のバイオ燃料に該当しない新たなバイオ燃料としてケロシンと同等のエネルギー密度・燃料品質をもったSAF（持続可能な航空燃料：Sustainable Aviation Fuel）が求められている。

本稿ではSAFの化学的特徴や油脂からの反応概要、SAF普及拡大に向けた当社の取り組み等について紹介する。

原稿受付 2023年7月10日

*1 (株)レボインターナショナル

〒612-8473 京都市伏見区下鳥羽広長町173

E-mail: sesami@e-revo.jp

Table 1 Types of SAF in ASTM D7566-22⁽³⁾

Annex No.	type	summary	raw materials	Mixing limit
Annex1	FT-SPK	Biomass Gasification Fischer-Tropsch Synthesis	Wood, municipal waste, cellulosic biomass, etc.	50vol%
Annex2	HEFA SPK	Hydrogenation of fats and fatty acids	Fats such as used cooking oil	50vol%
Annex3	SIP	Sugar-derived synthetic isoparaffin	Biomass sugar	10vol%
Annex4	SPK/A	Synthetic kerosene with alkylated non- petroleum-derived aromatics	Non-petroleum-derived aromatics	50vol%
Annex5	ATJ	Hydrogenation after conversion of biomass to alcohol	Biomass sugar and municipal solid waste	50vol%
Annex6	CHJ	Hydrogenation hydrothermal cracking of microalgae and used cooking oil	Microalgae and used cooking oil	50vol%
Annex7	HC-HEFA SPK	Hydrogenation of microalgae-derived oil	Microalgae extract oil	10vol%

2. SAF概要

2.1 SAFとは

SAFとは持続可能な航空燃料のことを指し、バイオマスや廃棄物等の持続可能な物質を原料とする従来の化石燃料と同様の炭化水素組成を持つジェット燃料のことである。バイオマスを原料とした場合には、バイオマスは成長過程でCO₂を吸収する為、温室効果ガスの排出量と吸収量を均衡させる事ができ、カーボンニュートラルが実現可能となる。構造中に酸素を含む従来のバイオエタノールやバイオディーゼル燃料とは異なり、SAFの組成は既存の化石燃料と同様に構造中に酸素を含まない炭化水素で構成されている為、既存のインフラやエンジン等の改修が必要ないDrop-inの新たな持続可能燃料である。

品質規格としては国際規格であるASTM D7566（合成炭化水素を含む航空タービン燃料の品質規格）に規定されている。SAFを製造する技術及び原料となる物質は様々であり、現在までにTable 1に示す通り、製造技術及び原料に応じた7つのカテゴリーが承認されている。この品質規格に合格することで既存のジェット燃料に混合することが可能となり、Table 1に示す通りカテゴリー毎に混合上限が設定されている。

また、SAFの利用に関しては品質規格とは別に持続可能性の認証を得ることが重要となる。国際民間航空機関（ICAO）は2021年以降、国際線を運航する航空会社に対し、2019年度のCO₂排出量を基準として超過分を航空以外の事業からCO₂排出権（CO₂クレジット）を購入すること等を義務付けるCORSIA制度を採択している。2021～2026年の期間はパイロットフェーズとして自発的な参加国のみが対象となるが、2027年以降は一部の国を除きすべての国がこのオフセット（埋め合わせ）制度の対象となる。CO₂排出量のオフセットに関しては、ICAOが定めるCORSIAの持続可能性基準に適した代替燃料をCORSIA適格燃料（CORSIA Eligible Fuel：CEF）として認証を受けることが可能であり、エアラ

インはCEFを利用することによるCO₂削減量をオフセット義務から控除することが認められている⁽⁴⁾。

その為、SAFの製造事業者は持続可能性基準の項目となる、間接的土地利用変化（Indirect Land Use Change：ILUC）を含むライフサイクルアセスメント（LCA）評価でのCO₂削減効果を把握し、CEFとして認証を得ることがSAFの供給・利用において重要な項目となる。

2.2 化石燃料の分子構造

SAFには石油と同様の分子構造が求められる。石油とは分子構造の骨格となる炭素数や分子構造の異なる、炭素と水素で構成された無数の炭化水素を主成分とする混合物であり、一つ一つの成分は炭素数・分子構造が異なることで物理的性質も異なる。一般的に炭素数が多いほど沸点・密度・発熱量等が高くなり、炭素数が少ないほど引火点・融点・析出点等が低くなる性質がある。

また、炭化水素はその分子構造毎に分類されており、飽和炭化水素はパラフィン（またはアルカン）と呼ばれる。Fig. 1に示すように直鎖状の構造を持つパラフィンはノルマルパラフィン、分枝鎖を持つパラフィンはイソパラフィン、環状構造を持つパラフィンはシクロパラフィン（またはナフテン）と呼ばれる。構造中に二重結合を持つ不飽和炭化水素はオレフィン（またはアルケ

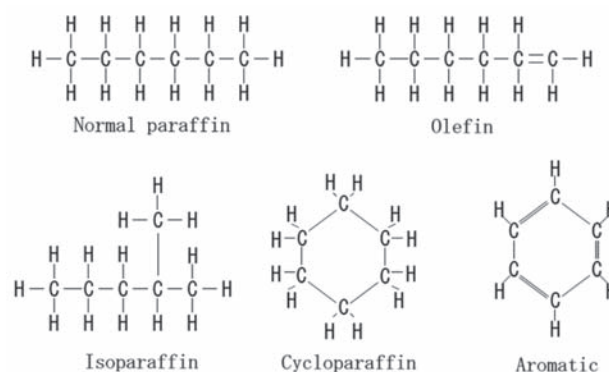


Fig. 1 Main molecular structures of hydrocarbons

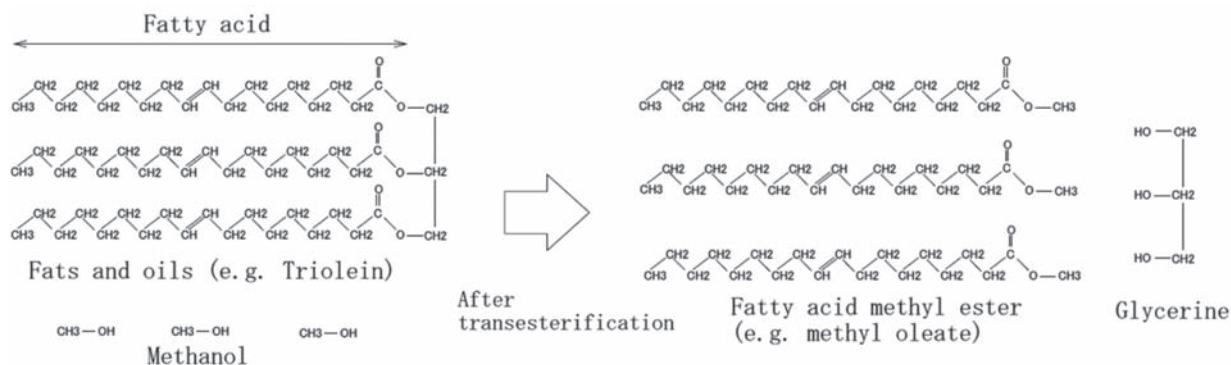


Fig. 2 Outline of transesterification reaction

ン)と呼ばれ、分子中に少なくとも1つの芳香環を持つ炭化水素は芳香族系炭化水素(またはアロマ)と呼ばれる。同一の炭素数であっても分子構造が異なれば物理的性質も異なり、沸点を例に挙げると一般的にはイソパラフィン<ノルマルパラフィン<シクロパラフィン<アロマの順に沸点が高くなる。その為、規格に則したSAFを製造するには燃料中の炭素数及び分子構造毎の比率が特に重要な項目となってくる。

原油からのナフサ(粗製ガソリン)・灯油・軽油等への分離に関しては、物質の沸点差を利用した蒸留精製にて行われている。原油の組成は原産国により異なる為、定められた燃料品質規格を満たすように、石油メーカー各社で蒸留条件が調整されており、一般的な炭素数の範囲はナフサ: 5~10, 灯油: 8~16, 軽油: 14~20程度となる。ジェット燃料は低温流動性や発熱量・着火性等が求められる為、灯油に近い組成であるが、灯油に比べてはるかに厳しい燃料品質が求められる。

2.3 油脂, FAME及びSAFの分子構造と特性

当社がSAF原料とする油脂(廃食用油)の分子構造をFig. 2中に記載する。構造的には-CH₂-CH₂- (不飽和の場合は=CH-CH₂-)の鎖列が連鎖しているカルボン酸である脂肪酸とグリセリンがエステル結合した分子構造となっている。脂肪酸はナタネ・パーム等の植物種により炭素数と不飽和度が異なるが、日本国内において流通している食用油中の脂肪酸組成としては、炭素数16・18がほとんどである。また、Fig. 2には脂肪酸基が3つ結合したトリグリセリドを記載しているが、こちらも植物種によって脂肪酸基の個数が1~3まで異なる。

脂肪酸は構造中に一部酸素を含むが炭素と水素の鎖列であり、炭素数としても16もしくは18であることから、化学的性質としては軽油に近い性質となる。その為、油脂から脂肪酸を取り出すことで軽油代替燃料となるバイオディーゼル燃料(脂肪酸メチルエステル= Fatty acid methyl ester: FAME)を製造することが可能となる。具体的にはFig. 2に示すように原料として油脂、副原料としてメタノールを使用し、一般的にはアルカリを触媒としたエステル交換反応によって製造される。油脂からのFAME化プロセスは、比較的低コスト・低エネルギー投入にて高収率に燃料を得ることができるプロセス

であるが、軽油とは異なり構造中に酸素を含む為、厳密には物理的特性が多少異なる。バイオ燃料の利用が活発なEUでは7%の混合上限、東南アジアの一部地域では20%等の高濃度混合にて利用されているが、日本国内においては揮発油等の品質確保等に関する法律(品確法)により軽油への混合上限が5%までと低い割合にとどまって利用されているのが現状である。

SAFも同様に原料の一つとして油脂から製造されるが、FAMEとの概略の分子構造的相違点としては1点目として酸素が除去されている点である。酸素を除去することで塗料などを溶かす洗浄性やゴム・樹脂への浸透性が化石燃料相当にまで改善される。2点目に炭素鎖の鎖列の長さがジェット燃料相当にまで短くなっている点である。炭素鎖が短くなることでエネルギー密度は低下することとなるが、炭素鎖が長いほど融点・流動点・曇り点が向上することとなる為、軽油相当よりも短い鎖列とすることで低温流動性が改善される。3点目に分子構造の比率である。FAMEはFig. 2に示すように元々の脂肪酸の分子構造が直鎖である為、反応後の分子構造も直鎖構造のままとなる。直鎖状の炭化水素は融点及び流動点・曇り点が他の分子構造よりも最も高くなる為、低温流動性等SAFとして求められる燃料品質を満たす為には、燃料中を占める分子構造の比率を調整することが必要となる。

2.4 油脂からのSAF化反応概要

油脂からSAFへの変換は一般的には、従来の石油精製と同様の触媒を用いた接触水素化分解反応によって行われる。油脂からSAFへの変換は同時多発的に様々な反応が起こるが、代表的な反応としては炭素鎖の鎖列を短くする分解反応・分子構造の組み換えを行う異性化反応・水素を添加する水素化反応の3種類である(Fig. 3)。これらの反応は触媒担体として使用するアルミナやゼオライトといった固体酸の働きや、担持されている活性金属種による働きによって促進される。生成される油は脱炭酸反応もしくは水素化脱酸素反応によって構造中から酸素が取り除かれる為、その組成はすべて炭化水素となる。また、分解・異性化反応を経ることにより、石油と

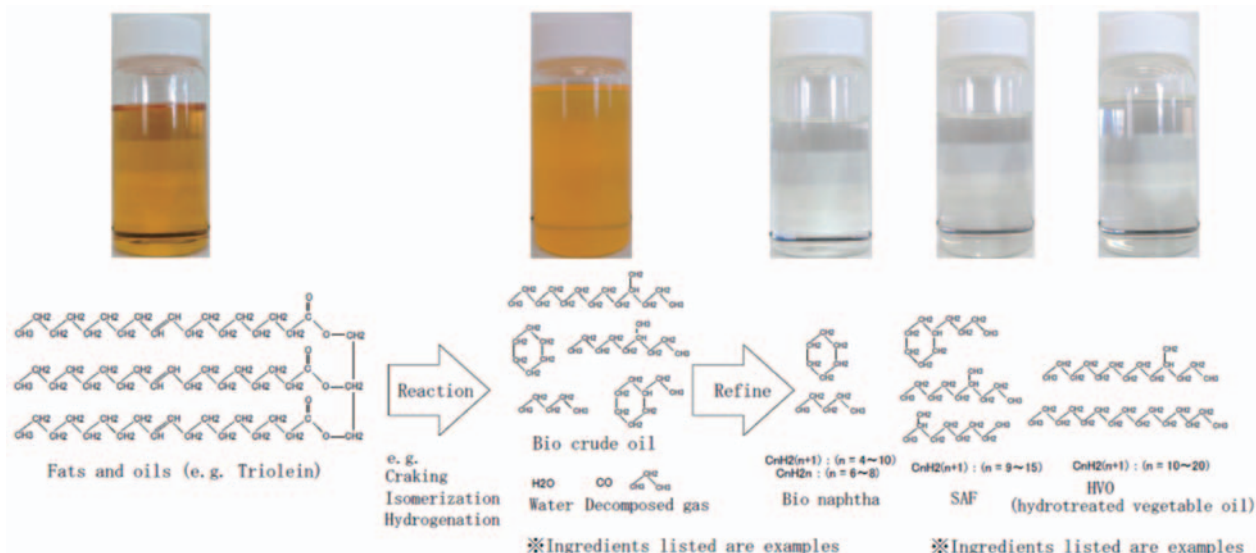


Fig. 3 Conversion flow from oil to hydrocarbon liquid fuel

同様に炭素数・分子構造の異なる多数の炭化水素の混合物となる為、廃食用油から反応して生成された油は原油と同じ状態になる。その為、それ以降は従来の石油精製と同じく蒸留によって沸点順に分離され、分解が進み短鎖の炭化水素で沸点が低い成分がナフサ（ガソリン前駆体）・中鎖の炭化水素成分がSAF・長鎖の炭化水素で沸点が高い成分がHVO（Hydrotreated vegetable oil）といったように精製される。

2.5 SAF普及拡大に向けた課題

持続可能な社会構築に向けて世界各地でSAFの研究開発が実施され、一部技術は既に実用化されているが、1点目の課題はコストである。油脂からSAFへの水素化接触分解反応は一般的には高温・高圧で反応させる為、大きなエネルギー投入・水素の大量使用・高価な高压用設備等がコスト増加の大きな要因となっている。その為、コスト低下には効率的な反応触媒の開発や安価なグリーン水素の確保等が必要となる。

2点目の課題は原料資源の賦存量である。当社が取り扱う廃食用油を例に挙げると、国内での発生量は年間あたり事業系・家庭系合わせて40～50万tといわれている。仮に全量がそのままSAFとなったと想定しても国内における航空運送事業での燃料消費量に対してはおよそ10%未満⁵⁾の割合となり、廃食用油のみを資源とするだけではジェット燃料の国内供給量全量の代替は不可能であり、原料の拡大や様々な持続可能な原料の有効利用が重要となる。また、現状の廃食用油の用途としてはおよそ、20万tが飼料用・5万tが石鹸や塗料などの工業用・1万tがバイオ燃料用・12万tが海外のバイオ燃料原料としての輸出・10万tが主に家庭系からの排出で焼却や埋め立て等の未利用となっており、国内におけるエネルギー自給率の増加や持続可能な社会形成に向けて、国内向けのバイオ燃料用途への廃食用油確保は重要となる。

3点目の課題は国内におけるSAFのサプライチェーン

の早期構築である。SAFの国内供給目標としては2030年時点のSAF使用量について、本邦エアラインにおける燃料使用量の10%をSAFに置き換ええるとの目標が定められており、2030年に向けて国内における原料の確保から製造・供給といったサプライチェーンの構築が急務となっている。国内にてSAFを供給できる体制が無ければ、将来的には海外から日本への発着が避けられる可能性もあり、国内における経済性の高いSAFの製造体制・技術の確立や、安定的な原料収集及び供給体制の構築、並びに品質や混合比率の管理体制等の構築に取り組んでいく必要があり、これらの取り組みを加速させる為にも国の施策・支援が重要なものとなる。

3. 当社の取り組み

3.1 バイオディーゼル燃料製造・販売事業

当社は創立以来、バイオマス・廃棄物の有効活用の一環として廃食用油を有価物として引き取り、自社工場にてバイオディーゼル燃料（当社商品名「C-FUEL」）の製造並びに国内外への販売を設立当初より継続的に実施している（Fig. 4, Fig. 5）。当社は日本初のバイオディーゼル燃料の品質規格である京都市暫定規格「京都スタンダード」の策定協力をはじめ、品質規格安全性実証の為に国内耐久レースや世界一過酷なパリ・ダカールラリーへの参加、2023年4月時点では契約顧客数25,000店となる廃食用油の引き取り体制の構築等、自社での原料調達・技術開発・製造・供給までの資源循環システムを構築し、廃食用油やバイオ燃料に関する知見やノウハウを培ってきた（Fig. 6）。世界的な脱化石燃料・持続可能な社会形成に向けたバイオ燃料の新たな需要に応えるべく、当社は次世代バイオ燃料の製造技術開発・低コスト化の技術開発と共にSAF普及促進に向けて様々なことに取り組んでいる。



Fig. 4 C-FUEL (biodiesel fuel)



Fig. 5 C-FUEL manufacturing plant



Fig. 6 Cross-country race in Asia (2006)

3.2 当社独自のSAF製造技術

当社は2017年より「平成29年度ベンチャー企業等による新エネルギー技術革新事業」(NEDO)を(公財)京都高度技術研究所と共同受託した。この事業ではHVOの製造技術開発及びHVOの導入と普及拡大に取り組むことを目標とし、廃食用油等の油脂を炭化水素系のバイオ燃料に変換する為の、新たな低圧水素化接触分解触媒を開発するとともに、新たな技術検討会を立ち上げ、HVOの本格的な利用に向けた検討・調査を実施し

た。本事業は製造コストに課題を残すこととなったが、事業終了後も研究開発を進め、SAFを製造可能な技術へと独自に進化させた。

当社のSAF製造技術は、海外では高温・高圧で反応させることが一般的である接触水素化分解反応を、独自の触媒開発により1 MPa未満の低圧で可能としている点が最大の特徴となる。低圧での反応により水素使用量の削減・設備コストの低下に加え、法規制の厳しい高圧設備に対して比較的規制等も少ない為、地産地消を可能とする製造技術となっている。

これまではラボスケール・ベンチスケールの試験装置にて最適条件の検討等の基礎研究を行い、Fig. 2に示すように当社独自の触媒による低圧接触水素化分解反応による油脂のバイオ原油化、バイオ原油からのバイオナフサ・SAF・HVOの精製に取り組んできた。2024年度からは、国内油脂類を原料とし、日本企業技術を用いて水素化精製される設備としては世界初となるパイロットスケールの実証設備を完工・稼働し、商用化に向けた設計データの蓄積やプロセスの微調整を実施する計画である。

3.3 原料の拡大

前述のように廃食用油の資源量には限りがあるのが現状であり、2050年に向けたCO₂排出量を実質ゼロとする国際的な目標に対して原料となる油脂資源が不足している状況である。その為、新たな油脂資源調達をテーマにジャトロファという植物の研究開発にも取り組んでいる(Fig. 7)。ジャトロファは中南米原産の落葉広葉樹であり、種子に毒性成分が含まれる為食用には適さず、含油率が高い為バイオ燃料の原料としてのポテンシャルが注目されている植物である。更に、害虫耐性・乾燥耐性があり、農業や植林に適さない乾燥地や荒地でも生育可能であり、未利用の荒廃地を緑化し、土壤浸食防止・CO₂の固定に貢献しながらバイオ燃料を生産することが期待されている。新たに森林を切り開くことや農耕地を利用することが無い為、間接的土地利用変化の観点からも高い評価が得られる。当社はベトナムにて優良品種開発及び栽培方法の研究に取り組んでおり、2028年には本格的なバイオ燃料用油脂の生産として15,000 haへの栽培面積拡大を計画している。

また、都市部にて豊富に存在している廃プラスチックや豊富に存在しているのにも関わらず、あまり利用が進んでいない木質系バイオマス等の有効利用を目的に、それらを原料としてSAFを含む持続可能な液体燃料及び固体燃料を製造する当社独自の急速熱分解技術の研究開発にも取り組んでいる。木質系バイオマスや廃プラのエネルギー賦存量は膨大である為、燃料化しやすい廃食用油以外の長期的に国内で安定調達が可能な原料の確保ができ、これらの有効利用による里山の保全や海洋汚染等の環境問題の解決へとつながるものと考え、研究開発に取り組んでいる。



Fig. 7 Jatropha fruit

3.4 ACT FOR SKY

2022年3月2日、国産SAFの普及・拡大を目指す有志団体「ACT FOR SKY」を当社及び日揮HD・ANA・JALの4社が幹事企業として設立した。航空業界におけるCO₂排出量削減に向けてSAFの技術開発・製造・流通及び利用を国内全体で加速させる必要がある為、企業や自治体とその垣根を越えて行動を起こし、SAFやカーボンニュートラル、資源循環の重要性を訴えながら市民・企業の意識改革を通じて行動変容につなげていくことを目指す⁽⁶⁾。事業として国産SAFに直接関与する事業者や利用者である航空会社、航空機燃料供給に係わる関係官庁等の連携強化を進めるとともにSAF製造設備の本格商業化に向けた行動を具体化させていく予定である。

3.5 合同会社SAFFAIRE SKY ENERGY

国内での廃食用油の収集からSAFの製造、輸送・供給に至るまでのサプライチェーン構築に向けて、2020年夏から当社と日揮HD、コスモ石油の3社共同で事業化検討を進め、2022年11月8日に「合同会社SAFFAIRE SKY ENERGY」を設立した。国内初となる国産SAFの大規模生産を目指し、国産の廃食用油100%を原料とした年間約3万kLのSAFの国内供給を予定している。SAF生産設備は、大阪府堺市のコスモ石油堺製油所内にて2024年内に完工、2024年度下期～2025年度初

での運転開始を予定する。原料調達を当社及び日揮HD、SAF製造及び需要家への販売をコスモエネルギーグループが担い、各社の知見・ノウハウを結集して安全・安定の燃料サプライチェーン構築を目指す。

4. おわりに

当社は、地球環境保全の重要性を深く認識し、事業活動全てにおいて環境負荷の低減に努め、持続可能な社会構築に貢献するとの環境経営方針に基づき事業に取り組んできた。これからも、これまで培ってきた廃食用油やバイオ燃料に関する知見や実績、新たな技術開発等により持続可能なエネルギーの開発製造そして普及を推進していく計画である。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁 エネルギー白書2023
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/pdf/2_2.pdf> (参照日2023年6月29日)。
- (2) Martin Hepperle, Electric Flight - Potential and Limitations, German Aerospace Center, Institute of Aerodynamics and Flow Technology
<<https://elib.dlr.de/78726/1/MP-AVT-209-09.pdf>> (参照日：2023年6月29日)。
- (3) 国土交通省 航空機運航分野におけるCO₂削減に関する検討会（第1回）
<https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk8_000004.html> (参照日：2023年6月29日)。
- (4) ICAO ENVIRONMENT CORSIA Eligible Fuels
<<https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-Eligible-Fuels.aspx>> (参照日：2023年6月29日)。
- (5) 航空統計輸送調査 航空輸送事業・航空機使用事業月別、油種別、燃料消費量
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00600360&tstat=000001018894&cycle=7&result_back=1&tclass1val=0> (参照日：2023年6月30日)。
- (6) ACT FOR SKY ホームページ
<<https://actforsky.jp/>> (参照日：2023年7月3日)。

特集：航空分野の脱炭素化へ向けたサステナブル航空燃料（SAF）普及の取り組み

エアラインのCO₂排出量削減へ向けた取り組み

Approach and Measures to Reduce and Offset CO₂ Emissions as an Airline.



星 次郎*¹
HOSHI Jiro



毛利 洋志*²
MOHRI Hiroshi

キーワード：NZE(ネット・ゼロ・エミッション), CO₂排出量削減, 空のエコ・プロジェクト, 代替航空燃料(SAF), 日本航空(JAL)

Key Words：NZE(Net Zero Emission), CO₂ Reduction, SAF(Sustainable Aviation Fuel), Japan Airlines(JAL)

1. 緒言

JALグループでは、これまでも航空機で使用する燃料を削減する取り組みを継続的に行ってきた。

近年では世界的に地球の気候変動に対する意識の高まりを受けて、長期的な目標が設定される中、JALグループとしても2021年に発表した中期経営計画の中に、2050年CO₂排出量実質ゼロを宣言し、この目標達成に向けたロードマップを作成した。

この経営計画の中で、より積極的にCO₂を削減する施策を進めると共に、実質（正味）ゼロの目標達成の為に展開する様々な取り組みを打ち出した。

航空業界の置かれている状況と求められる気候変動対策と共に、JALグループの具体的な取り組み内容について、その概要を紹介する。

2. 航空業界の気候変動対策

2.1 気候変動に関する国内外の目標

2015年に第21回国連気候変動枠組条約締約国会議(COP21)で採択されたパリ協定(2016年発効)を受けて、全世界的に脱炭素の流れが大きく動いている。新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の世界的な拡大以降、欧州におけるグリーンリカバリー計画の深化、米国のパリ協定への復帰や中国の2060年までのカーボン・ニュートラル宣言、更に国内では日本政府の2050年カーボン・ニュートラル宣言とNDC(Nationally Determined Contribution: 国が決定する貢献)の大幅な見直し等、国際社会は脱炭素に向け動きが加速している状況にある(Table 1参照)。

Table 1 Global Aspirational Target for International Aviation

	目標
パリ協定	・産業革命以降の平均温度上昇を2度未満に抑制(努力目標: 1.5度未満に抑制) ・今世紀後半に排出量と吸収量を均衡させる
日本(NDC)	・2030年に2013年度対比総排出量46%減 ・2050年までに脱炭素社会を目指す
ICAO (国際民間航空機関)	・燃料効率を平均2%改善 ・2020年以降総排出量を2019年レベルから増加させない ・2050年までにカーボン・ニュートラルを実現
IATA (国際航空運送協会)	・2019年以降総排出量を増加させない ・2050年までに総排出量ネット・ゼロ

2.2 航空業界の目標 - CORSIA制度

航空業界においては、脱炭素に対する社会的な要請を踏まえ、国際民間航空機関(ICAO)が2016年第39回総会において、CORSIA(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)の導入を決定した。この制度により、国際線を運航する航空会社が、2020年以降のCO₂排出量を増加させないとするグローバル削減目標を達成するべく、市場メカニズムを活用した排出削減制度(クレジット制度)等によりオフセットすることを義務付けるものとなった。

2027年から全世界に導入されることが決定しているが、2021年から2026年までの間は国または地域が自主的に参加することが認められている。

環境対策に積極的な国々は当初から参加を表明しており、日本もこの中に含まれている。

参加の判断は国または地域が行うが、CO₂排出量の増加分に対するクレジットの負担等は航空会社が対応することになる。

2022年に行われた総会では、「2050年までにカーボン・ニュートラルを実現する」という長期目標を追加することが採択され、CORSIAについても2024年から2035年までの期間、オフセット義務量に関わる算定基準を深

原稿受付 2023年7月10日

*1 日本航空(株) ESG推進部
〒140-8637 品川区東品川2-4-11
E-mail: hoshi.r5yk@jal.com

*2 日本航空(株) 運航基準技術部試験飛行室
〒144-0041 大田区羽田空港3-3-2
E-mail: mohri.p98w@jal.com

掘り（2019年排出量の85%が基準）する案が採択された。

3. JALグループの取り組み

3.1 中期経営計画⁽¹⁾

3.1.1 2050年CO₂排出量実質ゼロ JALグループは、社会の持続可能性にとって、気候変動への対応が特に重要な課題であると考えており、航空運送事業者の責務として、CO₂排出量の削減をはじめとする様々な取り組みを着実に推進するため、2020年6月の株主総会にて、2050年までにCO₂排出量実質ゼロとする「ネット・ゼロ・エミッション」の実現を目指すことを宣言した（Fig. 1参照）。

また2021年2月には金融安定理事会（FSB）「気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）」の提言に、そして2022年3月にはSBT（Science Based Target：科学と整合した目標）イニシアティブへ、それぞれ賛同を表明した。

2021年5月に発表した「2021-2025年度 JALグループ中期経営計画」にて、2050年のネット・ゼロ・エミッションの実現までのロードマップを発表すると同時に、

2030年までのCO₂排出量削減の目標を設定した（Fig. 2参照）。

JALグループでは、ESG戦略を経営戦略の軸に捉え、長期的な成長を実現し企業価値の向上につなげていくことを基本的な考え方としている。

3.1.2 目標達成に向けた取り組み 自社のCO₂排出量を削減し目標を達成させるための取り組みとして、「省燃費機材への更新」・「運航の工夫」・「SAF²の活用」を掲げた。

2023年に発表した同中期計画の『ローリングプラン2023』では、CORSIAベースライン見直しに伴う追加対応として「排出権取引の活用」を打ち出し、取り組みの柱として加えた。

3.2 省燃費機材への更新

JALグループでは、省燃費機材へ着実に更新していくことで、排出するCO₂を削減する取り組みを推進している。2019年から国内線にエアバスA350を就航させ、国際線機材であったボーイング787を国内線にも就航させた。

これらの機材は省燃費かつ低騒音であり、従来機と比

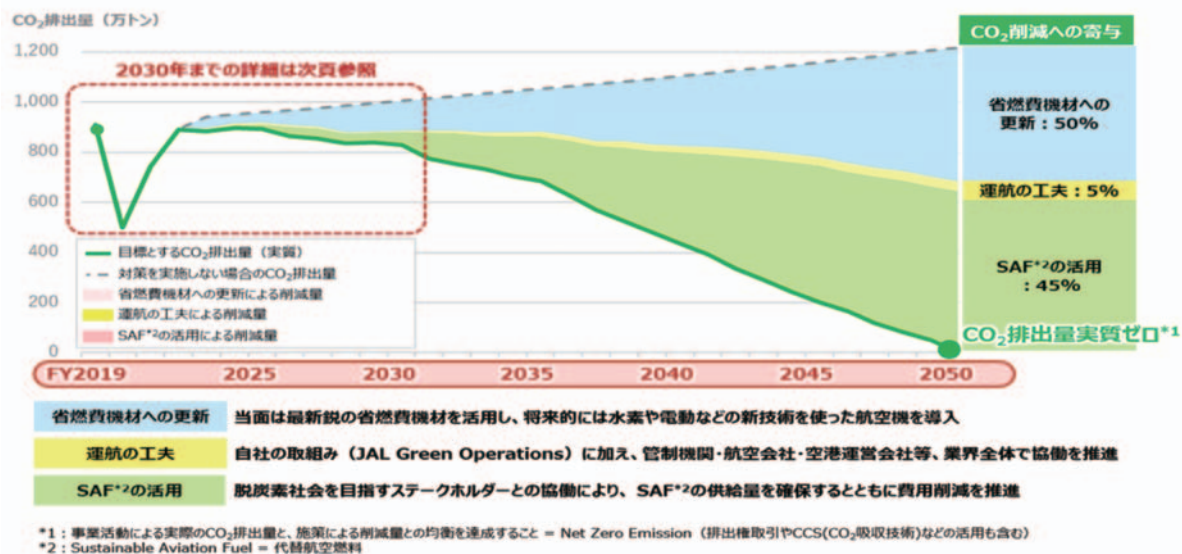


Fig. 1 JAL Group Medium-Term Management Plan FY2021-2025 ⁽¹⁾

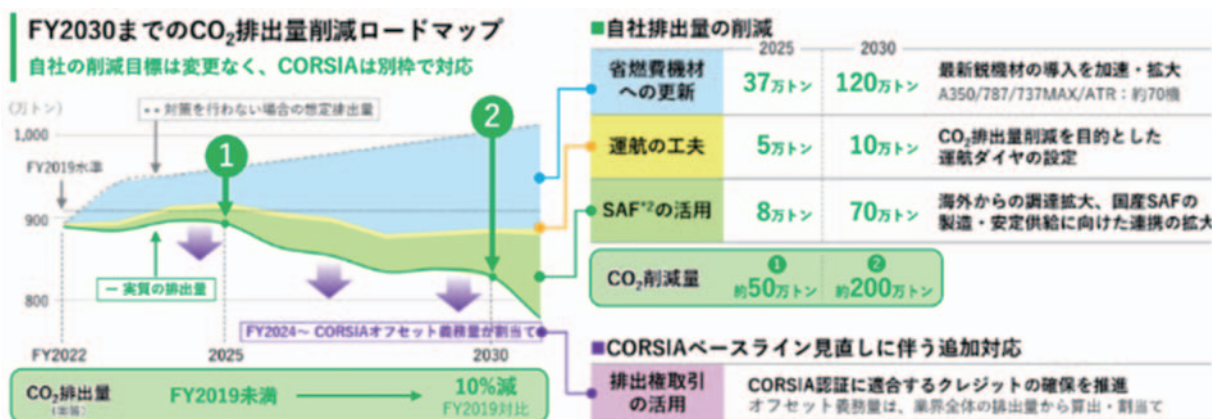


Fig. 2 Roadmap for Reducing Emissions up till FY2030 (JAL Group Medium-Term Management Plan Rolling Plan 2023) ⁽¹⁾

較して15～20%程度のCO₂削減効果が期待できる。

現時点で、省燃費機材の割合は85%を占めるまでになっており、引き続き計画的な更新を進める（Fig. 3参照）。

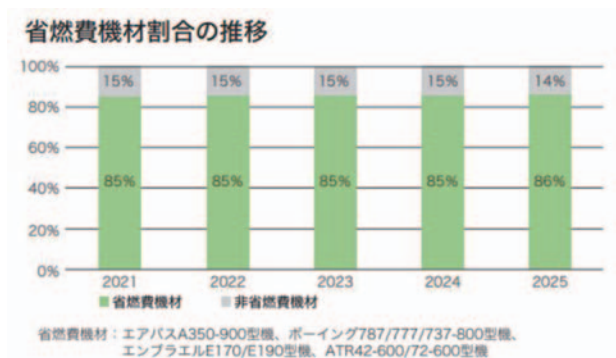


Fig. 3 Trends of Low-Emission Aircraft Ratio ⁽¹⁾

3.3 運航の工夫 — 空のエコ・プロジェクトについて

JALグループが取り組んでいる運航の工夫によるCO₂削減施策のうち、パイロットが操縦時に実施している「空のエコ・プロジェクト」について紹介する。空のエコ・プロジェクトは以下の8つの施策から構成されている。

(1) 早期加速上昇方式（NADP2）

離陸後の早い段階で加速を開始し、フラップ（Fig. 4参照）収納のタイミングを早める操縦方式。



Fig. 4 Flaps

CO₂の排出削減とは、言い換えれば燃料を効率的に使用することでもある。その一つの方法として、飛行時の空気抵抗を極力減少させることが挙げられる。

離着陸時のような低速ではフラップと呼ばれる高揚力装置が用いられるが、翼の前縁および後縁に展開されるフラップは同時に空気抵抗も増加させてしまう。そこで、離陸後の早い段階で加速を開始し、フラップ収納のタイミングを早めることで空気抵抗をより早期に減少させる操縦方法が早期加速上昇方式である。

これはICAOが定めたNoise Abatement Departure Procedure 2（NADP2）の方式にほぼ相当する。

名称の通り、Noise Abatement Departure Procedure

は本来騒音軽減出発方式のことを指すが、空港近隣の騒音軽減を目的とした第1方式と、空港からはやや離れた場所での騒音を軽減することを目的とした第2方式のうち、後者に近いプロファイルで操縦を実施する形をJALでは早期加速上昇方式としている（Fig. 5参照）。

従来はNADP1方式に基づいて離陸することがほとんどであった。これは離陸後、対地450m以上で離陸推力を上昇推力に減じ、更に900m以上で上昇エネルギーを加速エネルギーに換えること（上昇角を減じる）で加速し、フラップを収納していく方式を指す。

NADP2方式では、対地240m以上より上昇推力への変更及び加速を開始し、順次フラップを収納していく手順をとる。この操縦方法を実施することで、筆者が乗務しているボーイング767では1回につき約185kgのCO₂が削減できる計算となる。

一方で、より低い高度における推力の変更や加速、旋回のための大きな操作、管制通信実施等のタスクが重なることから、操縦を担当するパイロットはリスクマネジメントの観点から慎重に計画し、チーム内であらかじめ手順を共有しておく必要がある。

空港から半径9 km、高度900mの空域に設定される管制圏には従来200kt（約360km/h）の速度制限が設けられていたが、2021年12月30日に航空法施行規則が改定され速度制限が緩和されたために、早期加速上昇方式がより実践しやすくなった。このような官民共同の取り組みもCO₂削減の為に必要であり、また非常に効果的である。

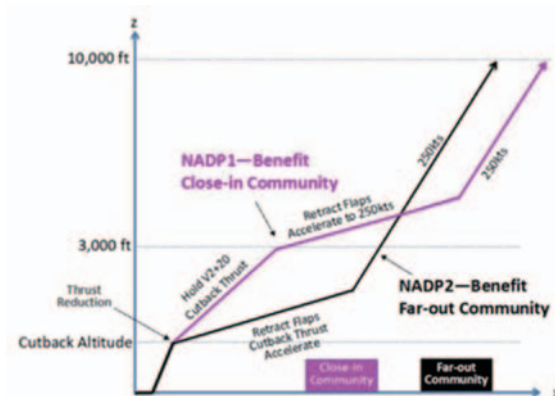


Fig. 5 Flight Path of NADP1 and NADP2

(2) Full Climb Thrust施策

飛行効率の良い巡航高度に早く到達するために、安全な範囲で最大推力を用いて上昇する施策。

飛行機にはあらかじめ段階的な上昇推力がFlight Management Computerにプログラミングされている。

以前はエンジン内部が過剰に高温化することを抑え、整備負担を軽減する目的でやや低めの推力が用いられることが多かったが、CO₂を削減するという観点からは飛行効率の良い高度へより早く到達し、巡航に移ることが望ましいということが判明した。エンジンの維持管理に

関する検討や安全性を含めた性能計算に基づき、現在は当施策がJALの保有する多くの機種で導入されている。

(3) Time and Efficiency Guideline (TEG) 施策

目的地への到着時刻がスケジュールよりも大幅に早まりそうな時には飛行速度を減少させ高効率で飛行し、遅れそうな時には一定の条件を適用した上で、飛行速度を増加させて遅延を最小限にする施策。

わずかな時間を回復するために、過剰な燃料消費やCO₂排出増加を伴わないよう、運航中は総合的な判断をしつつ時間と効率を管理していく必要がある。このようなフライト・マネージメントをサポートすることを目的に独自のガイドラインを設定し、活用している。

(4) Reduced Flap Approach方式

着陸時に用いられるフラップを、より角度の浅い設定を用いて空気抵抗を減少させる方式。騒音軽減にも効果がある。

一方で、若干速い速度での着陸となることから、滑走路長や滑走路面の状態を慎重に検討する必要がある。ボーイング767ではFlap 25°あるいは30°が着陸時に用いられるが、25°を用いることで1回あたり約135kgのCO₂削減ができる。

(5) Delayed Flap Approach方式

進入時にフラップを下げる操作を遅らせることで、空気抵抗を減少させる操縦方式。騒音軽減にも効果がある。

但し、安定した進入を実施する上で着陸までの時間的余裕が短縮されるので、進入空域の大気状態等に対する洞察がより求められる。

過去に多く行われていた高度900mで着陸フラップを下ろした場合と、当施策が推奨する450mで下ろした場合を比較すると、ボーイング767では約220kgのCO₂が削減できる。

(6) Delayed Gear Approach方式

進入時にLanding Gear（タイヤを含む着陸装置）を下げるタイミングを遅らせることで、空気抵抗を減少させる方式。騒音軽減にも効果がある。

前項の方式と同様に、安定した進入を実施する上で注意が必要となる。東京国際空港（羽田）における一般的な精密進入開始高度である1200mでLanding Gearを下ろした場合と、当施策で推奨される750mの場合を比較すると、ボーイング767では約115kgのCO₂削減ができる。

(7) Idle Reverse施策

CO₂および使用燃料削減や騒音軽減を目的として、着陸後にリバース（逆噴射）をフルに用いるのではなく、アイドル・リバースという状態に留める施策。

飛行機はエンジンがアイドル状態でも前進する力が働くので、着陸後はエンジンをリバース状態にして後方へのジェット噴射を抑制している。

着陸性能の観点から、滑走路長や路面状態、風の状況に対し注意し、実施可否を判断する必要がある。ボーイ

ング767では1回あたり約90kgのCO₂が削減できる。

(8) Engine Out Taxi (EOT) 施策

着陸後の駐機場までの地上滑走で、エンジンのクールダウンに必要な3分間以上の時間を要する場合に、片側エンジンを停止して地上走行する施策。

安全性の観点から走行する路面に雪氷等が無いなど、一定の条件を満たす必要がある。

3.4 SAF (Sustainable Aviation Fuel) の活用

3.4.1 SAFの開発状況 航空領域のネット・ゼロ・エミッション実現のためにはSAFの活用が不可欠である。現在、欧米諸国を中心にSAFの開発や実用化が進められているが、まだ初期段階であり本格的な普及は2030年以降と予想されている。

航空機の燃料としてSAFを活用することで、SAFの製造から使用までのライフサイクルで、CO₂の排出量を抑制することができ、従来燃料と比較すると約80%の削減効果があるものと期待されている。

CORSIAにおけるCO₂削減効果を計上するためには、原料および製造技術に関わる国際規格（ASTM）の認証を取得することが必要なことに加えて、SAFの持続可能性に関わる認証（CEF：CORSIA Eligible Fuel：CORSIA適格燃料）も求められる。これらの認証を受ければ、特別な適用措置を講ずることなくそのまま航空機へ搭載することができる「ドロップ・イン燃料」として取り扱いでき、既存のインフラを活用することも特筆すべき点である。

現在、世界のSAF生産量は、航空燃料総需要量の0.1%程度に留まっている。開発が進められているのは、廃油や動物油脂、都市ごみや廃材等を原料とするものであり、今後の量産化と普及が急務であると考えている。

一方、将来世代の合成燃料を開発する機運も高まっている。これは再生可能エネルギー由来の電力を用いて水を電気分解してグリーン水素を作り、大気中のCO₂からSAFを製造するPtL（Power To Liquid）と呼ばれるもので、原料の制約のない画期的な燃料であり、2030年代の早期の商用化を目指している。

3.4.2 JALのSAF運航実績 Table 2に示す通り、JALが初めてSAFを搭載したフライトを行った2009年以降これまでの間に、航空機へSAFを搭載し運航する実績を重ねている。

2030年までにすべてのフライトをサステナブルなものとする、というコンセプトのもと、2022年に「JAL2030サステナブル・チャーター・フライト」を運航した。

航空機から排出するCO₂に対する取り組みだけでなく、機内サービスやアクセシビリティの向上など、お客様や企業・地域の皆さまと共にご協力いただき総合的に理想とするサステナブルなフライトを実現した（Fig. 6参照）。

Fig. 6 Overview of JAL2030 Sustainable Charter Flight ⁽²⁾

Table 2 JAL's Operation with SAF

年月	フライト内容	燃料規格
2009.1	カメリナを原料としたSAFを用いたデモンストレーション・フライト（羽田-羽田）を実施	Annex2 HEFA
2017.11	国際線定期便（シカゴ-成田）へSAFを搭載	Annex5 ATJSPK
2019.1	サンフランシスコから羽田へのJAL便に搭載	Annex2 HEFA
2019以降	A350新造機の、エアバス工場（仏）から羽田へのデリバリー・フライトにSAFを搭載	Annex3 SIP Annex5 ATJSPK
2021以降	ATR-42-600新造機のデリバリー・フライトにSAFを搭載	Annex5 ATJSPK
2021.2	古着を原料とした国産SAFを搭載したフライト（羽田-福岡）を実施	Annex5 ATJSPK
2021.6	国産SAF2種類を同時に搭載したフライト（羽田-札幌）を実施	Annex1 FT-SPK Annex7 HCHEFA
2022.11	SAF搭載のサステナブル・チャーター・フライト（羽田-沖縄）実施（Fig. 6参照）	Annex2 HEFA

3.4.3 SAF実用化に向けた取り組み

- (1) 北米発便を中心にSAF利用を促進するため、2018年にSAFの大量生産の実現性の高い米国Fulcrum社への出資を決定した。
製造事業社の株式を取得することで同社の行う一般廃棄物を原料としたSAF製造事業を通じてSAF実用化の推進について本格的に取り組んでいる。
- (2) JALが加入しているワンワールド・アライアンスは、「2050年までにCO₂排出量を実質ゼロにする」という共通目標を掲げており連携して共同調達の取り組みを進めている。
アライアンス・メンバー数社で共同調達する契約を締結した事業社は現在2社（Ametis社、およびGevio

社）であり、JALとしてもSAFの一部を米国で搭載する見込みである。

- (3) SAFの供給量が不足している現状では、様々な原料から製造されるSAFの必要性を示すことで、SAFの普及・市場拡大に貢献して空のカーボン・ニュートラルを促進している。
2023年には、都市ごみなどの廃棄物からSAFの製造を目指す米国Raven社とSAF調達に関する覚書を締結した。
- (4) SAFの国内調達に向けた取り組みとして、2020年より丸紅株式会社やエネオス株式会社と共に、廃プラスチックを含む産業廃棄物・一般廃棄物等を原料としSAFを製造するサプライチェーンの実現性につき事業性評価を実施している。
- (5) SAFの国内供給は、業界を挙げての課題であることから、JALとANAが連携し、共同レポート『2050年航空輸送におけるCO₂排出実質ゼロへ向けて』を策定した。これは2050年のネット・ゼロ・エミッション実現に向けて普及が期待されるSAFの活用促進に関する市場調査を行い、考察をまとめたもので、SAFの認知度拡大および理解促進を目的としており、両社で関係者と連携しながら横断的に取り組むことを表明した。
- (6) 2022年には、日揮ホールディングス株式会社、株式会社レボインターナショナル、全日本空輸株式会社と共に、国産SAFの商用化および普及拡大に取り組む有志団体である「Act For Sky」の設立に参加した。これは国内のSAF製造サプライチェーン構築の為、同じ意思を持つ企業が参画し、資源循環の重要性を訴えながら市民・企業の意識変革を通じて行動変容につなげていくことを目指している。
こうした産業界を横断して連携する取り組みにも積

極的に参加し推進していく。

- (7) 日本全体でSAFの開発・利用促進のため、国土交通省や経済産業省等との連携が重要と考えており、これら省庁主催の官民協議会に積極的に参画し協議を進めている。

日本政府の掲げるGX戦略⁽³⁾では、国内でのエネルギーの安定供給と脱炭素分野での新たな需要・市場を創出することが重要で、これにより日本の経済成長につながることを課題とされている。

観光立国施策をはじめ日本の経済発展の下支えをしているとも言えるインフラとしての国際航空ネットワークを維持するためにも、国を挙げての施策を展開することが極めて重要と考えている。

国策としての航空脱炭素化に向けた戦略的なグランドデザインを設定することが必要と考えており、国内に充分な分量の国産SAFを配備し、国際競争力を持った価格で安定的に供給できる仕組みを作るべく、当該協議会場で議論を進めている。

今後も引き続き官民一体となった取り組みを進めるための協議を継続していく。

4. 排出権取引への対応

JALグループでは、CO₂の排出を抑制する施策と、CO₂削減効果を持つSAFを利用することで実質排出量を削減する取り組みを継続していくことに加え、様々なCO₂クレジットの購入により、CO₂排出量をオフセットしていく方針を打ち出した。これは航空以外の業態で抑制されたCO₂排出量を購入するもので、地球全体で効率的にCO₂削減を目指すものである。

自社の直接排出量の削減に寄与する取り組みと共に、当社便をご利用いただくお客様に対しても、運航便のCO₂排出をオフセットする選択肢として、「JALカーボンオフセット」の仕組みも提供している。

5. 結言

近年は日本国内でも政府のカーボン・ニュートラル2050宣言以降、グリーン成長戦略の打ち出し等、CO₂削減に向けた動きが加速しているが、JALグループとしても地球規模の気候変動対応に於いて、しっかりと役割を果たす意識を強く持ち続けていく。

日本の高い技術力等で脱炭素に貢献し、2050年のネット・ゼロ・エミッションの達成という大きな目標に向け、航空セクターが一丸となることに加え、他業界との連携や官民での協議と連帯により取り組みを進めていく。

JALグループは、自らの事業が環境に与える影響と環境保全の取り組みの成果を確認しつつ、気候変動対応の継続的な改善に努めながら、持続可能な航空輸送と豊かな地球を次世代へ継承するため、様々なステークホルダーと力を合わせ、あらゆる関係者と連携を深めてCO₂削減をはじめとする環境対策を推進していくことが必要だと考えている。

参考文献

- (1) 日本航空 2021-2025年度JALグループ中期経営計画ローリングプラン2023
<<https://www.jal.com/ja/philosophy-vision/strategy/>>
(参照日：2023年6月30日)
- (2) 日本航空プレスリリース第22051号（2022年09月22日）
<<https://press.jal.co.jp/ja/release/202209/006915.html>>
(参照日：2023年6月30日)
- (3) 経済産業省 GX実現に向けた基本方針 ～今後10年を見据えたロードマップ～
<https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002_1.pdf>（参照日：2023年6月30日）

特集：航空分野の脱炭素化へ向けたサステナブル航空燃料（SAF）普及の取り組み

SAF（Sustainable Aviation Fuel）の概要 Overview of Sustainable Aviation Fuel



橋本 康^{*1}
HASHIMOTO Yasushi

キーワード：SAF, ガスタービン, ジェットエンジン, ジェット燃料

Key Words：SAF, Gas Turbine, Jet Engine, Jet Fuel

1. 緒言

地球温暖化防止対策が様々な産業セクターで進むなか、航空セクターにおいてはSAF（持続可能な航空機燃料：Sustainable Aviation Fuel）の普及が不可欠であるとされている。SAFはバイオマスのような製造段階においてCO₂を吸収する原料をベースとし、航空機運航時には通常通りのCO₂を排出。最終的にライフサイクルにおける二酸化炭素排出量を算定し、総量としてのCO₂排出量削減を実現するものである。

ICAO（国際民間航空機関：International Civil Aviation Organization）は航空輸送業界の二酸化炭素排出量増加抑制を目指すCORSIA（国際民間航空のためのカーボン・オフセットおよび削減スキーム：Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation）の施行を開始しており、エアライン各社によるSAFに対しての期待感はこれまでにない高い。

本稿では、国際認証を取得した燃料を中心に、SAFについての概要を解説する。

2. ジェット燃料及びSAFについて

2.1 ジェット燃料の概要

航空機用ジェット燃料は、ジェットエンジンのエネルギー源となる液体燃料である。ジェット燃料は、氷点下40度を下回る低温から数百度を超える高温という過酷な使用環境においても所定の性能を発揮し、大勢の旅客・乗務員を載せた航空機の安全なエネルギー源として、日々流通・運用されている。

一般的なジェット燃料は、石油を分留して得られた、主に炭素原子数8～15程度の炭化水素から構成されている混合物であり、世の中に一般的に流通している石油由来のジェット燃料はパラフィン系を主体として、2割程度の芳香族（アルキルベンゼンなど）が含まれてい

る。一般的な石油由来ジェット燃料（Jet A）の化学組成の例¹⁾をTable 1に示す。このような化学組成に加えて、ジェット燃料の化学特性は国際規格ASTM D1655 Standard Specification for Aviation Turbine Fuels（ASTM D1655）によって定められており、航空機エンジン内での熱エネルギーのみならず、種々環境における流動性などを規定し、機体や空港インフラの燃料システムでの円滑な運用を担保している。

Table 1 Hydrocarbon Composition of Average Jet Fuel

Average (Jet A POSF10325)	
Composition,wt%:	
n-alkanes	20
iso-alkanes	30
monocyclic alkanes	25
bicyclic alkanes	7
aromatics	19

2.2 SAFの定義と仕組み

SAFは、広義には非石油原料から製造され、なおかつそのライフサイクルにおけるCO₂排出量が石油由来のジェット燃料と比して少ないジェット燃料のことを指す。実はSAFという用語について、厳密な要件や規格は存在しない。一般的に認められるSAF要件としては、工業規格であるASTM D7566 認証と、サステナビリティ認証であるCORSIA Eligible Fuel (CEF) 認証を満たすものであるが、CEF認証の仕組みや運用は未だ策定途上にあり、ASTM D7566認証済燃料であってもCEF認証未取得で、現在その認証検討が続いている燃料も多く存在することから、本稿ではCEF認証取得の可能性を勘案して、CEF認証取得有無を注記したうえで、ASTM D7566認証取得済燃料をSAFとして紹介する。

原稿受付 2023年6月23日

*1 (一財)日本航空機エンジン協会 技術開発部
E-mail: hashimoto2414@ihi-g.com

2.3 SAFの国際認証

SAFの工業規格は、ASTM D7566 Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons (ASTM D7566) に規定されている。この規格では、非石油由来原料からなる合成ジェット燃料 (Synthetic Aviation Turbine Fuel) を規定している。厳密にはASTM D7566規定燃料のうちの一部分が、バイオマス由来のような二酸化炭素排出抑制・削減に貢献できる燃料であり、それがSAFということになる。そのため、ASTM D7566規定燃料には石炭由来の合成ジェット燃料も含まれており、当然ながらサステナビリティ要件を満たさず、SAFとして成り立たない燃料も含まれている点には注意が必要である。これは、ASTM D7566規格の成り立ちが中東の政情不安や将来の石油枯渇への懸念に誘発された、エネルギー保障策の一環であったことに起因する。

また、ASTM D7566規格は既存の航空機材・補給装置などインフラでの安全な動作性を担保すべく、従来の石油由来ジェット燃料とブレンド (ASTM D7566規定燃料の種類によるが、最大で50vol%までブレンド可能) して使用することを義務づけている⁽²⁾。品質フローの観点から解説すると、主要各国の航空局は航空機 (ジェット機) の飛行に使用可能な燃料として、石油由来ジェット燃料規格ASTM D1655を指定している。ASTM D7566は、この石油由来ジェット燃料 (ASTM D1655) に添加可能な合成燃料成分 (Synthetic Blending Component) を規定しており、ASTM D7566認証燃料のブレンドされた石油由来ジェット燃料が、ASTM D1655に適合した燃料としての取り扱いを可能とする。

このASTM D7566とASTM D1655燃料の関係性や品質フローをFig. 1に示す。

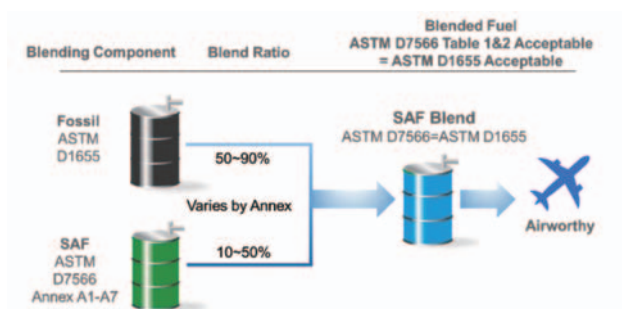


Fig. 1 Blending Flow of SAF and Fossil-based Jet Fuel

一方で、SAFのサステナビリティ要件においては、各種燃料が、その製品ライフサイクルにおいて排出するCO₂量を算定し、その数値が認定される必要がある。この燃料ごとの平均排出量を認証リスト化したものがCEF (CORSIA適格燃料: CORSIA Eligible Fuel) である。厳密には、CEFは国際間の民間商業輸送の排出量のみが対象であり、域内輸送には適用されていない。しかし、業界内においては、各種SAFの排出量計算根拠

として認知されており、CEFの取得がSAFのサステナビリティ要件と捉えて差し支えない。CORSIA制度においては、エアラインなど参画企業が、このCEF認定SAFの使用量を申告し、各社の排出削減量がカウントされる⁽³⁾。

CEFはICAOの認定制度であり、対象となる燃料の製造過程 (サプライチェーン) における直接的な排出であるCore LCA (コアライフサイクル排出量: Core Life Cycle Assessment) と、土地利用に伴う間接的な排出であるILUC LCA (土地利用変化による排出量: Induced Land Use Change Life Cycle Assessment) を合算し、ライフサイクル排出量として計算される。

Core LCAでは、例えばバイオマス由来燃料であれば、栽培から収穫・中間加工・輸送・ジェット燃料化というプロセスにおいて発生しないしは吸収される温室効果ガスを実測値・計算値を織り交ぜて算定する。

ILUC LCAでは、燃料の製造開始に伴って、元にあった土地の排出量の増減、いわば間接的な排出量増減を計算する。例えば、南米や東南アジアで熱帯雨林を農地化してサトウキビやパーム油などのフィードストック生産を行うとすると、元の熱帯雨林が吸収していた温室効果ガス量と、整地や建設といった農地化において発生する排出量の差引した値がILUC LCAということになる。

これらLCA値の算出には、燃料製造者がデータを算出したうえで提示を行い、SCS (持続可能性認証スキーム: Sustainability Certification Scheme) というICAOが指定するサステナビリティ認証の取得が必要となる。現在、ISCC (International Sustainability & Carbon Certification) 及びRSB (Roundtable on Sustainable Biomaterials) といった環境認証団体の認証システムがSCSとしてICAOより指定されている。燃料製造者は、これらの認証制度に沿って、数値算定の根拠を、実地調査などを通じて示すことが求められる。なお、このようなサステナビリティ認証の取得には、単に製造工程上の排出量のみならず、労働者の作業環境のようなエシカル面への留意も必要となる。

このことからわかるように、CEF認証は単なる排出量計算に留まらない認証制度であり、ASTM認証に比べても認証取得の難易度は高いと言える。CEF認証燃料も、ASTM同様にフィードストックと燃料製造の組み合わせで分類されているが、LCA値は産地や製法によって、同じフィードストックでも産地別に様々な計算値が示されている。そのため、CEF認証燃料のリストはより多岐に細分化されている。また、一部の燃料ではベースライン値 (石油由来ジェット燃料の排出量) を上回るLCA値が算定されており、エアラインにとっては使用しても排出量削減に貢献しない燃料もリスト化されているので注意が必要である。例えば、閉鎖池で製造されたマレーシア産パーム油由来HEFA SPKは、石油由来ジェット燃料よりもLCA値が大きい。また、ASTM

規格では7種類のSAF製造方法が認定されているが、現時点でCEF認証を取得している製法は4種類に留まっている。

2.4 SAFの製造方法

バイオディーゼル燃料が陥った普及に向けた課題に学び、新たなインフラや機材整備を回避すべく、SAFはドロップイン型燃料であることを基本とした。ドロップイン型燃料とは、現行の石油由来ジェット燃料と類似の化学組成を持ち、既存のジェットエンジンにそのまま投入（ドロップイン）し、使用可能であることを意味する。前項で述べた通り、現行のSAFは50vol%を上限として石油由来ジェット燃料とブレンドしたうえでの使用が義務づけられているが、その上でもドロップイン可能であることを担保するためにはSAF段階で石油由来ジェット燃料になるべく近い化学組成を有するよう設計されていることは言うまでもない。

そのため、SAFの化学組成は前述した一般的なジェット燃料の化学組成である、パラフィン系炭化水素を主成分とする。石油由来ジェット燃料が、原油を分留・精製して製造されるのに対して、SAFは植物油やバイオマスといった有機物を、主に触媒を用いて種々化学反応によって炭化水素へ改質する製造方法を取る。原油は炭化水素が雑多に存在する混合物であって、それをふるいにかけて、石油由来ジェット燃料が得られるイメージに対して、SAF製造では脂肪酸など炭素・水素以外に酸素や窒素など余分な原子が含まれており、これらを切り落とし、且つ炭化水素成分を所定の長さに整えるべく分子同士を貼り合わせるプロセスとなる。ここで想像できるように、石油由来ジェット燃料に比べてSAF製造プロセスは工程が複雑となりがちで、SAF製造コスト高騰要因のひとつとなっている。

2.5 SAFの課題

SAFは石油由来ジェット燃料に近い化学特性を実現させているが、その一方で石油由来ジェット燃料とは微妙な違いがあり、それがSAF単体での商業運用、ひいてはSAF普及を妨げる原因となっている。但し、これらの技術課題を解消すべく、SAF技術も日々新しい製造手法の開発が続いている。

最も大きな課題としては、現在最も普及している廃食用油由来のSAF（HEFA）等において、石油由来ジェット燃料には20%程の割合で含まれている芳香族成分が存在せず、パラフィン系炭化水素が成分のほぼ全てを占めることにある⁽⁴⁾。芳香族は不完全燃焼の要因となるため、燃焼効率の観点においてはパラフィン系炭化水素の増加は好ましいことではあるが、その一方で芳香族を含有しないジェット燃料は、ある種類のニトリルゴム材を収縮させる作用があることが実験的・経験的に判明している。ニトリルゴムは航空機の燃料システムにおいてシール材として活用されているため、芳香族が欠如したSAFを適用した際に、この収縮作用によって燃料漏れが起

きる懸念がある。前述した、SAF（ASTM D7566認証燃料）は使用の際に、石油由来ジェット燃料とブレンド（SAFが最大50vol%までブレンド可能）を必須とするのは、この芳香族成分の欠如を補うためである。なお、一部のASTM D7566認証燃料及び新規開発中のSAF製法によっては、芳香族成分を一定量含み、このようなシール材収縮の懸念が無い燃料も存在しており、石油由来ジェット燃料のブレンドを必要としない、いわゆる100%SAF使用に期待がかかっている⁽⁴⁾。

3. SAFの種類

ここで、SAFの種類を紹介する試みとして、ASTM D7566認証燃料を解説する。前述の通り、SAFとして認められるためには工業規格としてのASTM D7566認証に加えて、サステナビリティ認証であるCEF認証を取得することが必要とされるが、CEF認証は未だ完成途上にある認証制度であり、本稿においては将来のCEF認証の見通しも踏まえてASTM D7566認証燃料を以下に解説する。

2023年6月現在で、ASTM D7566では7種類の燃料が認証されている。これら認証燃料は、フィードストックと、その燃料の製造（原料を化学的に改質してジェット燃料化する）方法によって分類されていて、その概要や特徴を以下に述べていく。

3.1 ASTM D7566 Annex1 FISCHER-TROPSCH HYDRO PROCESSED SYNTHESIZED PARAFFINIC KEROSENE

通称 FT-SPK。主な原料は石炭、木質バイオマスや都市ゴミなど有機物全般。これらをガス化及びFischer-Tropsch合成（FT法）後、水素化処理を行ってジェット燃料化する。

FT法自体は、石炭など石油代替品を得る方法として、石油資源に乏しい1920年代ドイツで開発された。ガス化及びFT過程で大きなエネルギーを有する上に燃料収率が低いため、経済的な燃料製造手段とはいえず、戦後は一部地域を除いて実用利用されずにいたものが再脚光を浴びた。現在は触媒開発が進み、丸紅やJALが出資するFulcrum Bioenergiesをはじめ、量産設備も登場し始めている。

ASTM D7566上では、フィードストックはガス化後の合成ガス（CO+H₂）であり、これに対して「鉄またはコバルトの触媒」を用いたFT合成を施した燃料とされている。このため、本手法の新たな用途として、大気もしくは排気CO₂を、逆シフト反応や共電解を用いて合成ガス化したものと組み合わせて、合成燃料（Power-to-LiquidやeFuelとも呼ばれる）を得る方法が近年、CO₂削減手法の新たなトレンドとして注目を浴びている⁽⁵⁾。

燃料組成はイソパラフィンを中心としたパラフィン系燃料（Synthetic Paraffinic Kerosene）である。芳香族を含まないため、混合率上限は50vol%となっている。

CEFについては、農業・林業残渣、都市ゴミ、被覆作物など一部のバイオマス由来のものについて認証されている。

3.2 ASTM D7566 Annex2 SYNTHESIZED PARAFFINIC KEROSENE FROM HYDROPROCESSED ESTERS AND FATTY ACIDS

通称 HEFA SPK。主な原料は廃食油、動植物油脂といった生物系油脂。規格上は脂肪酸及び脂肪酸エステル (Fatty Acid and Fatty Acid Esters) を水素化した燃料と定義される。これらを脱酸素・異性化・クラッキング等のプロセスを経て燃料化する。これら水素化工程は、現在の石油精製所でも日常的に活用されている技術であるため、既存の石油精製技術を転用でき、現時点で最も多く商業化されている技術である。2016年に世界で初めてSAFの商業量産を始めたWorld Energy社 (当時はAltAir社) は、この技術を使う。Honeywell UOP, Topsoe, Axens, Nesteといった主要な石油精製技術事業者が技術を競っている。World Energy社に続き、フィンランドのNeste社も量産設備を運転開始し、以来数々のSAFデモフライト・商業フライトに活用されてきた。World Energy社の設備はロスアンゼルス空港からパイプラインで繋がれており、日常的に同空港にSAFが供給されている。

製造コスト面で他SAF技術に比して低コストで済む一方で、主原料である廃食油の入手性が悪く、将来的にSAF流通の主流とはなり得ないという見方が大勢である⁽⁶⁾。その一方で、現時点で安定的に商業量産が続けられているSAFであることから、同燃料の引き合いは強く、結果として原料である廃食油取引市場価格の高騰を呼んでいる。

燃料組成はイソパラフィンを中心としたパラフィン系燃料 (Synthetic Paraffinic Kerosene) である。芳香族を含まないため、混合率上限は50vol%となっている。

CEFについては、牛脂・廃食油・トウモロコシなど植物油 (一部に地域制限あり) 由来のものについて認証されている。

3.3 ASTM D7566 Annex3 SYNTHESIZED ISO-PARAFFINS FROM HYDROPROCESSED FERMENTED SUGARS

通称 SIP。新興バイオテクノロジー企業であったAmyris社が中心となって開発した手法。主なベース原料はサトウキビのようなバイオマス糖である。これらを微生物発酵技術により炭化水素であるファルネセン (Farnesene, C₁₅H₂₄) に転換、水素化処理によって二重結合を取り除いたファルネサン (Farnesane, C₁₅H₃₂) に変換する。炭素数15の炭化水素のみから構成される燃料ということであり、他ASTM D7566認証燃料と比してかなりユニークな燃料と言える。通常の石油系ジェット燃料の構成と比較して、分子量が多い傾向＝動粘度が高まる傾向にあることは必然であり、航空機の補助動力

装置 (Auxiliary Power Unit, APU) の冷間始動特性に悪影響があるため、規格上の燃料混合率上限は10vol%に留められている。

2014年に認証が完了したが、現在までにAmyris社は燃料事業から撤退しており、実質的に普及停止状態の燃料となっている。

CEF認証は種々地域のサトウキビやテンサイ由来のものが登録されている。

3.4 ASTM D7566 Annex4 SYNTHESIZED KEROSENE WITH AROMATICS DERIVED BY ALKYLATION OF LIGHT AROMATICS FROM NON-PETROLEUM SOURCES

通称 SPK/A。南アフリカの石油会社であるSasol社及び、アメリカの新興企業であるRentech社が認証活動を行った。Annex1のFT-SPKがパラフィン主体の構成であり、シール材収縮の問題があることに対処したものの、合成ガスを生成するガス化工程で発生したタールを水素化・アルキル化し、アルキルベンゼンを生成する。これと従来のFT合成によるパラフィン成分を混ぜ合わせるにより、石油由来ジェット燃料の組成に近づけたもの。石油由来ジェット燃料に近い、芳香族成分を含んだ燃料組成を実現可能であり、現在ASTMで検討が続くSAF100%使用の候補燃料として期待がかかるものの、現実には煩雑化した工程からコストに課題があり、認証完了から10年近くが経過した現在においても、大規模生産化には至っていない。現状の混合率上限はFT-SPK同様に50vol%である。

普及活動も実質停止状態にあることから、CEF認証は為されていない。

3.5 ASTM D7566 Annex5 ALCOHOL-TO-JET SYNTHETIC PARAFFINIC KEROSENE (ATJ-SPK)

通称 ATJ-SPK。米国の新興バイオテクノロジー企業であるGevo社やLanzatech社が認証活動を主導。Gevo社は発酵技術を駆使して、トウモロコシよりイソブタノールを生成したものをジェット化する商流を手掛ける。Lanzatech社は都市ゴミ・工場排気ガスを発酵技術によりエタノール化する。

これらアルコール類を、脱水・オリゴマー化・水素化を経てジェット燃料化する。Gevo社及びLanzatech社はバイオ由来アルコールを製造する技術を有する企業であるが、燃料規格上はアルコールの原材料は問わず、バイオ由来のアルコール類を改質したものでも適合する。現時点ではイソブタノール及びエタノールが認証されているが、原理上はメタノールも類似技術を用いてジェット燃料化が可能である。最終的な燃料組成は、イソパラフィンが大半で、芳香族成分は非常に小さく0.5mass%以下である。従って、混合率上限はHEFAやFT同様に、50vol%に設定されている。

CEFについては、イソブタノール及びエタノールの両方が認証されており、これらアルコールの原料として

サトウキビやトウモロコシ、その他セルロース系バイオマス、工場廃棄ガスが登録されている。

3.6 ASTM D7566 Annex6 SYNTHESIZED KEROSENE FROM HYDROTHERMAL CONVERSION OF FATTY ACID ESTERS AND FATTY ACIDS

通称 CHJ。米国の研究機関（民間）であるApplied Research Associates (ARA) が開発し、認証活動を行った技術。廃食油、動植物油脂といった生物系油脂を超臨界水熱処理の後に、水素化処理してジェット燃料化する。超臨界水熱処理の工程で大量の環式化合物（シクロパラフィン及びベンゼンなど）を発生させる。後段の水素化処理でこれらの環は分解されず、結果として他ASTM D7566燃料と比してシクロパラフィン（25～50wt%程度）及び芳香族（20wt%以下）を比較的多く含む、ユニークな燃料組成となる。

日本のバイオベンチャーであるユーグレナ社が横浜で稼働させる実証プラントには、このプロセスが採用されている。混合上限率は現状50vol%とされているが、芳香族成分及びシクロパラフィンを多く含む、石油由来ジェット燃料に近い組成を持つことから、Annex4 SPK/A同様に100%SAF使用の有力な候補として目されている。

現時点において、この燃料はCEF認証されていない。

3.7 ASTM D7566 Annex7 SYNTHESIZED PARAFFINIC KEROSENE FROM HYDROPROCESSED HYDROCARBONS, ESTERS AND FATTY ACIDS

通称 HC-HEFA SPK。Hydroprocessed Hydrocarbon-HEFAという意味合いで、HHC-HEFAと表記されることもある。微細藻類*Botryococcus braunii*（ボツリオコッカス）が生成する炭化水素油（*Botryococcene*, ボツリオコッセン）を水素化処理してジェット燃料化したもの。IHIが認証申請した日本発SAFである。

ボツリオコッセンは炭素数C32～C34を中心とした炭化水素が9割の成分を占め、残りを炭化水素及び脂肪酸が占める。これをAnnex2同様のプロセス（HEFAプロセス）、つまり水素化工程を経ることでジェット燃料化する。脱酸工程の要素が小さく、Annex2のように脂肪酸を原料とした工程よりも、従来の石油精製プロセスに近いことになる。

燃料組成はパラフィン主体のSPKで、特にシクロパラフィンが50mass%以下と高く、シクロパラフィンに限ってみると従来の石油由来ジェット燃料に近い組成と言える。芳香族は生成されず、残りの構成をnパラフィン及びイソパラフィンが占める。

混合上限率は10vol%とされているが、これは燃料認証時にFast Track制度という、燃料組成分析結果を中心とした簡易的な試験のみで10vol%を混合上限とする、認証のスピード感を優先した条件付き認証制度を利用したためである。

2020年に認証が完了し、混合上限率を引き上げるため

の追加認証活動を目指しているが、現在は微細藻類の大量培養技術（量産技術）の向上に主眼を置いた開発が進んでいる。

現時点において、この燃料はCEF認証されていない。

4. 結びに

SAFは非常に量が少ないながらも、既に量産運用が開始されていて、航空機輸送のCO₂削減の主要手段として大きな期待がかかっている。その一方で、現状のSAFのコスト水準は石油由来ジェット燃料の2～5倍と言われ、燃料代がコストの大きな要素を占めるエアラインは、SAFの本格導入に対して慎重姿勢とならざるを得ない。この問題の解決には、現状技術の成熟・拡大によるコストダウンもさることながら、更に革新的な燃料製造技術の登場が必須である。本稿執筆時点においても、現状7種類に留まるASTM D7566認証燃料について、新規参入業者による新規認証活動は続けられており、今後も新たな燃料製造技術が生まれてくると考えられる。業界としても、排出量削減に貢献しうる新たなフィードストック・燃料製法の登場を歓迎しており、技術開発をサポートすべく様々な支援制度を打ち出している。今後も、多様なアイデアから航空機業界の脱炭素へ貢献するような燃料ソリューションの登場を期待したい。

参考文献

- (1) U.S. Department of Energy Bioenergy Technologies Office (BETO), Sustainable Aviation Fuel Review of Technical Pathways, (2020)
<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/09/f78/beto-sust-aviation-fuel-sep-2020.pdf>
- (2) ASTM International, ASTM D7566-22 : Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, (2022)
- (3) ICAO, CORSIA IMPLEMENTATION PLAN Brochure, (2019) <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Brochure/CorsiaBrochure_ENG-Mar2019_Web.pdf>（参照日2023年6月23日）
- (4) Gurhan Andac, Stephen Kramer, 100% SAF - Background, status, considerations, (2022)
<https://www.caafi.org/resources/pdf/CBGM2022/100Percent_Synthetic_Aviation_Turbine_Fuel_Update.pdf>（参照日2023年6月23日）
- (5) World Economic Forum, Clean Skies for Tomorrow: Delivering on the Global Power-to-Liquid Ambition, (2022)
<<https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/clean-skies-for-tomorrow-delivering-on-the-global-power-to-liquid-ambition>>（参照日2023年6月23日）
- (6) Air Transport Action Group (ATAG), Waypoint 2050, (2021) https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf（参照日2023年6月23日）

特集：航空分野の脱炭素化へ向けたサステナブル航空燃料（SAF）普及の取り組み

SAFの規格化プロセスとHondaの取り組みについて

SAF Standardization Process and Honda's Approach



石丸 大祐^{*1} 橋本 公太郎^{*2}
ISHIMARU Daisuke HASHIMOTO Kohtaro

キーワード：SAF，ジェット燃料，規格化，航空用ガスタービンエンジン，O-ring，LBO

Key Words：SAF, Jet Fuel, Standardization, Aviation Gas Turbine Engine, O-ring, LBO

1. はじめに

Hondaは、ASTM International（以下ASTM）においてSAF（Sustainable Aviation Fuel）の規格化を支援するOEM Panelのメンバーとして、航空領域の脱炭素化の要であるSAFの普及に貢献すべく活動している⁽¹⁾。Honda Aero, Inc.（本田技研工業㈱の100%子会社）とGeneral Electric Company（GE）は、折半出資子会社であるGE Honda Aero Engines（GHAE）を設立し、GHAEの商品としてHF120の型式証明を2013年に取得した⁽²⁾。その後2022年にはHF120の飛行時間が累計20万時間を達成している⁽³⁾。一方で、OEMとして2050年までに製品使用時を含めてカーボンニュートラルを目指すHondaにとって、航空領域の脱炭素化は重要な課題の一つである。そのため、航空領域の脱炭素化に必要なSAFに関わる活動に取り組んでいる。

本稿では、SAF規格化のガイドラインASTM D4054及び、その改善を含むSAFの今後について解説するとともに、SAFに関連するHondaの取り組みを紹介する。

2. ジェット燃料の分類

2.1 従来のジェット燃料

ASTM D1655に定められる従来のジェット燃料（以下従来燃料）は、主に炭素原子数8～15の炭化水素の混合物で構成されており、その成分比率はパラフィン60%、シクロパラフィン25%、芳香族15%程度である。石油系資源から製造された従来燃料はD1655の他にも、UK MOD Defense Standard 91-091などに規定されている。

2.2 SAF

SAFは従来燃料の製法とは異なる原材料と方法で製造された代替ジェット燃料である。Fig. 1に示す通り、現時点では従来燃料に最大で50%混ぜて使うことを前提としてASTM D7566に定義されており、従来の機体とエンジンの燃料システム、及び空港設備を含む流通システムに変更を加えることなくそのまま使用できるDrop-inと呼ばれる特性が求められる。SAFがDrop-inであるためには、従来燃料と同等であると言える必要があるが、従来燃料のように多様な炭素数でかつ芳香族を含む様々な形態の炭化水素で構成される燃料を製造することは容易ではない。そのため、neat SAF（ブレンド前の100%SAF）を従来燃料と最大50%までの比率でブレンドした後の検査で、従来燃料の特性範囲から外れていないことを確認することで、従来燃料と同等であるというDrop-in特性を確立する形を採っている。

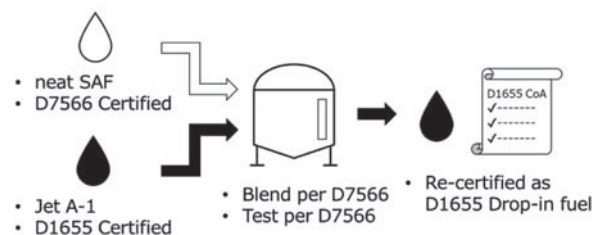


Fig. 1 Concept of Drop-in SAF

一方で、D7566ではSustainability（持続可能性）は要求されていない。これは、この規格の歴史的な背景による。米国の航空燃料業界が米国のエネルギーセキュリティ確保と環境対応を目的として、石油由来ではない代替燃料の開発・普及を促進するCAAFI（Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative）を2006年に設立して活動を開始した⁽⁴⁾。CAAFIが、ASTMに対して代替燃料の規格化を支援する規格の策定を依頼し⁽⁵⁾、既存の燃料添加剤評価プロセスを提供するD4054の改訂及び新規のD7566の制定に至った。従って、様々な目的で人

原稿受付 2023年7月12日

*1 ㈱本田技術研究所 先進パワーユニット・エネルギー研究所 GT開発室

〒351-0193 和光市中央1-4-1

E-mail: daisuke_ishimaru@jp.honda

*2 ㈱本田技術研究所 先進パワーユニット・エネルギー研究所 先進エネルギー研究開発室

〒351-0193 和光市中央1-4-1

E-mail: kohtaro_hashimoto@jp.honda

工的に合成された燃料を使用した場合の、機器の安全性の観点からD7566が制定されており、持続可能性は評価対象ではない。そのため、環境価値と切り離れたSATF (Synthetic Aviation Turbine Fuel) という呼称の方が、SAFよりも適している^[6]。しかし、SAFという言葉が一般に広く浸透しており、本稿においてもそれに従う。燃料のSustainabilityに関する国際ルールは、CORSIA (Carbon Offset and Reduction Scheme for International Aviation) が施行されているが、本稿ではASTMにおける規格化に絞って解説する。

2.3 Co-processing

Fig. 2に示すように、従来燃料の製造時に、従来以外の原料を混ぜた後に、従来通りの製造プロセスを行うCo-processingと呼ばれる方法もある。SAFはD7566に規格化されているが、Co-processingはD1655のAnnex1に規格化されている。Co-processingは製造にあたって新規の設備を必要とせず、バイオ由来原料などを混ぜることで燃料単位当たりの二酸化炭素排出量を下げることができる。投資費用が抑えられるなどの製造側のメリットが多いため、Co-processingの取り組みは急速に増えている。

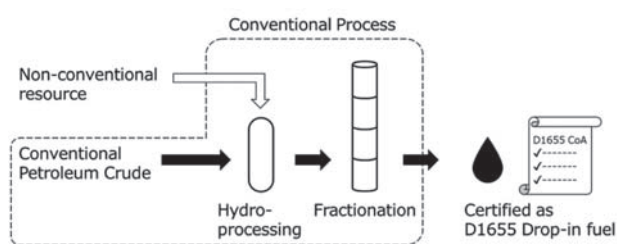


Fig. 2 An example of Co-processing

3. SAFの評価プロセスとOEMの役割

3.1 ASTM規格化におけるD4054の位置づけ

SAFの評価プロセスとして認識されているD4054は、燃料添加剤及びSAFを評価する際の慣行を提供するものであり、厳密に適用が求められているわけではないが、実質的には拘束力を持っている。D4054は、Fig. 3に示すように、OEMによるレビューを受けたResearch Reportとそれに基づく規格改定案を作成することを推奨している。その後、ジェット燃料を扱うASTM Subcommittee D02.Jの投票で可決されたのち、石油製品を扱うCommittee D02の投票で可決されて規格化される。

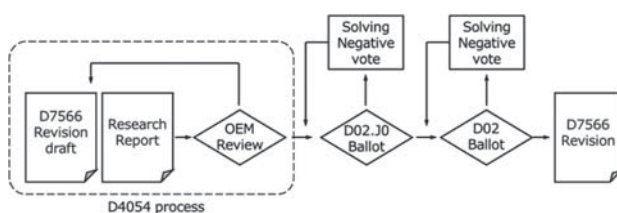


Fig. 3 ASTM balloting process

これらの投票は、OEM以外の関係者を含む、航空燃料に関わる業界関係者であるASTMメンバーによるものであり、業界のコンセンサスを得る必要がある。業界関係者間では、新しい燃料の規格案はD4054に従ってOEMから推奨されるものであるという共通の認識が確立されており、これに従わない燃料が投票を受けたとしても、合意を得ることは難しい。以上の理由から、D4054は実質的に拘束力を持つと言える。

3.2 D4054プロセスの活用方法とOEMの役割

D4054にはFig. 4に示すように2段階のプロセスが定義されている。Phase 1 (Tier 1/2) で一度レポートがまとめられる。レポートをOEMがレビューし、Phase 2 (Tier 3/4) へのGo/No goを判断するとともに、Phase 2での試験項目を決定する。Phase 2ではPhase 1の結果も含めて試験結果がレポートでまとめられ、OEMがレビューする。このPhase 2レビューを通過すると、先述のASTMの投票に進む。ここでOEMは、候補燃料が自社の機器の安全性に及ぼす影響を評価することで、規格化プロセスにおいて重要な役割を果たす。

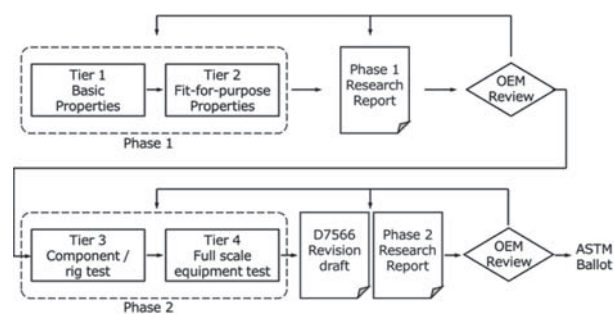


Fig. 4 ASTM D4054 process

D4054は、必要な試験項目や燃料特性値の目標を提示しており、燃料の認証を目指すメーカーは、これらをターゲットにした燃料開発を行う。または、既にD7566及びD1655の各Annexに規格化されている燃料の数値を参考にすることもできる。

また、D4054は反復的なレビューを想定しており、一度提出した燃料サンプルが要求を満たしていなかったとしても、特性を調整した燃料で再びレビューを受けることができる。OEMは、提出された時点での燃料を評価し、何が受け入れられて何が受け入れられないのかをフィードバックする。燃料メーカーは、以上のプロセスを繰り返し行うことが可能である。参考に、D4054の評価プロセスの各段階で必要な燃料の量と、試験費用の過去実績をTable 1に示す。

4. D4054における評価項目

ここではD4054プロセスで評価される項目について述べるが、全ての項目が必要条件でも、十分条件でもなく、その燃料の特性に応じて試験内容が決定される。

4.1 Tier 1: 基本仕様特性

候補燃料はまず、ジェット燃料として備えているべ

Table 1 Cost and Fuel amount of D4054 process⁽⁵⁾

Tier	Cost	Fuel amount to test
1	> \$ 5000	< 10 gal
2	> \$ 50,000	< 100 gal
3	> \$ 1,500,000	250 - 15,000 gal
4	> \$ 1,000,000	> 200,000 gal

き最低限の特性値が評価される。従来燃料規格であるD1655の要求と同等の要求項目が評価される。様々な原材料とプロセスから製造されるSAFが、従来燃料と同等であると言うには、より詳細な試験に進む前に、満たすべき最低限の項目が評価される。

4.2 Tier 2: Fit-For-Purpose特性

従来燃料には、規格に明文化されていない特性が多々ある。それらは、従来の原材料と方法で製造した場合には、ある程度の幅で安定した数値を示す⁽⁷⁾ため、規格としては明文化して要求されていない。Tier 2では、そのような特性について、以下のような項目が評価される。

4.2.1 化学的組成 燃料の化学的組成について、

GCxGC（2次元ガスクロマトグラフィー）のような高度な分析手法を用いて評価される。各種パラフィン、芳香族の炭素数分布や割合が従来燃料と比較され、その他に極微量含まれる可能性がある金属類などの含有量も調査される。

4.2.2 特性値の温度依存性 Tier 1で評価された特性

は、機体とエンジンが運用される全温度領域において、従来燃料と同等でなければならないため、それらの特性の温度依存性が評価される。

4.2.3 電気的特性 多くの航空機は燃料タンク中の燃料

残量を測定するセンサーを持っており、このセンサーは燃料の誘電率を用いて測定するため、誘電率は重要な電気的特性の一つとして評価される。

また、燃料はパイプラインでの輸送中などに帯電することが知られており、火花が発生すると爆発、火災の原因となる。そのため、燃料中に蓄積した静電気を放出する必要がある。ジェット燃料では、導電率の改善のために静電防止剤（SDA: Static Dissipator Additive）を添加することが一般的であり、SAFもSDA添加に対して、従来燃料と同様の導電率の改善効果が求められる。そのため、SDA添加量に対する感度が評価される。

4.2.4 グランドハンドリング特性 従来燃料と同じく、

地上での貯蔵安定性や燃料取り扱いに伴う人体への有害性などが評価され、従来通りの取り扱いで問題が生じないか評価される。

4.2.5 添加剤との適合性 従来燃料には、SDA以外にも

多くの添加剤の使用が認められており、それらとの適合性が評価される。従来燃料に対して既に認可されている添加剤が問題無く溶解するか、溶解後の特性が問題ないか等が評価項目である。

4.2.6 シール（O-ring）材料との適合性

燃料システムには多様な材料が使用されており、

SAFがその材料に対してどのような影響を与えるのかを予測することは難しいため、試験による確認が行われる。

燃料配管などに使用されるO-ringなどのエラストマー材料は、燃料種に対して膨潤特性などに著しい違いがあることが分かっており、燃料中に材料を浸漬して反応を確認する試験が行われる。古いエンジンなどで使用されているニトリルゴム（NBR）系O-ringは、燃料中の芳香族の影響で膨潤している。そのため、十分な芳香族を含まない燃料に切り替えた場合に、NBR系材料の劣化による硬化と相まって、燃料漏洩を引き起こす可能性がある⁽⁸⁾。NBRの他にも、現代の燃料システムで使用されているフルオロシリコンゴム（FVMQ）系及びフッ素ゴム（FKM）系のO-ringに対しても、燃料中の成分がどのように振舞うかを、完全には予測できない。そのため、上記3種類のO-ringによる試験が行われる。

O-ringの試験結果によっては、以降のTier 3で、より多くの材料リストに対して同様の浸漬試験が実施される。

4.3 Tier 3: コンポーネント試験、エンジン/機体システムリグ試験

Phase 2での試験内容は、Tier 1及びTier 2のPhase 1試験の結果をもとにその範囲が決定される。Phase 1の試験結果から、候補燃料の特性が従来燃料の特性から大きく異なる場合には、Phase 2の試験項目は多くなる。現代の航空機とガスタービンエンジンの複雑さから、Phase 2の試験内容は、OEMの持つ経験と専門知識に大きく依存して決定される。以下に代表的なTier 3試験の項目を示す。

4.3.1 エンジン及び機体材料との適合性 D4054

には多様な材料がリストされており、候補燃料との適合性が評価される。Tier 2で実施したO-ring浸漬試験は、本項目の予備試験の位置づけである。

4.3.2 ホットセクション耐久試験 候補燃料をリグで長時間使用し、タービンブレードやタービンノズルなどの部品の耐久性に与える影響が評価される。

4.3.3 燃焼噴霧試験 燃料ノズルの噴霧試験、低温環境下でのノズルの詰まり試験などが行われた実績がある。

4.3.4 燃焼器リグ試験 燃焼器の低温着火性などの性能、失火限界のような操作性や、スモークなどのエミッション、タービン入口温度の変化とそれが高温部品の耐久性に与える影響などが評価される。

4.4 Tier 4: フルスケールエンジン試験、フライト試験

実際のエンジン運転状態を再現するためにフルスケールエンジンを用いて試験を行うことがある。設備の制約から、リグ試験では実際のエンジン運転状態を再現できないことがあるためである。

フライト試験も同様に、リグや地上試験では再現できない条件を達成するために実施することがある。タンク中の燃料消費量の測定やタンク間の燃料移送、実飛行中のエンジン再始動性の確認などが行われる。

5. 評価プロセス改善の取り組み

5.1 プレスクリーニング (Pre-screening)

D4054プロセスは、Table 1で示した通り、多量の燃料とそれを試験する設備と労力、コストを要する。一方で、その燃料が規格化できるかどうかは確実ではない。そのため規格化を実行できるのは、豊富なリソースを持った大手企業のみとなり、資金力の乏しい新興企業などの参加を阻むことになる。これは、脱炭素化のためにSAFを必要としている航空業界にとって好ましくない。

そこで、米国のNJFCP (National Jet Fuel and Combustion Program) において、極少量の燃料サンプルがあれば、その燃料が規格化できる可能性がどの程度あるのかを分析できる指標が開発された⁽⁹⁾。これは現在CAAFIのホームページから入手可能である⁽¹⁰⁾。このツールを用いて少量のサンプルを分析し、燃料を改良しながら、規格化できる可能性が高い燃料を開発することができる。そしてその結果を後のスケールアップへの判断材料とすることができる。

具体的には、586 mlの燃料サンプルがあれば、二次元ガスクロマトグラフィー、中赤外吸収法、核磁気共鳴法などの高度な分析法と、粘度、蒸留曲線、質量密度、引火点、DCN (Derived Cetane Number)、表面張力などの物理的特性の試験を行い、その燃料が規格化できる可能性を効率的に探索することができる。

5.2 ファストトラック

D4054プロセスは非常に大きなリソースを必要とする一方で、SAFはジェット燃料需要に対して供給が足りていないため、常に規格上限まで混合しての商用利用を現時点では想定する必要はない。

そこで、D4054は混合率上限を10%とする制限を設ける代わりに、評価プロセスで要求される試験項目を削減するファストトラックと呼ばれるプロセスを定めている。ファストトラックはD4054 Annex4に組み込まれ、D7566 Annex7として(株)IHIがHC-HEFAを規格化した際に初めて適用された。

具体的にはPhase 1の評価を元に投票に進み、規格化を目指すプロセスである。ただし、ファストトラックで評価対象となる特性値は、Phase 2まで完了する予定の通常のプロセスにおけるPhase 1の評価項目に、一部の項目が追加、変更されている。主な違いとしては以下がある。

- ・蒸留特性が細かく指定されている。
- ・密度の範囲が広がっている。
- ・評価項目にDCN値が追加されている。
- ・熱安定性試験 (JFTOT) の実施温度が高く設定されている。

6. SAF規格化の今後

SAF製造は原料が制約となり供給が追い付いていない現状があるが、将来の技術革新による供給拡大を見込

んで、規格化活動は、従来燃料と混合をせずneat SAFのまま使用する規格を作ることを目指している。

6.1 100% Drop-in SAFの規格化⁽¹⁾

従来燃料とブレンドせず、neat SAFの状態に従来燃料と同等とみなすことができ、現在運用中の航空機にそのまま使用できる性質のものは、100% Drop-in SAFと呼ばれる。現在D7566 Annexに登録されている7種類のSAFのうち、Annex4 SPK/AとAnnex6 CHJの2種類は、この100% Drop-in特性を持つとみなされている。

そのSAFが100% Drop-in特性を持つかどうかは、主に十分な量の芳香族を含有しているかどうか基準となる。これは、世界中で運行中の機体には、NBR製のO-ringのように、燃料中の芳香族が重要な役割を果たす材料を使用している古い航空機が存在するためである。

ASTMにおいて、100% Drop-in SAFの規格化を目指すタスクフォースが2021年に設置され、作業が進められている。100% Drop-in SAFの場合、従来燃料のサプライチェーンでそのまま流通させることができるため、後述する100% Non-Drop-in SAFよりも管理が容易であり、規格化のハードルも低い。そのため、100% Drop-in SAFの規格化は、ASTM内において、100% Non-Drop-in SAFよりも優先的に作業が進められている。

6.2 100% Non-Drop-in SAFの規格化⁽¹⁾

Drop-in特性を持たない、すなわちneat SAFの状態では従来燃料と同等とみなすことができないものはNon-Drop-inであるとみなされる。前項でも述べた通り、十分な量の芳香族を含有しないSAFの場合、古い航空機で使用されると、燃料漏洩のリスクなどがあるため、様々な航空機が給油するサプライチェーンに100%の状態では供給することができない。そのため、従来のサプライチェーンから切り離された形での供給のコントロールが必要になる。

D7566の7種類のうち、Annex1 FT-SPK, Annex2 HEFA, Annex5 ATJ-SPK, Annex7 HC-HEFAが、100% Non-Drop-in SAFとされている。ただし、Annex5 ATJ-SPKは、現在の規格の範囲内であっても、その製造方法によっては、エンジンのLBO (Lean Blow Out) 特性に悪影響を与えられられている。この場合、Non-Drop-in SAFとして従来サプライチェーンと切り離された形であっても、100%での使用が認められる可能性は低い。Annex3 SIPも、組成が極端であるため同様である。

以上のように、複雑な制限や取り扱いが想定される100% Non-Drop-in SAFについても、ASTMにタスクフォースが設置されているが、規格制定は100% Drop-in SAFのさらに数年後になると考えられている。

6.3 段階的な認証

SAFの規格は一見複雑に見えるが、最低限の労力で段階的に使用範囲を拡大できる仕組みになっている。以下にその4ステップを示す。

- (1) プレスクリーニングによる効率的な燃料開発
- (2) ファストトラックによる混合上限10%での規格化
- (3) Phase 2以降の試験による混合率上限の引き上げ
- (4) 燃料の性質に応じてDrop-in / Non-drop-in 100%化

燃料製造側にメリットが大きいため近年注目されているCo-processingについては、最終製品である燃料に占める新原料の割合が低いにも関わらず、燃料製造会社ごとの従来プロセスの違いとその複雑さから、規格化の議論が難解になる。Co-processingのスムーズな規格化を目指して、ASTMでは新しいタスクフォースが動き出したため、今後の規格化プロセスの改善が期待される。

7. Hondaの取り組み

HondaはSAFを「ルール化する」「使う」「つくる」の全方位に取り組んでいる。その取り組みを紹介する。

7.1 ルール化する - OEM Review Panelへの参加

前述の通り、Hondaは、SAFのASTM規格化をOEMという立場から支援すべく、D4054に定義されているOEM Review Panelへ参加している。

7.2 使う - エンジン試験

Hondaは、SAFを用いた自社製品の試験を行っている。現行のD7566に適合したSAFは、ブレンド後の検査に合格すると、D1655として再承認を受けるため、Hondaの製品に給油して使用された場合、従来燃料を使用する場合と取り扱いは変わらない。しかし様々な目的でHondaではSAFを用いた試験に取り組んでいる。

7.2.1 HF120 / HEFA 100%試験 HF120ターボファンエンジンを用いて、SAF 100%での地上エンジン試験を実施し、従来燃料での運転と比較して、エンジンの性能等に差が無いことを確認した¹²⁾。この試験は、現在最も広く商用利用されているHEFAを用いて、GEの試験設備があるPeeblesで実施された。HEFAは芳香族分が含まれておらず、100%での使用については、Non-Drop-inとして扱われる可能性が高い。100% Non-Drop-in SAFは、燃料種毎に、個別のエンジン型式を改訂する形で使用されることが想定されている。この試験を通じて、将来HF120が、HEFA 100%での認定を取得できる可能性が高いことを確認できた。

7.2.2 HF120 / ATJ試験 Isobutanol経由で製造されたATJは、芳香族を含まないのみならず、C12及びC16に炭素数が偏在しており、極端に低いDCN値を持つという特徴がある。この燃料がO-ring部品機能と燃焼器LBO特性へ及ぼす影響を調査した。

燃料中の芳香族成分含有量が種々のO-ringに及ぼす影響を調査した結果をFig. 5に示す。HF120に使用されていないNBRは、燃料中の芳香族含有量が変化すると、体積膨潤率が変化することが分かる。従って、芳香族含有量に応じて、O-ringのシール性能は影響を受けると考えられる。HF120に使用されているFVMQ及びFKM、FKMの一種であるFFKMは芳香族含有量に依らず、体積

膨潤は一定であるため、芳香族を含まないSAF 100%の場合でもシール性能は影響を受けないことを確認できた。

次に、Jet A-1と100% ATJ及びそのブレンド燃料を用いて、DCNがHF120のLBO特性に与える影響を地上エンジン試験によって評価した結果をFig. 6に示す。本試験はHondaの和光研究所の試験設備 (Fig. 7) で実施した。過去に行われた調査では、燃焼器や燃料ノズルの形態によって、DCNに対するLBOの感度に差あることが分かっているが¹³⁾、HF120においても他の多くのエンジンと同様に、DCNがLBO特性に影響を与えることが確認できた。

本エンジン試験の実施にあたって、テストセルの燃料供給ラインを改修し、従来燃料ラインとは別に、SAFを供給する専用ラインを追加した。従来燃料を用いて認定試験等を行う際に、SAFが混入することを防ぐため、バルブ切り替えとフラッシングにより、エンジン型式認定のベースである従来燃料と、SAFを使い分けることができる。

今後、規格化前の新たな燃料を、商業運用されているHF120エンジンを用いて本項のような試験を行うことで、ASTM規格化を支援することができると考えている。

同様に、各種試験において継続的にSAFを使用し、研究開発時の二酸化炭素排出削減に取り組んでいる。

7.2.3 GT-Hybrid/ATJ試験 Hondaは、都市間移動を想定したeVTOL (electric vertical takeoff and landing) 機及び、ガスタービンと発電機を組み合わせたハイブリッドパワーユニットを研究開発中であり¹⁴⁾、パワーユニット試験の一部において、SAFを使用している。ガスタービンは将来100% SAFで運用されることを織り込んだ設計を目指している。同時に、SAF使用によって、研究開発時に発生する二酸化炭素排出を低減することに取り組んでいる。

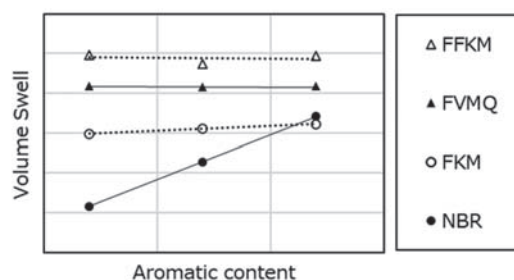


Fig. 5 O-ring volume swell vs aromatic content in fuel

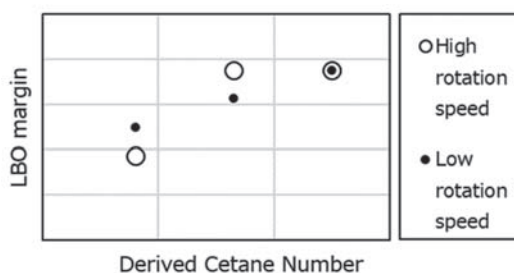


Fig. 6 LBO margin of HF120 vs DCN



Fig. 7 HF120 engine test facility and SAF used in the test

7.3 つくる – 燃料の開発

Hondaは、COを介さずに、CO₂とH₂から直接液体燃料を得る、ダイレクトFT（Fischer Tropsch）法による燃料合成技術の研究開発に取り組んでいる^[45]。一般的なFT合成では、CO₂を一度COに変換して、触媒でH₂と反応させることで液体燃料を得る。一方、ダイレクトFT法では、COに一度変換する必要がないため、燃料製造に必要なエネルギーが少なくなるため、大きなメリットとなる。

Hondaはこの技術を、SAF製造に用いるための研究開発に取り組んでいる^[46]。この技術で合成したSAFは、芳香族を含むため、100% Drop-in SAFとして利用できる可能性がある。

8. おわりに

本稿では、ASTMにおけるSAFの規格化プロセスについて解説した。最近では、規格化候補燃料の特性と製造方法の多様性から、これまでの規格プロセスでは対応が難しいケースなどが顕在化してきている。そのため、解説したように、燃料がプロセスにエントリーするために推奨される要件の明確化や規格化の方法の整合が議論されている。

Hondaは上記の規格化のような活動を含め、SAFに関わる活動に取り組んでいる。本稿で紹介したHondaの取り組みは主に以下3つである。

- ・ルール化する：OEMとして新しい燃料の規格化を支援している。規格化を通じてSAFの普及に貢献している。
- ・使う：研究開発活動における試験において、SAFを積極的に使用している。研究所の設備を改修し、規格化前の燃料であっても、試験を実施できる環境を整えている。
- ・つくる：自社技術を用いたSAFに取り組んでいる。特に、ダイレクトFT法による燃料合成に取り組んでいる。

謝辞

O-ring浸漬試験の実施において、一般財団法人 化学物質評価研究機構にご協力頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) Honda SAF OEM Panelへ参加
<<https://www.honda.co.jp/news/2022/c220623.html>> (参照日 2023年7月11日)。
- (2) 野田悦生, HF120ターボファンエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 26, No. 2, pp. 1-5
- (3) Honda HF120総運転時間が200,000時間を突破
<<https://www.honda.co.jp/aeroengine/releases/20220308/index.html>> (参照日 2023年7月11日)。
- (4) CAAFI<<https://www.caafi.org/>> (参照日 2023年7月11日)。
- (5) Rumizen, M., Qualification of Alternative Jet Fuels, frontiers in Energy Research, 9:760713. (2021)
- (6) CAAFI Synthetic Aviation Turbine Fuel (SATF) ASTM Qualification Update
<https://www.caafi.org/resources/pdf/CBGM2022/ASTM_Certification_Qualification_Update.pdf> (参照日 2023年7月11日)。
- (7) World Fuel Sampling Program, CRC Report No.647, (2006)。
- (8) Alternative Aviation Fuel Experiment (AAFEX) II, <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150010381/downloads/20150010381.pdf>> (参照日 2023年7月11日)。
- (9) Colket, M. B., Heyne, J. S., Rumizen, M., Edwards, J. T., Gupta, M., Roquemore, W. M., Moder, J. P., Tishkoff, J. M., and Li, C., "An Overview of the National Jet Fuels Combustion Program," AIAA Journal, (2017)。
- (10) CAAFI Prescreening of synthesized hydrocarbons intended for candidates as blending components for aviation turbine fuels
<https://www.caafi.org/tools/docs/CAAFI_RD_Prescreening_Guidance_Document_v1.0.pdf> (参照日 2023年7月11日)。
- (11) CAAFI 100% SAF – initial reflections
<https://www.caafi.org/resources/pdf/3.10_100_Percent_SAF_Andac_Kramer.pdf> (参照日 2023年7月11日)。
- (12) GHAE GE Honda Aero Engines completes 100% SAF testing<GE Honda Aero Engines Completes Testing of HF120 Engine Using 100% Low Carbon Sustainable Aviation Fuel (SAF) > (参照日 2023年7月11日)。
- (13) National Jet Fuels Combustion Program Initial Results of Alternative Fuel Effects on Combustor Performance: Lean Blowout and Ignition
<https://www.caafi.org/resources/pdf/NJFCP_Jan19_2018_SOAP-Jet.pdf> (参照日 2023年7月11日)。
- (14) Honda eVTOL
<https://www.honda.co.jp/future/EngineerTalk_eVTOL2/> (参照日 2023年7月11日)。
- (15) Yamamoto, O., Direct Conversion of Co₂ to Liquid Fuels Using Novel Fe-Based and Zeolite Multifunctional Catalysts Via a Direct Fischer-Tropsch Synthesis Pathway, Proceedings of the 16th Greenhouse Gas Control Technologies Conference (GHGT-16) 23-24, (2022)。
- (16) Honda Stories <<https://www.honda.co.jp/stories/058/>> (参照日 2023年7月11日)。

大気環境を考慮したガスタービン用吸気フィルタの 差圧上昇の推定手法の考案

Differential Pressure Estimation for Gas Turbine Air Intake Filter with Consideration of Atmospheric Environment

尾関 高行^{*1}
OZEKI Takayuki

松井 陽平^{*1}
MATSUI Yohei

藤井 智晴^{*1}
FUJII Tomoharu

ABSTRACT

In gas turbines, many air intake filters are installed to prevent damage and deterioration of the compressor due to suction of dust in the atmosphere. For reducing the cost of replacing these filters, it is necessary to estimate the increase in the differential pressure of the filter, which is the criteria for replacement. In this study, we described the relationship between the differential pressure and the dust collection amount of the filter based on the fluid drag. Moreover, we proposed a method to estimate the dust collection amount of the filter used in atmospheric environmental conditions. The test in which the air was continuously ventilated through the filter demonstrated that the dust collection amount estimated by the proposed method was in good agreement with the experimental result. Furthermore, the experimental results suggest that the differential pressure of the filter can be estimated from the dust collection amount of it.

キーワード：ガスタービン，吸気フィルタ，大気環境，差圧推定，捕集量

Key words : Gas Turbine, Air Intake Filter, Atmospheric Environment, Differential Pressure Estimation,
Dust Collection Amount

1. 緒言

空気を圧縮して燃焼用空気として利用する大型発電用ガスタービン（以下，GT）では，吸気中に含まれる粉塵（以下，大気塵）の圧縮機翼への付着による圧縮機の効率低下や，飛来物の衝突による圧縮機翼の損傷を招く恐れがある⁽¹⁾。そのため，GTでは吸気フィルタを導入し，圧縮機に流入する空気を清浄化している。発電用の大型GTでは，2段構成あるいは3段構成の吸気フィルタシステムが利用されており，各段に数百枚単位の吸気フィルタが用いられる。JIS Z 8122で定義される吸気フィルタにおいて，1次フィルタには5 μm 以上の粒子を主に捕集する粗じん用エアフィルタ（以下，プレフィルタ）が，2次フィルタには5 μm 以下の粒子に対して中程度の粒子捕集率をもつ中性能エアフィルタ（以下，中性能フィルタ）が，3次フィルタには0.3 μm の粒子に対して99.97%の粒子捕集率を持つHEPAフィルタがそれぞれ用いられる⁽²⁾。これらの吸気フィルタは大気塵を捕集することで，その差圧が使用時間に対して指数関数的に上昇することが知られている⁽³⁾。しかし，大気塵の粒子径

分布や質量濃度は季節や場所によって異なるため，一概に差圧が上昇する時間を推定することは困難である。吸気フィルタの急激な差圧上昇は，GTの運転停止を招く恐れがあるため，差圧が上昇する前にGTの吸気フィルタを交換する必要がある。差圧が上昇する前に吸気フィルタを交換することは，その交換周期を早めるため，過剰な交換費用が掛かる。

吸気フィルタの交換時期を適正化するためには，交換基準となる吸気フィルタの差圧を推定する必要がある。清浄な状態での吸気フィルタに対しては，吸気フィルタを構成する繊維の周りに空気が流れるため，その繊維の流体抵抗の総和から差圧を求めることができる⁽⁴⁾。また，粉塵負荷時の差圧の推定については，吸気フィルタを構成する繊維の抵抗係数や線径の変化に着目した手法⁽⁴⁾や，単分散粒子を吸気フィルタで捕集した場合の手法⁽⁵⁾が報告されている。坂野らは，数時間程度の比較的短時間で，大気塵よりも高く均一な質量濃度の単分散粒子を繊維で捕集した試験結果を基に差圧上昇を検討している⁽⁵⁾。しかし，GTでは質量濃度が刻々と変化する上，多分散の大気塵を年単位の長時間吸引する点が異なる。そこで，本研究では，GT用吸気フィルタに大気を長時間連続通風させることが可能な試験装置を製作し，差圧及び捕集量とともに，捕集量の推定に重要な吸気フィルタの粒子捕集率を測定する。そして，吸気フィルタの粒子捕集率

原稿受付 2022年3月20日

査読完了 2023年7月14日

*1 一般財団法人 電力中央研究所

〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1

E-mail: t-ozeki@criepi.denken.or.jp

および大気塵の質量濃度に関する公開データから吸気フィルタの捕集量を推定する手法を考案し、試験結果を用いて検証する。さらに、単分散粒子の差圧推定手法⁽⁵⁾を基に、多段構成であるGT用吸気フィルタの特徴を考慮し、フィルタ差圧上昇を推定する手法を考案する。

主な記号

A_F	: 吸気フィルタの開口面積	(m^2)
C_{D0}	: 清浄な繊維における抵抗係数	(-)
C_m	: 大気塵の質量濃度	(kg/m^3)
C_{ml}	: $5.2\mu m$ より大きい粒子の質量濃度	(kg/m^3)
C_{mm}	: $2.5\mu m$ より大きく $5.2\mu m$ 以下の粒子の質量濃度	(kg/m^3)
C_{ms}	: $2.5\mu m$ 以下の粒子の質量濃度	(kg/m^3)
$C_{mPM2.5}$	: 大気塵のPM2.5の質量濃度	(kg/m^3)
C_{mSPM}	: 大気塵のSPMの質量濃度	(kg/m^3)
C_{mTSP}	: 大気塵のTSPの質量濃度	(kg/m^3)
d_f	: 吸気フィルタの繊維径	(m)
d_p	: 粒子径	(m)
d_{pv}	: 平均体積となる粒子径	(m)
F_0	: 清浄な繊維における単位長さの流体抵抗	(N/m)
F_m	: 粒子捕集時の繊維における単位長さの流体抵抗	(N/m)
L	: 吸気フィルタのろ材の厚さ	(m)
LB	: 粒子径範囲の下限の粒子径	(m)
m	: 吸気フィルタの捕集量	(kg)
$\dot{m}$	: 吸気フィルタのろ材の単位長さあたりの捕集量	(kg/m)
N	: 大気塵の粒子径範囲の分割数	(-)
N_l	: $0.3\mu m$ 以上 $10\mu m$ 以下の粒子径範囲の分割数	(-)
N_m	: $0.3\mu m$ 以上 $5.2\mu m$ 以下の粒子径範囲の分割数	(-)
N_s	: $0.3\mu m$ 以上 $2.5\mu m$ 以下の粒子径範囲の分割数	(-)
n	: 大気塵の個数濃度	($1/m^3$)
n_i	: 吸気フィルタ上流側における大気塵の個数濃度	($1/m^3$)
n_o	: 吸気フィルタ下流側における大気塵の個数濃度	($1/m^3$)
Q	: 吸気フィルタ1枚当たりの吸気流量	(m^3/s)
t	: 時間	(s)
U	: 接近速度	(m/s)
UB	: 粒子径範囲の上限の粒子径	(m)
x	: 吸気フィルタの厚さ方向の長さ	(m)
β	: $\dot{m}$ に対する差圧上昇係数	($m^\gamma/(kg)^\gamma$)
Δp_0	: 清浄時の吸気フィルタの差圧 (初期差圧)	(Pa)
Δp_m	: 粒子捕集時の吸気フィルタの差圧	(Pa)

ε	: 吸気フィルタの空隙率	(-)
γ	: 差圧上昇指数	(-)
η_c	: 吸気フィルタの計数法の粒子捕集率	(-)
η_m	: 吸気フィルタの質量法の粒子捕集率	(-)
κ_l	: $5.2\mu m$ より大きく $10\mu m$ 以下の粒子における体積濃度割合	(-)
κ_m	: $2.5\mu m$ より大きく $5.2\mu m$ 以下の粒子における体積濃度割合	(-)
κ_s	: $0.3\mu m$ 以上 $2.5\mu m$ 以下の粒子における体積濃度割合	(-)
ρ	: 空気密度	(kg/m^3)
ω	: 差圧上昇係数	($1/(kg)^\gamma$)
添え字		
1	: 1次フィルタ	
2	: 2次フィルタ	
3	: 3次フィルタ	
k	: 粒子径範囲序数	

2. 吸気フィルタの差圧及び捕集量の理論

2.1 吸気フィルタの差圧と捕集量の関係

吸気フィルタは空隙率 ε が高く、吸気フィルタを構成する繊維の周りを空気が流れる。清浄な吸気フィルタの場合、これらの繊維の流体抵抗の総和として、差圧 Δp_0 を求めることができる⁽⁴⁾。

$$\Delta p_0 = 4 \frac{1-\varepsilon}{\pi d_f^2 \varepsilon} F_0 L \quad (1)$$

$$F_0 = C_{D0} d_f \frac{\rho u^2}{2} \quad (2)$$

吸気フィルタが粒子を捕集した状態では、繊維に堆積した粒子が流体抵抗を増大させる。単分散粒子が堆積した場合、式(1)を拡張した下式で差圧 Δp_m が推定される⁽⁵⁾。

$$\Delta p_m = 4 \frac{1-\varepsilon}{\pi d_f^2 \varepsilon} \int_0^L F_m dx \quad (3)$$

$$F_m = F_0 (1 + \beta \dot{m}(x, t)^\gamma) \quad (4)$$

実際の大気塵は単分散粒子ではないものの、GT用吸気フィルタの場合、多段構成により各吸気フィルタが捕集する粒子径は一定の範囲内となる。そのため、GT用吸気フィルタに式(3)、式(4)を適用できると仮定した。また、簡単のために、厚さ方向の捕集量の分布の影響は無視でき、下式で表すことができると仮定した。

$$\Delta p_m = 4 \frac{1-\varepsilon}{\pi d_f^2 \varepsilon} F_m L \quad (5)$$

$$F_m = F_0 (1 + \beta \dot{m}(t)^\gamma) \quad (6)$$

ここで、吸気フィルタの捕集量 m はろ材の単位長さあたりの捕集量 $\dot{m}$ の総和として下式により求められる。

$$m = 4 \frac{1-\varepsilon}{\pi d_f^2} \dot{m} A_F L \quad (7)$$

式(5)を式(1)、式(6)を用いて変換し、さらに単位長さあた

りの捕集量 $\dot{m}$ に対する差圧上昇係数 β を吸気フィルタの捕集量 m に対する差圧上昇係数 ω に置き換えると、ガスタービン用吸気フィルタの差圧 Δp_m は下式で推定される。

$$\Delta p_m = \Delta p_0(1 + \omega m(t)^\gamma) \quad (8)$$

したがって、GTの使用環境における差圧上昇係数 ω および差圧上昇指数 γ をあらかじめ求めておくことで、吸気フィルタの初期差圧 Δp_0 と捕集量 m から、差圧 Δp_m を推定することができると考えられる。

2.2 吸気フィルタの捕集量の推定

吸気フィルタの捕集量 m は、大気塵の質量濃度と吸気フィルタ前後の質量濃度比から求められる質量法での粒子捕集率から推定することができる。一方で、粒子捕集率は吸気フィルタ毎、粒子径範囲毎に異なる。また、GTでは吸気フィルタを通常3段以内で構成するため、各段の吸気フィルタは前段の吸気フィルタを通過した大気塵を捕集する。そのため、大気塵の粒子径範囲の分割数を N として、大気塵の質量濃度 C_{mk} と各段吸気フィルタの粒子捕集率 η_{mk} を用いて、下式より吸気フィルタの捕集量 m を推定した。

$$m_1 = \int \rho \sum_{k=1}^N \eta_{mk} C_{mk} dt \quad (9)$$

$$m_2 = \int \rho \sum_{k=1}^N \eta_{m2k} (1 - \eta_{m1k}) C_{mk} dt \quad (10)$$

$$m_3 = \int \rho \sum_{k=1}^N \eta_{m3k} ((1 - \eta_{m2k})(1 - \eta_{m1k})) C_{mk} dt \quad (11)$$

ここで、吸気フィルタの質量法での粒子捕集率 η_{mk} は、粒子形状を球形とし、粒子径範囲毎の粒子の密度は一定と仮定することで、吸気フィルタに供された同粒子径範囲の粒子の個数に対する吸気フィルタが捕集した個数との比で求められる計数法の粒子捕集率 η_{ck} と等しくなる。そのため、吸気フィルタの前後の個数濃度 n_{ik} 、 n_{ok} から、下式で求められる計数法の粒子捕集率 η_{ck} を用いることとした。

$$\eta_{mk} \approx \eta_{ck} = 1 - \frac{n_{ok}}{n_{ik}} \quad (12)$$

大気塵については、全粒子径範囲である大気浮遊粉塵 (Total Suspended Particles, 以下、TSP)、空気動力学的粒子径 $10 \mu\text{m}$ で100%の粒子捕集率をもつ分級装置を通過する粒子と定義される浮遊粒子状物質 (Suspended Particulate Matter, 以下、SPM)、空気動力学的粒子径 $2.5 \mu\text{m}$ で50%の粒子捕集率がある分級装置を通過する粒子である微小粒子状物質 (Particulate Matter 2.5, 以下、PM2.5) などのように、粒子径により区別がなされている。吸気フィルタは全ての粒子径範囲の大気塵を吸引するため、TSPの粒子径範囲に対して、粒子径範囲毎の質量濃度 C_{mk} を求める必要がある。一方でSPMおよびPM2.5の粒子径範囲については、自動測定機による1時間毎の質量濃度の速報値が環境省大気汚染物質広域監視システム (以下、そらまめくん)⁽⁶⁾で公開されている。

そらまめくんは全国に測定局があり、GT発電所の近隣の計測値も入手しやすい。そこで、粒子径範囲毎の質量濃度 C_{mk} を求めるのに、そらまめくんで公開されているSPMとPM2.5の質量濃度の計測値を用いることとした。また、TSPとSPMの質量濃度の関係を調査した事例⁽⁷⁾から、そらまめくんのSPMの質量濃度 C_{mSPM} を用いてTSPの質量濃度 C_{mTSP} を下式により推定した。

$$C_{mTSP} = \frac{C_{mSPM} - 3.1}{0.57} \quad (C_{mSPM} > 3.1) \quad (13)$$

$$C_{mTSP} = C_{mSPM} \quad (C_{mSPM} \leq 3.1) \quad (14)$$

SPMとPM2.5はそれぞれの定義から、特定の粒子径以下の質量濃度を示すものではないが、SPMとPM2.5を計測するための分級装置は粒子径に対して滑らかなS字曲線となる場合が多い⁽⁸⁾。そこで、それぞれの質量濃度は分級装置の粒子捕集率が50%となる中位径以下の質量濃度に等しいと仮定した。SPMの中位径については、各メーカーのSPM用の分級装置の計測結果⁽⁹⁾から、粒子捕集率が50%となる粒子径の平均値を算出して $5.2 \mu\text{m}$ とした。PM2.5の中位径はその定義から $2.5 \mu\text{m}$ である。これにより、大気塵の質量濃度を $2.5 \mu\text{m}$ 以下、 $2.5 \mu\text{m}$ 以上 $5.2 \mu\text{m}$ 以下、 $5.2 \mu\text{m}$ 以上の粒子の質量濃度 (以下、それぞれ C_{ms} 、 C_{mm} 、 C_{ml}) を推定することができる。また、球形粒子を仮定した上で、粒子径範囲毎の上限粒子径 UB_k と下限粒子径 LB_k から、平均体積となる粒子径 d_{pvk} を求めた。 d_{pvk} とGT近傍で計測した大気塵の個数濃度 n_k の平均値から、 C_{ms} 、 C_{mm} 、 C_{ml} それぞれにおける体積濃度割合 κ_{sk} 、 κ_{mk} 、 κ_{lk} を求めた。粒子径範囲毎の質量濃度 C_{mk} は、球形粒子、粒子密度一定を仮定した上で、 C_{ms} 、 C_{mm} 、 C_{ml} および κ_{sk} 、 κ_{mk} 、 κ_{lk} から求めた。なお、 C_{ms} の下限および C_{ml} の上限は各吸気フィルタが主に捕集する粒子径から、それぞれ $0.3 \mu\text{m}$ と $10 \mu\text{m}$ とし、TSPの質量濃度 C_{mTSP} は全て $0.3 \sim 10 \mu\text{m}$ に分布すると仮定して、粒子径範囲毎の質量濃度 C_{mk} を下式により算出した。

$$\kappa_{lk} = \frac{\frac{1}{6} \pi d_{pvk}^3 n_k}{\sum_{k=N_m+1}^{N_l} \frac{1}{6} \pi d_{pvk}^3 n_k} \quad (5.2 < d_p \leq 10) \quad (15)$$

$$\kappa_{mk} = \frac{\frac{1}{6} \pi d_{pvk}^3 n_k}{\sum_{k=N_s+1}^{N_m} \frac{1}{6} \pi d_{pvk}^3 n_k} \quad (2.5 < d_p \leq 5.2) \quad (16)$$

$$\kappa_{sk} = \frac{\frac{1}{6} \pi d_{pvk}^3 n_k}{\sum_{k=1}^{N_s} \frac{1}{6} \pi d_{pvk}^3 n_k} \quad (0.3 \leq d_p \leq 2.5) \quad (17)$$

$$d_{pvk} = LB_k \left[\frac{1}{4} \left(1 + \left(\frac{UB_k}{LB_k} \right)^2 \right) \left(1 + \left(\frac{UB_k}{LB_k} \right) \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (18)$$

$$C_{mk} = C_{ml} \kappa_{lk} = (C_{mTSP} - C_{mSPM}) \kappa_{lk} \quad (5.2 < d_p \leq 10) \quad (19)$$

$$C_{mk} = C_{mm} \kappa_{mk} = (C_{mSPM} - C_{mPM2.5}) \kappa_{mk} \quad (2.5 < d_p \leq 5.2) \quad (20)$$

$$C_{mk} = C_{ms} \kappa_{sk} = C_{mPM2.5} \kappa_{sk} \quad (0.3 \leq d_p \leq 2.5) \quad (21)$$

3. 試験方法

3.1 試験装置

吸気フィルタに大気を通風する試験装置を神奈川県横須賀市の（一財）電力中央研究所構内に設置した。試験装置の外観をFig. 1に示す。試験装置は下流部に設置されたファンが大気を吸引する風洞構造となっており、その上流側に吸気フィルタの設置部が直列に3か所設けられている。それぞれの設置部には吸気フィルタを1枚ずつ設置でき、上流側に設置された吸気フィルタを通過した空気が下流側の吸気フィルタに流入する構造である。各吸気フィルタの差圧 Δp_m は、吸気フィルタ前後の天井面に設置された圧力ポートの静圧差として計測される。吸気フィルタ設置部の前面にはウェザールーバが設置されており、雨水が直接入り込まない構造になっている。吸気フィルタ設置部の下流側にある流量測定部には、整流機能付きの定置式複合ピトー管センサが設置されており、このセンサで計測された動圧を吸気流量 Q に換算している。試験装置の吸気流量 Q は約30～100m³/minの範囲で調整することが可能である。これらにより、実機GTの吸気フィルタと同一の構成に対して、運転条件を模擬した試験が可能となる。各吸気フィルタの差圧 Δp_m や試験装置の吸気流量 Q は、温度や湿度のデータとともにデータロガーに随時記録される。

吸気フィルタの粒子捕集率 η_{ck} の計測および大気塵の個数濃度 n_k の計測には、0.3～10 μ mの大気塵を対数で16等分割した粒子径範囲毎における個数濃度を計測できるTSI社製の光散乱式個数濃度計を用いた。吸気フィルタ前後に本個数濃度計を設置して、吸気フィルタ前後での個数濃度を簡易的に計測し、その変化から式(12)で粒子径範囲毎の計数法での粒子捕集率 η_{ck} を求めた。また、試験装置近傍に本個数濃度計を設置して、大気塵の個数濃度 n_k を計測した。

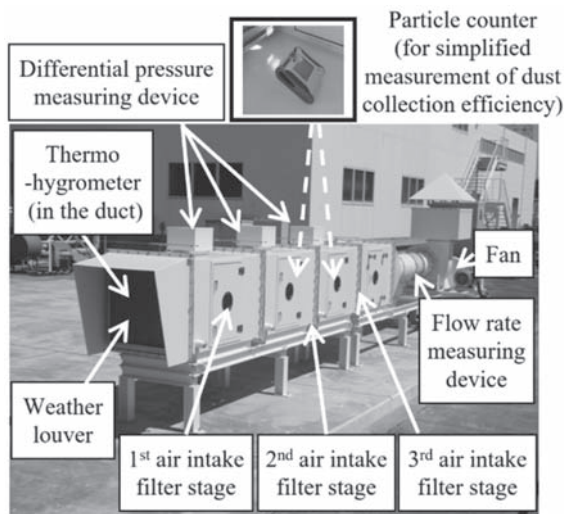


Fig. 1 Test equipment for GT air intake filter system

3.2 試験条件

吸気フィルタに対して、大気を連続通風させた際の試験条件をTable 1にまとめた。試験には日本無機製の吸気フィルタを用い、1次フィルタにプレフィルタを、2次フィルタに中性能フィルタを、3次フィルタにHEPAフィルタをそれぞれ用いた。同一型式の吸気フィルタに対して、異なる時期に2回試験した。試験期間1は2016年7月から2019年4月まで、試験期間2は2019年11月から2020年12月までであり、それぞれ断続的に実施した。試験では、一定流量で各吸気フィルタに連続通風し、それぞれの試験における差圧 Δp_m や吸気流量 Q を1分毎に記録し、1時間平均でまとめた。各試験期間の前後および試験装置メンテナンスのための試験中断時には、差圧計や吸気流量を調整した上で、各吸気フィルタの差圧 Δp_m 及び粒子捕集率 η_{ck} を、毎秒計測の15分間の平均値、30秒計測の5分間の平均値でそれぞれ計測した。また、各吸気フィルタを乾燥させた上で質量計測し、初期質量からの変化量を捕集量 m として求めた。

Table 1 Conditions of continuous ventilating tests conducted intermittently during the test periods

Case	Test period 1	Test period 2
Testing time	9624 (h) (July 2016 ~April 2019)	7936 (h) (November 2019 ~December 2020)
Testing location	Central Research Institute of Electric Power Industry (Yokosuka area)	
Flow rate	58 (m ³ /min)	
1 st air intake filter	Prefilter	
	Dimension (mm)	External: 594×594×95 Opening space: 553×564
2 nd air intake filter	Medium efficiency air filter	
	Dimension (mm)	External: 594×594×292 Opening space: 527×527
3 rd air intake filter	HEPA filter	
	Dimension (mm)	External: 610×610×290 Opening space: 572×561

4. 試験結果

4.1 試験装置周辺の大気環境

試験装置から直線距離で約0.5km離れたそらまめくんの測定局である神奈川県横須賀市西行政センターのSPMおよびPM2.5の質量濃度を、試験期間毎に各月の平均値でまとめたものをFig. 2に示す。Fig. 2の白抜きは20日間以上試験を実施していない月を示しており、黒塗りの月には概ね試験を実施している。そらまめくんでは計測された質量濃度の経時変化において、データ欠損部はFig. 2に示した当該月の平均値を用いることとした。また、そらまめくんのSPMおよびPM2.5の質量濃度を、試験期間2の開始以前3年間における各月の平均値でまとめたもの（以下、過去3年間平均データ）をFig. 3に示す。試験期間2では、SPMおよびPM2.5の質量濃度が

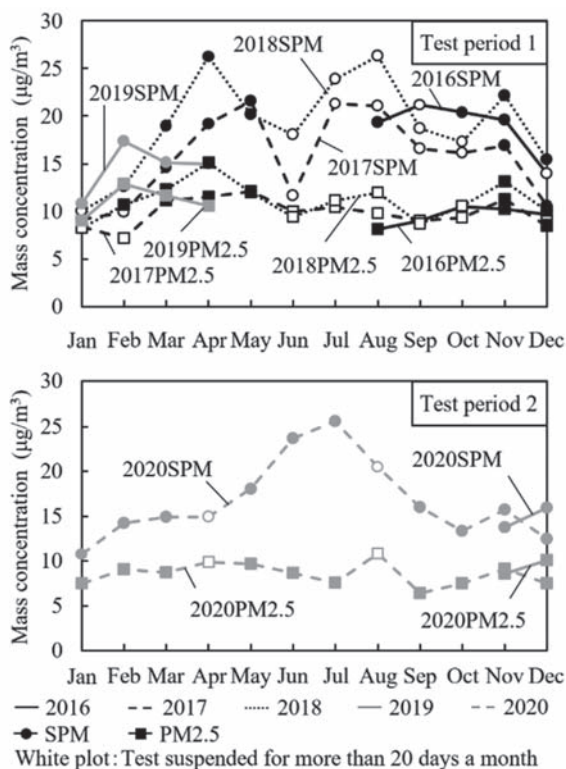


Fig. 2 Mass concentration of SPM and PM2.5 in Nishi Administration Center during the test periods (created based on Atmospheric Environmental Regional Observation System (Ministry of the Environment of Japan) <<https://soramame.env.go.jp/>>) (Reference date 2021.8.23)

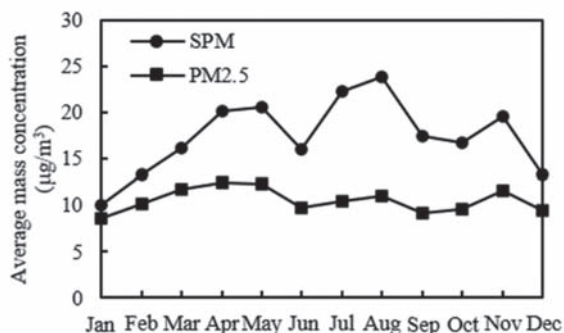


Fig. 3 Mass concentration average of SPM and PM2.5 in Nishi Administration Center for the last 3 years before the test period 2 (created based on Atmospheric Environmental Regional Observation System (Ministry of the Environment of Japan) <https://soramame.env.go.jp>) (Reference date 2021.8.23)

Fig. 3に示した各月の平均値で一定であるとして、各吸気フィルタの捕集量 m を予測した。さらに、本試験での大気塵の個数濃度には、Fig. 4に示した試験装置近傍で2018年度に計測した個数濃度分布の平均値を用いた。

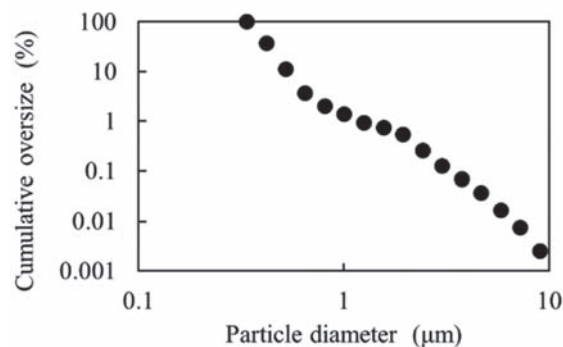


Fig. 4 Particle size distribution over the test equipment

4.2 吸気フィルタの連続通風試験結果

Fig. 5に各吸気フィルタの差圧 Δp_m と時間 t の関係を示す。1次フィルタ及び2次フィルタの差圧 Δp_m の上昇は、試験期間1及び試験期間2で異なり、同一試験期間において比較した場合、いずれも試験期間1の差圧 Δp_m の方が高い。3次フィルタの差圧 Δp_m については、明確な差異は見られなかった。2次フィルタと3次フィルタにスパイク状の差圧上昇がみられるが、これは雨天などにおける高湿度の影響と思われる。また、いずれの試験期間においても、本試験時間内では指数関数的な差圧上昇は確認されなかった。

各吸気フィルタの質量増加から計測した捕集量をFig. 6に示す。1次フィルタ及び2次フィルタの捕集量は時間 t とともに増加していることが確認されるが、試験期間2よりも試験期間1の捕集量の方が大きい傾向にある。3次フィルタの捕集量はばらつきが大きい結果となったが、これは3次フィルタの枠材が木材であったため、吸湿の影響を受けていると考えられる。特に、試験終了時を除く試験期間1は、空調による室内乾燥であったため、乾燥状況が各計測で異なっていた恐れがあった。そこで、試験期間1の試験終了時点から乾燥剤を用い、乾燥状況を概ね一定にして計測した。

Fig. 7に試験前後及び試験を中断した際に計測した各吸気フィルタの粒子捕集率 η_{ck} の平均値を示す。各吸気フィルタの試験期間における平均粒子捕集率 η_{ck} は多少異なるが、傾向は同一であることを確認した。

5. 吸気フィルタの差圧及び捕集量の考察

5.1 吸気フィルタの捕集量の推定

実機GTの吸気フィルタの管理に向けた吸気フィルタの捕集量 m の推定には、日常的な吸気フィルタの捕集量を管理するために随時推定する手法と、今後の差圧上昇を把握するために吸気フィルタの捕集量を事前に予測する手法が必要である。そこで、試験時のそらまめくんのSPMおよびPM2.5の質量濃度から試験中の吸気フィルタの捕集量 m を随時推定する手法と、SPMおよびPM2.5の質量濃度の過去の平均値から試験前に吸気フィルタの捕集量 m を予測する手法を検討した。

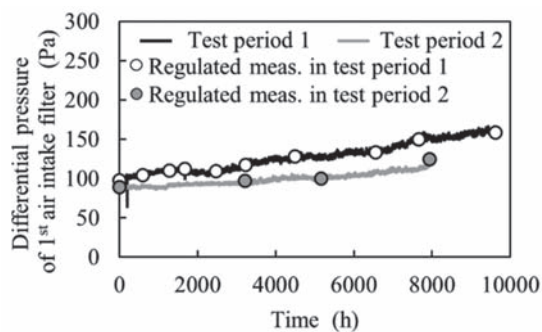
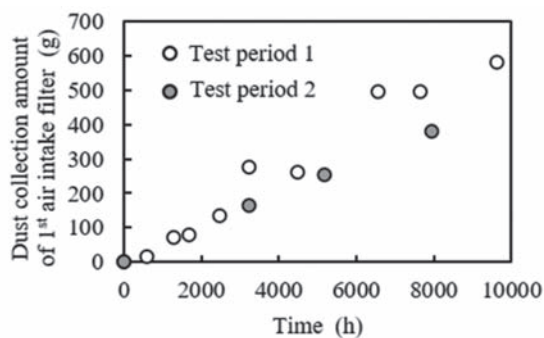
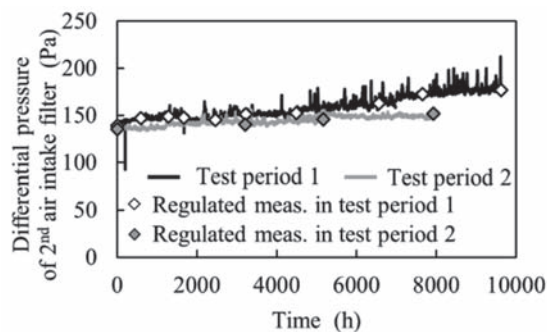
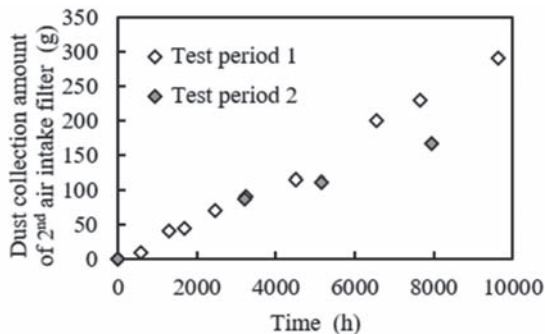
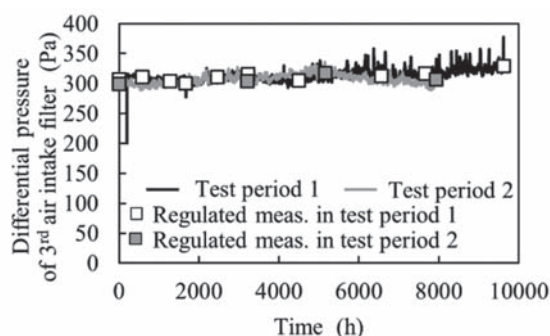
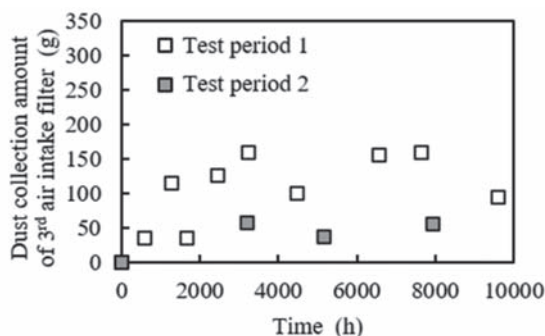
(a) 1st air intake filter(a) 1st air intake filter(b) 2nd air intake filter(b) 2nd air intake filter(c) 3rd air intake filter(c) 3rd air intake filter

Fig. 5 Differential pressure of each filter over time in continuous ventilation tests conducted intermittently during the test periods

Fig. 6 Dust collection amount of each filter over time in continuous ventilation tests conducted intermittently during the test periods

Fig. 2に示したSPMおよびPM_{2.5}の質量濃度と、Fig. 4に示した大気塵の個数濃度 n_k の平均値を用いて、式(9)～式(21)とFig. 7に示した平均粒子捕集率 η_{ck} により、各吸気フィルタの捕集量 m を随時推定した結果をFig. 8に示す。試験期間2に対しては、Fig. 3に示したSPMおよびPM_{2.5}の各月の質量濃度の過去3年間の平均データと、Fig. 4に示した大気塵の個数濃度 n_k の平均値を用いて、試験期間1で計測した各吸気フィルタの粒子捕集率 η_{ck} から同様に各吸気フィルタの捕集量 m を予測した結果を合わせてFig. 8に示す。さらに、Fig. 6に示した吸気フィルタの質量変化から計測した捕集量を合わせてFig. 8に示す。但し、3次フィルタについては、乾燥剤を用いた捕集量の計測結果のみを示す。両試験期間において、随時推定した各吸気フィルタの捕集量 m と、吸気フィルタの質量変化から計測した捕集量は概ね一致することを確認した。したがって、吸気フィルタが吸引する大気の

SPMおよびPM_{2.5}の質量濃度を用いることで、式(9)～式(21)により、運転中の吸気フィルタの捕集量 m を推定することができる。1次フィルタおよび2次フィルタで推定した捕集量は、試験期間1及び試験期間2の捕集量の大小関係を概ね示しており、Fig. 5に示した各試験期間における差圧の上昇傾向の違いとも連動している。また、SPMおよびPM_{2.5}の各月の質量濃度の過去3年間平均データから予測した各吸気フィルタの捕集量 m は、2次フィルタでは推定した捕集量とほぼ同等であったが、1次フィルタ、3次フィルタでは多少乖離が生じた。これはFig. 2に示した通り、試験期間2におけるPM_{2.5}の質量濃度が過去3年間の傾向よりも低かったためと考えられる。一方で、予測した捕集量と推定した捕集量は、いずれも吸気フィルタの質量変化から計測した捕集量と概ね一致している。このことから、各月のSPMおよびPM_{2.5}の過去の質量濃度の平均値を用いることで、式(9)

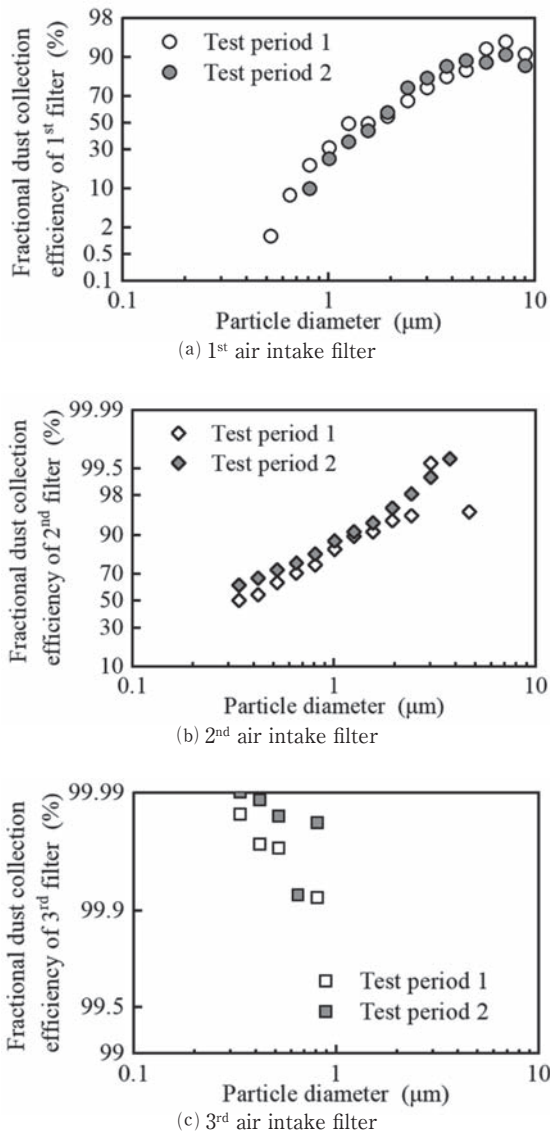


Fig. 7 Dust collection efficiency of each filter over time in continuous ventilation tests conducted intermittently during the test periods

～式(21)により、吸気フィルタの捕集量 m の予測が可能であると考えられる。

5.2 吸気フィルタの差圧と捕集量の関係の導出

試験期間 1 に対して、Fig. 5 に示した差圧 Δp_m の経時変化と、Fig. 8 に示した各吸気フィルタの捕集量 m の推定値の経時変化から、各吸気フィルタの差圧と捕集量の関係を整理した結果を Fig. 9 に示す。また、Fig. 9 に示した差圧と捕集量の関係から、差圧上昇係数 ω および差圧上昇指数 γ を最小二乗法で推定し、式(8)で吸気フィルタの差圧 Δp_m を推定した結果を合わせて Fig. 9 に示す。2 次フィルタと 3 次フィルタにおけるスパイク状の差圧上昇を除いて、式(8)で求めた各吸気フィルタの差圧 Δp_m と捕集量 m の関係は、試験期間 1 の実測値とよく一致した。

試験期間 2 の初期差圧 Δp_0 と、試験期間 1 で求めた各吸気フィルタの差圧上昇係数 ω および差圧上昇指数 γ を

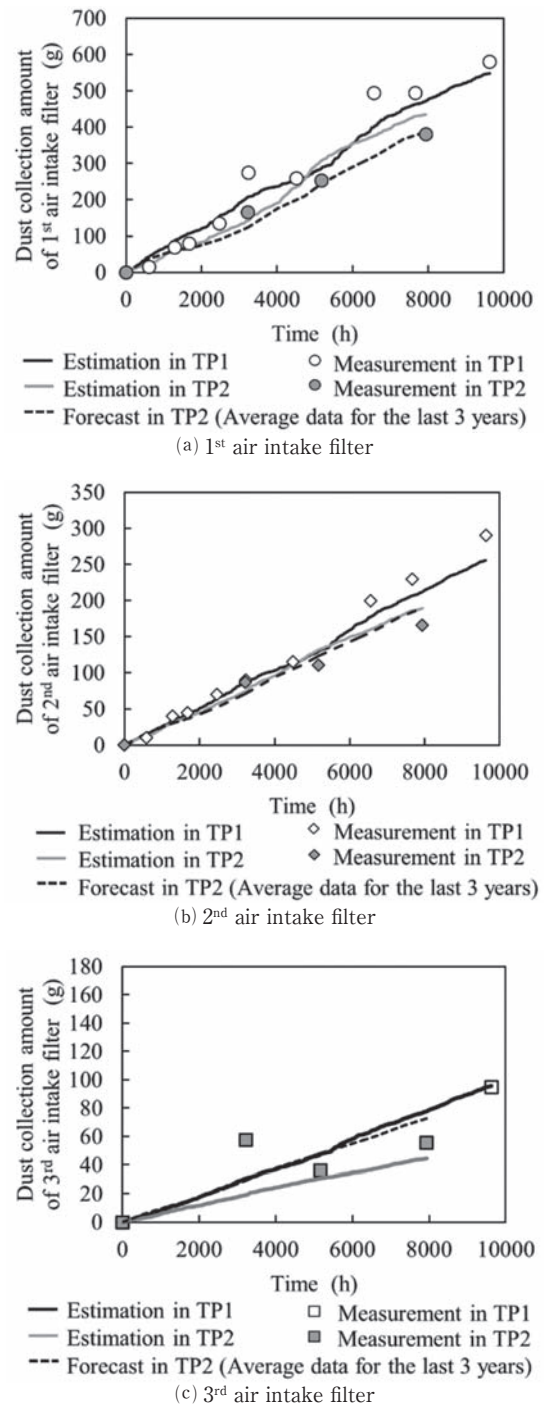


Fig. 8 Estimation of dust collection amount of each filter continuous ventilation tests conducted intermittently during the test periods (TP1: Test period 1, TP2: Test period 2)

用いて、式(8)から試験期間 2 の差圧上昇を予測した結果を Fig. 10 に示す。また、Fig. 9 と同様に、試験期間 2 における各吸気フィルタの差圧と捕集量の関係を整理した結果を合わせて Fig. 10 に示す。試験期間 2 における各吸気フィルタの差圧 Δp_m の予測結果は、試験結果と概ね一致している。したがって、同じ型式の吸気フィルタを測定値と同じ場所で使用するのであれば、差圧上昇係数 ω と差圧上昇指数 γ は一定として差圧と捕集量の関係

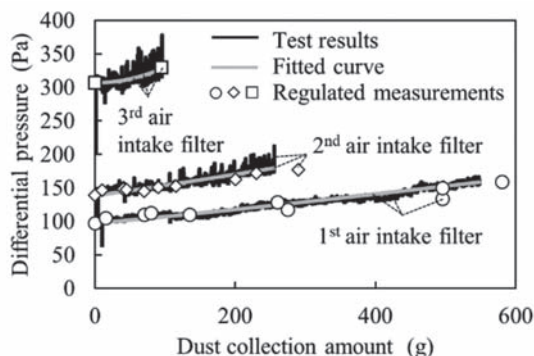


Fig. 9 Relationship between the differential pressure and the dust collection amount of each filter in test period 1

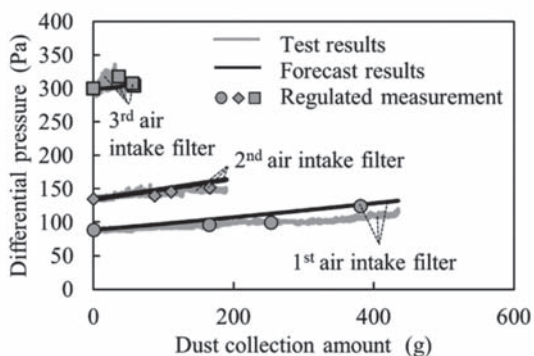


Fig. 10 Relationship between the differential pressure and the dust collection amount of each filter in test period 2

を導出することができる。導出した差圧と捕集量の関係に、式(9)～式(21)で予測した捕集量 m を用いることで、差圧 Δp_m の予測が可能である。

6. まとめ

本研究では、GT用吸気フィルタの粒子捕集率と大気塵の質量濃度に関する公開データから吸気フィルタの捕集量を推定する手法を考案した。また、単分散粒子の差圧推定手法を基に、多段構成であるGT用吸気フィルタの差圧上昇を推定する手法を考案した。考案した手法を、GTと同一構成の吸気フィルタセットに対して、連続通風させる試験に適用して検証したところ、以下の知見を得た。

SPMとPM2.5の質量濃度の公開データと粒子径範囲毎の個数濃度から、粒子径範囲毎の質量濃度を推定し、吸気フィルタの粒子捕集率から、吸気フィルタの捕集量を推定した。推定した捕集量を試験結果と比較したところ、概ね一致することを確認した。また、直近のSPMとPM2.5の各月の質量濃度の平均値を用いて、予測した吸気フィルタの捕集量も試験結果と概ね一致した。したがって、本手法により、吸気フィルタの捕集量を予測することが可能である。

吸気フィルタの初期差圧、差圧上昇係数および差圧上昇指数を用いて、吸気フィルタの差圧と捕集量の関係を整理したところ、試験結果とよく一致した。

差圧上昇係数および差圧上昇指数を把握した測定地と同じ場所で同じ型式の吸気フィルタを使用する場合、差圧上昇係数と差圧上昇指数は概ね一定となる。したがって、予め吸気フィルタの使用環境における差圧上昇係数と差圧上昇指数を把握しておくことで、吸気フィルタの捕集量を基に差圧の予測を可能とした。

GTの吸気フィルタの運用に本手法を適用する際の課題として、より長期間の吸気フィルタの差圧上昇の推定が挙げられるとともに、2次フィルタや3次フィルタに生じるスパイク状の差圧上昇を予測する手法を検討する必要がある。

参考文献

- (1) 三浦千太郎, ガスタービンにおける吸気フィルタ総論—吸気浄化技術へのユーザーの取り組みと実績—, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 25, No. 99 (1997), pp. 3-10.
- (2) 藤井智晴, 尾関高行, ガスタービン用吸気フィルタの保守管理の実態調査. 電力中央研究所報告 M13008. (2014).
- (3) 金子清隆, 岩間秀司, 寺澤秀彰, 自家発電設備用ガスタービンの吸気系改善事例 (日本ガスタービンユーザー会), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 42, No. 3 (2014), pp. 166-173.
- (4) 金岡千嘉男, フィルタ性能の経時変化, エアロゾル研究, vol. 4, No. 4 (1989), pp. 256-264.
- (5) 坂野健夫, 大谷吉生, 並木則和, 江見準, 単分散粒子に対する中性能繊維層フィルタ集塵性能の経時変化予測, エアロゾル研究, vol. 17, No. 3 (2002), pp. 185-190.
- (6) 環境省大気汚染物質広域監視システム (そらまめくん) <<https://soramame.env.go.jp/>>, (参照日2021年8月23日).
- (7) 渡辺征夫, 遠藤治, 後藤純雄, 田辺潔, 溝口次夫, 松下秀鶴, β 線吸収法とハイボリュームエアサンプラー法による都市大気中の浮遊粉塵の測定値の比較—東京の2監視局での10年間にわたる間欠測定調査より—, 環境化学, Vol. 10, No. 3 (2000), pp. 557-572.
- (8) L.C. Kenny, R. Gussman and M. Meyer. Development of a Sharp-Cut Cyclone for Ambient Aerosol Monitoring Applications. Aerosol Science & Technology. Vol. 32, No. 4 (2010), pp. 338-358.
- (9) 兼保直樹, 大気中の汚染物質に関する法規則と研究の現状, 第31回環境工学連合講演会講演論文集, (2018), pp. 21-24.

ジルコニア系連続繊維を強化繊維とする酸化物系CMCの開発 (2)

Development of Oxide/Oxide Composites Using Continuous Zirconia Fiber as a Reinforcement (2)

長谷川 良雄^{*1}
HASEGAWA Yoshio秦 青^{*1}
QIN Qing鉄井 利光^{*1}
TETSUI Toshimitsu久保田 勇希^{*2}
KUBOTA Yuki

ABSTRACT

Development of the ceramics matrix composites (CMC) which can be used at higher temperature than SiC/SiC composites is being advanced. It is expected that oxide/oxide composites bring performance improvements of a jet engine. In this research, using improved C-coated continuous zirconia fibers as reinforcements, CMCs with BaZrO₃-matrix or YSZ-matrix were prepared. Mechanical characterization and structural analysis of CMCs heat-treated over 1400°C to increase the sinterability of the matrix were performed to investigate the effect of fiber and matrices soundness on CMC properties. And, by evaluation of the super environment resistance of CMCs, the practicability of oxide-oxide composites was examined.

キーワード：ジェットエンジン, ジルコニア連続繊維, 酸化物系複合材料, ジルコニア系マトリックス, 機械的特性, 耐環境性

Key words : Jet Engine, Continuous Zirconia Fiber, Oxide/Oxide Composites, Zirconia Matrix, Mechanical Property, Super Environment Resistance

1. はじめに

金属材料では使用困難な高温部位用の耐熱材料としてセラミックス基複合材料 (CMC) の開発が長年進められており, 2002年にSiとCの比率を化学量論組成に近づけ結晶性を高めたSiC繊維が開発されると, 高温でも十分な耐久性を示す高性能なCMCが開発され, CFM International社製LEAPエンジンにCMC製シュラウドが採用された。このエンジンは, エアバスA320neo, ボーイング737maxなど新型の狭胴型航空機に搭載され, 2016年から運用が開始され, 2020年には, エンジン生産台数は, 延べ3000基を超えている⁽¹⁾。しかしながら, SiC/SiCは, 高温強度は良好であるが, 酸化するため耐環境性には限界があり, 最高使用温度は1400°C程度にとどまっている。更なるジェットエンジンの性能向上には, より高温で使用できるセラミックス基複合材料の開発が必要である。

1400°Cを超える超高温域においては, 本質的に耐環境性が良好な酸化物系材料の適用が考えられ, 例えば, アルミナ系複合材料の研究開発が進められている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾が,

改良されたとは言え, 繊維そのものの耐熱性が1200°C程度であり, 1100°Cでの引張り強度170MPa程度が得られているに過ぎない。より高温では強度が大幅に低下するため, 超高温部位への使用には適さない。このような状況を解決するため, アルミナ系より耐熱性が期待できるジルコニア系複合材料の開発が進められてきた。

筆者らは, すでにこれまでの研究において, BaZrO₃の超高温強度が従来の酸化物と較べると著しく高いことを見出しており⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾, BaZrO₃をマトリックスとする大幅な耐熱性向上が期待できる酸化物系複合材料を開発することを目的として研究開発を進めている。

その第一歩として, 強化繊維として期待されているにもかかわらず, いまだ工業的に生産されていない超耐熱性ジルコニア連続繊維の開発を行い, 高温での結晶成長を抑制できる易紡糸性の前駆体ポリマーの乾式紡糸法により, 連続繊維の量産化のための基本プロセスを開発し報告した^{(9),(10)}。開発中のジルコニア連続繊維も, 1300°C程度以上では強度の下が起ることなどの課題の克服が十分できてはいないが, CMC強化繊維として用いるためのジルコニア連続繊維量産の基本プロセスの開発ができたこと, さらに, 複合化に必須の効果的な界面層を, 繊維表面に炭素をコーティングすることで形成し, 最終的にこれを焼失させて生成させるギャップを利用する界面層の効果を, 一次元強化複合材料 (1D-CMC) であるミニコンポジットを作製し確認できた^{(9),(10)}。さらに BaZrO₃あるいはY₂O₃安定化ジルコニア (YSZ) 微粉末

原稿受付 2022年10月21日

査読完了 2023年6月22日

*1 国立研究開発法人物質・材料研究機構 構造材料研究拠点
〒305-0047 つくば市千現1丁目2-1
E-mail: HASEGAWA.Yoshio@nims.go.jp

*2 (株)IHIエアロスペース
〒370-2307 富岡市藤木900
E-mail: yuki-kubota@iac.ihi.co.jp

スラリーとYSZ前駆体ポリマーを用いるポリマー含浸焼成法 (PIP法) により作製したミニコンポジットの曲げ強度の測定により, BaZrO_3 をマトリックスとするミニコンポジットで室温曲げ強度200MPaを達成した^{(10),(11)}。

本研究では引き続き1D-CMCの作製を行い, PIPプロセスの最適化を行い, さらに二次元強化複合材料 (2D-CMC) を作製し, 強度測定, 構造解析により, 繊維および界面層の健全性, さらに, マトリックスの焼結性と特性の関係を調べた。耐環境性評価結果と合わせて, 酸化物系CMCの実用性を検討した結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 ミニコンポジットの作製

ジルコニア連続繊維は, すでに報告した前駆体ポリマーの乾式紡糸法で得られた繊維を使用した⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。

使用した繊維は, 各金属アルコキシドを原料として合成した繊維前駆体ポリマーの組成, 添加元素 (M) の種類と, さらに各元素のZrに対する原子数比を () 内に記載して, $\text{Zr-M1 (M1/Zr)} \cdot \text{M2 (M2/Zr)} \cdot \text{M3 (M3/Zr)}$ と表記した。前報⁽¹¹⁾で報告した, SiCを生成するポリカルボシラン (PCS) を添加した前駆体から合成した Y_2O_3 安定化ジルコニア繊維は, $\text{Zr-Y (Y/Zr)} \cdot \text{PCS (Si/Zr)}$ のように表記した。

使用した繊維の焼成条件と室温引張強度をTable 1に示す。各ジルコニア系繊維径はいずれも $10\mu\text{m}$ 程度を示しており, 引張強度も各繊維間で著しい差はない。CMCの強化繊維として, クリープ試験を含む引張試験用1D-CMCとエロージョン試験用2D-CMCについては $\text{Zr-Y (0.1)} \cdot \text{Al (0.1)} \cdot \text{Si (0.1)}$ を用いた。曲げ試験用には3種類の繊維をそれぞれ用いて1D-CMCをほぼ同数本作製し, 区別することなく評価に用いた。Type S (NGSアドバンストファイバー (株) 製Hi-Nicalon Type S)⁽¹¹⁾は比較用として用いた。

合成したジルコニア系繊維束を用いて, 一次元強化複合材料であるミニコンポジット (1D-CMC) を既報⁽¹¹⁾のFig. 1に示した方法で作製した。

Table 1 The calcination conditions and the tensile strengths of fibers as reinforcements

Fiber	Calcination temperature/ $^{\circ}\text{C}$ (atmosphere)	Fiber diameter / μm	Tensile strength/GPa
$\text{Zr-Y (0.1)} \cdot \text{Al (0.1)} \cdot \text{Si (0.1)}$	1000 (Air)	10.91	1.11
$\text{Zr-Y (0.1)} \cdot \text{Al (0.1)} \cdot \text{PCS (0.1)}$	1000 (N_2)	9.08	1.01
		8.75	1.20
		8.06	1.25
		8.28	1.15
$\text{Zr-Y (0.1)} \cdot \text{PCS (0.05)}$	1000 (Ar)	10.64	0.95
Type S	—	12.49	3.18

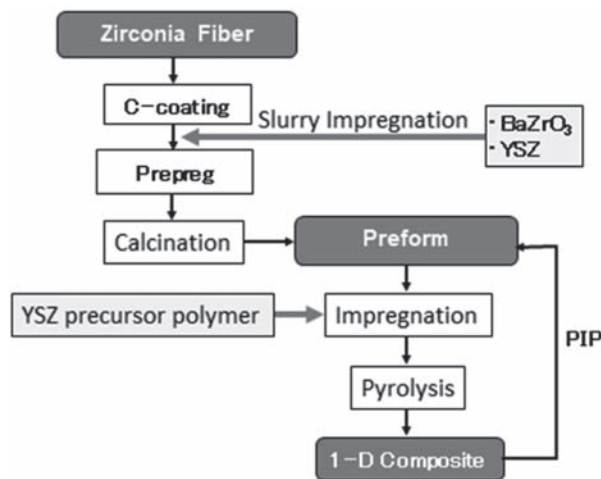


Fig. 1 Fabrication process of CMC

まず, マトリックスと繊維表面との強固な結合を起こさないようにするためのC界面層形成のため, 繊維表面に炭素コーティングを, ヘキサンバブルフロー法⁽⁸⁾で行った。すなわち, 窒素ガスを $150\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ でヘキサン中にバブリングさせ発生させた飽和ヘキサン蒸気を, $150\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ の窒素ガスで希釈しながら管状炉中の繊維束に導入し, 1000°C で1時間保持して繊維表面にCコーティングを実施した。C層の生成状態はSEM観察により確認した。

次に, C界面層を付与したジルコニア系繊維束に, BaZrO_3 (ニッキ (株) 製ZB-103JM-A) あるいは8 mol% Y_2O_3 安定化 ZrO_2 (8YSZ) 微粉末 (スターファイヤー社製SL-455) を, 前者は60wt%, 後者は75wt%になるように調製したスラリーを繊維束に含浸させ, 直径2 mm, 長さ約100mmの丸棒に成型した。スラリー調製のための分散媒は, BaZrO_3 については, 5 mol% Y_2O_3 を含有するように分子設計して合成した5YSZ前駆体ポリマーの50wt%キシレン溶液, 8YSZについては水を用いた。

成型プロセスは, Fig. 2に示したように, 内径2 mm, 長さ100mmのアルミナチューブへの引込成型で行い, 乾燥後, Arガス雰囲気中, 1000°C で焼成した後, アルミナチューブを除去してプリフォームとした。

また, 長さ200mmのアルミナチューブを用いて, 直径2 mm, 長さ約200mmの丸棒も作製した。

その後, 5 mol% Y_2O_3 を含有するように分子設計して合成した5YSZ前駆体ポリマーの80wt%キシレン溶液を用いて前駆体の含浸と焼成を行うPIP (Polymer Impregnation and Pyrolysis) 法で一次元強化CMCであるミニコンポジット (1D-CMC) を作製した⁽¹¹⁾。減圧下で前駆体溶液を含浸させた後, 85°C の飽和水蒸気雰囲気中で0.5時間前駆体のゲル化を促進させ乾燥する工程を4回繰り返したのち焼成するプロセスを2回繰り返す方法で, ミニコンポジット内部に5YSZ前駆体から生成するマトリックスを形成させた。焼成温度は 1000°C とした。また, 焼成雰囲気はすべてAr雰囲気とし, 1D-CMC中

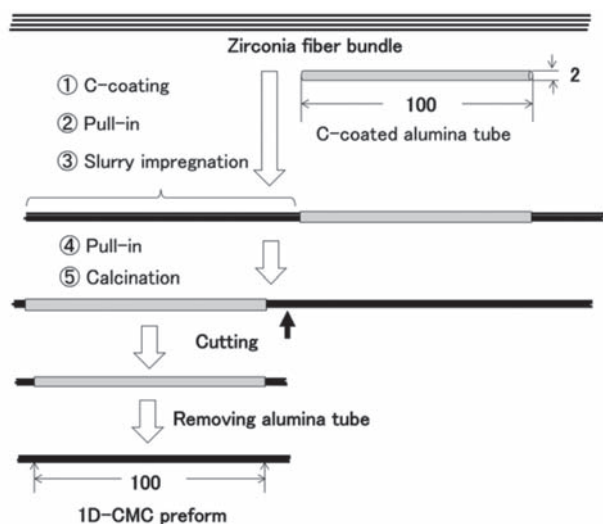


Fig. 2 Fabrication process of 1D-CMC preform

にごくわずかに炭素を残留させた。本検討では、焼成後にもC界面層を残し、繊維と同様マトリックス化した前駆体中にも炭素を残留させ結晶化を抑制し、すなわちマトリックスの焼結に伴うクラックの生成の抑制を行った。本検討では1000℃で生成するミニコンポジットの基本的特性をまず確認し、その後、後述する耐環境性評価のためにより高温での焼成を行った。

ジルコニア系ミニコンポジットは、プリフォーム作製時に用いたマトリックス用微粉末、BaZrO₃、8YSZに関連付けて、それぞれCMC(ZB)、CMC(YSZ)と呼ぶ。

また、比較用にType Sを用いて1D-CMC(SiC/SiC)を作製した。C界面層を付与後、SiC微粉末(株ニラコ製SiC粉末(<0.5 μm))とNGSアドバンストファイバー(株)製ポリカルボシラン、PCS-UH、の50%キシレン溶液から調製したSiC微粉末濃度50wt%のスラリーを用いてプリフォームを作製した後、45%PCS-UH/キシレン溶液によるPIPプロセスを6回繰り返すことにより作製した⁽¹²⁾。焼成はすべて、Ar雰囲気中で1000℃とした。以後、Type S/SiCと呼ぶ。

さらに、ジルコニア繊維強化/SiC複合材料として、本研究のジルコニア系連続繊維を用い、マトリックスをType S/SiCと同様にSiCとした1D-CMCも作製し、1D-CMCにおよぼすマトリックスの影響の検討用とした。以後、CMC(SiC)と呼ぶ。

2.2 二次元強化複合材料の作製

1D-CMCの作製で最適化した条件で、二次元強化複合材料(2D-CMC)の作製を、Table 1のZr-Y(0.1)・Al(0.1)・Si(0.1)を前駆体とする大気中、1000℃焼成繊維を用い、基本的にはFig. 1の方法で行った。

ジルコニア繊維束を200tex程度に調整し、1D-CMC用の炭素コーティングと同様の条件で、炭素コーティングを行い、これを平織りを模擬した0°/90°に配列したのち、スラリーを塗布含浸後、3枚をバギング法で積層し、プリプレグとした。スラリーは、BaZrO₃または8 mol%

Y₂O₃安定化ZrO₂(8YSZ)を用い、ミニコンポジット用スラリーと同様の方法で調製した。

その後、プリプレグをSUS製の治具で挟んで厚さ2.5mmあるいは3mmのスペーサーを用いてその厚さまで加圧固定して、真空中1200℃まで200℃・h⁻¹で昇温し、1時間熱処理してプリフォームとした。使用するジルコニア系繊維は、1300℃以上では強度が低下してしまうため^{(9),(10)}、焼成温度は1200℃とした。その後、1D-CMCと同様の方法で、5YSZ前駆体ポリマーを用いたPIP法により、真空中1200℃で熱処理を繰り返して緻密化した。

Fig. 3に、2D-CMC製造プロセスの概略を示す。

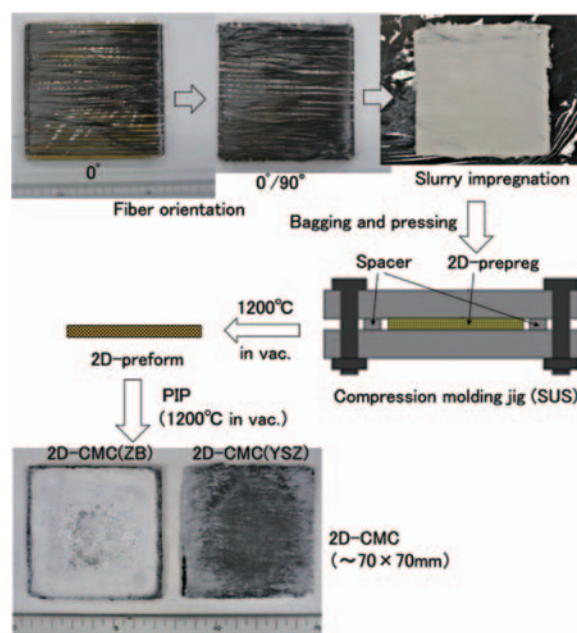


Fig. 3 Fabrication process of 2D-CMC

2.3 複合材料の評価方法

得られたミニコンポジットの評価は、基本特性として、室温での3点曲げ試験、引張試験、断面のSEM観察で、強度と繊維の引き抜けの有無の関係などを評価することで行った。

3点曲げ試験は、支点間距離40mmで、クロスヘッド移動速度0.5mm・min⁻¹で行った。

引張試験は、Fig. 4に示すようなアルミ製タブ付き引張り試験片⁽¹³⁾を作製し、チャック間距離40mm、クロスヘッド移動速度2 mm・min⁻¹で行った。

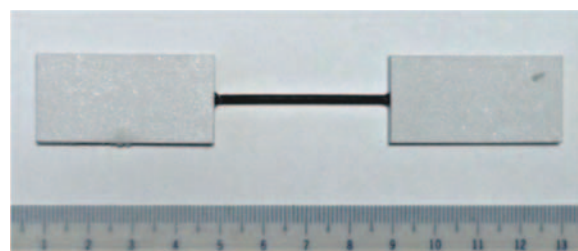


Fig. 4 Tensile test piece with aluminum tabs

耐環境性評価は、ミニコンポジットについては、1000℃で焼成したものを、さらにAr中、1400℃あるいは1500℃で0.5時間処理したものを用い、以下の評価を行った。

高温曲げ試験は、JFCCのインストロン社製万能強度試験機4507を用いて、大気中、室温および1200℃、1400℃、1500℃で、支点間距離30mm、クロスヘッド移動速度0.5mm・min⁻¹で3点曲げ試験を行った。

酸化雰囲気暴露試験は、JFCCの(株)モトヤマ製SUPER BURN SBH-2025で酸化雰囲気暴露を行った。暴露条件は大気中、10℃・min⁻¹で1400℃あるいは1500℃まで加熱し、1時間保持とした。

水蒸気雰囲気暴露試験は、Fig. 5に示すJFCCの熱処理装置により、1400℃あるいは1500℃で、80vol%H₂O + 20vol%Ar雰囲気中で1時間暴露して行った。昇降温は昇温速度5℃・min⁻¹とし、Ar雰囲気下で行った。

これら雰囲気暴露後の試料は、質量変化の評価と、上記の室温曲げ試験、引張試験、およびSEMによる観察を行った。

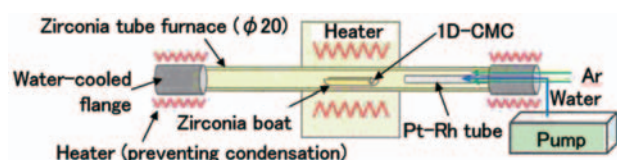


Fig. 5 Apparatus for water vapor exposure test

クリープ試験は、Fig. 4に示したアルミ製タブ付き試験片を、約200mmのミニコンポジットを用いてチャック間距離>120mmになるように作製し、JUTEMの極超高温疲労試験機2号機 (INSTRON社製 8502型) および東伸工業(株)製局部加熱炉を用いて行った。試験は大気中で、昇温速度20℃・min⁻¹で1000、1200あるいは1400℃まで加熱し、試験荷重約20N～40Nで実施した。

以上の1D-CMCに関する評価結果を用い、繊維の耐熱性、マトリックスの焼結性および界面層の健全性と特性の関係を調べ、耐環境性、実用性の可能性について検討した。

2D-CMCに関しては、エロージョン試験を、JUTEMの石川島播磨重工業(株)製エロージョン試験機を用い、超高温に加熱したプラズマ状のガスを高速で供試体に吹き付けて材料表面の損耗を評価した。試験条件は、直流アーク加熱 (20KW) で、窒素流量40L・min⁻¹、酸素流量40L・min⁻¹、ノズル (φ75) からの距離50mm、温度は、2D-CMC(ZB)は1963℃、2D-CMC(YSZ)は1846℃で、照射時間は180秒とした。

また、マトリックスの焼結の程度確認と、2D-CMCのエロージョン試験の比較用として、BaZrO₃焼結体を作製した⁽⁷⁾。造粒粉を金型を用いて縦横 50mm厚さ 3mmの平板に一軸成形し、CIP成形後、1000–1750℃で焼成した。得られた成型体の相対密度測定を行い、エ

ロージョン試験に供した。さらに、Type Sの8枚朱子織織布 (NGSアドバンスファイバー(株)製) を用いた、2D-Type S/SiCも作製し、比較用のエロージョン試験を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 ミニコンポジットの基本特性

本研究のミニコンポジット作製方法は、Fig. 1およびFig. 2に示した方法で作製し、室温での曲げ強度は、C界面層を付与した場合、200MPaを示す可能性が確認されている⁽²⁾。本研究では、室温での曲げ強度とともに引張強度の測定を行い、1D-CMCの強度発現メカニズムを精査した。

まず、1000℃焼成後の試料をより高温で再焼成したミニコンポジットについて引張試験を行い検討した。結果を、Type S/SiCと比較してTable 2に示す。CMCの繊維の体積含有率、 V_f は、使用した繊維の質量を繊維の密度で除して求めた繊維体積を、得られたCMCの最終的な寸法から算出した体積で除して求めた。

Table 2 The heat-treatment temperature and the tensile strengths at room-temperature of 1D-CMCs

1D-CMC	Heat-treatment temperature/℃ (Atmosphere)	V_f	Tensile Strength/MPa
CMC(ZB)-30	1000 (Ar)	0.24	19.1
CMC(ZB)-31	1400 (Ar)	0.27	175.3
CMC(YSZ)-34	1000 (Ar)	0.32	78.4
CMC(YSZ)-36	1400 (Ar)	0.30	86.6
Type S/SiC	1000 (Ar)	0.31	329.0

Fig. 6に、引張り試験の応力-歪曲線を示す。Fig. 7にはType S/SiCの応力-歪曲線を示す。

Fig. 6のジルコニア系ミニコンポジットの引張り強度は、CMC(ZB)-30以外は80MPa程度以上の値を示した。CMC(ZB)-30の応力-歪曲線は、繊維間のマトリックスの焼結が十分ではなく強度が発現できていないことを示唆している。その他の試料については、Type S/SiCの引張り強度が300MPa以上の値を示し、すでに報告している曲げ強度670MPa以上の値⁽²⁾との比較から、やはり、曲げ強度は200MPa程度には達していることを示している。特に、1400℃処理試料では、いずれも1000℃処理の場合より引張強度は増加しており、CMC(ZB)-31では顕著で、曲げ強度は300MPaに達すると予想できる。

Fig. 8には各試験片の強制破面のSEM写真を示した。これらの結果から、1000℃処理1D-CMCの場合は、繊維の引き抜けは明瞭に観測され、繊維の劣化も見られないが、マトリックスの焼結は不十分であることがわかる。これが、引張試験において低強度であることの原因と考えられる。一方、1400℃処理試料では、1000℃処理試料と比べ、マトリックスの焼結は進んでいるように

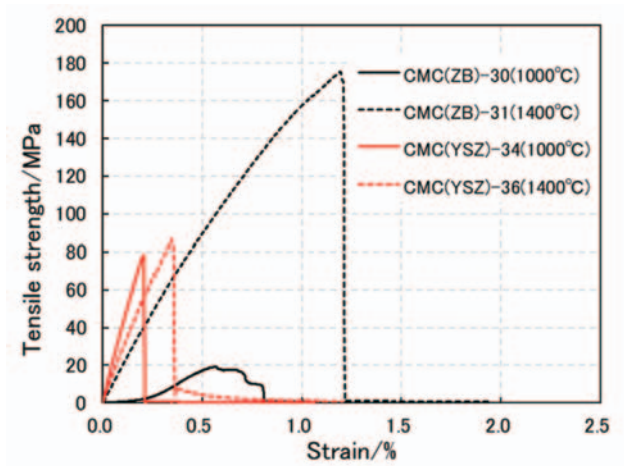


Fig. 6 Stress-strain curve of 1D-CMC

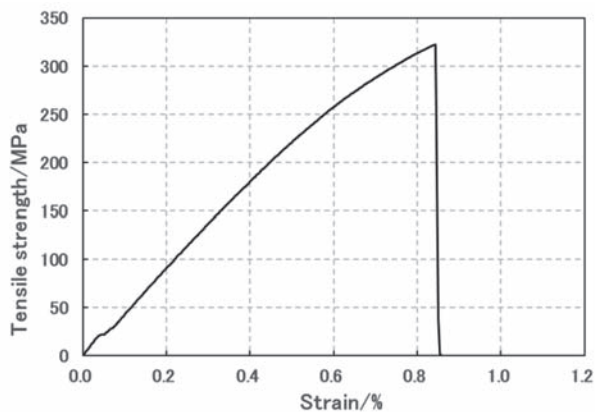
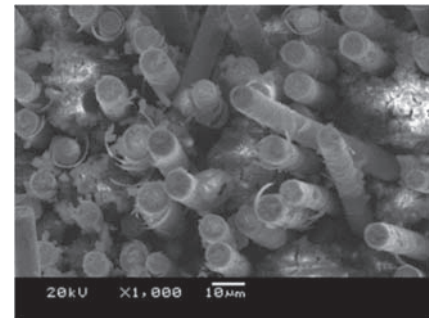


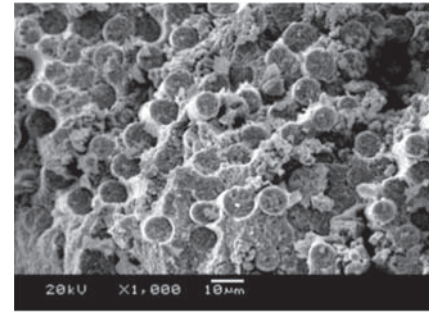
Fig. 7 Stress-strain curve of Type S/SiC

見える。特にCMC(ZB)-31(1400°C)では顕著である。しかも、CMC(ZB)-31(1400°C)の繊維は繊維中に気孔が生成しているように見え、劣化していることが明瞭である。したがって、この試料が最も大きな引張強度を示したということは、1D-CMCの強度に対するマトリックスの焼結が大きく影響していると考えることができる。一方、CMC(YSZ)-36(1400°C)の場合は繊維の劣化は明確に観測されていないが、CMC(ZB)-31(1400°C)のような強度の向上が見られないのは、YSZマトリックスの焼結が進んでいないからであると推察できる。

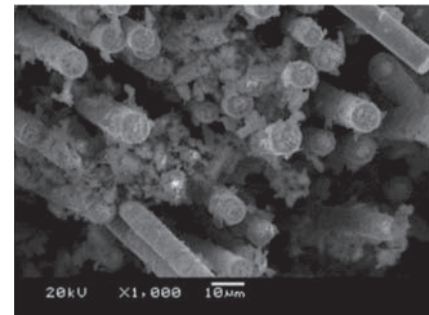
また、比較のためにジルコニア系繊維を強化繊維として、Type S/SiCと同様にマトリックスをSiCとしたCMC(SiC)-21(1000°C)の場合には、 V_f が0.15程度にもかかわらず200MPaには達しないものの115MPa程度の曲げ強度を示し、やはりマトリックスの焼結の程度が強度に大きく影響することを示した (Fig. 8)。これらの結果は、CMC(ZB)-31(1400°C)がType S/SiCと同様の非脆性的な破壊挙動である応力-歪曲線を示し、破断面において繊維の引き抜けも起きていることから、高強度化がマトリックスの緻密化で向上できれば、高靱性酸化物系CMCの実現の可能性があることを示している。



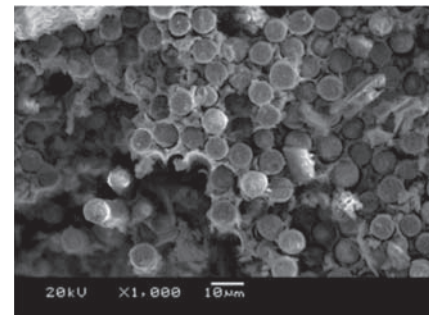
CMC(ZB)-30(1000°C)



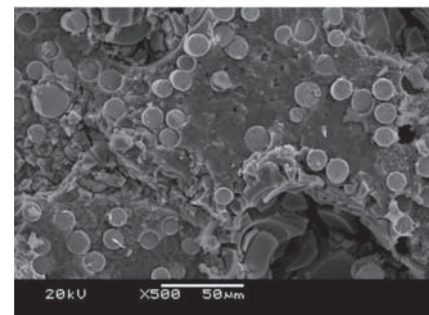
CMC(ZB)-31(1400°C)



CMC(YSZ)-34(1000°C)



CMC(YSZ)-36(1400°C)



CMC(SiC)-21(1000°C)

Fig. 8 SEM photographs of fracture surfaces of zirconia fiber 1D-CMCs heat-treated at 1000°C and 1400°C

3.2 ミニコンポジットの高温暴露特性

上述したように、特にBZ系ではミニコンポジット作製時の最終熱処理温度の上昇に伴い強度の増加が確認された。そこで、1000℃で焼成された1D-CMCについて、さらに高温で熱処理を行った試料の室温曲げ試験を行うとともに、高温暴露後の質量変化を観測し、耐環境性も評価した。Table 3に1D-CMCの最高暴露温度、雰囲気、質量変化および室温曲げ強度を示す。

Table 3 The flexural strengths at room-temperature of 1D-CMCs after exposure test at high temperatures in various atmospheres

ID-CMC	V _f	Exposure temperature/℃ (Atmosphere)	Mass change rate / %	Flexural strength / MPa
CMC(ZB)-8	0.14	1000 (Ar)	-	34
CMC(ZB)-24	0.22	1300 (Ar)	-0.04	35
CMC(ZB)-25	0.20	1350 (Ar)	-0.72	45
CMC(ZB)-27	0.14	1400 (Ar)	-2.18	31
CMC(ZB)-29	0.15	1450 (Ar)	-3.46	41
CMC(ZB)-32	0.27	1500 (Ar)	-2.67	252
CMC(ZB)-14	0.12	1400 (Air)	-2.18	77
CMC(ZB)-15	0.11	1500 (Air)	-2.48	121
CMC(ZB)-16	0.12	1400 (Water vapor)	-2.88	65
CMC(ZB)-18	0.12	1500 (Water vapor)	-2.35	139
CMC(YSZ)-10	0.11	1000 (Ar)	-	71
CMC(YSZ)-43	0.25	1500 (Ar)	-2.48	32

曲げ強度 σ は、ミニコンポジットの断面がほぼ真円であり、以下の式より算出した。

$$\sigma = 8LF / (\pi D^3)$$

ここで、Lは支点間距離、Fは試験片が破壊したときの最大荷重である。

これらの暴露試験後の1D-CMCの室温における曲げ強度の測定結果から、マトリックスにBaZrO₃および5YSZ前駆体ポリマーの熱分解物を使用した場合、1500℃でいずれの雰囲気でも強度が著しく増加することが分かった。一方、マトリックスに8YSZ粉末のスラリーを用いた場合には、1500℃での強度の増加は観測されなかった。Ar雰囲気での高温暴露後の曲げ強度変化と密度変化をFig. 9に示す。大気および水蒸気暴露では、Table 3に示すように、1400℃ですでに強度増加が観測されている。この理由は、Fig. 10に示したように、BaZrO₃成型体は1000℃以上で徐々に焼結が進み、1500℃で相対密度がほぼ80%に達していることが確認できたこととよく一致する。すなわち、BaZrO₃をマトリックス中に含有するCMCで曲げ強度が増加するのは、マトリックス強度が増加するためと推定される。一方、8YSZの場合は、おそらく焼結温度がより高温側にシフトしているため、まだ強度増加が起こっていないものと推定される。

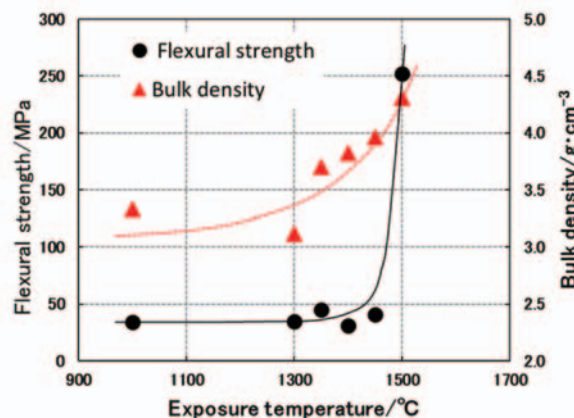


Fig. 9 The flexural strength and bulk density of 1D-CMCs heat-treated up to 1500℃ in Ar atmosphere

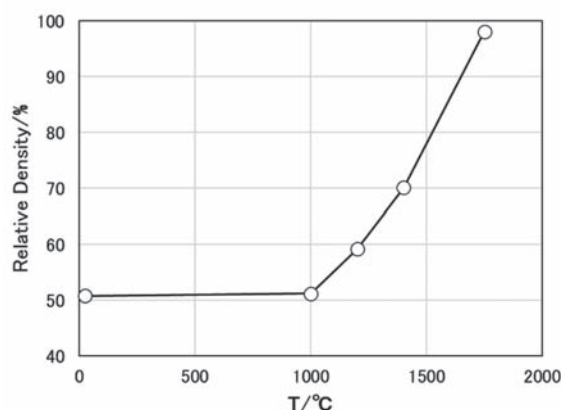


Fig. 10 The relationship between the relative density and the heat-treatment temperature of BaZrO₃ compact in air

これらの結果は、Fig. 6の引張り強度の増加とも矛盾しない。応力-歪曲線は、既に報告している1000℃焼成のミニコンポジットと同様^[11]に非脆性的な破壊挙動を示し、破断面では繊維の引き抜けも起きており、上述した通り高靱性酸化物系CMCの実現の可能性を確認できた。すなわち、1D-CMC(ZB)で示されたように、現状のCMCでは、まずマトリックスの焼結性を高めることが高強度CMCの実現にとって重要である。質量変化の測定から、おそらく遊離の炭素による酸化物のわずかな還元反応以外はなく、耐環境性に優れていることも確認できた。

以上の結果から、1D-CMCの高温特性は、マトリックスの焼結の程度に依存することが示唆されたので、次に、高温曲げ強度と耐クリープ特性の評価を行った。

まず、上述したAr中1500℃で焼成し室温の曲げ試験で高強度を示した試料と同条件で作製したCMC(ZB)-33の、1400℃高温曲げ試験前後の外観を、Fig. 11に示す。この試料に限らず、いずれの試料も治具の圧子の荷重0.245N以下で破壊、あるいは湾曲し、その強度は5 MPa以下と推定された。破断せずに治具の最大変位まで湾曲する挙動は、ZB系およびYSZ系CMCの両方で、曲げ試験温度1200℃、1400℃、1500℃のいずれの温度でも確認

された。すなわちマトリックスの軟化による塑性変形が確認された。一方、マトリックスがSiCのCMC(SiC)では、1400℃処理後の試験片は1400℃での曲げ試験が可能となり、41.7MPaの曲げ強度を示した。しかしながら、マトリックスがSiCおよびCの結晶成長を起こす1500℃処理後の試料では圧子の荷重のみで湾曲し、塑性変形が起きた。これらの結果から、1D-CMCの軟化はマトリックスの結晶粒と界面構造に起因することは明らかである。

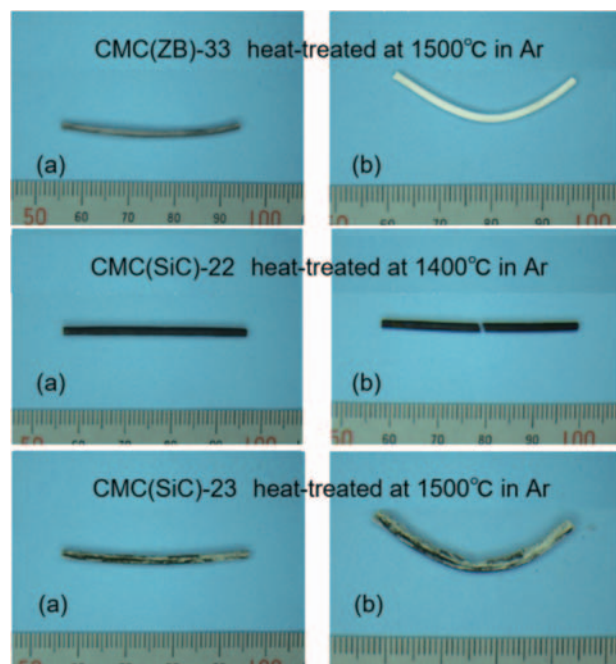


Fig. 11 The photographs of 1D-CMC (a) before and (b) after three-point bending tests at 1400℃ in air

1D-CMCの高温クリープ試験は、Table 4の条件で、長さ200mm程度で作製したミニコンボジット(1D-CMC-200)をFig. 4と同様にアルミ製タブを付加し行った。Table 4に示した以外のミニコンボジットの場合には試験開始前にタブから抜け落ちたり破断したため試験できなかった。荷重は、Fig. 6に示したように、CMC(YSZ)の室温引張試験で、比例限界応力が20MPa程度であったため、10～20MPaに相当する20あるいは40Nとした。

その結果、1000℃では20N、8.5MPaで10時間破断することなく応力負担でき、40Nでは荷重負荷数秒後で破断した。

したがって、1000℃までは複合材としての機械特性

Table 4 The results of creep tests for 1D-CMCs(YSZ) in air

1D-CMC	T/℃	Load/N	Time to rupture/h
CMC(YSZ)-200-06	1000	20	>10
CMC(YSZ)-200-10	1000	40	0.001
CMC(YSZ)-200-14	1400	20	0.001

を示すことが示唆されたが、1000℃、8.5MPa、10時間におけるひずみは0.4%となり、これはCMCとして非常に大きなひずみ量である。例えば、SiC/SiCの場合、0.4%ひずみを発生させるのに必要な条件として1200℃、110MPaでおおよそ1000時間となる^{(14),(15)}。

したがって、やはり本研究の1D-CMCの耐熱性が低い原因は、1D-CMCの軟化による塑性変形であり、マトリックスの焼結性不足、さらには繊維の耐高温特性が低いことにあると言える。この二点が今後の検討課題である。

3.3 二次元強化複合材料の耐エロージョン特性

Table 5にエロージョン試験結果を示す。BaZrO₃焼結体は、熱衝撃により割れて飛散してしまい測定不能であったが、2D-CMCについては測定可能であった。Fig. 12に示すように、1200℃で焼成されたZB系、YSZ系CMCは、試験温度がZB系では1900℃を超え、YSZ系では1800℃を超えているが顕著な表面損耗は確認されなかった。また、1600℃以上の温度域では、SiC系CMCはActive酸化により非常に激しい表面損耗が生じるが、ジルコニア系では高い耐損耗特性を示すことが分かった。

Table 5 The results of erosion tests for 2D-CMCs

2D-CMC	Surface temperature/℃	Weight loss/%	Erosion amount/mm
2D-CMC(ZB)-4	1963	0.29	0.20
2D-CMC(YSZ)-5	1846	0.24	0.02
2D-Type S/SiC	1634	1.03	0.07

これらの結果から、1200℃処理2D-CMC(ZB)、CMC(YSZ)では、試験温度が2D-Type S/SiCよりはるかに高い1800℃以上でもエロージョン量は小さく、YSZ系では損耗速度は 9.7×10^{-5} mm/sであった。また、予備検討で作製した1000℃焼成CMCでは試験中に変形する現象が観測されたため、本試験では焼成温度を1200℃としたCMCを用いたため変形せず、それぞれ1900℃、1800℃以上でも形状を維持できたことから、マトリックスの軟化する温度も向上していることが明らかとなった。2D-CMC(ZB)では、試料厚みが2D-Type S/SiCの3倍程度となったのは、焼成温度よりさらに高温に曝されることにより、BaZrO₃ではさらに焼結が進み、厚み方向に収縮したことを示している。

1D-CMCの高温での評価試験から、マトリックスの焼結性の低さ、およびジルコニア系繊維の耐熱性の低さが明らかとなったが、実用的な2D-CMCにとっても同様の課題が解決されなければならないことは明らかで、解決できればさらに耐エロージョン性の向上が期待できる。

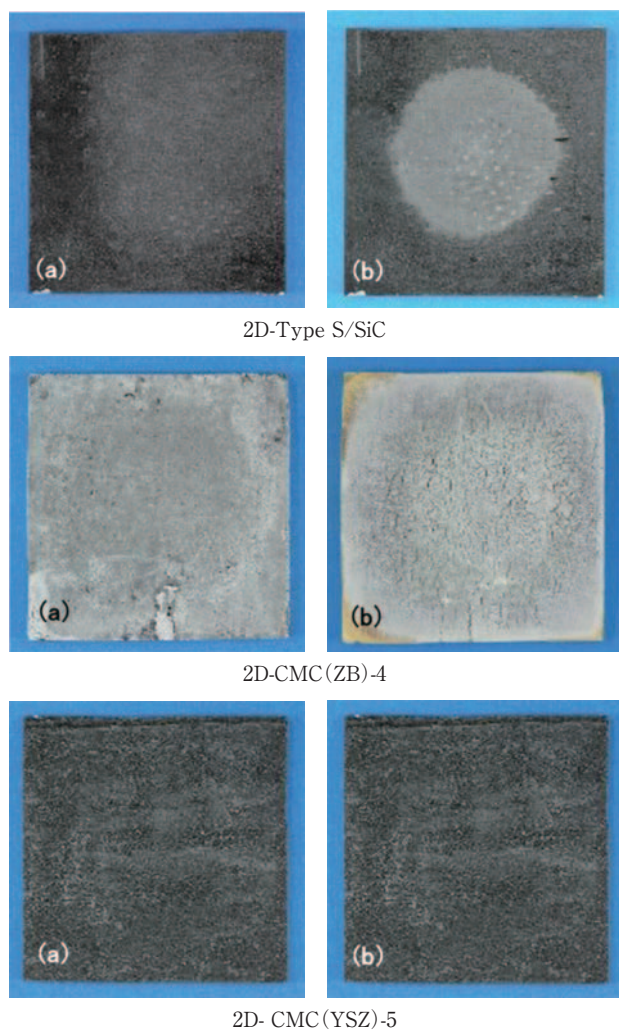


Fig. 12 The photographs of 2D-CMC (a) before and (b) after erosion tests

4. まとめ

超耐熱性酸化物系CMCの酸化物系強化繊維として開発中のジルコニア系連続繊維を用いて、1D-CMCと2D-CMCを、 BaZrO_3 あるいは8YSZ微粉末スラリーとYSZ前駆体ポリマーを用いる（バギング+PIP）法により作製し、最終熱処理温度を高くしマトリックスの焼結性を高め、基本特性と耐環境性を評価し以下を明らかにした。

- ・ 1400℃ 処理1D-CMCで室温引張強度180MPa達成。
- ・ 1500℃ 処理1D-CMCの室温曲げ強度250MPa以上確認。
- ・ 1D-CMCの1500℃ までの大気および水蒸気暴露試験で質量変化がほぼないことを確認。
- ・ 1200℃ 処理2D-CMCの耐エロージョン性は、SiC/SiCよりはるかに高温まで維持されることを確認。
- ・ 高温での機械的特性は1000℃を超えると軟化による塑性変形により低下。

いずれもマトリックスの焼結性と繊維の耐熱性に関連付けことができ、繊維およびマトリックスの組成制御および製造プロセスの改良の必要性も明らかにできた。

今後は、さらに繊維の耐熱性を改良し、CMC化する

マトリックスの焼結性を高めるための組成および製造プロセスの最適化を行い、酸化物系CMCの実現を目指す。

謝辞

本研究は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度JPJ004596の支援を受けたものである。

参考文献

- (1) 武田道夫, 進化を続けるSiC繊維, 第39回無機高分子研究討論会講演要旨集, 2020, pp. 23-26.
- (2) 長谷川良雄, 越坂亜希子, 新関智丈, 牛田正紀, 西川紘介, 糸田和弘, 垣澤英樹, ポリアルミノキサン系無機高分子PIP法によるアルミナ系繊維強化CMCの開発(3), 第37回無機高分子研究討論会講演要旨集 (2018), pp. 77-78.
- (3) 長谷川良雄, 越坂亜希子, 新関智丈, 牛田正紀, 西川紘介, 糸田和弘, 垣澤英樹, ポリアルミノキサン系無機高分子PIP法によるアルミナ系繊維強化CMCの開発(3), 第37回無機高分子研究討論会講演要旨集 (2018), pp. 77-78.
- (4) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「革新的構造材料」研究開発成果報告書, C45 酸化物系軽量耐熱部材の開発, (2019), pp. 139-142.
- (5) 福島明, 関川貴洋, 牛田正紀, 野上龍馬, 田麥あづさ, 西川紘介, 栗村隆之, 松本峰明, 垣澤英樹, 長谷川良雄, 新関智丈, 糸田和弘, 酸化物系セラミックス複合材料部材の開発, セラミックス, Vol. 55, No. 6 (2020) pp. 427-430.
- (6) 鉄井利光, 原田広史, 長谷川良雄, 超高温用酸化物系CMCの開発, 第43回日本ガスタービン学会定期講演会 (米子) 講演論文集 (2015) A-12.
- (7) 鉄井利光, 原田広史, 超耐環境性高強度酸化物系セラミック複合材料の開発, 第46回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集 (2018), A-7.
- (8) 鉄井利光, 原田広史, ジルコニア連続繊維と酸化物系セラミックスからなる複合材料とその製造方法, 特許6327512号.
- (9) 長谷川良雄, 秦青, 鉄井利光, 超耐環境性高強度酸化物系セラミック複合材料用強化繊維の開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 49, No. 3 (2021), pp. 75-82.
- (10) Qing Qin, Yoshio Hasegawa, and Toshimitsu Tetsui, Development of High-strength Continuous Zirconia Fibers for Oxide/Oxide Composites, J. Ceram. Soc. Jpn., Vol. 130, No. 7 (2022) pp. 487-492.
- (11) 長谷川良雄, 秦青, 鉄井利光, ジルコニア系連続繊維を強化繊維とする酸化物系CMCの開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 50, No. 4 (2022), pp. 258-265.
- (12) 長谷川良雄, 小堀武夫, 非電子線不融化による第4世代SiC繊維(3), 第40回無機高分子研究討論会講演要旨集 (2021) pp. 61-62.
- (13) 山根誠, 小溝陽平, 野田淳二, 合田公一, 鈴木道之, 日本材料学会学術講演会講演論文集, 60 (2011) pp. 313-314.
- (14) A. G. Evans and C. Weber, Creep damage in SiC/SiC composites, Materials Science and Engineering, A 208 (1996) pp. 1-6.
- (15) Shijie Zhu and Yutaka Kagawa, Evaluation of Creep SiC/SiC Ceramic Matrix Composites, 生産研究 Vol. 53, No. 9・10 (2001) pp. 466-469.

地上型圧縮空気エネルギー貯蔵 (CAES) による 中容量ガスタービン発電システムの出力変化率の改善

Improvement of Load Changing Rate of Heavy Duty Gas Turbine Applied with Overground Compressed Air Energy Storage (CAES) System

後藤 絢大^{*1}
GOTO Kenta

中野 晋^{*2}
NAKANO Susumu

竹田 陽一^{*1,2}
TAKEDA Youichi

ABSTRACT

In order to stabilize power grid systems, thermal power generation systems, especially gas turbine systems, are used frequently to regulate the electric power demand. One of functions required for electric power generators as load following is to improve in the load changing rate. However, most existing gas turbine systems have an issue that is the so-called “a booting-up congestion owing to the high temperature exhaust gas”. In this study, we propose an overground compressed air energy storage (CAES) system to solve the issue. The operation method of an existing medium-capacity gas turbine applying the overground CAES is presented to improve the load changing rate. It is shown that the time to reach the rated power output from the partial load can be reduced to 1/2 of the normal operation of the existing turbine system by increasing the air supply from the CAES.

キーワード：ガスタービン, CAES, 負荷調整, 出力変化率, 圧縮機, リザーバ

Key words : Gas turbine, CAES, Load-following, load changing rate, Compressor, Reservoir

1. はじめに

地球温暖化防止の観点から、発電時に二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーの導入が進められており、日本においても増加傾向にある。しかしながら再生可能エネルギー、とりわけ太陽光や風力などといった変動出力型再生可能エネルギーは出力が天候に依存するため、電力需要に合わせた出力調整が困難である。現時点では、大容量電力の貯留が困難であるため、変動電源の導入増加時には、他の発電設備によって電力需要に合わせて出力を調整する負荷追従運転を行うことが電力系統安定化のためには不可欠である。負荷追従運転には比較的起動時間が短く、出力調整も容易であるといった特徴を持つ火力発電、その中でも特に起動性、応答性に優れるガスタービンが用いられてきた。従来の重構造ガスタービン設備は、定格運転時に高効率な運転が行われるように設計されているが、負荷追従用ガスタービンには、最低負荷から定格負荷までの運転範囲の拡大と、起動時間の短縮等の負荷変化率の増加が求められる。負荷変化率の増加に関しては、既存の重構造ガスタービンで起動時

や発電出力増加時に燃料投入量を増加させて出力変化率を上げる際に、いわゆる「排ガス温度高起動渋滞」⁽¹⁾という課題がある。これは、タービンシステムでは高温部位の保護のため、燃焼温度の上昇を排ガス温度の監視で行っているが、燃料流量の増加による排ガス温度の上昇が、タービン運転の制限値を超えてしまい、実際には燃料投入量を増やすことができず出力増加率を上げられないといった課題である。

本研究では、既存の重構造ガスタービンに地上設置型のCAES (Compressed Air Energy Storage) システムを付加することで、ガスタービンの負荷追従性を向上させることを検討している。負荷追従機能の一つであるタービンの運転範囲の拡大に関しては、本研究の先行研究として、中容量ガスタービンシステムに地上CAESを付加することで、日本における昼食時間帯の約1時間の電力需要の低下時に圧縮機吐出空気の一部を貯留することで、その運転範囲を約1.4倍拡張できることを示した⁽²⁾。今回は、この地上CAESをタービン出力の変化率の向上に適用する。実機中容量ガスタービンの部分負荷から定格出力までの運転データを基に、中容量ガスタービンを対象としたタービンシステムの動作解析プログラム⁽³⁾により、現状の運転方法の再現、仮想的に燃料流量を増加させた場合、および地上CAESからの空気供給を受ける場合の3ケースに関してタービンシステムの動作解析を実施し、タービン出力変化率の増加に対する地上CAESの有効性を検討した。

原稿受付 2022年11月17日

査読完了 2023年7月6日

*1 東北大学大学院 工学研究科ファインメカニクス専攻
〒980-0845 仙台市青葉区荒巻青葉6-6
E-mail: Kenta.goto@rift.mech.tohoku.ac.jp

*2 東北大学大学院 工学研究科 附属先端材料強度
科学研究センター
〒980-0845 仙台市青葉区荒巻青葉6-6

記号の説明

A : 流路断面積, タンク表面積 [m^2]
 C_p : 定圧比熱 [$\text{J}/(\text{kg K})$]
 dt : 時間刻み [s]
 f : 圧縮機吸気流量の ω に関する関数 [-]
 g : 質量比 [-]
 H_B : 発熱量 [J/kg]
 h : 比エンタルピー [J/kg]
 I : ロータの慣性モーメント [kgm^2]
 M : 質量 [kg]
 m : 質量流量 [kg/s]
 P : 圧力 [Pa]
 Pr : 正規化圧力比 [-]
 Q : 正規化吸気流量比 [-]
 R : 気体定数 [$\text{J}/(\text{kg K})$]
 T : 温度 [K]
 t : 時間 [s]
 V : 体積 [m^3]
 W : 出力 [W]
 α : 対流熱伝達率 [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
 β : 放射率 [-]
 η_B : 燃焼効率 [-]
 η_{pl} : ポリトロップ効率 [-]
 κ : 比熱比 [-]
 σ : Stefan-Boltzmann定数 [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$]
 ω : 角速度 [rad/s]
 添え字
 1 : 貯留タンク流入
 2 : 貯留タンクから放出タンク
 3 : 放出タンク流出
 a : 空気または大気
 C : 圧縮機
 caes : CAES
 co : 圧縮機吐出側
 co2 : 二酸化炭素
 d : 定格点
 dst : 放出タンク
 ex : 出口
 f : 燃料
 G : 発電機
 g : 燃焼ガス
 H₂O : 水蒸気
 in : 入口
 loss : 軸受損失
 N₂ : 窒素
 O₂ : 酸素
 out : タンク外壁
 rated : IGV定格開度時
 rt : 貯留タンク
 shft : IGV開度減少時

T : タービン

 θ : IGV開度

2. 地上CAES

2.1 基本構成

既存のCAESシステム^{(4),(5)}では、圧縮機とタービンの回転軸が分離、または切り離しが可能な構造で、圧縮機とタービンは独立に運転できる。一方、既存発電用ガスタービンは圧縮機とタービンが同一の回転軸を有する場合が多いため、圧縮機とタービンをそれぞれ独立に運転することはできない。このため、既存発電用ガスタービンに地上CAESを適用するためには、圧縮機とタービンを分離運転しないことが制約になる。

地上CAESを付加したガスタービンシステムの概要をFig. 1に示す。地上CAESシステムは、タービンシステム圧縮機の吐出空気の一部を貯留する貯留タンクと、貯留タンク内の空気を昇圧する中間圧縮機、昇圧した空気を貯留する放出タンク、およびバルブ類から構成される。貯留タンク内の空気は、タービンシステム圧縮機の運転状態を変更することなく燃焼器空気流量を増加させたい場合に、圧力調整弁を介して燃焼器に供給される。中間圧縮機は、供給過剰になった変動電源出力によって稼働する。

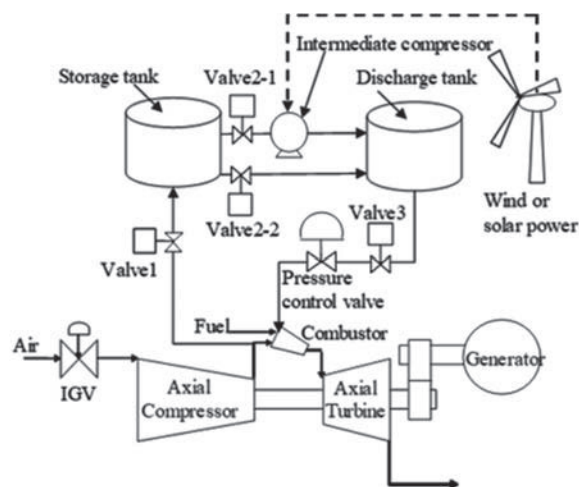


Fig. 1 Schematic diagram of over ground CAES

2.2 地上CAESシステムの運転方法

圧縮機吐出空気の貯留は、系統への電力需要が少ないときで、例えば待機運転中や部分負荷運転時が考えられる。ここでは、部分負荷運転時の圧縮機吐出空気の一部を貯留する場合を考える。タービン負荷が少ない状態では、圧縮機吐出圧は低下するため、貯留タンク内に貯められる空気圧は、圧縮機定格吐出圧以下になる。タンクから供給できる空気はタンク圧よりも低下するため、この圧力状態では、タービン出力増加時に燃焼器に空気を送ることはできない。そのため、放出タンク内の空気をタービン出力増加時にも送れるように、貯留タンクの空

気を中間圧縮機で昇圧し放出タンクに蓄える。放出時は、本研究で対象とする負荷変化率を上げる場合の操作になるが、タービン出力は部分負荷運転されており、例えば入口案内弁 (IGV) を絞ることで圧縮機吸気流量を減らした運転を行っている。Fig. 2は圧縮機の性能曲線として、各回転数における圧縮機吸気流量比と正規化圧力比を示したものである⁽⁶⁾。横軸の正規化吸気流量比は修正流量を設計点である定格修正流量で除した値で、縦軸の正規化圧力比は圧力比を定格圧力比で除した値である。回転数は修正回転数と定格修正回転数の比をパーセントで表示したものである。なお、本論文の燃料流量や圧縮機吸気流量など流量と記載されるものは、体積流量との記載がない限り質量流量を表す。圧縮機の吐出圧は、タービンの負荷によって決まる。タービン動作は、圧力比の小さい領域を除き、修正流量 ($m\sqrt{T/P}$) が一定になるため、タービン入口温度が一定の場合、流量の低下と共に圧力も低下する。定格回転数での圧縮機性能曲線はIGVを絞ることで、図の破線へとシフトする⁽⁷⁾。今、部分負荷運転として①の状態にあるものとする。この状態で、CAESからの空気供給によってタービン流量を定格流量にしてタービン出力を定格に持っていくことを考える。運転点④と①の流量差分の空気をCAESから供給する。タービンの負荷上昇に伴い、圧縮機吐出圧は破線で示した特性曲線上を上昇する。Fig. 2に示した例では、IGV開度68%の性能曲線上の10%サージマージン点 (以後、単にサージ点と呼ぶ) ②は、IGV定格開度における定格運転点の圧力比④を下回るため、このIGV開度では圧力比を定格値まで上昇できない。②に到達する前にIGV開度を上げ、例えばFig. 2のIGV開度78%の状態に持っていく。この状態の性能曲線のサージ点③は定格運転での圧力比④をわずかに上回るため、CAESからの空気供給によってタービン動作点を定格値まで上昇できる。CAESからの空気供給を終了させる時は、IGV開度を定格開度に広げて圧縮機吸気流量を定格流量に持っていく。

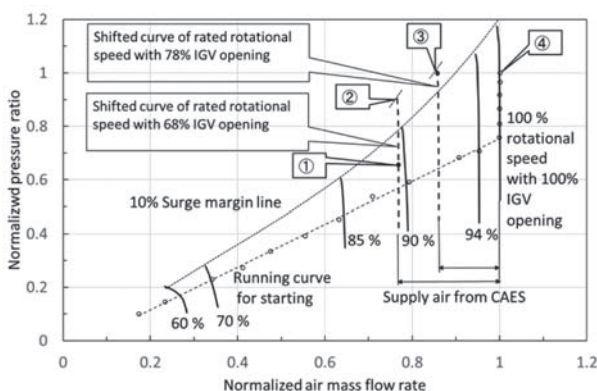


Fig. 2 Characteristic curves of the compressor and operation method of CAES

2.3 圧縮機性能曲線の移動方法

Fig. 2において圧縮機性能曲線はIGV開度によってシフトさせたが、ここではその移動方法の概略を述べる。この方法は生井・井上⁽⁷⁾によって示された方法と同様の方法である。Fig. 3はFig. 2に示した定格回転数でIGV定格開度の圧縮機性能曲線 (図中 $\overline{BCD}$ で示す実線) を、回転数は同一に保ちIGV開度を定格開度の68%にした場合の性能曲線 (図中 $\overline{GHJ}$ で示す破線) への移動方法を示す図である。

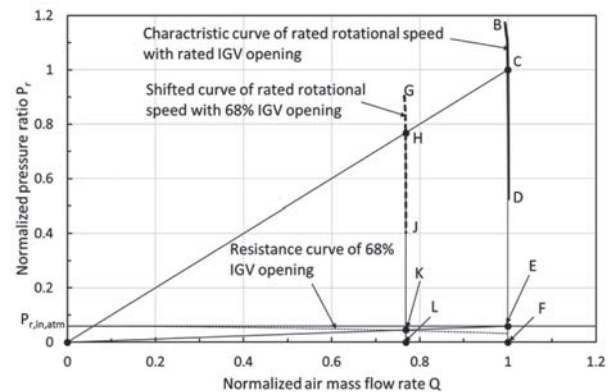


Fig. 3 Shifting method for characteristic curves of the compressor

初めにIGV定格開度における定格運転点Cを移動する。定格運転点の正規化吸気流量比を $Q_{rated,d}$ 、正規化圧力比を $P_{r,rated,d}$ 、圧縮機入口の正規化圧力比を $P_{r,rated,in}$ とする。また、IGV開度を絞った時の正規化吸気流量比を $Q_{shft,d}$ とする。IGV開度を絞り圧縮機吸気流量比を $Q_{shft,d}$ にした時、圧縮機入口圧比も低下する。回転数は一定のため体積流量はIGVを絞った場合も変わらない。また、流体の運動エネルギーを無視できると仮定した場合、IGV前後でエンタルピーは等しく、IGVを通過する流れを絞り膨張流れと考え、空気を理想気体と仮定すれば、ジュール・トムソン係数はゼロになり圧力降下による温度変化は生じなくなる。このため、圧力変化は密度変化に比例する。つまり、圧縮機入口圧力の低下は空気質量流量の低下に比例することになる。よって、Fig. 3の原点と点E ($Q_{rated,d}$, $P_{r,rated,in}$) を通る直線上で流量が $Q_{shft,d}$ となる点K ($Q_{shft,d}$, $P_{r,shft,in}$) がIGVを絞った状態での圧縮機入口の正規化圧力比になる。次に原点と定格運転点C ($Q_{rated,d}$, $P_{r,rated,d}$) を結ぶ直線を引き、この線と点L ($Q_{shft,d}$, 0) から立てた垂線の交点をH ($Q_{shft,d}$, $P_{r,shft,d}$) とする。点C, Fおよび原点からなる三角形と、点H, Lおよび原点から成る三角形で、両者は相似三角形になる。同様に、点E, Fおよび原点から成る三角形と点K, Lおよび原点から成る三角形も相似になる。よって線分の比 $\overline{CF} : \overline{EF}$ と $\overline{HL} : \overline{KL}$ は等しくなる。これらの比は定格運転における圧力比とIGVを絞った時の圧力比に対応する。よって点H ($Q_{shft,d}$, $P_{r,shft,d}$) が定格運転点C ($Q_{rated,d}$, $P_{r,rated,d}$) のIGVを絞った時の作動点となる。ここで、 $P_{r,shft,in}$ は定格

運転点の正規化吸気流量比 $Q_{rated,d}$ と正規化圧力比 $P_{r,rated,d}$ およびIGV開度絞った時の正規化吸気流量比 $Q_{shft,d}$ を用いて式(1)で表される。また、点K ($Q_{shft,d}$, $P_{r,shft,in}$) はFig. 3の細破線で示すIGV開度を定格開度の68%に絞った時の抵抗曲線上に位置する。IGVの抵抗曲線は流量に関して2次式になり、流量ゼロでは抵抗はゼロで大気圧に対応する正規化圧力比 $P_{r,in,atm}$ になる。点K ($Q_{shft,d}$, $P_{r,shft,in}$) と点 (0, $P_{r,in,atm}$) を通る流量の2次式として抵抗曲線上の圧力比 P_r は式(2)で表される。

$$P_{r,shft,in} = \frac{Q_{shft,d}}{Q_{rated,d}} P_{r,rated,in} \quad (1)$$

$$P_r = P_{r,in,atm} - \frac{(P_{r,in,atm} - P_{r,shft,in})}{Q_{shft,d}^2} Q^2 \quad (2)$$

定格回転数、定格IGV開度の状態にある圧縮機性能曲線上の任意の点 (Q_i , $P_{r,i}$) は、定格運転点吸気流量比 $Q_{rated,d}$ を $Q_{shft,d}$ までIGVで絞った時、式(1)と(2)から導かれる式(3)、および式(4)を満たす点 (Q , P_r) に移動する。

$$\frac{P_{r,in,atm}}{Q_{shft,d}^2} \left(\frac{Q_{rated,d} - Q_{shft,d}}{Q_{rated,d}} \right) Q^2 + \frac{P_{r,in,atm}}{Q_i} - P_{r,in,atm} = 0 \quad (3)$$

$$P_r = \frac{Q}{Q_i} P_{r,i} \quad (4)$$

3. 計算方法および計算条件

3.1 タービンシステムの基礎式

タービン回転軸の運動方程式は式(5)で表される。タービン出力 W_T 、および圧縮機動力 W_C は、入口温度 T_{in} と圧力比 (P_{ex}/P_{in}) を用いて式(6)および(7)で示される。損失 W_{loss} は軸受損失を考慮した。発電機出力 W_G は式(5)のタービン出力から圧縮動力および式(5)左辺の慣性力による仕事を差し引いて算出する。タービン入口温度 $T_{in,T}$ は式(8)に示す燃焼前後のエンタルピーの釣り合いから算出する。圧縮機の吸気流量と圧力比は対象としたガスタービンシステムの圧縮機特性曲線⁽⁶⁾から求めた。圧縮機吸気流量は、式(9)に示すように、回転数の関数として特性曲線から読み取った値にIGV開度の面積比を乗じて算出する。これらの計算では、空気および燃焼ガスを理想気体の混合ガスとして扱った。

$$\frac{d\omega^2}{dt} = \frac{2}{I} (W_T - W_C - W_{loss} - W_G) \quad (5)$$

$$W_C = m_C C_{p,C} T_{in,C} \left\{ \left(\frac{P_{ex,C}}{P_{in,C}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\eta_{pl,C}\kappa}} - 1 \right\} \quad (6)$$

$$W_T = m_T C_{p,T} T_{in,T} \left\{ 1 - \left(\frac{P_{ex,T}}{P_{in,T}} \right)^{\eta_{pl,T} \frac{\kappa-1}{\kappa}} \right\} \quad (7)$$

$$T_{in,T} = \frac{h_a m_c + h_{caes} m_{caes} + h_f m_f + \eta_B H_B m_f}{m_g (C_{p,co2} g_{g,co2} + C_{p,H2O} g_{g,H2O} + C_{p,N2} g_{g,N2} + C_{p,O2} g_{g,O2})} \quad (8)$$

$$m_C = \frac{A_\theta}{A_{\theta,rated}} f(\omega) \quad (9)$$

なお、上式において、圧縮機のポリトロップ効率⁽⁸⁾は参考文献(6)に示される図から読み取り、タービンのポリトロップ効率は、Smith線図⁽⁸⁾から推定した断熱効率を比熱比と圧力比で表される断熱効率とポリトロップ効率の関係式⁽⁹⁾から算出した。また、式(8)に用いられる燃焼効率は参考文献(10)に示される環状缶型燃焼器の燃焼効率を示した図から読み取った値を用いた。

3.2 CAESシステムの基礎式

次にタンク内状態量変化の計算方法を示す。タンク内の状態量変化は、式(10)および式(11)に示す質量保存式、式(12)および式(13)に示すエネルギー保存式、式(14)および式(15)に示す状態式を用いて算出した。また、エネルギー式ではタンク表面からの放熱を、対流熱伝達率7 (W/(m²K))、放射率0.5と仮定して計算した。

$$\frac{dM_{rt}}{dt} = m_1 - m_2 \quad (10)$$

$$\frac{dM_{dst}}{dt} = m_2 - m_3 \quad (11)$$

$$\frac{d(C_p M_{rt} T_{rt})}{dt} = m_1 C_p T_{co} - m_2 C_p T_{rt} - A_{rt} [\alpha (T_{rt,out} - T_a) + \beta \sigma (T_{rt,out}^4 - T_a^4)] \quad (12)$$

$$\frac{d(C_p M_{dst} T_{dst})}{dt} = m_2 C_p T_{rt} - m_3 C_p T_{dst} - A_{dst} [\alpha (T_{dst,out} - T_a) + \beta \sigma (T_{dst,out}^4 - T_a^4)] \quad (13)$$

$$P_{rt} = \frac{M_{rt}}{V_{rt}} R T_{rt} \quad (14)$$

$$P_{dst} = \frac{M_{dst}}{V_{dst}} R T_{dst} \quad (15)$$

3.3 対象ガスタービンと計算条件

地上型CAES動作の計算は、中容量ガスタービンシステムを解析対象とし、既開発のガスタービンシステムダイナミックシミュレータ^{(3),(11)}にCAES動作計算プログラム⁽²⁾を組み込み行った。対象としたガスタービンシステムと地上型CAESの基本仕様をTable 1に示す。タービンシステムの計算には、計算条件として、タービンロータの回転数、IGV開度、および燃料流量を与える必要がある。計算は実機タービンシステムの起動から定格運転までの一実施例を対象とし、その時の運転条件をFig. 4に示す。薄色太線が運転データで、実機運転を再現する計算の計算条件は、運転データを濃色細線で近似した値を用いている。また、計算は60%回転数から開始する。Fig. 4には発電機出力の計測データと計算結果も一緒に示した。これは、本計算におけるIGV開度操作を説明するためである。次章では出力変化率を上げるためにCAESを適用する運転方法と、比較のために燃料流量のみ増加させる運転方法を試す。それらの運転では通常運転に比べて出力の増加率が上昇する。時間に対するIGV開度操作を通常運転と同じにすると、出力増加に伴い作動点がサージ点に達する恐れが生じる。Fig. 4に示した

通常運転のIGV開度と発電機出力を比較すると、経過時間1.8hでIGV開度は68%から増加する。この時の発電機出力は64%になる。本計算で実施する出力変化率を増加させるための2ケースの運転方法でも、発電機出力が64%に到達した時点で、IGV開度を68%から増加させる。以後、Table 2に示すように、ケース1を実機運転条件、ケース2を燃料流量のみを増やす運転条件、ケース3をCAESからの空気供給を受ける運転条件とする。

Fig. 5に実機運転方法を含めた3ケースの計算入力条件の燃料流量とIGV開度を示す。また、参考のためケース3のCAESからの供給空気量も示す。経過時間1.35 hから燃料流量投入量は増加する。ケース2と3の燃料増加率はケース1の2倍にした。ケース3で1.6 hで燃料流量の増加が止まるが、これは発電機出力が定格出力に到達したため燃料流量が保持されたことを示す。

IGV開度に関しては、ケース3が最初に68%開度から増加を開始する。Fig. 2に示したように78%開度でIGV開度を保持する。78%開度では、圧縮機性能曲線のサージ点は定格運転点の圧力よりも上回るため、この開度で負荷を上昇させても圧縮機の安定運転は維持できる。発電機出力が定格出力到達後は、燃料流量とIGV開度を定格値まで増加させる。IGV開度の増加に伴い圧縮機吸気流量は増加するため、CAESからの空気を減少させる。ケース2では1.58 hからIGV開度の増加が始まる。なお、ケース2およびケース3のIGVの開度増加率はケース1と同じである。

4. 結果および考察

4.1 実機運転データとの比較

前章のFig. 4に実機発電機出力と計算結果の比較図を示した。実機タービンシステムはコンバインドサイクルのため、計測される発電機出力はガスタービンと蒸気タービンの出力の合計値になる。本研究ではガスタービンのみから成るシステムを対象としているため、実測データから蒸気タービン出力の推定値を差し引いて比較に用いた。なお、蒸気タービンの出力は、供給蒸気と排気蒸気の計測値から、それらのエンタルピー差によって推定した。Fig. 4において、計算結果は実機計測値と最大9.2%の誤差はあるが、ほぼ全域にわたり実機出力と良好に一致している。

Table1 Specifications of target plant and over ground CAES

Rated power of turbine system		109 MW ((GT+ST)×2)
Rated rotational speed		7280 rpm
Compressor		17 stages axial flow
Turbine		3 stages axial flow
Combustor		Low NOx combustor
Storage and discharge tanks		Spherical shape with a diameter of 18 m
Intermediate compressor	Pressure ratio	4
	Rated flow rate	10% of turbine system compressor
Inner diameter of piping		0.14 m
Initial tank pressure		5 MPa

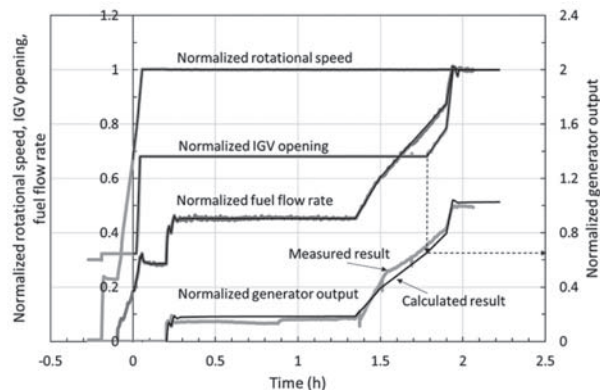


Fig. 4 Comparison between plant operation data and calculation conditions and result

Table 2 Calculation cases

CASE	Operation	Rotational speed	Fuel supply rate	IGV operation
1	Normal operation	Normal operation	Normal supply rate	Normal operation
2	Rapid fuel supply operation	Same as normal operation	Doubled supply rate after 1.35 h	Same as normal operation for IGV opening to Generator output
3	CAES operation	Same as normal operation	Doubled supply rate after 1.35 h	Same as normal operation for IGV opening to Generator output

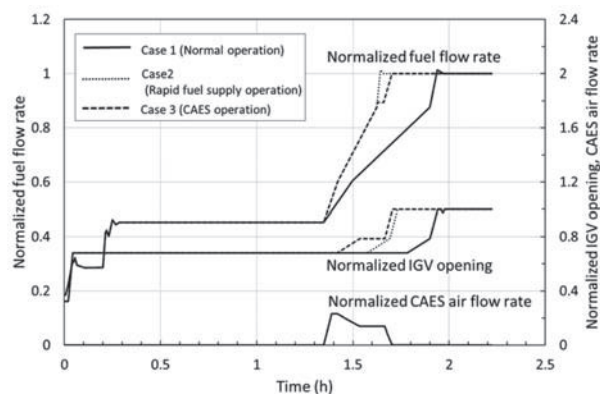


Fig. 5 Calculation conditions of three cases

4.2 起動線の比較

Fig. 6に3ケースの起動線の計算結果を示す。実線で示す実機の起動線はIGV開度68%で圧力比が定格圧力比の77%まで上昇し、その後IGVを定格開度まで開けていき定格運転点に到達する。ケース2の起動線もケース1と同等であるが、IGV開度68%から定格開度までがわずかに圧力比が高く、タービン負荷が実機運転よりもわずかに増加した状態で定格運転点に到達する。

ケース3はIGV開度68%の状態、サージ線直前まで圧力比を上げ、IGV開度78%において定格運転点近くの圧力比に到達する。他ケースに比べて、CAESからの空気供給によってタービン負荷を上げるため、圧縮機吸気流量が低い段階で動作点圧力比は上昇していることが分かる。しかし、ケース3の起動線は10%サージマージン以下に収まっている。

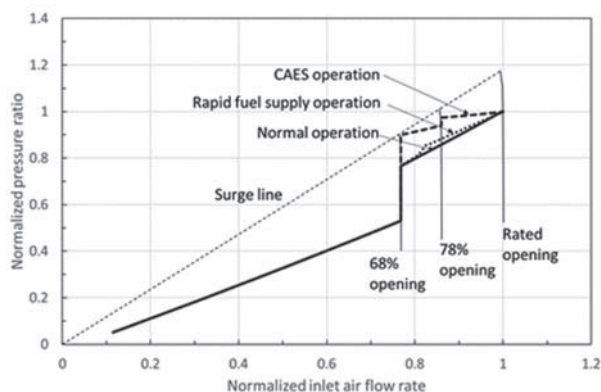


Fig. 6 Comparison of starting lines for three cases

4.3 出力変化率とタービン入口温度の比較

本研究では、Fig. 4に示した約1.35時間経過後からの出力増加時間帯を対象に、出力変化率の検討を行う。Fig. 7に各ケースの発電出力を示す。また、Fig. 7にはFig. 5に示したCAESからの空気供給量も示す。ケース2では、Fig. 5の燃料流量が定格流量に達する1.64 hにおいて、発電機出力は定格出力に到達していない。この段階では、まだIGV開度が低く空気流量が不足するためである。IGV開度が定格開度になる直前の1.7 hで定格出力に到達する。ケース3のCAESを適用した場合、1.62 hでほぼ定格出力に到達している。CAESからの空気流量と比較すると、CAES開始時の空気供給量の立ち上がり、発電機出力の増加の立ち上がりが同様の変化を示す。CAES開始時の発電機出力の増加はCAESからの空気量の増加が大きく影響することが分かる。1.35 hの部分出力から定格出力到達までの時間は、従来運転では約0.6 h掛かっていたのに対して、CAESを適用した場合には約半分の時間で到達できている。

Fig. 8にタービン出力と圧縮機駆動動力を示す。ケース1および2では、IGV開度の増加に伴い、タービン出力および圧縮機動力が増加する。ケース3では、IGV開度を一旦78%開度で保持するため、圧縮機動力の増加は抑えられるが、この間にもタービンにはCAESからの空気供給があるためタービン出力は増加する。IGV開度を78%で保持している間のタービン出力の増加により、発電機出力は定格出力に達する。ケース1および2の発電機出力増加傾向は、燃料流量の増加率とIGV開度の増加率に依存するが、CAESを適用する方法では、CAESからの空気供給開始時の空気流量の増加が発電出力の短時間での増加につながる特徴と言える。

Fig. 9はタービン入口のガス温度比を示したものである。ケース2では、発電機出力比が70%に到達する1.6 hで、タービン入口温度は定格温度に達するため、実際の運転ではこれ以上の燃料流量を増加することはできないことになるが、燃料流量を定格流量まで増加すると、Fig. 9に示したようにタービン入口温度は定格温度の1.1倍まで上昇する。また温度の上昇率も実機運転に比べて

大きくなっている。このため実際にはこのような運転は行えないことが分かる。ケース3ではガス温度の上昇率は従来運転とほぼ同等に保たれていることが分かる。燃料流量の増加率を従来方法の2倍にしても、高温部位の熱伸びは従来運転と同等に保てると考えられる。

Fig. 10は各ケースの燃空比の変化を示したものである。Fig. 9のタービン入口ガス温度と同様に、ケース1と3に対してケース2の燃空比は高くなっている。燃空比は燃焼器での燃料の燃え方に密接に関連する。CAESを適用した場合でも、燃空比の変化は、従来運転と大きく外れることはなく、従来運転と同等の燃焼が実現できると考えられる。

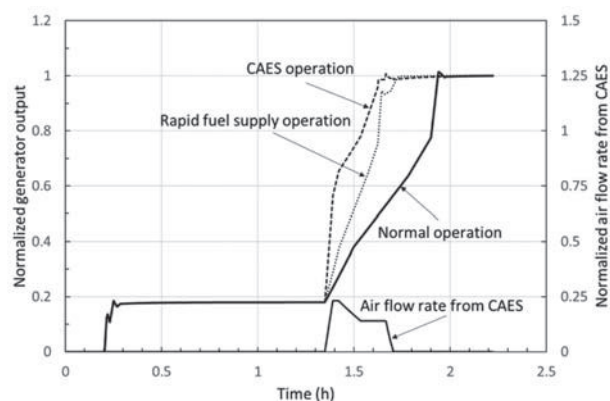


Fig. 7 Generator output power

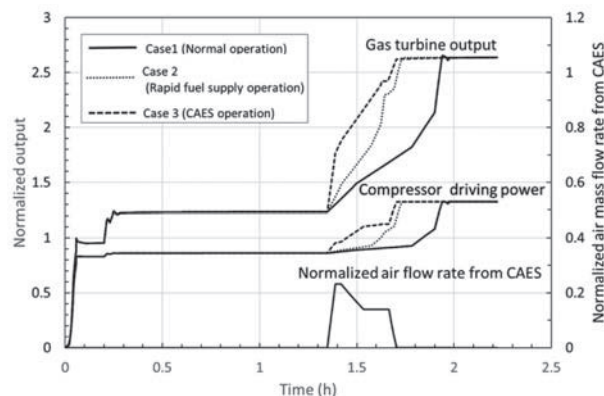


Fig. 8 Turbine and compressor power

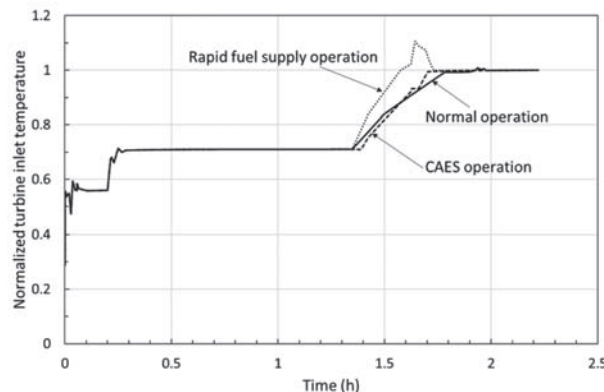


Fig. 9 Turbine inlet gas temperature

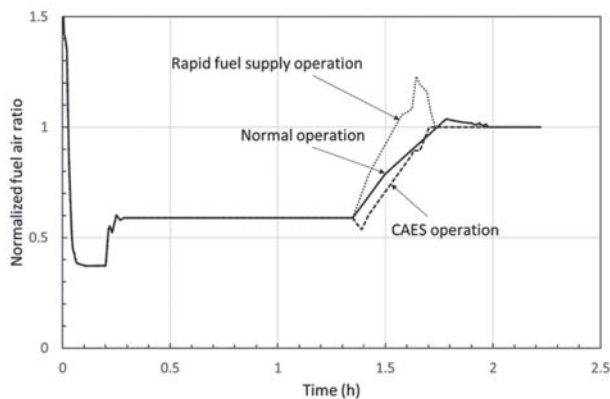


Fig. 10 Fuel air ratio

燃料流量の投入率を従来運転の2倍にすることで、発電機出力の増加率を上げることが確かめてきたが、一方で、燃料流量の増加は、高温部位の過熱や燃焼の安定性にも影響を及ぼすと考えられる。燃料流量の増加とCAESを適用することで、高温部位の温度上昇や燃焼に関しては従来運転方法と同等に維持できることを確認した。

4.4 放出タンクの圧力変化

最後に、CAESシステムの計算結果として、ケース3における放出タンクおよびタービン入口圧力の変化を、定格タービン入口圧で正規化した結果をFig. 11に示す。2.2で述べたように、CAESからの給気供給を可能にするため、タンク圧力はタービン入口圧よりも高く保持されていなければならない。Fig. 11において放出タンク内の空気圧は常にタービンの入口空気圧よりも高く保たれている事が分かる。このため、Table 1に示したCAESの仕様で、ケース3においてCAESシステムは常に安定した空気供給を行える事が示された。

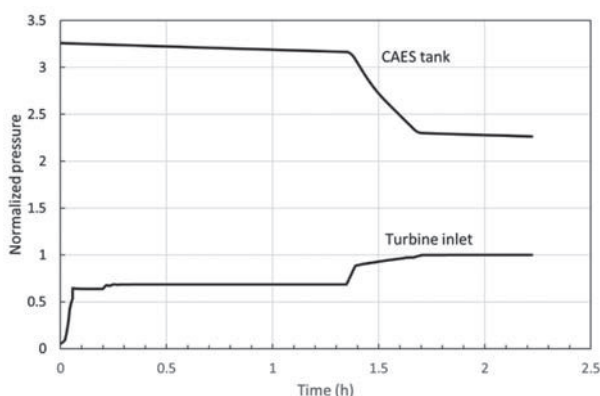


Fig. 11 Pressure changes in CAES tank and turbine inlet

5. 結論

既存の中容量ガスタービンの部分負荷から定格負荷への出力変化率の向上を目的に、燃料流量の増加と共に地上型CAESを適用した場合のタービンシステムの動作解析を行い以下の結論を得た。

- (1) 燃料投入量を従来運転の2倍に、さらに地上CAESからの空気供給を行うことで、部分負荷から定格負荷に到達する時間を、従来運転の約1/2に短縮できることを確認した。
- (2) CAESからの空気供給を行うことで、燃料供給率を2倍にした場合でも、タービン入口温度および燃空比の変化は従来運転と同等に維持できることを確認した。

謝辞

本研究は東北電力株式会社と東北大学の共同研究部門である電力エネルギー未来技術共同研究部門で実施されたもので、研究遂行に対して東北電力株式会社からは多くの支援を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 福泉靖史, 上田慎太, 火力プラントの柔軟性向上による電力系統の安定化, 火力原子力発電, Vol. 66, No. 11 (2015), pp. 16-31.
- (2) 野々村弘樹, 中野晋, 竹田陽一, 負荷調整用地上型圧縮空気エネルギー貯蔵 (CAES) を備えたガスタービンシステムの基礎検討, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 48 No. 6 (2020), pp. 41-50.
- (3) 鈴木晃純, 中野晋, 田中翔悟, 竹田陽一, 菅原由貴, 中容量ガスタービン用動作解析シミュレータの開発, 第45回日本ガスタービン学会定期講演会 講演論文集, (2017), pp. 83-88.
- (4) Jidai Wang, Kunpeng Lu, Lan Ma, Jihong Wang, Mark Dooner, Shihong Miao, Jian Li, and Dan Wang, Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development, Energies 10, 991 (2017).
- (5) 中北智文, 小林英夫, 奥原巖, 高橋克行, 安田友芝, 圧縮空気エネルギー貯蔵ガスタービン (CAES-G/T) の開発, 石川島播磨技法, Vol. 43 No. 3 (2003).
- (6) Y. Kashiwabara, Y. Katoh, H. Ishii, T. Hattori, Y. Matsuura, and T. Sasada, Developments leading to an axial flow compressor for a 25 MW class high efficiency gas turbine, 90-GT-238, (1990).
- (7) 生井武文, 井上雅弘共著, ターボ送風機と圧縮機, コロナ社, (1988).
- (8) Moustapha, H., Zelesky, M. F., Baines, N. C., and Japikse, D., Axial and Radial Turbines, Concept NREC, (2003).
- (9) Nonomura, H., Nakano, S., and Takeda, Y., A FUNDAMENTAL STUDY ON A GAS TURBINE SYSTEM WITH OVERGROUND COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE (CAES) FOR LOAD FOLLOWING, Proceedings of Global Power and Propulsion Society, GPPS-CH-2020-0025 (2020).
- (10) Lefebvre, A. H., Gas Turbine Combustion, Taylor & Francis, (1983).
- (11) 関慧一, 中野晋, 竹田陽一, マイクロガスタービンの動作解析, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 43 No. 3 (2015), pp. 68-74.

水素燃焼を模擬した環境での水素センサーおよび酸素センサーを用いた純鉄の耐環境性の解析

Investigation of the Environmental Resistance of Fe in the Simulated Hydrogen Combustion Atmosphere Provided by Hydrogen and Oxygen Sensor

福本 倫久^{*1}
FUKUMOTO Michihisa

原 聖也^{*1}
HARA Seiya

高橋 弘樹^{*1}
TAKAHASHI Hiroki

ABSTRACT

The environmental resistance of pure iron was evaluated with an oxygen and hydrogen sensor installed after the oxidation furnace. The amount of introduced oxygen was precisely controlled by the oxygen pump sensor at the front stage of the oxidation furnace, and the reaction with hydrogen was analyzed. As a result, when oxygen was supplied, a reaction between hydrogen and oxygen occurred. Still, when sufficient oxygen was not provided, a hydrogen-vapor environment was created, and oxidation was not accelerated. However, when the amount of supplied oxygen was excessive, the atmosphere became an oxygen-steam environment, and the oxidation was accelerated. At that time, it was clarified that oxidation by oxygen was dominant under the oxygen-water vapor environment, and the weight gain by the oxidation was accelerated. In addition, the border of the region dominated by oxygen oxidation and that by steam oxygen was clarified by precisely controlling the amount of supplied oxygen by the oxygen pump sensor.

キーワード：水素センサー，酸素センサー，酸素ポンプ・センサー，水素燃焼，ガスタービン

Key words : Hydrogen Sensor, Oxygen Sensor, Oxygen Pump-Sensor, Hydrogen Combustion, Gas Turbine

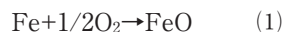
1. 緒言

温室効果ガス濃度の増加によって地球温暖化の深刻化が懸念されている。そして、温室効果ガスは化石燃料等を用いたエネルギー変換部門，すなわち火力発電所や航空機用ジェットエンジンなどの熱機関から多く排出されている。したがって、温室効果ガスの排出を止めるためには、化石燃料からの脱却が必要である。そこで、再生エネルギー由来の水素を化石燃料に代わりエネルギー源として用いることができれば、温室効果ガスを排出せず地球温暖化を解消することができる⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかし、水素燃料を用いた際に構成部材が晒される高温雰囲気が化石燃料の場合と異なり、水素を燃料にした場合の部材の高温酸化による劣化挙動については不明な点が多い。すなわち、燃焼ガス中には水素、酸素および水蒸気等が混在すると想定され、このような種々のガスが共存し分圧が変化する環境での金属材料の劣化および高温酸化特性については、ほとんど研究例が無い。その理由は、水素と酸素を反応させた燃焼環境の実験が困難であるためである。さらに、水素および酸素ガス分圧を精密に制御した環境での、各々のガス種の反応挙動が不明である。そこ

で、これまで著者らは電気化学的に酸素を精密に供給できる装置（酸素ポンプ・センサー）を開発し、電極表面での水素と酸素の反応量を制御してきた⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。前報において水素燃料とした場合の水素と酸素の反応挙動とNi基合金の酸化挙動を検討した⁽⁸⁾。しかし、水素、酸素および水蒸気が含有される環境では水素の挙動を正確に測定する必要がある。

これまでに水素、酸素および水蒸気混合雰囲気での金属の酸化挙動については数多く報告されている⁽⁹⁾⁻⁽²³⁾が水素の挙動をその場測定した報告はない。また、水蒸気と酸素はともに酸化に関与し、類似した酸化物が生成する。したがっていずれによる酸化なのかを区別することができず、どちらの酸化種に起因する酸化が起こるのか明らかになっていない⁽²³⁾。

酸素雰囲気中では、(1)式によって酸化が進行する。



この場合、雰囲気中の酸素がFeとの反応に消費されて酸素分圧は低下すると考えられる。一方、水蒸気を含む環境では(1)の反応に加え(2)の反応が起こる。



このように水蒸気との反応によって水素が発生して雰囲気中の水素分圧は上昇すると考えられる。従って、酸化雰囲気中の酸素分圧及び水素分圧を測定することは重要である。さらに、酸素分圧と水素分圧を測定することによって酸素による酸化なのか水蒸気による酸化なのか

原稿受付 2022年11月22日

査読完了 2023年6月22日

*1 秋田大学 大学院理工学研究科 革新材料研究センター
〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1
E-mail: fukumoto@gipc.akita-u.ac.jp

区別することができる。

本研究では、Ar-H₂中において酸素供給デバイスである酸素ポンプ・センサーを用いてAr-H₂中に供給する酸素量を精密に制御した。そして、水素センサーおよび酸素センサーで水素と酸素の挙動をその場観察しFeの水蒸気酸化における酸素および水蒸気分離解析を行った。

2. 実験方法

基材試料には、Fe (99.99%) を用いた。試料寸法は2 cm²の正方形試料とした。試料表面をエメリー紙800番まで研磨し、超音波洗浄した。

Fig. 1に本実験で用いた装置の概略図を示す。電気炉の前段に酸素センサーと酸素ポンプ・センサーを設置した。この酸素センサーでガスの酸素分圧を測定し、酸素ポンプ・センサーを用いて酸素を供給して水素と酸素の反応を誘発した。Ar-10% H₂ガスを導入ガスとし、流速は30 ml min⁻¹とした。酸素ポンプ・センサーによる酸素の供給と水素の反応に関しては既報⁸⁾に記載の手法で行った。本研究では酸素供給量を明らかにする目的で、定電流で実験を行った。

縦型のシリコニット電気炉内に試料を設置し、900℃まで1時間で昇温した後、4時間保持し、その後炉令した。電気炉の後段にいずれも管状の酸素センサーおよび水素センサーを設置し、排出されたガス雰囲気の水素分圧および酸素分圧を測定した。

Fig. 2に(a)酸素センサーおよび(b)水素センサーの概略図を示す。水素センサーおよび酸素センサーは共に環状であり、酸素センサーは、長さ250 mm、外径10 mm、内径8.5 mmであり、水素センサーは、長さ200 mm、外径10 mm、内径7.0 mmである。中央部の内外側に10 mm幅で白金を塗布し電極とした。内外側の電極から外部端子までは、約3 mm幅で外部端子まで白金を塗布

して導通させた。酸素センサーには酸化物イオン伝導体であるイットリア安定化ジルコニア管 (8 mol%Y₂O₃-ZrO₂) を用いた。また、水素センサーにはプロトン伝導体であるCaZr_{0.9}In_{0.1}O_{3-α}管を用いた。

酸素センサーおよび水素センサーで測定した起電力を(3),(4)式に示すNernstの式に代入し、酸素分圧および水素分圧を算出した。

$$\text{酸素センサー} : E = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_{O_2}(\text{mea})}{P_{O_2}(\text{ref})} \quad (3)$$

$$\text{水素センサー} : E = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2}(\text{ref})}{P_{H_2}(\text{mea})} \quad (4)$$

ここで、 R ：気体定数 (J K⁻¹ mol⁻¹)、 T ：温度 (K)、 F ：ファラデー定数 (A s mol⁻¹)、 E ：測定起電力 (V)、 $P_{O_2}(\text{ref})$ ：参照ガス中の酸素分圧、0.21atm、 $P_{H_2}(\text{ref})$ ：参照ガス中の水素分圧、0.01atmである。センサーの特性上、酸素センサーでは、酸素分圧の高い方が正極となり、水素センサーでは水素分圧の高い方が負極となる。酸素センサーは700℃で、水素センサーは500℃で作動させた。

最初に、プロトン伝導体が500℃で正確に水素濃度を検出できることが可能であるか確認した。Fig. 3に濃度既知のAr-H₂ガスを用いて設定した水素分圧と、センサーで起電力を測定し(4)式に代入して得られた水素分圧の関係を示す。その結果、既知のAr-H₂ガスと水素センサーで測定した起電力から算出した水素分圧が一致したため、正確に作動していることが確認できた。

その後、測定したガス分圧から発生ガス量の算出を行った。測定ガスを理想気体としてシャルルの法則が成立すると仮定すれば、

$$P(dV_r/dt) = (dn/dt)RT_r \quad (5)$$

が成立する。ここで、 P は気体の圧力、 V_r は温度 T_r で測定したガス流量、 n は発生ガスmol量、 T_r は流量を測定した温度で、本研究では25℃である。

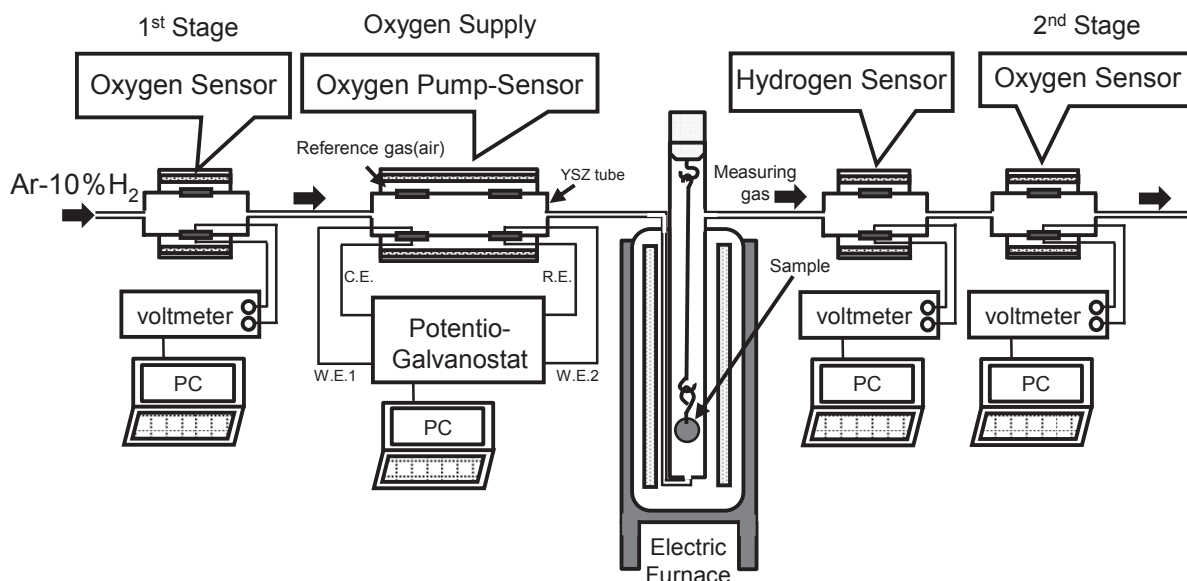


Fig. 1 Oxidation experiment equipment using hydrogen sensor and oxygen sensor.

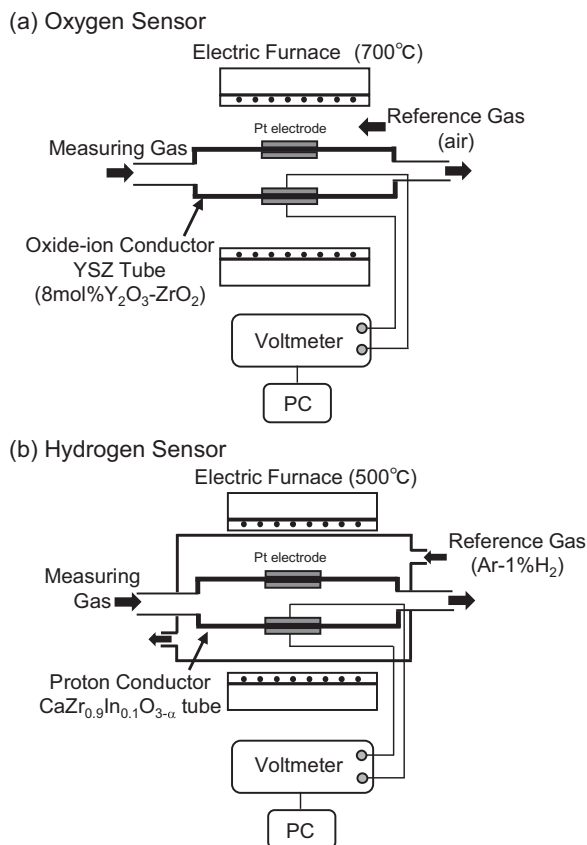


Fig. 2 Schematic diagram of hydrogen (a) and oxygen (b) sensors.

まずFeと酸素では、(1)式の酸化反応が進行する。また、 H_2O は低酸素分圧下では、



の反応で解離する。したがって、低酸素分圧下の水蒸気中では、(1)式と(6)式の反応から(2)式の酸化反応が進行する。(1)式の反応による酸素の消費量は、酸素分圧変化、 ΔP_{O_2}

$$\Delta P_{O_2} = P_{O_2} - P_{O_2}^0 \quad (7)$$

から求める。 $P_{O_2}^0$ 、 P_{O_2} はそれぞれ反応前後のガスの酸素分圧である。(2)式の反応による水素の発生量は、水素分圧変化、 ΔP_{H_2} 、

$$\Delta P_{H_2} = P_{H_2} - P_{H_2}^0 \quad (8)$$

から求める。 $P_{H_2}^0$ 、 P_{H_2} はそれぞれ反応前後のガスの水素分圧である。

酸化速度の算出は、 ΔP_{O_2} および ΔP_{H_2} を(5)式の圧力の項に代入して単位時間あたりの発生ガスmol量 dn/dt を算出して質量に変換し、試料表面積で割ることにより求めた。酸素分圧の変化 ΔP_{O_2} から求めた酸化速度が酸素による酸化になり、水素分圧の変化 ΔP_{H_2} から求めた酸化速度が水蒸気による酸化になる。

耐環境性を評価した試料は、XRD(X-ray diffractometer)を用いて生成した酸化物相の同定をおこなった。さらにFE-SEM(Field emission scanning electron microscope)およびEPMA(Electron probe micro analyzer)を用いて試料断面の観察、分析を行った。

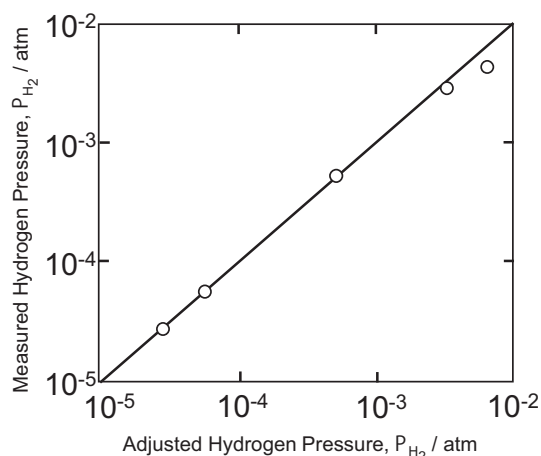


Fig. 3 Relationship between standard gas and measured hydrogen partial pressure.

3. 結果

3.1 供給酸素量と酸素分圧および水素分圧の変化

Fig. 4に、酸素ポンプ・センサーのポンプ部で電流を印加して酸素を供給し、その電流値を用いてファラデーの法則から算出した酸素供給量と時間との関係を示す。算出方法については既報⁸⁾に示す。酸化実験中、一定の酸素が酸素ポンプ・センサーによって供給されていることがわかる。この供給された酸素と雰囲気中の水素が反応することで雰囲気を制御することができる。電流値が350 mAでは、 $2.05 \times 10^{-2} \text{ mol s}^{-1}$ の酸素が管内に供給されている。そして、この供給量は、印加する電流によって上昇し、450 mAでは $2.63 \times 10^{-2} \text{ mol s}^{-1}$ の酸素を供給していることがわかる。これより、供給する酸素量を酸素ポンプ・センサーによって精密に制御できることが明らかになった。

Fig. 5に電流を印加した際の酸化炉後段の酸素センサーで測定した酸素分圧と水素センサーで測定した水素分圧の結果を示す。印加する電流の条件は、酸素を供給しない0 mAと酸素を供給する350 mA、380 mA、

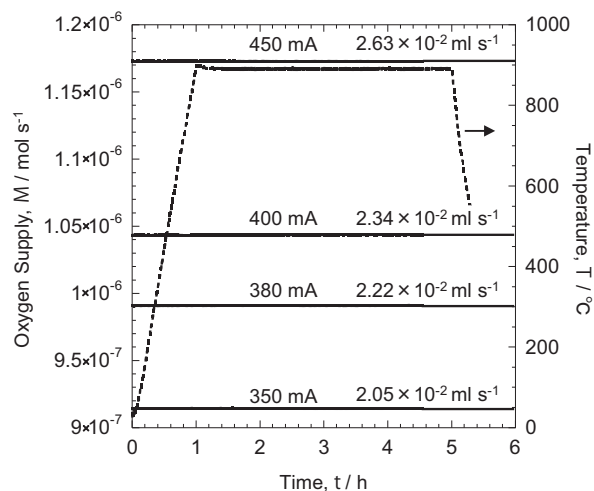


Fig. 4 Time dependence of the amount of oxygen supply as a function of applied current.

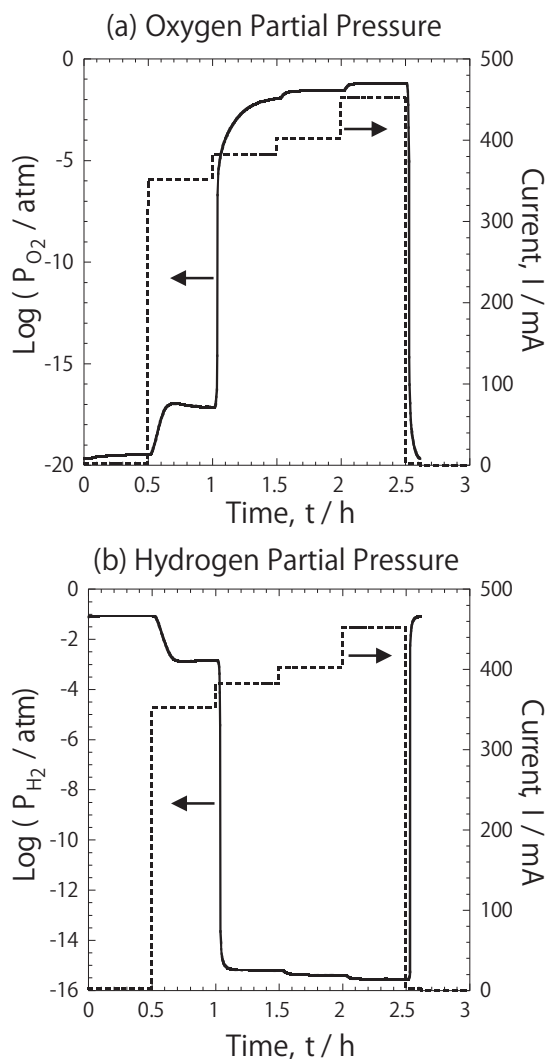


Fig. 5 Relationship between (a) oxygen partial pressure, (b) hydrogen partial pressure, and applied current.

400 mAおよび450 mAとした。その際、電流を印加し30分保持した後に電流を変化させた。電流を印加しない0 mAすなわち酸素を供給しない雰囲気では酸素分圧は $10^{-19.5}$ atmを示し、水素分圧は 10^{-1} atmを示した。ガスとしてAr-10% H_2 を用いているため水素センサーは正確に作動していることがわかる。また、酸素分圧が $10^{-19.5}$ atmであるため還元雰囲気である。この場合、鉄の酸化物であるFeOは900℃では $10^{-15.7}$ atmで生成するため鉄酸化物が生成しない環境であることが想定される。この環境に電流を印加して酸素を供給する。350 mAでは酸素分圧は 10^{-16} atmとなり水素分圧は 10^{-3} atmとなる。すなわち、酸素供給により雰囲気の水素が反応したと考えられ水素分圧が減少した。しかし、380 mAの電流を印加すると酸素分圧は急激に上昇し、一方、水素分圧は急激に低下した。この挙動は380 mAの酸素供給量では雰囲気の水素が、すべて酸素と反応したことを意味している。そして、さらに電流を上昇させると酸素分圧は上昇し水素分圧は低下した。すなわち、水素と酸素の反応よりも過剰の酸素が供給されていることになる。このよう

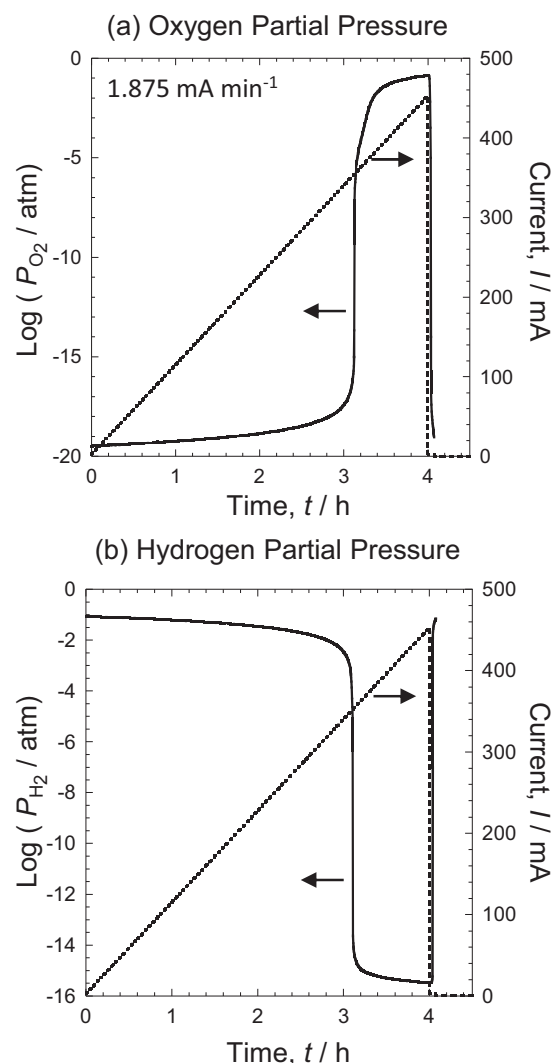


Fig. 6 Changes in (a) oxygen partial pressure and (b) hydrogen partial pressure when the current is varied continuously.

電流制御により供給酸素を精密に制御することで、酸素分圧と水素分圧が変化することが明らかになった。

Fig. 6に、0 mAから450 mAまで連続的に電流を変化させたときの酸素分圧および水素分圧の変化を示す。この時の電流の掃引速度は $1.875 \text{ mA min}^{-1}$ とした。電流を印加しない状況では酸素分圧および水素分圧はFig. 5と同様の値を示した。電流を印加して酸素を供給することによって徐々に酸素分圧は上昇することがわかった。しかし、350 mA付近までは、酸素分圧の上昇は小さく350 mAでの酸素分圧は 10^{-18} atmであった。酸素分圧が低い雰囲気中には水素が残存していると思われる。しかし、350 mAを超えると酸素分圧は急激に増加する。すなわち、この付近から雰囲気中の水素がすべて酸素と反応したと考えられる。そして、350 mAを超えると水素がすべて反応し、雰囲気中には過剰の酸素が存在することがわかる。そして、450 mAでは酸素分圧は 10^{-1} atmまで上昇した。一方、水素分圧においては、初期には 10^{-1} atmを示し、電流を印加することで徐々に水素分圧が低下する。酸素分圧と同様、350 mAまでは大きな水

素分圧の低下を示さず 10^{-3} atm付近まで低下した。しかし、350 mAを超えると急激に水素分圧は低下した。このように、水素分圧を測定することにより雰囲気中の水素量を正確に測定することができ、水素と酸素との反応挙動が解析できる。

3.2 酸化実験における酸素分圧および水素分圧

Fig. 7に、Feを各雰囲気条件で酸化した際の酸素分圧および水素分圧の経時変化を示す。酸素分圧(a)において0 mAでは、一定の値を示した。すなわち、ほとんど酸素による酸化が起こっていないことを示す。350 mAにおいて、高温保持前の酸素分圧は0 mAの時よりも上昇した。そして900℃保持中に、酸素分圧は 10^{-18} atmまで低下するが大きな変化は観察されなかった。一方、380 mA、400 mAおよび450 mAでは高温保持前は高い酸素分圧を示す。そして、昇温過程ではほとんど変化しないが900℃になると急激に酸素分圧が低下した。すなわち、雰囲気中の酸素と純鉄が反応していることを示

唆している。その後、380 mAにおいては、900℃保持中、 10^{-17} atmの値を維持していた。400 mAでは徐々に酸素分圧が上昇した。酸素供給量の多い450 mAでは20 min経過後に急激に酸素分圧は増加した。これは、酸素供給量は450 mAより400 mAの方が少ないため、等温酸化中の酸素分圧の上昇が450 mAよりも遅くなったと考えられる。一方、水素分圧(b)では、0 mAおよび350 mAでは高温保持前は、高い水素分圧を示し、900℃保持中ほとんど水素分圧は変化しなかった。しかし、酸素供給量の多い380 mA、400 mAおよび450 mAでは、酸化温度が900℃になると急激に水素分圧が上昇した。すなわち、酸化によって水素が発生していることがわかる。380 mAでは900℃保持中、高い水素分圧を維持していた。そして、酸化試験終了後、高温保持前の値に戻った。しかし、400 mAでは30 min経過後に、450 mAでは10 min経過後に水素分圧は急激に低下した。これより、400 mAおよび450 mAでは酸化の途中で水蒸気による酸化が抑えられたと考えられる。

3.3 各雰囲気での酸化速度

Fig. 8に、380 mA、400 mAおよび450 mAの酸化速度の時間依存性を示す。黒の部分が水蒸気による酸化、グレーの部分が酸素による酸化を示している。算出方法については実験方法に示している。酸素による酸化と水蒸気による酸化の境界は380 mAでは $0.04 \text{ mg cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 、400 mAでは $0.15 \text{ mg cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 、450 mAでは $0.75 \text{ mg cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ であった。この差は、初期の酸素分圧の差によって生じる。すなわち、酸素分圧が高い場合には、 ΔP_{O_2} が大きくなるため、酸素による酸化速度の境界部分も大きくなる。380 mAでは、酸化速度は小さいが、酸素による酸化よりも水蒸気による酸化の方が大きな割合を占めている。しかし、400 mAにおいて酸素による酸化が昇温過程で起こり、900℃に達すると酸素による酸化と水蒸気による酸化が起こっていることがわかる。その後、水蒸気による酸化は消失して酸素による酸化のみが進行する。このように、酸素センサーと水素センサーを用いることによって酸素による酸化か水蒸気による酸化を区別して解析することができる。そして、酸素の供給量が多い450 mAでは、昇温過程に酸素による酸化が起こり、900℃に到達すると水蒸気による酸化も進行するが、その割合は小さくほとんどが酸素による酸化に支配されている。また、酸化速度は450 mAでの酸素供給時の方が大きな値を示した。このように酸素供給量が多いと酸化速度は大きくなることが明らかになった。

3.4 耐環境性評価後の断面組織

Fig. 9に350 mA(a)および400 mA(b)で酸化した試料の断面組織を示す。酸素供給量の少ない350 mAでは生成した酸化物は薄くFeOの単層が生成していた。Fig. 7の酸素分圧の結果に示すように、酸化中の酸素分圧は 10^{-17} atmであるためFeO単層が生成した。一方、酸素

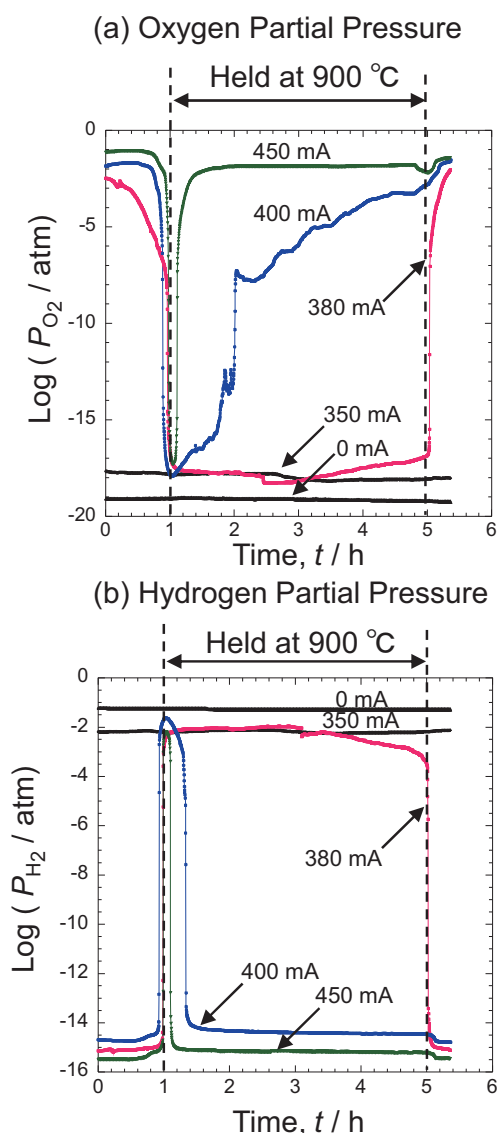


Fig. 7 Changes in (a) oxygen partial pressure, and (b) hydrogen partial pressure when pure iron is oxidized.

供給量の多い400 mAでは酸化物は厚くなり、多層構造を呈していた。基板側からFeO、Fe₃O₄が生成し、最表面に薄いFe₂O₃が生成していた。また、FeOが厚く生成していた。すなわち、加速的な酸化が起こっている。Fig. 7の酸素分圧の結果より酸化中酸素分圧は徐々に上昇しており、Fe₃O₄およびFe₂O₃が生成したと考えられる。このように酸素供給量の違いにより生成する酸化物の形態が異なる。

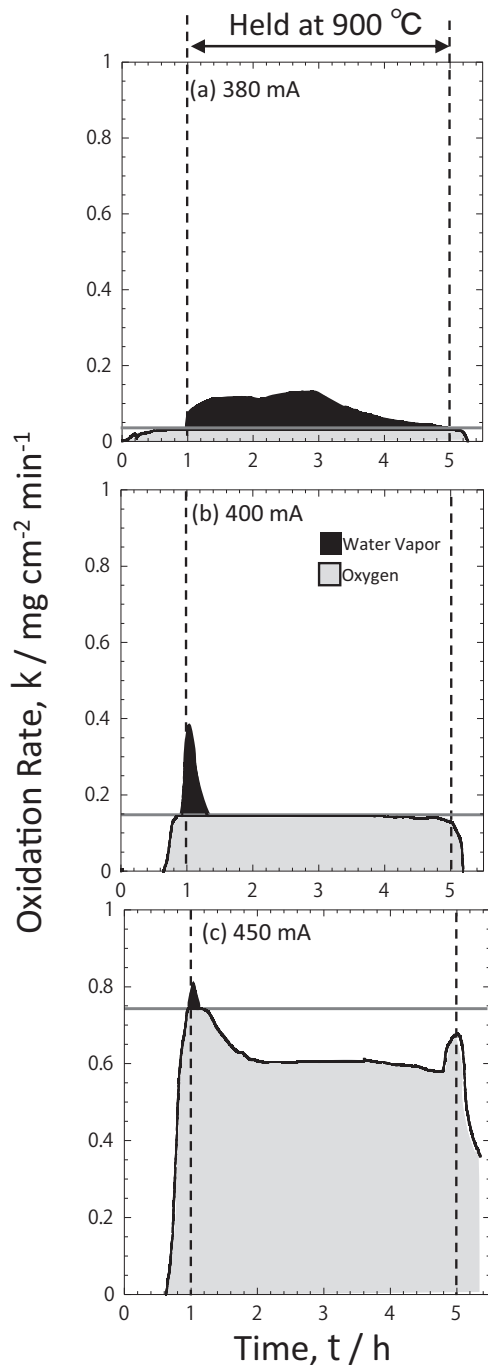


Fig. 8 Time dependence of oxidation rate at (a) 380 mA, (b) 400 mA, and (c) 450 mA.

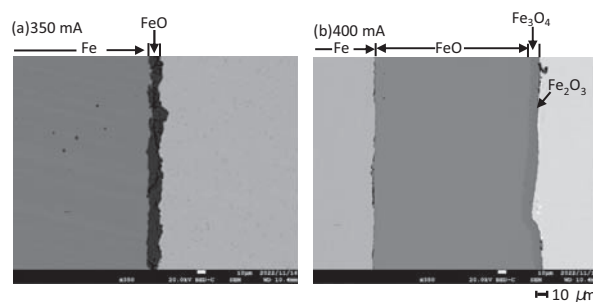


Fig. 9 Cross-sectional microstructure after oxidation at (a) 350 mA, and (b) 400 mA.

4. 考察

4.1 供給酸素と雰囲気との関係

Fig. 10にFig. 6の酸素分圧の変化と2.5から3.5 hの部分の拡大図を示す。350 mAでは酸素分圧は低く、その値を超えると酸素分圧は急激に増加した。酸素ポンプ・センサー部分に印加した電流値は350 mAであり、この値から酸素供給量をファラデーの法則より算出すると $2.0 \times 10^{-2} \text{ ml s}^{-1}$ である。そして、今回の実験におけるAr-10%H₂の流量は 30 ml min^{-1} である。これより、流れる水素量に換算すると $5.0 \times 10^{-2} \text{ ml s}^{-1}$ になる。酸素の値に対して水素の値がおおよそ2倍になるため、350 mAの酸素供給条件では、供給したすべての酸素が水素と反応し水蒸気が生成していることが推察される。すなわち、350 mAよりも電流値が低い環境では、水素—水蒸気的环境となり、350 mAよりも大きな電流値では酸素—水蒸気的环境になることがわかる。そして、供給酸素量が少ない場合には水蒸気による酸化が支配的であり、供給酸素量が多い場合には酸素による酸化が支配的になる。したがって、供給する酸素によって耐環境性が大きく変化することがわかる。

4.2 供給酸素量と酸化増量の関係

Fig. 11に、各電流値での酸化増量の変化を示す。横軸に印加した電流値、縦軸に酸化増量を示している。0 mAでは酸化増量は観察されなかった。すなわち、純鉄の酸化は起こっていないことがわかる。350 mAでは、酸化増量はおおよそ 3.5 mg cm^{-2} を示した。この酸化増量は水蒸気のみによる酸化であると推察される。380 mAでは水蒸気による酸化に酸素による酸化も加わるため酸化増量は急激に増加した。そして、400 mAおよび450 mAではさらに酸化増量が増加するのは、雰囲気酸素—水蒸気的环境になり、Fig. 8に示すように酸素による酸化が優先的に起こるために酸化増量が大きくなったと考えられる。また、酸素供給量の増加にしたがい、酸化物表面の酸素分圧が上昇する。その結果、十分に酸素が供給されるため酸化増量が大きくなったと考えられる。一方、供給する酸素量が少ない場合には酸化物表面の酸素分圧は低いため、十分に酸素が供給されずFeイオンと酸化物イオンの反応が抑制され、酸化増量は小さくなると考えられる。すなわち、水蒸気による酸

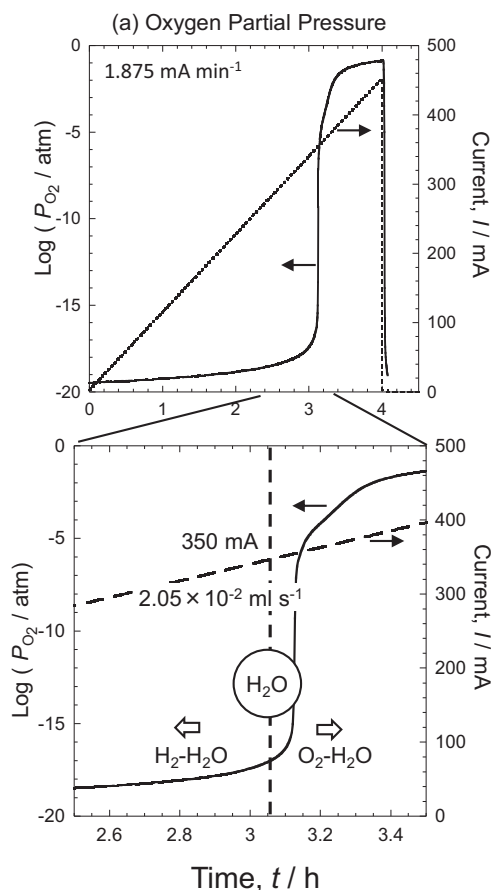


Fig. 10 Relationship between oxygen partial pressure and water vapor generation and applied current.

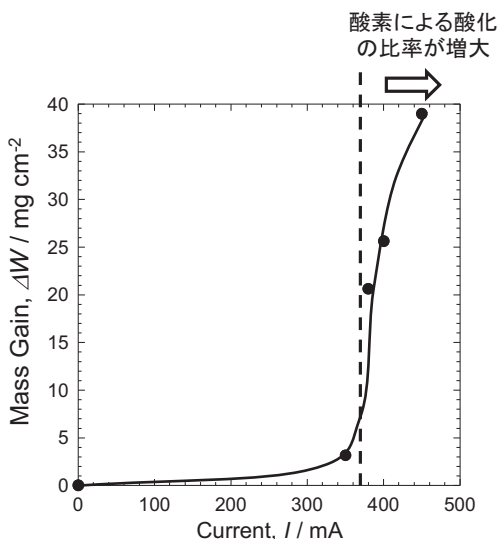


Fig. 11 Relationship between mass gain and applied current.

化は、耐環境性に大きな影響を与えることはないが、その環境に酸素が添加させると材料は加速的な酸化を示すと考えられる。本実験において400 mAでの酸素供給量は $2.34 \times 10^{-2} \text{ ml s}^{-1}$ であり450 mAでは $2.63 \times 10^{-2} \text{ ml s}^{-1}$ である。この $2.9 \times 10^{-3} \text{ ml s}^{-1}$ の差によって酸化挙動が大きく変化することが本実験より明らかとなった。今後、 Al_2O_3 や Cr_2O_3 などの保護的皮膜を生成する合金について本装置を用いて評価する。

5. 結論

- (1) 酸素ポンプ・センサーを用いて供給する酸素量を正確に制御した。その結果、350 mAでは $2.05 \times 10^{-2} \text{ ml s}^{-1}$ の酸素を供給し、電流を増加させ450 mAでは $2.63 \times 10^{-2} \text{ ml s}^{-1}$ の酸素を供給することができた。
- (2) 酸素を供給させて水素と酸素の反応機構を水素センサーおよび酸素センサーを用いて調査した結果、350 mAでは酸素分圧は 10^{-17} atm 、水素分圧は 10^{-3} atm となった。この時、雰囲気中の水素がすべて酸素と反応したと考えられる。
- (3) 雰囲気中の酸素供給量を変化させて酸化実験を行った結果、酸素供給量が少ない場合は、酸素分圧および水素分圧は大きな変化を示さなかった。しかし、酸素供給量が多くなると酸素分圧および水素分圧は酸化とともに大きく変化した。
- (4) 水素センサーおよび酸素センサーを用いて水蒸気による酸化と酸素による酸化を区別して解析した結果、酸素供給量が多い環境では酸素による酸化が支配的であることがわかった。
- (5) 酸素ポンプ・センサーにおける電流値と酸素分圧の結果から、水素と酸素の反応に必要な酸素供給量を明らかにすることができた。

参考文献

- (1) Momirlan, M. and Veziroglu, T. N., The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 30 (2005), pp. 765-802.
- (2) Matsuo, Y., Endo, S., Nagatomi, Y., Shibata, Y. and Komiyama, R., Fujii, Y., A quantitative analysis of Japan's optimal power generation mix in 2050 and the role of CO_2 -free hydrogen, Energy, Vol. 165 (2018), pp. 1200-1219.
- (3) Tratter, A., Klell, M. and Radner, F., Sustainable hydrogen society - Vision, findings and development of a hydrogen economy using the example of Austria, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47 (2022), pp. 2059-2079.
- (4) Fukumoto, M., Kawamori, Y., Sonobe, H., Hara, M. and Kaneko, H., Investigation of High-Temperature Oxidation in Steam for Ni-Al Alloys Using the Combination of a Hydrogen Sensor and an Oxygen Pump-Sensor, Oxidation of Metals, Vol. 89 (2018), pp. 357-373.
- (5) Fukumoto, M., Kawamori, Y. and Hara, M., Investigation of cyclic oxidation in Ar- H_2O for NiAl containing Hf or Zr by the combination of a hydrogen sensor and an oxygen pump-sensor, Corrosion Science, Vol. 149 (2019), pp. 68-74.
- (6) Fukumoto, M., Nakajima, K. and Kawamori, Y., Investigation of Alumina Formation and Oxidation Rate of Ni-5 wt%Al-X wt %Cr Alloy Using Hydrogen Sensor and Oxygen Pump Sensor, Oxidation of Metals, Vol. 94 (2020), pp. 191-204.
- (7) Fukumoto, M. and Nakajima, K., Effect of Oxygen

- on Water Vapor Oxidation of Fe by Oxygen Partial Pressure Control Using Gas Sensor, *Oxidation of Metals*, to be published.
- (8) 福本倫久, 原聖也, 高橋弘樹, 酸素を添加した水素雰囲気におけるNi基合金の高温酸化挙動, *日本ガスタービン学会誌*, Vol. 51 (2023), pp. 176-181.
- (9) Mikkelsen, L. and Linderoth, S., High temperature oxidation of Fe-Cr alloy in O_2 - H_2 - H_2O atmospheres; microstructure and kinetics, *Materials Science and Engineering*, Vol. A361 (2003), pp. 198-212.
- (10) Dudziak, T., Łukaszewicz, M., Simms, N. and Nicholls, J., Analysis of High Temperature Steam Oxidation of Superheater Steels Used in Coal Fired Boilers, *Oxidation of Metals*, Vol. 85 (2016), pp. 171-187.
- (11) Fujii, C. T. and Meussner, R. A., The Mechanism of the High-Temperature Oxidation of Iron-Chromium Alloys in Water Vapor, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 111 (1964), pp. 1215-1221.
- (12) Asteman, H., Svensson, J. -E., Norell, M. and Johansson, L. -G., Influence of Water Vapor and Flow Rate on the High-Temperature Oxidation of 304L; Effect of Chromium Oxide Hydroxide Evaporation, *Oxidation of Metals*, Vol. 54 (2000), pp. 11-26.
- (13) Laverde, D., Gómez-Acebo, T. and Castro, F., Continuous and cyclic oxidation of T91 ferritic steel under steam, *Corrosion Science*, Vol. 46 (2004), pp. 613-631.
- (14) Żurek, J., Wessel, E., Niewolak, L., Schmitz, F., Kern, T. -U., Singheiser, L. and Quadakkers, W. J., Anomalous temperature dependence of oxidation kinetics during steam oxidation of ferritic steels in the temperature range 550-650°C, *Corrosion Science*, Vol. 46 (2004), pp. 2301-2317.
- (15) Ehlers, J., Young, D. J., Smaardijk, E. J., Tyagi, A. K., Penkalla, H. J., Singheiser, L. and Quadakkers, W. J., Enhanced oxidation of the 9%Cr steel P91 in water vapour containing environments, *Corrosion Science*, Vol. 48 (2006), pp. 3428-3454.
- (16) Essuman, E., Meier, G. H., Żurek, J., Hänsel, M., Singheiser, L. and Quadakkers, W. J., Enhanced internal oxidation as trigger for breakaway oxidation of Fe-Cr alloys in gases containing water vapor, *Scripta Materialia*, Vol. 57 (2007), pp. 845-848.
- (17) Essuman, E., Meier, G. H., Żurek, J., Hänsel, M. and Quadakkers, W. J., The Effect of Water Vapor on Selective Oxidation of Fe-Cr Alloys, *Oxidation of Metals*, Vol. 69 (2008), pp. 143-162.
- (18) Pujilaksono, B., Jonsson, T., Halvarsson, M., Panas, I., Svensson, J. -E. and Johansson, L. -G., Paralineal Oxidation of Chromium in O_2 + H_2O Environment at 600-700°C, *Oxidation of Metals*, Vol. 70 (2008), pp. 163-188.
- (19) Saunders, S. R. J., Monteiro, M. and Rizzo, F., The oxidation behaviour of metals and alloys at high temperatures in atmospheres containing water vapour: A review, *Progress in Materials Science*, Vol. 53 (2008), pp. 775-837.
- (20) Othman, N. K., Othman, N., Zhang, J. and Young, D. J., Effects of water vapour on isothermal oxidation of chromia-forming alloys in Ar/O_2 and Ar/H_2 atmospheres, *Corrosion Science*, Vol. 51 (2009), pp. 3039-3049.
- (21) Othman, N. K., Zhang, J. and Young, D. J., Temperature and water vapour effects on the cyclic oxidation behaviour of Fe-Cr alloys, *Corrosion Science*, Vol. 52 (2010), pp. 2827-2836.
- (22) Pujilaksono, B., Jonsson, T., Heidari, H., Halvarsson, M., Svensson, J. -E. and Johansson, L. -G., Oxidation of Binary FeCr Alloys (Fe-2.25Cr, Fe-10Cr, Fe-18Cr and Fe-25Cr) in O_2 and in O_2 + H_2O Environment at 600°C, *Oxidation of Metals*, Vol. 75 (2011), pp. 183-207.
- (23) Jonsson, T., Pujilaksono, B., Heidari, H., Liu, F., Svensson, J. -E., Halvarsson, M. and Johansson, L. -G., Oxidation of Fe-10Cr in O_2 and O_2 + H_2O environment at 600°C : A microstructural investigation, *Corrosion Science*, Vol. 75 (2013), pp. 326-336.

平板試験装置を用いた高性能フィルム冷却孔形状に関する研究 —Pick-Shaped Holeの提案—

Studies on High-Performance Film Cooling Hole Shape using a Flat-Plate Test Facility - Proposal of Pick-Shaped Hole -

佐々木 優大^{*1}
SASAKI Yudai

船崎 健一^{*2}
FUNAZAKI Ken-ichi

ABSTRACT

Turbine inlet temperature (TIT) of gas turbines has been increasing for decades to achieve their larger output and higher thermal efficiency and the advances in cooling technology for the turbine sections have significantly contributed to this trend. Among the cooling technologies, film cooling is widely adopted for turbine blades because of its high cooling performance, however, further studies are still required on the film cooling so as to attain higher cooling effectiveness with lower aerodynamic loss caused by the coolant injection into the main flow. This study proposes a new cooling hole shape, called Pick-Shaped Hole. The film cooling performance and aero-thermal performance of this new cooling hole are investigated experimentally and numerically in comparison with Round Hole and Fan-Shaped Hole under various flow conditions, such as blowing ratio and turbulence intensity.

キーワード：ガスタービン，フィルム冷却，冷却孔，感圧塗料，主流乱れ度

Key words : Gas Turbine, Film cooling, Cooling Hole, Pressure Sensitive Paint, Turbulence intensity

1. 研究背景

近年，燃料価格の高騰等によりガスタービンには更なる高出力化，高効率化が求められている。これらを達成するためにはタービン入口温度（TIT）の上昇が重要であるが，TITの上昇に伴って燃焼器直下流に位置する高圧タービン部の熱負荷が増大するため，冷却技術の進歩が必要不可欠である。その中でも，フィルム冷却技術は最も有効な冷却手法である。

フィルム冷却の課題として，冷却空気と主流の干渉により発生するCounter Rotating Vortex Pair (CRVP) と呼ばれる渦構造の存在が挙げられる。CRVPにより冷却空気を壁面から引き離す現象であるlift-offや高温主流の巻き込みが誘起されるため，結果として，CRVPによりフィルム冷却性能が悪化することがHaven⁽¹⁾らの研究で示されている。CRVPを制御することがフィルム冷却効率の向上に繋がる⁽²⁾ため，CRVPの制御に向けて数多くの研究が実施されている。

フィルム冷却に関する最大の技術的進歩は，冷却孔出口形状に関するものであるとされている⁽³⁾。最もよく知られている出口形状はDiffuser Hole（またはFan-

Shaped Hole)⁽⁴⁾であり，これにより主流への冷却空気の貫通を低減するとともにCRVPを制御することで，壁面への付着性が向上することから広く実用に供されている。また近年では，Arrowhead-Shaped Hole⁽⁵⁾やNEKOMIMI cooling hole⁽⁶⁾と呼ばれる高い冷却性能を有する形状なども提案されている。

一方で，フィルム冷却は主流との混合現象を伴うため冷却性能だけでなくタービン損失への影響も考慮しなければならない。Fan-Shaped Holeは1980年頃に提案された革新的な形状であったが，その後提案された冷却孔形状は主として冷却性能のみに関心が寄せられ，空力面の調査が十分ではなかった。

本研究では，岩手大学において新たに考案された形状であるPick-Shaped Hole (PSH) を対象として，フィルム冷却性能評価及び空力損失評価を行っている。ここでは，吹き出し比，主流乱れ等の各流動条件におけるフィルム冷却性能及び空力損失について，Round Hole (RH) と777-Shaped Hole⁽⁷⁾ (SH) との比較により明らかにしている。

○主な記号

A_0, A_1, A_2, A_3	: Stern-Volmer係数[-]	BR	: 吹き出し比[-]
C	: 酸素濃度[%]	DR	: 密度比[-]
d	: 冷却孔直径(10[mm])	I	: 発光強度[a.u.]
L_{fwd}	: 拡大部長さ[mm]	L_m	: 直管部長さ[mm]
MW	: 分子量比[-]	P	: 圧力[kPa]

原稿受付 2023年5月14日

査読完了 2023年7月30日

*1 岩手大学大学院

〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5

*2 岩手大学理工学部

〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5

P_{O_2}	: 酸素分圧 [kPa]
Re	: レイノルズ数 ($= \rho \infty U \infty d / \mu$) [-]
Tu	: 主流乱れ度 [%] U : 流速 [m/s]
x	: 流れ方向 [-] y : 高さ方向 [-]
z	: スパン方向 [-] δ : 境界層厚さ [mm]
δ_1	: 排除厚さ [mm] δ_2 : 運動量厚さ [mm]
ζ	: 流れ方向渦度 [s^{-1}]
η	: フィルム冷却効率 [-]
θ	: 無次元空間温度分布 [-]
μ	: 粘性係数 [$Pa \cdot s$]
ρ	: 密度 [kg/m^3]

○添え字

∞	: 主流空気	2	: 冷却空気
dark	: 暗電流画像	ref	: リファレンス
wall	: 断熱壁		

2. 実験手法

2.1 平板試験装置

Fig. 1に実験装置の概要を示す。本研究では、吸込式風洞を用いている。主流は風洞下流に位置する送風機により供給され、主流流入部を通過する際、ハニカム格子と3枚の整流網を通過し整流される。その後、縮流され加速した空気がテストセクションへ流入する。冷却空気として二酸化炭素を代用しており（以下、便宜的に冷却空気という）、ボンベから供給され、質量流量計で所定の流量に調整後、プレナム内へ流入する。テストセクションには感圧塗料（PSP: Pressure Sensitive Paint）を塗布した供試体を取り付けている。PSP計測にはロングパスフィルタを取り付けた冷却CCDカメラとPSP励起用の紫外線LED光源を用いている。

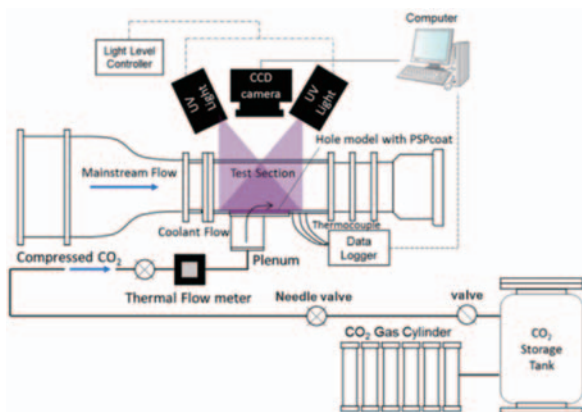


Fig. 1 Flat plate test equipment

2.2 冷却孔形状

本研究で用いた冷却孔形状はTable 1, Fig. 2に示す通りである。冷却孔の中心軸と壁面が交わる点を原点としている。各冷却孔の冷却孔長さは $6d$ であり、供試体の厚さは $3d$ である。また冷却孔はスパン方向に3つ設けており、冷却孔ピッチは $6d$ である。形状の特徴として、

SHは冷却孔出口部の断面形状を末広状としているディフューザー型である。一方で、PSHは上から見た冷却孔出口部形状が先端にいくにつれて狭まっていく特徴を持ち、弦楽器を弾く際に用いるピック（Pick）のような形状をしている。PSHの出口部形状の概要をFig. 3に示す。PSHはスパン方向拡大角を広げることで冷却空気をスパン方向へと拡散させることと出口部形状の先端を狭めることで冷却空気の流れを低減させることを目的としてパラメータを決定している。今回、比較対象としたSHの形状は新たな冷却孔形状と比較するための基準の形状として考案されている。そのため、このSHの形状と比較することでPSHの性能を評価している。

Table 1 Parameter details

Cooling hole shape	RH	SH	PSH
Diameter (d) [mm]	10	10	10
Metering length (L_m/d) [-]	-	2.5	2.13
Injection angle (α) [deg.]	30	30	30
Forward expansion angle (β) [deg.]	-	7	5.3
Lateral expansion angle (γ) [deg.]	-	7	11.2

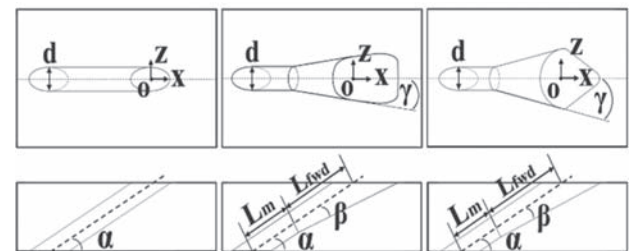
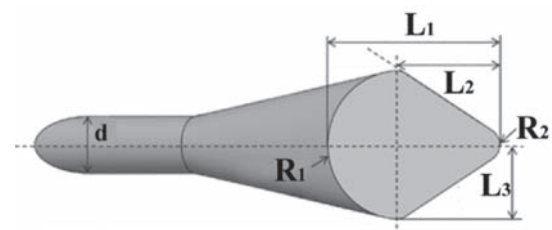
Fig. 2 Configuration parameters
(Left: RH, Middle: SH, Right: PSH)

Fig. 3 Cooling hole outlet shape (PSH)

2.3 PSP計測

PSPは発光色素をセンサとした機能性塗料であり、特定の波長により励起され発光し、その発光強度は色素周辺の酸素濃度に応じて変化する性質を持っている。そこで本研究では、紫外線LED光源によってPSPを励起し、冷却CCDカメラにより供試体表面のPSPの発光強度を撮影した後、画像処理によりフィルム冷却効率を算出した。

今回用いたPSPの感圧色素には常温で高い圧力感度を持つ白金ポルフィリン（PtTFTT）を使用しており、励起波長は392nm、発光波長は650nmである。そのため紫外線LED光源のピーク波長は400nmである。また650nm

の発光波長を捉えるために、カットオン波長630nmのロングパスフィルタを装着した冷却CCDカメラ（16bit）を使用した。

PSPを用いたフィルム冷却効率の計測では、熱拡散と物質拡散のアナロジー成立が前提条件とされており、同アナロジーが成立する場合、フィルム冷却効率は式(1)のように定義される⁽⁸⁾。

$$\eta = \frac{T_{\infty} - T_{wall}}{T_{\infty} - T_2} = \frac{C_{\infty} - C_{wall}}{C_{\infty} - C_2} \quad (1)$$

本研究では、分子量比の影響も考慮したCharbonnierら⁽⁹⁾が提案した式(2)を定義式として採用している。MWは異種ガスである二酸化炭素と主流空気分子量比（MW=1.5194）である。 $P_{O_2,air}/P_{O_2,ref}$ は冷却空気として空気を使用した際の酸素分圧比、 $P_{O_2,gas}/P_{O_2,ref}$ は冷却空気として二酸化炭素を代用した際の酸素分圧比である。なお、冷却空気として空気を使用した際の酸素分圧の変化は非常に小さく、無視できると仮定し、 $P_{O_2,air}/P_{O_2,ref} \approx 1$ として計測を行っている。

$$\eta = 1 - \frac{1}{\left\{1 + MW \left(\frac{P_{O_2,air}/P_{O_2,ref}}{P_{O_2,gas}/P_{O_2,ref}} - 1 \right)\right\}} \quad (2)$$

また、PSPの発光強度と圧力の間には式(3)に示すStern-Volmer式が成立するため、事前に真空チャンバーを用いてPSPの較正を行い、同式を取得しておくことでフィルム冷却効率の算出が可能となる。

$$\frac{I_{ref} - I_{dark}}{I - I_{dark}} = A_0 + A_1 \frac{P}{P_{ref}} + A_2 \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^2 + A_3 \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^3 \quad (3)$$

ここで、 I_{ref} は主流のみ通風時の画像、 I_{dark} は暗電流画像、 I は冷却空気を噴出した際の画像の輝度である。また (P/P_{ref}) は表面圧力とリファレンスの比である。 A_0, A_1, A_2, A_3 は較正係数であり、供試体表面温度を制御した較正試験により取得する⁽¹⁰⁾。較正試験を行った後、式(3)を利用し、取得した画像から分圧比を算出し、式(2)に分圧比を代入することで、フィルム冷却効率を算出した。なお、各撮影条件で150枚の画像を取得し、平均した画像を用いた。

2.4 境界層計測

本研究ではDenton⁽¹¹⁾による空力損失の考えに基づき、境界層計測を行っている。以下に境界層計測の手順を述べる。まずアクリルプレートに開けたスリット（吸い込み防止材付き）から通した熱線プローブをマイクروسコープと隙間ゲージを用いて、 $x/d=18$, $y/d=0.03$, $z/d=0$ の位置まで正確に接近させる。その後、2軸トラバース装置によって壁面法線方向に $0.03d \sim 2.5d$ まで移動させながら流速を計測することで境界層内の流速分布を得る。なお、使用する熱線プローブは、試験直前に風洞内で較正を行う。サンプリング周波数は20kHz、計測時間は3.5sとしている。境界層内の速度分布から、式(4)及び式(5)によりそれぞれ排除厚さ δ_1 及び運動量厚さ δ_2 を算出する。これらの二つの積分量は、Dentonによって翼面境界層由来の翼列全圧損失と深く関係しているこ

とが示されている。なお、境界層厚さ δ は流速が主流速度の98%に達する時の壁面からの距離と定義している。

$$\delta_1 = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (4)$$

$$\delta_2 = \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (5)$$

また、本研究では、空気を用いて熱線プローブの較正を行い、実験では冷却空気として二酸化炭素を使用している。そのため、空気との混合過程における物性値（定圧比熱、密度、粘性係数、熱伝導率）の変化に伴う熱線プローブの出力変化の影響が懸念された。そこでSHのBR=2.5を対象に以下のように二酸化炭素と空気との混合効果を調査した。なお調査するにあたり、日本カノマックス株式会社の技術資料⁽¹²⁾を参考にしている。濃度の見積もりに関する情報をTable 2に示す。まず式(2)を用いて、 $x/d=18$ におけるフィルム冷却効率から $P_{O_2,gas}/P_{O_2,ref}$ を逆算した。酸素分圧の減少分を二酸化炭素分圧の増加分と仮定することで、計測時の二酸化炭素の割合を算出した。そして、混合ガス中の各気体の割合から混合ガスの物性値を求める。その後動粘性係数、温度伝達率を求め、それらを用いてレイノルズ数、プラントル数、ヌセルト数を求める。最後に放散熱量を算出する。Fig. 4に空気・混合ガスそれぞれの物性値から算出した放散熱量と流速の関係を示す。Fig. 4より、流速の最大の誤差は約0.711%であり、境界層計測位置での出力変化はほぼ無視できると考えられる。

Table 2 Concentration estimates at $x/d=18$

Film effectiveness[-]	0.499
$P_{O_2,gas}/P_{O_2,ref}$ [-]	0.604
Oxygen ratio[%]	12.655
Carbon dioxide ratio[%]	8.325

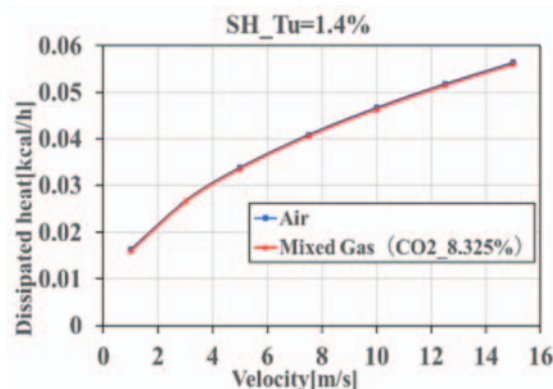


Fig. 4 Relationship between dissipated heat and velocity at $x/d=18$

2.5 乱流格子及び主流乱れ度

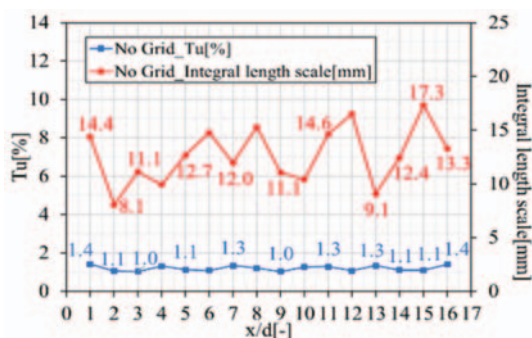
主流乱れ度の導入のためにFig. 5に示す乱流格子を用いている。乱流格子は一辺が b （ $=8\text{mm}$ ）の正方形断面を有する角材の組み合わせで作製しており、 $x/d=-20$

の位置に設置している。格子間隔Mは25mm、空隙率は0.462である。主流乱れ度の計測は熱線プローブを用いて行い、 $x/d=1 \sim 16$, $y/d=7.5$, $z/d=0$ の位置で計測している。サンプリング周波数は20kHzで計測時間は5sとした。主流乱れ度の算出については約100,000個のデータを10分割してRMSを算出し、その後10区間の相加平均を計算し、主流乱れ度としている。Fig. 6に主流乱れ度と計測データから算出した積分長さスケールを示す。主流乱れ度は冷却孔直下 ($x/d=1$) で定義しており、式(6)を用いて算出している。 U_i は任意の流速である。乱流格子を挿入しない場合は $Tu=1.4\%$ であり、乱流格子を挿入した場合は $Tu=12.6\%$ である。積分長さスケールは速度データの自己相関係数の積分で得られる積分時間スケールと平均流速から算出している。自己相関係数が0になる区間を積分範囲としており、自己相関係数のカーブが0を下回らない場合は近似曲線によってフィッティングしたデータから算出している。

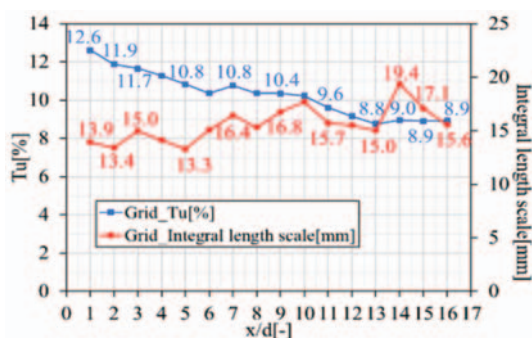
$$Tu = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (U_i - \bar{U})^2}}{\bar{U}} \times 100 \quad (6)$$



Fig. 5 Turbulence grid



(a) No Grid



(b) Grid

Fig. 6 Turbulence intensity and integral length scale

2.6 計測条件

本研究では、PSP計測・境界層計測共に冷却孔直径 $d=10\text{mm}$ を代表長さ、 $x/d=0$ の位置でピトー管により取得した主流流速を代表流速とし、 $Re=6,000$ で試験を実施した。主流 (air) に対する冷却空気 (CO_2) の密度比は $DR=1.53$ である。今回の行った試験ケースはTable 3に示す通りである。PSP計測により取得したデータの処理範囲は、 $0 \leq x/d \leq 20$, $-3 \leq z/d \leq 3$ の領域である。

Table 3 Test cases

Cooling hole shape	RH		SH	PSH
$BR[-]$	0.5	1.0	1.5	2.5
$Tu[\%]$	1.4		12.6	

3. 数値解析手法

Fig. 7に解析ドメインを示す。格子生成にはANSYS ICEM CFD ver18.1を用いており、全て非構造格子を生成した。格子サイズは主流部ダクトにおいて $0 \leq y/d \leq 0.25$ の範囲で0.5mm, $0.25 \leq y/d \leq 2.5$ の範囲で1mm, $2.5 \leq y/d \leq 3.5$ の範囲で3mm, $3.5 \leq y/d \leq 7.5$ の範囲で5mmとした。冷却孔の格子サイズは0.5mmとし、冷却空気用プレナムにおいて $-3.5 \leq y/d \leq -3.0$ の範囲で0.5mm, $-13 \leq y/d \leq -3.5$ の範囲で3mmとした。壁面近傍にはプリズムメッシュを適用しており、最小格子幅: 0.0040mm, 拡大率: 1.2, 生成層数: 22 (プリズム幅: $\sim 1\text{mm}$) とし、 y^+ は1未満である。総格子要素数は約2800万セルで、格子依存性調査の結果から計算格子を選択している。

解析ソルバーにはANSYS CFX ver18.1を使用してRANS解析を行った。乱流モデルにはSSTモデルを使用した。SSTモデルの選定理由は過去に行われた流れ制御デバイスの最適化の研究^[3]において、RANS解析かつSSTモデルを採用した場合の数値解析結果と実験結果から導出された最適形状が一致した前例があるためである。また、実験における境界層厚さ ($x/d=-9$, $z/d=0$ の位置で $0.24d$) を再現するため、主流入口部には速度分布を与えた。境界条件をTable 4に示す。主流側の上面部には対称境界条件、下面部には断熱壁条件、側面部には周期境界条件を適用した。冷却空気側の上面部には断熱

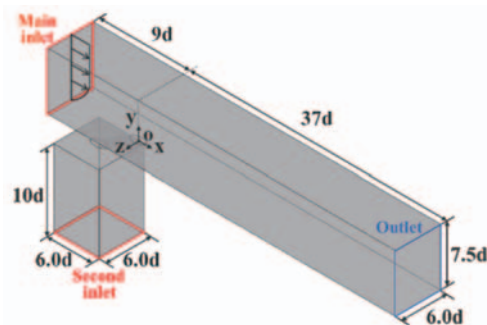


Fig. 7 Analysis domain

Table 4 Boundary conditions

Reynolds number	$Re=6,000$
Blowing ratio	$BR=0.5, 1.0, 1.5, 2.5$
Density ratio	$DR=1.53$
Mainstream inlet	Velocity profile [m/s] Temperature: 298.15 [K] Turbulence: 1.4 [%]
Mainstream outlet	Static pressure: 0 [Pa]
Secondary flow inlet	Mass flow rate [kg/s] Temperature: 194.85 [K]

壁条件，側面部には周期境界条件または断熱壁条件を適用した。またデータの処理範囲は，PSP計測の処理範囲と同様に $0 \leq x/d \leq 20$ ， $-3 \leq z/d \leq 3$ の領域である。

4. 結果と考察

4.1 PSP計測結果

Fig. 8の(a)～(d)に各吹き出し比における各冷却孔のフィルム冷却効率分布を示す。各条件において上段が $Tu=1.4\%$ ，下段が $Tu=12.6\%$ の結果である。全体の傾向として，主流乱れ度が増加するとスパン方向と主流流れ方向共にフィルム冷却効率が低下している。これは高い主流乱れ度によって主流空気と冷却空気の混合が促進したためだと考えられる。RHはどちらの主流乱れ度の条件でも $BR=1.5$ ， 2.5 では著しい効率の低下が確認される。これは吹き出し比の上昇により主流に対する冷却空気の貫通が強まり，冷却空気がlift-offしたためと思われる⁽⁴⁾。SHは冷却孔出口部が拡大している形状の効果により，冷却空気の運動量が低下し，RHに比べて冷却空気のlift-offの抑制やスパン方向への拡散を促進させる効果が確認できる。SH，PSHは各吹き出し比において傾向が似ているが，PSHはSHよりも広いスパン方向拡大角を有しており，SHと比較してスパン方向への広がりを維持したまま冷却空気が下流まで付着していることが分かる。特に $Tu=1.4\%$ かつ高い吹き出し比の条件ではその様子が顕著に確認できる。

Fig. 9の(a)～(d)に各冷却孔のフィルム冷却効率のスパン平均値を示す。図中の破線，点線，実線の鉛直線は，それぞれRH，SH，PSHの冷却孔の後縁(T.E.)の位置を示す。 $x/d=3.8$ 付近に不連続性が見られるが，その位置は供試体のはめ込みによって生じるつなぎ目の位置である。

$Tu=1.4\%$

RHは $BR=0.5$ でスパン平均値のピークを取り，吹き出し比の上昇に伴って効率が低下していった。 $BR=1.5$ ， 2.5 ではほぼ無冷却のような効率分布であったため，スパン平均値としても非常に低い値になっている。各吹き出し比において，PSHはSHの効率を上回っており，効率分布からも明かなように吹き出し比が上昇するにつれて差が広がっている。PSHはSHのスパン平均値と比較して， $x/d=20$ では $BR=1.5$ で約14%増加し，

$BR=2.5$ で約36%増加した。

$Tu=12.6\%$

$BR=0.5$ ， 1.0 においてPSHはSHのスパン平均値を若干下回った。しかし，PSHはSHの効率値と比較して， $BR=1.5$ では冷却孔直下で若干上回っており， $BR=2.5$ ではほぼ全ての領域でSHのスパン平均値を上回り， $x/d=6$ では約10%増加した。 $Tu=12.6\%$ の条件でも高い吹き出し比において優位性を示している。

これらの結果から，PSHはSHと比較して，どちらの主流乱れ度の条件でも高い吹き出し比において優れた冷却性能を有していることが確認できた。また，RHは $BR=0.5$ ， 1.0 において $Tu=1.4\%$ の条件の効率が高い一方で， $BR=1.5$ ， 2.5 では $Tu=12.6\%$ の条件の方が高いスパン平均値を示している。これは主流乱れによって冷却空気がスパン方向に広がり，効率が上昇したと考えられ，Saumweber⁽¹⁵⁾らの研究でも同様な傾向が示されている。

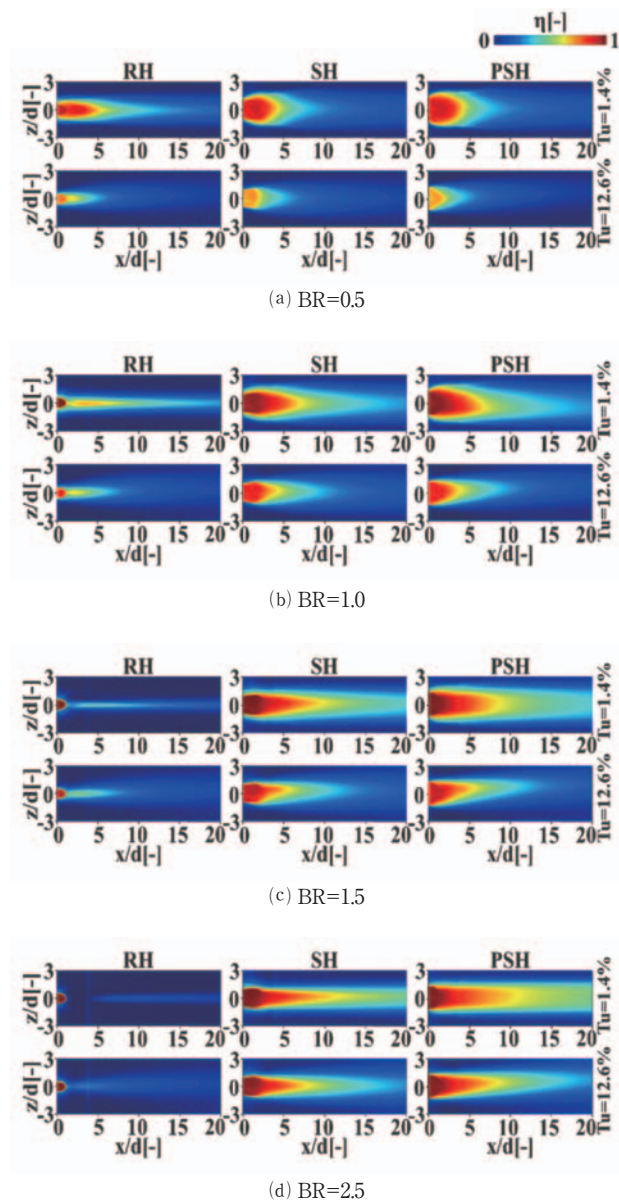
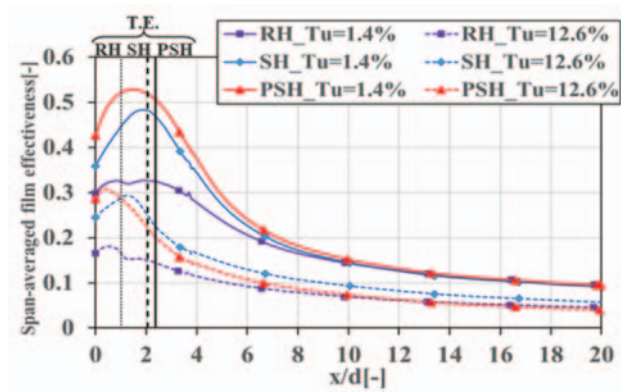
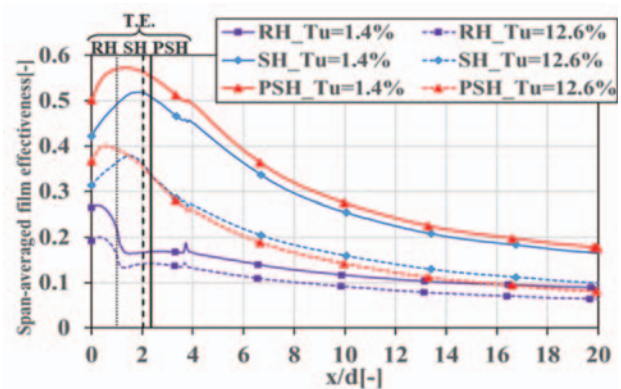


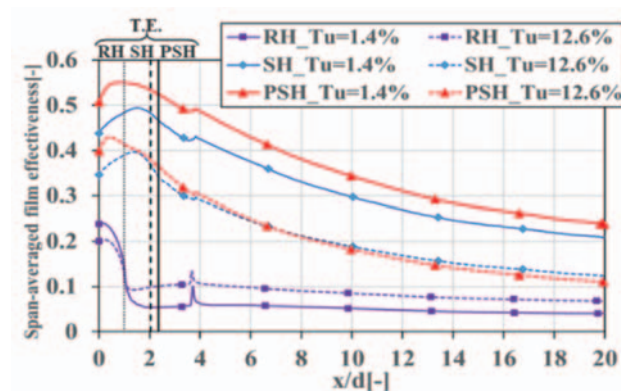
Fig. 8 Film cooling effectiveness distributions



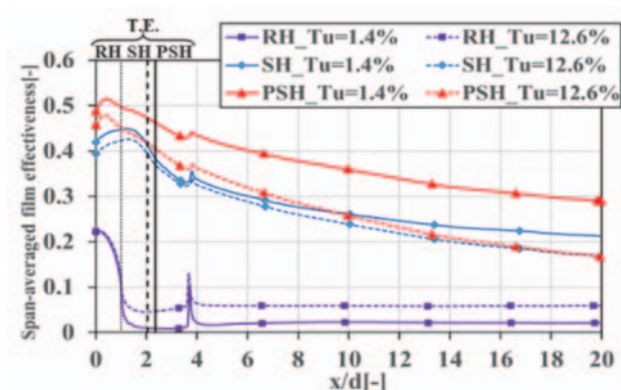
(a) BR=0.5



(b) BR=1.0



(c) BR=1.5



(d) BR=2.5

Fig. 9 Span-averaged film effectiveness

4.2 境界層計測結果

(1) 時間平均速度分布

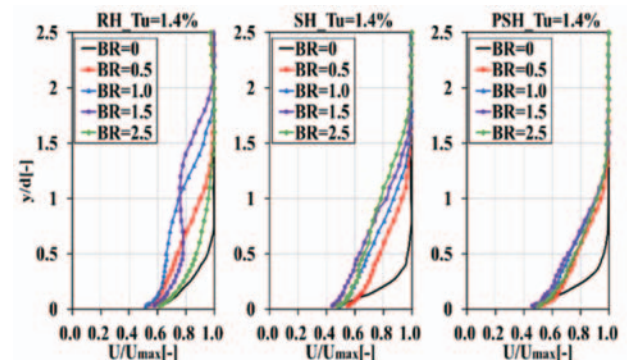
Fig. 10の(a), (b)は各主流乱れ度の条件における時間平均速度分布を示す。

Tu=1.4%

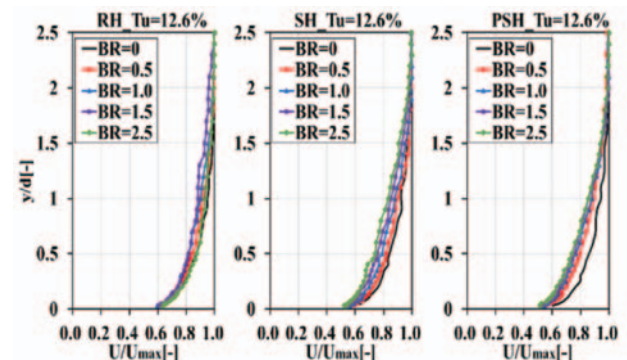
RHはBR=1.5の $y/d=1.2$ 付近で流速が低下しており、噴流状となった冷却空気下流でのwake発生の様子が確認できる。これはPSP計測の結果から、BR=1.5ではすでに冷却空気が壁面からlift-offしている条件であることから推測できる。BR=2.5になると冷却空気の噴出がないBR=0の速度分布の傾向に近づいているが、これは、冷却空気が大きくlift-offし、冷却空気の存在する領域が計測領域外に存在していることが推測される。また、SHはBRの上昇に伴って、境界層が厚くなる傾向にある。一方で、PSHはSHと比較して境界層が薄く、BRの上昇による変化があまり見られない。そのため、高い吹き出し比の場合でもlift-offを抑制できていることが分かる。

Tu=12.6%

Fig. 10 (b)より壁面近傍での流速上昇が確認できることから主流乱れ度の増加により、主流空気と冷却空気の混合が促進され、PSP計測結果で示したようにフィルム冷却効率の低下を招いたと考えられる。



(a) Tu=1.4%



(b) Tu=12.6%

Fig. 10 Time-averaged velocity profile at $x/d=18$

(2) 境界層厚さ

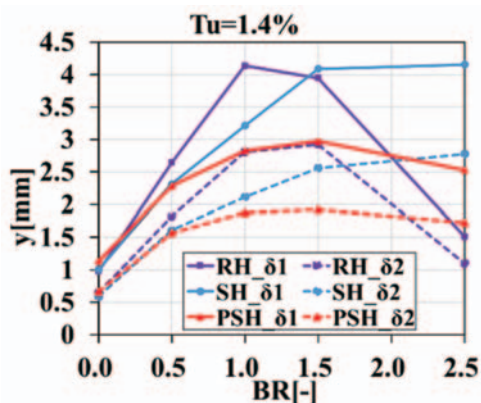
Fig. 11の(a), (b)に各主流乱れ度の条件における時間平均排除厚さ (δ_1) 及び時間平均運動量厚さ (δ_2) を示す。

Tu=1.4%

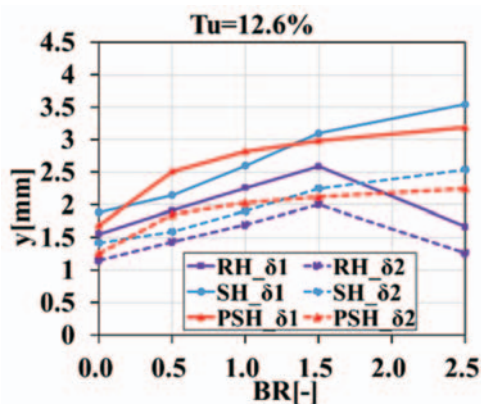
RHはBR=1.5で運動量厚さがピークに達し、BR=2.5では大きく減少している。PSP計測の結果よりBR=2.5においてもSH、PSHはフィルム冷却効率が維持されているのに対し、RHは冷却空気がlift-offしており、冷却性能が発揮されていないことが分かる。したがって、RHのBR=2.5の条件では今回の計測範囲外に冷却空気の影響が大きく及んでいる。そのため運動量厚さが極大となる吹き出し比以上の条件においては議論の対象にできない。SH、PSHはBR=0.5において排除厚さ・運動量厚さに差はないが、BR=1.0以上では、SHはBRの上昇に伴い排除厚さ・運動量厚さが増加している。一方で、PSHはSHと比較して、BR=2.5において約38%も空力損失（運動量厚さ）が低減している。

Tu=12.6%

主流乱れ度が増加したことにより各冷却孔共に排除厚さ・運動量厚さが減少したことが確認できる。PSHはSHと比べて高い吹き出し比において排除厚さ・運動量厚さが小さくなっており、BR=2.5では約12%の空力損失（運動量厚さ）が低減された。PSP計測でもこの条件で優位性を示している。



(a) Tu=1.4%



(b) Tu=12.6%

Fig. 11 Time-averaged displacement thickness (δ_1) and momentum thickness (δ_2) at $x/d=18$

4.3 数値解析結果

以下ではTu=1.4%, BR=1.5の条件でのデータを例に考察を行っていく。Fig. 12, 13にPSP計測結果と数値解析結果のフィルム冷却効率分布及びスパン平均フィルム冷却効率を示す。全体的な傾向として、数値解析の方が実験よりも低い効率値を示した。フィルム効率分布を見ると、RHではlift-offの影響もあり実験とCFDとは傾向的には一致しているが、SH、PSHに関してはフィルム冷却効率分布及びスパン平均値に差異が確認できる。ただし、実験結果でPSHがSHのスパン平均値を相当量上回るという結果はCFD結果でも明確に確認できる。このように、RANSによる定常解析は定性的な議論には有用であると考えられるが、フィルム冷却はそれ自体非定常性の強い乱流拡散現象であり、今後、非定常解析によるPSHの更なる考察が必要である。

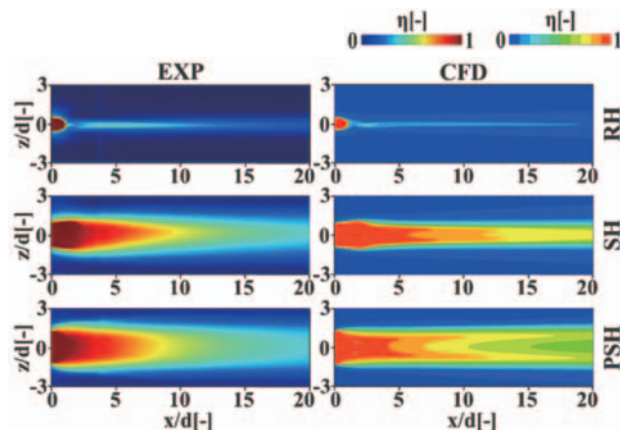


Fig. 12 Film cooling effectiveness distributions (EXP vs CFD, BR=1.5)

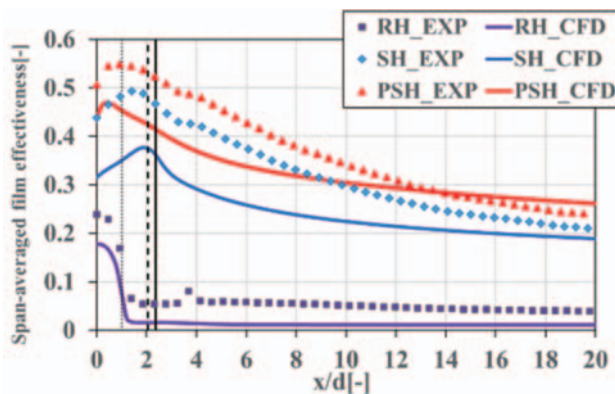


Fig. 13 Span-averaged film effectiveness (EXP vs CFD, BR=1.5)

Fig. 14に各冷却孔のフィルム効率分布と $x/d=0 \sim 20$ における無次元空間温度分布 θ を示す。 θ は空間における冷却空気の広がりを出す指標であり、式(7)で定義される。 T_f は任意の地点の温度、 T_∞ は主流温度、 T_2 は冷却空気温度を示している。

$$\theta = \frac{T_f - T_\infty}{T_2 - T_\infty} \quad (7)$$

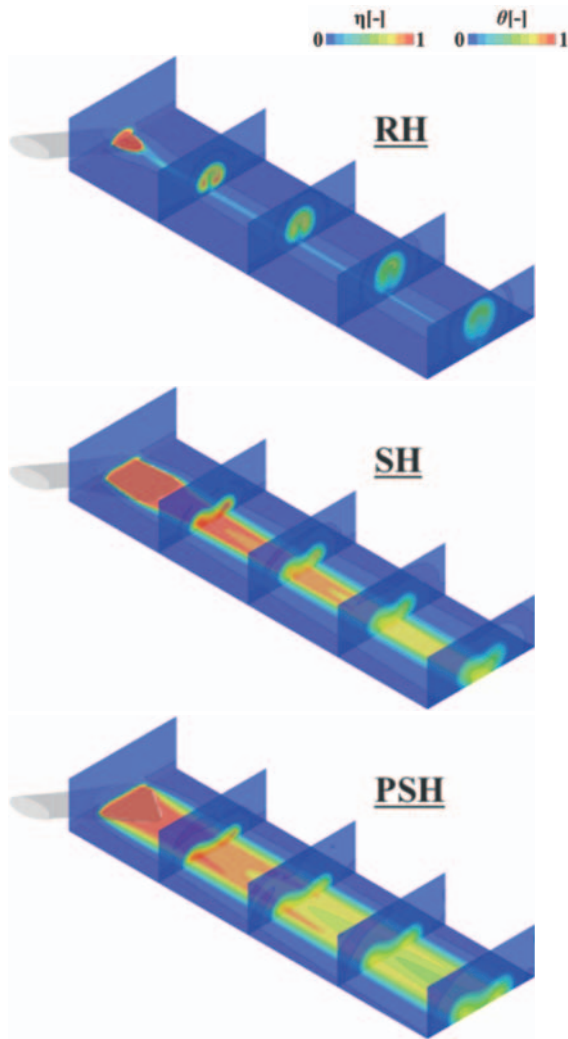


Fig. 14 Contours of film effectiveness and space temperature calculated by RANS simulation

RHは下流にいくにつれて冷却空気が徐々にlift-offしていく様子が確認できる。一方で、SH、PSHは冷却空気の付着性が良く、高い吹き出し比においても下流まで広がっている。これらは冷却孔出口部の形状の効果により、RHに比べてlift-offの抑制や冷却空気をスパン方向へ拡散させる効果があるためであり、実験でもその様子が確認できた。もちろん、SHの場合でも下流へいくと冷却空気が徐々にlift-offしていく傾向は見られる。一方で、PSHはスパン方向への広がりを持続したまま下流まで広がり、lift-offの様子もSHほど顕著ではない。

Fig. 15に各冷却孔のQ値（速度勾配テンソルの第2不変量）の等値面および $x/d=0 \sim 20$ における流れ方向渦度分布を示す。Q値は局所的な流体の回転運動と歪み率の関係を示しており、歪み率に対して回転運動が大きい場合は正の値を示し、回転運動が小さい場合は負の値を示す。ここで流れ方向渦度は式(8)で定義される。 w は z 方向速度、 v は y 方向速度である。

$$\zeta = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (8)$$

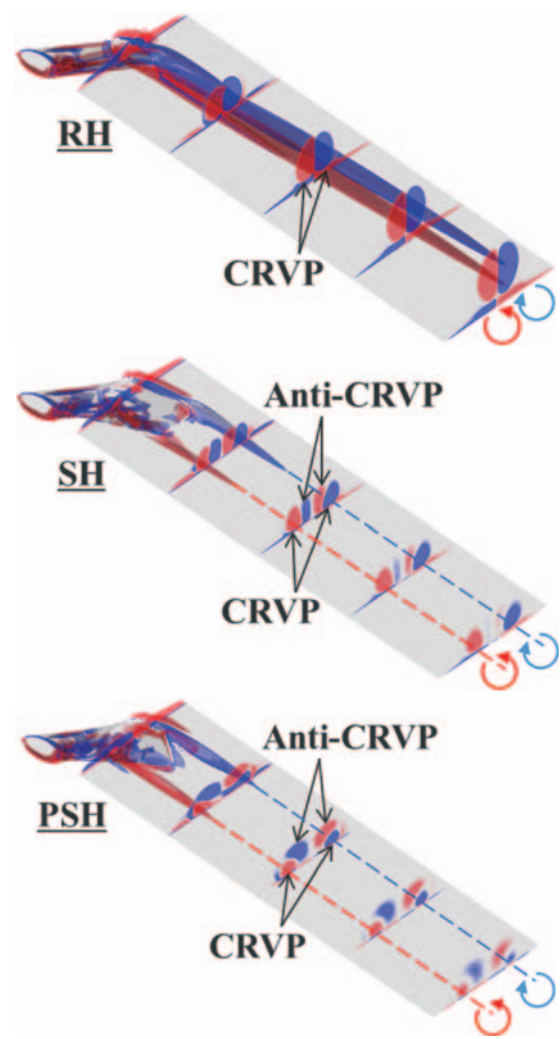


Fig. 15 Iso-Q value surfaces and contours of streamwise vorticity calculated by RANS simulation

RHではCRVPの規模が大きく、Fig. 14に見られるように冷却空気のlift-offを促進してしまい、フィルム冷却効率が低下する原因となっている。CRVPは時計回りの負の渦と反時計回りの正の渦の渦対（下流視）になっていて、この渦対の距離が近いことで冷却空気のlift-offが強化され、冷却空気が覆う面積が少なくなる。一方で、SHとPSHはCRVPと逆回転の渦（Anti-CRVP）が発生している。PSHはSHと比較してAnti-CRVPが大規模で、下流にいくにつれてCRVPの規模がかなり小さくなっている。このAnti-CRVPが発生し、CRVPと干渉することによって冷却空気のlift-offが抑制され、冷却空気をスパン方向へと拡散させていると考えられる。

6. 結言

本研究では、新奇出口形状であるPick-Shaped Hole (PSH) のフィルム冷却性能及び空力性能評価を目的とし、吹き出し比や主流乱れ度等の各流動条件における性能評価を行い、以下の知見を得た。

PSP計測

- PSHは低い主流乱れ度の条件でSHの冷却性能を大きく上回った ($x/d=20$ において $BR=1.5$ で約14%増加し、 $BR=2.5$ で約36%増加した)。
- 高い主流乱れ度の条件でもPSHは冷却孔直下流でSHを上回る冷却性能を示した ($x/d=6$ において $BR=2.5$ で約10%増加した)。

境界層計測

- PSHはSHと比較して境界層が薄く、 BR の増加による速度分布の変化があまり見られないため、高い吹き出し比の場合でもlift-offを抑制する効果を有していることが分かった。
- 空力損失評価より、PSHはSHよりも運動量厚さが低減されている ($BR=2.5$ の時、 $Tu=1.4\%$ で約38%低減し、 $Tu=12.6\%$ で約12%低減した)。

数値解析

- 実験結果と同様に、PSHはSHと比較して冷却空気がスパン方向への広がりを維持したまま下流へ広がっている様子が確認できた。
- PSHは形状の効果により、より大規模なAnti-CRVPが発生し、それがCRVPを制御することで冷却空気のlift-offを抑制し、冷却空気をスパン方向に拡散させる効果を有していることが確認できた。

今後の展望として、より詳細かつ広範囲での境界層計測を実施するとともに、PSHの形状最適化に取り組む予定である。

参考文献

- (1) Haven, B. A., Yamagata, D. K., Kurosaka, M., Yamawaki, S. and Maya, T., 1997, Anti-kidney pair of vortices in shaped holes and their influence of film cooling effectiveness, ASME paper No. 97-GT-45.
- (2) 船崎健一, 流れ制御デバイスによるフィルム冷却の高性能化, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 46, No. 6 (2018), pp. 35-41.
- (3) Bunker, R.S., A Review of Shaped Hole Turbine Film-Cooling Technology, Journal of Heat Transfer, Vol. 127 (2005), pp.441-453.
- (4) Goldstein, R. J. and Eckert, E. R. G., International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.17, Issue 5, (1974), pp. 595-607.
- (5) Okita, Y., Nishiura, M., Film Effectiveness Performance of an Arrowhead-Shaped Hole Film Cooling Hole Geometry, ASME paper GT2006-90108, (2006).
- (6) Kusterer, K., Tekin, N., Bohn, D., Sugimoto, T., Tanaka, R., Azarii, M., Experimental and numerical investigations of the NEKOMIMI film cooling technology, ASME paper GT2012-68400, (2012).
- (7) Robert, P., Schroeder, and karen, A., Thole., 2014, Adiabatic Effectiveness Measurements for a Baseline Shaped Film Cooling Hole, ASME Turbo Expo GT-2014-25992, (2014).
- (8) 船崎健一, 藤原浩介, 感圧・感温塗料による計測法のタービン冷却関連研究への応用, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 49, No. 5 (2021), pp. 22-27.
- (9) Charbonnier, D., Ott, P., Jonsson, M., et all, Experimental and Numerical Study of the Thermal Performance of a Film Cooled Turbine Platform, ASME paper GT2009-60306, (2009).
- (10) Takisawa, H., Funazaki K., Sasaki, H., Kawamura T., Tagawa, H. and Nakano, S., Improvement of Flat-Plate Film Cooling Performance by Double Flow Control Devices under High Density Ratio, ACGT2016 (India), ACGT2016-123 (2016).
- (11) Denton, J.D., Loss Mechanisms in Turbomachines, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 119, Oct. (1993), pp. 621-656.
- (12) 混合ガス補正計算法 (理論), 日本カノマックス株式会社技術資料: E0015
- (13) Hirokazu Kawabata, Ken-ichi Funazaki, Ryota Nakata, Hisato Tagawa, Yasuhiro Horiuchi, Improvement of Flat-Plate Film Cooling Performance by Double Flow Control Device : Part2 -Optimization of Device Shape and Arrangement by Experiment- and CFD-Based Taguchi Method, ASME Turbo EXPO, GT2014-26070, (2014).
- (14) 漆山諒, 船崎健一, 佐々木優大, 平板上フィルム冷却の熱流体特性に関する研究 (主流乱れの効果について), 第50回日本ガスタービン学会定期講演会, (2022).
- (15) Christian Saumweber, Achmed Schulz, Sigmar Wittig, Free-Stream Turbulence Effects on Film Cooling with Shaped Holes, ASME Turbo Expo GT-2002-30170, (2002).

2023年ASME国際ガスタービン会議

1. 全 般

太田 有^{*1}

OHTA Yutaka

2023年のASME Turbo Expoは、6月26日(月)から30日(金)にかけて米国Massachusetts州BostonにあるHynes Convention Center (Fig. 1) で開催された。会場はBoston民間経済の中心地であるCopley Squareやブランドショップが立ち並ぶPrudential Centerと連絡通路で繋がり、近くを流れるCharles川の対岸にはMITが見える絶好のロケーションであった。日中は気温、湿度共に比較的高く、蒸し暑ささえ覚えることが多かったが、会場内は極度に冷房が効き過ぎており上着が必須であった。参加する度に思うのだが、Turbo Expo特有のランチにおける大量のフードロスと過度に冷房が効いた室内で、持続可能な未来社会を議論することに問題はないのだろうか。

講演会は朝8時から午前のセッションが始まり、コーヒブレイクの後に午前10時30分からPlenaryまたはInvited Lecture、昼食後、午後1時30分と午後4時からそれぞれ午後のセッションが開始になる形式が採用されていた。オープニング時のアナウンスによれば、参加者は約2500人、920件を越える論文が投稿され、コロナ以前の状態に戻った感がある。昨年度まで実施されていた専用アプリを用いたVideo On Demandやライブ配信を視聴する仕組みは撤廃されて完全対面に戻った。この他にパネルが24件、チュートリアルが48件、120件弱の展示ブースが展開されており、いずれも参加者が多く“密”の状態が続いていた。学生ポスターセッションには欧米のみならず、アジアからも中国、韓国の大学が数多く出展していた。

月曜日の午前中には、ASME Executive Director/CEOのThomas Costabile氏およびIGTC ChairのAkin Keskin氏の開会挨拶に続き、“Pathways to Net-Zero Carbon Emission”と題したPlenaryが開催された。MITのSpakovszky教授とSouthwest Research InstituteのNatalie Smith氏がモデレータを務め、2050年のNet Zero社会を実現するために、どのようなイノベーションと技術が必要かを議論した。Universal Hydrogen社のMark Cousin氏は、航空業界向けの水素流通・物流システムの開発状況と有効性を解説し、航空貨物のように扱うことが可能なモジュール式水素燃料カプセル

を用いた物流ネットワークを紹介した。MITのAnne White教授は温暖化対策としてMITが設立した“MIT Plasma Science & Fusion Center”の概略を説明し、エネルギー転換の革新的なブレークスルーの必要性を訴え、核融合に取り組んでいることを紹介した。さらにMassachusetts州港湾局のFlavio Leo氏は、インフラが新しいエネルギー要件（合成燃料、バイオ燃料、電動化、ハイブリッド、水素など）のニーズを確実に満足するようなBoston Logan空港の取り組みを紹介した。このPlenaryの冒頭、Spakovszky教授の友人であり、チェロ奏者、歌手、作曲家としても著名なMike Block氏のミニコンサートを聴くことができたのは幸運であった。

火曜日午前のPlenaryでは、Purdue大学のNicole Key教授とPenn StateのKaren Thole教授がモデレータを務め、“Gas Turbines for a Sustainable Future”をテーマに議論が行われた。GE AerospaceのArjan Hegeman氏は、Safran社と共同で進めている燃料消費とCO₂排出量の20%以上の削減を目標としたRISE (Revolutionary Innovation for Sustainable Engines) プログラムについて、P&WのGeoff Hunt氏は、2050年のゴールを目指した



Fig. 1 A View of the Hynes Convention Center from Newbury Street.

原稿受付 2023年7月7日

*1 早稲田大学 機械科学・航空宇宙学科
〒169-8555 新宿区大久保3-4-1
E-mail: yutaka@waseda.jp

P&Wの取り組みとしてGTF、電動化、水素の基本方針を説明すると共に、データサイエンスの重要性と広い工学分野の融合が不可欠であると述べていた。Siemens EnergyのKathleen O' Brien氏は、Net Zeroを目指す発電用GTにおいて、2030年のCO₂排出ゼロを目指して水素混焼から専焼へのエネルギー転換を話題としていた。更に、RRのSteve Wellborn氏は、脱炭素化に向けて水素燃料を用いるRRの取り組みとして、燃料電池、GT、燃料電池+GTという航空エンジンの新しい形態について紹介していた。航空エンジンの主要OEM3社とSiemens Energyが参加したパネルではあったが、各社が自ら提案した技術の有効性を淡々と説明し合うことに終始し、しかもそれらの技術が既に公表されているものばかりで、内容的には少し残念なパネルではあった。

水曜日午前のPlenaryでは、P&WのSean Bradshaw氏とMälardalen大学の博士候補生D. E. Diamantidou氏がモデレータを務め、“Workforce Development and Diversity: The Engineer of the Future”と題して、次世代の技術者を育成して行くための戦略や当該分野にもっと女性を引き付けるためには何が必要なのか、などが議論された。パネリスト全員の共通認識としては、例えば大学に“エネルギーリテラシー”のようなカリキュラムを設置することで、大学院での更なる学習・研究と

共に、2050年の未来を担う若者を育成することを喫緊の課題としている点であった。このパネルは参加者が前日の半分程度で、あまり聴衆の興味を引くことはなかったようだが、大学に勤務する筆者としては非常に興味深く拝聴することができた。これら3件のPlenaryに加えて、会期中を通して脱炭素、エネルギー転換、エネルギーストレージ、水素などに関するPanelやセッションが数多く企画されており、当該分野の関心の深さが伺われた。

今回のTurbo Expoではコロナの影響は全く感じられず、会場内および街中にもマスクをしている人は皆無であった。しかし、コロナの副産物とも言えるASMEのアプリは年々進化を続け、講演プログラム機能のみならず会場の案内図、自らのスケジュール管理やSNS、Q&Aの機能などを備えた便利なものであった。

当学会は今年も展示ブースを出展しており、学会の諸活動や国際会議の情報を積極的に発信するのに大きく貢献している。特に、金閣寺のファイルは、今年11月のIGTC2023が京都開催であることもあり、外国人参加者には好評であったと聞く。また、IGTC2023にはASMEも展示ブースを出展する予定で準備が進んでいる。

来年のTurbo Expo 2024は、6月24日(月)から28日(金)までLondonで開催される。アブストラクトの締切は今年の10月27日(金)ですので、皆様お忘れなく。

2. 航空用ガスタービン

浅子 知昭^{*1}

ASAKO Tomoaki

1. 概要

今年の航空エンジン関連 (Aircraft Engine Committee (AEC) 主催) のセッション数は、全部で13セッションであった。セッションの内訳は、パネルセッションが1セッション (バーチャル開催を除いた過去の件数と比べると、2022年: 1件/2019年: 1件/2018年: 4件)、テクニカルセッションが12セッション (同9/10/9件)、チュートリアルセッションは行われなかった (同3/5/2件)。(なお、過去のセッション数は、2022年の見聞記からの転記である。)

この中で、今年のパネルセッションは、2019年に亡くなったバージニア工科大学のDr. Walter F. O' Brien先生のメモリアルセッションとして行われた。

また、テクニカルセッションの内容とそこでの発表数は、①モデリングとシミュレーション (I からIVの合

計で11件)、②エンジン性能と新コンセプト (I からIIIの合計で12件)、③コンセプト設計と最適化 (I とIIの合計で6件)、④インレット・ノズル・ミキサーとナセル (4件)、⑤インレットディストーションとエンジンオペラビリティ (4件)、⑥プロペラとオープンロータ (3件) であり、発表数の合計は40件であった。これは発表がキャンセルされた件数を除いた数である。

また、テクニカルセッションの発表に至るまでの件数を見ると、アブストラクトの受理数が94件、ドラフトペーパーの提出が49件となっているが、いずれも昨年よりも多くなっている。

チュートリアルセッションがなかったのは、予定外のバーチャル開催となった2020年を除けば記憶にない。また、パネルセッションも昨年度に引き続き故人のメモリアルセッションという形であり、技術的なものでなかったという意味で少し残念に感じた。

テクニカルセッションとしては、以前はかなりの多くの発表のあった中国からのものが、ここ数年減っていて、今年は実際に発表があったのは1件のみ (ただしそれも

原稿受付 2023年7月19日

* 1 (株)IHI 航空・宇宙・防衛事業領域 技術開発センター
スタッフグループ
〒196-8686 昭島市拝島町3975-18

代理者による発表)であり、もう1件プログラムには記載されていたが発表は直前にキャンセルされた。また、ここ数年はモデリングや新コンセプト設計に関するセッションや発表が多くなっているが、セッション名だけではどのような発表が含まれるかが分かりにくい。さらに今年はプログラムの記載内容も簡略化され、各セッションにどのようなタイトルの発表があるかは各自のスマホなどにインストールした、ASMEのイベントアプリを開かなければわからないため、興味のある発表を探すのが難しくなった印象を持つ。次項にテクニカルセッションでの発表内容を紹介する。

2. テクニカルセッション内容

2.1 モデリングとシミュレーション

このセッションでは、圧縮機サージ時のエンジンの挙動シミュレーション方法に関する発表 (GT-100874)、AIを用いた圧縮機特性マップの生成方法に関する発表 (GT-102054)、ギアのロスの評価 (GT-100546, 100547)、運用エンジンの要素性能評価に用いるためのエンジンモデルを合わせこむ方法 (GT-103548)、ダクト付きの可変ピッチファンの逆推力への過渡的な挙動を明らかにしたもの (GT-101980)、ヘリコプタ用エンジンの周囲温度のシミュレーションに関する発表 (GT-101498)、OH後の出荷エンジンのエンジン流量を寸法計測データからAIを用いて推測する方法の発表 (GT-103015) などがあった。

2.2 エンジン性能と新コンセプト

ここでは、ASCENDとREEACHプログラムの紹介 (GT-104109)、水素燃焼エンジンのサイクル計算ツールの作成 (GT-103505)、水回収・噴射ターボファンエンジン (WET) のサイクル検討 (GT-100807)、水素用マイクロ燃焼器の燃焼場の予測 (GT-102370)、可変サイクルエンジンの熱管理についての検討 (GT-103912)、圧縮機に水分を吹き込んだ場合の推力やNOxへの影響

の検討 (GT-103947)、電動ハイブリッド推進を適用した小型航空機の検討 (GT-102211)、ファン駆動用ギアシステムのオイルキャブチャ形状のオイル捕捉量への影響検討 (GT-101589) などの発表があった。

2.3 コンセプト設計と最適化

このセッションでは、AIを用いたエンジン概念設計ツールに関する報告 (GT-102024)、低バイパス比ターボファンエンジンの最適化検討 (GT-101426)、地球観測衛星 (CALIPSO) のデータを用いて航空機が運航中に晒されるコンタミ量を評価した研究 (GT-13417)、パラレルハイブリッドエンジンの燃料削減量と運航費の評価 (GT-103131)、超臨界CO₂サイクルをボトムリングサイクルに用いたエンジンの検討 (GT-103166) などの発表があった。

2.4 インレット・ノズル・ミキサーとナセル

この中では、パーティクルセパレータの流れに関する解析 (GT-103506)、ウィンドミル状態での排気部流れ場の機体搭載による影響 (GT-100833)、S字インレットダクトの流れやダクトへ設置したフローコントロール装置の効果について (GT-104188, 104104) の発表があった。

2.5 インレットディストーションとエンジンオペラビリティ

このセッションでは、横風状態のCFDに関する発表 (GT-102227)、機体後方に搭載される境界層吸い込みファンを模したリグ装置に関する発表 (GT-100561)、スワールディストーション発生装置に関する発表 (GT-100773) などがあった。

2.6 プロペラとオープンロータ

この中では、ターボプロップエンジンモデルの実機データへの合わせ込みに関する発表 (GT-101812)、UAV用のプロペラ特性と騒音の評価に関する研究 (GT-102389)、プロペラと機体主翼の干渉による騒音検討 (GT-102655) の発表があった。

3. 産業用ガスタービン

木下 泰希^{*1}

KINOSHITA Taiki

1. 概要

産業用ガスタービンに関する、Coal, Biomass, Hydrogen & Alternative Fuels Committee, Cycle

Innovations Committee, Electric Power Committee, Industrial & Cogeneration Committee, Marine Committee, Oil & Gas Applications Committee, Organic Rankine Cycle Power Systems Committee および Supercritical CO₂ Committee が主催する論文件数は、前年の142件に対して139件と同程度であった。「Pathways to Net-Zero Carbon Emission」と題したキーノート講演、「Gas Turbines for a Sustainable Future」

原稿受付 2023年7月24日

* 1 Mitsubishi Heavy Industries America, Inc.
Woburn Office
400 Tradecenter Drive, Suite 7800, Woburn,
MA 01801

と題した基調講演でも紹介されたように、脱炭素社会の実現に向けて社会全体で取り組んでいく必要があるなか、産業用ガスタービンのセッションでは、水素活用技術、製造、貯蔵が関連するものが多かった。また水素の他に代替燃料としてアンモニアも取り上げられていた。各セッションにおける主な概要を以下に示す。

2. テクニカルセッション内容

2.1 石炭, バイオ, 水素, 代替燃料

水素の生産と使用を通じたクリーンエネルギーとエネルギー貯蔵への関心が高まる中、既存のインフラに対する水素の影響を十分に理解すると同時に、将来の需要に備えた新技術の開発の必要性が高まっている。また、製品設計の初期段階から環境ライフサイクルアセスメントを適用していくことが望まれる。そのような背景の中、水素燃焼、水素の持続可能性・経済性・安全性、ライフサイクルアセスメントに関する最新技術動向の発表が多数あった。また、代替燃料としてアンモニアに関する発表もあった。水素とアンモニアの輸送に関する経済分析をした論文では、短距離の場合は水素が低コスト、長距離の海上輸送ではアンモニアが低コストとなる可能性が高いことが示されており (GT-100880)、代替燃料として水素だけでなく、アンモニアの注目もより一層高まっていくと考えられる。

2.2 サイクルイノベーション

脱炭素社会に向けて、余剰の電力をガスに変換する Power to Gas 技術により、発電所をハイブリット化することが重要かつ実行可能なソリューションと考えられている。Gas としては水素、アンモニアなどが候補となる。Power to Gas を含む、エネルギー貯蔵システムの技術的および経済的な検討に関する発表が多数あった。

2.3 発電用途

「Hydrogen-Fired Gas Turbine」のセッションでは、水素燃焼ガスタービンの実機実証結果の発表があった。ニューヨーク電力公社のプレントウッド発電所では、GE 製 Lm6000 ガスタービン (出力 45 MW) でグリーン水素 44 vol.% の混焼を実施 (GT-101283)。また、ジョー

ジア・パワーのマクドノフ発電所では、三菱重工製 M501G ガスタービン (出力 265 MW) で水素 20 vol.% の混焼を実施 (GT-102660)。いずれも水素混焼の試験を成功させ、近い将来の脱炭素社会の到来を実感させるものであった。

「The Gas Turbine's Role in the Decarbonized Power Generation Portfolio」及び「The Pathway Forward: Future Gas Turbine Products & Technologies? OEM Perspective」のパネルセッションでは、各 OEM が水素の混焼、専焼の取り組みについて紹介し、2024 年～2026 年頃にかけての早期の水素混焼、専焼実現を宣言していた。二酸化炭素を回収・貯留、または利用する「CCS」, 「CCUS」の取り組みについての紹介もあったが、水素に関する発表が大部分であり、各 OEM が水素燃焼に注力していることが窺えた。

「Voice of the Customer: User Experience with Gas Turbine Technology」のパネルセッションでは、ガスタービンを使用しているユーザーや保険会社が、ユーザー目線での技術動向について紹介していた。水素ガスタービンにおいては、水素設備設置、長期の運転監視、水素の配管からのリーク検知等の課題がある。また、再生可能エネルギーの普及拡大に伴いガスタービンの運用が変化してきているが、それがサービス間隔や部品寿命にどのような影響を与えているかについて関心が高いとのことであった。

2.4 Oil&ガス産業用

パイプライン、圧縮ステーションでの実機適用の最新状況、メンテナンスや運用面での診断機能・最適運用などについて発表があった。

2.5 超臨界CO₂発電

超臨界 CO₂ 発電は、流体密度が高い超臨界 CO₂ を利用することで圧縮仕事軽減され、高い発電効率を達成でき、次世代システムとして広く研究されている。

超臨界 CO₂ のターボ機械の設計に必要となる、圧縮、タービン、シール、熱交換器、熱伝達、材料、サイクル、酸素燃焼および検証に関する最新技術動向の発表が多数あった。

4. 小型ガスタービンおよびセラミックス

北村 剛^{*1} 金子 雅直^{*2}

KITAMURA Tsuyoshi KANEKO Masanao

1. 小型ガスタービン^{*1}

Microturbines, Turbochargers & Small Turbomachines Committeeが主催するテクニカルセッションでの論文件数は、「Radial High Speed Compressors & Turbines」の3件、「Heat Transfer in Turbochargers」の2件（日本から1件）、「Combustor Design + Hydrogen Applications」の4件、「Designs for Energy Applications, Modeling, Optimization & Performance Enhancement」の3件、「Rotordynamics in High Speed Turbochargers」の2件および「Radial High Speed Pumps」の3件であった。総論文件数は17件で、昨年の21件から減少している。上記の他にRadial Turbines, Off-Design Operation, Thermal Effects, Pulsating Flow and Acousticsと題したチュートリアルが1件開催された。

「Radial High Speed Compressors & Turbines」のセッションでは、高速電動コンプレッサに斜流および遠心コンプレッサホイールのそれぞれを適用した場合の設計、および検証試験に関する報告が行われた（GT-100418）。またバードディフューザ付き遠心コンプレッサについて、ベンチ試験での詳細計測とCFDに基づく、インペラ、ディフューザおよびポリュームごとの詳細な性能マップおよび分析結果が示された（GT-102869）。その他に、ORC適用を目的としたペーンレスかつブレードの半径流エキスパンダの設計、試作および検証試験結果が報告された（GT-101192）。

「Heat Transfer in Turbochargers」のセッションでは、ガソリンエンジン向け可変容量ターボチャージャを対象に、タービン部、可変ノズル機構および軸受け台を模擬した一体CHT解析による熱エネルギーロス評価、それに伴うタービン性能への定量的な影響に関する報告が行われた（GT-101499）。また、ターボチャージャのタービンホイールを対象にCFDおよび定常CHT解析から熱的境界条件を評価し、それをFEAへ適用して伝熱および構造解析を行う手法が示された（GT-102204）。

「Combustor Design + Hydrogen Applications」の

セッションでは、マイクロガスタービンの水素燃焼器を対象に燃焼CFDを行い、当量比、空気-燃料の運動量比および希釈空気導入形態が温度場およびNoxに与える影響が示された（GT-102592）。その他に、ガウス過程回帰による水素混焼過程のサロゲートモデルの構築（GT-103229）、燃料を天然ガスから水素に変更した場合の性能および कोरोジョンの解析的評価（GT-104132）、酸化による材料劣化（GT-104204）に関する発表が行われた。

「Designs for Energy Applications, Modeling, Optimization & Performance Enhancement」のセッションでは、電動ターボチャージャによるエネルギー貯蔵システムの設計、試作および検証試験結果が報告された。計測に基づく性能評価がなされ、プロジェクトの達成状況および課題が示された（GT-104045, 104232）。また風力発電、水電解装置および水素貯蔵設備を有するマイクログリッドシステムにおいて、マイクロガスタービンの経済性をAIにより最適化した結果が報告された。水電解装置の有無で検討が行われ、いずれのケースでも稼働コストの低減効果が見いだされた（GT-104145）。その他に、マイクロガスタービンの軸受け台を対象とした、温度および熱変形の簡易解析手法の開発とその適用事例が示された（GT-101838）。

「Rotordynamics in High Speed Turbochargers」のセッションでは、燃料電池向け電動コンプレッサ等の適用を想定した空気軸受けに関する研究の発表が行われた（GT-102298, 103344）。

2. セラミックス^{*2}

Ceramics Committeeが主催するテクニカルセッションでの論文件数は、Ceramics and Compositesに関する「Processing and Mechanical Characterization」の3件と「Application」の3件、およびThermal/Environmental Barrier Coatingsに関する「Modeling and Simulation」の4件と「Environmental Effects and Characterization」の4件であった。総論文件数は14件で、昨年と一昨年の11件から3件増加していた。上記の論文件数はOnline Conference Papersに収録されている論文を集計した結果である。以下に各テクニカルセッションにおける論文の概要を示す。

Ceramics and Compositesに関する「Processing and Mechanical Characterization」では、3D braidingと高圧slip castingの組み合わせによるAll-oxide CMCsの高機能化（GT-103828）、3D needle-punched C/SiC複合材の熱残留応力にPLY構造が及ぼす効果（GT-102684）、

原稿受付 2023年7月28日

*1 三菱重工業(株) 総合研究所 ターボ機械研究部
ターボ機械第一研究室

〒851-0392 長崎市深堀町5-717-1

E-mail: tsuyoshi.kitamura.2q@mhi.com

*2 東京電機大学 理工学部 機械工学系

〒350-0394 比企郡鳩山町石坂

E-mail: kaneko@mail.dendai.ac.jp

E-mail: jiro@gtsj.or.jp

高温固体粒子の衝突によるOxide/Oxide CMCの強度劣化 (GT-102371) が報告された。「Application」では高温の蒸気噴流に晒されたセラミックス材のライフサイクル分析 (GT-103660), 冷却技術が適用されたCMC製ベーンの高圧タービンへの適用がもたらす航空エンジンの性能向上効果 (GT-101601), 300 Wガスタービンへの適用を想定したラジアルタービンと遠心圧縮機のAdditive Manufacturingによる製作の検討 (GT-101198) が報告された。

Thermal/Environmental Barrier Coatingsに関する「Modeling and Simulation」では, Air Plasma Spray セラミックコーティングプロセスのICME (Integrated

Computational Material Engineering) によるモデル化 (GT-104103), SiC/SiC CMCに対するEBC (Environmental Barrier Coating) の接着強度 (GT-104037), 高温の蒸気噴流に晒されたEBCの腐食 (GT-103720), ICMEによるエロージョンの予測手法の開発 (GT-104088) が報告された。「Environmental Effects and Characterization」では, TBCのマイクロ組織の変更による散乱係数の増加 (GT-101962), Calcium Magnesium Aluminosilicatesを主成分とするデブリに晒されたEBCsの耐エロージョン性能 (GT-101212), EBCとCMCの高温環境試験に用いる燃焼器リグの開発 (GT-101562), CMCに付与したBi-layer EBCの機械的特性 (GT-102609) が報告された。

5. ターボ機械の性能と流れ

5.1 軸流関係 5.1.1 ファン・圧縮機

岡田 隆一^{*1}
OKADA Ryuichi

軸流ファン・圧縮機の空力関係では全12セッションにて43件の論文が発表された。昨年は44件 (論文収録件数) であり, 概ね例年と同程度であった。第一著者の所属でカウントしたところ, ドイツからの発表が13件で最も多く, 次いで米国から6件, 英国から5件であった。各セッションにおける主な発表内容を以下に示す。

圧縮機設計 I, II

圧縮機動翼において異物吸い込み (FOD) により損傷を受けうる位置を特定した上で, 損傷を受けた場合に空力・構造それぞれの面で影響が大きい位置を調べた論文 (GT-102573), 遷音速動翼の最適設計のため, 入口に対するスロートの面積比を3次元RANS解析結果から抽出し, 面積比を半径方向に調整することで3次元的な衝撃波構造のバランスを取る手法 (GT-101692), ロスモデル構築に機械学習を適用した研究 (GT-101954) 等が報告された。

ファンおよびPropulsor設計

スナバー付きファンからワイドコードファン, 複合材ファン, 中空ファンに至るまでのファン動翼の変遷や今後のOpen Fan等の展望をまとめた論文 (GT-101639), 超高バイパス比ファンのOpen Test Case作成を目的に実施された試験結果 (GT-103629) 等が報告された。

圧縮機設計方法

サージや旋回失速を予測する1次元解析手法の開発

(GT-100709) 等が報告された。

タンデム設計

低圧圧縮機を対象に, タンデム翼の適用条件や回避条件を, 流量係数や仕事係数で整理した研究 (GT-101948) 等が報告された。

実験方法

壁面せん断応力を計測するSurface Fence Probeを動翼チップのケーシング面に適用し, 失速に至るまでのチップクリアランス流れの挙動を論じた論文 (GT-101944) や, 機械学習を援用し, RANS解析の流れ場と組み合わせることで, 点数が疎な計測でも密な計測結果と同等の流れ場が得られることを示した研究 (GT-103886) 等が報告された。

チップクリアランス流れ

チップクリアランス流れ損失が生じる位置・メカニズムと損失低減方法 (チップにおけるキャンバー調整と3次元設計適用) に関する研究 (GT-103005) や, 圧縮機翼面にリブレットを施した場合の流れ場をDNSで解析した研究 (GT-101038) 等が報告された。

流れ制御

ハブ面における2次流れ制御のため, Guide Fin (GT-101012) やVortex Generator (GT-103769) の設置位置および形状を最適化した研究や, ストール特性改善のために翼型前縁部にTubercle (半径方向に波状の形状としたもの) を適用した実験 (GT-102056) 等が報告された。

遷音速圧縮機

遷音速動翼のミッドスパンを対象に実施したLESおよ

原稿受付 2023年7月20日

*1 (株)IHI 航空・宇宙・防衛事業領域
技術開発センター 要素技術部 空力技術グループ
〒196-8686 昭島市拝島町3975番地18

びURANS解析結果に対し、エントロピー生成位置やその生成メカニズムの分析を行って、URANSが負圧面において衝撃波や衝撃波近傍の境界層を予測できていない点を論じた論文（GT-102949）や、遷音速風洞での実験とLES解析を用いて、遷音速動翼における衝撃波境界層干渉の非定常的挙動のメカニズムを考察した研究（GT-103218）等が報告された。

圧縮機インレットディストーション

狭胴機の胴体尾部への9つの電動分散ファン搭載により、境界層吸い込み（BLI）効果で燃費低減を図る検討（GT-101991）等が報告された。

ケーシングトリートメント（CT）

遷音速単段圧縮機の試験とLES解析の分析を通じて、周方向および軸方向CTによる失速特性改善のメカニズ

ムとその共通点を説明した論文（GT-101077）や、2段遷音速ファンの初段に軸方向CTを適用して、クリーンインレットと周方向全圧ディストーション下で失速特性の改善を実証した研究（GT-101620）等が報告された。

Endwall, シールおよび漏れ流れ

プラットフォーム間の隙間における漏れ流れの影響や、形状変更による損失低減をCFDで調べた研究（GT-100717）や、3次元設計適用による静翼コーナー剥離の抑制と、ハブキャビティからの噴き出しがコーナー剥離に及ぼす影響を、遷音速までの幅広い回転域で実験的に調べた論文（GT-103502）等が報告された。

5.1 軸流関係 5.1.2 タービン

浜辺 正昭^{*1}

HAMABE Masaaki

軸流タービン空力に関するセッションの論文登録数は42件で昨年より8件増加。コロナ禍前の2018、2019年はそれぞれ33、30件であったことや、今年テクニカルセッションの全論文数は昨年より微減であることを踏まえると、軸流タービンの件数の増加が目立つ。地域別内訳は米国8件、欧州21件、豪州4件、アジア9件（うち3件が日本）であった。テクニカルセッションは8つのセッションで構成され、そのうちの4つは2回に分割されている。以下、各セッションにおける主な発表の概要を述べる。

“CFD Modeling & Validation”のセッションでは、RANS/URANSの乱流モデルに機械学習を適用することで低圧タービンの乱流遷移やウェイク混合の予測精度が向上した結果が示された（GT-102985）。また、CFDではないが、燃焼器からのHot StreakやEntropy Waveが下流の高圧タービンを通過した後の分布を予測するモデルに関する提案（GT-102601）もあった。

“High Fidelity CFD 1, 2”のセッションはLES解析あるいはDNS解析のいずれかに関する発表であった。LES解析については、如何に効率的に計算するかという観点での発表が多く、低圧タービンの翼列ロス予測に対する時間刻みの依存性を調べたもの（GT-102625）、後縁近傍の格子解像度の影響を調べたもの（GT-102276）、翼のスパン方向の解析領域の依存性を調べたもの（GT-

102697）が見られた。スパン方向については、解析領域をEndwallまで取ることににより、ミッドスパン付近のみを切り出した準2次元解析で見られた試験結果との乖離を解消できることが示されている。DNS解析については、高圧タービンの翼表面粗さを確率的な関数によりモデル化し、表面粗さの違いで衝撃波構造が変化する様子が捉えられている（GT-102671, 103355）。

“Low Pressure Turbines 1, 2”のセッションでは、高高度無人機向けの高負荷高揚力低圧タービンの開発成果として直線／環状翼列試験結果をまとめたもの（GT-103164）、Clean Sky 2の成果としてHigh Speed低圧タービンを対象にCavityやPurge空気の影響を直線翼列試験にて調査したもの（GT-102828）が発表された。また、低圧タービンのインシデンスロスカーブが上流翼のウェイク流入の有無により変化するメカニズムについて、LES解析データをPOD解析することにより考察した発表（GT-103770）も見られた。

“Aerothermal Investigations”のセッションでは、高圧タービン向けのリグ試験設備に関する発表が多く、入口温度分布の非定常性を調べたもの（GT-101625）、従来の設備を拡張して主流と2次空気の温度比を実機レベルに近づけたもの（GT-102935）、スモールコア向け新規回転リグ試験設備（GT-102118）の報告があった。

“Purge & Cavity Flows”のセッションでは、独自のレーザー計測システムにより回転タービンの動翼流路内の2次流れ渦構造を可視化し、非軸対称Endwallによる改善効果を確認した研究（GT-103877）や低圧タービンのCavity windageロスを低減するデバイスの設計及び

原稿受付 2023年8月9日

*1 株式会社IHI 航空・宇宙・防衛事業領域技術開発センター要素技術部空力技術グループ
〒196-8686 昭島市拝島町3975-18

試験結果 (GT-103532, 102311) が示された。

“Flow Control 1, 2” のセッションでは、翼背側からのジェット噴き出しによりNZLスロートエリアを変化させるコンセプトの研究 (GT-101856, 102015) やチップクリアランス上流からの冷却空気噴き出し (Tip Injection) が動翼チップ付近の流れ場に与える影響を直線翼列にて調査した研究 (GT-102124) が発表された。

“Aerodynamic Studies & Performance 1, 2” のセッションでは、リグ試験におけるタービン効率の不確かさに関する発表が2件あり、タービン出口の全周トラバース計測により全圧・全温の状態量評価範囲を拡大することで不確かさを低減するアプローチ (GT-100642) や確率的なアプローチにより評価する手法 (GT-103860) が提案された。また、動翼チップクリアランスを模擬した

翼列試験によりチップスキラ形状を最適化した研究 (GT-100621) やケーシングの表面粗さがチップ付近の流れ場に与える影響を調査した研究 (GT-103119) が発表された。いずれも現状は動翼、ケーシングともに静止状態での試験であり、今後は動翼とケーシングの相対移動を考慮した試験に発展していくことを期待したい。

最後に、“New Turbine Designs & Concepts” のセッションでは、ORC (Organic Rankine Cycles) 向け超音速タービンの翼後縁から発生する衝撃波ロスが後縁形状を工夫することにより低減できること (GT-103488), RDE (Rotating Detonation Engine) 向け超音速流入タービンの翼前縁付近に発生する衝撃波構造のメカニズムを踏まえた設計空間に関する発表 (GT-103883) があった。

5.2 遠心関係

北村 英二郎^{*1}
KITAMURA Eijiro

1. 概要

遠心ターボ機械の空力分野の発表セッションは“Centrifugal Compressor” と “Radial & Mixed Flow Turbines” の2種類である。遠心圧縮機の発表は20件、半径流もしくは斜流タービンはno-showが1件 (GT-102556) あったため3件、計23件の発表があった。昨年度の17件に比べると増加傾向だが、23件中6件がBaker Hughes社とフィレンツェ大学によるものであったため、発表者数という観点では件数ほど増加はしていない。下記に、圧縮機、タービンそれぞれのセッションについて、簡単に内容を述べる。

2. Centrifugal Compressors

普遍的なテーマである失速に関して4件の発表があった。動翼の失速について、インペラをインデューサとエクスデューサの2つに区分けし、インデューサが失速してもエクスデューサが失速しない限りは圧縮機としては圧力上昇できるため、安定的な作動ができることが別々の研究グループによって独立に発表された (GT-101815, 103035)。同様の考え方ではあるが、さらに別の研究グループから、1段の軸流圧縮機と遠心圧縮機を組み合わせた多段圧縮機について、軸流圧縮機が失速をしても遠心圧縮機が失速しない限りは圧縮機全体がサージサイクルに入らないことが示された (GT-103407)。残り1件はディフューザ失速に関する研究で、パイプディフュー

ザの失速初生の発生個所について非定常CFDを使って調べた結果が発表された (GT-100835)。

最適化計算事例としては逆問題設計手法を活用した事例紹介 (GT-103145) とANNを使ってベーンディフューザの形状最適化を行った例 (GT-103585) との2件の発表があった。後者については今回発表件数が多かったBaker Hughes社とフィレンツェ大学のグループによるものだが、質疑応答において、「性能改善に最も効果があった個所についてスライドで示された翼断面形状を使って示してほしい」という趣旨の質問に対して、「論文およびスライドで示した断面形状は実際と異なる」と信頼性を疑われるような回答を行い、質問者が立腹した様子で会場を去る場面があった。同じ研究グループの発表がいくつかあるがそれらについても、結果について幾分注意して見た方がよいと考える。

性能のさらなる改善を意図して新たな試みを行った例としては3件の発表があった。作動範囲の拡大を意図して、可変ベーンディフューザの設計指針および試験での実証を行った例 (GT-103317)、ポリユート内壁にリブレット加工を行い圧損低減ができた事例 (GT-103040)、軸流+遠心多段圧縮機において重量を軽減するために、動翼を反転することで静翼をなくした圧縮機の空力設計を試みた例 (GT-103803) がそれぞれ発表された。

NASAが小型航空用エンジン向けに設計した遠心圧縮機の性能や内部流れについて詳細な計測データを取得した事例が紹介された (GT-103128)。圧縮機の形状および計測データは公開されており、同論文に示されたHPのリンクよりダウンロードが可能である。

原稿受付 2023年7月20日

*1 (株)本田技術研究所 先進パワーユニット・エネルギー研究所
E-mail: eijiro_kitamura@jp.honda

3. Radial & Mixed Flow Turbines

それぞれ異なるテーマについて、3件の発表があった。軸方向に2つのポリュートを重ねたようなマルチスクロールポリュートを使った斜流タービンについて、前後のポリュートの体積比を変えることで、スパン方向のインシデンスを改善することで性能改善できることが示された (GT-101738)。

GT-102360ではインペラ背面のwindage lossについて

回転数や漏れ流量を変えて流れ場および損失量を調べた上で、古典的なDailyのモデルが比較的良い一致を示すこと、さらにCFDの結果を使ってDailyのモデルの調整を試みた結果が示された。

地熱発電用にラジアルタービンの下流に2段の軸流タービンを組み合わせ膨張比10以上の多段タービンの設計を行った事例が紹介された (GT-102867)。

5.3 非定常流れと数値流体力学

宮澤 弘法^{*1}

MIYAZAWA Hironori

1. 概要

今年度の「ターボ機械の非定常流れと数値流体力学」に関する発表は合計で69件であり、昨年度の82件からは減少した。そのうち、非定常流れ (Unsteady Flows in Turbomachinery) は25件 (昨年度34件)、数値流体力学 (Design Methods and CFD Modeling for Turbomachinery) は44件 (昨年度48件) であった。地域別の発表件数はドイツを中心とした欧州が最多で、北米、アジアと続いた。日本からも1件の発表があった。

2. Unsteady Flow in Turbomachinery

非定常流れ関係では、タービンに関するセッションと、軸流・遠心圧縮機の非定常流動に関するセッションがそれぞれ3つずつあり、他には非定常流動に関連する機械学習や流れの制御についてのセッションが1つ組み込まれた。いずれのセッションも部屋に入りきれないほどの聴講者が集まり、注目度の高さが伺えた。タービンの非定常流れについての発表でまず目を引いたのは、「LESとDiscontinuous Galerkin (DG) 法を用いて数値的な試験装置 (Numerical test rig) を実装する」という研究発表であった。発表は3つのパートからなり、Part-1では高次精度DGソルバーにおける移動境界の実装と翼列干渉の評価 (GT-101623)、Part-2では衝撃波の捕捉と遷音速流れ (GT-101891)、Part-3では二次流れの影響 (GT-101374) について報告された。他にはタービンの二次流れと相互作用についての発表が多くあり、燃焼器とタービンの一方向連成熱流動解析において、非定常な流入条件の影響を、スケール分解シミュレーションを使って調査した研究 (GT-100884) や、非設計点の高圧タービン段におけるエントロピー波干渉について実験とシミュ

レーションによって調査した研究 (GT-102837) はそれぞれ昨年度のTurbo Expoにおいても報告があったグループからの発表であった。軸流圧縮機では二次流れと相互作用を取り上げた発表が多くを占めた。遷音速圧縮機翼列試験機を用いた実験において、衝撃波と境界層の干渉の様子を非定常計測・分析した研究 (GT-102622)、小型の航空エンジンに用いられる軸流-遠心複合コンプレッサの入口全温ディストーションの伝達特性をシミュレーションにより調査した研究 (GT-103122)、高負荷圧縮機翼列のコーナー剥離の非定常流れ構造をDDESによってシミュレーションした研究 (GT-104234) などが報告された。遠心圧縮機では、すべての発表が失速やサージに関連した研究であった。可変入口案内翼を取り付けた遠心圧縮機の安定性とサージ限界を実験により解析し、可変翼がディープサージ前の不安定性のパターンに大きな影響を与えることを明らかにした研究 (GT-101626)、羽付きディフューザーを持つ遠心圧縮機のストール前の挙動について実験と数値解析による調査を行い、ディフューザーで発生する5つの失速セルの発生メカニズムを明らかにした研究 (GT-102425) などについて報告があった。

3. Design Methods & CFD Modeling for Turbomachinery

今年度のTurbo Expoでは主に非定常流れのセッションの方に参加していたため、残念ながら数値流体力学関連のセッションにはほとんど参加できなかった。私が聴くことのできた発表の中から、いくつか興味深かったものを紹介する。LES, DES, DNSの手法に関するセッションでは2件の発表があった。1件目は低圧タービンの直線翼列試験機を対象に、DDESに1方程式の γ 遷移モデルを組み込んだDDES- γ モデルによるシミュレーションを実施し、RANSやLESとの比較を行った研究 (GT-100670) で、2件目は低圧タービン入口エンド

原稿受付 2023年7月19日

*1 東北大学 大学院情報科学研究科 計算数理科学分野
山本・古澤研究室
〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01

ウォール境界層が二次流れに与える影響について、実験、RANS、LESでそれぞれ比較を行った研究 (GT-103435) について報告された。乱流モデルに関するセッションでは、データ駆動型のアプローチで乱流のモデリング

を行ったり (GT-102902)、Physics-informed neural networks (PINNs) を使って翼周りの乱流を予測したり (GT-101238) するなど、データや機械学習を活用した研究発表が見られたのが印象的であった。

6. 燃焼および燃料関係

クロニガー ダニエル^{*1}
KRONIGER Daniel

1. Overview

This year, the fuel flexibility of the aviation sector has been recognized to play a key role achieving the net zero carbon emissions target until 2050. Sustainable aviation fuels (SAF) or liquid hydrogen are seen as most promising candidates to replace kerosene.

This is also reflected in the track Combustion, Fuels & Emissions, wherein a total of 154 papers were presented and thus being the largest track of the conference in this year. The affiliations of the authors by country are classified as follows: 38 from the United States, 35 from Germany, 21 from France, 13 from UK, 8 from Italy, 7 from Norway, and 5 from Swiss and South Korea, respectively. Japan presented 2 papers (KHI on thermoacoustic oscillations of hydrogen combustion for gas turbines and Toyota/AIST on the stability of ammonia combustion for gas turbines). A total of 50 sessions were held, and additionally 2 plenary/panel sessions and 3 tutorial sessions were organized.

2. Technical sessions

Continuing the trend of last year, hydrogen as gas turbine fuel was a significant topic in the technical sessions. Also ammonia is recognized as a candidate to replacing fossil fuels. Experimental investigations of laboratory scale burners with flexible fuels remain on a high level of interest, and are often accompanied by numerical simulations of reactive flows, where unsteady Large Eddy Simulations (LES) are prevailing. More gas turbine manufacturers entered the development of hydrogen capable gas turbine combustors.

2.1 High hydrogen combustion research

The challenging reactivity of hydrogen is addressed by new combustion concepts that can be grouped as follows: lean swirl-stabilized and multitube premixers, micromixers, and lean direct injection concepts (LDI).

Laboratory scale lean premixed flames with swirl-stabilization have been studied experimentally at atmospheric conditions (GT-101461, 101903), high pressure conditions (GT-102527), and numerically with LES (GT-102634, 103006) and RANS simulations (GT-103212). Multitube burners were investigated (GT-101706, 104021). A laboratory scale lean direct injection concept has been introduced (GT-101577). A non-premixed micromix combustion system was applied to an aero-engine combustor (GT-103970). Moreover, jet-stabilized flameless oxidation (GT-102392) and a humid combustion system (GT-103023) have been investigated for NOx control.

2.2 Ammonia combustion research

A liquefied ammonia-fired gas turbine with a reformer prior to the combustor has been investigated (GT-100755). A premixed swirled-stabilized ammonia and hydrogen blend flame has been developed (GT-102452). For a real gas turbine combustor, a study on ammonia and hydrogen co-firing with natural gas under atmospheric pressure has been conducted (GT-103364). A Rich-burn/Quick-quench/Lean-burn (RQL) combustor has been simulated numerically with natural gas and ammonia (GT-103835).

2.3 Novel combustor design

Novel combustors mainly base on concepts described in the previous sections. A micro gas turbine combustor with swirl-stabilized premixed main flame and central pilot fuel injection for pure hydrogen was shown (GT-101364). A premixed fuel nozzle for an annular combustor was presented by Baker Hughes with testing results from atmospheric until engine test conditions (GT-102502). A retrofit

原稿受付 2023年7月26日

* 1 川崎重工(株) 技術開発本部技術研究所
エネルギーシステム研究部 研究1課
〒673-8666 明石市川崎町1-1

concept of F-CLASS gas turbines from GE with compact micromixing flames was presented (GT-101797). A simplified flamesheet hydrogen burner was investigated regarding the occurrence of flashback and thermoacoustic instabilities (GT-103779). Moreover, a new recursive sequential combustion has been presented at an early development stage (GT-102889).

The hydrogen capability of a lean premixed combustion concept has been tested under high pressure conditions by Siemens with the target to increase the hydrogen capability to 50 vol.% in the heavy-duty gas turbine SGT5-4000F (GT-103574). Siemens also reported about their fleet experience with over 60 vol.% of hydrogen in the smaller SGT-600 engine with the 3rd generation DLE combustor (GT-103650). Experimental investigation of novel combustion concepts for hydrogen fuel have also been presented by Doosan for their 5 MW gas turbine, including multi-tube nozzles, partially premixed combustion and non-premixed micromix combustion (GT-102363).

2.4 Combustion dynamics

Low NO_x premixed combustion systems are prone to thermoacoustic instabilities, but are also gaining importance for high hydrogen combustion in general.

Flame response investigations: The effect of hydrogen on flame-transfer functions has been investigated for a jet flame (GT-103032) and a forced premixed burner (GT-103741). For spray injectors, flame-transfer functions have been modelled for an acoustically forced premixed swirl-stabilized burner GE15 (GT-103246), an annular combustor (GT-101370), and experimentally determined with a Jet A fueled aero-engine combustor (GT-103222).

Experiment: High frequency flame responses of premixed multi-jet combustors have been studied experimentally and numerically, with acoustic analysis and proper orthogonal decomposition (POD) (GT-101417, 102022, 103598, 104112). Oscillations from the multi-can arrangement of combustors have also been reported (GT-103206).

Modelling/CFD: Regarding swirl-stabilized premixed flames, the thermoacoustics have been characterized with a momentum potential theory (GT-102831), and an analysis of their entropy wave generation (GT-102833). An acoustic transfer matrix uses acoustic energy conservation as a reduced order model (GT-101500, 102035). LES is the dominating numerical method for acoustic analysis. The response of an aero-engine fuel injector has been investigated with a

hybrid CFD-CAA (Computational Aero-Acoustics) model (GT-100865). The dynamics of a can-type combustor (GT-103298) and a jet-in-crossflow (GT-102853) have been simulated. LES is also applied to the analysis of thermoacoustic instabilities of a premixed burners (GT-103438, 103133).

Hydrogen: The dynamics and stabilization of swirling hydrogen flames with cross-flow injection have been analyzed (GT-101977). For non-premixed hydrogen micromix flames, oscillation modes have been experimentally determined (GT-102068). The dynamics of a premixed micromix fuel nozzle (GT-104117) and a partial-premixed combustor based on LDI (GT-102611) have also been studied.

Spray flames: Flame transfer functions are presented for a swirl-stabilized combustor for different degrees of fuel-air premixing (GT-102448). Moreover, the thermoacoustics of the primary zone of an RQL fuel nozzle for an aero-engine was investigated (GT-103105).

2.5 Fuel flex

Fuel flexibility refers to admixing non-carbon containing reactants, like hydrogen or ammonia, to fossil fuels. This effect of admixing on a can-type premixed combustor (GT-102217), an industrial annular combustor (GT-104113), an industrial gas turbine fuel nozzle of first combustion stage (GT-103568), and a jet-stabilized micro gas turbine combustor are investigated (GT-103418).

2.6 Ignition, flashback, blow-off

Experimental studies on ignition phenomena comprise a light-around study of methane-ammonia and methane-hydrogen blends in an annular combustor (GT-101255), ignition of CO₂-diluted syngas (GT-102356), and ignition inside an helicopter engine with a laser system (GT-103897). Flashback limits for hydrogen rich fuels and the effect of mixing quality (GT-101551), and for a low swirl burner (GT-102221) are investigated. The effect of water/steam (GT-101575) and other inert species (GT-102318) to the flame stability and blow-off limits were investigated.

2.7 Emissions

For aero-engines, a study compared Jet-A1 fuel with SAF (GT-101375). A novel low NO_x combustor concept was also shown (GT-100453). Soot measurements and flame characterization (GT-101152, 104174), especially for a RQL burner (GT-103642) as well as gaseous and particulate emission measurements (GT-101273) were presented. For industrial gas turbines, combustion tests for

CO₂ diluted methane flames (GT-101261, 104096) and pulsed plasma supported combustion (GT-101315, 102621) were introduced.

NOx emissions reduction remains a key criteria for the transition towards carbon-free fuels. The impact of preheating on the flame stability and NOx emissions of a hydrogen injector was investigated (GT-103992). The NOx emissions are especially critical in non-premixed industrial heavy-duty gas turbines (GT-103822). During lean combustion of ammonia, nano-additives for aviation combustors (GT-103846) and methane/ammonia blends for an aero-derivative (GT-103074) have been studied. Fuel-bond NOx emissions of ammonia admixed fuels from biomass gasification have also been reported (GT-103191).

2.8 Combustion modelling, kinetics

Combustion models are continuously being improved. For LES applications, the FGM approach with the thickened flame model is especially often used for non-premixed hydrogen combustion (GT-101075, 102250), premixed hydrogen/methane flames (GT-101994, 102039, 102427, 102651), and reheat hydrogen flames with water/steam injection (GT-103466). Finally a numerical study compared FGM and EDC models (GT-103205).

A chemical kinetic model was validated regarding to the ignition delay time for hydrogen and ammonia (GT-100992). Other studies reviewed chemical mechanisms for natural gas/hydrogen co-combustion (GT-101471), syngas and methane (GT-103069).

The effect of the definition of the progress variable on hydrogen containing fuel has been investigated with a RANS/FGM model (GT-103664).

2.9 Machine learning/Neural network

Several contributions apply machine learning to

improve CFD model parameters or predict combustion oscillations. Turbulence model parameters (GT-103649) and RANS model parameters (GT-102159) have been improved by machine learning from LES results using Bayesian inference. Another study trained a CFD flame simulation (GT-102543).

Targeting combustion oscillation analysis, parameters of a low order physics-based model of a premixed flame were assimilated with flame images. A Bayesian ensemble of neural networks was then trained on numerical simulations (GT-101460). Thermoacoustics of a micromix combustor were simulated with a wave-based low order network model (GT-104098).

3. Panel/Tutorial sessions

A nowadays trending topic is the utilization of Artificial Intelligence (AI), which is also reflected in the combustion research community. A novel lecture "*Learning Models from Data - Application to Combustion Dynamics*" introduced fundamental theory of using a neural network instead of a physical model. For newcomers to combustion research, two lectures on combustion gave an introduction to "*Gas Turbine Combustion*" fundamentals, and to combustion instability phenomena in the tutorial "*Combustion Dynamics*".

In two panel discussions, significant attention is dedicated to hydrogen and ammonia applications in stationary gas turbines in "*Carbon free dry low NOx gas turbine combustion using hydrogen and ammonia*" and the application of additive manufacturing (AM) in "*Additive Manufacturing Enables GT Combustion System Innovation*".

7. 材料, 構造および製造技術

本山 宜彦^{*1}

MOTOYAMA Norihiko

1. 概要

ガスタービン材料, 構造及び製造技術に関して, Additive Manufacturingに関するセッションが近年増加

してきている。今回パネルセッション2件, テクニカルセッションは5件が開催。Ceramic Matrix Composites (CMC) は, その実装のハードルの高さにより Additive Manufacturing関連に比べ少なかった。

また, 脱炭素化社会に向けた水素焼きガスタービン, アンモニア焼きガスタービンへの取組みが多く取り上げられる中で, その開発実験用試験品を Additive

原稿受付 2023年7月20日

*1 三菱重工業(株) GTCC事業部 ガスタービン技術部
ガスタービン燃焼器構造設計グループ
〒676-8686 高砂市荒井町新浜2-1-1

Manufacturingで製作することがほぼ当たり前になってきている印象を受けた。また、従来タービン静翼など製造に対しAdditive Manufacturingに転換する事で製造段階におけるCO₂削減効果、Carbon Footprint (CFP) の低減を呈する発表 (GT-103043) もあり、脱炭素化社会へ向けた取組みにAdditive Manufacturingの親和性が高いと考えられる。

2. テクニカルセッション (18-08) Additive Manufacturing の特性評価

Additive Manufacturing部品の実用化には、プロセスパラメータ、造形方向、熱処理等の条件違い等を加味すると多大な材料データを必要とするため、最小限の材料データ調査方法について、造形方向に沿う向き (0°)、垂直の向き (90°)、斜め方向 (45°) の3方向取得し、3 σ の安全率ばらつきを考慮することで早期且つ開発コストを抑える手法について発表があった (GT-101581)。

ノズル、ベーン、タービン部品の冷却通路に活用するためのIN718LCのクリープ特性把握においても、前述同様の手法でクリープ強度特性の取得について発表があった (GT-102193)。

3. パネルセッション (4-40) Additive Manufacturing Enables GT Combustion System Innovation

Penn State大学, NASA, Desktop Metal社等が登壇し、ガスタービン燃焼器における冷却パネル、ノズル部品のAdditive Manufacturing技術の実用化が討議された。燃焼器冷却パネル構造をAdditive Manufacturingを用いて波状冷却通路やピンフィン構造にして冷却効率向上の研究がなされているが、それぞれの形状に対し熱伝達率や圧力損失のデータを蓄積しており、造形向きによる表面粗さのばらつきの影響が大きいことが示された。一方で、Additive Manufacturing技術そのものが日々進化しているため、AMの装置やプロセスに応じ適宜評価が必要ことが呈された。

現在、Laser Powder Bed Fusion (LPBF) 方式が主流であるものの、Binder Jet方式の製造コスト面において有利であること、材料強度特性としても問題ないことが示され、今後注目される製造技術となる可能性を感じた。

NASAでは高温高強度用としてGRX-810と呼ばれるNiCoCr鋼の酸化物分散強化型 (ODS= Oxide Dispersion Strengthened) の材料開発について発表があり、1000℃における引張強度、クリープ強度がIn718などの従来材と比べはるかに高い強度を得ることに成功したと紹介があった。材料開発においてもAdditive Manufacturing材料の改良検討が積極的に行われている。

8. ロータダイナミクスとベアリング

梅原 隆一^{*1}
UMEHARA Ryuichi

岩崎 真人^{*1}
IWASAKI Makoto

後藤 俊郎^{*1}
GOTO Toshiro

1. 全般

構造ダイナミクスCommitteeでは、翼振動に関連するStructural Mechanics and Vibrationが27件、翼振動の空力 (フラッタ、励振力) に関連するAerodynamics Excitation and Dampingが20件、軸振動に関連するRotordynamicsが19件、ベアリングに関連するBearing and Seal Dynamicsが39件発表され、例年と同程度の発表件数となっていた。内容の傾向としては例年通りで、翼振動に関しては、ミストチューン、摩擦ダンパ、フラッタに関する内容が多く、軸振動に関しては、シールやすべり軸受、ガス軸受について多数の発表があったが、特に、ガス軸受の高減衰化のための研究が積極的に進められていた。

2. 各論

2.1 翼振動

ミストチューンに関する事例としては、空力不安定を安定化する交互ミストチューンに対する評価方法 (GT-102933)、ブリスクリングの振動を自動で取得してミストチューン特性を推定する手法 (GT-102903)、摩擦ダンパに関しては、ブリスクリングのリングダンパに関する発表 (GT-103721)、ランダム振動を考慮したアンダープラットフォームダンパに関する発表 (GT-101137)、高節直径モードのシュラウドダンパに関する発表 (GT-102146)、フラッタに関しては、複数モードで空力不安定となる場合の摩擦減衰と空力負減衰が釣り合うリミットサイクルに関する振動特性 (GT-103099) などが発表された。

流体励振力に関しては、圧縮機動翼に作用する偏流による応答の予測 (GT-103881)、蒸気タービンを低負荷条件で運転した際に生じるランダム振動応答の予測 (GT-101083) などがあり、その他、Additive

原稿受付 2023年7月24日

*1 三菱重工業(株) 総合研究所 振動研究部 振動第三研究室
〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1

Manufacturingを用いた衝突型ダンパによる減衰付加技術 (GT-102685, 103274) なども報告された。

航空用エンジンを対象とした研究が活発であり、その中で翼振動に関しては、摩擦ダンパとミスチューンを組み合わせた発表、フラッタについては、摩擦減衰と空力負減衰を組み合わせたリミットサイクルの発表など、最近では複数の事象が組み合わされた、より複雑で実現象に近い事例が多くなってきている印象である。

2.2 軸振動

ガス軸受は小型回転機械にて多くの実績があるが、ガスは粘性が小さくMWクラスの大型機へ適用するには減衰が不足するため、油を封入したハーメチック型ダンパ等がこれまでも開発されている。今回も、ダンパ付きの高減衰ガス軸受に関して多数発表があり、剛性や減衰の周波数依存性を低減するための3Dプリンタ製の複雑形状ダンパ (GT-104108) や、パッド材として潤滑性に優れ一様な面圧分布が得られるポーラスカーボンを採用したガス軸受の開発 (GT-100904, 103885) が進んでいる。また、負荷容量増加のために磁気軸受とガス軸受を組み合わせたハイブリッド軸受 (GT-102860) の発表もあった。

すべり軸受については、 $\phi 500$ 大型軸受にてロータ側に圧力センサと変位センサを設置することで、PEEKとバビットの異なるライナーの油膜厚さおよび圧力の2D分布を計測した発表 (GT-101502) があった。軸受特性の予測精度向上のため、パッド変形のみでなくパッドを支持するリングの変形を考慮した解析手法 (GT-102244) や、ミキシングロス等の補正係数がチューニング不要となるCFD解析手法 (GT-101046) が開発されている。また、性能向上のための給油量低減に関しても継続研究されており (GT-103242, 103732)、機械学習を援用した供給油量の最適化の検討 (GT-102562) も実施されていた。

ラビリンスシールについては、Oil&Gas分野では深海用途のターボ機械のニーズも高まっており、二相流条件のシール動特性に関する研究が継続実施されている (GT-100555, 102302)。ダンピング向上のデバイスである高減衰シールについては、超臨界CO₂コンプレッサに適用したシステムレベルの検証試験が実施され (GT-102395)、今後も実機展開が進んでいくものと考えられる。

9. 蒸気タービン

妹尾 茂樹^{*1}

SENOO Shigeki

7件の論文セッションで、27編の発表があり、日本からの発表は4編だった。運用柔軟性向上と湿り蒸気（エロージョンの原因となる粗大水滴、湿り損失）に関する論文が多かった。加えて、実運用されている蒸気タービンの現状と課題に関する4つのパネルセッションが、ASME POWER（動エネ部門）と共催で行われた。また、実機性能試験方法とクリープ疲労に対する寿命評価のチュートリアルセッションが行われた。

1. パネルセッション

再生可能エネルギー導入の増加を受けて、コンバインドサイクルや従来火力発電用の蒸気タービンは、部分負荷運用や起動停止回数が多くなってきている。その状況を受け、今年の4つのパネルセッションでは、ASME POWERから、実際の運用状況に詳しいField Engineers（試運転や保守に従事する人、電力会社）を招いて、現場からの要望、実運用上の課題と対策を議論した。議論した要望や対策を、設計・開発・研究に反映していくことが重要だと考える。

「Steam Turbine Modernizations and Retrofits」では、近年の米国における、原子力、従来火力、コンバインドサイクル発電用の蒸気タービンの、年間および一日の負荷トレンドの実績データが示され、電力系統からより低負荷での運転要求が強まっていることが議論された。

「Steam Cycle Operational Flexibility」では、再生可能エネルギーとの共存で必要となる短期間（5日以内）の停止に対して、蒸気タービンを暖機することの有効性、課題と対策が議論された。

「Water Induction Protection Strategies」では、起動停止などに、液体水（飽和温度）が作動蒸気温度（過熱）に近い蒸気タービン内に流入し、熱塑性変形するなどの課題と対策や、運用柔軟性に対応するために対策ガイドラインASME TDP-1-2013（火力）、TDP-2-2012（軽水炉原子力）を改定することなどが議論された。

「Generator Maintenance Timing to Support Plant Availability」では、寿命数十年で設計されている発電機も、電圧・系統周波数変動などの増加で、不具合が生じてきている事例が紹介され、保守期間の適正化など、蒸気タービンとも連携していくことなどが議論された。

原稿受付 2023年7月14日

*1 三菱重工業(株) 総合研究所

〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1

2. 運用柔軟性

低負荷運転時の非定常流体力が、最終段動翼に作用することによる振動応力を、非定常流体解析と振動応答解析を用いて評価し、動翼先端の失速セル（はく離渦）の影響を分析した研究（GT-101083）、熱疲労による微小き裂に対する補修方法（GT-102664）、起動停止時の実機温度計測結果から、実時間で熱応力と間隙を推定するためのモデルを、既存の温度計測結果と、流体・伝熱・構造解析による詳細な温度・熱応力・間隙分布との関係を、Neural networkを用いて予め機械学習しておくことで構築する研究（GT-102171, 103537）が報告された。

3. 湿り蒸気

水滴エロージョン損傷低減に関する研究が、5編報告された。気流の剪断力によって駆動される液膜流動から液滴飛散に至る一連の非定常現象を、Kelvin-Helmholtz, Rayleigh-Taylor, Plateau-Rayleighの不安定性理論を組み合わせた数理モデルで包括的に記述し、環状液膜の分裂現象を可視化計測した実験結果と比較することで、その妥当性を検証した研究（GT-101666）、同じ現象に対し、単独翼を対象に試験し、翼面液膜流と翼後縁からの液糸（Ligament）成長、さらに液滴分裂までの一連の現象を、高速度カメラ、LIF（Laser Induced Fluorescence）

とLDS（Laser Diffraction Spectroscopic）による計測により詳細分析し、その特性を定式化した研究（GT-101583）、実負荷縮小4段低圧蒸気タービン試験装置の最終段静翼下流の三次元空間を、入射レーザー光の後方散乱光を利用した粗大水滴計測プローブでトラバースし、液滴径の数密度分布と液滴速度を実測、平均液滴径と速度は、不安定性理論による予測と概ね一致することを確認した研究（GT-103378）、低負荷時の風損による温度上昇抑制のための排気室スプレイ水滴による、最終段動翼後縁エロージョンを、数値解析（GT-103178）と実機翼損傷の分析（GT-103990）から評価した研究が報告された。

湿り損失に関する研究が、4編報告された。原子力用蒸気タービンの湿り損失をモデルベースで評価した研究（GT-100567）、原子力1100 MW、火力660 MW、中型34 MW実機の最終段出口で湿り度と圧力をトラバース計測し、流体解析結果と合わせ流体特性を分析した研究（GT-101624）、縮小実負荷低圧タービン試験と損失モデルを組み込んだ流体解析により、各種湿り損失の割合を評価した研究（GT-103379）、同じく実負荷試験で、入口温度を変えることで凝縮開始位置を変化させ、速度三角形とタービン効率などの特性を調べた研究（GT-103637）が報告された。

10. 展示

谷 直樹^{*1}
TANI Noki

展示は例年会期2日目の昼休みから4日目の午後まで開催されており、今回も同様の期間で開催された（Fig. 1）。コロナ禍後復活2回目であり、今回はアメリカ本土開催ということもあってブース数も多く（後述）盛況であった。

近年はエンジンOEMからの展示が無く寂しい状況であったが、今年度は久しぶりにGEからの出展がありエンジンの模型などの展示を行い非常に賑わっていた。その隣にはMIT Gas Turbine Laboratoryのブースがあり、始祖のジェットエンジンの一つであるJunkers Jumo 004、航空エンジン用電動モータを持ち込んで展示しておりこちらも盛況であった。近年の展示ではCAE会社の展示が広いスペースを取って展示しており、今回もANSYS, Cadenceが入り口近くの一等地を占めており大きな注目を集めていた。

今年度は珍しい展示も複数見られた。金属製3Dプリンタで有名なVELO3Dでは、一体成型された燃料噴射ノズル、ラムジェットエンジン、ロケット用ターボポンプ&ノズルが展示されていた。積層跡などがまだ目立つため最後の機械仕上げがどうしても必要になる、とのことであったが加工の自由度が上がるため顧客が増えている。



Fig. 1 Exhibit hall (photo courtesy of ASME/IGTI)

原稿受付 2023年7月12日

*1 株式会社IHI 航空・宇宙・防衛事業領域 技術開発センター
要素技術部 システム基盤グループ
〒196-8686 昭島市拝島町3975番地18

る様である。実物を目の当たりにしつつ情報交換できるのは展示会ならではの貴重な機会である。また、こちらにも超有名なSpaceXのブースもあり、Falcon9, Starshipの模型と試験の様子動画、Merlinエンジンの写真を展示していた。展示期間中にもStarshipの試験があるとのこと担当の方は大変そうであった。

今回は119のブースがあり、前回のオランダが84ブースだったことを考えると大幅に増加している。この増加数を吸収するため会場は少し手狭な印象があり昼休み時にはすれ違うのも困難な状況であった。ブースとして最も多いのは試験関連24ブース、次がソフトウェア会社で19ブースあり比較的実物の開発に必要性が高いものがそろっている。制作・加工関連も15ブースあり、そのうち13社がAdditive Manufacturingを扱っており近年の傾向を反映している。また、精密加工、コーティングを扱っている会社も多く見られた。例年は国別の情報も公開されていたが今回はそういった情報がなくなってしまっており、多国籍企業が増えたからという状況を反映していると考えられる。なお、アジア圏からはコロナ前には中国、韓国からの展示もあったが今回は日本ガスタービン学会のブースとアイコクアルファ株式会社からの2つのみであった。アイコクアルファ株式会社では精密加工品の実物のサンプルを持ち込んだ充実の展示となっていた。

ガスタービン学会でも毎年ブース展示を行っており、昨年度に引き続きIGTC2023の集客に向けてクリアファイルにIGTCとガスタービン学会のCircular、賛助会員パンフレットを入れて皆さんに配ることとした。2023年のIGTCは京都開催であり、それに合わせてクリアファ

イルの柄は前年度と同じ金閣寺を選んだが、開催地のインパクトと合わせて非常に集客に力を発揮した。すでにIGTC2023は学会発表、展示ブースともに締め切っているため、主たる目的としては聴講していただく方を増やすという形になっている。今年度開催ということもあり、すでに参加申し込みをされている方、発表の準備をされている方、出席できないが同僚が出席するという方、色々な方々が声をかけていただけた。また、発表や展示に申し込むことができず残念、という声も聞くことができた。想像以上の認知度であり、これはひとえに過去のIGTCの運営に携わった皆さんのおかげである。配布物は約250部持参したが、展示終了の際にはすべて配り終わることができた。ブースにはガスタービン学会の紹介ポスターと、日本のガスタービンの歴史をまとめたポスターを併せて掲示したが、ブースの配置として一番奥の見えにくいところに掲示せざるを得ず、今回はあまり目立たなかった点は心残りであり、次回以降改善したいと考えている。

展示期間中は学会終了後にレセプションが行われ、ドリンクとおつまみを手にいろいろなブースを回りつつ商談、相談、営業、情報収集、グッズ収集をする時間が例年通り設けられている。リラックスした雰囲気でも多くの会話ができるため展示する側としても非常に楽しく、色々な方とお話、宣伝、情報交換できる機会であった。

展示最終日の昼休みには、Closing CeremonyとTurboExpo2024のキックオフが展示会場内で行われて、展示の締めくくりとなった。次回はロンドンでの開催であり、コロナ終息後3回目となり出席者、出展者ともにさらに増えることが予想される。

11. 統計資料

学会誌編集委員会 Journal Editorial Committee

本年に採択された技術論文件数および過去5年間に発表された技術論文件数をFig. 1～Fig. 14に示す。各分野における論文件数の変動の分析等にお役立ていただけると幸甚に存じる。なお、図中の数値は、基本的に本年分についてはOnline Conference Papersに収録

されている論文、過去5年分についてはASME Digital Collection (<https://asmedigitalcollection.asme.org/GT>)に収録されている論文を集計したものであり、各図における論文件数の集計対象セッションはTable 1に示す通りである。

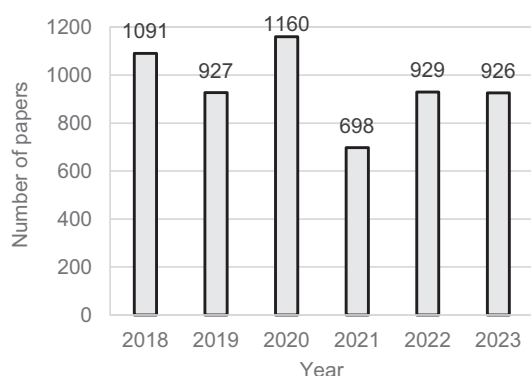


Fig. 1 All Technical Sessions

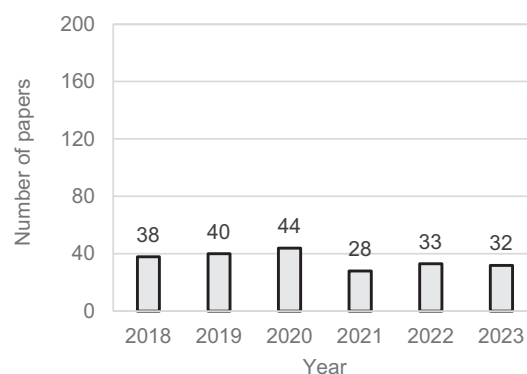


Fig. 4 Small Gas Turbine and Ceramics

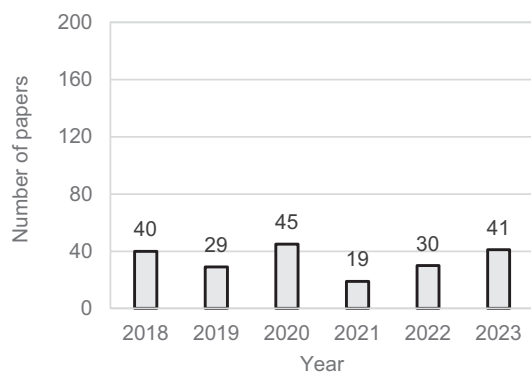


Fig. 2 Aircraft Engine

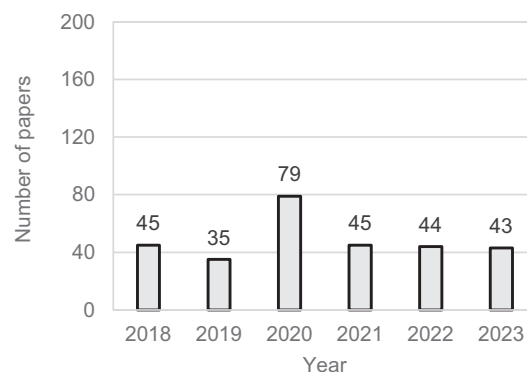


Fig. 5 Turbomachinery (Axial Flow Fan & Compressor)

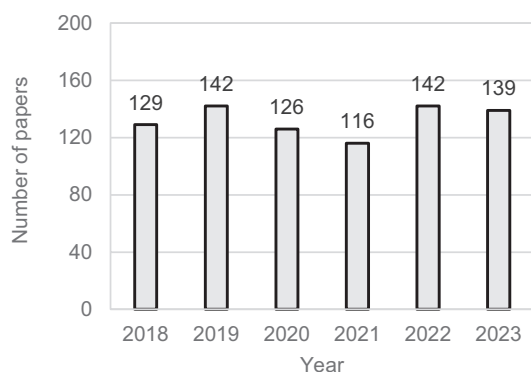


Fig. 3 Industrial Gas Turbine

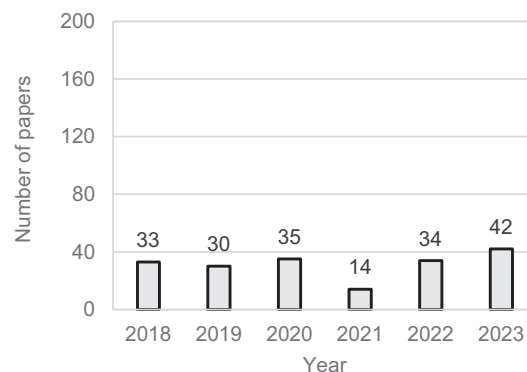


Fig. 6 Turbomachinery (Axial Flow Turbine)

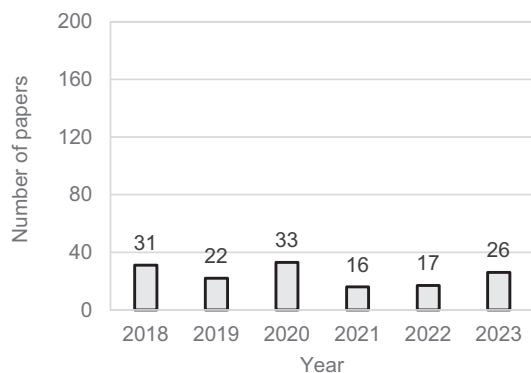


Fig. 7 Turbomachinery (Radial Turbomachinery)

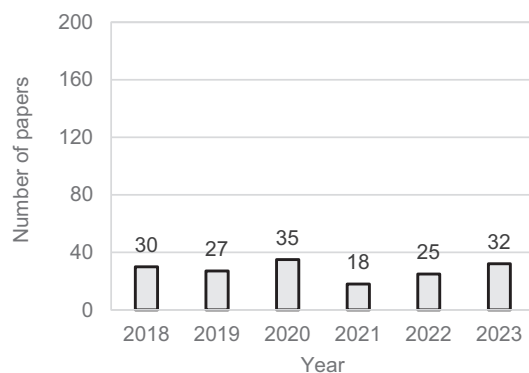


Fig. 11 Controls and Diagnostics

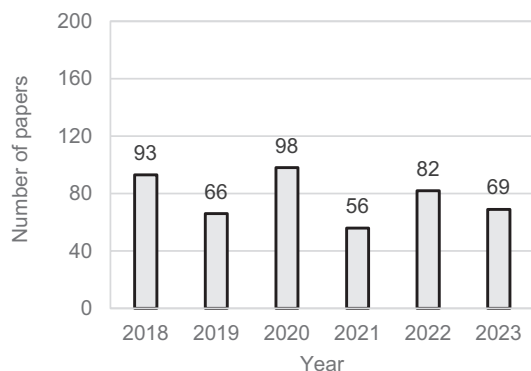


Fig. 8 Turbomachinery (Unsteady Flow and Computational Fluid Dynamics)

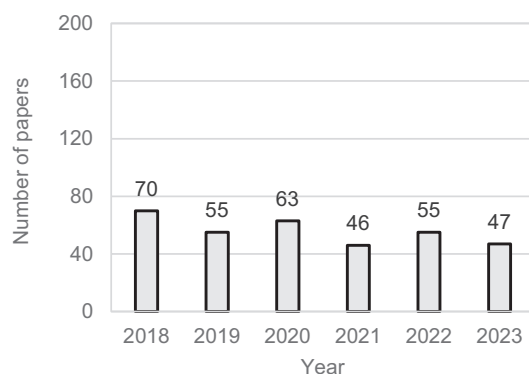


Fig. 12 Material, Structure and Manufacturing Process

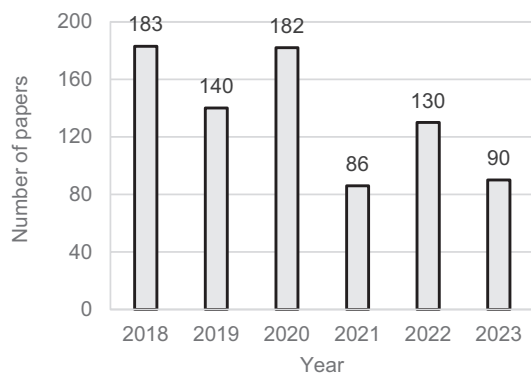


Fig. 9 Heat Transfer

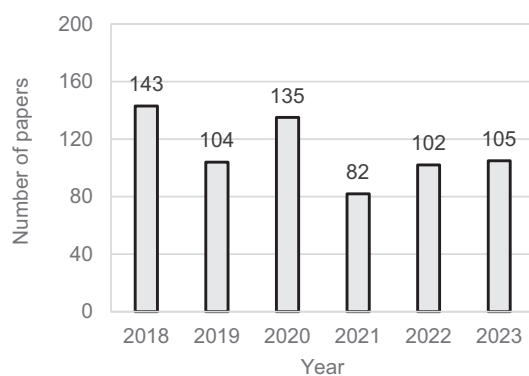


Fig. 13 Rotordynamics and Bearings

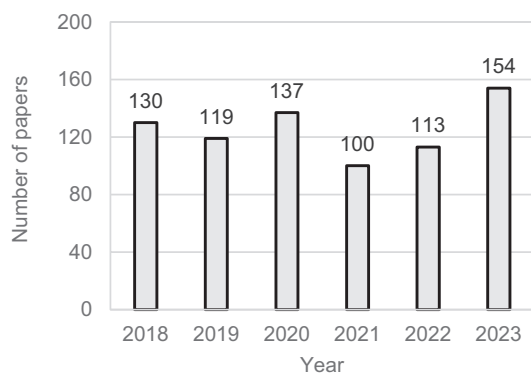


Fig. 10 Combustion and Fuels

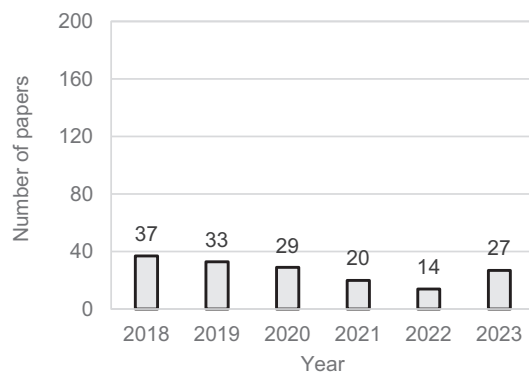


Fig. 14 Steam Turbine

Table 1

図番号	集計対象セッション
1	全テクニカルセッション
2	Aircraft Engine Committeeが主催したテクニカルセッション
3	Coal, Biomass, Hydrogen & Alternative Fuels Committee, Cycle Innovations Committee, Electric Power Committee, Industrial & Cogeneration Committee, Marine Committee, Oil & Gas Applications Committee, Organic Rankine Cycle Power Systems CommitteeおよびSupercritical CO ₂ Committeeが主催したテクニカルセッション
4	Microturbines, Turbochargers & Small Turbomachines CommitteeおよびCeramics Committeeが主催したテクニカルセッション
5	Turbomachinery Committeeが主催した「軸流ファン・圧縮機」に関するテクニカルセッション：Axial Flow Fan & Compressor Aerodynamics
6	Turbomachinery Committeeが主催した「軸流タービン」に関するテクニカルセッション：Axial Flow Turbine Aerodynamics
7	Turbomachinery Committeeが主催した「遠心圧縮機・ラジアルタービン」に関するテクニカルセッション：Radial Turbomachinery Aerodynamics
8	Turbomachinery Committeeが主催した「設計手法とCFDモデリング」および「非定常流れ」に関するテクニカルセッション：Design Methods and CFD Modeling for Turbomachinery / Unsteady Flows in Turbomachinery
9	Heat Transfer Committeeが主催したテクニカルセッション
10	Combustion, Fuels & Emissions Committeeが主催したテクニカルセッション
11	Controls, Diagnostics & Instrumentation Committeeが主催したテクニカルセッション
12	Manufacturing Materials & Metallurgy Committeeが主催したテクニカルセッションおよびStructures & Dynamics Committeeが主催した「エマージング手法」、「疲労、破壊と寿命予測」および「確率論手法」に関するテクニカルセッション：Emerging Methods in Engineering Design, Analysis, and Additive Manufacturing / Fatigue, Fracture and Life Prediction / Probabilistic Methods
13	Structures & Dynamics Committeeが主催した「ロータダイナミクス」、「構造力学と振動」、「軸受とシールの動力学」および「空力励振と減衰」に関するテクニカルセッション：Rotor dynamics / Structural Mechanics and Vibration / Bearing and Seal Dynamics / Aerodynamics Excitation and Damping
14	Steam Turbine Committeeが主催したテクニカルセッション

2022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

ガスタービン統計作成委員会は、2022年1月から12月におけるガスタービン及び過給機を生産状況を調査・集計して生産統計資料を作成いたしましたので、ここにご報告申し上げます。

陸船用ガスタービンは12社、航空用ガスタービンは3社、過給機は8社に統計データの提供をご依頼し、ご提供いただいた範囲で生産統計資料として集計いたしました。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は含まれておりません。資料提供にご協力いただいた関係各社に対し、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

I. 概要

1. 2022年陸船用ガスタービン生産統計概要

表1 出荷年次別

	Class	小型		中型		大型		総計	
		Small		Medium		Large		G.Total	
2021年	台数計(台)	53		157		18		228	
	出力計(MW)	23		514		4,860		5,397	
2022年	台数計(台)	59		151		19		229	
	出力計(MW)	27		369		6,610		7,005	
vs 前年 増減 (数値/率)	台数計(台)	6	11%	▲6	▲4%	1	6%	1	0%
	出力計(MW)	4	18%	▲145	▲28%	1,749	36%	1,609	30%

出荷年次別で見ると前年に対し22年は小型は台数、出力ともに若干増えた。中型は台数は微減であったが、出力ベースでは3割近い落ち込みとなった。これとは対照的に大型は台数こそ微増であったが出力ベースで3割強の増となった。総計で見ると台数に大きな変化はなかったが大型の実績が効いて出力ベースで3割増となった。

表2 用途別生産台数及び出力(kW)

区分		全出力				
用途	コード	台数	増減率	出力(kW)	増減率	
ベースロード 発電用	BL	2021年	43		4,822,102	
		2022年	36		5,915,706	
		vs 前年増減	▲7	▲16%	1,093,604	23%
ピークロード 発電用	PL	2021年	0		0	
		2022年	2		679,600	
		vs 前年増減	2		679,600	
非常用発電用	EM	2021年	174		474,302	
		2022年	187		327,390	
		vs 前年増減	13	7%	▲146,912	▲31%
艦船用	MM	2021年	2		80,000	
		2022年	3		80,000	
		vs 前年増減	1	50%	0	0%
その他	MC	2021年	9		20,405	
		2022年	1		2,630	
		vs 前年増減	▲8	▲89%	▲17,775	▲87%
合計		2021年	228	0	5,396,809	0
		2022年	229	0	7,005,326	0
		vs 前年増減	1	0%	1,608,517	30%

用途別を見ると前年同様、22年も台数ベースでは非常用発電用が全体の8割強を占め、出力ベースではベースロード発電用が8割強を占める。全体的な構成傾向は概ね変わっていない。又、表示はしていないが、ベースロード発電用の1台当たりの出力を対前年で比較すると小型・中形・大型を問わず1台当たりの出力の大きいものにシフトする傾向が読み取れる。

(21年、22年共に実績の無かった商船用、石油化学プロセス用、その他プロセス用、実験用、空調用は表上では非表示とした。)

注：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。

表3 燃料別生産台数及び出力 (kW)

区分				全出力			
用途		コード		台数	増減率	出力 (kW)	増減率
ガス燃料	液化天然ガス	LNG	2021年	6		1,352,900	
			2022年	8		3,245,596	
			vs 前年増減	2	33%	1,892,696	140%
	天然ガス	GNG	2021年	10		3,081,600	
			2022年	26		3,016,960	
			vs 前年増減	16	160%	▲64,640	▲2%
	液化石油ガス	LPG	2021年	1		34,150	
			2022年	0		0	
			vs 前年増減	▲1	▲100%	▲34,150	▲100%
	都市ガス	GTW	2021年	5		4,902	
			2022年	2		3,200	
			vs 前年増減	▲3	▲60%	▲1,702	▲35%
	高炉ガス	GBF	2021年	0		0	
			2022年	2		351,700	
			vs 前年増減	2		351,700	
ガス燃料 小計		2021年	22		4,473,552		
		2022年	38		6,617,456		
		vs 前年増減	16	73%	2,143,904	48%	
液体燃料	灯油	T	2021年	35		81,139	
			2022年	34		45,711	
			vs 前年増減	▲1	▲3%	▲35,428	▲44%
	軽油	K	2021年	36		174,433	
			2022年	34		129,100	
			vs 前年増減	▲2	▲6%	▲45,333	▲26%
	重油 1 種	H1	2021年	133		336,285	
			2022年	123		213,059	
			vs 前年増減	▲10	▲8%	▲123,226	▲37%
液体燃料 小計		2021年	204		591,857		
		2022年	191		387,870		
		vs 前年増減	▲13	▲6%	▲203,987	▲34%	
その他	MF	2021年	2		331,400		
		2022年	0		0		
		vs 前年増減	▲2	▲100%	▲331,400	▲100%	
合計		2021年	228		5,396,809		
		2022年	229		7,005,326		
		vs 前年増減	1	0%	1,608,517	30%	

燃料別を見ると前年同様、22年も台数ベースで液体燃料が全体の8割強を占め、出力ベースではガス燃料が9割強を占めた。更に燃料タイプ別に見るとガス燃料の中では天然ガスが台数、出力ともに割合が高く、これに液化天然ガスが続く。一方、液体燃料の中では重油1種が台数、出力ともに割合が高く、燃料コストが重要視される傾向が読み取れる。

(20年、21年ともに実績の無かった石油プラントオフガス、石炭(ガス化)ガス、プロセスガス、石炭は表上では非表示とした。)

表4 地域別生産台数及び出力 (kW)

区分			全出力				
用途			台数	増減率	出力 (kW)	増減率	
国内向け	北海道	2021年	3		2,300		
		2022年	5		4,600		
		vs 前年増減	2	67%	2,300	100%	
	東北	2021年	8		4,339		
		2022年	10		9,836		
		vs 前年増減	2	25%	5,497	127%	
	関東	2021年	66		163,119		
		2022年	93		216,790		
		vs 前年増減	27	41%	53,671	33%	
	中部	2021年	33		45,281		
		2022年	19		20,268		
		vs 前年増減	▲14	▲42%	▲25,013	▲55%	
	近畿	2021年	42		184,100		
		2022年	34		66,420		
		vs 前年増減	▲8	▲19%	▲117,680	▲64%	
	中国	2021年	10		44,580		
		2022年	10		9,318		
		vs 前年増減	0	0%	▲35,262	▲79%	
	四国	2021年	5		125,400		
		2022年	3		1,800		
		vs 前年増減	▲2	▲40%	▲123,600	▲99%	
	九州	2021年	16		19,590		
		2022年	14		24,860		
		vs 前年増減	▲2	▲13%	5,270	27%	
	沖縄	2021年	6		10,400		
		2022年	3		1,840		
		vs 前年増減	▲3	▲50%	▲8,560	▲82%	
	艦艇用	2021年	2		80,000		
		2022年	3		80,000		
		vs 前年増減	1	50%	0	0%	
	その他	2021年	9		1,240,255		
		2022年	12		1,254,378		
		vs 前年増減	3	33%	14,123	1%	
国内向け小計			2021年	200	1,919,364		
			2022年	206	1,690,110		
			vs 前年増減	6	3%	▲229,254	▲12%
輸出向け	アジア	2021年	22		1,705,600		
		2022年	17		3,312,896		
		vs 前年増減	▲5	▲23%	1,607,296	94%	
	大洋州	2021年	0		0		
		2022年	2		679,600		
		vs 前年増減	2		679,600		
	欧州	2021年	3		288,045		
		2022年	0		0		
		vs 前年増減	▲3	▲100%	▲288,045	▲100%	
	中東	2021年	0		0		
		2022年	4		1,322,720		
		vs 前年増減	4		1,322,720		
	中東	2021年	3		1,483,800		
		2022年	0		0		
		vs 前年増減	▲3	▲100%	▲1,483,800	▲100%	
輸出向け小計			2021年	28	3,477,445		
			2022年	23	5,315,216		
			vs 前年増減	▲5	▲18%	1,837,771	53%
合計	2021年		228		5,396,809		
	2022年		229		7,005,326		
	vs 前年増減		1	0%	1,608,517	30%	

地域別を見ると台数ベースでは国内向けが90%と大多数を占めるが、出力ベースでは輸出向けが75%と高い割合

を示す傾向が継続している。22年の国内全体では台数ベースで微増するも多くの地域において出力総計値を落とす結果となった。輸出の中ではアジア向け比率が台数、出力ともに高い。22年の輸出全体で見ると、台数こそ若干減らしたものの出力は対前年で、5割強の増加となった。

(20年、21年ともに実績の無かったアフリカ、非公表は表上では非表示とした。)

表5 被駆動機械別生産台数及び出力 (kW)

被駆動機械	コード	全出力			
		台数	増減率	出力(kW)	増減率
発電機	G	2021年	223		5,305,559
		2022年	224		6,921,666
		vs 前年増減	1	0%	1,616,107 30%
水ポンプ	W	2021年	3		11,250
		2022年	3		3,660
		vs 前年増減	0	0%	▲7,590 ▲67%
推進機又は回転翼	PRR	2021年	2		80,000
		2022年	2		80,000
		vs 前年増減	0	0%	0 0%
合計		2021年	228		5,396,809
		2022年	229		7,005,326
		vs 前年増減	1	0%	1,608,517 30%

被駆動機械別では前年同様、発電機が全体の98%を占める。

(20年、21年ともに実績の無かった動力計、その他圧縮機は表上では非表示とした。)

表6 出力区分別生産台数及び出力 (kW)

被駆動機械	出力区分(kW)	全出力			
		台数	増減率	出力(kW)	増減率
小型 0 ~ 735kW	0 ~ 146	2021年	2		102
		2022年	1		
		vs 前年増減	▲1	▲50%	▲102 ▲100%
	147 ~ 367	2021年	12		3,273
		2022年	12		3,441
		vs 前年増減	0	0%	168 5%
	368 ~ 735	2021年	39		19,436
		2022年	46		23,457
		vs 前年増減	7	18%	4,021 21%
	小計	2021年	53		22,811
		2022年	59		26,898
		vs 前年増減	6	11%	4,087 18%
中型 736 ~ 22,064kW	736 ~ 4,412	2021年	116		221,938
		2022年	122		209,972
		vs 前年増減	6	5%	▲11,966 ▲5%
	4,413 ~ 10,296	2021年	34		182,610
		2022年	29		158,840
		vs 前年増減	▲5	▲15%	▲23,770 ▲13%
	10,297 ~ 16,180	2021年	3		32,400
		2022年	0		0
		vs 前年増減	▲3	▲100%	▲32,400 ▲100%
	16,181 ~ 22,064	2021年	4		76,800
		2022年			
		vs 前年増減	▲4	▲100%	▲76,800 ▲100%
	小計	2021年	157		513,748
		2022年	151		368,812
		vs 前年増減	▲6	▲4%	▲144,936 ▲28%

			台数	増減率	出力 (kW)	増減率
被駆動機械	出力区分(kW)					
大型 22,065kW ～	22,065 ～ 44,129	2021年	7		272,950	
		2022年	3		118,880	
		vs 前年増減	▲4	▲57%	▲154,070	▲56%
	44,130 ～	2021年	11		4,587,300	
		2022年	16		6,490,736	
		vs 前年増減	5	45%	1,903,436	41%
	小計	2021年	18		4,860,250	
		2022年	19		6,609,616	
		vs 前年増減	1	6%	1,749,366	36%
合計	2021年	228		5,396,809		
	2022年	229		7,005,326		
	vs 前年増減	1	0%	1,608,517	30%	

出力区分別に見ると台数ベースでは中型が全体の7割弱を占め、出力ベースでは大型が全体の9割強を占める。上記の傾向は22年も前年同様である。

総括：紙面の都合上、表2～表5の表において小型、中型、大型毎の台数、出力値は非表示としているが、全体像として読み取れるのは、ガスタービン（以下GT）は総じて発電用途が大多数である。中身を見ると、大型GTが海外向けのベースロード用発電に使われ、燃料はガス燃料主体である。一方、小型、中型GTは主に国内の非常用発電用に使われ、重油等の液体燃料が使用されるのが主流である。

過去からの動きを見ると、21年は対前年で国内需要が大きな伸びを見せ、停滞する輸出を補って、市場復調を感じさせる結果であったが、22年は対前年で台数的には同レベルを維持しつつ、出力のみ伸ばす結果となった。出力増の中身を見ると、国内需要が市場を牽引した21年とは対照的に22年はアジア向け輸出が国内市場の出力減少を補う形で全体での伸びを実現した。

2. 2022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、製造台数は昨年の6台から1台増の7台であった。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年に米国連邦航空局（FAA）の型式承認を取得し、2015年に出荷が開始されている。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13、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T700のみとなり、製造台数は昨年の9台から3台減の6台であった。（表14、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、今年は2020年からのコロナ禍による減少傾向から増加に転じ、昨年の2,239台から176台増加し、2,415台となった。（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は製造台数にあまり変化

はないが、令和4（2022）年12月に公表された防衛力整備計画⁽¹⁾に「次期戦闘機に関する取組として、英国およびイタリアとの共同開発を着実に推進し、2035年度までの開発完了を目指す」と明記され、エンジンも日英伊共同開発に取り組む⁽²⁾。これにより国際的に活躍する次世代エンジニアの育成、適切な生産の分担等を通じ、防衛生産・技術基盤を維持・強化できるとともに、本格的な最新鋭戦闘機の開発を通じて、社会全般に幅広い波及効果が期待できる。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、コロナ前までの世界的な航空機需要の増加⁽³⁾に伴い、GENx, TrentXWB, PW1100G-JMのモジュール製造、部品製造が増加、更にビジネスジェット機であるGlobal7500に搭載されているPassport 20も生産が増加した。次世代大型民間輸送機B777Xシリーズに搭載予定のGE9X（2020年9月にエンジン型式承認を取得）等、新機種エンジンの国際共同開発が行われている状況⁽³⁾や、2024年には旅客需要が2019年水準を超えて回復すると予想されている⁽⁴⁾ことから、中長期的には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思われる。

出典(1)：防衛省ホームページ <https://www.mod.go.jp/j/policy/defense/nextfighter/index.html>

II. 統計

1. 陸船用ガスタービン

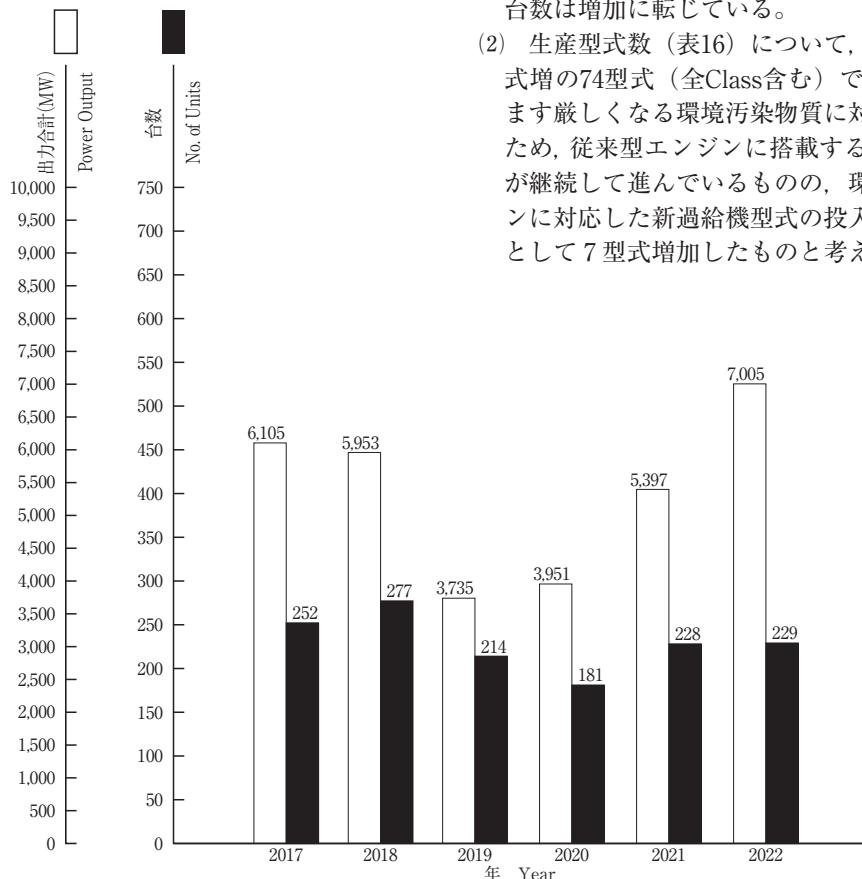


図1 陸船用ガスタービン

出典(2)：株式会社IHIプレスリリース https://www.ihico.jp/ihico/all_news/2022/aeroengine_space_defense/1198116_3479.html

出典(3)：一般社団法人 日本航空宇宙工業会「令和4年版 日本の航空宇宙工業」

出典(4)：一般財団法人 日本航空機開発協会「民間航空機に関する市場予測 2022-2041」

3. 2022年過給機生産統計概要

(1) 生産台数（表15）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過給機の実生産台数は2010年以降増加を続ける世界自動車生産台数を背景に増加傾向を保っているが、2022年は前年（約636万）比11%減の約565万台となった。主に建設機械、陸上発電設備、小型船舶用機関等向けに使用される圧縮機翼車外径101mm～200mmのClass2過給機の実生産台数は2019年下半年から続く建設機械生産台数の低迷およびCOVID19の影響から回復し、前年の約3.17倍（約4.31万台）となった。主に船舶用機関向けに使用される圧縮機翼車外径201mm以上のClass3以上の過給機については、Class3, Class6, Class9は減少しているものの、Class4, Class5, Class7, Class8においてはそれぞれ約16%, 60%, 10%, 220%増となっており、Class10は0から10台となった。総じて前年度（1494台）比約7%増の1598台となった。2017年以降減少傾向にあったが、COVID19の影響も落ち着き、世界の船舶需要の増が見込まれ、2022年総生産台数は増加に転じている。

(2) 生産型式数（表16）について、2022年は前年比7型式増の74型式（全Class含む）であった。これはますます厳しくなる環境汚染物質に対する規制に対応するため、従来型エンジンに搭載する旧過給機型式の淘汰が継続して進んでいるものの、環境対応の新型エンジンに対応した新過給機型式の投入も進んでおり、結果として7型式増加したものと考えられる。

表7 2022年用途別生産台数及び出力 (kW)

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	
用 途 Application	コード Code	台数 Units	出 力 Output (kW)	台数 Units	出 力 Output (kW)	台数 Units
ベースロード発電用 Generator Drive for Base Load	BL	10	4,508	11	61,182	15
ピークロード発電用 Generator Drive for Peak Load	PL	0	0	0	0	2
非 常 用 発 電 用 Generator Drive for Emergency	EM	48	22,390	139	305,000	0
商 船 用 Merchant Marine	M	0	0	0	0	0
艦 艇 用 Military Marine	MM	1	—*1	0	0	2
石油化学プロセス用 Oil Refinery and Chemical Process	OR	0	0	0	0	0
その他のプロセス用 Miscellaneous Chemical Process	PR	0	0	0	0	0
実 験 用 Experimental	XP	0	0	0	0	0
空 調 用 Air Conditioning	ACD	0	0	0	0	0
そ の 他 Miscellaneous	MC	0	0	1	2,630	0
合 計 Total		59	26,898	151	368,812	19
						6,609,616
						229
						7,005,326

*1 現地定格出力不明

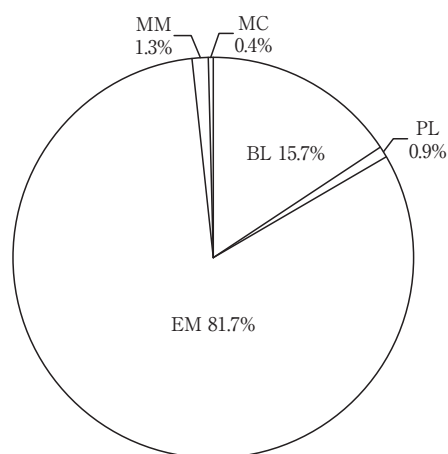


図2 2022年用途別生産台数割合 (%)

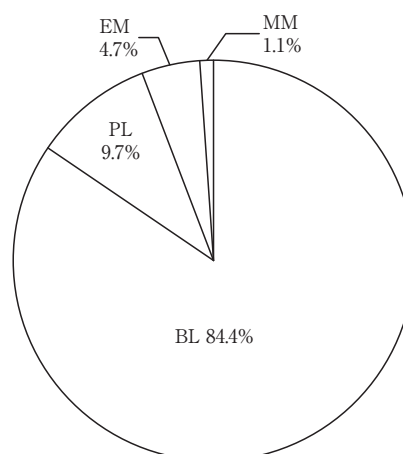


図3 2022年用途別出力割合 (%)

表8 2022年燃料別生産台数及び出力 (kW)

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	
燃料種類 Kind of 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)
ガス燃料 Gaseous Fuel	液化天然ガス Liquefied Natural Gas	LNG	0	0	0	8	3,245,596
	天然ガス Natural Gas	GNG	0	0	19	7	2,932,320
	液化石油ガス	LPG	0	0	0	0	0
	石油プラントオフガス	GOG	0	0	0	0	0
	石炭（ガス化）ガス	GCG	0	0	0	0	0
	プロセスガス	GRF	0	0	0	0	0
	都市ガス Town Gas	GTW	0	0	2	0	3,200
	高炉ガス Blast Furnace Gas	BFG	0	0	0	2	351,700
	ガス燃料 小計 Sub Total		0	0	21	17	6,529,616
液体燃料 Liquid Fuel	灯油 Kerosene	T	12	4,681	22	0	41,030
	軽油 Gas Oil	K	13	5,900	19	2	80,000
	重油1種 Heavy Oil No.1	H1	34	16,317	89	0	196,742
	液体燃料 小計 Sub Total		59	26,898	130	2	280,972
固体燃料 Solid Fuel	石炭	CB	0	0	0	0	0
	固体燃料 小計 Sub Total		0	0	0	0	0
その他 Miscellaneous Fuel		MF	0	0	0	0	0
合計 Total			59	26,898	151	19	6,609,616

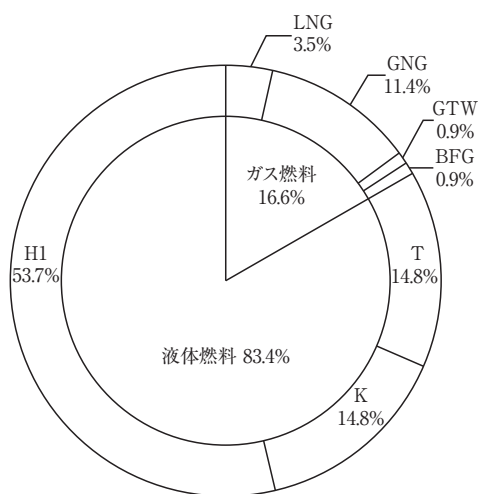


図4 2022年燃料別生産台数割合 (%)

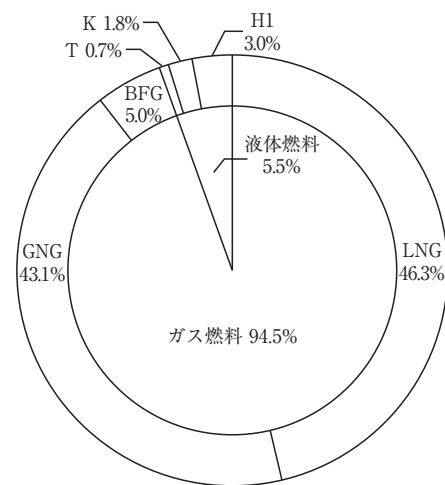


図5 2022年燃料別出力割合 (%)

表9 2022年地域別納入台数及び出力 (kW)

区分 Size 地域 Location		小型 Small Unit ～735kW	中型 Medium Unit 736～22,064kW	大型 Large Unit 22,065kW～	全 出 力 Total				
		台数 Units	出 力 Output (kW)	台数 Units	出 力 Output (kW)	台数 Units	出 力 Output (kW)		
国内向け Domestic Use	北海道 Hokkaido	2	1,000	3	3,600	0	0	5	4,600
	東北 Tohoku	4	1,436	6	8,400	0	0	10	9,836
	関東 Kanto	17	8,100	76	208,690	0	0	93	216,790
	中部 Chubu	8	3,468	11	16,800	0	0	19	20,268
	近畿 Kinki	7	2,820	27	63,600	0	0	34	66,420
	中国 Chugoku	3	1,318	7	8,000	0	0	10	9,318
	四国 Shikoku	3	1,800	0	0	0	0	3	1,800
	九州 Kyushu	6	3,080	8	21,780	0	0	14	24,860
	沖縄 Okinawa	2	640	1	1,200	0	0	3	1,840
	艦艇用 Military Marine	1	0	0	0	2	80,000	3	80,000
	その他 Miscellaneous	6	3,236	4	7,942	2	1,243,200	12	1,254,378
	国内向け 小計 Sub Total		59	26,898	143	340,012	4	1,323,200	206
輸出向け For Export	北米 North America	0	0	0	0	0	0	0	0
	中南米 South Central America	0	0	0	0	0	0	0	0
	アジア Asia	0	0	8	28,800	9	3,284,096	17	3,312,896
	大洋州 Oceania	0	0	0	0	2	679,600	2	679,600
	欧州 Europe	0	0	0	0	0	0	0	0
	ロシア・NIS諸国 Russia・NIS	0	0	0	0	4	1,322,720	4	1,322,720
	中東 Middle East	0	0	0	0	0	0	0	0
	アフリカ Africa	0	0	0	0	0	0	0	0
	非公表	0	0	0	0	0	0	0	0
	輸出向け 小計 Sub Total		0	0	8	28,800	15	5,286,416	23
合 計 Total		59	26,898	151	368,812	19	6,609,616	229	7,005,326

表10 2022年被駆動機械別生産台数及び出力 (kW)

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	
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
発電機 Electric Generator	G	57	25,868	150	366,182	17
水ポンプ Water Pump	W	2	1,030	1	2,630	0
推進機または回転翼	PRR	0	0	0	0	2
動力計	DM	0	0	0	0	0
その他圧縮機	GC	0	0	0	0	0
合 計 Total		59	26,898	151	368,812	19
						6,609,616
						229
						7,005,326

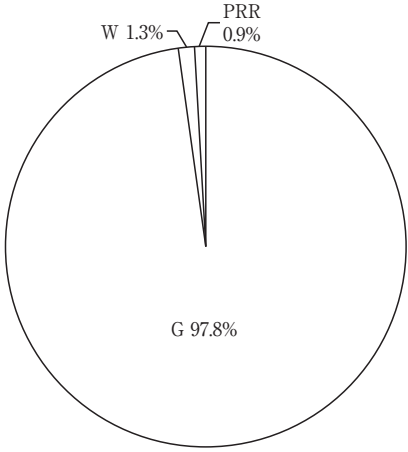


図6 2022年被駆動機械別生産台数割合 (%)

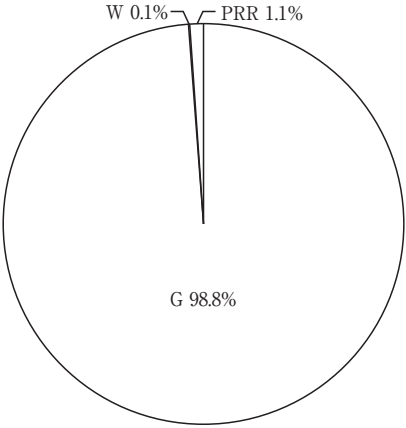


図7 2022年被駆動機械別出力割合 (%)

表11 2022年出力区分別生産台数及び出力 (kW)

出力区分 (kW) Units Output		台数 Units	出力 Output (kW)
小 型 Small Unit 0～735kW	0～146	1	0
	147～367	12	3,441
	368～735	46	23,457
	小計 Sub Total	59	26,898
中 型 Medium Unit 736～22,064kW	736～4,412	122	209,972
	4,413～10,296	29	158,840
	10,297～16,180	0	0
	16,181～22,064	0	0
	小計 Sub Total	151	368,812
大 型 Large Unit 22,065kW～	22,065～44,129	3	118,880
	44,130～	16	6,490,736
	小計 Sub Total	19	6,609,616
合 計 Total		229	7,005,326

表12 2022年発電用ガスタービン用途別生産台数及び出力 (kW)

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	
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)
国内事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	2	1,243,200	2	1,243,200
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Domestic/Public Use 国内事業用 小 計 Sub Total			0	0	0	0	2	1,243,200	2	1,243,200
国内自家用	ベースロード発電用	BL	4	1,272	7	53,240	0	0	11	54,512
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	48	22,390	131	276,200	0	0	179	298,590
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	艦艇用	MM	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Domestic/Private Use 国内自家用 小 計 Sub Total			52	23,662	138	329,440	0	0	190	353,102
国内合計 Domestic Use Total			52	23,662	138	329,440	2	1,243,200	192	1,596,302
輸出事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	10	4,216,236	10	4,216,236
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	2	679,600	2	679,600
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	艦艇用	MM	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
For Export/Public Use 輸出事業用 小 計 Sub Total			0	0	0	0	12	4,895,836	12	4,895,836
輸出自家用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	3	390,580	3	390,580
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	8	28,800	0	0	8	28,800
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	艦艇用	MM	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
For Export/Private Use 輸出自家用 小 計 Sub Total			0	0	8	28,800	3	390,580	11	419,380
輸出合計 For Export Total			0	0	8	28,800	15	5,286,416	23	5,315,216
事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	12	5,459,436	12	5,459,436
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	2	679,600	2	679,600
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	艦艇用	MM	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Public Use 事業用 合 計 Total			0	0	0	0	14	6,139,036	14	6,139,036
自家用	ベースロード発電用	BL	4	1,272	7	53,240	3	390,580	14	445,092
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	48	22,390	139	305,000	0	0	187	327,390
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	艦艇用	MM	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Private Use 自家用 合 計 Total			52	23,662	146	358,240	3	390,580	201	772,482
総 計 Grand Total			52	23,662	146	358,240	17	6,529,616	215	6,911,518

Note : Code Explanation BL : for Base Load PL : for Peak Load EM : for Emergency

2. 航空用ガスタービン

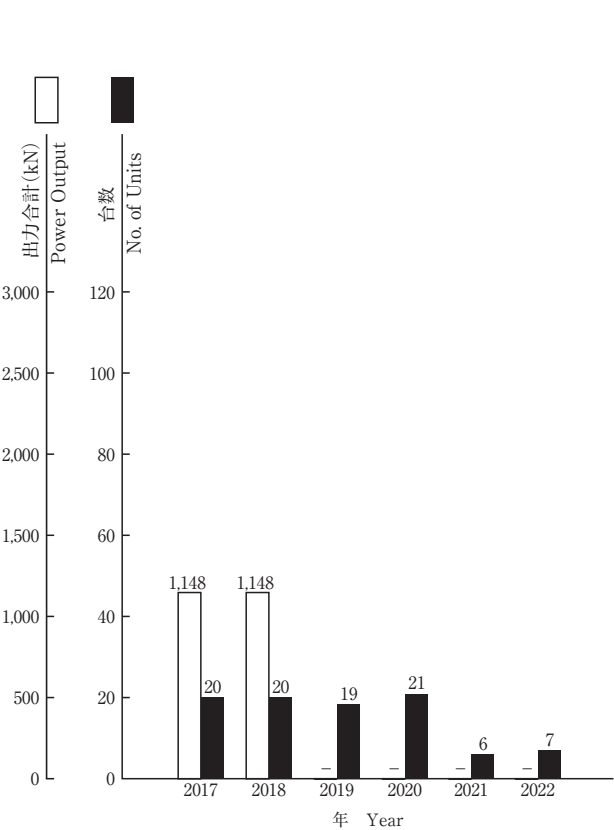


図8 ターボジェットエンジン／ターボファンエンジン

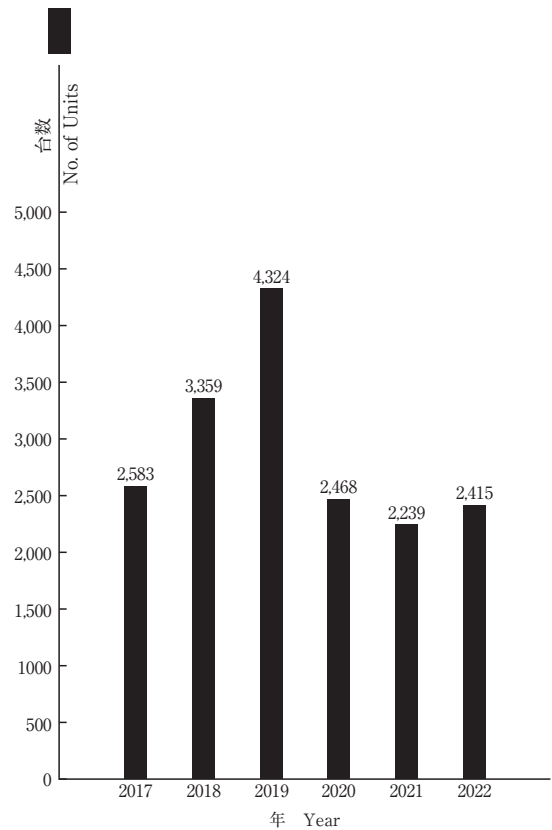


図10 民間航空エンジン用モジュール

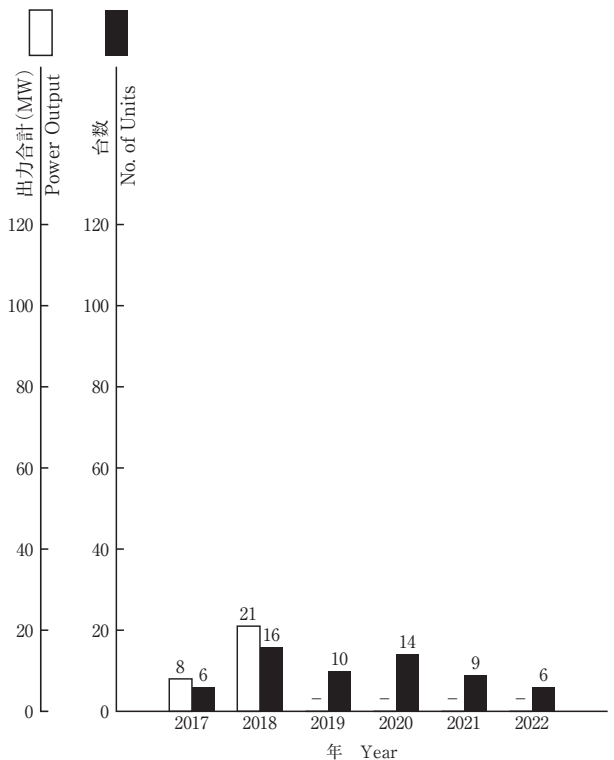


図9 ターボシャフトエンジン／ターボプロップエンジン

表13 2022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 Number of Units	7	スラスト合計*1 Thrust	-
-------------------------	---	--------------------	---

※1 海面上静止常用スラスト
Normal Thrust at Sea Level Static Condition

表14 2022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	0～735kW		736kW～		全出力	
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	6	-	0	0	6	-
補助機関駆動用 Aux. Drive Units	0	0	0	0	0	0
合 計 Total	6	-	0	0	6	-

※2 海面上静止常用出力
Normal Output at Sea Level Static Condition

3. 過給機

表15 クラス別の年間生産台数

区 分		Size					
Class	圧縮機翼車外径 (mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
Class 1	0～ 100	約462万	約518万	約583万	約492万	約636万	約565万
Class 2	101～ 200	39,008	37,067	17,867	8,012	13,574	43,090
Class 3	201～ 300	897	1,005	1,154	1,009	760	715
Class 4	301～ 400	164	172	165	200	192	222
Class 5	401～ 500	239	181	216	233	180	288
Class 6	501～ 600	173	196	213	174	176	160
Class 7	601～ 700	88	85	100	112	79	87
Class 8	701～ 800	38	47	44	55	25	80
Class 9	801～ 900	44	10	36	49	82	36
Class 10	901～1000	0	0	0	0	0	10
Class 11	1001～	0	0	0	0	0	0
合計 Total ^{※4}		40,651	38,763	19,795	9,844	15,068	44,688

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 Class2 to Class11.

表16 クラス別の型式数^{※3}

区 分		Size					
Class	圧縮機翼車外径 (mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
Class 1	0～ 100	48	48	49	46	47	47
Class 2	101～ 200	25	21	21	20	20	22
Class 3	201～ 300	16	15	15	15	14	18
Class 4	301～ 400	13	10	11	10	9	6
Class 5	401～ 500	13	12	11	12	10	11
Class 6	501～ 600	12	9	9	8	7	8
Class 7	601～ 700	8	6	5	5	3	4
Class 8	701～ 800	3	4	4	2	2	3
Class 9	801～ 900	5	2	2	3	2	1
Class 10	901～1000	0	0	0	0	0	1
Class 11	1001～	0	0	0	0	0	0
合計 Total ^{※4}		95	79	78	75	67	74

※3 型式はいずれも排気タービンである。
Every model is an exhaust turbine type supercharger.

※4 合計数は、圧縮機翼車外径100mmを越す分を示す。
Total number of superchargers over 100mm in impeller diameter is shown.

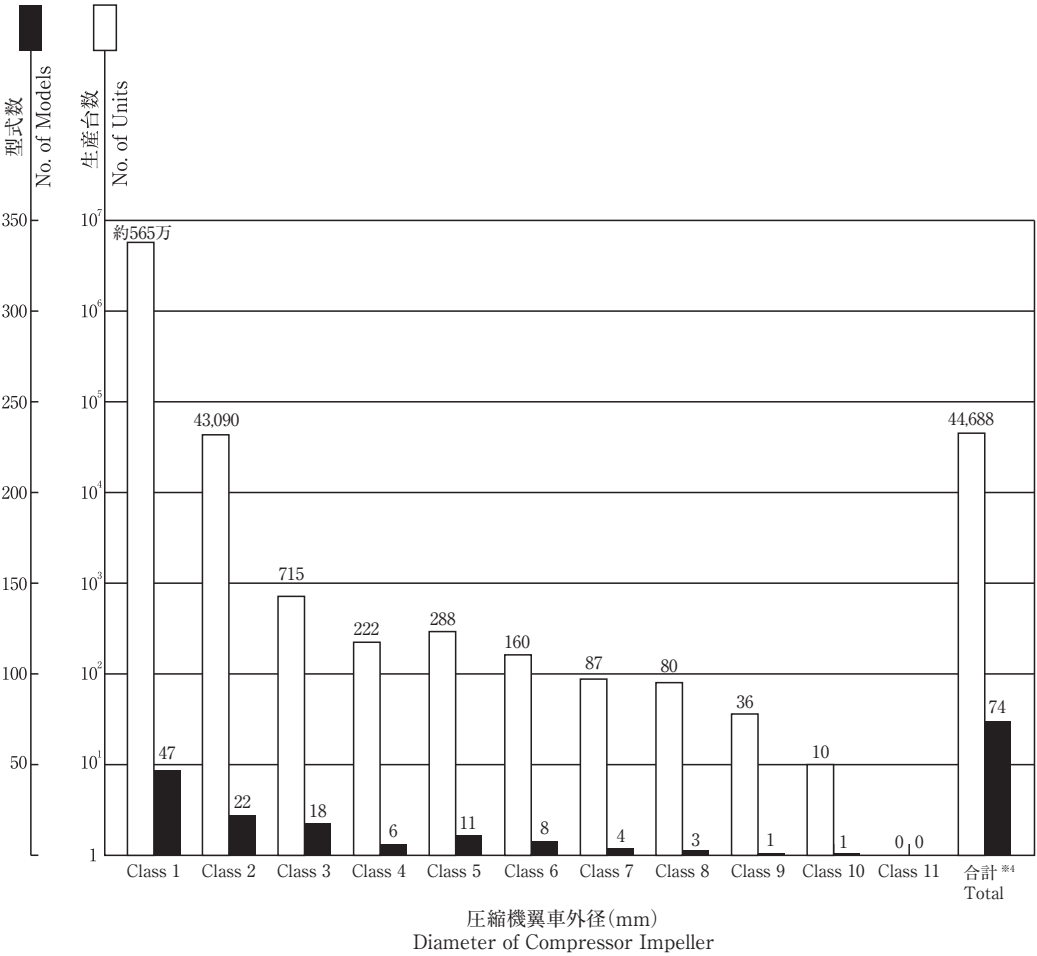


図11 2022年過給機生産台数及び型式数（注※4は表16を参照）

ASME Turbo Expo 2023 GTSJ展示 実施報告

国際委員会

国際委員会では、当学会が主催または共催するIGTCやAGCTといった国際会議などの活動をはじめとして、日本におけるガスタービンの研究開発に関する情報を発信することを目的として、2014年からASME Turbo Expoの展示に日本ガスタービン学会のブースを構えています。しばらくリモート開催だったTurbo Expoも2022年からは現地開催となり、これに伴いGTSJブースでの展示も復活しました。昨年度までは航空輸送量の減退による物品輸送ができないなどのコロナ禍の影響がありましたが、その影響も今年度は無くなりようやく通常通りの開催ができるようになりました。

ブース展示の準備については事務局長の中村さんを含む国際委員会のワーキンググループにて行い、ポスターやパンフレットのアップデート作業を行いました。また、例年通りではありますがブースでの説明も国際委員のみならず会議出席者の皆様にも協力いただきました。これらの活動に協力いただいた皆様には深くお礼を申し上げます。なお、ASME/IGTIと当学会とは国際会議に関する協力協定を締結しており、IGTI事務局に大変お世話になっています。

Turbo Expoの展示は学会期間中の真ん中3日間に開催されるのが通例となっており、今回も会期2日目の6月27日から4日目の29日までの3日間で開催されました。展示はGTSJの紹介ポスターおよび日本のガスタービン開発史のポスターを2つ、加えて、配布物として京都金閣寺の写真と学会ロゴの入ったクリアファイルに、①

GTSJ英文パンフレット、②IGTC2023パンフレット、③日本のガスタービン関連機関情報パンフレットを挟み、配りました。IGTC2023については注目度が高く、すでに講演申し込み、展示申し込み共に終了している点を残念に思うコメントを多くいただきました。

前はブース数が84件と、例年の100件オーバーという状況を見ると寂しく会場が広く感じましたが、今回は合計119件となっており、展示の面でもコロナ禍の終了を感じさせる状況で会場も非常に混みあった状況でした。今後も展示内容の更なるアップデートなど工夫を進めていただきたいと思います。今後ともブース展示を継続して行きたいと思いますので、ご理解とご協力をいただきますよう宜しくお願い致します。



GTSJブースの様子

ASME Turbo Expo 2023 参加報告

日本ガスタービン学会事務局

中村 優美

ボストンで開催のASME Turbo Expoに参加してまいりました。展示ブース出展も8回目となりました。今回もASME事務局のBarrangerさんには、ブース設営準備や備品の追加など細やかにご対応いただき、ブース設営等もスムーズに準備することができました。ブースでは、国際委員会メンバーの他、GTSJ会員の方々にもご協力いただき、来訪者にGTSJの紹介や、11月に開催のIGTC2023 Kyotoの紹介をいたしました。顔なじみの方も増え、京都に行きますよと声を掛けてくださる方もた

くさんいらっしゃいました。

Turbo Expoに参加された国際委員会委員やGTSJ会員のみならず皆様のご協力により、今年も無事に、そして充実した日々を送ることができました。この場をお借りして御礼申し上げます。

なお、11月のIGTCには前回までに引き続きASMEのブース出展があります。当学会との協力事業の一つですので、是非ご覧ください。

第35回ガスタービン教育シンポジウム報告

澤 徹

SAWA Tetsu

2023年7月6日(木)と7日(金)の二日間にわたり本会主催の第35回ガスタービン教育シンポジウムが神奈川県横浜市にある東芝エネルギーシステムズ(株)京浜事業所タービン工場で開催された。本シンポジウムは昨年に続きの対面での開催となる。新型コロナウイルス感染症拡大対策のため参加者数を減らしたので、参加者数は従来よりも少なく42名(学生:5名, 社会人:37名)であった。

本シンポジウムは、学生や若手技術者などガスタービン初学者を対象に、ガスタービンに関する基礎知識を学んで頂くことを主目的に、第一線で活躍されている各専門家の方々による講義と、実際のガスタービンとその関連の製造および研究開発施設の見学を併せた企画である。関東地区では毎年、関西地区では隔年で開催してきた。

今回は新型コロナウイルス感染症の5類感染症への移行後となるが、感染症対策として参加者数を減らし、また従来行っていた懇親会は行わなかった。

1日目は、開会のあいさつの後、3件の講義(1)「ガスタービン概論」(姫野武洋氏)、(2)「ガスタービンと燃焼工学」(齊藤圭司郎氏)、(3)「東芝の火力発電技術とカーボンニュートラルへの取り組み」(清國寿久氏)が行われた。その後、官学参加者は京浜事業所内のタービン工場、タービン羽根工場、ガスタービン補修工場といった生産設備の見学を行い、参加者は各工程の説明に聞き入っていた。また、企業参加者は業種に応じて分かれ、タービン工場、タービン羽根工場、ガスタービン補修工場の見学と東芝ガスタービン補修技術の紹介を受講した。

2日目は、前日に引き続き4件の講義、(4)「ガスタービンと材料工学」(窪谷悟氏)、(5)「ガスタービンと制御工学」(垣内大紀氏)、(6)「ガスタービンと伝熱工学」(小田豊氏)、(7)「ガスタービンと流体工学」(山本誠氏)が行われた。それぞれの講義ではガスタービンの基礎から最新の技術動向までを専門家の立場から説明がなされ、受講者にとって今後の研究や仕事などを行ううえ

で役立つ内容となっており、講義の最後には時間が許す限り質疑応答が活発に行われた。

本シンポジウムでは2023年に改訂された「ガスタービン工学」を教材として用いており、これに沿った講義を講師の方々をお願いしている。ただ、本教材は300ページを超えるもので、2日間の講義では時間の都合もあり、教材の一部分しか扱うことができなかった。今回参加された方々には教材を各々の現場で活用して頂き、ガスタービンの知識をさらに深めるのに役立てて頂ければ幸いである。

また、全講義終了後、2日間の講義に出席した参加者全員に修了の証として受講証が手渡された。また、参加者には、今後の教育シンポジウムの運営及び教材に関するアンケートにご協力頂いた。アンケート結果は次回以降の企画及び教材の改定に反映する予定である。

最後に、講義や資料の作成・準備にご尽力して頂いた講師の方々に感謝するとともに、会場の提供、見学会の実施において色々にご協力頂いた東芝エネルギーシステムズ株式会社の関係各位に深く感謝いたします。

(集会行事委員会委員)



講義風景

第51回日本ガスタービン学会定期講演会(福井)・見学会のお知らせ

第51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。プログラムなどの最新情報は、学会ホームページに掲載します。なお、新型コロナウイルス感染症状況により、オンライン開催とする場合があります。

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、学会ホームページ (<https://www.gtsj.or.jp/>) をご覧ください。

開 催 日：

- ・講演会 2023年10月4日(水), 5日(木)
- ・見学会 2023年10月6日(金)

開催場所：

- ・福井県国際交流会館
〒910-0004 福井市宝永3丁目1-1
<https://www.f-i-a.or.jp/ja/plaza/>

講 演 会：

- ・一般講演：空力、燃焼、システム、伝熱、材料、タービンなど
- ・基調講演：ガスタービン要素技術研究の進展と期待（仮題）
- ・先端技術フォーラム：ガスタービン材料開発の最新動向（仮題）
- ・特別講演：恐竜王国福井の恐竜時代：約1億2000万年前の恐竜達のすがた 今井拓哉氏（福井県立大学恐竜学研究所）

参加登録費：

日本ガスタービン学会正会員	13,000円（不課税）
協賛団体会員	14,300円（税込）
非会員（上記以外）	19,800円（税込）
日本ガスタービン学会学生会員	4,000円（不課税）
協賛団体学生会員	4,400円（税込）
非会員学生	7,700円（税込）

懇 親 会：

- ・新型コロナウイルス感染対策を考慮した形で第1日目（10月4日）終了後、「ホテルフジタ福井」にて開催予定。状況により中止する場合があります。
- ・参加費：6,600円（税込）（学生は、4,400円（税込））

見 学 会：

- ・新型コロナウイルス感染対策を考慮した形で現地開催を予定。状況により中止する場合があります。
- ・日 程：10月6日(金)
- ・申込締切日：2023年9月15日(金)
- ・見学先：福井県工業技術センター、福井県立恐竜博物館など
- ・参加費：6,600円（税込）
- ・定 員：40名程度、先着順、講演会への参加登録者に限ります。

参加申込方法：

- ・学会ホームページよりお申し込みください。学会ホームページからお申し込みができない場合は、学会事務局までお問い合わせください。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。
- ・申込締切日：9月27日(水)

市民フォーラム：

- ・講演会前日の10月3日(火)に、ガスタービン市民フォーラム（会場：福井大学文京キャンパス総合研究棟Ⅰ大会議室）を対面形式にて開催する予定です（参加無料）。詳細については、学会ホームページ (<https://www.gtsj.or.jp/>) をご覧ください。

第51回日本ガスタービン学会定期講演会プログラム：第1日

(一般講演 講演時間15分 討論5分, [学]:学生優秀講演賞の審査対象講演, 連名者の所属が省略されている場合は後者と同じ)

第1日 10月4日	A室	B室	C室
	伝熱(1)	空力(1)	システム・材料
9:40	【A-1】コルゲートインピンジメント冷却の伝熱特性 * 坂田篤哉, 伊藤竜太, 水上聡, 若園進(三菱重工)	【B-1】[学]前縁フィレットを有する超高負荷軸流タービン直線翼列内の流れの数値解析 - フィレットの幅の影響 - * 長島健裕, 古谷琉翔(法大院), 辻田星歩(法大)	【C-1】背圧を下げ, 推力を下げず, 最高温度を下げるターボファンサイクル * 根本勇(無所属)
10:00	【A-2】ガスタービン翼の連成伝熱解析 - 一ふく射熱伝達の影響評価 - * 高橋俊彦, 酒井英司, 藤井智晴, 泰中一樹(電中研)	【B-2】[学]翼端溝加工が圧縮機翼列の失速特性に及ぼす影響の調査 * 横山貴大, 高島涼太郎, 佐藤拓(高知工大院), 荻野要介, 野崎理(高知工大)	【C-2】水素ジェットエンジンに関する一考察 * 二村尚夫(JAXA)
10:20	【A-3】Improvements with Computationally Efficient Conjugate Heat Transfer Modeling Workflow applicable for Transient Combustion Simulations Ishan Verma, Sudhanshu Prasad(ANSYS), Sourabh Shrivastava(Ansys Software), Hiroshi Yukawa, * Tsuyoshi Minowa(Ansys Japan)	【B-3】[学]遷音速連心圧縮機における三次元はく離の流れ構造および非定常挙動のDES解析 * 能美智(岩手大院), 山田和豊(岩手大), 谷口直, 富田勲(三菱重工)	【C-3】上越火力発電所第1号機熱効率および運用性向上への取り組みについて * 鎌田嘉尚(東北電力)
10:40	【A-4】IRカメラ計測によるタービン静翼面の冷却効率評価 * 池原侑, 仁田耕造, 藤本秀(IHI), 賀澤順一, 大北洋治(JAXA)	【B-4】[学]突極形タービン発電機の内部流動と冷却構造に関する研究 * 浅沼拓真(早大院), 藤澤信道, 太田有(早大), 武藤琢真, 小澤明, 佐藤和雄, 増田光(TMEIC)	【C-4】高強度粉末鍛造ディスク材の製造プロセスの開発 * 今野晋也, 芝山隆史(MHI) 長田俊郎, 佐々木泰祐(物材機構) 長濱大輔, 奥野元貴(本田)
11:00	【A-5】高圧タービン翼面上フィルム冷却効率分布に与える密度比及び主流乱れの効果に関する研究 * 漆山諒(IHI), 船崎健一(岩手大), 藤本秀(IHI)	【B-5】[学]エンジンフロースルーでの抗力値を用いた解析フレームワークによる翼胴一体機(BWB)における境界層吸い込み(BLI)の利得評価 * 安藤翔, 河野雅大, 小桐間智也(早大院), 岡井敬一, 賀澤順一, 正木大作, 小島孝之(JAXA), 佐藤哲也(早大)	【C-5】付加造形と三次元計測を組み合わせたガスタービン翼の新しい補修システム * 中川知哉, 木村祐二, 川崎雄太, 上野和樹, 松津貴行, 長坂博之(ニコン)
11:20		【B-6】[学]横風により励起されるインテーク内のディストーション計測 * 細野俊輔(東理大院), 石井達哉, 生沼秀司, 大木純一(JAXA), 楠田真也, 大庭芳則(IHI), 石川仁(東理大)	
11:40	(昼休憩)		
12:00	A室	B室	C室
	空力(2)	騒音・二相流	燃焼(1)
13:20	【A-7】General One Equation乱流モデルによる翼列性能評価 * 谷直樹, 神崎大(IHI), Aleksandar Jemcov(NDTL)	【B-7】音響及び空力性能に優れた航空エンジン用音響ライナの提案と実験的評価 * 大木純一, 近藤依央菜, 増倉明寛, 橋口大輝, 久保凱, 榎本俊治, 長井健一郎, 生沼秀司, 岡村直行, 石井達哉(JAXA), 村田耀(東大)	【C-7】Turbulence Model Tuning Using Adjoint Optimization and Machine Learning for Gas Turbine Combustion (GTC) Applications George Klavaris(Ansys UK), Min Xu, Ishan Verma, Stefano Orsino(ANSYS), Sourabh Patwardhan(Ansys Software), Hiroshi Yukawa, * Tsuyoshi Minowa(Ansys Japan)
13:40	【A-8】非構造格子を用いた翼列空力解析における対流項解析スキームの高度化 * 南部太介(JAXA), 河野貴久(愛友システムズ), 小島良実(JAXA)	【B-8】[学]レーザー光と位置検出素子を用いた超音速ジェット騒音計測の妥当性に関する研究 * 松本一希, 権率河(東大院), 岡本光司, 赤嶺政仁, 寺本進(東大)	【C-8】ドライ水素燃焼器のNOx排出量低減と混焼範囲拡大 * 岡田邦夫, クロニガーダニエル, 神谷浩武, 堀川敦史, 山口正人, 足利貢, 青木茂樹, 石村祐宣(川崎重工)
14:00	【A-9】産業用ガスタービン圧縮機翼列流動の全周計算に基づく不安定稼働条件の分類 * 宮澤弘法, 萩田泰晴, 早川陸駆, 古澤卓, 山本悟(東北大)	【B-9】[学]マルチショット計算を導入した格子-粒子カップリング法による雨水条件下でのSLD着氷の数値シミュレーション * 兼次正隆, 阿部優輝(東理大), 福留功二(金沢工大), 藤村宗一郎, 山本誠(東理大)	【C-9】Pressure gain combustionを適用するガスタービンのサイクル解析 * 井上素良(都立大院), 櫻井毅司(都立大)
14:20	【A-10】圧縮機動翼の翼端漏れ渦崩壊が空力安定性に与える影響 * 関亮介, 東俊彦, 岩谷淳二, 中庭彰宏, 奥井英貴(三菱重工), 柴田貴範(岩手大)	【B-10】[学]氷粒子付着判定を導入したアイスクリスタル着氷モデルの数値的研究 * 龍田和佳奈(東理大院), 福留功二(金沢工大), 藤村宗一郎, 山本誠(東理大)	【C-10】Influence of the scalar variances in a quasi-two-dimensional flamelet model to the LES of MILD combustion Yu Panlong, * Kai Reo, Watanabe Hiroaki (九大)
14:40	【A-11】Investigation of aero-engine compressor under inlet distortion using native multi-GPU solver Michael Wise, Sunil Patil(Ansys), Hiroshi Yukawa, * Tsuyoshi Minowa(Ansys Japan)	【B-11】[学]計算負荷低減手法を用いたSLD着氷の格子-粒子カップリングシミュレーションの数値的研究 * 阿部優輝, 兼次正隆(東理大), 福留功二(金沢工大), 藤村宗一郎, 山本誠(東理大)	【C-11】Effect of fuel injection and composition on thermoacoustic instability of a micromix flame * Daniel Kroniger, 岡田邦夫, 神谷浩武, 堀川敦史(川崎重工)
15:00	【A-12】急速起動時の圧縮機動翼過渡変形に関する流体-熱-構造連成解析法の開発 * 渡辺紀徳, 姫野武洋(東大)	【B-12】オイラー・ラグランジュ三次元非定常解析による蒸気タービンの湿り損失評価 * 笹尾泰洋, 田畑創一朗, 瀬川清(三菱重工)	【C-12】火炎自発光計測を用いた断面内燃焼振動モード評価 * 宮崎 洗治, 堀田和郎, 齋藤敏彦(三菱重工)
15:20			
15:40	特別講演		
	座長：岡本光司(東大)		
	【S-1】恐竜王国福井の恐竜時代: 約1億2000万年前の恐竜達のすがた		
	今井拓哉 氏 (福井県立大学恐竜学研究所)		
17:10			
18:00	懇親会		
	【市内】ホテルフジタ福井 天山の間		
20:00			

第51回日本ガスタービン学会定期講演会プログラム：第2日

(一般講演 講演時間15分 討論5分, [学]: 学生優秀講演賞の審査対象講演, 連名者の所属が省略されている場合は後者と同じ)

	A室	B室	C室
第2日 10月5日	材料(1)	燃焼・伝熱	二相流・振動
9:40	【A-13】プロトン伝導体を用いた水素測定によるアンモニア雰囲気中での材料の耐環境性評価 * 福本倫久、原 聖也、高橋弘樹(秋田大)	【B-13】[学]素反応計算によるガスタービン燃焼器内燃焼履歴の最適化検討 * 日下部侑汰、廣光永兆(金沢工大)、松山新吾(JAXA)	【C-13】[学]ファン動静翼における雨滴衝突の三次元数値予測 * 池田悠馬、福留功二、藤村宗一郎、山本誠(東理大)、鈴木正也(JAXA)、林亮輔、岡田隆一(IHI)
10:00	【A-14】ジルコニア系連続繊維を強化繊維とする酸化物系CMCの開発(3) * 長谷川良雄、秦青、鉄井利光(物材機構)、早川敏之、山岸英明、桑田和弘(ニチビ)	【B-14】[学]水素-空気燃焼の数値シミュレーション: 選択拡散・火炎伸長・熱損失効果を考慮可能なFGM法の開発 * 衣田和弘(京大院)、甲斐玲央(九大)、黒瀬良一(京大)	【C-14】[学]高温高速固気二相流によるステンレス鋼のエロージョン試験 * 横濱充(東理大院)、石川仁(東理大)、鈴木正也(JAXA)
10:20	【A-15】フラットトップレーザ粉末床熔融結合法におけるニッケル単結晶の造形に不可欠なレーザスキャンストラテジー * 北嶋具教、ジョディデニス(物材機構、九大)、渡邊誠(物材機構)	【B-15】[学]微小噴射孔を用いる水素浮き上がり火炎バーナのNOx性能 * 市枝和典(都立大院)、櫻井毅司(都立大)	【C-15】高速気流中における液滴の微細化に関する研究 * 田畑創一朗、妹尾茂樹(三菱重工)、Vincent McDonell、Brandon Esquivias、Brendan Hickey (University of California, Irvine)
10:40	【A-16】マテリアルズインテグレーションシステムMintを活用したγ'相析出型Ni基合金の仮想熱処理実験 * 長田俊郎(物材機構)、小山敏幸(名大)、プルガリビッチドミトリー、源聡、大澤真人、渡邊誠、川岸京子、出村雅彦(物材機構)	【B-16】[学]冷却孔を有するリブ付き内部冷却流路の熱伝達特性に関する実験的・数値的研究(流路断面形状の効果) * 澤村優太、竹内祥人(岩手大院)、船崎健一(岩手大)、堀内豪、福田芽衣(川崎重工)	【C-16】電動ターボチャージャーにおけるタービンに流入する液滴挙動の予測について * 中村一諒、伊藤光紀、池田諒介、森田功、桐明拓郎、崎坂亮太、鈴木涼馬(IHI)
11:00	【A-17】離散コサイン変換と最大エントロピー法によるガスタービン動翼用単結晶Ni基超合金の高温クリープ変形時の相転移内挿予測研究 * 平口英夫(日本技術士会)	【B-17】[学]高性能フィルム冷却孔形状を用いたフィルム冷却の効率化に関する研究 —Pick-Shaped Holeの最適化— * 佐々木優大(岩手大院)、船崎健一、柴田貴範(岩手大)	【C-17】ミスチューンを有する翼・ディスク系のモーダルパラメータ同定に関する研究(共振通過時の過渡応答を利用したモーダルパラメータ同定) * 金子康智(龍谷大)、渡邊敏生、古川達也(三菱重工)
11:00	【A-18】超合金の合金設計技術の現状と可能性 * 原田広史(超合金設計研)	【B-18】[学]フィルム冷却効率測定の高精度化に向けた重ね塗り感圧・感温塗料の開発 * 岡雅登、仲林直斗、松浦健太、小田豊(関西大)	【C-18】BVMによる翼振動計測および遠隔監視システムの開発と実用化 * 三宅 哲、門間 和弘、宮島 慶一郎、後藤 俊郎、田村和浩、渡邊 敏生(三菱重工)
11:20	(昼休憩)		
	A室		
13:00	基調講演:ガスタービン要素技術研究の進展と期待(仮題)		
	未定		
14:40			
	A室		
15:00	学生優秀講演賞 審査結果報告		
	座長: 岡本光司(東大)		
	先端技術フォーラム:ガスタービン材料開発の最新動向(仮題)		
15:10	未定		
17:20			

2023年度第2回見学会のお知らせ

2023年度第2回見学会を、下記の通り開催いたします。

1. 日 時： 2023年11月10日(金) 12:15～18:00 (予定)*

※3班にて実施のため班により実施時間が異なります。

2. 見学場所： (株)IHI そらの未来館 (東京都昭島市)、鶴ヶ島工場 (埼玉県鶴ヶ島市)

3. 内 容： そらの未来館にて、IHIにおける航空エンジン開発の歴史の説明
鶴ヶ島工場において、航空エンジン整備の概要説明、及び見学

4. 行 程：

1班 集合12:45 IHI昭島事務所正面玄関集合 (最寄り駅/JR青梅線 昭島駅)
解散17:00 東武東上線若葉駅

2班 集合13:45 IHI昭島事務所正面玄関集合 (最寄り駅/JR青梅線 昭島駅)
解散18:00 東武東上線若葉駅

3班 集合12:15 東武東上線若葉駅西口
解散16:30 IHI昭島事務所 (最寄り駅/JR青梅線 昭島駅)

※班分けは学会にご一任お願い申し上げます。どの班でご参加いただくかは参加可否と合わせて連絡申し上げます。

5. 参加要領：

(1)参加資格： 高校生以上

(2)定 員： 40名程度 (お申込み多数の場合、お断りすることがございます。)

(3)参 加 費 (税込。移動バス代を含む。)：事前振込

学生 (会員/非会員問わず) 2,640円

正会員 3,740円

非会員 4,840円

※振込先等は、申込締切後にご案内いたします。

6. 申込方法：

学会ホームページ (<https://www.gtsj.or.jp/>) よりお申込みください。または、「2023年度見学会 参加申し込み」と明記のうえ、下記の情報を、FAXまたはE-mailにて学会事務局 (FAX: 03-3365-0387, E-mail: gtsj-office@gtsj.or.jp) までお送り下さい。

- (1) 氏名 (フリガナ)
- (2) 会員種別
- (3) E-mailアドレス
- (4) 携帯電話番号 (当日連絡可能な電話番号)
- (5) 勤務先・部署 (学生の場合は学校名)
- (6) 役職
- (7) 勤務先住所 (学生の場合は学校住所)
- (8) 国籍

◆申込締切：2023年9月29日(金)

*申込者全員に、参加可否を10月23日(月)までにお知らせいたします。学会からの連絡がない場合には、お問い合わせください。

International Gas Turbine Congress 2023 Kyoto のご案内

IGTC2023 Kyoto実行委員会

International Gas Turbine Congress 2023 Kyoto (IGTC2023 Kyoto) の開催が近づいて参りました。実行委員会では、新型コロナウイルスの大流行が終息して完全対面で本会議を開催すべく昨年度より準備を進めて参りました。お陰様で230編を越える講演の申し込みを頂きました。併設される展示会にも31社にご出展いただき、盛況となっています。また、招待講演 (Plenary Lecture, Invited Lecture) と合わせて、毎回好評を頂いておりますパネルディスカッションも開催する予定です。

今後も実行委員会にて開催まで努力と準備を続け、学術発表と討論による情報交換、広く海外への情報発信およびネットワーキングの場として価値の高い国際会議を実現したいと思います。会員の皆様には是非この場を活用いただきますよう、宜しくお願い致します。

記

会 期： 2023年11月26日(日)～12月1日(金)

開 催 場 所： 国立京都国際会館 (京都市左京区宝ヶ池, <http://www.icckyoto.or.jp/>)

ウェブサイト： <http://www.igtc2023.org/>

講 演 会： 一般講演230件以上

Plenary Lectures 4件

- (1) Prof. Harald H.-W. Funke (Aachen Univ. of Applied Sciences)
- (2) Prof. Toshinori Watanabe (The University of Tokyo)
- (3) Mr. Krishnakumar PG (GE Gas Power)
- (4) Dr. Mark Hardy (Rolls-Royce)

Invited Lectures 5件

- (1) Prof. Damian Vogt (University of Stuttgart)
- (2) Prof. Richard Sandberg (The University of Melbourne)
- (3) Dr. Kyoko Kawagishi (National Institute for Materials Science)
- (4) Prof. Agustin Valera-Medina (Cardiff University)
- (5) Dr. Dale Van Zante (NASA Glenn Research Center)

Panel Discussions

“Future Prospects of Gas Turbine Combustion Towards Carbon Neutral Society”

Part 1 : Aircraft Gas Turbine

Part 2 : Industrial Gas Turbine

展 示 会： 31社, 11月27日(月)～30日(木) 入場無料

行 事： Welcome Reception, 11月26日(日) 18:00～20:00

Banquet, 11月29日(水) 18:00～20:30

Tours, 12月1日(金) 2コース

【参加登録】：ウェブサイトから参加登録をお願いします。

1. 登録料（税別）

	早期登録 (9月30日まで)	後期登録 (10月1日～11月17日17時まで) および 当日登録
会 員	70,000円	80,000円
非会員	80,000円	90,000円
学 生	15,000円	
昼 食	11月27日(月)～30日(木)：1食あたり2,000円 (11月17日17時までに申し込みをお願いします)	

(1) 登録料には、全てのセッションへの参加、ウエルカムレセプション、電子論文集および当日配布プログラムが含まれます。

(2) 見学会（¥8,000）とバンケット（¥10,000）は追加料金（共に税別）になります。

2. 登録方法

登録受付WEBページURL:

<http://www.igtc2023.org/>

にて受付します。

IDを取得してログインの後、必要情報を入力します。

お支払いは、上記WEBページを通じてのクレジットカード支払にてお願いします。

3. 参加登録についての問合せ先

IGTC2023 Kyoto Registration Desk (c/o 株式会社イーサイド 担当：宮本/西島)

Tel：03-6435-8789, Fax：03-6435-8790, E-mail：igtc2023-office@e-side.co.jp

第52回ガスタービンセミナー開催のお知らせ

第52回ガスタービンセミナーを下記の通り開催いたします。

産官学の最前線で活躍されている方々を講師にお迎えし、航空用および発電用のガスタービンに関する最新技術動向についてご講演いただきます。(詳細につきましては、11月号学会誌、ホームページ等で後日お知らせいたします)

1. 日 時： 2024年1月30日(火) 9:30～17:00 (予定)
31日(水) 9:30～17:00 (予定)
2. 開催方式： ハイブリッド開催 (東京大学 武田先端知ビル 武田ホールおよびZoom)
千代田線根津駅1番出口から徒歩5分
南北線東大前駅1番出口から徒歩10分
丸の内線、都営大江戸線本郷三丁目駅2番出口から徒歩25分
3. 参加要領： 11月号学会誌、当学会ホームページに掲載予定です。(https://www.gtsj.or.jp)



次号予告 日本ガスタービン学会誌2023年11月号 (Vol. 51 No. 6)

特集 再生可能エネルギーの開発現況と今後の展開

論説・解説

巻頭言 中富 大輔 (経済産業省資源エネルギー庁)

1. 浮体式洋上風力発電の技術動向と最新状況の紹介 吉本 治樹 (ジャパンマリンユナイテッド)
2. 次世代型太陽電池の研究開発動向：ペロブスカイト太陽電池を中心に 吉田 郵司, 村上 拓郎, 松井 卓矢, 棚橋 克人 (産業技術総合研究所)
3. 水力発電 田村 悠太 (日立三菱水力)
4. 地熱発電の現状 有木 和春 (日本地熱協会 (三菱マテリアル)), 持永 竜郎 (日本地熱協会 (三菱ガス化学)), 川口 堯 (日本地熱協会 (東芝エネルギーシステムズ))
5. 再エネ開発戦略 舘上 博 (丸紅)
6. 東北エリアの再エネ連系拡大に向けた取り組み 松本 光裕 (東北電力ネットワーク)

※タイトル、執筆者は変更する可能性があります。

2023年度日本ガスタービン学会賞候補募集のお知らせ（再掲）

応募締切日：2023年10月31日(火)

日本ガスタービン学会では、下記の趣旨により2年毎に学会賞（論文賞、技術賞および奨励賞）の贈呈を行っております。つきましては、今年度も下記要領により学会賞の募集を行うこととなりましたので、お知らせ致します。

募集要領

1. 日本ガスタービン学会賞の趣旨

本会はガスタービンおよびエネルギー関連技術に関する工学および技術の発展を奨励することを目的として、優れた論文、技術ならびに新進会員個人の業績に対して、それぞれ日本ガスタービン学会論文賞、技術賞、奨励賞を贈り、表彰を行う。

2. 対象となる業績

- (1)論文賞：日本ガスタービン学会誌および日本ガスタービン学会英文電子ジャーナルJGPP (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems) に2019年11月以降2023年10月迄に公表された論文で、独創性があり工学および技術に寄与したものの。
- (2)技術賞：ガスタービンおよびエネルギー関連の技術で画期的な新製品の開発、製品の品質または性能の向上、材料開発、制御計測および保守技術の向上等に寄与したものの。
- (3)奨励賞：日本ガスタービン学会誌および日本ガスタービン学会英文電子ジャーナルJGPP (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems) に2019年11月以降2023年10月迄に公表された独創的な論文（本人が中心的役割を果たしたものの）。なお、萌芽的研究も対象とする。
奨励賞の候補者は、1988年4月2日以降生まれの個人とする。ただし、論文賞、技術賞あるいは奨励賞をすでに受けた者および今年度の論文賞、技術賞内定者は奨励賞を受けることはできない。

3. 受賞件数

論文賞2件、技術賞2件、奨励賞2名程度とする。

4. 表彰の方法

審査の上、表彰状および賞牌を授与する。

5. 表彰の時期

表彰は、2024年4月開催予定の日本ガスタービン学会総会において行う。

6. 応募の方法

公募によるものとし、論文賞、技術賞は推薦または本人より申請、奨励賞は推薦による。なお、一度申請して受賞しなかったものでも、再度応募して差し支えない。

7. 提出書類

推薦または申請には、本会の所定用紙に必要事項を記載して、1件につき正1通、副2通（コピーで可）の計3通を提出する。

- ・日本ガスタービン学会賞（論文・奨励）申請書・推薦書
 - ・日本ガスタービン学会賞（技術）申請書・推薦書
- 所定用紙は本会ホームページ（<https://www.gtsj.or.jp/>）からダウンロード可能。

8. 提出締切日

2023年10月31日(火)17時必着

9. 提出先

〒160-0023
東京都新宿区西新宿7-5-13
第3工新ビル402
公益社団法人日本ガスタービン学会
表彰委員会 宛

ガスタービン学会が全てのガスタービンエンジニアに贈るテキスト

ガスタービン工学 第2版

教科書「ガスタービン工学 第2版」を発行しました。初版発行から10年、ガスタービンを取り巻く環境は大きく変化しています。第2版では、普遍的、基礎的な内容は初版を引継ぎつつ、最近の状況の変化を取り込んで、将来に向けたガスタービン技術の方向性も理解できるような構成としました。

本教科書は他にない幅広い工学分野を含む章立てに基づき、我が国ガスタービンの研究、製造や運用の最前線で活躍する多くの技術者が最新の専門知識を活かして執筆し、発電用および航空用ガスタービンとそこに使われている各種技術を総合的・体系的に学べるように作られたものです。

ガスタービンを少し専門的に学びたい学生さん、業務に必要な知識を得たい初級エンジニアの方々、さらには、専門とは少し離れた分野に知識を拡げたい中級エンジニアの方々にも最適な教科書です。

主要目次

[第一章] 概論

1.1はじめに／1.2ガスタービンの構成要素／1.3ガスタービンのサイクル論／1.4ガスタービン要素の特性とマッチング／1.5ガスタービン要素とシステム／1.6環境適合技術／1.7ガスタービンの実際と将来展望／1.8まとめ

[第二章] 流体工学

2.1はじめに／2.2ガスタービンと流体工学／2.3ガスタービン要素における流れ／2.4圧縮機及びタービンの空力設計／2.5ガスタービンにおける特異現象／2.6ガスタービンの流体力学解析／2.7最新の空力技術／2.8おわりに

[第三章] 伝熱工学

3.1はじめに／3.2ガスタービンにおける高温化と冷却の必要性／3.3タービン翼外面の熱伝達／3.4内部冷却／3.5フィルム冷却／3.6回転部分の伝熱/冷却／3.7伝熱数値解析／3.8 伝熱計測技術の応用／3.9おわりに

[第四章] 燃焼工学

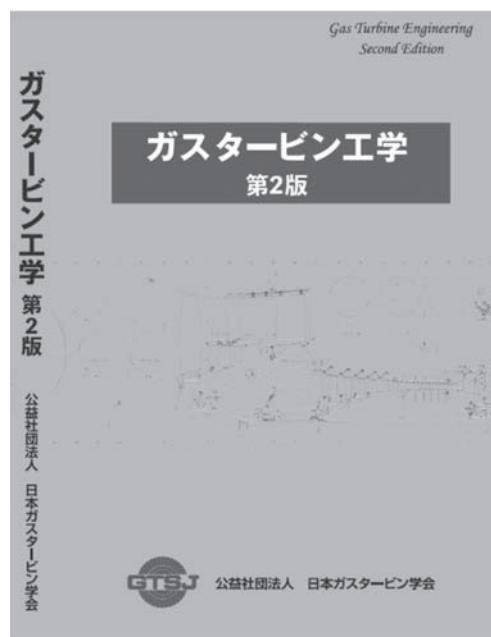
4.1はじめに／4.2燃焼器の概要と特徴／4.3燃焼の基礎／4.4燃焼器の基本設計／4.5燃料と燃料供給法／4.6燃焼器の性能評価／4.7燃焼解析／4.8低NO_x燃焼器／4.9低カロリーガス燃料用燃焼器／4.10その他の燃焼器例／4.11おわりに

[第五章] 材料工学と信頼性

5.1はじめに／5.2ガスタービンと材料工学／5.3ガスタービンの構造・材料と強度・振動／5.4ガスタービンの保全と寿命評価／5.5おわりに

[第六章] 制御工学とモニタリング

6.1はじめに／6.2発電用ガスタービンの制御システム／6.3航空用ガスタービンの制御システム／6.4ガスタービンのシミュレーション技術／6.5ガスタービンの動特性／6.6発電用ガスタービンのモニタリング・システム／6.7航空用ガスタービンのモニタリング／6.8おわりに



2023年第2版発行
(2013年初版, 2017年改訂版発行)
A4版ソフトカバー
本文318頁, カラー口絵付
定価 (本体5,600円+税)
会員特価 (本体3,600円+税)
送料別

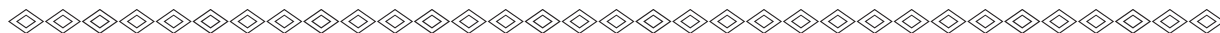
【購入申込】

日本ガスタービン学会webページ
<https://www.gtsj.or.jp/>
「当学会刊行物の購入申込」ページからお申込みください。
(書店では販売していません。)

ご不明な点は、学会事務局にお問い合わせください。

○ 本会協賛行事 ○

主催学協会	会合名	協賛	開催日	詳細問合せ先
ターボ機械協会	第89回ターボ機械協会 創立50周年 記念学術講演会	共催	2023/9/21	URL : https://www.turbo-so.jp/
日本機械学会 関西支部	第387回講習会「応用計測の基礎とそ の応用 (デモンストレーション付き)」	協賛	2023/10/17-18	URL : https://jsmekansai.org/
日本機械学会 関西支部	第24回秋季技術交流フォーラム	協賛	2023/10/28	URL : https://jsmekansai.org/
日本燃焼学会	第61回燃焼シンポジウム	協賛	2023/11/15-17	URL : http://www.combustionsociety.jp/sympo61/
日本機械学会 関西支部	第388講習会「実務者のための流体解 析技術の基礎と応用(各種シミュレ ーション技術の適用事例紹介つき)」	協賛	2023/11/21-22	URL : https://jsmekansai.org/



▷ 入 会 者 名 簿 ◁

〔正会員〕

大坪 尚充(愛三工業)

甲斐 玲央(九州大学)

市川 和樹(本田技術研究所)

福岡 儀剛(本田技術研究所)

坂田 篤哉(三菱重工業)

武田(井筒) 大輔(三菱重工業)

水上 聡(三菱重工業)

宮崎 洸治(三菱重工業)

〔学生会員〕

岡 雅登(関西大学大学院)

松本 一希(東京大学大学院)

浅沼 拓真(早稲田大学大学院)

安藤 翔(早稲田大学大学院)

2023年度役員名簿

会長 山本 誠 (東京理科大)

副会長 輪嶋 善彦 (本田)

法人管理担当執行理事 猪亦 麻子 (東芝ESS), 佐藤 哲也 (早大), 鈴木 雅人 (産総研), 田中 良造 (川崎重工), 濱名 寛幸 (三菱重工)

公益目的事業担当執行理事 及部 朋紀 (防衛装備庁), 黒瀬 良一 (京大), 鈴木 雅人 (産総研) (兼務), 寺本 進 (東大), 仲俣 千由紀 (IHI), 西田 啓之 (電中研), 檜山 貴志 (三菱重工), 山本 悟 (東北大), 山本 武 (JAXA)

理事 杉浦 修 (本田), 清野 幸典 (東北電力), 花井 直人 (JALエンジニアリング), 山田 和豊 (岩手大), 渡邊 啓悦 (荏原)

監事 鈴木 健 (IHI), 吉岡 洋明 (東北大)

2023年度委員名簿 (順不同)

2023年9月12日現在

○は委員長

倫理規定委員会 ○猪亦 麻子 (東芝ESS), 佐藤 哲也 (早大), 黒瀬 良一 (京大), 田中 良造 (川崎重工), 仲俣 千由紀 (IHI), 濱名 寛幸 (三菱重工)

自己点検委員会 ○猪亦 麻子 (東芝ESS), 佐藤 哲也 (早大), 濱名 寛幸 (三菱重工), 田中 良造 (川崎重工), 黒瀬 良一 (京大), 仲俣 千由紀 (IHI)

運営委員会 ○佐藤 哲也 (早大), 猪亦 麻子 (東芝ESS), 黒瀬 良一 (京大), 後藤 尚志 (IHI), 酒井 義明 (東芝ESS), 鈴木 雅人 (産総研), 田中 良造 (川崎重工), 塚原 章友 (三菱重工), 寺本 進 (東大), 仲俣 千由紀 (IHI), 濱名 寛幸 (三菱重工), 松岡 右典 (川崎重工), 松沼 孝幸 (産総研), 村田 章 (東京農工大), 山本 悟 (東北大)

企画委員会 ○田中 良造 (川崎重工), 猪亦 麻子 (東芝ESS), 太田 有 (早大), 佐藤 哲也 (早大), 鈴木 雅人 (産総研), 塚原 章友 (三菱重工), 仲俣 千由紀 (IHI), 村田 章 (東京農工大), 安田 聡 (三菱重工), 山本 悟 (東北大), 輪嶋 善彦 (本田), 渡辺 紀徳 (東大)

国際委員会 ○谷 直樹 (IHI), 岡井 敬一 (JAXA), 岡村 泰博 (IHI), 風見 秀樹 (本田), 渋谷 直紀 (東芝ESS), 鈴木 雅人 (産総研), 須原 亮 (川崎重工), 福田 雅文 (高効率発電システム研究所), 船崎 健一 (岩手大), 安良岡 淳 (三菱重工), 山本 誠 (東京理科大), 渡辺 紀徳 (東大)

学術講演会委員会 ○岡本 光司 (東大), 山本 武 (JAXA), 藤澤 信道 (早大), 渡邊 裕章 (九大), 三戸 良介 (三菱重工), 糟谷 宏樹 (東芝ESS), 山積 弘信 (本田), 富永 純一 (JEFエンジニアリング), 増田 裕貴 (川崎重工), 林 亮輔 (IHI), 范 勇 (産総研), 古澤 卓 (東北大), 水野 拓哉 (JAXA), 櫻井 毅司 (都立大)

集行事務委員会 ○檜山 貴志 (三菱重工), 尾崎 喜彦 (川崎重工), 桂田 健 (FPGエアサービス), 河上 誠 (日立), 澤 徹 (東芝ESS), 泰中 一樹 (電中研), 高山 祐輔 (三井E&S), 仲俣 千由紀 (IHI), 中村 織雄 (本田), 西村 英彦 (三菱重工), 花井 直人 (JALエンジニアリング), 樋口 隆幹 (防衛装備庁), 久枝 孝太郎 (IHI), 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 ○高橋 徹 (電中研), 井筒 大輔 (三菱重工), 岡村 直行 (JAXA), 小田 豊 (関西大), 垣内 大紀 (IHI), 加藤 博士 (川崎重工), 窪谷 悟 (東芝ESS), 多田 暁 (JALエンジニアリング), 寺本 進 (東大), 西田 啓之 (電中研), 林 明典 (三菱重工), 林 明宏 (富士電機), 姫野 武洋 (東大), 村田 章 (東京農工大), 山本 誠 (東京理科大), 渡辺 紀徳 (東大)

学会誌編集委員会 ○山本 悟 (東北大), 壹岐 典彦 (産総研), 岩井 裕 (京大), 加藤 千幸 (東大), 金子 雅直 (東京電機大), 阪井 直人 (川崎重工), 坂田 友 (防衛装備庁), 佐藤 哲也 (早大), 渋谷

直紀 (東芝ESS), 杉浦 修 (本田), 清野 将人 (東北電力), 清野 幸典 (東北電力), 高橋 俊彦 (電中研), 田中 望 (IHI), 中野 賢治 (IHI回転機械エンジニアリング), 新関 良樹 (徳島文理大), 西内 昌義 (荏原エリオート), 西江 俊介 (三井E&S), 野原 弘康 (ダイハツディーゼル), 原 浩之 (三菱重工), 三ヶ田 一裕 (JALエンジニアリング), 本橋 功会 (NIMS), 森澤 優一 (東芝ESS), 柳内 秀之 (本田), 山下 一憲 (荏原), 山田 和豊 (岩手大), 渡邊 啓悦 (荏原)

論文委員会 ○姫野 武洋 (東大), 青塚 瑞穂 (IHI), 壹岐 典彦 (産総研), 岩井 裕 (京大), 大北 洋治 (JAXA), 佐藤 彰洋 (IHI), 鈴木 雅人 (産総研), 田頭 剛 (JAXA), 都留 智子 (川崎重工), 寺本 進 (東大), 中谷 辰爾 (東大), 山田 和豊 (岩手大), 山本 誠 (東京理科大)

ガスタービン統計作成委員会 ○村田 章 (東京農工大), 飯塚 清和 (IHI), 恵比寿 幹 (三菱重工エンジン&ターボチャージャ), 澤 徹 (東芝ESS), 尤 舒怡 (ターボシステムズユナイテッド), 高橋 一雄 (三菱重工), 前田 泰宏 (ヤンマーパワーテクノロジー), 矢嶋 理之 (川崎重工), 山上 展由 (三菱重工)

産官学連携委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 壹岐 典彦 (産総研), 今村 満勇 (IHI), 岡崎 正和 (新潟工科大), 飴 雅英 (川崎重工), 川岸 京子 (NIMS), 岸部 忠晴 (MHI原子力研究開発), 北山 和弘 (東芝ESS), 幸田 栄一 (電中研), 西澤 敏雄 (JAXA), 野崎 理 (高知工科大), 原田 広史 (超合金設計研究所), 松崎 裕之 (元東北電力), 山根 秀公 (理研), 輪嶋 善彦 (本田)

広報委員会 ○寺本 進 (東大), 酒井 義明 (東芝ESS), 谷 直樹 (IHI), 藤澤 信道 (早大), 吉田 征二 (JAXA), 多田 暁 (JALエンジニアリング), 壹岐 典彦 (産総研)

表彰委員会 ○輪嶋 善彦 (本田), 黒瀬 良一 (京大), 山本 悟 (東北大), 猪亦 麻子 (東芝ESS), 仲俣 千由紀 (IHI)

男女共同参画推進委員会 ○森川 朋子 (三菱重工), 池田 亜矢子 (NIMS), 猪亦 麻子 (東芝ESS), 川澄 郁絵 (本田), 土屋 一三子 (川崎重工), 山上 舞 (IHI)

調査研究委員会 ○川岸 京子 (NIMS), 大北 洋治 (JAXA), 岡崎 正和 (新潟工科大), 岡田 満利 (電中研), 長田 俊郎 (NIMS), 寛 幸次 (東京都立大), 金久保 善郎 (IHI), 岸部 忠晴 (MHI原子力研究開発), 東部 泰昌 (川崎重工), 野上 龍馬 (三菱重工航空エンジン), 日野 武久 (東芝ESS), 輪嶋 善彦 (本田)

IGTC2023実行委員会 ○太田 有 (早大), 大石 勉 (アイ・エヌ・シーエンジニアリング), 小田 豊 (関西大), 岸根 崇 (三菱重工), 黒瀬 良一 (京大), 酒井 祐輔 (川崎重工), 鈴木 正也 (JAXA), 玉井 亮嗣 (川崎重工), 塚原 章友 (三菱重工), 寺本 進 (東大), 姫野 武洋 (東大), 平川 香林 (IHI), 武藤 昌也 (名城大)

IGTC2023総務委員会 ○姫野 武洋 (東大), 小田 豊 (関西大), 鈴木 正也 (JAXA), 藤澤 信道 (早大), 古澤 卓 (東北大)

IGTC2023論文委員会 ○黒瀬 良一 (京大), 武藤 昌也 (名城大), 井上 智博 (九大), 岩井 裕 (京大), 岡井 敬一 (JAXA), 齋藤 敏彦 (三菱重工), 酒井 英司 (電中研), 佐藤 彰洋 (IHI), 柴田 貴範 (岩手大), 鈴木 正也 (JAXA), 田頭 剛 (JAXA), 高橋 徹 (電中研), 谷 直樹 (IHI), 都留 智子 (川崎重工), 寺本 進 (東大), 中村 寛 (IHI), 堀川 敦史 (川崎重工), 山本 誠 (東理大), 渡邊 裕章 (九大)

IGTC2023行事委員会 ○岸根 崇 (三菱重工), 石川 智貴 (東芝ESS), 風見 秀樹 (本田), 川澄 郁絵 (本田), 佐藤 賢治 (三菱重工), 塚原 章友 (三菱重工), 堂浦 康司 (川崎重工), 中村 龍司 (三菱重工), 野勢 正和 (三菱重工), 平川 香林 (IHI)

IGTC2023展示委員会 ○酒井 祐輔 (川崎重工), 川澄 郁絵 (本田), 庄司 烈 (JAXA), 須原 亮 (川崎重工), 竹田 敬士郎 (川崎重工), 玉井 亮嗣 (川崎重工), 原田 純 (川崎重工), 藤田 英之 (GE), 藤木 貴子 (IHI), 前田 大輔 (三菱重工), 森澤 優一 (東芝ESS)

IGTC2023財務委員会 ○大石 勉 (アイ・エヌ・シーエンジニアリング), 平川 香林 (IHI)

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、家族的雰囲気ですら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（2023年3月現在）

会員数：1,790名（正会員 1,755名、学生会員 35名）

賛助会員：107社

会員の出身母体数：企業・研究機関・官公庁等 約300、学校 約100

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

※当該年度3月1日現在

後期・・・9月1日～翌2月末まで

入会方法

学会ホームページにて入会手続きができます（<https://www.gtsj.or.jp/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。



公益社団法人

日本ガスタービン学会

Gas Turbine Society of Japan

〒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.or.jp

編集 後記

この夏は全国的に連日危険な暑さに襲われ、東京都心では猛暑日日数の最多記録16日を大きく更新し、すでに21日を記録しました。全国各地で大雨の被害も多くみられ、線状降水帯や記録的短時間大雨情報という非常時を意味する言葉を日常的に耳にするようになりました。また、ハワイのマウイ島をはじめ、世界各地で大規模な山火事が報じられており、観測史上最高となった世界気温との関連が指摘されています。国連のグテーレス事務総長が「地球温暖化の時代は終わり地球沸騰の時代が訪れた」と述べて強い危機感を示しているように、地球温暖化による気候変動が今後、人々の健康や環境、経済に対して大きな影響を与えることが危惧されます。

喫緊の課題である気候変動対策として、世界は「2050年カーボンニュートラル」を目標に掲げ、大きく加速を始めました。航空分野でも同様の目標を掲げ、燃料による低炭素化が有望な手段として期待されています。一方で、コロナ禍を脱した世界では、航空旅客需要が回復し、2023年はコロナ禍以前の水準に戻る見通しとなっています。日本でも国内線需要はほぼ回復しており、中国からの団体旅行解禁にともない、インバウンド需要が以前の水準まで戻ることが予想されています。航空需要が回復し、今後さらに増加することが予想されるなか、現在のサステナブル航空燃料（SAF）の供給量は極めてわずかで、その普及が重要課題となっています。

本号特集は「航空分野の脱炭素化へ向けたサステナブル航空燃料（SAF）普及の取り組み」と題し、日本国内におけるSAFの原料、製造、認証から利用までの取り組みを紹介しました。脱化石燃料へ向けての新たな取り組みは課題が多いなか、急加速で走り出すことが求められています。当面供給されるSAFは、従来燃料と同様に扱える“Drop-in”燃料であり、機体とエンジンに特別の対応は必要ありませんが、気候変動対策としても、SAF利用にともなう運用コスト上昇の抑制策としても、

燃料消費量低減技術はこれまで以上に重要となっています。読者の皆さまには、研究者、技術者、あるいは市民の立場から、自分ごととして関心をもっていただき、新しい未来へ向けた行動につなげていただけたら幸いです。

最後に、本号特集を編集するにあたり、快く執筆を引き受けてくださった皆さま、企画から校正までご助言ご協力をいただきました皆さまに、心より感謝を申し上げます。（柳内 秀之）

● 9月号アソシエイトエディタ

柳内 秀之（本田技術研究所）

● 9月号担当委員

金子 雅直（東京電機大）

阪井 直人（川崎重工業）

田中 望（IHI）

原 浩之（三菱重工業）

（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。

- ・「FT合成によるSAF製造の取り組み」…（P.388～393）
- ・「航空分野の脱炭素化へ向けた廃食用油を原料とするバイオジェット燃料「SAF」普及の取り組み」
……………（P.394～399）
- ・「エアラインのCO₂排出量削減へ向けた取り組み」
……………（P.400～405）
- ・「SAF（Sustainable Aviation Fuel）の概要」
……………（P.406～410）
- ・「SAFの規格化プロセスとHondaの取り組みについて」
……………（P.411～416）

だより

♣事務局✉♣

気象庁より今夏（6～8月）の全国の平均気温が1898年の統計開始以来最高だったとの発表がありました。東京では毎日暑い日が続く、夕立もあまりなく、通勤するだけでへとへとになります。事務局もできるだけ在宅勤務を取り混ぜて出勤しております。数年前にはあまり見かけず、ちょっと風変わりにも見えた電動ファン内蔵上着は、工事現場などの炎天下での作業をされている方はもちろん、街を歩いている人や電車の中でも、着用されている方が多くなったように感じます。他にもいろいろな暑さ対策グッズが出ていますが、みなさまはどのような対策をされているでしょうか。

さて、日本ガスタービン学会では、10月初めに定期講演会、11月には見学会、そしてIGTC2023Kyoto、1月にはガスタービンセミナーなどイベントが続きます。それに合わせてハイブリッドでの委員会開催も多くなり、委員会、事務局とも忙しい毎日を送っております。イベントの案内は学会ホームページにも詳細が掲載されておりますので、ホームページでの案内もお見逃しのないよう、こちらも忘れずにチェックしてみてください。

（中村 優美）

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2018年7月13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。
- 1.2. 技術論文の投稿については、「技術論文投稿要領」による。
- 1.3. 英文技術論文の投稿については、Instruction to Authors, JGPP (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems) による。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、論説・解説、講義、技術論文、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、講義	6ページ以内
技術論文	「技術論文投稿要領」による
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. 原稿の執筆者は、本会誌の「学会誌原稿執筆要領」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参考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、学会事務局から原則として「学会誌の執筆謝礼に関する内規」第2条に定めた謝礼を贈呈する。
8. 非会員の第一著者には掲載号学会誌1部を贈呈する。
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「日本ガスタービン学会著作権規程」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：高橋 邦和
 〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17 明産西新橋ビル
 TEL：03-5157-1277
 E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領（抜粋）

2021年7月11日改定

1. 本学会誌に投稿する和文技術論文（以下和文技術論文）およびJGPPに投稿する英文技術論文（以下英文技術論文）は次の条件を満たすものであること。
 - 1) 和文技術論文の責任著者は、論文投稿時および論文掲載時に、本学会の正会員または学生会員であること。英文技術論文についてはこの限りではない。
 - 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) 和文技術論文は「学会誌原稿執筆要領」に従って執筆された日本語原稿、英文技術論文は「Instruction to Authors」に従って執筆された英語原稿であること。
 - 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. 技術論文のページ数は、和文技術論文は原則として刷り上がり8ページ以内とする。ただし、「学会誌の掲載料に関する内規」第2条に定めた金額の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。英文技術論文は「Instruction to Authors」に定める。
3. 和文技術論文のカラー図は電子版と本学会ホームページ上の「技術論文掲載欄」に掲載し、冊子体にはモノクロ変換した図を掲載する。著者が「学会誌の掲載料に関する内規」第3条に定めた金額を負担する場合には、冊子体もカラー印刷とすることができる。
4. 投稿者は、「学会誌原稿執筆要領」「Instruction to Authors」に従って作成された原稿電子データを、「技術論文原稿表紙」とともに技術論文投稿システム(Editorial Manager)から提出する。
5. 投稿された論文は、論文委員会が「論文査読に関する内規」に従って査読を行い、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. 和文技術論文の著作権に関しては、別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程」、および「学会誌編集および発行要領」第5章第16条を適用する。英文技術論文の著作権に関しては、別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程 (Copyright Regulations of the Gas Turbine Society of Japan)」, および「英文論文集発行要領」第6章を適用する。

日本ガスタービン学会誌

Vol. 51 No. 5 2023.9

発行日 2023年9月20日

発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会

編集者 山本 悟

発行者 山本 誠

〒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)

〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17

明産西新橋ビル

Tel. 03-5157-1277

©2023, 公益社団法人日本ガスタービン学会

複写複製をご希望の方へ

公益社団法人日本ガスタービン学会では、複写複製に係る著作権を一般社団法人学術著作権協会に委託しています。当該利用をご希望の方は、学術著作権協会 (<https://www.jaacc.org/>) が提供している複製利用許諾システムを通じて申請ください。