

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集

日本ガスタービン学会 50周年記念特集号発刊にあたって The 50th Anniversary of the Gas Turbine Society of Japan



福泉 靖史*¹
FUKUIZUMI Yasushi

あけまして、おめでとうございます。

日本ガスタービン学会は、昨年創立50年を迎えることが出来ました。本学会の創立にご尽力いただいたみなさま、学会の活動にご参加いただき、活動の発展に御貢献いただいたみなさま、そして今後50年先を見据えた新たな活動を始めていただいているみなさま、全ての会員各位に感謝を申し上げます。

日本ガスタービン学会の50周年記念特集号の発刊に当たり、一言ご挨拶申し上げます。

日本ガスタービン学会は、1972年に日本ガスタービン会議が設立され、これを母体に1976年に文部省認可の社団法人として発足いたしました。その後、法改正に従って2011年に公益社団法人として認定され、現在に至っています。

昨年実施された50周年記念式典では、多数の学会員にお集まりいただき、過去の50年を振り返ると共に、これからの50年に思いを馳せました。記念式典でも申し上げた通り、発足以来の50年を、3つの大きな時期として捉えることが出来ると考えています。

① 黎明期

戦前からの技術が、平和利用目的で製品化された時期。

② 急速発展期

日本を含む先進国の経済発展と共に、エネルギー消費、航空輸送共に拡大し、それに応じた製品が実用化された時期。

③ 安定発展期

日本のガスタービン技術が国際的に認められ、学会の国際的活動が発展した時期。

これからの50年は、また大きな節目を迎えると考えられます。それが、エナジートランジションと言う言葉で表現される、脱炭素をベースにしたエネルギーサプライチェーンの再構築です。

今、我々が直面している大きな節目は、後世歴史を振り返ると、産業革命にも匹敵する大きな変化だと思いま

す。これまでエネルギー源の多くを化石燃料に依存し、効率的に経済発展を図って来た人類が直面している課題です。

エネルギーは、全ての人類の活動の基盤です。どこに行くにも、何をするにもエネルギーは必要です。どのようなエネルギーサプライチェーンが、今後構築されていくのでしょうか。

しかし、どのようなエネルギー供給になるにしても、最後にはエネルギーを必要な動力や電力に変換する機械が必要です。そして、ガスタービンは人類が発明した機械の中で最も比出力が大きく、軽量コンパクトで経済性に優れた機械です。効率も飛躍的に向上してきました。私は、そのエネルギー変換機器としての優位性は変わらないと思います。

学会誌の掲載内容は、ガスタービンの固有の技術だけでなく、時代の変化に応じて、最新のエネルギー事情などの内容も取り上げられるようになりました。学会員の中で、そのような変化を捉えた議論が高まっているのを感じます。このような変革の時であればこそ、学会にも会員の多様な視点が必要です。日本ガスタービン学会はこれまでも、官・学・産が近く、幅広く交流・議論ができる場でしたが、この輪に近年活発化している国際的な交流を加えて、ベテランと若手が協力して建設的な議論とその出口としての提言の発信や具体的なプロジェクトの発動を、是非期待したいところです。多様化と言えば、女性にも積極的に学会活動に参加いただいておりますが、この流れをどんどん加速いただければと思います。

この記念特集号では、1月3月と2回に分けて、これまでの50年を振り返り、今後の50年を予測する記事を掲載します。本号の発刊が、会員各位の新たな活動の参考になれば幸いです。

最後に、今年は4年に一度、当学会主催のInternational Gas Turbine Congressが京都で開催される年にあたります。是非とも、会員各位におかれては積極的にご参加いただき、対面での会話を通じて、新たな研究のモチベーション向上や交流を図っていただくようお願いいたします。

原稿受付 2022年12月8日

* 1 三菱重工業(株)上席シニアフェロー、エナジードメイン副
メイン長
〒100-8332 千代田区丸の内三丁目2番3号

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集

The Role of the GTSJ in the International Gas Turbine Community

Prof. Joerg R. Seume*¹

Member Verein Deutscher Ingenieure (VDI)

Member Turbomachinery Committee of the ASME

Member European Turbomachinery Society (Euroturbo)

1. A personal Introduction

When I accepted a university chair in 2000 after 10 years of working on heavy-duty gas turbines in industry, one of my predecessors, Prof. Rautenberg, told me of a small, high quality, and well-organized conference in Japan which he had attended many times and valued. It has been my great privilege to attend and contribute to the activities of GTSJ during the almost 20 years since my first attendance in 2003.

2. Community Building

2.1 Communication between Industry and Academia

The International Gas Turbine Congress (IGTC) hosted by GTSJ has provided a great opportunity for turbomachinery engineers from both, industry and academia to network in Japan. I can personally confirm that this opportunity has provided the foundation for building collaborative relationships which lasted many years and were scientifically and economically fruitful. My laboratory was privileged to contribute some papers ^{(1)...}
⁽¹⁴⁾.

The main value of IGTC is that it provides a stage for the partners to show their competencies and interests in turbomachinery. While gas turbines are prevalent in the name and in the tradition, many topics relevant to other types of turbomachinery such as steam turbines and turbochargers have broadened the scope.

2.2 Promotion of Young Engineers

When attending IGTC, I have been impressed with the dedication with which young Japanese engineers have taken the opportunity to present their work to an international audience. Of course, presenting in English initially is a great obstacle for many young Japanese and other non-native speakers but with continued attendance, the presentations became more fluent and answering questions after the presentation became easier.

Beyond the scientific exchange, however, non-Japanese young researchers were given opportunities to participate in Japanese academic customs. Unfortunately, I cannot say more because as a senior person I was only allowed to accompany the young researchers to the venue of their meeting but I was

not allowed to attend. I left venue and I will never know the academic customs to which the Japanese hosts introduced my doctoral students. They were very discrete and never told me - and was sufficiently discrete not to ask.

2.3 Cultural Ambassadors for Japan

Apart from introducing young engineers to Japanese academic customs, GTSJ has performed most impressively as a culinary and cultural ambassador for Japan.

I had never understood the range of flavors of Japanese sake prior to attending the last IGTC and by Japanese standards, I will probably never fully do justice to the subtle nuances of sake, I think that due to your kind introduction, I have started to appreciate them. The same holds for Japanese food, the range and quality of which many of us Western attendees have come to increasingly value and understand.

As for the role of cultural ambassador, GTSJ has provided the attendees with many glimpses of Japanese culture. I am glad that some of my Japanese hosts have provided me with additional facets over the years, but never having immersed myself for prolonged time, I still can only guess at many aspects of the richness of Japanese culture.

2.4 Journal of the GTSJ

The Journal of the Gas Turbine Society of Japan (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, JGPP) has evolved into a respected international journal of our community. It has achieved this status primarily through a rigorous and meaningful peer-review process. The quality of the reviewers' feed-back shows the thoroughness and competence of the reviewers. For the international turbomachinery community, the opportunity to submit manuscripts to JGTSJ is a valued additional opportunity for high-quality publications which my laboratory has had the privilege to enjoy ^{(15)...}
⁽¹⁷⁾.

3. Agenda setting for R&D

The rigor and consistency with which the Japanese Government and particularly MITI pursues industrial policy is the envy of many other nations. In the Gas Turbine community and beyond in the field of energy conversion, the IGTC has provided great opportunities for Western engineers from industry and academia to observe and continuously follow the setting of the Japanese agenda on energy conversion and to some extent on

原稿受付 2022年11月22日

*1 Leibniz Universität Hannover

Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik

aerospace.

By providing insights into the Japanese effort in these fields, GTSJ has stimulated international competition. This competition ultimately benefits everyone in the industry and our customers.

4. Window on Japanese Industry

Some of the most valuable opportunities GTSJ provided beyond the core IGTC, were the plant tours to power plants and manufacturing plants in Japan. This window on Japanese industry helped me to better understand the boundary conditions of power conversion in Japan and to more fully appreciate the extent of the international integration of the Japanese gas turbine industry. This is most valuable, even if the market share of gas and steam turbines in the overall energy conversion in the world may shrink.

5. Conclusions and Outlook

The insights GTSJ and its biennial International Gas Turbine Conference have provided for us in Europe and elsewhere in the world into the current research in Japan has been most valuable since Japan over the last 50 Years has become a major industrial and academic player in gas turbines. I hope that this contribution to international scientific exchange and collaboration will continue into the future. I wish GTSJ success in this important contribution to science, technology, and the economy far beyond the 50th anniversary.

References

IGTC

- (1) Mimic, D. and Herbst, F., "Influence of Transonic Flow on the Tip-Leakage Vortex in a Turbine Cascade", Proceedings of the International Gas Turbine Congress (IGTC) 2019, Paper IGTC-2019-082.
- (2) Mimic, D., Jätz, C., Oettinger, M., Herbst, F., Seehausen, H., Kurth, S., Frieling, D., Zieße, M. and Seume, J.R., "Improving Aerothermal and Aeromechanical Turbomachinery Design by Combining High-Fidelity Methods with Multi-Stage Approaches", Proceedings of the International Gas Turbine Congress (IGTC) 2019, Paper IGTC-2019-PL3.
- (3) Oettinger, M., Henke, M., Herbst, F. and Seume, J.R., "Axial-Gap Size Effect on the Unsteady Flow Field at Midspan in a 1.5-Stage Low-Pressure Turbine", Proceedings of the International Gas Turbine Congress (IGTC) 2019, Paper IGTC-2019-084.
- (4) Schwarzbach, F., Mimic, D. and Herbst, F., "Profile Aerodynamics of an Oscillating Low-Pressure-Turbine Blade", Proceedings of the International Gas Turbine Congress (IGTC) 2019, Paper IGTC-2019-048.
- (5) Seehausen, H., Gilge, P., Kellersmann, A., Friedrichs, J. and Herbst, F., "Numerical Study of Stage Roughness Variations in

a High Pressure Compressor", Proceedings of the International Gas Turbine Congress (IGTC) 2019, Paper IGTC-2019-062.

- (6) Hohenstein, S., Gilge, P. and Seume, J.R., "Experimental Investigation of the Aerodynamic Effect of Local Surface Roughness on a Turbine Blade", Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2015, IGTC2015-0078.
- (7) Keller, C., Willeke, T., Burrafato, S. and Seume, J.R., "Design Process of a 1.5-Stage Axial Compressor for Experimental Flutter Investigations", Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2015, IGTC2015-0141.
- (8) Kleine Sextro, T., Steglich, T. and Seume, J.R., "Variable Inlet Guide Vane Devices for a Turbocharger Compressor", Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2015, IGTC2015-0161.
- (9) Müller, C., Herbst, F., Fiala, A., Zscherp, C., Kügeler, E. and Seume, J.R., "Parameter Study for an Improved Prediction of Wake-Induced Transition in Low-Pressure Turbines", Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2015, IGTC2015-0043.
- (10) Adamczuk, R.R. and Seume, J.R., "Time Resolved Full-Annulus Computations of a Turbine with Inhomogeneous Inlet Conditions", Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2011, IGTC2011-0175.
- (11) Herbst, F., Bluemel, S., Fakiolas, E. and Seume, J.R., "Numerical Investigation of the Interaction between Probe, Flow and Blading in an Axial-Turbine", Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2011, IGTC2011-0194.
- (12) Lietmeyer, C., Chahine, C. and Seume, J.R., "Numerical Calculation of the Riblet-Effect on Compressor Blades and Validation with Experimental Results", Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2011, IGTC2011-0106.
- (13) Natkaniec, C.K., Kammeyer, J. and Seume, J.R., "Influence of Variable Nozzle Geometry on Radial Turbine Performance", Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2011, IGTC2011-0112.
- (14) Imetovski, E. and Seume, J.R., "Multi-Stage Effects of Bow and Sweep in a High-speed Axial Compressor", Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2007, IGTC2007-TS-049.

JGPP

- (15) Schwarzbach, F., Mimic, D. and Herbst, F., "Profile Aerodynamics of an Oscillating Low-Pressure-Turbine Blade", International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems (JGPP), Vol. 11 (2020), Number 4.
- (16) Mimic, D., Jätz, C., Sauer, P. and Herbst, F., "Total Pressure Loss Reduction in Annular Diffusers", International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems (JGPP), Vol. 10 (2019), Number 2.
- (17) Drechsel, B., Seume, J.R. and Herbst, F., "On the Numerical Prediction of the Influence of Tip Flow on Diffuser Stability", International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems (JGPP), Vol. 8 (2016), Number 3.

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集

日本ガスタービン学会これからの50年への期待

Expectations for the Next 50 Years of the Gas Turbine Society of Japan



仲俣 千由紀*1
NAKAMATA Chiyuki

キーワード：GTSJ, Weak Ties

Key Words：GTSJ, Weak Ties

1. まえがき

公益社団法人 日本ガスタービン学会 (Gas Turbine Society of Japan, GTSJ) が創立50周年を迎え、50周年記念特別企画へ寄稿させていただく機会を頂いたことは身に余る光栄であり、心よりお礼申し上げます。思えば私が本学会の活動に初めて参加したのは1995年の第10回ガスタービン秋季講演会 (新潟) で、入社3年目のことであつた。GTSJの50年にわたる歴史の約半分を経過したところで私のGTSJとの関りが始まり、その後の会社人生において、様々な形でお世話になってきた。ガスタービンの何たるかを知らない我が家の子供たちをもつても「お母さんの墓石にはガスタービンと刻んであげる」と言われるほど、家族にとって私といえばガスタービンという印象である。それほどGTSJにお世話になってきた。ガスタービン学会50周年記念特集号に寄せて、一個人の視点、私見ではあるが、私なりのGTSJの存在認識をもとに、将来への期待を述べたい。

2. GTSJとの出会い

私が社会人になって初めて参加した学会がGTSJの定期講演会であつた。学生時代、理学部で教育を受けた私は学会といえば参加者は大多数が大学の研究者であるとの認識であつたが、GTSJの定期講演会には多くの企業研究者が参加していることに驚いた。会社に入って初めて参加した学会であつたので、機械工学系の学会とはこのようなものなのかとも思ったが、その後、これはGTSJの誇るべき一つの特徴であることを知つた。その後、しばらくは学会行事への参加者という形でGTSJと関り、2011年に定期講演会委員となつて以降、運営側として本格的に学会活動に参加させていただくことになった。GTSJの委員会には、2011年度～2012年度：定期講演会委員、2013年度～2015年度：国際委員、2016年度

～2017年度：男女共同参画推進委員、2018年度～2019年度：IGTC2019実行委員、2016年度～現在：将来ビジョン検討委員と様々な形で参加させていただいた。

2.1 ASME Turbo Expo GTSJブース出展立上げへの参加

2013年度に国際委員となり、GTSJを起点とした国際交流と情報発信を活発化させる戦略立案と施策の実行に携わつた。私が委員会に参加した当時、2014年のASME Turbo ExpoへGTSJブースを初出展するという計画が進行していた。GTSJブース出展が理事会で承認され出展準備が始まり、私もGTSJ展示Working Groupへ参加させていただくことになった。何か記念品を準備しようということになり、展示ブースでの配布物を入れるためのクリアファイルがあると嬉しいと思つたので、クリアファイルを提案したところその案が採用された。富士山と桜が青空に映える美しいクリアファイル (Fig. 1) は好評で、クリアファイル目当てにブースに立ち寄りられる方もいらつしやつたと記憶している。初めての出展に際し展示物・配布物を何にするか、何部準備するか、誰がブースに立つかなど検討事項が多かつたが、無事出展することができた。Fig. 2に初出展時のGTSJブースの様子を示す。展示ブースでは次回開催されるIGTCやACGTについて宣伝することも主たる目的であつたので、翌年2015年に開催を控えていたIGTC2015を積極的に宣伝し論文投稿を呼び掛けた。Fig. 3に示すようにIGTC2015では海外からの参加者が大幅に増加したが、ASME Turbo Expo展示ブースの宣伝効果があつたのであれば嬉しい。GTSJブースの出展を開始して以来、GTSJブースはTurbo Expoでの日本人参加者の立ち寄り所ともなつており、そのおかげで出席経験の浅い人も、経験の長い人の仲介で海外技術者と交流することができ、国際交流を深化させる一助となつた。

2.2 男女共同参画推進委員会立上げへの参加

ASME Turbo Expoでは、2005年からWomen's networkingという会が催されている。この業界で少数

原稿受付 2022年11月27日

*1 (株)IHI 航空・宇宙・防衛事業領域
〒190-1297 西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229



Fig. 1 ASME Turbo Expo 2014 (デュッセルドルフ) GTSJ展示ブースで配布した記念品

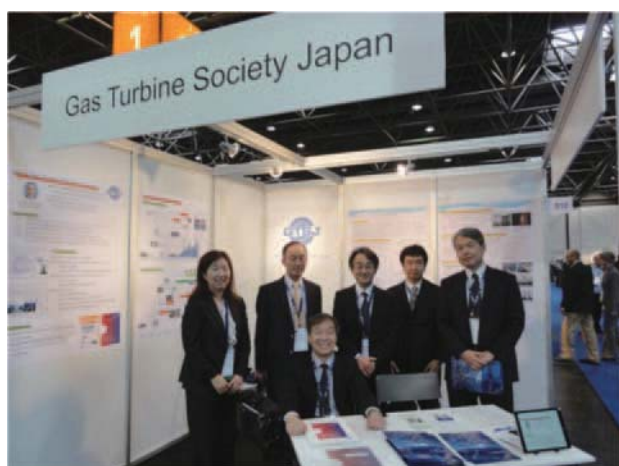


Fig. 2 ASME Turbo Expoへの展示ブース初出展の様子 (2014年デュッセルドルフ)

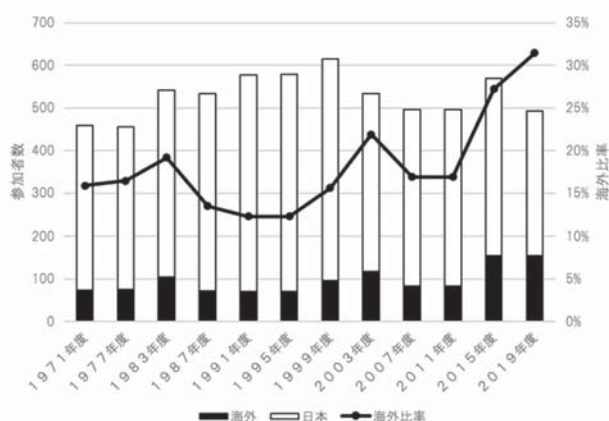


Fig. 3 IGTCにおける参加者数と海外比率

派である女性同士が人脈を形成し、情報を交換し、互いに刺激を与え合ってよりよく成長していけるようにとの趣旨の下、私が尊敬してやまないペンシルバニア州立大学のKaren Thole教授のご尽力で始まったものである。記念すべき第1回は2005年(リノ)で開催された。このときは参加者十数名で昼食会という形であったが、2年後の2007年(モントリオール)では夕食会になり、その後、参加人数は増え続け2014年には約140名を数えるまでになっている(ただし、2014年の全参加人数は3000名を超えており、Women’s networkingに参加した女性は5%に満たない)。私は2005年の第1回に参加し、2019年まではほぼ毎年参加していた。この会で母国を離れて異国で研究に邁進する若き才能と出会うことを私は楽しみにしていたし(研究者はだいたい母国を離れ国際的にダイナミックに流動していることが常であった)、彼女らとの出会いは私のエネルギー源であった。また来年、成長した自分で彼女らと会いたい、そう思うことで頑張ろうと思えるのであった。ともすると安きに流れる弱気心のつかえ棒のような存在がWomen’s networkingであった。

2014年にGTSJがASME Turbo Expoに展示ブースを出展するようになってから、GTSJ事務局の中村優美氏もWomen’s networkingに参加されるようになった。中村氏はGTSJにもこのような会を作りたいとの強い希望をお持ちで、IGTC2015でWomen’s networkingを開催、翌年2015年にはGTSJ行事委員会の下部組織として女性参画推進委員会が発足することとなった。私もその立上げメンバーとして参加させていただくことになった。手探りでイベントを企画してきたが、GTSJの女性参画推進委員会のイベントにはリピーターも多く、私がASME Turbo Expoで感じたような同志の絆が国内にも出てきているように感じる。

お気づきだろうか、発足当初は「女性参画推進委員会」であったが、委員会メンバーの間でこのネーミングはおかしいとの議論になり、確か、翌年には「男女共同参画推進委員会」に名前を変えた。今では「男女共同参画」でも古く、「ダイバーシティ促進」とすべきかもしれない。

2.3 IGTC2019実行委員会への参加

IGTC2019には行事委員長として国際学会の企画運営に参加させていただいた。IGTC2019はIGTC2015と同じ場所での開催であったので、前回に倣うところも多く準備は比較的順調であった。しかし見学会だけは同じところを訪問するわけにもいかないの、新たに見学先を探さねばならなかった。委員会メンバーで議論を重ねて見学場所を決め、現地確認のための委員会を見学先のNIMS様で実施することとなった。ところが委員会予定日の朝早くに台風が関東上陸との予報となり、開催が危ぶまれた。午後には通過すると見込まれていたため決行することにしたが、当日連絡を取り合えるよう、前日

に慌ててLINEグループを作成した。当日の交通は混乱していたが、前日に作成したLINEグループが功を奏し、どうにか連絡を取り合い、無事に委員会を開催することができた。このLINEグループはIGTC2019期間中、特に見学会時の進捗確認に威力を発揮した。IGTC2019から三年がたつが、最近このLINEグループにふとメッセージが届いた。投稿された方が行事委員会のつながりを大切に思ってくださった事に心が温かくなった。また、このメッセージに対し、当時の委員の皆さんが続々とメッセージを返しており、誰しもが行事委員会を懐かしく思い出されたものと感じられ、ともに行事を企画運営した仲間としての絆を感じた。

3. GTSJの果たしてきた役割

1972年9月発行の「日本ガスタービン会議会報」第1巻第1号の巻頭に寄せられた日本ガスタービン会議（GTSJの前身組織）初代会長／渡部一郎氏の「日本ガスタービン会議の発足に当たって」の中に「純粋な学会ではなく、ガスタービンならびにこれの関連工業（使用者も含めた）の技術者と大学、官公庁研究所の研究者のあつまりでありまして、その事業を大別しますと(1)ガスタービンに関する情報の国際的視野での交換、配布と(2)ガスタービンに関する懇談の場の提供という二つの柱の上に成立しているものであります。」⁽¹⁾とある。この発足時に掲げられた2本の柱に沿ってGTSJの活動は行われており、「ガスタービンに関する情報の国際的視野での交換、配布」が国際会議（IGTC、ACCT）の開催、ASME Turbo Expoへの出展、International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems (JGPP)の発行といった活動であり、「ガスタービンに関する懇談の場の提供」が様々な集行活動である。これらの明示的な役割は誰しもが認識するところであるが、その他にGTSJがもたらしているものについて私なりの考えを述べる。

3.1 Weak Tiesを生み出す場所

海外の方々からGTSJについて語られるとき、「Well Organized」との形容詞を付けていただくことが多い。皆さんが口を揃えてそのようにおっしゃっていただいているので平均以上に組織がうまく機能している学会であると考えてよいのだと思う。この50年間、産官学の学会員が学会活動を支えているが、委員が交代してもしっかりと委員会の活動を継続できるよう組織化されている。委員が楽しんで活動に参加していることも円滑な運営を支えている要因であると思う。GTSJの規模が適切であるとか、ガスタービンという単一の機器の研究開発を目的としているとか、様々なGTSJの委員会活動に対して委員のコミットメントが高い理由が挙げられるが、一番の貢献要因は委員会の後の懇親会であろう。懇親会は委員のつながりを深め委員会の空気を良いものにすることに貢献している。これがGTSJの文化となりGTSJの組織

を強固にしている。委員会活動はガスタービン技術の普及、情報発信といったガスタービン技術に関わる者の共通の目的をもって行われるため、委員が所属する組織の利害が対立することは少ない。様々な組織から選出された委員が学会活動を通じて具体的な目標に向かってともに活動することで、組織の壁を越えたWeak Tiesを生み出している。これはGTSJの果たしてきた大きな役割ではないかと思う。学会活動で見せる顔は、おそらく皆さんがそれぞれの組織で仕事をしているときに見せる顔とは違う顔であると思う。学会で構築されたWeak Tiesが時には開発や研究といった実際の業務において潤滑剤になっていることは間違いない。

3.2 結末点

GTSJは「純粋な学会ではなく、ガスタービンならびにこれの関連工業（使用者も含めた）の技術者と大学、官公庁研究所の研究者のあつまり」という発足当時の性格を今に残している。3.1にて言及したように委員会活動を通じて国内のガスタービン研究開発に携わる産官学の人々の間にWeak Tiesを形成し、国内のガスタービン研究開発関係者の結末点となっている。一方、GTSJは海外に対して日本の技術を発信しその発信範囲を拡大してきた。海外学会にも日本国内におけるガスタービン関係者の結末点としてGTSJが機能していることは良く知られており、このことから海外学会がガスタービン関係で日本に対して情報発信したいと思うとき、GTSJにコンタクトすれば大変効率的に日本国内に情報発信できると認識されている。GTSJが日本においては産官学の関係者が集う場であろうとし、その存在を海外にアピールする努力を重ねた結果、GTSJは海外と日本の研究開発者のつながりを深め、国際的に日本のガスタービン技術を認知させることに貢献してきた。ガスタービンに関する国内外の結末点、それがGTSJの果たしてきた役割であると私は考える。

4. GTSJこれからの50年への期待

GTSJはこの50年、日本におけるガスタービンの歴史とともにあり、ガスタービンに関わる技術者・研究者の結末点として情報交換の場を提供し、国際社会へ情報を発信することでガスタービンの発展に寄与してきた。この50年ガスタービンは空力技術、解析技術、材料技術、冷却技術などの関連技術の進歩により性能向上してきたが、どちらかという連続的な技術向上の道のりであった。しかし今、大きなエネルギートランジションのうねりの中、ガスタービンにもこれまでの延長線にある連続的な変化だけではなく、飛躍的革新が求められている。そのためには多角的な視点と知識のつながりが欠かせない。また、カーボンニュートラルという目標の達成に向けて、様々な可能性が考えられるが、それぞれの得失評価、課題解決の難易度評価などを素早く行い、解決の道筋を見極めて具体的な施策に結び付けていく必要がある。その

ためには研究者が一致団結して総合力を発揮する必要がある。その中でGTSJには以下を期待したい。

4.1 社会課題解決に向けて、正しい理解のための見解提示、コンセンサス形成支援

カーボンニュートラルなどの社会課題の解決に向けて、様々な解決策が議論されるが、時としてイメージ先行で世論が形成されていくように感じることもある。公正な視点で、学術的に定量的に評価して正しい方向に世論を導く活動を今後ますます活発に行うことをこれからの学会に期待したい。GTSJは産官学の会員がバランスよく参加しており、この機能を発揮できるものと期待する。

4.2 SeedsとNeedsが会おう場所

GTSJは産業界の会員が多く、NeedsとSeedsが会おう場所であった。飛躍的变化が求められるこれからの時代は、解決に向けてどんなSeedsが必要なのか、いまだ理解できていないNeedsが数多く出てくると考えられる。「こんなことを実現したい」という要望を技術課題にブレークダウンしSeeds探索ができる状態にしなければならない。まず、このブレークダウンにおいて、様々な知見を持った方々と議論が必要であろう。そういうことが学会で実施できるとよいと思う。調査研究のような場面でもよいかもしれない。さらに、技術課題にブレークダウンできたとして、現状のGTSJのプレーヤーには存在しない技術分野の人々が必要になるということがあるであろう。この異分野をつなぐということに学会の特に学

術界の方々のお力を発揮いただきたいと思います。あるいは、学会自体が学会間のつながりを作っていくことで異分野連携を強化していくことも可能かもしれない。いずれにしても、現状のプレーヤーの外に連携を求めていく必要がある、学会は今後も連携の結束点として機能して欲しいと期待している。

5. おわりに

GTSJ50周年特集号への寄稿の機会をいただき、はなはだ個人的な振り返りではあるが自分自身のGTSJとの関りを振り返り、そこから私自身が感じたGTSJの日本国内ならびに海外において果たしてきた役割ともたらしめたものについて振り返らせていただいた。あくまでも個人的な印象である。ご覧いただいた皆様から様々にご意見をいただき、この記事ネタに話を花を咲かせることができれば嬉しい。

日本におけるガスタービン界の要であり産官学をつなぐ重要な機能を持つ本学会が、今後も知の融合を促進し、革新的な技術の創造に寄与する場を創ってゆくことを期待する。

参考文献

- (1) 渡部一郎, 「日本ガスタービン会議の発足にあたって」, 日本ガスタービン会議会報, 第1巻第1号 (1972), pp.1-3.

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集

ガスタービン学会半世紀の歩みと将来に向けて

The Gas Turbine Society of Japan, Half a Century of Progress and Looking to the Future



筒井 康賢*¹ 吉識 晴夫*²
TSUTSUI Yasukata YOSHIKI Haruo

キーワード：ガスタービン, ガスタービン学会, GTCJ, GTSJ

Key Words : Gas Turbine, Gas Turbine Society, GTCJ, GTSJ

1. はじめに

ガスタービン学会の50年を最初から知るぎりぎりの世代として表題のタイトルの執筆を依頼されたと考えている。「50年のあゆみ」を知るためには、前半の25年を書いた中味も充実した貴重な資料である「25年史」⁽¹⁾があるが、残念ながら当時の会員全体に頒布されたものではなく、学会事務局にも寄贈された一冊が残っているのみである。前半部はその貴重な「25年史」を事務局から借りて読むことから始め、必要に応じて学会誌で確認し、後半部は150冊近くになる学会誌を読み、筆者二人が経験したことも折り込んでまとめることにした。手元の学会誌が欠けている場合には、ガスタービン学会のホームページにアップされているバックナンバーで確認した。

2. 1971年国際ガスタービン会議東京大会・展示会

この部分は、「25年史」⁽²⁾と日本機械学会誌1972年9月号の「1971年国際ガスタービン会議東京大会」⁽³⁾から抜き書きした。

2.1 1971年国際ガスタービン会議東京大会・展示会の開催に到るまで

ASME（アメリカ機械学会）のGTD（ガスタービン部会）を設立し、自ら初代の部会長となったTom Sawyer氏（フルネーム：Robert Thomas Sawyer）は、1年おきに米国と米国以外（主に欧州）でガスタービン会議を開催していて、日本でもASME主催のガスタービン会議を開きたいと考えていた。これに対してTom Sawyer氏と個人的に交際のあった慶應義塾大学の渡部一郎教授、三菱重工業技術管理部長の岡村健二氏と日本鋼管の佐藤玉太郎氏が日本側の受け皿になり、渡部教授が当時ガスタービンに関係していたメーカーと大学研究者に呼びかけ、国際的なガスタービン会議開催の賛同が得られた。

その後、ASMEとの打合せを経て、日本機械学会との共催にすること、米国でのガスタービン会議と同様に製品展示会も共催すること、開催費用は参加諸団体の寄付の他、会議や展示会の参加登録費、論文売り上げ、展示会出展費などで賄われることが決まった。共催については日本機械学会も快く引き受けてくれた。

会議の運営のために1970年3月に組織委員会が設立され、委員長は渡部教授、副委員長を岡村健二氏とするTable 1に示す総勢17名の実行委員が指名された。

当初、ASMEと日本機械学会から同数の論文を選定するという基本合意があったが、結果的にはASME側25編、日本側41編、合計66編が選定された。展示関係も展示場所の設営のほか通関関連で保税地区の設定と管理などで大変苦勞したことであった。

これらの準備と実施のために実行委員の下に実施委員や実施班員と称した250人もの手伝いがかり出され、筆者の一人は、講演発表担当の実施委員、もう一人はスライド担当の実施班員を務めた。

Table 1 Tokyo Joint International Gas Turbine Conference and Product Show, executive committee ⁽⁴⁾

委員長	渡部一郎（慶應義塾大学）
副委員長	岡村健二（三菱重工業）
委員	阿部安雄（三菱重工業）、有賀一郎（慶應義塾大学）、井口泉（東京芝浦電気）、一色尚次（東京工業大学）、井上宗一（石川島播磨重工業）、入江正彦（三井造船）、浦田星（日立製作所）、片山博道（川崎重工業）、小茂鳥和生（慶應義塾大学）、斉藤猛夫（新潟鉄工所）、佐藤豪（慶應義塾大学）、佐藤玉太郎（日本鋼管）、水町長生（東京大学）、三輪光砂（船舶技術研究所）、森本隆興（富士電機製造）

2.2 1971年国際ガスタービン会議東京大会・展示会の開催⁽³⁾

会議前日、1971年10月3日にパレスホテルで開かれたカクテルパーティー形式のアーリーバードレセプションに引き続き、会議と展示会の本番は1971年10月4日から

原稿受付 2022年11月14日

*1 高知工科大学名誉教授、本会名誉会員

*2 東京大学名誉教授、本会名誉会員

4日間、千代田区北の丸の科学技術館で開催された。

4日間、毎日1題目ずつ特別講演が行われ、1日目は東京大学の八田圭三教授と岡崎卓郎教授から“The Recent Problems of Gas Turbine Researches in Japan”, 2日目は慶應義塾大学の渡部一郎教授から“The Development of Gas Turbine Industries in Japan”, 3日目は東京大学の小泉磐夫教授から“Gas Turbine Operating Experience and Application in Japan”, 最後の4日目には、William Research社のS. B. William氏から“Future of Small Gas Turbine”の講演が行われた。

論文講演は、日米それぞれ20編選定することとしたが、日本機械学会には59編もの応募があり、調整の結果、アメリカ側25編、日本側41編の計66編を選定した。その後、日本側から2編の発表辞退、アメリカ側で1編が発表者欠席で最終的にはアメリカ側24編、日本側39編、合計63編が実際に講演された。この講演は、毎日3セッションで4日間、計12セッションに分かれて行われた。

聴講者は、ターボ機械関連が4セッションで合計285名、材料関係が2セッションで140名、燃焼と伝熱関係が2セッションで計190名、船用ガスタービンが110名、サイクルと制御関係が90名、ガスタービンの応用関係が105名、日本におけるガスタービンの開発が160名で合計1080名だった。

展示会場には、59個の展示小間が設営され、国内20社、海外14社がガスタービン本体、部品、関連機器、材料、計測機器、燃料、潤滑油などの最新技術が展示され、館外にも屋外展示場が設置されて2社がガスタービンバスの試作車を展示していた。展示会のみ参加者は3094名、学術講演参加者と合わせれば3553名が見学したことになる。

先に書いたように筆者の一人は講演発表担当の実施委員で朝早くからのパレスホテルでのブリーフィングから忙しく4日間を過ごした。もう一人はスライド担当の実施班員を務め、スライドが終わっているにもかかわらず“Next slide please”と言われて英語での返事に困ったこと、昼休みなどの空いた時間に展示会場で見たKongsberg製の背中合わせになった遠心圧縮機とラジアルタービンの片持ち構造やWilliams Researchの超小型ファンエンジンWASPを載せたFlying Platformにわくわくしたこと、会議・展示会の終了後、屋外展示してあったガスタービンバスの撤収作業のそばから最後までしつこく離れず、展示した会社の担当者に追い払われそうになったことなどを懐かしく思い出す。

3. 日本ガスタービン会議の設立⁽⁵⁾

1970年3月の「1971年国際ガスタービン会議東京大会・展示会」の組織委員会の席上でも、国際ガスタービン会議の終了後に残余が出たなら、ガスタービンに関係する技術者、研究者などが集まるガスタービン協会などの組織を設け、残余の受け入れ口とする構想が検討され

ていた。

国際ガスタービン会議の終了後の1971年11月19日にガスタービン協会設立準備の最初の懇談会が開かれ、多くの議論がなされ、次のような合意が得られた。

- (1) ガスタービン関係者のための共通の広場が必要であり、それまで国際会議準備・実施のための組織を以後も存続させる。
 - (2) 何らかの会を設ける場合はなるべく小規模のものにし、学術的色彩は強めない。業務として、情報交換、文献頒布、次回国際ガスタービン会議の準備などが考えられる。そのため経費のかからない方策を講ずる。第2回の懇談会が同年12月に開かれ、
 - (1) 会の名称を「日本ガスタービン会議」とし、英名は「Gas Turbine Committee of Japan (略称: GTCJ)」とする。
 - (2) GTCJの性格、構成などの詳細については、小委員会を設け、原案を検討する。その検討事項としては、目的、事業内容、会員(個人、団体)会費、組織・構成、事務局とする。
- と決まり、以後、小委員会が開かれ懸案の諸点が検討されることになった。

小委員会では、会則、細則、会報発行の責任体制、会報発行回数、幹事会の開催回数などが詰められていった。

その後、日本ガスタービン会議設立発起人を委嘱し、その中から23名の実行委員を選び実行委員会が結成され、準備に当たることになり、1972年4月7日に実行委員会が開かれ、

- (1) 発会式と評議員会は6月15日14時から健保会館で開催する。
- (2) 会長に渡部一郎教授、副会長に岡村健二氏、幹事長に井口泉氏を候補とする。
- (3) 三氏で幹事案を作成することになった。

これらの準備を終えて、1972年6月15日、東京都港区乃木坂の健保会館で第1回の評議員会が開かれ、会則・細則が原案通り承認され、続いて第1期の役員と第1期幹事がTable 2の様に選出され⁽⁶⁾、その後、昭和47年度の事業計画と予算について審議承認され評議員会は終了した。発会式が行われて日本ガスタービン会議の第1期が始まった。

第1回評議員会の報告、日本ガスタービン会議会則、日本ガスタービン会議細則は、会報創刊号に掲載されており、会則の第3条には、

本会はガスタービンに関する知識・情報の普及、国際交流等をはかり、あわせて会員相互の相互の親睦に資することを目的とする。

と書かれ、細則の2条に、

本会議の対象にターボ過給機も含める。

と書かれている⁽⁷⁾。

Table 2 Division of duties of executives and secretaries

会長	渡部一郎 (慶應義塾大学)
副会長	岡村健二 (三菱重工業)
幹事長	井口泉 (東京芝浦電機)
編集	会報の編集, 刊行とガスタービン生産統計作成
	水町長生 (主担当, 東京大学), 小茂鳥和生 (慶應義塾大学), 一色尚次 (東京工業大学), 田中英穂 (東京大学), 今井兼一郎 (石川島播磨重工業), 有賀基 (日産自動車), 鶴見喜男 (小松製作所)
企画	シンポジウム, 講習会, 見学会, 懇談会, 特別講演会の企画・実施, 国際会議への参加・協力, 外国史料の入手配付, 国内ガスタービン関係団体との連絡
	入江正彦 (主担当, 三井造船), 中村健也 (トヨタ自動車), 松木正勝 (航空宇宙技術研究所), 浦田星 (日立製作所), 佐藤玉太郎 (日本鋼管)
庶務・会計	期末幹事会, 評議員会の開催業務, 事務局統括, 資料の蒐集・保管, 財務管理
	片山博道 (主担当, 川崎重工業), 有賀一郎 (慶應義塾大学), 三輪光砂 (船舶技術研究所), 阿部安雄 (三菱重工業), 本間友博 (東京芝浦電機)

4. 社団法人日本ガスタービン学会への改組と公益法人化

4.1 日本ガスタービン学会の設立まで

この学会設立までの取り組みは, それについて詳しく記述されている「25年史」⁽⁸⁾と会報, 学会誌に掲載された評議員会報告などから記述した。

まず, 社団法人への改組を目指した大きな理由は, 1971年国際ガスタービン会議東京大会・展示会の準備の母体となった組織委員会が任意団体であったことで種々のやりにくさを経験したことにあった。

ガスタービン会議が発足したばかりの1972年8月には法人化の検討が組織・運営検討特別委員会(井口泉委員長)により始まり, 第2期の1973年7月に法人化特別委員会(渡部一郎委員長)が発足し, 3回の委員会が開催され, 法人化のために必要な基金, 会員数, 定款などの調査を行った⁽⁹⁾。これに基づいて1973年11月に臨時評議員会を開き, 文部, 通産両省共管の社団法人化についての評議委員会の承認が得られた⁽¹⁰⁾。

これを受けて1974年から1975年にかけて所管官庁との折衝が続いた。文部省には定款などの説明に向いて良い感触を得られたが, 通産省との折衝ではガスタービン独自の法人団体を設ける意義が理解されず, 加えて同省管轄の法人を減らそうとしていたところもあり進展が得られず, 文部省管轄の法人に一本化した。

その後, 再度, 法人化特別委員会(渡部一郎委員長)を設け, 文部省の指導の下に定款案を作成し, 1975年11月28日に日本ガスタービン会議の臨時評議員会と社団法人日本ガスタービン学会設立総会が開かれた。まず, 臨時評議員会では, 日本ガスタービン学会の認可, 発足とともに日本ガスタービン会議を発展的に解散する件が承認され, ガスタービン会議の会員及び所有財産を新組織に移管することも承認された。引き続き開催された社

団法人日本ガスタービン学会設立総会で入江正彦議長(日本ガスタービン会議第4期会長)から学会設立の趣旨と経緯が説明され, 文部省との折衝も進み, 学会発足の機運が醸成されたので, 同学会を設立したいと提案され満場一致で可決された。次いで定款・細則などについても承認された⁽¹¹⁾。

翌1976年2月に文部省に法人化に必要な書類を提出した。その時には4月上旬には承認されるという見通しであったが, 4月以降から必要な基金が600万円から1000万円になると連絡があり, 一転して悲観的な状況になったが, 強力な働きかけで基金は従来通りの600万円で文部省側の了解が得られて, 1975年5月31日付けで文部省から正式に社団法人日本ガスタービン学会設立が認可された。

これを受け, 日本ガスタービン会議としての最後の評議員会と社団法人日本ガスタービン学会の最初の評議員会と総会は6月4日に機械振興会館で順次開かれ, 第1期役員及び評議員, 学会の定款・細則, 第1期事業計画案, 予算案が承認され, 社団法人日本ガスタービン学会が活動を始めた^{(12),(13)}。

4.2 主な定款の変遷

第1期の定款第4条には⁽¹⁴⁾,

この法人は, ガスタービンに関する研究発表・調査・知識の交換並びに会員相互間及び関連学協会との連携・定形を図り, もって学術・技術の発展に寄与することを目的とする。

と書かれ, 細則第2条には,

本法人の研究, 調査等の対象は各種ガスタービン(ターボ過給機を含む)およびその関連分野とする。と書かれている。

2001年に文部科学省の指示で定款第4条は

この法人は, ガスタービンに関する研究発表・調査・知識の交換並びに会員相互間及び関連学協会との連絡・提携を図り, もって学術・技術の進展及び社会の発展に寄与することを目的とする。

と変更されている⁽¹⁵⁾。

更に2011年の公益法人化に伴い学会の所掌範囲を「ガスタービン」から「ガスタービン及びエネルギー関連技術」と改め, 定款第3条は

この法人は, ガスタービン及びエネルギー関連技術に関する研究発表・調査・知識の交換並びに関連学協会との連絡・提携を図り, もって学術・技術の進展及び社会の発展に寄与することを目的とする。

と変更されている。

4.3 公益法人化

2006年年6月2日に制定された「公益社団法人及び公益財団法人の認定等に関する法律」, 「一般社団法人及び一般財団法人に関する法律」及び「一般社団法人及び一般財団法人に関する法律および公益社団法人及び公益財団法人の認定等に関する法律の施行に伴う関係法律の整

備に関する法律」により、それまでの公益法人は「公益社団・財団法人」（新公益法人）あるいは「一般社団・財団法人」（一般法人）に移行しなければ、解散となることとなった。そこで、日本ガスタービン学会では33期より35期までの組織検討委員会において「新公益法人」となるか「一般法人」となるか検討を重ねた。その結果、2010年4月の35期通常総会で新公益法人への移行申請手続きを理事会に一任することが満場一致で承認された^{(16),(17)}。

その後、申請書類一式ならびに関連規程類等の作成を終え、2010年9月に公益認定等委員会に移行認定申請を行い承認され、2011年3月1日から公益法人に移行した。公益法人化後の定款は学会のホームページにアップされている⁽¹⁸⁾。公益法人化の最初の定款では、会長だけを代表理事とするとしており、ちょうど筆者の一人が会長の時で、何があっても理事会出席しなくてはならないと緊張した1年であった。定款は次の年の総会で副会長も代表理事とすると改定された。

5. 歴代会長と事務局長

日本ガスタービン会議から現在の公益社団法人日本ガスタービン学会の歴代会長をTable 3、歴代事務局長をTable 4に示す。

Table 3 Successive presidents ⁽¹⁹⁾

GTCJ			
在任年度	名前	所属	期
1972	渡部 一郎	慶応義塾大学	1
1973	岡村 健二	三菱重工業	2
1974	水町 長生	東京大学	3
1975	入江 正彦	三井造船	4

GTSJ

1976	入江 正彦	三井造船	1
1977	岡崎 卓郎	東京大学	2
1978	浦田 星	日立製作所	3
1979	山内 正男	宇宙技術開発事業団	4
1980	円城寺 一	東京芝浦電気	5
1981	井口 泉	福井工業大学	6
1982	今井 兼一郎	石川島播磨重工業	7
1983	須之部 量寛	東京理科大学	8
1984	窪田 雅男	工業技術院	9
1985	谷村 輝治	川崎重工業	10
1986	佐藤 豪	慶応義塾大学	11
1987	稲葉 興作	石川島播磨重工業	12
1988	松木 正勝	日本工業大学	13
1989	田中 英穂	東海大学	14
1990	石井 泰之助	三井造船	15
1991	平山 直道	千葉工業大学	16
1992	丹羽 高尚	三菱重工業	17
1993	高田 浩之	東海大学	18

1994	濱田 邦雄	日立製作所	19
1995	葉山 眞治	東京大学	20
1996	大槻 幸雄	川崎重工業	21
1997	有賀 一郎	千葉工業大学	22
1998	佐藤 文夫	東芝	23
1999	菅 進	船舶技術研究所	24
2000	伊藤 源嗣	石川島播磨重工業	25
2001	酒井 俊道	東京理科大学	26
2002	柘植 綾夫	三菱重工業	27
2003	大田 英輔	早稲田大学	28
2004	住川 雅晴	日立製作所	29
2005	川口 修	慶応義塾大学	30
2006	吉野 隆	川崎重工業	31
2007	吉識 晴夫	帝京平成大学	32
2008	並木 正夫	東芝	33
2009	本阿弥 眞治	東京理科大学	34
2010	渡辺 康之	IHI	35
2011	筒井 康賢	高知工科大学	-
2012	佃 嘉章	三菱重工業	-
2013	坂田 公夫	JAXA	-
2014	藤谷 康男	三菱日立パワーシステムズ	-
2015	田沼 唯士	帝京大学	-
2016	久山 利之	川崎重工業	-
2017	船崎 健一	岩手大学	-
2018	油谷 好浩	東芝	-
2019	渡辺 紀徳	東京大学	-
2020	識名 朝春	IHI	-
2021	太田 有	早稲田大学	-
2022	福泉 靖史	三菱重工業	-

Table 4 Successive secretary generals ⁽²⁰⁾

名前	就任日
三浦敦子	1991年4月1日
伊藤高根	2007年7月1日
平岡克英	2011年5月1日
中村優美	2016年5月1日

6. 会員数の推移

各期末の学会の正会員、賛助会員、学生の数を「25年史」⁽²¹⁾と各期の評議員会報告、総会報告からまとめてFig. 1に示す。創立25年までは順調に会員は増えたが、2001年に正会員2058人と一旦ピークを迎えた後に減り始め2009年に1881人まで減っている。その後の会員増強の努力もあって2013年に2057人まで盛り返したが、今は漸減傾向にあり2021年時点で1812人となっている。

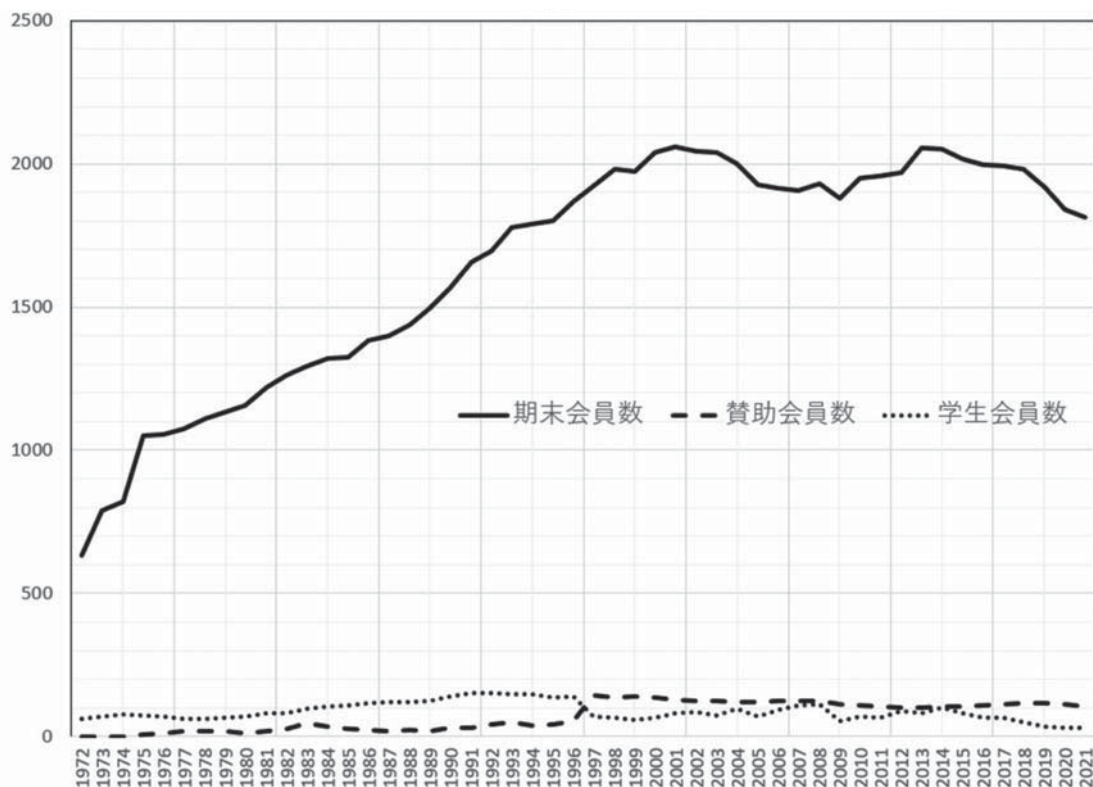


Fig. 1 Changes in the number of members

7. 学会の主な出版事業

7.1 学会誌

学会誌の創刊号の1972年9月号は、「日本ガスタービン会議会報」として第1期の1972年10月に会員に配付された。第1期の編集幹事の長は、東京大学生産技術研究所の水町長生教授であり、当時、水町教授の下で助教授と大学院生だった筆者二人は、研究室の助手だった遠藤敏彦氏が、日産自動車のデザイナーによる図案を基に創刊号の写真製版用の版下をあれこれ工夫しながら丁寧に作っていたのを懐かしく思います。そのB5版の創刊号の表紙をFig. 2に示す。

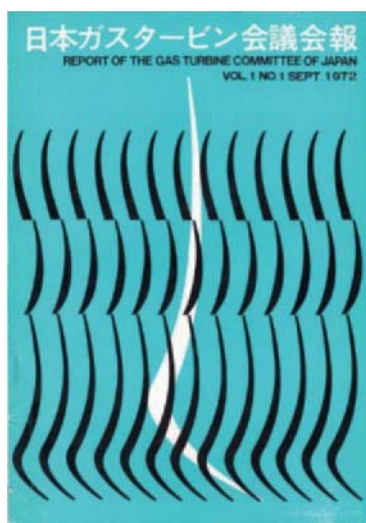


Fig. 2 The cover of the first issue of the Report of GTCJ

会報は、創刊号に続いて1973年2月号、1973年9月号、第1巻の最後として、1974年3月号が発刊されている。1974年度から1期分が6月、9月、12月、翌年3月に4回発行され、第3期発行の1974年6月号から第2巻となり、期が変わる毎に巻数が増えて、号数は創刊号からの連番になっている。

日本ガスタービン学会の設立を受け、1976年6月号から「日本ガスタービン学会誌」となったが、「日本ガスタービン会議会報」からの巻と号は引き続いている。1997年にB5版からA4版に変更され、連番の最終号は、1998年12月号の26巻103号となっている。1999年1月号から巻が期毎から年ごとに変わり、1月、3月、5月、7月、9月、11月の年6回の発行になり、号もそれぞれNo. 1からNo. 6まで振られ現在まで続いている。

7.2 集会に関わる出版

1973年から現在まで開催されている定期講演会と1985年から2001年まで開催された秋季講演会では、それぞれ発表される論文を日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集、日本ガスタービン学会秋季講演会講演論文集としてそれぞれの講演会の直前に発行されている。また、1973年から開催されているガスタービンセミナーでは講演要旨をまとめた資料集がセミナーと同時に発行されている。

7.3 国産ガスタービン・過給機資料集

国産ガスタービンに関する資料を収集した資料集を1973年に発行し、1989年版から過給機の資料も含め、ほぼ5年おきに2019年まで10刊発行している。この日本の

ガスタービンに関する統計作成は日本ガスタービン会議発足時からの重要な事業の一つである。

7.4 Bulletin of GTSJ

1983年から海外機関向けに国内のガスタービン及び過給機の情報、学会と会員の活動状況を紹介する目的でほぼ毎年1回、英文誌Bulletin of GTSJが発行されてきたが、2005年で出版が途絶えた。しかし実質的には2007年からオンライン・ジャーナルInternational Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems (JGPP)に移行している。

8. 学会の主な集会事業

8.1 国際ガスタービン会議・展示会

当学会の発足のきっかけとなった1971年国際ガスタービン会議東京大会・展示会からほぼ4年おきに2019年まで国際ガスタービン会議・展示会が12回開催され、次回は2023年11月26日から京都で開催予定である。この国際会議については2012年1月号40周年記念特集号²²⁾にまとめられているので本稿では触れないことにする。

8.2 定期講演会と秋季講演会

定期講演会の第1回は、日本ガスタービン会議発足の次の年、1973年6月に東京都千代田区霞が関にあった国立教育会館で開催され、26件の成果が発表され、参加者も215名と好評であった²³⁾。以降、定期講演会が毎年開催されている。

秋季講演会の第1回は、1985年11月に鹿児島大学で開

催され、19件の成果が発表され、74名が参加している。講演会当日の13時から1時間、蟹江松男鹿児島大学名誉教授から「鹿児島の焼酎」と題した特別講演が開かれた。また講演会の翌日には京セラ国分工場とソニーセミコンダクターの見学会が行われている²⁴⁾。その後の秋季講演会では特別講演と見学会を伴うことが恒例となった。

しかしながら、講演会の年2回開催が続いたことから、定期講演会よりも秋季講演会の発表件数が次第に多くなり、学会誌29巻5号の「学術講演会の開催方法の見直しについて」という会告で年1回の開催とすることが報告され、第30回の定期講演会は2002年10月に富山国際会議場で開催され、実質的にそれまでの秋季講演会が定期講演会となり、開催地域特有の文化などの特別講演と見学会は、2020年、2021年のZoomによるオンライン開催を除いて現在まで続いている。

また、2009年10月21日から山口市で開催された第37回ガスタービン定期講演会の前日10月20日に宇部市の山口大学工学部でガスタービン市民フォーラム「明日を拓くガスタービン～ジェットエンジンと産業用ガスタービン～」を山口大学と共催で開催している。この時の講師は本田技術研究所の園田豊隆氏と川崎重工業の杉本隆雄氏である²⁵⁾。この後の定期講演会では、地元の大学や工業高専等と共催で毎回市民フォーラムが開かれている。

第1回から11回までの秋季講演会と会場、見学先などをTable 5に示す。30回以降の定期講演会については表が大きくなるので省略した。

Table 5 Fall Lecture Presentation Meeting

回	開催年月	会場	講演件数	参加者数	見学先
1	1985.11	鹿児島大学	19	74	京セラ国分工場,ソニーセミコンダクター
2	1986.11	広島工業大学鶴会館	22	79	マツダ, 三菱重工業広島研究所
3	1988.11	愛媛大学	26	85	大王製紙工場
4	1989.10	金沢工業大学	23	97	渋谷工業, 小松製作小松工場
5	1990.11	東北大学	30	104	航空宇宙技術研究所角田支所, NASDAロケット開発センター
6	1991.8	北海道大学	39	105	北海道大学低温科学研究所, JAMIC地下無重力実験センター
7	1992.11	三菱重工業ルネッサンス長崎・伊王島	37	127	三菱重工業長崎造船所, ハウステンボス・コジェネシステム
8	1993.10	岩手大学	42	104	東北電力電力葛根田地熱発電所
9	1994.11	鳥根県立産業交流会館くにびきメッセ	40	135	日立金属安来工場
10	1995.9	オークラホテル新潟	39	160	新潟鉄工所新潟ガスタービン工場他
11	1996.11	宮崎厚生年金会館	48	117	オーシャンドーム, 宮崎大学
12	1997.10	奈良県新公会堂	35	115	堺市クリーンセンター東第二工場, 檀原考古学研究所
13	1998.10	北海道大沼国際セミナーハウス	48	105	森地熱発電所, 五稜郭, トラピスチヌ修道院など
14	1999.8	ビックパレットふくしま	26	122	三菱電機郡山製作所, アサヒビール福島工場
15	2000.11	北九州国際会議場	37	117	日本鑄鍛鋼など
16	2001.10	秋田市文化会館	42	134	秋田大学鉱業博物館, 秋田ウインドパワー研究所, 平野政吉美術館, ねぶり流し館

8.3 ガスタービン特別講座

ガスタービン特別講座は都会の雑踏から離れた場所で開く「緑陰講座」を目指して、第1回は、1984年7月に蔵王町の蔵王ハイッで開催され、セミナー形式の講義と分野別懇談会が行われ、講師と参加者の活発な討論や意見交換が行われた。討論会は、70名を収容できる研修室内に講師を囲む5つのグループが作られ、予定の22時を30分延長して討論が続き、グループによっては次の日の2時過ぎまで討論が続いたとも言われている。翌日には、航空宇宙技術研究所の角田支所と宇宙開発事業団の角田ロケット開発センターの見学会・技術懇談会が開催された²⁹⁾。

この第1回ガスタービン特別講座は、航空宇宙技術研究所の遠藤征紀氏のまさしく孤軍奮闘の運営であったが、箱根のホテル湖尻富士見荘で1985年9月に開かれた第2回からは企画委員会全体で運営をするようになった。ただ、都会から離れた会場で開催するために研究所から借り出したプロジェクターやスクリーンなどを車に載せて持ち込んで前日から会場設営するなど面倒なところもあった。

この第2回の開催日当日朝は、視界が5mもないような濃霧で参加者が集まるどころか心配であったが、バスを降りた参加者が霧の中から次々に現れたのは感動的でもあった。都会の雑踏から離れた会場での「緑陰講座」だったからこそ経験することができたことだった。

1986年9月に湯河原厚生年金会館で開催された第3回では「ガスタービンの新しい発展を探る」とテーマも与えられ、以降、1994年9月に「ガスタービン高温化技術の現状と将来動向」というテーマの下、鈴鹿サーキット研修センターで開催された第9回まで続いた。Table 6にガスタービン特別講座の開催日、開催場所などを示す。

8.4 ガスタービン教育シンポジウム

「ガスタービン特別講座」は、対象を工学系大学、大学院、高等専門学校、工業高校在籍者とした「ガスタービン教育シンポジウム」に衣替えし、第1回は1995年7

月20日と21日が開催され、1日目のシンポジウムと懇親会は勝田厚生年金会館で開催され、2日目の見学会は日立製作所日立工場、勝田工場のガスタービン開発センター、タービン工場・ガスタービン設備・コージェネレーター・ブレード製造工場で開催された²⁹⁾。

第1回の教育シンポジウムのプログラムは、「ガスタービン概論」、「ガスタービンと流体力学」、「ガスタービンと伝熱工学」、「ガスタービンと燃焼工学」で始まったが、その後には「ガスタービンと材料工学」、「ガスタービンと制御工学」などが加わっている。また、第3回から参加対象にガスタービン技術者の初心者も加わった。

教育シンポジウムは1995年から1998年まで関東と関西で交互に開催され、1999年から2005年までは関東のみの開催、2006年から関東での毎年の開催に加えて隔年で関西でも開催することになった。また、この教育シンポジウムのテキストが「ガスタービン工学」として発行された。

筆者の一人が高知工科大に勤務していた時、研究室に配属された最初の学生全員を研究費で参加費と旅費を支払って関西で開催された教育シンポジウムに参加させたところ、シンポジウムから帰ってきた当時学部3年生の一人が開催場所であり見学先にもなった企業に就職したいと猛烈に勉強を始めた。結果としては彼の夢は叶わなかったが、学生のやる気を刺激する効果を目の当たりにしたことであった。Table 7にガスタービン教育シンポジウムの開催年月と開催場所を示す。見学先、参加者、演題数などのデータは大きくなったので省略した。

8.5 ガスタービンセミナー

ガスタービンの技術情報の普及を図り、1978年9月の大阪での開催を例外として1974年1月から毎年一度開催されているが、残念ながら2021年と2022年は新型コロナウイルスの影響でZoomでのオンライン開催となっている。このガスタービンセミナーは技術情報の普及を主目的とするが、実は学会に貴重な収入をももたらしていることも忘れてはならない。

Table 6 Gas Turbine Special Lecture

回	開催年月	会場	テーマ	講演数	参加者数
1	1984.7	蔵王ハイッ	—	6	42
2	1985.9	箱根・ホテル湖尻富士見荘	—	3	44
3	1986.9	湯河原厚生年金会館	ガスタービンの新しい発展を探る	9	40
4	1988.9	湯河原厚生年金会館	ガスタービンと環境との調和について考える	7	43
5	1989.9	三河ハイッ	ガスタービンとセラミックス材料	8	49
6	1990.9	湯河原厚生年金会館	エネルギー問題に対応する新しいガスタービンシステム—研究開発プロジェクトの現状と展望—	6	38
7	1992.9	鈴鹿サーキット研修センター	ガスタービン技術の温故知新	8	63
8	1993.9	鈴鹿サーキット研修センター	ガスタービンと計算流体力学 (CFD) — 今日・明日・そして夢—	6	51
9	1994.9	鈴鹿サーキット研修センター	ガスタービン高温化技術の現状と将来動向	6	53

Table 7 Gas Turbine Education Symposium

回	開催年月	開催場所
1	1995.7	勝田厚生年金センター
2	1996.7	川崎重工業明石工場研修センター
3	1997.7	航空宇宙技術研究所
4	1998.7	三菱重工業高砂製作所
5	1999.7	石川島播磨瑞穂工場
6	2000.7	東芝京浜事業所
7	2001.7	関西電力姫路第一発電所
8	2002.7	富士電機エネルギー製作所
9	2003.7	航空宇宙技術研究所
10	2004.7	JAXA航空宇宙研究センター調布飛行場分室
11	2005.7	JAXA航空宇宙技術研究センター
12	2006.7	JAXA航空宇宙技術研究センター
13	2006.9	三菱重工業高砂製作所
14	2007.7	JAXA航空宇宙技術研究センター
15	2008.7	IHI瑞穂工場
16	2008.9	川崎重工業明石工場研修センター
17	2009.6	首都大学東京日野キャンパス
18	2010.7	東芝京浜事業所
19	2010.9	三菱重工業高砂製作所
20	2011.6-7	JAXA調布航空宇宙センター
21	2012.7	IHI昭島事業所, 瑞穂工場
22	2012.9	川崎重工業明石工場研修センター
23	2013.7	JAXA航空宇宙技術研究センター
24	2014.7	東芝京浜事業所タービン工場
25	2014.9	三菱日立パワーシステムズ高砂工場
26	2015.7	本田技研工業和光ビル
27	2016.7	IHI航空宇宙 事業本部瑞穂工場 昭島事業所
28	2016.9	川崎重工業明石工場
29	2017.7	JAXA調布航空宇宙センター
30	2018.7	東芝エネルギーシステムズ京浜事業所タービン工場
31	2018.11	三菱日立パワーシステムズ高砂工場
32	2019.7	IHI 昭島事務所IHI そらの未来館
33	2021.12	Zoom によるオンライン開催
34	2022.9	JAXA調布航空宇宙センター

8.6 見学会・技術懇談会

ガスタービン会議会報を創刊号から見直すと、1972年9月8日に第1回技術懇談会が日本鋼管高輪クラブでONERAのJ. Fabri氏を講師として開催され、1972年11月6日に東京瓦斯根岸工場で第1回の見学会が開かれている。1973年7月12日に東京電力横須賀発電所で第2回見学会が開催され、1973年9月7日に日本鋼管高輪クラブで田中良平東京工業大学教授と小松ハウメットの近江敏明氏を講師として第2回技術懇談会が開かれている。以降、毎年開催され、多いときには5回開催されている。開催は、見学会、技術懇談会のそれぞれ単独、見学会・技術懇談会と2つが一緒になったもの、さらに近年は見

学会及び技術フォーラムとして行われている。日本ガスタービン会議の時代には、期が違っても見学会と技術懇談会は連番になっていたが、1976年に日本ガスタービン学会になってからは、期毎の開催番号になっている。

8.7 シンポジウム

シンポジウムと名の付くものは、日本ガスタービン会議時代の1972年12月5日に自動車技術会と共催した「自動車用ガスタービンに関するシンポジウム」が最初のものである。東京大学の水町長生教授、日産自動車の木下啓二郎氏、トヨタ自動車の中村健也氏、本田技術研究所の井上和夫氏、小松製作所の鶴見喜男氏、三菱重工業の岡村健二氏が講師になっている。

日本ガスタービン学会となつてからは、第1回シンポジウムが機械振興会館ホールで「セラミックとガスタービン」のテーマで開催され、年1回の開催を目標にしていたが、開催されなかった年も多く、2012年10月に「先進ガスタービンシステムの技術開発動向」と題するテーマで東京理科大で開催されたシンポジウムが最後になっている。

8.8 特別講演会

1973年4月に開催された日本ガスタービン会議の第2回評議員会の後に第1回の特別講演会は開かれ、通産省鉱山石炭局の竹村豊氏から「石油を中心とした資源問題」、東京大学の山崎毅六名誉教授から「ガスタービン用燃料」の講演がなされている。その後は、学会の通常総会の後や、海外からガスタービンに関連する著名人が訪日した機会をとらえて開催されている。

9. 将来に向けて

9.1 脱炭素社会に向けた学会の役割

2020年10月、日本は「2050年カーボンニュートラル」を宣言した²⁸⁾。ガスタービン学会でもタイミング良く、2021年1月号に「電動化とガスタービン」、3月号に「水素・脱炭素燃料の最新動向(その1)」、5月号に「水素・脱炭素燃料の最新動向(その2)」という特集号を組んでいる。これらは宣言に応じてというより、時の情勢を読んで宣言前から準備されていたものと考えられる。

「2050年カーボンニュートラル」宣言以降、カーボンニュートラル、脱炭素に向けての議論には少し余裕がなく、何もかにも「電池+モーター」に流されてしまう危なさを個人的には感じている。これに対して資源エネルギー庁からの委託調査で財団法人エネルギー総合工学研究所が2006年3月にまとめた「超長期エネルギー技術ロードマップ報告書」²⁹⁾では、少し冷静に2100年までの技術のロードマップを見て感じ、電池やモーターの過剰な進展を期待していないところにも安心感を覚える。この2100年までのロードマップでは2050年には間に合わず使い物にならないと言われるかも知れないが、そこで予測された2100年までの技術の進展を2050年までに如何にして加速していくかという視点が大事だと思う。

同報告書では、水素燃焼タービン技術等水素を高効率に燃焼させる技術が重要になるとして、大規模水素燃焼タービン、中容量水素燃焼タービンをロードマップに記している³⁰⁾。

一方、運輸の航空機では「航空機は、水素・電気への転換が相対的に難しいために2100年時点でも炭化水素系燃料を使用」と想定して合成液体燃料が使われると予測している³¹⁾。

電池の質量当りのエネルギー貯蔵密度、発電機やモーターの質量当りの発電量、動力発生量が大幅に増えれば、リージョナルジェットなどの小型機までは「燃焼ガスタービンと電池+モーター」もあるだろうが、燃料がSAF (Sustainable Aviation Fuel) 等に変っただけのものが現状のジェットエンジンの後継機と考えるべきではないか。

これらのことを考えるとガスタービンの分野ではこれまで求められてきた高効率化を加速的に進めることが、カーボンニュートラル、脱炭素に向けた役割と考えられる。当学会は、そう言うガスタービンに対して、しっかりした議論の下でガスタービンセミナー、シンポジウム、特別講座、講演会、市民フォーラムなどを徹底的に利用してカーボンニュートラル、脱炭素化を進めていくためのリーダーシップを取るという役割がある。

9.2 会員数の維持、増強

カーボンニュートラル、脱炭素化を進めていくためのリーダーシップを取るためには、現状の会員数を維持し、さらに増強する必要がある。これまで、本学会は、対象を工学系大学、大学院、高等専門学校、工業高校在籍者としたガスタービン教育シンポジウムを1995年から始め、第3回から参加対象にガスタービン技術者の初心者も対象に含めてガスタービン技術の理解者を広げること努力してきた。

さらに2009年10月21日から山口市で開催された第37回ガスタービン定期講演会の前日10月20日に宇部市の山口大学工学部でガスタービン市民フォーラム「明日を拓くガスタービン～ジェットエンジンと産業用ガスタービン～」を山口大学と共催で開催した以降、定期講演会やその他の学会主催のイベントの前などガスタービン市民フォーラムを開催してガスタービンを広く知って貰うよう努めてきた。

それらに加えてガスタービンを広く知って貰うために、小学校高学年や中学生などに向けた教材が出来ないだろうか。Fig. 3は筆者の一人が、高知工科大学の学生と作った卓上ガスタービンである³²⁾。

現代は、Frank WhittleやHans von Ohainの時代と違って、タービンプレードなど設計・製造技術が格段に進歩している。残念ながら筆者や学生には、それだけの技術がなかったため、ファンとタービンプレードの性能不足を補うために卓上コンロのガスを使って加熱量を大きくしたが、非常に良く設計されたファンとタービンを



Fig 3 Tabletop gas turbine

用いられ、100℃程の加熱で自立運転でき、より安全な電気加熱方式も可能であろう。

小学校高学年や中学生などに向けてそのような教材キットを作って安価で販売し、彼らが自分で組立てて運転できれば、子供の時からガスタービンに対する親しみが湧き、実物のガスタービンやジェットエンジンを作りたいという児童や生徒が増えるのではないだろうか。レシプロエンジンでは実際の動作原理で動くものを小学生に組み立てることは出来ないが、ガスタービンならばこそ出来る利点ではないか。

10. 終わりに

ガスタービン学会誌の創刊号からガスタービン学会誌の最新号までを書棚から引っ張り出して、25年史とともにページをめくることから作業を始めたが、ガスタービン学会を作って来た先輩達の凄まじい努力に圧倒され続けた。今後は彼ら先輩の働きにも増してカーボンニュートラル、脱炭素化に向けてガスタービン学会がしっかり役割を果たすことを期待して結びとする。

参考文献

- (1) (社)日本ガスタービン学会25年史, (1998), (社)日本ガスタービン学会, 以下では「25年史」と記述.
- (2) 「25年史」, pp. 3-8.
- (3) 1971年国際ガスタービン会議東京大会組織委員会実行委員会, 1971年国際ガスタービン会議東京大会を省みて, 機械学会誌, Vol. 75, No. 645, (1972), pp. 1329-1337.
- (4) 「25年史」, p. 5.
- (5) 「25年史」, pp. 8-12.
- (6) 第1回評議員会報告, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 1, No. 1, (1972), pp. 69-70.
- (7) 会則・規程, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 1, No. 1, (1972), pp. 73-75.
- (8) 「25年史」, pp. 17-20.

- (9) 法人化委員会報告, 日本ガスタービン会議会報, Vol. 1 No. 4, (1974), p. 61.
- (10) 臨時評議員会報告, 日本ガスタービン会議会報, Vol. 1 No. 4, (1974), p. 61.
- (11) 日本ガスタービン会議第4期臨時評議員会報告, 日本ガスタービン会議会報, Vol. 3, No. 12, (1976), p. 42.
- (12) 日本ガスタービン会議評議員会報告, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 4, No. 13, (1976), p. 74.
- (13) 日本ガスタービン学会評議員会・総会報告, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 4, No. 14, (1976), p. 63.
- (14) 社団法人日本ガスタービン学会定款, 日本ガスタービン会議会報, Vol. 4 No. 14, (1976), pp. 68-81.
- (15) 伊藤源嗣会長文部省提出「定款変更の修正案について」, 平成12年9月12日.
- (16) 第33期理事会, 公益法人制度へのガスタービン学会の取り組み, 日本ガスタービン学会誌・会告, Vol. 37, No. 2, (2009), p. 71.
- (17) 評議員会・総会報告, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 38, No. 3, (2010), p. 67.
- (18) 公益社団法人日本ガスタービン学会定款<<https://www.gtsj.or.jp/society/certificate.html>> (参照日2022年11月14日).
- (19) 日本ガスタービン学会事務局資料.
- (20) 各年度の評議員会報告と総会報告から.
- (21) 「25年史」, p. 61.
- (22) 大田英輔, 川口修, 藤岡照高, 長谷川武治, 日本ガスタービン学会を支えてきたIGTCと日本のガスタービン産業界, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 1, (2013), pp. 2-9.
- (23) 「25年史」, p. 14.
- (24) 有賀一郎, ガスタービン秋季大会鹿児島地区後援会を終えて, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 13, No. 51, (1985), pp. 70-71.
- (25) 荒木秀文, 第37回ガスタービン定期講演会報告, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 38, No. 1, (2010), pp. 60-61.
- (26) 遠藤征紀, 特別講座を終えて, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 12, No. 46, (1984), pp. 46-47.
- (27) 熱田正房, 第1回ガスタービン教育シンポジウム報告, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 23, No. 90, (1995), pp. 116-117.
- (28) 首相官邸, グリーン社会の実現, <<https://www.kantei.go.jp/jp/headline/tokushu/green.html>> (参照日2022年11月14日).
- (29) エネルギー総合工学研究所, 超長期エネルギー技術ロードマップ報告書(超長期エネルギービジョン2100) <https://www.iae.or.jp/report/list/general/ene_vision_2100/> (参照日2022年11月14日).
- (30) エネルギー総合工学研究所, 分野別ロードマップ概要(資料1)の産13<https://www.iae.or.jp/wp/wp-content/uploads/2014/09/ene_vision_2100/02_RM-j.pdf> (参照日2022年11月14日).
- (31) エネルギー総合工学研究所, 分野別ロードマップ概要(資料1)の運13 <https://www.iae.or.jp/wp/wp-content/uploads/2014/09/ene_vision_2100/02_RM-j.pdf> (参照日2022年11月14日).
- (32) 中山翔太, 筒井康賢, 卓上ガスタービンの開発, 第42回ガスタービン定期講演会講演論文集, B12 <https://www.gtsj.or.jp/thesis/index/program2014.pdf> (参照日2022年11月14日).

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン・蒸気タービンの半世紀の歩みと今後の展望【技術】

民間航空機用ガスタービンエンジン Gas Turbine Engine for Civil Aircraft

平塚 真二*¹
HIRATSUKA Shinji

村田 亮*¹
MURATA Ryo

陶山 修二*¹
SUYAMA Shuji

キーワード：ガスタービン，民間航空機用エンジン，推進システム形態，高バイパス比化，安全性，信頼性，経済性，環境性，カーボンニュートラル

1. 緒言

他の熱機関に比べて大出力を軽量・小型で得られるというガスタービンの特性を活かすべく，航空機用のガスタービンエンジンの歴史が始まってから約90年，第二次世界大戦を経て，民間航空機用に活躍の場を広げてからでも70年近くになり，今や100席機以上の機体に限っても世界中で約2万機を超える民間航空機にガスタービンエンジンが搭載され⁽¹⁾，空のモビリティを文字通り推進していると言える。

わが国においては，日本ガスタービン学会が設立された1970年代から民間航空機用ガスタービンエンジン（以下，民間航空機用エンジン）への取組みが本格化して，その後の世界で活躍するエンジンの進歩・発展に貢献してきた。本稿では，そんな歴史の中で世界中の先輩技術

者諸氏が実現して来た技術革新を振り返り，その上で今後のカーボンニュートラル時代に向けた民間航空機用エンジンの展望について考察を行った。

2. 民間航空機用エンジンの進化

民間航空機用エンジンの歴史は，Fig. 1に示すように1950年代初頭に世界初ジェット旅客機である英国のCometに搭載されたGhostに始まり，その後ガスタービンエンジンを搭載した米国ボーイング社の707やDC-8といった民間航空機が就航し使用されることで拡大してきた。またガスタービンエンジンの形態も，GhostやAvon，JT3CなどのターボジェットからJT3DやJT8Dなどの低バイパス比ターボファン，JT9DやCF6，RB211などの高バイパス比ターボファンへと進化し，推力の拡

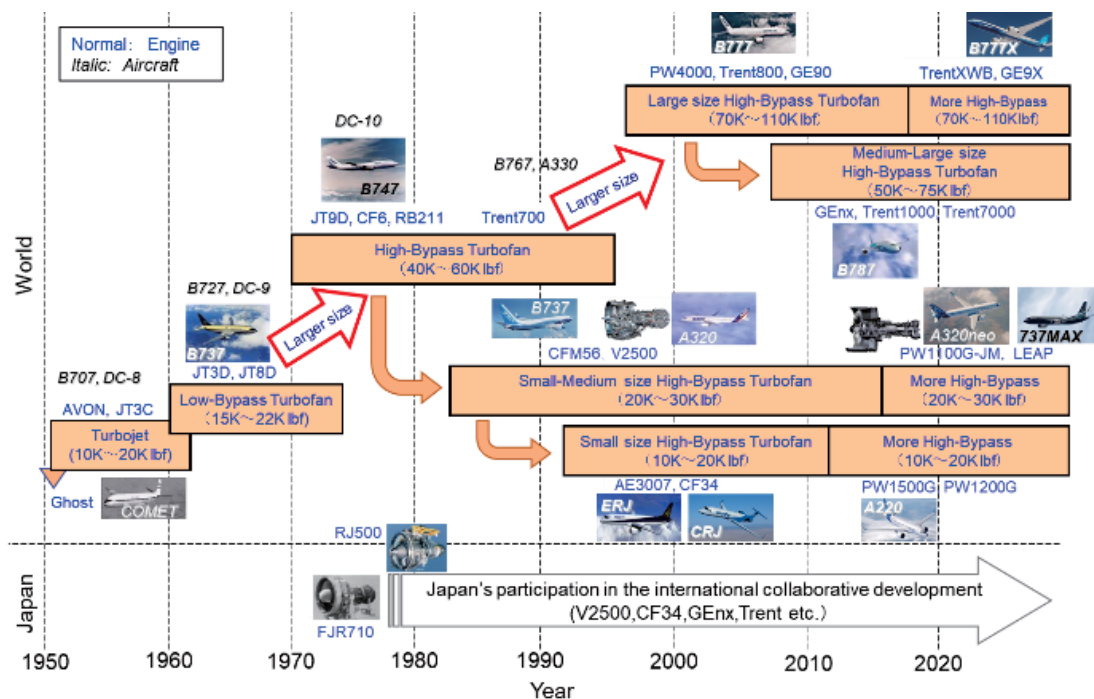


Fig. 1 Gas turbine engine development history

原稿受付 2020年12月2日

* 1 一般財団法人日本航空機エンジン協会
東京都中央区京橋2-5-18京橋創生館9階

大による大型化や更なる高バイパス比化を図ったターボファンの1種であるギアードターボファン形態（以下GTF形態）が出現してきた。一方、日本においては、バイパス比5～6程度の高バイパス比ターボファンが実用化された1970年代から研究開発が本格化し、通産省/航空宇宙技術研究所のもと我が国初の高バイパス比ターボファンFJR710が開発されたことは周知のことである。また民間航空機用エンジンのビジネス上の特性から国際共同開発が一般的になったが、日英共同でのRJ500開発やそれを発展継承する形で1983年に5か国国際共同開発のV2500に参画したのが始まりで、その後も様々な国際共同開発に参画、発展してきた。最近でもGTF形態のPW1100G-JMに開発段階から参画し更に事業を拡大している。

そういった民間航空機用エンジンの発展を技術面で振り返ってみると、安全性・信頼性、経済性、環境適合性の改善・向上が常に図られてきたと言える。

3. 安全性・信頼性の向上

技術面における発展として最初に航空機、特に民間航空機にとって一番重要と考えられる安全性・信頼性に関し、民間航空機用エンジンにおいてどのように改善が行われてきたのか振り返りたい。民間航空機エンジンの安全性・信頼性の指標は幾つかあるが、最もクリティカルなものとして1000飛行時間あたりのエンジン停止率IFSD (In-Flight Shut Down) rateがある。機体に搭載されているエンジン全てが同時に停止した場合、致命的な事故につながることから、この指標が非常に重要視されている。一般的にこのIFSD rateは初期不具合が発生するエンジン就航直後が高く、不具合や問題点を改善することで徐々に下がり、1950年代に開発・就航したエンジンでは1.0程度であったが、1990年代以降に開発・就航し成熟したエンジンでは0.005程度を下回るまで低下してきている。これは、過去の事故や不具合等の教訓を反映し耐空性基準や設計標準が見直されるとともに、設計技術の向上、新しい非破壊検査技術（例えば渦流探傷検査や超音波検査）や統計的品質管理の導入・改善など製造・検査技術の進歩、さらには運用側も巻き込んだヘルスマニタリング技術の進歩により成し遂げられてきた。特に設計技術の面では、有限要素法（FEM: Finite Element Method）などの数値解析が進歩し、精度の良い応答解析、亀裂進展解析、衝撃応答解析、伝熱解析等を行うことで、寿命予測精度の向上や振動特性の確認等ができるようになり、設計初期からの故障モード影響解析（FMEA: Failure Mode and Effects Analysis）や故障の木解析（FTA: Fault Tree Analysis）手法の導入が行われてきた。この信頼性向上により、エンジン就航当初のエンジンから低いIFSD rateを達成できるようになり、ETOPS (Extended-range Twin-engine Operational Performance Standard) と呼ばれる双発機での長距離

洋上飛行に対する耐空性基準が設けられるようになった。またエンジンの信頼性向上に伴い、ETOPSの基準緩和等も行われ、大型双発機による大陸間の運航も可能となっている。

一方、航空機システムにおいてその故障や破損のリスクをゼロにすることはできないが、できるだけリスクを小さくし安全性・信頼性を確保するためにSafe Life, Fail Safe, Fault Tolerance等の考え方を採用し設計されており、エンジンでも特にFail SafeとSafe Lifeの考え方を適用し設計されている。Fail Safeは何らかの理由である部分が故障や破損した場合でも、それが致命的な事象に発展しないように食い止める設計がなされているものを指し、Safe Lifeはそういった設計が採用できない場合、故障や破損自体を発生させないようにあらかじめ十分な設計余裕を持った寿命を設定し、その寿命に達したら新品に交換するという考え方である。例えば、何らかの理由でファンブレードが破損、飛散した場合に、ブレードがエンジン内部から外に飛び出さないようにしたものがFail Safeであり、一方、回転体であるディスクが破断するとその破片がエンジンケースを突き破り最悪機体を損傷してしまう可能性があるためディスクに寿命を設定しLLP (Life Limited Parts) として管理・部品交換していくことがSafe Lifeである。過去の事故や不具合等はこのFail SafeやSafe Lifeに関連する耐空性基準や設計標準に反映されていくことで安全性・信頼性の向上が図れている。なお、日本において民間航空機用エンジンの世界では国際共同開発が主流でモジュールや部品の設計・開発に留まっていることもあり、このFail SafeやSafe Lifeを考慮した設計を進める上で過去の経験やデータにおいて独自蓄積が不十分なところがあり、日本主体で認証を取得する際の大きなハードルとなっていると考えられる。

4. 経済性の改善

技術面における発展の2点目として、経済性の改善について振り返る。航空機用ガスタービンエンジンの経済性の代表的な指標として単位推力・時間あたりの燃料消費率SFC (Specific Fuel Consumption) があるが、民間航空機用エンジンでは、Fig. 2に示すように過去70年の間に大幅に低下してきている。これは、産業用ガスタービンと同じようにガスタービン自体の熱効率を向上させ

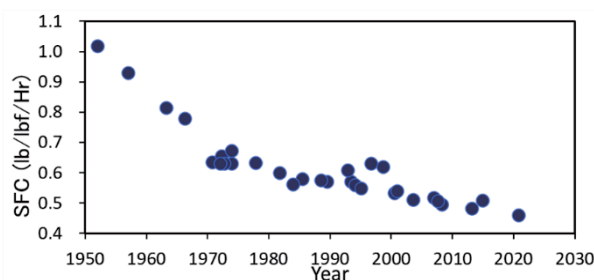


Fig. 2 SFC of Civil Aircraft Engine

と共に、ガスタービンから排出される空気の運動エネルギーを推進仕事に変換する際の効率、いわゆる推進効率も向上させてきたことによる。以下、この推進効率及び熱効率の向上がどのように行われてきたかを述べる。

5. 推進効率の向上とエンジン形態の進化

5.1 推進効率の向上

推進効率はエンジンから排出される空気の運動エネルギーとエンジンから発生する有効仕事の比で定義され、一般的に機体速度と排出される空気の速度を使って以下の式で示される。

$$\text{推進効率} = 2 / (1 + \text{排出空気速度} / \text{機体速度})$$

このため、推進効率を向上するのは、排出空気速度をできるだけ低く抑え、機体速度に近づけることがよいことになる。一方、エンジン推力は排出空気流量と排出空気速度の積に比例するので、推力を維持する一方で、排出空気速度を機体速度近くまで低くするには、排出空気量を増やす必要がある。このような考えのものと考案されたものがターボファンであり、その仕組みをFig. 3に示す。

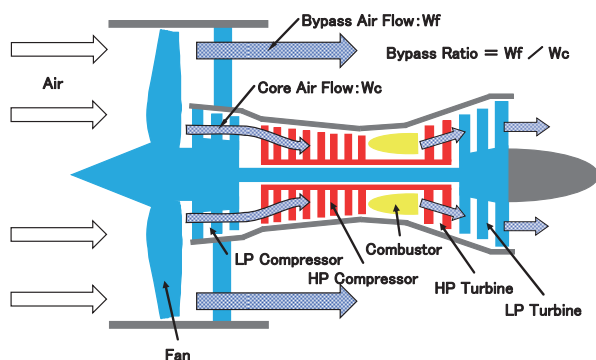


Fig. 3 Turbofan Engine and Bypass Ratio

ターボファンでは、エンジン最前部のファンから取り込まれた空気は、エンジン内部（コア部）の圧縮機を経て燃焼器へ導かれる空気と、バイパス部を通りファンからそのまま放出される空気の2つに分かれ、両者の流量比がバイパス比となっている。このバイパス部からの空気は、エンジン内部に比べ比較的低い排気速度を持つため、バイパス部の空気流量、すなわちバイパス比を大きくすることで推進効率の改善が図られてきた。その結果、一般的な高バイパス比ターボファンではバイパス部からの空気による推力が大部分を占め、7～8割がバイパス空気によって生み出されている。

またFig. 4に示すように、1950年代はターボジェットだったためバイパス比は0であり、ターボファンが出現した1960年代に1～2程度、高バイパス比ターボファンが出現した1970年代には5～6程度、2000年代以降に就航したエンジンでは10前後まで大きくなり、最新のPW1100G-JMやLEAPでは11～12程度まで大きくなってきている。なお、高バイパス比化は燃料消費率の改善

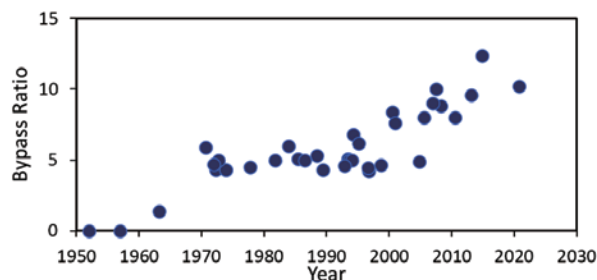


Fig. 4 Bypass Ratio of Civil Aircraft Engine

に貢献すると共に、バイパス部からの排気速度が比較的遅いことから、騒音低減にも大きく貢献している。

5.2 エンジン形態の進化

先に述べたバイパス比の増加は、エンジン形態の進化により成し遂げられている。初期のターボジェットでは1軸であったものが圧縮機の高圧力化に伴い2軸化したのが、1960年代に就航したJT3Dなどの低バイパスターボファンでは、この2軸ターボジェットをベースに、前方の圧縮機の一部の径を大型化しバイパス流を設けることでターボファン化を実現した。更に1970年代に就航したJT9DやCF6では、2軸のままバイパス部のファン径を更に大型化することでバイパス比5～6程度を達成する一方で、コア部の圧縮比不足を補うため低圧軸に低圧圧縮機を追加する形態が採用された。一方、ファンと同軸で回転する低圧圧縮機についてはファンと外径が異なるため、最適な回転数で回ることができず段数が増えてしまうため、JT9DやCF6と同時期に開発されたRB211では低圧圧縮機の部分を別の軸として独立させ、ファンとは異なる回転数で回る中圧圧縮機を導入した3軸形態が採用された。更にバイパス比を大きくするにあたり、ファンと低圧タービンの最適回転数ミスマッチへの対応が課題となる。2軸や3軸のターボエンジンでは、ファンのチップ周速は空力的な制限からある速度以上にはできず、ファンと同軸でつながれた低圧タービンは低速での回転を余儀なくされ段数の増加による重量増加を招いてしまう。この対策として、ファンと低圧タービン間に減速ギアを設け、ファン・低圧タービンをそれぞれの最適な回転数に調整し燃料消費率の改善を図ったものがGTF形態であり、PW1100G-JMではバイパス比は12にも達している。このようにバイパス比を大きくするにつれ、エンジン形態は進化しており、その代表的なエンジン形態をFig. 5に示す。

5.3 高バイパス比化に伴う軽量化

バイパス比を大きくすれば燃料消費率SFCは改善するが、ファン径が大きくなりエンジン重量が増すことになる。エンジン重量増は航空機にとって燃費が悪化することになるため、高バイパス比化と合わせファン部を中心に軽量化が図られてきた。1970年代に出現したバイパス比5～6程度の高バイパス比ターボファンでは、ファン径拡大に伴いファンブレード長に伴う翼振動を防止する

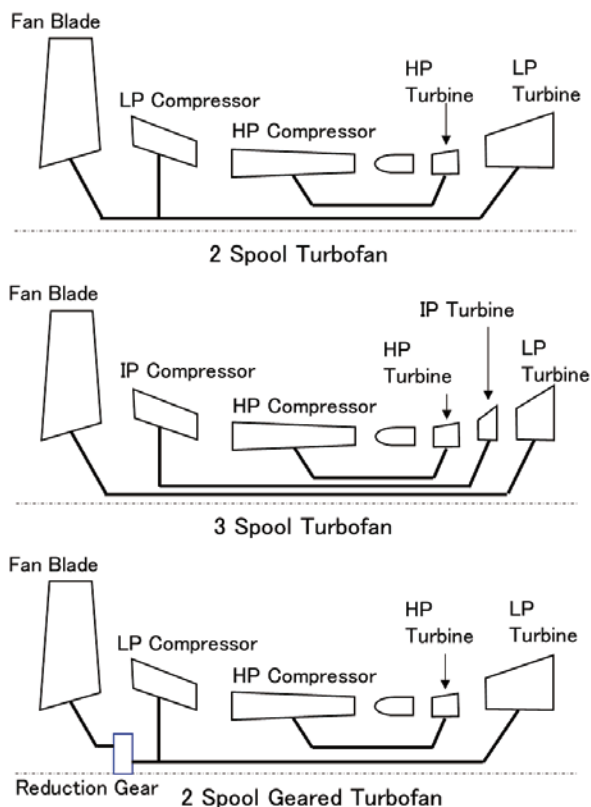


Fig. 5 Turbofan Architecture

ため、翼の中央部にスナバーと呼ばれる振動防止構造が採用されていた。このスナバーは重量以外にもファン効率等に悪影響を与えるため、1980年代以降のエンジンではスナバーを廃止したワイドコードブレードを採用するとともに、RB211やTrentシリーズ、PW4000などのエンジンでチタン等の金属製で中空構造のブレード（中空ブレード）を採用し重量軽減を図ってきた。一方、軽量の複合材（FRP）製のファンブレードも開発され、GE社では1990年代以降GE90をはじめとするエンジンに適用している。また空力技術の向上により、ファンブレードの枚数も少なくなり、例えば1970年代のCF6では38枚だったものが最新のGE9Xでは16枚になる²⁾など、軽量化に貢献している。ファンブレード以外の部品でも、アルミやチタンが使用されていたファンケースや出口案内翼に、複合材（FRP）が適用されるようになってきている。

6. 熱効率の向上

次に民間航空機用エンジンの熱効率の向上がどのように行われてきたのかを振り返る。熱効率の向上は主に圧縮機・タービン等の要素効率の向上に加え、全体圧力の高圧力化、タービン入口温度の高温化によって達成されてきている。

6.1 要素効率改善

まず圧縮機やタービン等の要素効率の改善は、翼形状の改良、3次元翼の導入、エンドウォールコンターなど

の非対称流路面形状の導入、チップクリアランスコントロールの導入、部品間の隙間からの漏れ空気低減などにより行われてきた。特に、翼形状の改良や3次元翼の導入や改良、非対称流路形状の導入において、CFD（Computational Fluid Dynamics）と呼ばれる数値流体力学の導入とその発展による影響が大きい。1960年代までは例えばNACA翼を使用して翼列を設計していたものが、CFDにより流れ場の状態を正確に把握して2次元流れによる損失を抑えた空力設計ができるようになってきている。1970年代では準3次元解析が行われるようになり、1980年代に単翼に対する3次元粘性解析が可能になり、その後複数の翼列を含めた全周非定常解析、現在では多段非定常解析や乱流を取り扱うLES（Large Eddy Simulation）解析、流体解析と構造解析を連成して行う翼振動応答解析など、大規模／統合型のCFDが実施可能となり、要素効率の改善が行われてきた。

6.2 全体圧力比

全体圧力比は、Fig. 6に示すように年々高くなってきており、最新のGE9Xでは60にも達する。

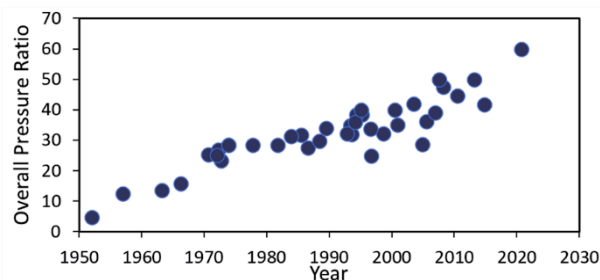


Fig. 6 Overall Pressure Ratio of Civil Aircraft Engine

一般的に1つの圧縮機で大きな圧力比を得ようとするとは低速低流量域で安定した作動領域を得るのが困難となる。そのため、1950年代のターボジェットや1960年代の低バイパス比ターボファンにおいて全体圧力比10を超えるようなエンジンが開発されるにあたり、圧縮機の2軸化、起動や加速時用の抽気弁の適用、圧縮機への可変静翼（VSV: Variable Stator Vane）の導入等が進められ、低速低流量域で安定した作動領域を確保するようになり、最新のエンジンでも使用されている。また全体圧力比を大きくするために単純に圧縮機の段数を増やすと軸方向に長く重量も増加するため、先に述べた空力技術の向上に伴い、段あたりの負荷も大きくし段数を抑えることで重量増の影響を抑えてきている。例えば、高圧圧縮機を比較すると1970年代のCF6-50では14段で圧力比が13だったものが、最新のGE9Xでは11段で圧力比が27となり、段あたりの高負荷化が達成されている。

6.3 タービン入口温度

熱効率改善のため、全体圧力比の向上と合わせてタービン入口温度の高温化も進められ、Fig. 7に示すように最新のものでは1700℃近くに達している。

このタービン入口温度の高温化は、高温耐熱材料の開

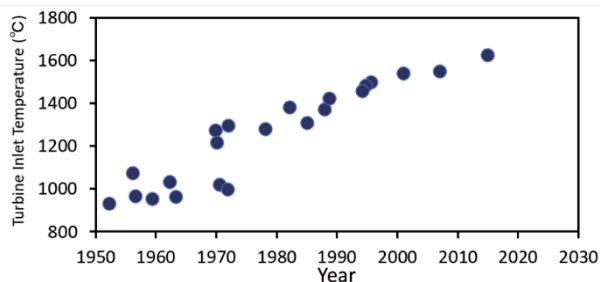


Fig. 7 Turbine Inlet Temperature of Civil Aircraft Engine

発・導入，タービン部品への冷却方法の導入と冷却効率の改善，耐酸化/耐熱コーティング導入およびそれらの組み合わせにより実現されてきた。

まず高温耐熱材料の開発・導入であるが，タービン翼を例に説明する。タービン翼の材料としては，主にニッケル基合金が使用されており，耐熱温度の向上のため，1960年代までは普通鋳造材が使用されていたが，1970年代より一方向凝固材（DS材）や単結晶素材（SC材）が開発・適用された。またニッケル基合金に加える金属の組成等を改良することで，SC材の中でも更に耐熱温度を上昇させた材料が次々に開発され，最新のエンジンでも使用されている。一方，ニッケル基合金の融点に近い温度域でも使用可能でニッケル基合金に対し比重が約1/3～1/4程度と軽く大幅な重量の軽減が図れるセラミック基複合材（CMC: Ceramic Matrix Composites）の開発が進められ，2010年代以降に開発されたLEAPやGE9Xといったエンジンにおいて高圧タービンのシュラウドや燃焼器パネル等に採用され，高温化や軽量化に貢献している。一方，現在のタービン入口温度は，材料の耐熱温度を大幅に超過しているため，高圧タービン部品を中心に部品の冷却と耐熱コーティング適用が行われてきた。

タービン部品の冷却では一般的にエンジンの圧縮機から抽気した空気を使用して冷却を行うため，冷却空気が増加すると燃費が悪化してしまう。このため，少ない冷却空気でも効率よくタービンを冷却する方法の開発が行われてきた。Fig. 8にタービン冷却技術と冷却効率の改善の動向を示す。図中の曲線は熱交換効率が一定とした場合の冷却空気量と冷却効率の関係を示しており，冷却方法の改善とともに冷却効率の改善が図られてきてことが分かる。タービン翼冷却は，1960年代に翼の内部に単純な空洞を設けその中に冷却空気を流す冷却方法が開発・導入されたのが始まりで，1970年代や1980年代に翼の内部に組み込まれたインサートに設けられた孔からの噴流を翼内面に衝突させ冷却するインピンジメント冷却（噴流衝突冷却）やフィンやピンなどの乱流促進体を備えた内部流路が導入され，熱交換効率の向上による冷却効率の向上が図られた。更に1980年代後半から翼面に設けられた孔から冷却空気を出し熱源からの熱流束を遮断するフィルム冷却が導入され，フィルム冷却自体も冷却孔の

配置や冷却孔形状の最適化が行われ冷却効率の向上が図られてきた。また現在ではインピンジメント冷却などの内部冷却とフィルム冷却の組み合わせが広く使用されており，冷却効率は大幅に向上している。

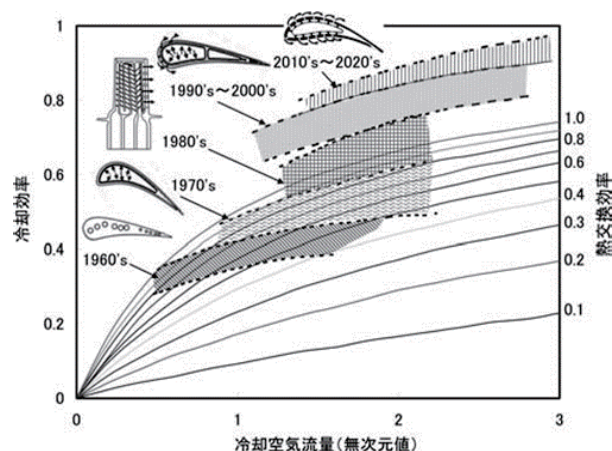


Fig. 8 Improvement of cooling technology of aircraft engine⁽³⁾

一方，耐熱コーティングは，タービン入口温度がそれほど高くはなかった1950年から1960年代の頃は主に耐酸化のためにCrやAlの拡散コーティングであるクロマイジングやアルミナイジングが適用されていたが，1980年代になって熱遮蔽効果を狙いトップコートとボンドコートの2層からなる熱遮蔽コーティング（TBC: Thermal Barrier Coating）が施されるようになりタービン入口温度の高温化に大きく貢献している。トップコートには熱遮蔽効果を目的としたセラミックスコーティングでY2O3を固溶させたイットリア安定化ジルコニア（YSZ: Yttria-Stabilized Zirconia）が，またボンドコートにはセラミックコーティングと金属の母材との剥離防止や母材の酸化防止を目的としてPt-アルミナイジングやMCrAlY（MはNi, Coあるいはこれらの合金）が一般的に使用されている。

7. 環境適合性の向上

技術面における発展の3点目として，環境適合性の向上，特に騒音及び排ガスNO_xの改善について振り返る。

7.1 騒音の低減

騒音規制は国際民間航空機関（ICAO: International Civil Aviation Organization）により規制値が定められ，現在は通称Chapter14と呼ばれる規制値が導入されている。Fig. 9にエンジン騒音発生源の変化及び機体の騒音低減の動向を示す。民間航空機用エンジンが運航開始された1950年代は，ターボジェットや低バイパス比ターボファンが主流であったため，ジェット騒音が大きな割合を占めていた。これに対し，燃料消費率改善のためエンジン形態が高バイパス比化するに伴い，比較的流速が遅いバイパス空気の量が推力の大部分を占めるようになり，ジェット騒音が低減され，全体の騒音が低減さ

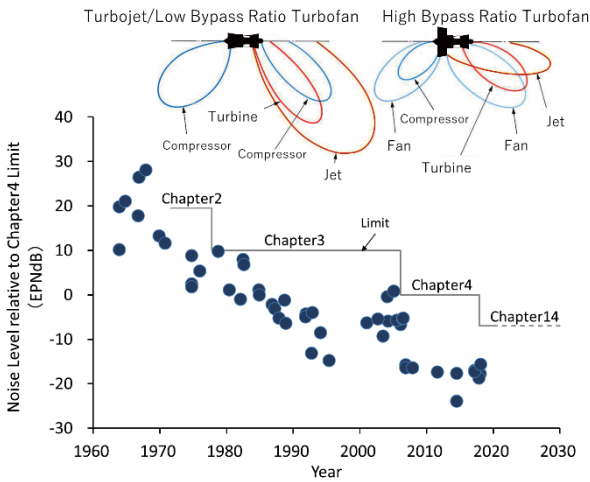


Fig. 9 Engine Noise Source and Noise Level of Civil Aircraft

れてきた。またジェット騒音が小さくなり、ファン部からの騒音（ファン騒音）が全体に占める割合が増えようになったが、ファン騒音についても、ファンケースやナセル、ファンダクトへの吸音ライナーの適用、ファンブレードへのスウェプト翼の採用、ファン動翼・静翼枚数比・間隔の最適化、ファン出口静翼のリーン翼の採用・形状の最適化、インテークの吸音ライナーの周方向分割数の削減等により低減が図られてきている。一方、最新のGTF形態のPW1100G-JMではファンブレードのチップ周速が抑えられており、更なるファン騒音低減に貢献、騒音レベルが抑えられている。

7.2 排気ガス・NOxの改善

次に環境適合性の向上として、NOxに対する規制値と排出量の動向をFig. 10に示す。NOx排出量の規制値はICAOにて1981年に策定・合意され1986年度より適用されたのが最初で、規制値も徐々に厳しくなり、CAEP/8と呼ばれる最新の規制値は2010年に策定・合意され、2014年より適用されている。これら規制値の強化に合わせ、燃焼器は燃料噴射方法や燃焼方法を改善することで徐々にNOx排出量が改善してきており、現在では2段燃焼や希薄予混合燃焼が主に採用されている。2段燃焼としてはRQL (Rich burn, Quick mix, Lean burn) と呼ばれる方式があり、これは1次燃焼領域で燃料過多の状態を冷却空気等により急速に希薄化し、希薄状態にて2次燃焼を行うことで、NOxの低減を狙ったものである。1980年代に開発・就航したエンジンから徐々に適用され始め、最新のPW1100G-JMやTrent XWBなどのエンジンにおいても改良されたRQL方式の燃焼器が適用されている。一方、希薄予混合燃焼は、パイロットステージで火炎を安定させる一方、メインステージの希薄燃焼により低NOxを達成し、幅広い作動域を確保することを狙ったものである。この方式の1つとして、メインステージとパイロットステージを外側、内側にそれぞれ配置したダブルアニュラ燃焼器 (DAC: Dual Annular Combustor) があり、1990年代に

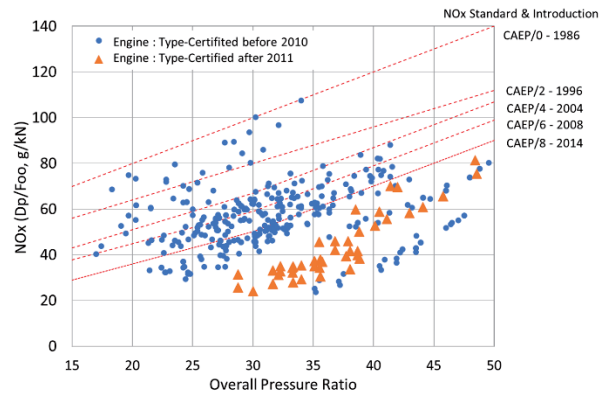


Fig. 10 NOx emission of Civil Aircraft Engine

就航した一部のGE90やCFM56に適用されている。更にTAPS (Twin Annular Pre-mix Swirl) と呼ばれる1つの燃料ノズルでパイロットとメインのステージングを行う希薄予混合燃焼器が実用化されており、2000年代に開発・就航したGEnxに搭載され、その後最新のLEAPやGE9Xにも導入され、NOx排出量の低減が図られている。

8. 今後の展望

ここまで述べてきたように民間航空機用エンジンの歴史は、安全性・信頼性、経済性、環境性の改善が常に図られてきた歴史であると言える。また、その市場は、1980年代から始まったオープンスカイなどの航空自由化の動きやそれに伴うLCC (Low Cost Carrier) の出現等により拡大し、リーマンショック等による一時的な落ち込みはあったものの年々拡大してきた。最近では世界的に流行した新型コロナウイルス (COVID-19) の蔓延によりここ2、3年間旅客需要が落ち込んでいるが、2024年頃には回復しその後も世界のGDPの伸びに応じて伸びていくと予想されている。また貨物需要も大きくこちらも今後も拡大していくと考えられている。

一方、このように今後も旅客・貨物共に航空需要の拡大が見込まれる状況下であるが、昨今の地球温暖化防止の観点から航空輸送も例外ではなく、温室効果ガスであるCO₂排出量を削減することが求められている。Fig. 11に示すように航空輸送に伴うCO₂排出量は総排出量

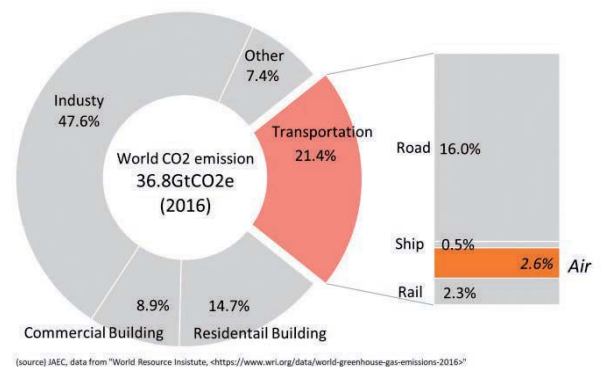


Fig. 11 World CO₂ emission

の3%以下に過ぎないが、輸送物単位あたり（例えば旅客1人あたり）の排出量で比較すれば決して小さくはないため、「飛び恥」などの批判を受けることになる。2021年には国際航空輸送機関（IATA: International Air Transport Association）にて、また2022年10月にはICAOにて、2050年までに年間のCO₂排出量を実質ゼロにする野心的な目標が採択された^{(4),(5)}。この挑戦的な目標はどのように達成できるのだろうか。

最初に運航時におけるCO₂排出量がゼロとなる全電動航空機や水素燃焼航空機の可能性を考えてみる。航空機の推進システムは動力発生源とエネルギーキャリアに分けて考えることができ、Fig. 12に現在の航空機と全電動航空機や水素燃焼航空機の推進システムの比較を示す。

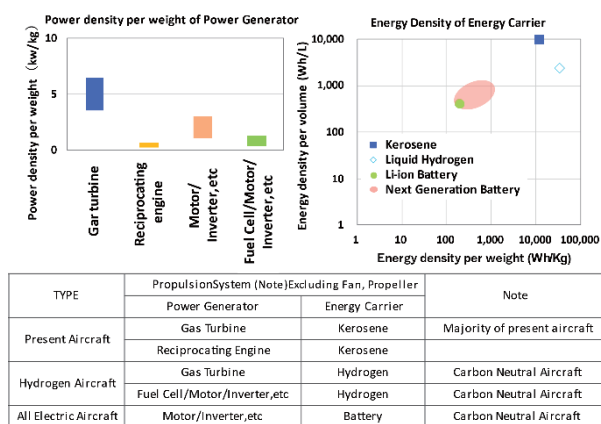


Fig. 12 Comparison of Propulsion System

全電動航空機において、ガスタービンに相当する動力発生源はモーター/電装品（インバーター等）、化石燃料（ケロシン）に相当するエネルギーキャリアは電池になる。将来的に改善は進むと思われるが現状モーター/電装品の重量出力密度はガスタービンのそれより小さく、動力発生源として重くなってしまふ。エネルギーキャリアについても、実用化されているリチウムイオン電池の重量及び体積エネルギー密度はケロシンの1/40～1/60程度しかなく、開発が進められている次世代電池（固体電池等）でもケロシンの1/10～1/20程度にしかない。このためモーター/電装品の効率がガスタービンより仮に2倍良いとしてもケロシンと同じ重さ・体積の電池しか機体に搭載できない場合、航続距離はリチウムイオン電池の場合で1/20～1/30に、次世代電池でも1/5～1/10に低下してしまう。このため、電池のエネルギー密度の更なる向上がなければ、全電動航空機は大型・長距離の航空機には適用するのは難しいと考えられる。他方、水素燃料航空機において、動力発生源は燃料電池/モーター/電装品の組合せ又はガスタービン、エネルギーキャリアは水素になる。エネルギーキャリアの水素はケロシンに対し重量エネルギー密度が約3倍あり軽量となるが、一方で液体水素の状態でも体積エネ

ギー密度が1/4倍となる。仮に水素航空機で動力発生源としてガスタービンを使用し、同じエネルギーを機体に搭載しなければならぬ場合、現行の4倍もの燃料タンクが必要となる。タンクが大きくなると、搭載貨物や客席数を減らす、または機体を大きくするなどの対応が必要となり、水素燃料航空機についても、大型・長距離の航空機への適用は困難であると考えられる。加えて、全電動航空機や水素航空機の実用化に向けた技術的課題解決にまだ時間がかかる見込みであること、電気や水素の製造や供給を行うためのインフラ整備も必要になっていることから、全電動航空機や水素航空機は小型・短距離の航空機から徐々に実用化・運用されると予想されるが、2050年末までのCO₂排出量を実質ゼロにする目標達成の決定打にはならないと思われる。

一方、CO₂排出量をゼロにするために、ケロシンの代わりに持続可能な航空燃料（SAF: Sustainable Aviation Fuel）と呼ばれる代替燃料を使用することも議論されている。SAFは都市ごみ、廃食油、廃材、食物、微細藻類等を原料として製造された燃料であり、使用時に排出されるCO₂の量はケロシンと変わらないが、その原料製造過程においてCO₂を吸収していることからCO₂排出量を大幅に減らす燃料と考えられている。但し、その供給量は現状では航空機に必要な燃料の0.1%にも満たず⁽⁶⁾、製造能力の拡大も急がれるとともに、SAF製造に必要な原料を十分確保できるか懸念がある。そのため空気中から回収したCO₂と水を電気分解して得られた水素から工業的に燃料を作り出すPTL（Power To Liquid）と呼ばれる合成燃料も議論されているが、その製造技術も開発途上にあり十分な燃料を供給できるようになるか未知な部分が多い。更にSAFの価格も現状ケロシンと比べ数倍高く、価格低減が必要となっている。

こういったCO₂排出量をゼロにする技術特性や開発動向を考慮すると、2050年までにCO₂排出量を実質ゼロにする目標を達成することは一朝一夕にはできないことがわかるだろう。このような状況において、将来の航空輸送はどのように変わっていくのだろうか。考えられる幾つかのシナリオのイメージ図をFig. 13に示す。

第1のシナリオは、CO₂排出量ゼロを達成する小型・短距離の全電動航空機や水素燃料航空機のみを使用し、大陸間横断など長距離移動が必要な場合でも、その小型・短距離の航空機を乗りついで移動していくものというものである。第2のシナリオは、ガスタービンを搭載した航空機に燃料としてSAF（含むPTL）を使用し、従来通りの運用を続けるものである。第3のシナリオは、第1及び第2のシナリオの組合せで小型・短距離は全電動航空機や水素燃料航空機、大型・長距離はガスタービン+SAFというように、航空機の特性に合った推進システムを使用するシナリオである。第4のシナリオは、炭素税の導入や高額なSAF使用等による航空輸送コストの大幅な上昇やCO₂排出する輸送機関での移動を避

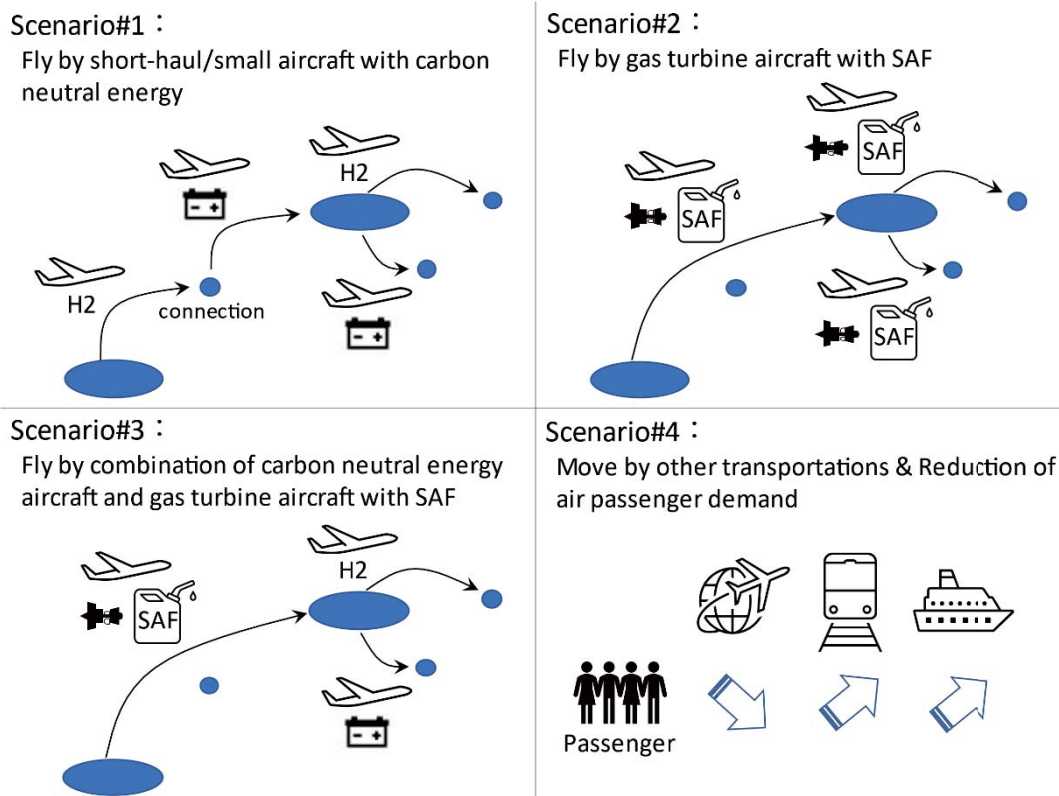


Fig. 13 Scenario of Future Air Transport

ける風潮の拡大などにより、他のカーボンニュートラルを達成する輸送機関への需要シフトが起り、将来の航空需要が想定とは異なり大幅に小さくなるシナリオである。

これらのシナリオを考えた場合、第4シナリオはCO₂排出量削減のために航空需要を大幅に減少することになるが、経済活動の観点から長距離の航空機による人の移動や貨物輸送の需要を大きく抑え、他の輸送機関で置き換えることは難しいと思われる。他方、第1のシナリオについては、現在の長距離航空機での移動から短距離の航空機を乗りついでいく移動に移行できるのか、想定される航空需要を満足するだけの電気や水素を供給できるのかなどの懸念があり、これも現実的には難しいと思われる。更に第2のシナリオについてもSAFの供給量の懸念から現実的ではないと思われる。結果として、第3のシナリオにならざるを得ないと思われ、実際IATAにて採択された2050年までにCO₂排出量を実質ゼロにする目標においても、全電動航空機や水素燃料航空機などの新技術導入による排出量削減、SAFの使用拡大による排出量削減、運航方法・インフラ等の改善による排出量削減、CORISIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) といった排出権取引などの経済的手段の活用を組み合わせ、その目標を何とか達成しようとしている。但し、IATAのシナリオでもSAFの使用拡大によるCO₂排出量削減は大いに期待されているが、これまで述べたようにSAF供給量や価格の懸念が大きいいため、今後もガスタービンエンジン

の燃費を改善することは重要だと考えられる。また水素燃料航空機の動力発生源の1つとしてガスタービンも考えられている。このため、今後も民間航空機用の推進システムとしてガスタービンエンジンが引き続き必要で、その効率改善のため推進効率改善や熱効率の向上に取り組んでいく必要があると言える。

ガスタービンエンジンの熱効率向上については、従来と同様に、要素効率の向上や全体圧力比の高圧力比化、タービン入口温度上昇等を実現するための技術開発や、ガスタービンと電池のハイブリッド化による熱効率の改善を狙った推進システム形態の研究開発も世界の研究機関やエンジンOEMにて精力的に進められている。またMTU Aero Engines社では産業用ガスタービンにおけるコンバインドサイクルのようにターボファンからの排熱を水蒸気で回収して熱効率を改善するWET (Water-Enhanced Turbofan) と呼ぶエンジン形態も検討されている⁽⁷⁾。

一方、推進効率改善に向けても幾つかの形態が検討されている。GTF形態のファン径を拡大し更に高バイパス比化する形態の他に、GE社/SAFRAN社の合弁企業であるCFMI社ではRISE (Revolutionary. Innovation for Sustainable Engines) という研究開発プログラムの中でオープンファンという形態を検討している⁽⁸⁾。これはダクトに覆われたファンの代わりにダクトなしの可変ピッチ機構を有する大型のファン動翼とファン静翼を備えた形態のエンジンで、1980年代より研究開発が行われた2重反転ファンを持つオープンローター形態からその

2重反転による構造の複雑さを減らし大幅なバイパス比増による推進効率改善を狙う形態になっている。他には、ガスタービンからの軸出力でファンを直接駆動するのではなく、ガスタービンからの出力を一旦電気に変換し複数のモーターでファンを駆動させることで1つ当たりのファン径を抑え高バイパス比化を行うターボエレクトリックと分散ファンを組み合わせた形態、更にそこに機体構造も変更し機体周りの境界層を吸い込み推力が向上させるBLI (Boundary Layer Ingestion) を組み合わせた形態なども議論されている。いずれの形態も機構が複雑となるだけでなく、推進システムの機体への搭載方法の変更、機体形状の変更等が必要となるため、推進システム及び機体システムを一体化した検討が必須となるだろう。

なお、本稿では紙面の関係で十分に議論できなかったが、今後のガスタービンエンジンを含む推進システムを検討する際、使用時だけでなく、製造時や整備時、廃棄時におけるCO₂排出量も考慮したライフサイクルでのCO₂排出量を考慮していく必要がある。先にみてきたように民間航空機用エンジンには様々が材料（鍛造材や鋳造材、FRPやCMCなどの複合材）やコーティングが使用されており、それらの製造には大量のエネルギーが必要でCO₂が排出される。また整備時に交換される部品の製造時もCO₂が排出される。このため、使用時だけのCO₂排出量を削減しても、製造時や整備時のCO₂排出量が増加し、ライフサイクルでのCO₂排出量が増加してしまうのであればカーボンニュートラルを目指す上で意味がなくなってしまうため、今後の推進システムの検討においてはライフサイクル視野での評価が必要となると考えられる。そのためには技術者同士のライフサ

イクルでの視野や評価基準を整えることから始める必要がある、この点における学会を中心にした活動が求められている。

参考文献

- (1) 一般財団法人日本航空機開発協会, 令和3年度版民間航空機関連データ集YGR-0219 (2022), pp II-18
- (2) GE Aerospace, GE9X engine
<<https://www.geaerospace.com/propulsion/commercial/ge9x>> (accessed on 30 November, 2022)
- (3) 大北洋治, “航空エンジンにおける冷却技術の動向”, 日本ガスタービン学会誌Vol. 38 No. 3 (2010), pp. 12-20
- (4) International Air Transport Association, Pressroom,
<<https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/>> (accessed on 30 November, 2022)
- (5) International Civil Aviation Organization, News Room
<<https://www.icao.int/Newsroom/Pages/States-adopts-netzero-2050-aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx>> (accessed on 30 November, 2022)
- (6) ATAG, Waypoint 2050, Second Edition,
<https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf> (accessed on 30 November, 2022)
- (7) MTU Aero Engines, Water-enhanced turbofan
<<https://www.mtu.de/technologies/clean-air-engine/water-enhanced-turbofan/>> (accessed on 30 November, 2022)
- (8) CFM International, CFM RISE Program
<https://www.cfmaeroengines.com/wp-content/uploads/2021/07/CFM_RISE_Whitepaper_Media.pdf> (accessed on 30 November, 2022)

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン・蒸気タービンの半世紀の歩みと今後の展望【技術】

防衛装備庁における航空用ジェットエンジンの研究開発

Research and Development of Aero Jet Engines at ATLA

平野 篤*¹
HIRANO Atsushi

宮入 嘉哉*¹
MIYAIRI Yoshiki

山根 秀公*¹
YAMANE Hideaki

高村 倫太郎*²
TAKAMURA Rintaro

キーワード：防衛装備庁，航空装備研究所，千歳試験場，防衛用ジェットエンジンの歴史

Key Words：ATLA (Acquisition, Technology and Logistics Agency), ASRC (Air Systems Research Center), CTC (Chitose Test Center), Japanese Defense Jet Engine R&D History

1. 緒言

我が国の航空用ジェットエンジンの開発史において最初に製造されたのは、終戦間際の昭和20年8月に初飛行した「橘花」に搭載された「ネ20」の1軸ターボジェットエンジンである。ネ20は当時の海軍航空技術廠（空技廠）が中心となって軍民一体となってわずか1年で初飛行までこぎ着けた。戦後、昭和29～35年にかけて開発された国産ジェット練習機「T-1」に搭載された国産ジェットエンジン「J3」の開発は難航を極め、立川試験場（現在の航空装備研究所）では日々耐久試験を繰り返し改良したとある。J3開発時の多くはネ20に関わっていた空技廠及び国内企業の関係者であったと記録が残っている。

それから56年後の平成28年に国産初のステルス機である先進技術実証機「X-2」が初飛行を行った。X-2に搭載された実証エンジン「XF5-1（以下「XF5」と言う。）」については、平成7年から研究が開始され、22年の歳月により初飛行を迎えた。X-2の初飛行時の離陸でXF5のアフターバーナが安定燃焼する様子を見て、半世紀後でも我が国の航空用エンジンの技術力が高いことが実証できたと感じたものである。航空用のジェットエンジンは、技術者の英知の結集品である。

本稿では、防衛装備庁の航空用ジェットエンジンに関する研究部門，開発実績，研究施設，最新研究，将来新技術の研究を紹介する。

2. 防衛装備庁の航空用ジェットエンジン研究部門

2.1 航空装備研究所

防衛装備庁における自衛隊の航空機及び誘導武器の研究並びに試験評価は、東京都立川市の陸上自衛隊東立川駐屯地内にある航空装備研究所で行っている。航空装備

研究所は昭和33年に防衛庁技術研究本部第3研究所（通称：3研）として設置され、機体・エンジン・誘導武器の3部門で研究を行っていた。平成18年に防衛庁技術研究本部航空装備研究所（通称：航装研）へ名称を変更し、その後、平成27年には防衛装備庁の発足により防衛装備庁航空装備研究所と改編された。航装研内には、航空機技術研究部，エンジン技術研究部，誘導技術研究部があり、エンジン技術研究部は、エンジンシステム研究室，エンジン先進要素研究室，エンジン制御研究室，ロケットエンジン研究室から構成されている。

2.2 千歳試験場

防衛装備庁千歳試験場は、北海道千歳市の東部，駒里地区に所在し、陸上車両の走行試験等を行う車両定地試験施設（敷地面積約80万m²）と、航空機及び誘導弾の風洞試験とエンジン試験を行う空力推進研究施設（敷地面積約27万m²）から成る（Fig. 1）。



Fig. 1 Overview of CTC
(Chitose test center aero-dynamics & propulsion test facility)

千歳試験場は、昭和32年に防衛庁技術研究所札幌試験場として札幌市丘珠に開設された。その後昭和45年に札幌市真駒内に庁舎を移転し、東千歳地区は昭和58年より車両定地試験施設，平成3年より空力推進研究施設の整備を開始した。平成16年には真駒内から東千歳地区に完

原稿受付 2022年11月15日

*1 防衛装備庁航空装備研究所
〒190-8533 立川市栄町1-2-10

*2 防衛装備庁千歳試験場
〒066-0011 千歳市駒里1032

全移転し、平成17年に車両定地試験施設及び空力推進研究施設が完成した。平成27年には防衛装備庁の発足により防衛装備庁札幌試験場に改編され、平成30年4月に防衛装備庁千歳試験場に名称変更した。

千歳試験場の空力推進研究施設は、3つの主要な試験装置を保有している。一つ目はラムジェットエンジンの燃焼試験を行う燃焼風洞装置、二つ目はジェットエンジンの高空試験を行うエンジン高空性能試験装置(Altitude Test Facility: 以下「ATF」と言う。), 三つ目は航空機及び誘導弾の風洞試験を行う三音速風洞装置である。これらに加えて新設の試験装置としてジェットエンジンの地上試験を行う大型エンジン試験場が建設中であり、令和5年の竣工を予定している。

千歳試験場には3つの試験班が置かれており、空力推進研究施設としては第2試験班が燃焼風洞装置と三音速風洞装置、第3試験班がATFを担当している。

3. 防衛装備庁におけるジェットエンジン開発実績

防衛装備庁におけるジェットエンジン研究開発の歩みをFig. 2に示す。航空自衛隊のT-1中等練習機とそれに搭載されるJ3エンジンの機体とエンジンの同時開発から3四半世紀余りが経過する中、J3、F3、F7及びTS1が自衛隊機向けに量産され、日本の安全保障に貢献している⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

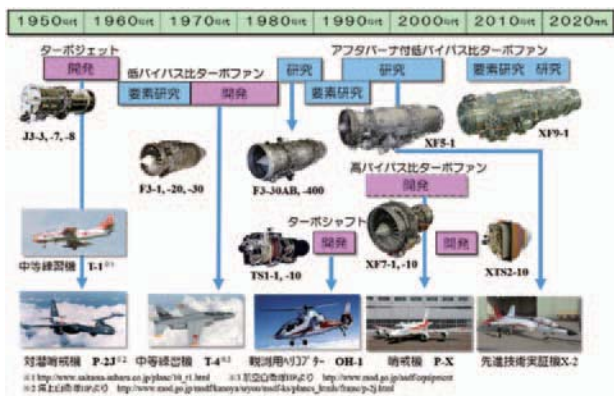


Fig. 2 Research and development of aircraft engine at ATLA

3.1 戦闘機用エンジンの半世紀

我が国は、戦闘機の国産または国際共同開発の実績を有するものの、これまで戦闘機用エンジン開発の機会には恵まれなかった。戦闘機用エンジンに関する研究としては、小型のアフターバーナ付ターボファン(XF3-400)⁽⁴⁾の地上性能を実証した。続いて、高い推重比(推力重量比: 最大推力/重量)や優れたディストーション耐性を実現するための要素研究に着手し、リグ試験等の成果を反映したXF5⁽⁵⁾について、予備飛行定格試験(PFRT)、機体・エンジン適合性確認等のシステム・インテグレーション、及び飛行試験を実施して技術を蓄積してきた。その結果、大型の戦闘機用エンジンに関し

て平成22年に要素研究を開始し、平成30年から実施したXF9-1プロトタイプエンジン(以下「XF9」と言う。)の試験において最大推力15トン等を達成している。

2010年代~2020年代の戦闘機用エンジンに想定される性能を、機体の加速・運動性能に関わる推重比と航続性能に関わる燃料消費率(以下「SFC」と言う。)の動向を基に検討する。Fig. 3に、国産エンジンを含めた世界の戦闘機用エンジンの推重比の傾向を示す。年代を経るに従い推重比はゆるやかな増加の傾向を見せており、本傾向を前提とすれば、2010年代~2020年代の推重比は点線の領域にあると判断された。

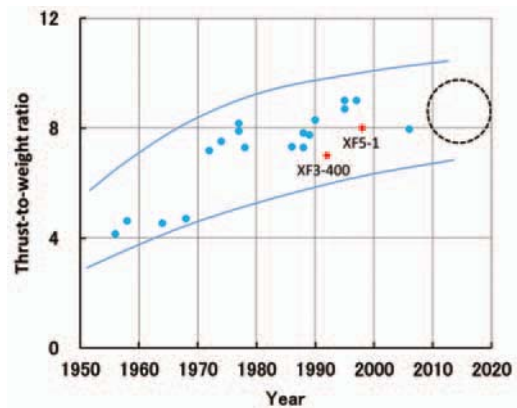


Fig. 3 Trend of thrust-to-weight ratio of fighter engine

次に、ミリタリー推力(アフターバーナ非作動での最大推力)でのSFCの傾向をFig. 4に示し、同じデータをバイパス比(バイパスダクトを通過するバイパス側空気の質量流量の、燃焼器を通過するコア側空気の質量流量に対する割合)に対し整理したものをFig. 5に示す。

Fig. 4において、ターボファンとなった1970年代以降について明確な傾向は見られないが、Fig. 5では、高バイパス比側が低SFCとなる傾向が現れていて、理論予測の傾向に符号する。SFCにはエンジン構成要素の効率が反映されるため、低SFCは高効率を意味するが、サイズ的に制約のある戦闘機用エンジンでは推重比との両立が肝要である。XF5は、時系列的にはFig. 5の分布の高SFC側にあるが、バイパス比を考慮した燃費性能は平均

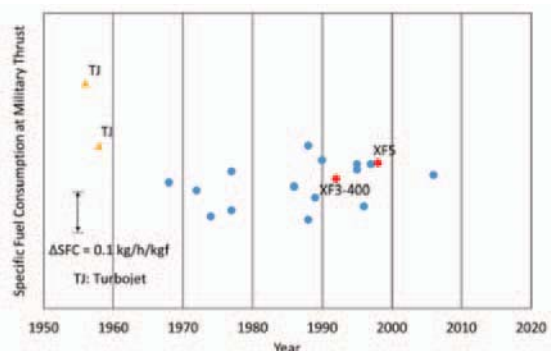


Fig. 4 Trend of SFC at military thrust of fighter engine

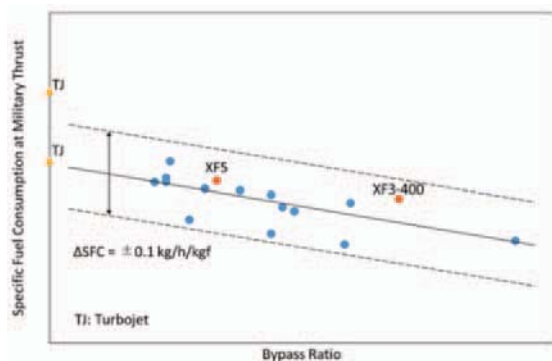


Fig. 5 Relation of SFC at military thrust to bypass ratio of fighter engine

並であり、さらにエンジン規模が小さいという技術的難易度を考慮すれば、諸外国のエンジンに比肩するといえる。

各エンジンのバイパス比は飛行条件や作動状態によって変化するが、相対的に高バイパス比側は低SFCであり、亜音速巡航重視といえる。他方、低バイパス比側は高比推力となり、断面積がスリムで超音速重視のエンジンということになる。熱サイクルが固定されている通常のエンジンでは、こうした特性を飛行中に変更することはできず、構想検討の段階での諸元設定が重要となる。

以下、XF5とF7について最近の状況を紹介する。

3.2 XF5 (低バイパス比ターボファンエンジン)

XF5のPFRTは平成20年度に完了した。その後、平成21年度からX-2搭載用として飛行試験 (FT: Flight Test) 用FTエンジン3台、加速ミッション試験 (AMT: Accelerated Mission Test) 用にAMTエンジン2台を製造し、初飛行に向けた機体・エンジン適合試験、加速ミッション試験を実施した。

AMTではX-2の飛行試験期間中にオーバーホールすることがなく飛行試験が可能となるように飛行ミッションプロファイルに基づく地上セルでの加速ミッション運転を実施し、AMTエンジン2台を用いて必要なオーバーホール間隔 (TBO: Time Between Overhaul) を確認した。

機体適合性としては千歳試験場ATFを用いて機体側が準備した機体補機駆動装置 (AMAD) に接続されるスタータ、発電機、油圧ポンプをXF5と接続し、空中再始動可能領域の確認、ディストーション耐性の確認、アフターバーナ安定作動領域の確認 (Fig. 6) などを行った。

X-2は推力偏向パドルを搭載した高運動機であり、高空・低速側でのエンジン作動が求められたため、多くの時間をかけてATFで必要なデータを取得した。機体・エンジン共に初飛行に向けて十分なデータが取得でき、ATFの有効性をあらためて認識させられた。その後FTエンジンはX-2に2発搭載され、平成28年4月に初飛行に成功した⁽⁶⁾。

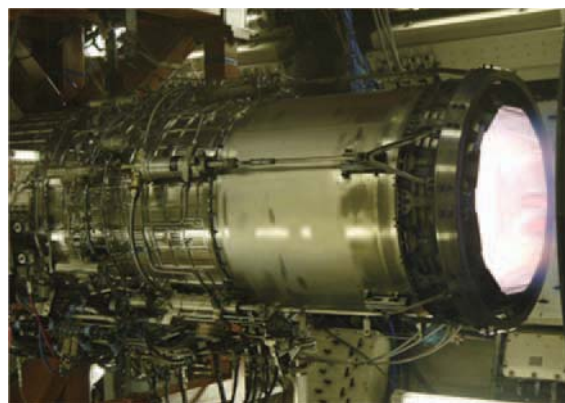


Fig. 6 XF5 afterburner test at CTC ATF

3.3 F7 (高バイパス比ターボファンエンジン)

F7については防衛装備庁における開発・試験評価⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾の後、海上自衛隊P-1哨戒機に4発搭載され、平成25年度から運用されている。

これまでの防衛用ジェットエンジンは国内運用を前提に開発されてきたが、今後自衛隊機の海外展開など多様な環境下で運用される可能性があるため、航装研では腐食・エロージョンへの耐性を向上する技術としてF7使用材料のテストピース等を用いたジェットエンジンの耐環境性向上技術の研究を進めている。

また、防衛装備庁では開発装備品の民間転用を進めており、平成28年12月には宇宙航空研究開発機構 (JAXA) へのF7の民間転用契約を製造会社のIHIと共に結んでいる^{(10),(11)}。JAXAでは国産ジェットエンジンであるF7を活用した研究活動を通して、我が国の航空用ジェットエンジン技術力の向上を目指しており、防衛装備庁としても技術成果の展開を期待している。

4. 防衛装備庁におけるジェットエンジン研究施設

4.1 航空装備研究所

航装研内のジェットエンジン研究施設としては、エンジン研究センター、原動機試験場、原動機構造強度試験場などがあり、各種エンジン試験の評価に使用している。

このうち、原動機試験場 (Fig. 7) は主として小型の



Fig. 7 Engine test cell of ASRC

航空機用原動機（ターボジェット、ターボファン、ターボシャフトエンジン等）の性能確認試験、耐久試験等を実施するための試験施設であり、昭和33年に完成した航装研内で最も歴史のある研究施設である。当該施設は2つのテストセルを備えており、供試エンジンを2台同時に試験をすることが可能である。

テストセルの性能としては空気流量約80kg/sまでのエンジン運転が可能である。使用実績としてはJ3, F3, TS1, XTS2¹²⁾と我が国の防衛用ジェットエンジン開発の一翼を担ってきている。ただし近年、周辺の都市化に伴い、低騒音の小型エンジンに限った使用をしており、大型エンジンについては主に製造会社の運転設備や千歳試験場を使用している。

エンジン研究センター内には防爆試験装置や燃料ポンプ試験設備などがあり、原動機構造強度試験場には大型・小型のスピン装置 (Fig. 8) があり、XF5, F7, TS1等の開発時の部品・補機試験で使用されている。



Fig. 8 Engine spin test equipment of ASRC

4.2 千歳試験場

千歳試験場のジェットエンジン研究施設は、既存のATFと、令和5年竣工予定の大型エンジン試験場（建設中）がある。

ATFでジェットエンジンの高空性能試験を、大型エンジン試験場で地上試験を実施することにより、令和5年以降はジェットエンジンの研究開発に必要なエンジン試験の大部分を千歳試験場で実施できるようになる。

ATFは平成5年度から平成12年度までの8年間に亘って建設された。またこの施設が必要とする最大電力を供給するために、8,000 kWの発電能力を持つ発電棟が別途、空力推進研究施設の敷地内に建設された。

ATFの規模¹³⁾を示す主要なパラメータである最大空気流量は約70 kg/sで、これは小型戦闘機を想定した推力5トン級のアフターバーナ付低バイパス比エンジンの空気流量に相当する。最大模擬速度は2.5Mach、最大模擬高度は75 kftで、これらも小型戦闘機の飛行エンベロープを包含する能力に相当する。ATFの装置能力をTable 1に、試験エンベロープをFig. 9に示す。

ATFは大規模な試験装置であり、ATFを構成する各

Table 1 Specifications of CTC ATF

Maximum Air Flow Rate	Approx. 70 kg/s
Thrust	Max. 7,000 kgf
Test Mach No.	Max. 2.5
Test Altitude	Max. 75 kft (approx. 23 km)
Test Temp.	-72 ~ 270 °C (Inlet)
Test Pressure	7.5 ~ 244 kPa (Inlet) 3.5 ~ 101.3 kPa (Chamber)
Connection Type	Direct Connect

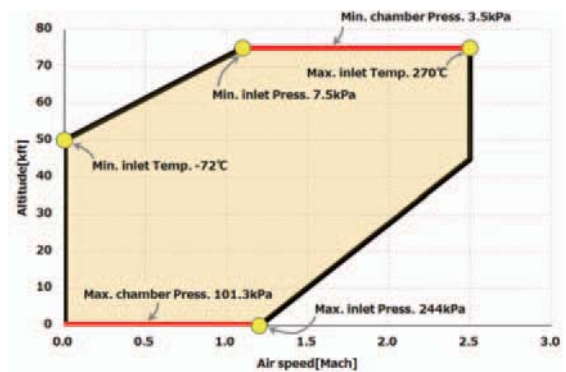


Fig. 9 Envelope of CTC ATF

装置は複数の建屋に設置され、配管で結合されている。ATFの全体図と作動空気の流れをFig. 10に示す。

作動空気の一番上流には、LM1600ガスタービンとこれにより駆動される圧縮機のユニットが2つあり、2台並列運転時に最大約70 kg/s、圧力約700 kPaの圧縮空気が供給される。作動空気は次に、吸気冷却器（水冷却及びブライン冷却）と吸気加熱器（灯油燃焼）によって所要の温度に調整される。吸気冷却器は-30°Cまで冷却可能で、これ以下の温度に設定する場合には液体空気（-194°C）が注入される。作動空気はプレナムチャンバーでハニカムにより整流された後、ベンチュリで流量を計測してテストチャンバーに供給される。エンジンの排気はアフターバーナ作動時で最大約1,800°Cに達し、煤も発生するが、その下流にある排気冷却装置で50°C以下に冷却されて煤も除去される。作動空気は最後にLM2500ガスタービン1基とこれにより駆動される圧

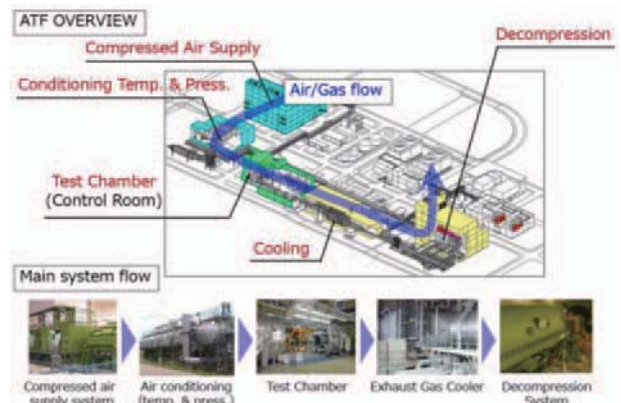


Fig. 10 Overview and main system flow of CTC ATF

縮機2台によって大気圧まで昇圧され、排気塔から排出される。

Fig. 11にテストチャンバーの概要図を示す。テストチャンバーの寸法は長さ約12 m、直径約4 mで、戦闘機用エンジンではF100 (F15戦闘機), F110 (F2戦闘機), XF9, 高バイパス比エンジンではF7が搭載可能である。

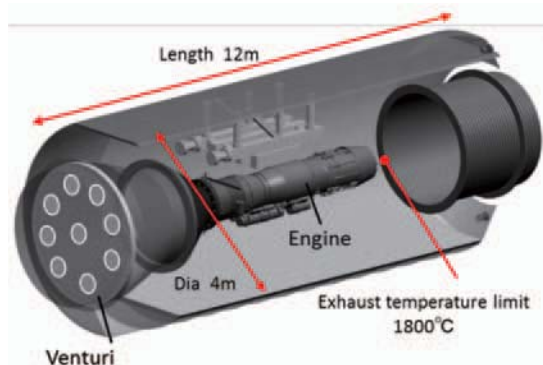


Fig. 11 Test chamber of CTC ATF

Fig. 12にATF中央制御室（左図）とエンジン運転制御計測室（右図）を示す。各室は、テストセル棟の2階に隣接して設置されており、運転中容易にコミュニケーションを取ることが出来る。ATFの運転にはテストセル棟を始め、各建屋に配置された人員を合わせると、施設側は約30名の人員が必要である。またエンジン側は、試験するエンジンや試験項目によるが、通常20～30名程度の人員が必要である。



Fig. 12 Facility control room & Engine control room of CTC ATF

これまでATFでは、XF5, F7, XF9, F3 (JP-8適合試験), 誘導弾用小型ジェットエンジン等の高空試験を実施しており、防衛省におけるジェットエンジンの研究開発に大きく貢献してきた。

現在建設中の大型エンジン試験場 (Fig. 13) は、令和2年度から建屋の建設に着手し、令和5年の竣工を目指している。本施設では、各種の地上性能の取得や耐久試験等の地上試験を行うことが可能である。本施設の寸法は全長約71m、全幅約33m、全高約27mで、大型の戦闘機用エンジンや高バイパス比エンジン (CF6クラス) の試験が可能な規模を有している。

本施設の最大の特長は、既存のATFで温度調整した低温空気と高温空気を用いてエンジン入口の空気温度を調整出来ることで、標準大気温度 (15°C) での性能取得

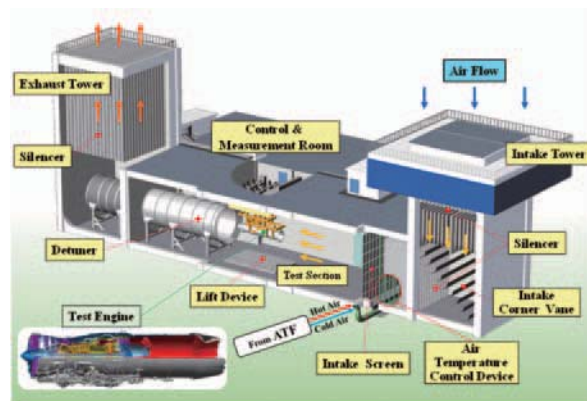


Fig. 13 Ground test cell (Under construction)

など、より正確で効率的なエンジンデータの取得が期待される。

5. 現在実施中の最新ジェットエンジン研究

5.1 戦闘機用エンジン研究 (XF9)

平成22年8月に防衛省が公表した「将来の戦闘機に関する研究開発ビジョン」において、将来の戦闘機のエンジンに関するコンセプトとして次世代ハイパワー・スリム・エンジンを次世代エンジン要素技術、システム化技術により実現するものとしており、航装研において当該コンセプトの実現に向けた戦闘機用エンジン要素及びシステムに関する研究^{[4]-[7]}を実施している。

Fig. 14に戦闘機用エンジン研究の流れを示す。令和2年度まで実施した戦闘機用エンジンシステムに関する研究では、平成30年6月に圧縮機等の高圧系要素、ファン等の低圧系要素及びコアエンジン要素の研究成果をシステム・インテグレーションし、アフターバーナ (AB: Afterburner) 作動時最大推力15トン以上を研究目標としたプロトタイプエンジンXF9を試作した。Fig. 15にXF9のエンジン構成要素を示す。

XF9の基本構想では、エンジン入口断面積当たりのミリタリー推力、全体圧力比、バイパス比とSFCの関係 (Fig. 5参照) 等を考慮したパラメトリックスタディを行い、バイパス比を設定した。

平成30年7月には、Fig. 16に示した千歳試験場のATFを使用した高空性能試験を含むエンジン試験を実



Fig. 14 XF9 development plan

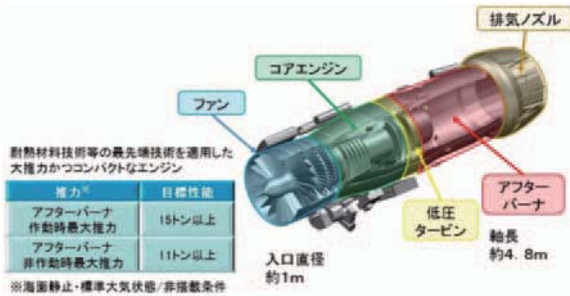


Fig. 15 The engine component of XF9



Fig. 16 Altitude test for XF9 at CTC ATF

施し、それらの試験によって、将来の戦闘機の実現に必要な不可欠なエンジン技術を確立した。令和元年度からは、更なるエンジン技術の成熟を目指してエンジン適応性向上技術の研究に着手している。

5.2 誘導弾用エンジンの研究 (XKJ301)

近年の我が国を取り巻く安全保障環境を踏まえ、防衛力強化の一つとしてスタンド・オフ防衛能力や統合ミサイル能力の強化が求められている¹⁸⁾。これらに対応するエンジン技術の一つとして、令和元年度より開始されている島嶼防衛用新対艦誘導弾の要素技術の研究において、小型で高性能な誘導弾用エンジン (XKJ301-1 (以下「XKJ301」と言う。))の研究 (Fig. 17)を進めている。

XKJ301の技術的な特長としては、2軸のターボファンエンジンによる低燃費化、補機を含めた外部直径の小型化に対応した発電機の内蔵化と補機電動化によるAGB (アクセサリギアボックス) レス構造、機体の高

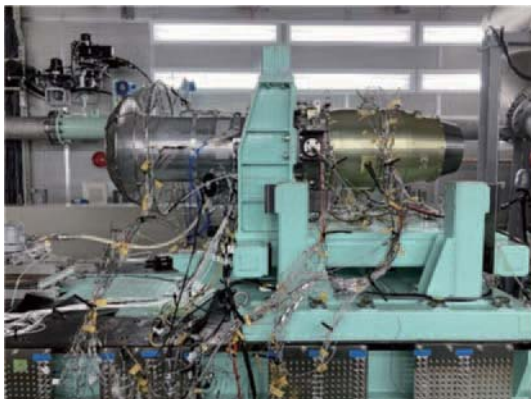


Fig. 17 XKJ301 engine

機動に対応する耐ディストーション性の向上や小型高推力化が図られている。また誘導弾用エンジンは、構造的な寿命に制限を有する部品を使用した消耗用途エンジンであることから、試験に関して有人機用エンジンとは異なる評価基準を適用する必要がある。将来的にはXKJ301は誘導弾用だけでなく、小型の無人機などへの応用の可能性も考えられる。

6. 将来的新技術の研究

6.1 RDE (ローテティング・デトネーションエンジン)

将来的新技術の研究として、超音速で燃焼が伝播するデトネーション現象を利用したエンジンであるローテティング・デトネーションエンジン (RDE) について研究を行っている。RDEは小型で軽量かつ高い熱効率を有することから、ガスタービンエンジンの燃焼器を代替することにより将来の航空機や誘導武器に適用可能な推進システムとして期待されている。

航装研では、RDEの将来の航空用推進システムとしての成立性を確認するため、まずは平成28～29年度に0.5秒程度の燃焼試験が可能な無冷却RDE供試体を設計、製造し、試験によりデトネーションによる燃焼を確認した。続いて、作動時の熱負荷を確認するため、平成30～令和2年度に水冷機構を備えたRDE供試体を設計、製造し、長秒時の試験を実施した。使用した供試体を

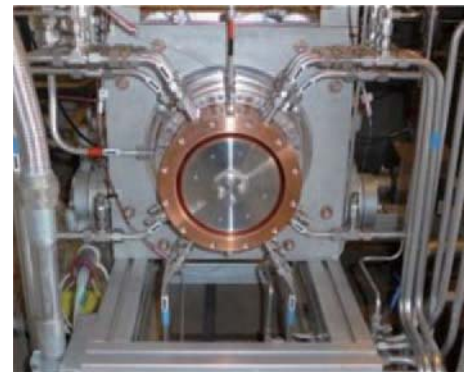


Fig. 18 Water cooling RDE test at ASRC

Fig. 18に示す。

試験では10秒以上のデトネーションによる燃焼を達成し、計測した冷却水の温度上昇をもとに解析を実施し作動時の熱負荷を推定した¹⁹⁾。

現在はシステムを空冷で成立させるための冷却機構の検討及び航空用液体燃料による作動を実現するための供給方式について検討を行っており、試験等によって課題を着実に解決していくことによって将来の航空推進システムとしての実現を目指している。

6.2 AM技術 (エンジン部品製造技術)

新たな技術を活用したエンジン軽量化の取り組みとして、AM (Additive Manufacturing) 技術の活用が挙げられる。近年AM技術の進歩により、複雑形状を持つ部

品の製造が可能となったことから、航空機の各部品においても機能を集約させ、部品点数を削減するなどの軽量化の取り組みが盛んに行われている²⁰。AMによる製造はコスト、性能、開発期間等で多くの利点があるが、厳しい品質管理プロセスの存在する航空エンジン部品においては、単純な応力条件である静止部品や設計変更の少ない部品など、限られた部品への適用にとどまっている。

航装研では航空エンジンの更なる高性能化を目指し、AM技術の適用範囲拡大に向けた研究を行っている。AM技術の適用によって利点のある航空エンジン部品のうち実用化する上で技術的難易度が高く、適用した際の効果が大きいと考えられる遠心圧縮機部のインペラを例にとり、トポロジー最適化やラティス構造の適用により軽量化を図った強度評価用の模擬部品を設計し、AMによる製造を行い、回転試験によってひずみ等の強度データの取得を行った。試験で使用した供試体と軽量化した構造がわかる断面の画像をFig. 19に示す。

軽量化のために中空化した内部については製造後に機械加工ができないため表面粗さが大きくなっており、一般に疲労寿命を短くする要因とされるが、誘導弾用エンジンのような消耗を前提としたエンジンへの搭載を考えた場合にはAMによる軽量化のメリットが十分にいかせるものと考えており、引き続き研究を実施し、データ取得等を通じて検討を深めていく計画である。



Fig. 19 Test disk and cross section by AM

7. 結言

本稿では、防衛装備庁における航空用ジェットエンジンの研究開発について紹介した。半世紀以上前のネ20から始まった我が国のジェットエンジン研究開発の知見は脈々と後世に引き継がれ、最新の戦闘機用エンジンや誘導弾用エンジンの研究開発に繋がっている。今後の展望として、RDEやAM技術などのジェットエンジンに適用できる可能性のある将来的新技術の研究にも積極的に取り組み、我が国の防衛用ジェットエンジンの研究開発を推進していきたい。

参考文献

- (1) 三宅公誠, 防衛庁におけるエンジン開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 28, No. 5 (2000), pp. 352-356.
- (2) 林利光, 高原雄児, 防衛庁におけるジェットエンジン研究開発の歴史と将来への展望, 日本ガスタービン学会誌,

Vol. 34, No. 3 (2006), pp. 178-183.

- (3) 山根秀公, 航空エンジン40年の進展と将来: 防衛用エンジン研究開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 1 (2013), pp. 35-41.
- (4) 山根秀公, 佐久間俊一, 及部朋紀, XF3-400再熱ターボファンエンジンの研究, 第38回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集, (1998), pp. 156-161.
- (5) 檀原伸補, 飛行実証用アフターバーナ付ターボファンエンジン (XF5) の概要, GTSJガスタービンセミナー (第36回) 資料集, (2008), pp. 51-58.
- (6) 及部朋紀, 先進技術実証機搭載エンジン (XF5-1) の概要, 日本航空宇宙学会第56回飛行機シンポジウム, (2018), 2S06-JSASS-2018-5082.
- (7) 秋津満, 高バイパス比ターボファンについて, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 40, No. 3 (2012), pp. 80-88.
- (8) 平野篤, 及部朋紀, 次期固定翼哨戒機 (XP-1) 用エンジンの開発について, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 43, No. 3 (2015), pp. 138-143.
- (9) 坂本数貴, 宮入嘉哉, 平野篤, 航空機用エンジンの評価試験 (高空性能試験, 水吸い込み試験, 横風試験), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 48, No. 3 (2020), pp. 156-161.
- (10) 防衛装備庁ホームページ, F7-10エンジンの民間転用契約の締結について<<https://www-d.mod.go.jp/atla/pinup/pinup281214.pdf>> (参照日2022年8月31日).
- (11) JAXAホームページ, 防衛装備庁F7-10エンジンの導入について, 2016.12.14<<https://www.aero.jaxa.jp/research/basic/propulsion/news161214.html>> (参照日2022年8月31日).
- (12) 大川啓, 松本隆平, 平野篤, 中村友行, 及部朋紀, ヘリコプター用エンジンXTS2の試験について, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 43, No. 3 (2015), pp. 150-155.
- (13) 舟越義浩, エンジン高空性能試験装置の概要, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 38, No. 1 (2010), pp. 36-42.
- (14) 井上寛之, 及部朋紀, 永井正夫, 将来戦闘機に向けたエンジンに係る技術基盤と今後の展望, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 43, No. 3 (2015), pp. 156-160.
- (15) 川瀬基之他, 将来戦闘機用エンジン実現に向けた構成要素技術の研究, 日本航空宇宙学会第59回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集, (2019), JSASS-2019-0032.
- (16) 枝廣美佳, 戦闘機用エンジン (XF9) の研究進捗状況について, 防衛技術ジャーナル, Vol. 39, No. 10 (2019), pp. 18-25.
- (17) 山根喜三郎, ハイパワーでスリムな戦闘機用エンジンXF9, 防衛技術ジャーナル, Vol. 41, No. 2 (2021), pp. 29-37.
- (18) 防衛省ホームページ, 我が国の防衛と予算, 令和5年度概算要求の概要<https://www.mod.go.jp/j/yosan/yosan_gaiyo/2023/yosan_20220831.pdf> (参照日2022年8月31日).
- (19) 高橋仙一, 是枝直樹, 山根喜三郎, 鈴木康文, 宇田川直彦, ローテティング・デトネーションエンジンの長秒時燃焼について, 日本航空宇宙学会第61回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集, (2022).
- (20) 金属3Dプリンタ先進活用事例<https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/seisan/new_mono/pdf/002_03_00.pdf> (参照日2022年8月31日).

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン・蒸気タービンの半世紀の歩みと今後の展望【技術】

発電用ガスタービンの高温・高効率化の進展と将来展望

The Future Outlook of Gas Turbine for Power Generation



正田 淳一郎*1
MASADA Junichiro

キーワード：発電，ガスタービン，コンバインドサイクル，水素，アンモニア

Key Words：Power Generation, Gas Turbine, Combined Cycle, Hydrogen, Ammonia

1. 緒言

発電用ガスタービンはその歴史をスイスのターボ機械メーカーであるBBC (Brown Boveri & Company Limited) が1939年に開発した4000kWの発電設備にさかのぼることが出来る。その後高性能化に向け研究開発がなされたが、1970年代まではガスタービン単体の熱効率は20%台と低く電力のピークカット用に用いられた。1973年、1979年の石油危機は、我が国におけるエネルギーの構成を多様化し、省エネルギー機器の開発の原動力となった。電力業界では1984年12月に世界初の液化天然ガス (LNG; Liquid Natural Gas) 焼き大型ガスタービン複合発電 (GTCC; Gas Turbine Combined Cycle) 設備を稼働させた。この発電設備は、1150℃級701D形ガスタービンと蒸気タービンから構成され、総出力109万kW、熱効率44% (HHV基準) 以上で、当時の最新の火力に比べ10%以上高い効率を達成した。その後、産業用ガスタービンの特徴を生かした独自の発展を遂げ、今日では1650℃級JAC形ガスタービンが商用化されるに至り、それを主機として用いた複合発電では熱効率65% (LHV基準) に迫る。

昨今の気候変動問題への注目の高まりに伴い、カーボンニュートラル社会の実現に向けて、二酸化炭素 (CO₂) 削減の取組みが政治・経済・産業・科学技術はじめ、あらゆる分野で活発に進められている。EUは世界に先駆けて地球環境への配慮と経済活動を同時に実現し、持続可能な開発目標を達成するための新たな基準として“EUタクソノミー”を定めた。日本でも政府が“2050年カーボンニュートラル宣言”を発表している。特に温室効果ガス排出の8割以上を占めるエネルギー分野の取組みが重要とされ、一次エネルギーの主な変換先である電力について、2030年度におけるエネルギー需給の見通しの中で電源構成の1%を水素・アンモニア発電でまかなう

ことが設定された。火力発電設備の中でCO₂排出量が最も少なく、かつ高効率である複合発電については、増大する再生可能エネルギーによる発電量の変動に迅速・柔軟に対応できるようにガスタービンの運用性を高める技術開発、水素 (H₂) やアンモニア (NH₃) といったCO₂を排出しない燃料の導入が取り組まれている。

本解説では、我が国における大型産業用ガスタービンの開発の歴史を振り返り、高温化を達成するキー技術である燃焼器とタービン冷却技術の変遷について述べると共に、ネットゼロ社会に向けた発電用ガスタービンを用いた将来技術について述べる。

2. 産業用ガスタービン開発の歴史と現状

ガスタービンは、航空機の推進機として優れた特徴を持つことから、1930年代、英国ではホイットル (Sir Frank Whittle (1907-1997)) とドイツではオハイン (Hans Joachim Pabst von Ohain (1911-1998)) が独立に開発を進め1930年代末から40年代初めにかけてジェットエンジンの試作に成功している。またドイツではユンカーズ社のフランツ (Anselm Franz (1900-1994)) が現在のジェットエンジンの原型となる軸流圧縮機と軸流タービンを組み合わせたJUMO004形エンジンを開発してメッサーシュミットMe262形戦闘機に実装し、第二次世界大戦末期に実戦に用いられるに至っている。航空用ガスタービンは英国、ドイツの技術を発展させる形で、低燃費で信頼性の高いジェットエンジンが欧米を中心に開発が進められ現在に至っている。

産業用ガスタービンの開発は、この航空用ガスタービンの流れとは別に、スイスのターボ機械メーカーであるBBCで行われた。スイスのETH (Swiss Federal Institute of Technology) のストドラ (Aurel Stodola (1859-1942)) の指導の下に、1939年4000kWの発電機駆動用ガスタービンの運転に成功している。

第二次世界大戦後蒸気タービンは高温化、高圧化、大容量化が進み熱効率も20%から40%へと向上した。航空

原稿受付 2022年11月11日

* 1 〒220-0012 横浜市西区みなとみらい3-3-1
三菱重工業エナジートランジション総括部

用ガスタービンでは1960年代に入ってロールスロイスが商用機に世界で初めて空冷タービン翼を採用した。その後1970年代に登場したジャンボの愛称で呼ばれるB-747型機に採用されたエンジンのタービン入口温度は1250℃レベルに達し、既にフィルム冷却を採用した空冷タービン動静翼が用いられた。しかし産業用ガスタービンでは、Fig. 1に示すように同時期、タービン入口温度900℃～1000℃級が開発されていて、ガスタービン単体運転の熱効率が20%台と、当時の最新鋭蒸気タービンに比べて見劣りする性能で、電力需要のピークカット用に用いられていた。

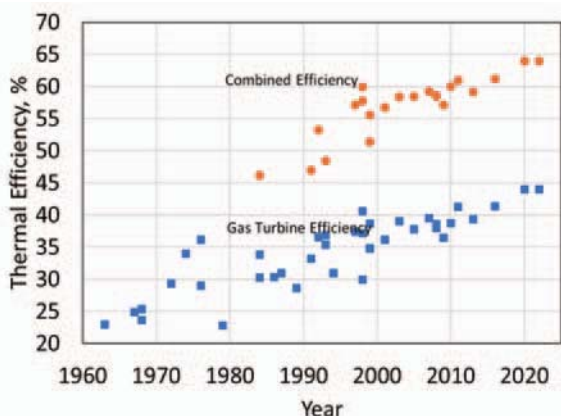


Fig. 1 Thermal efficiency of gas turbine combined cycle. ⁽¹⁾

今日のGTCCの発展の起点となったのが1984年12月に商用運転が開始された東北電力東新潟火力発電所3号系列のGTCCである。東北電力東新潟火力発電所3号系列のGTCCの全景を、その後1450℃級G形ガスタービンを用いた4号系列のGTCCと一緒にFig. 2に示す。本GTCCは世界で初めて運転された大型のGTCCで、タービン入口温度1154℃の701D形ガスタービン3台と蒸気タービン1台から構成された発電設備2系統（定格出力109万kW）から成り立っている。GTCCプラントはガスタービンの排ガスをを用いて排ガスボイラーで蒸気を生成



Fig. 2 GTCC at the Higashi Niigata Thermal Power Station of Tohoku Electric Co.⁽²⁾

して蒸気タービンを駆動するシステムである。東北電力東新潟火力発電所3号系列のLNG炊きGTCCは熱効率44%以上であり、当時の最新鋭火力発電に比べて約10%高い熱効率を達成した。

このGTCCの成功が起爆剤となり、産業用高温ガスタービンの開発が世界のガスタービンメーカーで開始された。

Fig. 3に航空用ジェットエンジンのタービン入口温度の変遷と比較する形で産業用ガスタービンのタービン入口温度の変遷を示す。1300℃級ガスタービンの開発を目指した国家プロジェクト“高効率ガスタービン（ムーンライトプロジェクト）”の成功を受けて、三菱重工業独自に1250℃級MF-111が開発、このMF-111の開発の成功を受けて1350℃級の501F形ガスタービンの開発に成功した。さらに、東北電力との6年間の共同研究によって1500℃級のガスタービンのキー技術の開発を進め、501Fの実績と研究成果を用いて1500℃級501G形ガスタービンの開発に成功している。

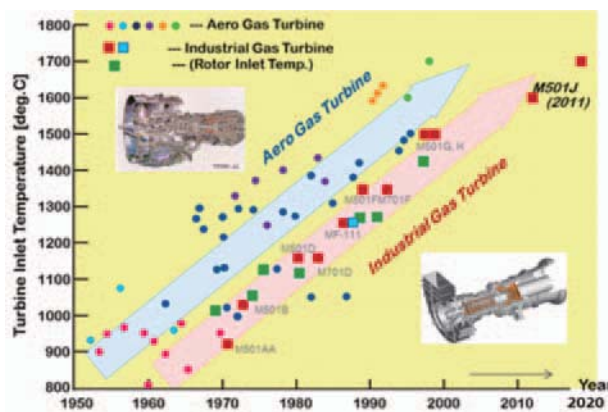


Fig. 3 Historical Trend of Thermal Inlet Temperature

1500℃級G形ガスタービンまでのGTCCの実績と、国家プロジェクト1700℃級産業用ガスタービンの開発研究の成果を取り入れ、三菱重工業では1600℃級501J形ガスタービンの開発に成功した。関西電力姫路第二発電所では2013年8月から商用運転が始まり6系列で総出力291.9万kW（大気温度4℃）の発電所となった。2004年から、国家プロジェクトとして1700℃級ガスタービンの研究開発が三菱重工業で12年以上にわたり実施された。このプロジェクトで取り組まれた要素技術は、①低NOx燃焼システム、②高性能冷却システム、③低熱伝導遮熱コーティング、④高負荷・高性能タービン、⑤高圧力比高性能圧縮機、⑥超耐熱材料であり、前述の1600℃級J形ガスタービンは、本プロジェクトで実用化の目処の得られた最新技術を採用し開発されたものである。2012年からは第3ステップとして前述した6分野に高性能シール・軸受技術、先進製造技術、先進制御技術、高精度・高機能検査技術、高性能ダンパ・振動制御技術、特殊計測技術などを加えて実機適用技術の開発が推進さ

れた。

三菱重工業では、実績のあるM501J形をベースとして、要素技術：①燃焼器強制空冷システム、②超厚膜化TBC、③高圧力比圧縮機を適用することで、更なる高効率化、運用性改善を狙い1650℃級次世代JAC形ガスタービンの開発を進めてきた。本ガスタービンの基本コンセプト (Fig. 4) は、個々の要素技術自体は三菱重工業高砂製作所内の実証発電設備 (T地点) での検証を完了し、1650℃ JAC形への適用を進めた。①強制空冷システム採用により、運用性を向上させるとともに、J形からタービン入口温度を上昇させる。②国家プロジェクト技術をベースに開発された超厚膜化TBCの採用により、タービン入口温度上昇に対し、高性能化と信頼性を両立させた。③M501H形 (1999-2000年に検証済、以下H形) と同等の高圧力比設計圧縮機を採用することにより、ガスタービン出口排気ガス温度の上昇を抑制した。



Fig. 4 Design Features of M501JAC gas turbine.

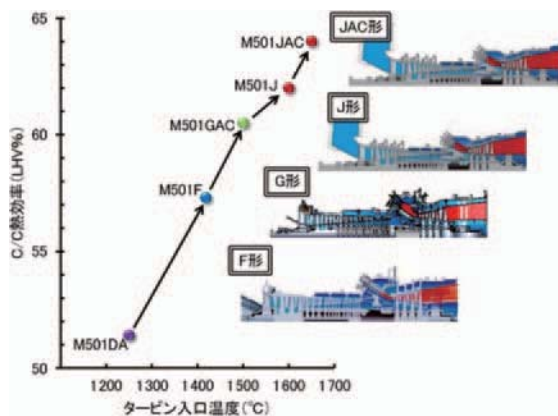


Fig. 5 Evolution of turbine inlet temperature of industrial gas turbines and jet engines. ⁽³⁾

D, F, G, J形からJAC形ガスタービンを用いたGTCCの熱効率 (LHV基準) の変化をFig. 5に示す。1650℃級JAC形ガスタービンを用いたGTCCの熱効率は65% (LHV基準) に近づいており、その熱効率の高さとメタンを主成分としたLNGを燃料に用いることから、最新鋭の石炭火力に比べて炭酸ガスの排出量を半分以下

にすることが出来るため、地球環境問題の観点からも大型産業用高温ガスタービンを用いたGTCCの建設・運用が世界的に行われている。

3. 高温化技術

産業用高温ガスタービンを成立させる最も重要なキー技術である燃焼器とタービン冷却技術について述べる。

3.1 低NO_x燃焼技術の進歩

三菱重工業の大型産業用ガスタービンは、1000℃級B形ガスタービン用燃焼器および1150℃級D形ガスタービン用タービン冷却翼までは、米国ウエスティングハウス・エレクトリック社との技術提携で製造していた。この燃焼器は当時世界的に採用されていた拡散燃焼器であるが、この燃焼器を1150℃級のD形ガスタービンに用いると東北電力東新潟火力発電所の環境規制 (NO_xレベル75ppm以下) を満足できず、当時まだNASA等で研究段階にあった予混合燃焼器の独自開発が行なわれた。予混合燃焼器は燃料と燃焼用空気を混ぜて燃やすため、局所火炎温度を下げてNO_xを低く抑えることが出来る反面、拡散燃焼に比べて安定燃焼域が狭く、また振動燃焼など不安定燃焼を起こしやすい特性を持つ。また、燃料を混合している箇所まで火炎が戻る逆火現象も生じるため燃焼器の開発は困難を極めた。拡散燃焼器を小型化したパイロット燃焼器と、逆火を生じさせない燃料混合部形状の最適化、バイパスバルブの採用などで、安定燃焼し規制値をクリアする予混合燃焼器の開発に成功している。

さらに温度が1350℃まで上昇したF形ガスタービンでは、旋回羽根を持つ8個の予混合器で燃料と燃焼用空気が均一に混ぜられ、燃焼器の中央に拡散燃焼を行い保炎するパイロット燃焼器が配置されているマルチノズル形予混合式燃焼器が開発された。NO_xの生成は中央の拡散燃焼するパイロット燃焼器からの発生が大部分であるために、パイロット燃焼器の燃料量を数%にまで減らすことによって、希薄予混合燃焼の火炎を安定させながら、低NO_x化に成功した。なお希薄予混合燃焼の平均火炎温度は1500℃程度で、燃焼器壁および燃焼器尾筒を冷却する空気が流入するために、平均約1500℃の燃焼ガスが希釈されてタービン第一段静翼入口での平均ガス温度は、

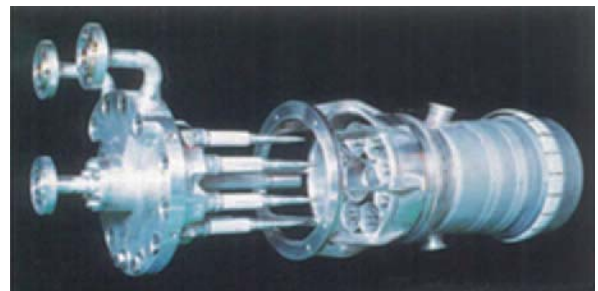


Fig. 6 Pre-mixed combustor with multi-mixers for 1350°C class F-type gas turbine.

1350℃となる。

G/J形ガスタービンでは、F形に比べてタービン入口温度はさらに高く1500/1600℃であるが、燃焼器の基本的な原理をF形から変更することなく、燃焼器壁および尾筒の冷却に、ボトミングサイクルの蒸気を使用して、冷却で加熱した蒸気をボトミングサイクルに戻す冷却法を採用している。このような手法を取ることによって、希薄予混合燃焼における平均火炎温度は1500℃のままタービン入口に達し、タービン入口温度を上昇させたにも係わらず、排出されるNO_xのレベルはF形ガスタービンのレベルを保っている。前述した最新鋭JAC形ガスタービンは、燃焼器の冷却に圧縮機吐出空気を外部圧縮機でさらに昇圧し、外部クーラーで空気温度を下げ、タービン入口温度を1650℃に耐えうるシステムを採用した。冷媒からボトミングを切り離すことにより運用性を改善した。

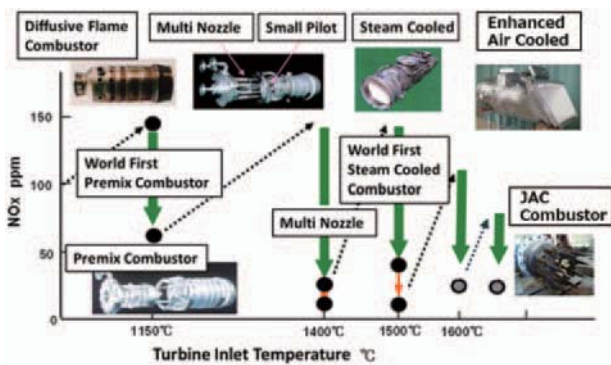


Fig. 7 Development of MHI's low NO_x combustors.

3.2 タービン翼冷却技術の進歩

三菱重工業の大型産業用ガスタービンのタービン第一段動静翼に採用されている冷却構造の変遷をFig. 8に示す。タービン入口温度900℃級のAA形では、第一段動翼は無冷却で、第一段静翼の前縁を内面からのみ冷却する構造が取られていた。1000℃～1150℃級のB形、D形の第一段動翼の冷却では、単純なマルチホール冷却が採用されている。第一段静翼では、B形では翼背側に斜めの衝突噴流冷却、D形では二つのキャビティーに仕切った上、多孔衝突噴流冷却（インピンジメント冷却）と円孔フィルム冷却が採用されている。D形までがWEC社の設計によるライセンス生産であった。しかし、D形は第一段動翼の一行のマルチホール冷却をタービン翼背腹に2列にした改良と、第一段静翼では3キャビティーにしてタービン前縁内面の冷却が強化された1200℃級501DA形を三菱重工業で開発している。さらに1250℃級のMF-111ガスタービンからは三菱重工業独自でタービン翼の冷却設計を進め、第一段動翼ではタービュレンスプロモータ付きサーペンタイン流路を初めて採用している。1350℃級F形の第一段動翼では世界で初めて産業用ガスタービンとしてタービン動翼にフィルム冷却が採

用されている。

現在のタービン翼に用いられている超耐熱合金の許容メタル温度は、材料の強度および耐酸化限界から約900～950℃に保つ必要がある。よってタービン入口温度の上昇に伴って冷却空気量は増加する傾向にあるが、冷却空気量の増加はガスタービンの熱効率および出力の低下をまねくこととなる。ガスタービンの高温化による性能改善を確保するためには、タービン入口温度の上昇に伴ってタービン翼の冷却にはより高性能な伝熱技術を採用した冷却方式を採用する必要が生じる。

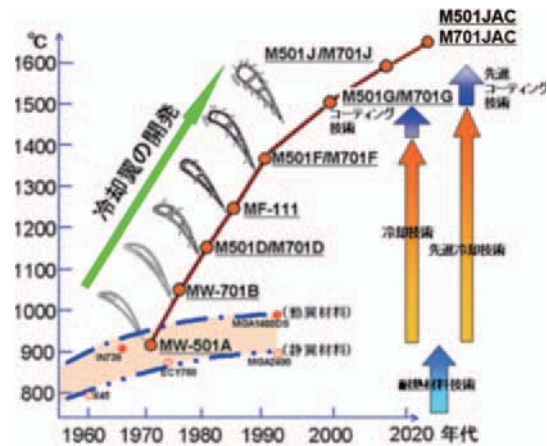


Fig. 8 Development of MHI's low NO_x combustors

タービン動静翼の冷却構造は、タービン入口温度、構造強度と加工法の制約から適切に冷却方式が選択され最適化される。Fig. 9に開発されたタービン動静翼の冷却構造の変遷を示す。タービン第1段静翼では、最適な空気量を精度良く供給できるインピンジメント冷却構造が採用されている。タービン翼後縁部は冷却通路に円柱を設置したピンフィン冷却が用いられている。第1段動翼は冷却空気流速を上げ、また冷却流路の伝熱促進を図るために、タービュレンスプロモータ付きサーペンタイン流路が用いられている。フィルム冷却としては、動静翼とも背側・腹側に多数のフィルム冷却孔を設置した全面フィルム冷却によりガス側からの入熱を低減させている。熱負荷の高い前縁部はシャワーヘッド冷却が、その他の部位はフィルム冷却孔出口形状を工夫し、フィルム冷却効率を高めたシェイプトフィルム冷却が採用されている。

これまではタービン翼の内部構造は精密鋳造により製造されてきたが、現在いわゆる3Dプリンティング（AM造形）による複雑冷却構造による性能向上やラピッドプロトタイピングによる開発期間の短縮、溶接組立構造の一体造形化によるコスト低減を目的に、技術開発、実機展開が活発に行われている。

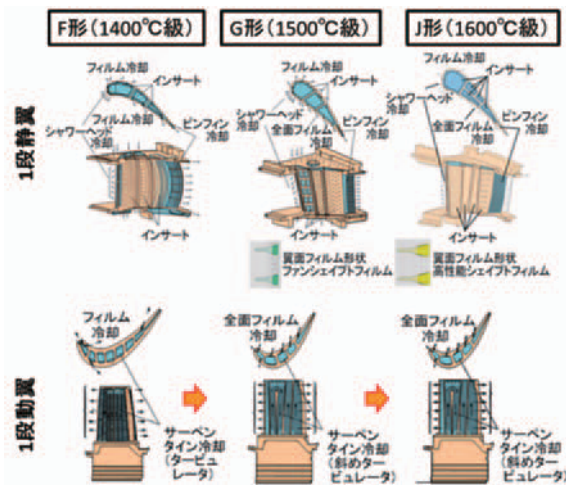


Fig. 9 Evolution of Cooling Configurations of MHI Cooling Blades and Vanes



Fig. 10 Examples of AM manufacturing for Industrial gas turbines (Combustor/Turbine)

4. 将来展望

2050年のカーボンニュートラル達成に向けて、二酸化炭素 (CO₂) 削減の取組みが政治・経済・産業・科学技術はじめ、あらゆる分野で活発に進められている。EUは世界に先駆けて地球環境への配慮と経済活動を同時に実現し、持続可能な開発目標を達成するための新たな基準として“EUタクソノミー”を定めた。日本でも政府が“2050年カーボンニュートラル宣言”を発表している。特に温室効果ガス排出の8割以上を占めるエネルギー分野の取組みが重要とされ、一次エネルギーの主な変換先である電力について、2030年度におけるエネルギー需給の見通しの中で電源構成の1%を水素・アンモニア発電でまかなうことが設定された。

このような情勢の中、三菱重工業は“MISSION NET ZERO”を宣言し、CO₂削減に貢献できる製品・技術・サービスを通じて世界中のパートナーと協調し、グローバル社会全体のカーボンニュートラルの達成に向けて取り組んでいる。火力発電設備の中でCO₂排出量が最も少なく、かつ高効率であるGTCCについては前述したJAC形ガスタービンの開発による高効率化・大容量化を進めてCO₂削減を実現してきた。また、増大する再生可能エネ

ルギーによる発電量の変動に迅速・柔軟に対応できるようにガスタービンの運用性を高める技術開発も行っている。更に一層のCO₂排出削減を進めるために、CO₂回収 (CCUS: Carbon Capture Utilization and Storage) と組み合わせたカーボンリサイクルの導入、そして、水素 (H₂) やアンモニア (NH₃) といったCO₂を排出しない燃料の導入に取り組んでいる。

三菱重工業はこれまで、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) にご支援を頂き、発電用大型ガスタービンにおいて、燃料の天然ガスに水素を30vol%混ぜて使用することができる燃焼器の開発に成功し⁽⁴⁾、更に水素混焼割合を50vol%まで拡大した燃焼試験を実施した。また、中小型ガスタービン用の燃焼器では燃焼試験にて水素100%専焼 (ドライ) ができる目途が得られ、引き続き、大型ガスタービン用の水素専焼燃焼器と合わせて開発を進めている。一方、水素のエネルギーキャリアとしての活用が期待されるアンモニアを利用したGTCCシステムの研究開発も進めている。これら、水素・アンモニア焼きガスタービンの開発を進めていく中で、2022年6月には、米国の高効率・大型GTCC (M501G形天然ガス焼き) 発電プラントにて水素20vol%混焼の実証試験に成功した。実機を使用した水素混合燃料による燃焼実証試験としては最大規模のもので、水素ガスタービンの実用化に向けた非常に大きな一歩となった。

4.1 水素焼きガスタービンの開発

水素焼きガスタービンは、既設の天然ガス焼きガスタービンの燃焼器と燃料供給系統以外の大規模な改造を必要としない。そのため、開発のキーポイントは水素焼きに対応できる燃焼技術と燃焼器となる。

マルチノズルタイプの予混合燃焼器は、予混合方式の燃焼ノズル8本と、それらの中心に燃焼の安定化を図るパイロット火炎用の燃料ノズルを有する。ノズル部には旋回翼 (スワラー) が設置され、スワラーを通過した空気とノズルから噴射された燃料がより均一に混合されることで、燃焼器内の火炎温度がより低減され、低NO_x燃焼が可能である。マルチクラスタタイプの予混合燃焼器は、マルチノズルタイプの燃料ノズルに対して、より多くのノズルを有する。マルチノズルタイプのようなスワラーはないが、1本あたりの燃料ノズルを小さくして燃料と空気をより小さなスケールで混合させ火炎が分散することで、高い逆火耐性と低NO_x燃焼が両立できる。

水素は天然ガスと比較して燃焼速度が速い特性がある。そのため、予混合燃焼器にて天然ガスと水素を混焼、あるいは水素専焼させた場合、天然ガスのみを燃焼させた場合よりも逆火の発生リスクが高くなる。逆火により火炎が予混合ノズルの上流に遡上し、当該部が焼損する可能性があるため、水素焼きガスタービン用の燃焼器は逆火発生の防止に向けた改良を中心に、低NO_x化や安定燃焼化を図る必要がある。

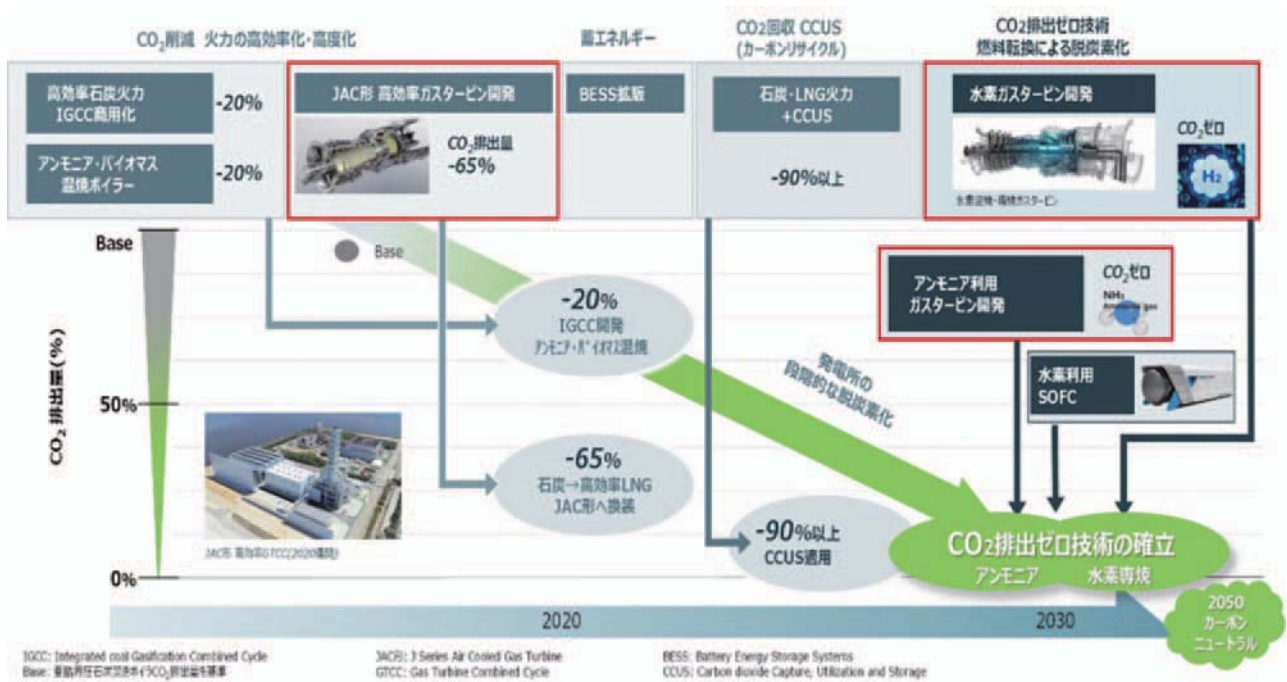


Fig. 11 Energy Transition to Net Zero Society. (4)

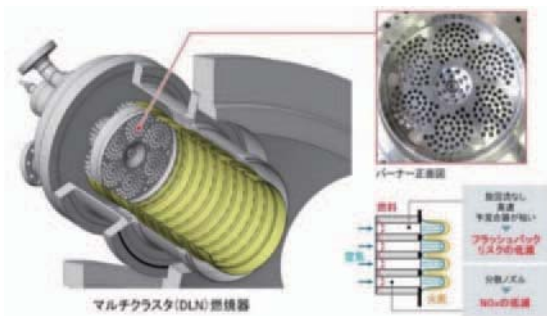


Fig. 12 Multi-Cluster Combustor System for H₂ firing (Combustor/Turbine)

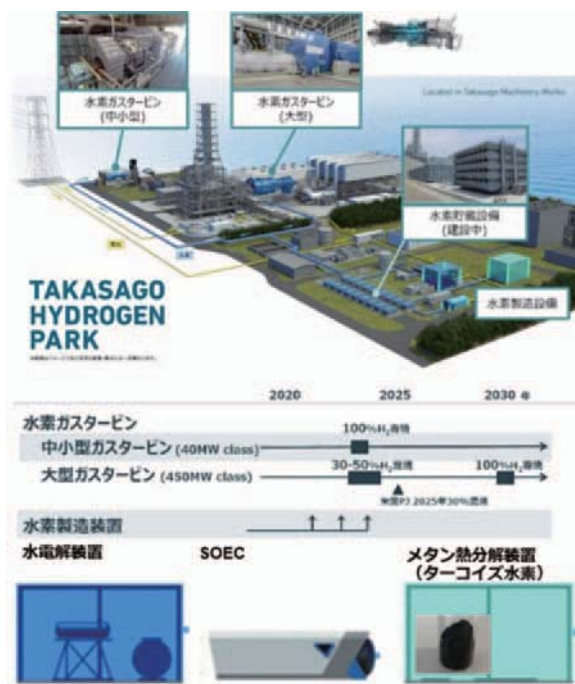


Fig. 13 MHI Takasago Hydrogen Park for verification of hydrogen manufacturing/storage/usage

水素発電の実用化に向けて、今後、要素開発の結果をもとに実機ガスタービンを用いた実証を進めていく。三菱重工業はガスタービンの開発、設計、製造、実証を高砂製作所にて実施している。基本設計の段階で各要素の検証試験を実施し、結果を詳細設計に反映、最終的に実機を用いた実証を行う開発サイクルを同一工場内で実施することで、迅速かつ、信頼性の高い製品の実用化を進めてきた。三菱重工業は世界初の水素関連技術の実証設備である“高砂水素パーク” (Fig. 13) を高砂製作所に整備し、2023年から運用を開始する。既存のGTCC実証設備を拠点に自社開発水素製造設備、貯蔵設備を迫設することで、次世代水素製造技術から水素ガスタービンによる発電までの一貫したプロセスの実証試験が可能となる。同設備内の水素を利用して大型ガスタービン水素混焼 (30vol%) の実証、またH-25ガスタービンを用いた中小型ガスタービン水素専焼の実証を行う。2025年には水素混焼 (30vol%) の実用化を開始、更に大型ガスタービンは2030年の水素専焼を目指す。

4.2 アンモニア焼きガスタービンの開発

水素の大量輸送・貯蔵には課題があり、水素のバリューチェーンについては、パイプラインなどガスの大規模インフラが利用可能な欧米での実用化が先行する可能性がある。翻って日本国内で水素社会を実現するためには、アンモニア (NH₃) の活用も有効な手段と考えられる。水素を運搬・貯蔵するためのキャリアの中で、アンモニアは液体水素やメチルシクロヘキサンに比べて体積あたりの水素密度が大きく、水素を効率良く運搬・貯蔵できる。また、液化石油ガスなどの既存インフラの転

用が可能であり、ハンドリングに優位な点がある。更に、カーボンフリーな燃料として直接燃焼することも可能であることから、発電設備へ早期に導入することにより、将来のカーボンフリー燃料としての活用が期待される。三菱重工ではアンモニアを利用したガスタービンシステムの開発に取り組んでおり、カーボンフリー発電システムのラインアップを更に拡充する (Fig. 14)。

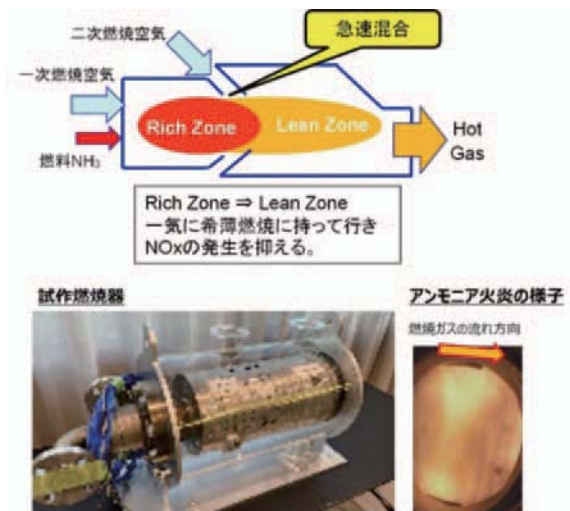


Fig. 14 Ammonia firing combustor and its verification result

5. まとめ

昨今の気候変動問題への注目の高まりに伴い、カーボンニュートラル社会の実現に向けて、二酸化炭素 (CO₂) 削減の取組みが活発に進められている。産業用ガスタービンは20世紀初頭から急激に発展し高性能化に向けたゆまない技術革新がなされ、今日ではタービン入口温度1650℃級JAC形ガスタービンが開発されるに至っており、それを主機として用いた複合発電では熱効率65% (LHV基準) に迫る。その高効率のために火力発電設備の中でCO₂排出量が最も少なく、その機動力は増大する再生可能エネルギーによる発電量の変動に迅速・柔軟に対応できる。また、水素 (H₂) やアンモニア (NH₃) といったCO₂をまったく排出しない燃料の導入に取り組んでおり、グローバル社会全体のカーボンニュートラル達成に貢献する。本解説では、我が国における大型産業用ガスタービンの開発の歴史を振り返る中で高温化を達成するキー技術である燃焼器とタービン冷却技術の変遷について述べると共に、水素・アンモニア焼き燃焼器の開発とその実証について概説した。

参考文献

- (1) 正田淳一郎, 武石賢一郎, 我が国におけるガスタービン複合発電の現状と将来, スマートプロセス学会誌, Vol. 3, No. 2 (2014), pp. 89-93.
- (2) 正田淳一郎, 発電用ガスタービン技術の変遷と将来展望, 日本機械学会誌, Vol. 119, No. 1173 (2016), pp. 434-437.
- (3) 森本一毅, 松村嘉和, 鈴木健太郎, 若園進, 片岡正人, 由里雅則, 1650℃級M501JAC形ガスタービンを有する第二T地点実証設備での運転状況, 三菱重工技報, Vol. 48, No. 3 (2021), pp. 1-9.
- (4) 松本照弘, 川上朋, 武石裕行, 三浦圭祐, 中村聡介, 由里雅則, カーボンニュートラルに貢献する水素/アンモニア焼きガスタービンの開発状況, 三菱重工技報, Vol. 59, No. 4 (2022), pp. 1-12.

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン・蒸気タービンの半世紀の歩みと今後の展望【技術】

産業用ガスタービン（大型発電用）とコンバインドサイクル（GE型）

Industrial Gas Turbines for Power Generation and Combined Cycle (GE model)



奥山 知視*¹ 井須 威博*²
OKUYAMA Tomomi ISU Takehiro

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，効率，水素混焼

Key Words：Gas Turbine, Combined Cycle, Efficiency, Hydrogen Mixed Firing

1. 緒言

日本ガスタービン学会が50周年を迎える節目として、大型発電用の産業用ガスタービンにおける半世紀の歩みと今後の展望を詳述する。東芝エネルギーシステムズ(株)では、米国General Electric (GE)社と協力して日本国内にコンバインドサイクル発電所を建設しており、本稿では、GE社由来の技術を中心にまとめる。

2. ガスタービンの進化

2.1 発電用ガスタービンの生い立ち

我が国において、第二次世界大戦中に航空用（ジェットエンジン）、船用として開発がすすめられたガスタービンであるが、終戦による中断を挟んだものの1950年前後より開発・実証が再開された。国産発電用の嚆矢としては、運輸省鉄道技術研究所にて研究用として供された石川島芝浦タービン(株)（現、東芝エネルギーシステムズ(株)）の「国産発電用1号タービン」である。続いて国内重工業各社でもガスタービンの研究開発がすすめられ、石川島播磨重工業(株)（現、(株)IHI）・三井造船(株)・三菱日本重工業(株)（現、三菱重工業(株)）・日立製作所(株)（現、三菱重工業(株)）・川崎重工業(株)により独自のガスタービンが誕生した。

その後、先行する海外メーカーとの技術提携を導入する国内メーカーが増えた。

東芝エネルギーシステムズ(株)とGE社は1980年代より技術提携関係を構築、その後1996年に東芝GEタービンサービス(株)（TGTS）を設立し、日本国内におけるガス

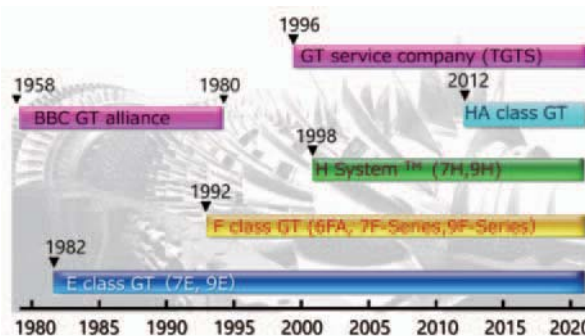


Fig. 1 History of TOSHIBA GT power business

タービン高温部品のメンテナンスサービスに対応している。

2.2 燃焼温度の高温化の経緯

本ガスタービン会議が発足した1972年当時、タービン入口温度900℃級が最先端であったガスタービンであるが、二度のオイルショック以降加速した省エネルギー／高効率化および低公害化を達成するために、各タービンメーカーに於いて1100℃級のガスタービンの開発がすすめられた。追って1980年代には更なる高温化が実現、1300℃級ガスタービンが主流となった。この時代になると各メーカーともガスタービンの標準機種化が進み、燃焼温度・出力・回転数（周波数）毎にモデル名称が付与されたが、一般に1100℃級を「E型」、1300℃級を「F型」と呼ぶことが通例となった。

燃焼温度の高温化に伴いThermal NO_xが増加することから、低公害化に対する取り組みとして、初期には水噴射によるNO_x低減策が導入され、液体燃料を用いるガスタービンに於いては現在も採用されている。ガス燃料を用いるガスタービンに於いては、のちに燃焼方式の最適化（拡散燃焼から予混合燃焼へ）による火炎温度低減技術が開発され、ドライ低NO_x（DLN）燃焼が主流となった。

1990年代後半には更なる高効率化を目指し、更なる燃焼温度の高温化が各タービンメーカーにて推進された。上

原稿受付 2022年11月25日

- * 1 東芝エネルギーシステムズ(株) パワーシステム事業部
国内火力システム技術部 エキスパート
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町 2-4
E-mail: tomomi.okuyama@toshiba.co.jp
- * 2 東芝エネルギーシステムズ(株) パワーシステム事業部
ヒートサイクル計画・技術部 シニアマネジャー
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町 2-4
E-mail: takehiro.isu@toshiba.co.jp

述の「E型」「F型」の後を受け「G型」「H型」と呼ばれる動きもあったが、各社による開発の方向性が多様化したため、以降のモデルは各社各様の名称付与となった。その中で、GE社に於いては蒸気冷却式1500℃級ガスタービンを適用したコンバインドサイクル「H System™」が導入された。

冷却媒体としての蒸気は冷却効率の面で優位ではあるものの、系統構成が複雑になることや起動停止過程における適切な冷却媒体の確保・切り替えなど運用性の面での制約事項から、ベースロード電源としては有用ではあるものの、急速な起動停止及び負荷変動というガスタービンの利点が損なわれるものであった。その後、急速起動停止・負荷変動に対するニーズが主流となった2010年代より、大型発電用ガスタービンの技術トレンドはシステム構成がシンプルな空気冷却式に戻り、現在ではより高効率で大容量な「HA型」ガスタービンがGE社の主流になっている。

Table 1にGE社の「HA型」ガスタービンのラインアップを示す。

Table 1 HA Class Gas Turbine Specification

	7HA.01	7HA.02	7HA.03	9HA.01	9HA.02
Speed	3600rpm			3000rpm	
GT Power Output	290MW	384MW	430MW	448MW	571MW
Combustor q'ty	12 cans			16 cans	
Combustor Model	DLN 2.6+ w/AFS		DLN 2.6e w/AFS	DLN 2.6e w/AFS	
Compressor	14 stages			14 stages	
Turbine	4 stages			4 stages	
1 on 1 CC Plant Efficiency	62.3%	63.4%	63.9%	63.7%	64.1%

2.3 高温材料

燃焼温度の高温化に必須となる高温部品に用いられる材料の開発状況を、GE製ガスタービンを例にとって紹介する。

タービン動翼材料は、クリープ強度・疲労強度が要求されるため、 γ' 相析出強化型Ni基合金を採用して耐熱性向上を図っている。併せて高温ガスから翼基材を保護するために、第1・2段動翼には遮熱コーティング（TBC）が施されている。また、第1段動翼には高温強度の優れた単結晶合金を採用し、従来翼と同等の寿命を実現している。

タービン静翼材料は、熱疲労強度やクリープ変形抑制が要求されることから、 γ' 相析出強化型Ni基合金を採用し、第1・2段静翼には遮熱コーティング（TBC）が施されている。

燃焼器材料は、高温クリープ強度と疲労強度が要求されることから、Ni基合金を採用しており、遮熱コーティング（TBC）を組み合わせている。

3. コンバインドサイクル発電への適用

3.1 はじめに

発電システムに於いて熱効率向上は尽きぬ命題である。ガスタービンの熱効率はその単独では20～30%台に留まるが、ガスタービンの高温排ガスのエネルギーを蒸気サイクルに回収し、プラント全体としての高効率化を図るコンバインドサイクル発電が1970年代以降急速に広まった。ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクルには幾つかの方式があり、以下に紹介する。

3.2 排気再燃式

排気再燃式コンバインドサイクルとは、ボイラの押込通風機に代えてガスタービン発電設備を設置し、ガスタービンで仕事をした後の排ガスをボイラの燃焼用空気として利用することで、排ガスの持つエネルギーを回収する発電方式である。

既設発電所のボイラ・燃焼設備・脱硝装置・煙突などのインフラが流用できるというメリットがあることから、日本国内では1990年代に「リパワリング」として導入された。

後述する排熱回収式と比べ、ガスタービンの排ガス温度が比較的低い場合に有利となるが、近年のガスタービン機種に於いては排ガス温度が高温化する傾向にあることから、現在は排熱回収式が主流となっている。

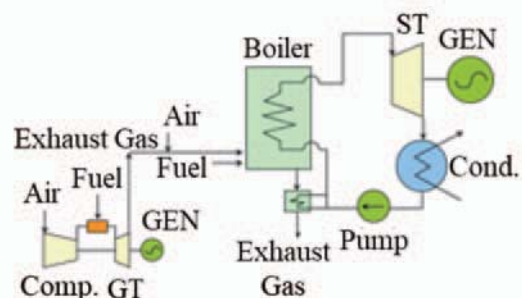


Fig. 2 Full fired combined cycle process flow

3.3 排熱回収式

排熱回収式コンバインドサイクルとは、ガスタービンで仕事をした後の排ガスを排熱回収ボイラに導き、排ガスのエネルギーを回収することで蒸気を発生させ、蒸気タービンを駆動する発電方式である。

T-S線図および基本的なプロセスフローはFig. 3, Fig. 4のようになり、温度の高い領域の熱エネルギーを使って発電を行うガスタービンサイクル（ブレイトンサイクル）と温度の低い領域の熱エネルギーを使って発電を行うボトムサイクル（ランキンサイクル）の2つの領域で発電を行う。

ガスタービン、蒸気タービン、発電機の軸数の組合せにより、一軸型・多軸型に分類することもできる。

一軸型は、一つの発電機をガスタービン・蒸気タービンの双方によって駆動する構成を取るものである。

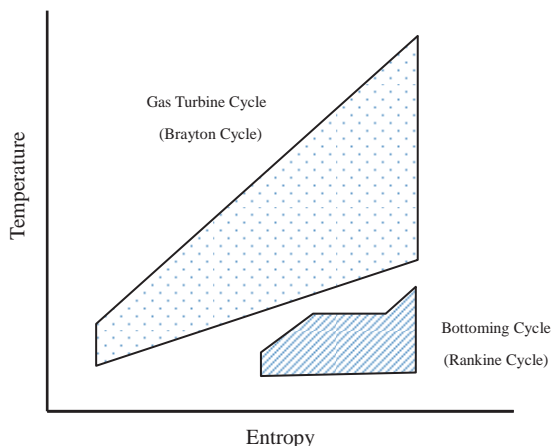


Fig. 3 Heat recovery type combined cycle T-S diagram

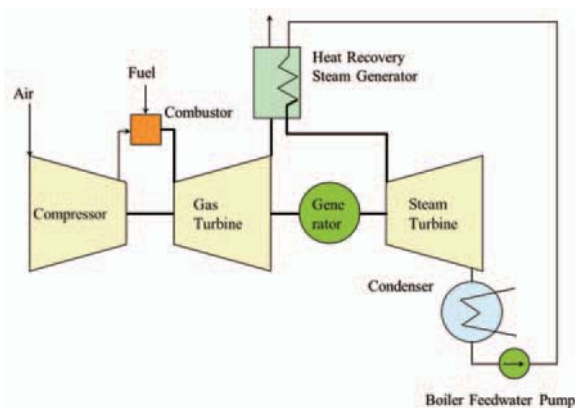


Fig. 4 Heat recovery type combined cycle process flow

これに対し、多軸型は、ガスタービン・蒸気タービンが各々個別の発電機を駆動する構成を取るものである。

一軸型・多軸型は各々長所短所がある。複数台のガスタービンにて発電プラントを構成する際に、ガスタービンの運転台数にてプラント出力の調整が可能となる一軸型は部分負荷におけるプラント全体の効率低下を防ぐことが出来ることから、ミドル負荷運用に適していると言える。

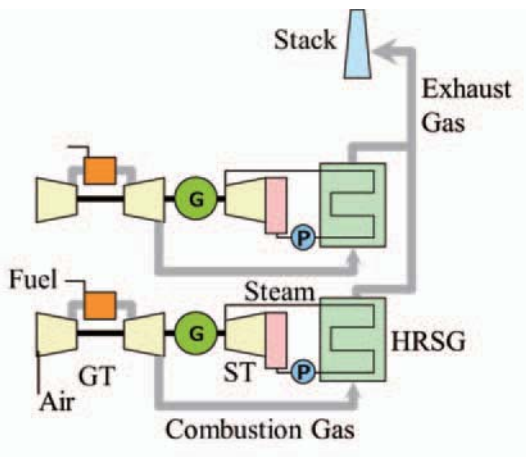


Fig. 5 Single shaft combined cycle

一方、複数のガスタービンに対し1台の蒸気タービンを組み合わせる多軸型は、一軸型に比べ蒸気タービンが大型化することから、スケールメリットによりより高効率率が期待できることから、ベース負荷運用に適する。

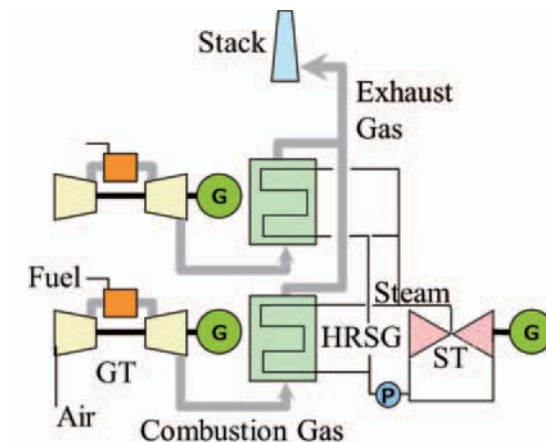


Fig. 6 Multi shaft combined cycle

排熱回収式におけるガスタービンと蒸気タービンの出力比は一般に2:1と言われており、ガスタービンの高効率化がプラント効率向上の重要因子であることが分かる。各ガスタービンメーカーの弛まぬ開発努力によりガスタービンの高効率化が進んだことにより、排熱回収式のプラント効率は低位発熱量ベースにて1970年代の40%台から現時点では64%を超えるところまで躍進してきている。

3.4 加圧流動層燃焼 (PFBC) 式

加圧流動層燃焼 (PFBC) システムは、流動層ボイラ、ガスタービン及び蒸気タービンから構成される。ガスタービンの空気圧縮機にて昇圧された空気は、圧力容器内に設置された流動層ボイラに燃焼用空気として供給される。流動層ボイラから発生した蒸気は蒸気タービンの駆動に用いられ、ボイラからの排ガスはガスタービンに導入され、空気圧縮機の動力源となるとともに余剰動力にて発電機を駆動する。ガスタービンの排ガスは蒸気タービンサイクルにおける給水を加熱する事で更なる熱回収が行われる。PFBCで期待される燃料は主に石炭であることから、ガスタービンへの灰の流入が大きな問題であり、サイクロン・セラミックフィルタなどの脱塵装置の設置が欠かせない。わが国でも数例導入事例がある

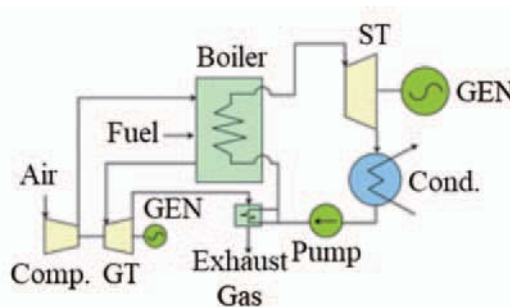


Fig. 7 PFBC combined cycle process flow

が、システムの複雑さが災いし新たな建設計画は見られない。

3.5 石炭ガス化複合サイクル (IGCC)

石炭ガス化複合サイクル (IGCC) は、固形燃料である石炭を可燃性ガスに転換し、ガスタービンの燃料とする発電方式である。石炭を可燃性ガス (CO, H₂など) へ転換するガス火炉設備、ガス中の不純物を除去するガス精製設備が備わること以外は、排熱回収式と同様の機器構成となる。

3.6 日本国内におけるコンバインドサイクルの建設例

至近で日本国内における事業用火力発電プラントとして商用運転開始した事例を紹介する。

3.6.1 鹿島火力発電所7号系列および八戸火力発電所5号機 東京電力 (現JERA) 鹿島火力発電所7号系列および東北電力八戸火力発電所5号機は東日本大震災後の震災復興緊急電源として震災から約16ヶ月後の2012年7月にガスタービンシンプルサイクルで営業運転を開始し2012年夏場の電力確保に貢献、引き続き高効率化と出力アップのためコンバインドサイクル化工事を進め、2014年6月 (鹿島) と8月 (八戸) にコンバインドサイクルとしての営業運転を開始した。

緊急電源として短工期を実現する上で、主要発電機器となるガスタービンはGE社の協力を得て、当初他案件向けに製造開始されていた9F.03型ガスタービンを確保、更にガスタービン補器は東京電力 (現JERA)、東北電力の了承を得てGE社標準仕様を採用していただき機器出荷納期の短縮を図った。また、ガスタービン補器は世界10ヶ国のGE社およびGE社ベンダー工場から出荷さ



Fig. 8 Hachinohe power station unit no.5



Fig. 9 Air transportation with Antonov

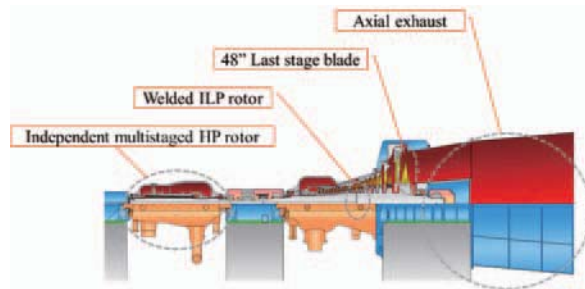


Fig. 10 TCSF-48 axial exhaust steam turbine

れるため、超大型輸送機アントノフを含めた航空機による空輸を活用し輸送期間の短縮を図った。

コンバインドサイクル化に当たっては土木建築工事物量を低減しつつ高いプラント性能が望める最終段48インチ軸流排気蒸気タービン (TCSF-48) を採用している。

3.6.2 西名古屋火力発電所7号系列 中部電力 (現JERA) 西名古屋火力発電所7号系列向け多軸型GTCC発電設備一式 (定格出力1,188.2MW×2ブロック) は、2018年3月に総合運転が開始された。本GTCC発電設備は大容量かつ高稼働率運用の高効率設備が求められた。高効率化を図るため、GE社の7HA.01型ガスタービンおよびHRSGそれぞれ3基と世界最大級の低压最終段翼を適用した高効率蒸気タービン1基で構成される3on1の多軸型コンバインドサイクルを採用することで発電効率63.08% (低位発熱量ベース) を達成した。



Fig. 11 Nishi-Nagoya power station block no.7-1 and 7-2

3.6.3 石狩湾新港1号 北海道では、主に道内の発電設備によって道内全域の電力需給のバランスを保つ必要があり、系統の安定化が非常に重要となる。既設経年火力を代替していくべく計画された北海道電力 (株) 石狩湾新港発電所には、石油火力と同等以上の調整力が必要とされるとともに、部分負荷から定格負荷まで、より高効率のGTCC発電設備が要求された。

このような背景の中、同発電所1号機向け一軸型GTCC発電設備 (定格出力569.4MW×1ブロック) は、2019年2月に営業運転開始を開始した。

GTは、GE社の9HA.01型を採用している。Fig. 12に示す通り、一軸型パワートレインはGT-発電機-SSSクラッチ-STという軸構成で、SSSクラッチにてGTとST

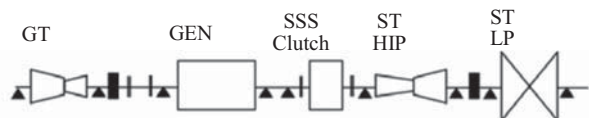


Fig. 12 Power train configuration
(1on1 single shaft GTCC)

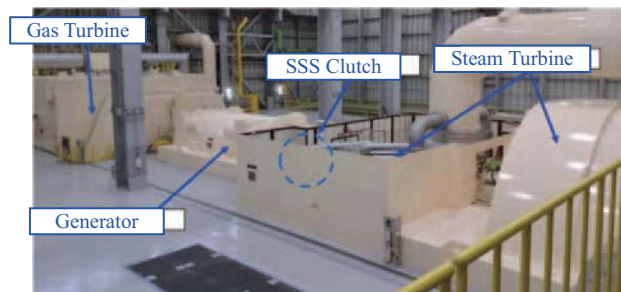


Fig. 13 Ishikariwan Shinko unit no.1 power train

の縁切りが可能なシステムを採用したことで、SSSクラッチを採用しない一軸型パワートレインよりも起動時間の短縮や補助蒸気量低減のメリットがある。

従来の一軸型パワートレインの起動では、GT回転上昇とともにSTも回転上昇が始まり通気前に空回りの状態となる。ST内は風損による温度上昇を防止するために補助蒸気による冷却（クーリング）が必要であった。

SSSクラッチの採用により、GT起動を先行し、HRSGでのST通気蒸気の発生に合わせてSTを後発で起動させることが可能となり、これまで補助蒸気より充当していた冷却蒸気を削減出来た。加えて、構内設置の所内ボイラの容量も低減することが出来た。

4. カーボンニュートラルに向けて

4.1 運用性 (Flexibility)

発電事業における脱炭素・カーボンニュートラルの潮流により、再生可能エネルギーの導入が進み、イナーシャを持たない太陽光・風力の電源構成比率が増えたことにより、回転体を用いる発電方式に対する負荷/周波数調整機能の期待がますます高まってきている。ガスタービン単独（シンプルサイクル）ではその調整機能を十分に果たしているが、コンバインドサイクルとして見た際には、環境特性の面での改善が必要となる。

コンバインドサイクル発電設備は、従来、低負荷域においてNOx排出濃度が高くなることから高負荷域のみにて運用されるのが一般的であった。これは、低負荷域では火炎温度が低くなりNO₂/NOx比が増加、従来型の脱硝触媒では十分な性能を発揮できなくなることが要因の1つであったが、東芝エネルギーシステムズ(株)とイビデン(株)は、Fig. 14に示す通り、NO₂/NOx比が0.5を超える領域において従来触媒に比べて高い脱硝率を得ることができる改良型の脱硝触媒を開発、ガスタービン低負荷域においても環境規制値を満足することができる高脱硝率技術を実現した。

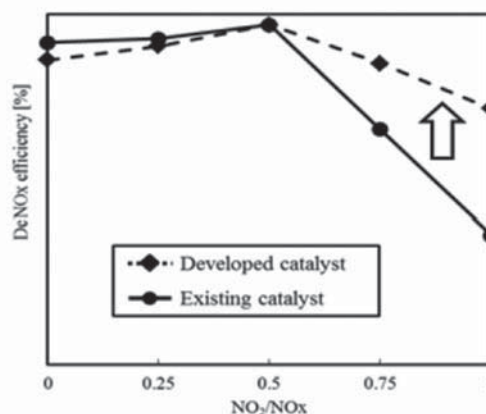


Fig. 14 DeNOx efficiency vs NO₂/NOx ratio

これによりコンバインドサイクル発電設備の常用負荷変化幅の拡大が可能となり、調整機能の担い手として期待されている。

4.2 燃料多様化

ガスタービンの特徴の一つとして、これまで広く活用されている油・天然ガスに加え、バイオ燃料や水素といったネットカーボン排出量ゼロである燃料にも対応可能である点が挙げられる。この点に関する技術開発の動向を記載する。

GE社では1990年代から約30年にわたってガスタービンに水素および低カロリー燃料を使ってきた経験があり、100台以上のユニットで800万時間以上、水素関連燃料の運転実績を持っている。また、一部拡散燃焼タイプの燃焼器においては100%水素燃料で運転可能である。

一方、価格の高い水素を高い発電効率で有効利用するためには、DLN燃焼器の水素混焼化対応が求められる。DLN2.6+を含む従来型のDLN燃焼器はスワラー羽根と燃料噴射孔から成るSwizzle構造を有しており、体積比5%から20%の水素混焼率で運転することが出来る。

2000年代に入りGE社では米国エネルギー省 (DOE) から政府補助金を受け、高水素含有燃料に対応するアドバンスド・プレミキサー構造の燃焼器開発をスタートさせた。アドバンスド・プレミキサーは、3Dプリンク技術を活用し、燃焼ガス流れと平行な方向に多数の細いチューブ構造を有するのが特徴である。

アドバンスド・プレミキサー構造を持つ最新のHA型ガスタービン用DLN2.6e型燃焼器は50%の水素混焼率で運転する能力を持っており、更には、2030年の水素専焼化を目指した燃焼器開発が進められている。

また、プラントレベルでの水素混焼実証が米国Long Ridge発電所で進められており、2022年3月に7HA.02型ガスタービンを使用して水素混焼率5%での水素混焼運転に成功、今後10年間で水素専焼化に向けた実証が行われる予定である。

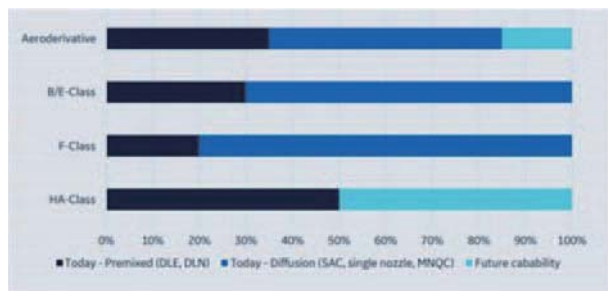


Fig. 15 GE gas turbine hydrogen blending capability
(Figure by GE Gas Power)

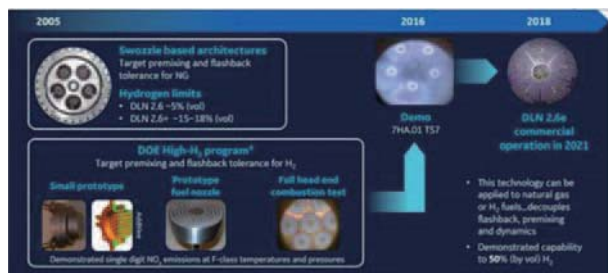


Fig. 16 Combustor development for higher hydrogen blending
(Figure by GE Gas Power)



Fig. 17 Hydrogen blending demonstration at Long Ridge combined cycle power plant (Photo by GE Gas Power)

5. まとめ

日本ガスタービン学会の前進である日本ガスタービン会議発足と同時期、1970年代に導入が開始されたコンバインドサイクル発電は火力発電の効率を飛躍的に向上させ、LNG燃料を海外からの輸入に頼らざるを得ない日本において省エネルギー化に貢献してきた。

近年においては、太陽光や風力といった再生可能エネルギーの発電量が大幅に増加し、電力系統を安定して運用するには、コンバインドサイクル発電の持つ慣性力/調整力がより重要なものとなってきている。

また、日本における電気の37.1%はLNG火力で発電されており、コンバインドサイクル発電の水素混焼化を進めることは、カーボンニュートラル社会を実現し、地球温暖化を防止する上で重要な役割を担っている。

コンバインドサイクル発電システムとその主要機器であるガスタービンは、これら多様化する社会のニーズに対応してこれからも進化を続けていき、日本の電力供給に貢献していくものと考えられる。

参考文献

- (1) 池上壽和, 産業用大型ガスタービンの技術系統化調査, 国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第13集
- (2) GE Gas Power web site, 「Aeroderivative and heavy-duty gas turbines」, <<https://www.ge.com/gas-power/products/gas-turbines>> (accessed on 4 November, 2022).
- (3) 三角滋, 震災復興対応の建設工事短縮を目指し採用した施策/技術について, 平成26年度火力原子力発電大会論文
- (4) 渡邊聡十郎, 西名古屋火力発電所7号系列 総合運開と採用技術, 平成30年度火力原子力発電大会論文
- (5) 平山龍, 程島岳, 太田行俊, コンバインドサイクルボトムリングサイクルにおける課題と対応, 日本ガスタービン学会誌2019年1月号, pp. 38-42.
- (6) 島田秀顕, 伊東正雄, 清水佳子, 春日貴史, 野呂俊平 GTCCプラント脱硝技術の高度化への取組み, 日本ガスタービン学会誌, 2017年5月号, pp. 140-145.
- (7) 福武英紀, 入門講座「コンバインドサイクル発電」第IV章: ガスタービン高温部の材料と冷却技術, 燃焼技術, 火力原子力発電技術協会誌「火力原子力発電」2021年7月号
- (8) GE Gas Power web site, 「Hydrogen fueled gas turbines」, <<http://www.ge.com/gas-power/future-of-energy/hydrogen-fueled-gas-turbines>> (accessed on 4 November, 2022).
- (9) GE Gas Power web site, 「Hurray For Hydrogen: This New Ohio Power Plant Successfully Used Hydrogen To Generate Electricity」, <<https://www.ge.com/news/reports/hurray-for-hydrogen-this-new-ohio-power-plant-successfully-used-hydrogen-to-generate>> (accessed on 4 November, 2022)
- (10) 資源エネルギー庁, エネルギー白書2021.

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン・蒸気タービンの半世紀の歩みと今後の展望【技術】

シーメンス・エナジー製重負荷型ガスタービンについて（大型発電用）

SIEMENS Energy Heavy Duty Gas Turbine (Large Size Power Generation)



山形 通史*¹ 門脇 徹*²

YAMAGATA Naofumi KADOWAKI Toru

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，発電，重負荷

Key Words：Gas Turbine, Combined Cycle, Power Generation, Heavy Duty

1. 緒言

ガスタービン学会創立50周年記念にあたり，重負荷型ガスタービンを製造する主要3社の一つであるシーメンス・エナジーのガスタービンの開発の歴史，ラインアップならびに今後の取り組みについて紹介させていただく。

ここで，ガスタービンの話を始める前に，シーメンスとシーメンス・エナジー，ならびに富士電機㈱の関係について少し説明する。

シーメンスは，日本がまだ江戸時代である1847年に設立された会社で，2020年にシーメンスからシーメンス・エナジーが分社化され，これまでどおりの事業ならびにサービスを行っている。

富士電機㈱は，1923年に古河電気工業とシーメンスとの資本・技術提携で設立され，社名の“富士”は，古河の『ふ』とシーメンス（ドイツ語発音でジューメンス）の『し（じ）』をとり，また日本一の富士山を表象したものとして命名された。

1955年に富士電機㈱とシーメンスとの間で蒸気タービンの技術契約を締結，1993年にガスタービンおよびコンバインドサイクルに対する技術契約を締結した。この間，国内初の超臨界圧変圧運転方式の国内最大級の大容量蒸気タービン発電設備や，最新鋭ガスタービンコンバインドサイクル発電設備などの納入実績を重ねている。

2. シーメンス・エナジーのガスタービン開発の歴史

2.1 開発のはじまり

シーメンスのガスタービンの開発の歴史は古く，1940年代初頭にドイツで開発された航空機用ジェットエンジン（JUMO-004）がルーツとなっている。この時のエンジンに採用された1本のセンタータイロッドを持った

ディスク型ロータ構造は，現在のシーメンス・エナジーの重負荷型ガスタービンの構造に引き継がれている。

2.2 1955～1990年まで

第二次大戦後，ドイツではガスタービン開発が禁止されていたが，1955年に開発禁止令が解除され，シーメンスのガスタービンの開発が本格的に開始された。

1960年には，シーメンスガスタービン初号機であるVM5（出力：8MW）の商用運転が開始された。その後，大型化が図られ，1974年に現在のSGT5-2000EのもととなるV94型ガスタービンの商用運転が開始，1980年代に1100℃級ガスタービンで50Hz機となるV94.2（現型式名：SGT5-2000E）の初号機を運開させ，追って60Hz機のV84.2（現型式名：SGT6-2000E）も市場投入してきた。

2.3 1990年～現在まで

このころから，重負荷型ガスタービンメーカー間の高温度化，大容量化ならびに高効率化の開発競争が始まった。

シーメンスのガスタービンでは，この開発競争において，燃焼器の小型化による冷却用空気の削減ならびに削減した空気の燃焼用空気と翼冷却への利用のため，Fig. 1 に示す通り，2000Eの特徴であるサイロ型燃焼器の小型化が段階的に進められ，4000Fのアンユラー型燃焼器にたどり着いている。その後，8000H / 9000HL形ガスタービンでは，高効率化，大容量化の流れにそってカンアンユラー型燃焼器（多缶型燃焼器）が採用されている。

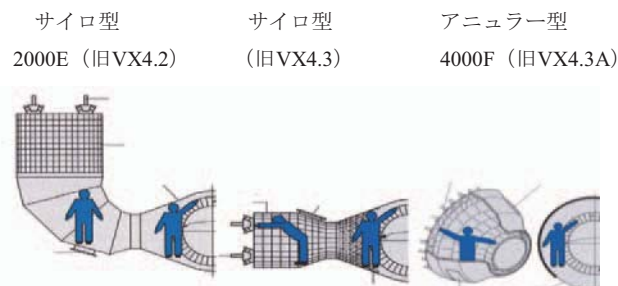


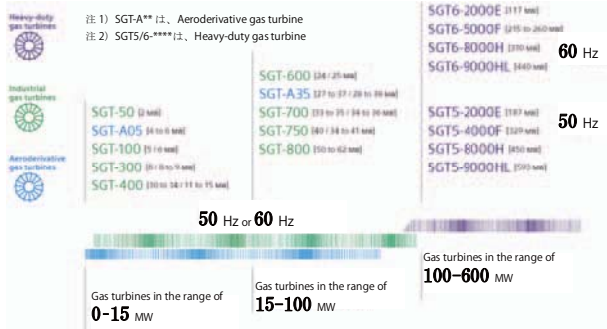
Fig. 1 Combustion chamber change from 2000E to 4000F

原稿受付 2022年11月18日

* 1 富士電機㈱ 発電プラント事業本部 ソリューション統括部
火力・地熱プラントサービス部
〒210-9530 川崎市川崎区田辺新田 1-1
E-mail: yamagata-naofumi@fujielectric.com

1998年には、ウェスチングハウス社の火力部門を、2003年にアルストム社の小型ガスタービン部門を吸収した後、2005年にそれまで各社のオリジナルモデル名からSGTx- (Siemens Gas Turbine) に統一してリネームされた。

シーメンス・エナジーの現在のガスタービンのラインアップをFig 2 に示す。



1980年に市場投入された重負荷型ガスタービンは、タービン入口温度1100℃級の2000E形に始まり、1400℃級ガスタービンの4000F形、1400℃超級ガスタービンの8000H / 9000HL形と高温化、高効率化、大容量化が図られた。現在の最大容量機である9000HLはガスタービン単独での熱効率が>43% (LHV基準)、コンバインドサイクルプラントでの熱効率が>64%に到達している。

2.4 信頼性の高い設計DNA

HLクラスは、信頼性と運転柔軟性を両立させた次の各項、ならびにFig. 3 で示すE, F, Hクラスの各エンジン構造要素を融合させて開発されている。

- ・ 1本のセンタータイボルトロータ：内部に冷却空気通路を設けることで高い負荷勾配を可能にし、必要に応じて現場でのロータ全分解が可能
- ・ ハースセレーション：ロータディスクのセルフセンターリングが可能で、ロータのアンバランスを防止

- ・ 高い靱性を持つ従来の鋼製ロータディスクを採用し、高い信頼性、急速起動、柔軟な過渡運転が可能
 - ・ HクラスとHLクラスのエンジンは、同じバーナー数のカンアニューラー（多缶型燃焼器）システムを採用し、試験装置からエンジンまでの実績がある
 - ・ 実績と信頼性のある空冷4段タービンを採用
 - ・ 油圧式翼隙間調整装置（HCO）：起動時および過渡運転時の隙間を管理し、運転中のタービン性能を向上
- HLクラスの特徴をFig. 4, ならびに重負荷型ガスタービンの開発過程とモデル間の実証技術の融合の関係をFig. 5 に示す。



Fig. 3 Common Siemens Energy H- and HL-class design features (7)

3. ガスタービン実証試験設備について

シーメンス・エナジーは、全世界で7都市・8地点にガスタービン各種の試験センターを有している。その中で最も歴史が古い試験設備であるガスタービン製造拠点にあるベルリン試験センターと、2015年にベルリン近郊で稼働開始したクリーンエナジーセンターについて紹介する。

一本のタイボルトのロータ

- 急速(冷機)起動・ホット起動が可能な冷却空気通路を持つ実証済みロータ設計
- ロータエアクリアにより実証済みディスク設計が使用可能
- ハースセレーションとセンタータイボルトによる相立ディスクにより現場で容易にロータ分解

12段圧縮機

- 部分負荷効率を改善し高速負荷変化を可能とする高速動作の可変IGVと2段のVGV
- ◇ 第三世代ハーモナイズ圧縮機
- ◇ 進化した3D翼による高効率
- 全動翼はロータ吊上げや分解なしで交換可能

軸受

- ◇ 劣化と隙間損失を減らす油圧式翼隙間調整装置 (HCO)

>63%

コンバインドサイクル効率

燃焼器

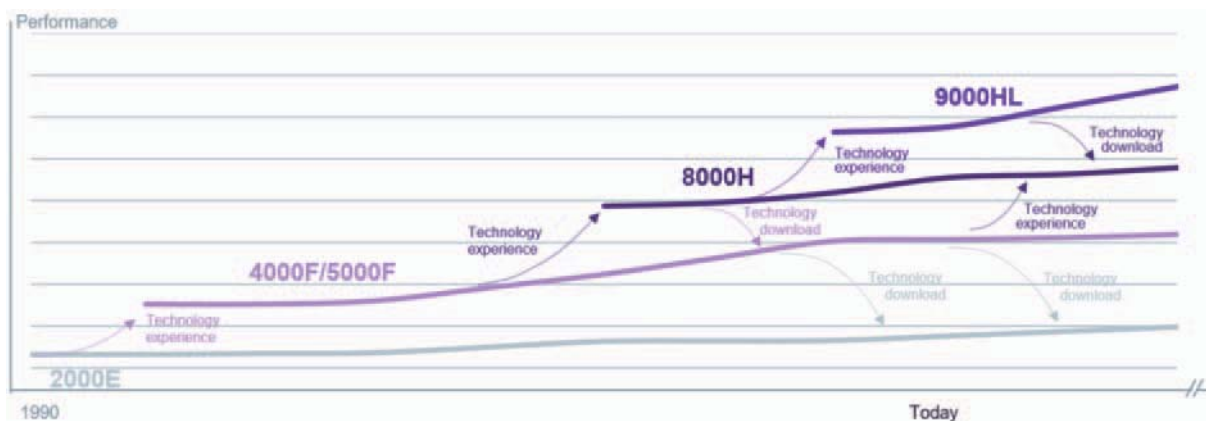
- ◇ 気液燃料の使用が可能な最新の多缶型燃焼器 (12/16缶)

4段タービン

- 完全空冷タービンにより急速な負荷増減が可能
- ◇ 高い冷却効率の動静翼
- ◇ 先進の材料及びTBCを使用した3D翼 4段タービン
- 全動静翼はロータを吊り出さず交換可能: 1段動静翼、4段動翼はケーシングを開放せずに交換可能

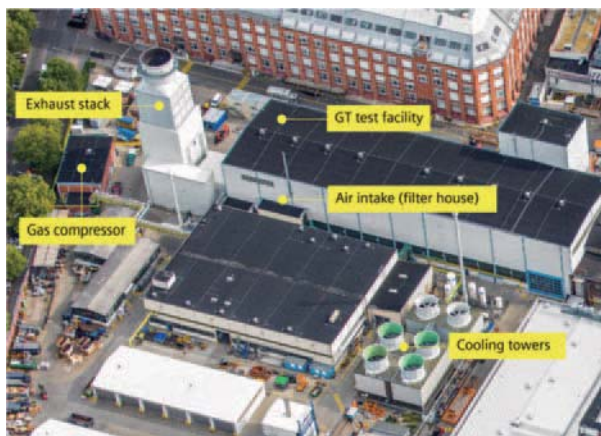
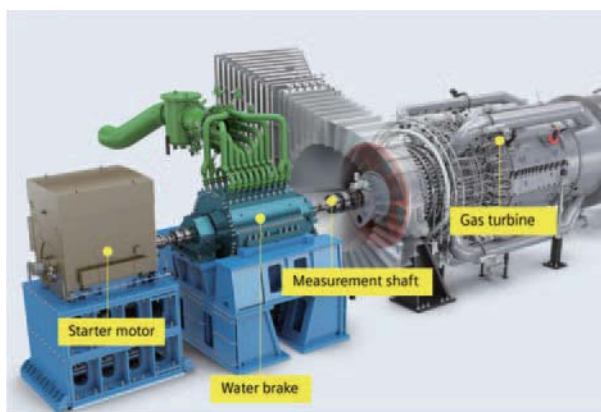
□ 運用柔軟性 ◇ 性能 ○ 保守性

Fig. 4 HL Class features (7)

Fig. 5 Siemens Energy large gas turbine portfolio evolution ⁽⁷⁾

3.1 ベルリン試験センター

ベルリン試験センターは、大型ガスタービンの負荷試験を行うために設計され、30年以上にわたってシーメンスのガスタービン開発にとって不可欠な存在として現在も運用されている。

Fig. 6 Overview of Berlin Test Center ⁽⁸⁾Fig. 7 Berlin Test Center Power Train ⁽⁸⁾

このベルリン試験センターが持つ特筆すべき高い試験柔軟性は、6枚ディスクで構成される世界最大級の水動力摩擦計に負うところが大きい。水動力摩擦計によりタービン出力は電力ではなく熱に変換されるため、電力

供給網に依存することなくいつでも効率的な試験が可能である。

3.2 クリーンエナジーセンター

2015年、ベルリン近郊のLudwigsfelde（ルートヴィヒスフェルデ）にあるガスタービン燃焼とコンポーネントのための最新鋭の高圧試験施設の操業を開始した。

Fig. 8 Overview of Clean Energy Center ⁽⁹⁾

クリーンエナジーセンターでは、燃料の高い柔軟性を実現させるため、燃焼用空気、冷却水、冷却空気システム、液体、気体燃料を供給し、オンラインで燃料を混合することが可能で、最大100MWthの燃焼およびタービン流量で試験することができる。またここには、燃焼システム試験用に完全装備された隔離型テストセルが3つある。1つは小型試験装置（例：産業用ガスタービンバーナー）用のテストセルで、残りの2つは大型試験装置用（例：大型ガスタービンバーナー）用のテストセルとなっている。

これらの設備により、現実的な高圧条件下での試験、特定の周囲温度のシミュレーション、後に製品アプリケーションに適用される正確な燃料混合物の作成など、ほぼすべての仕様を正確に再現することが可能で、出力・効率・排出ガス・火炎安定性など、関連するすべての主要なパラメータが監視、測定、分析できる。



Fig. 9 Combustion Test Rig of Clean Energy Center (9)



Fig. 10 Overview of F-BIT Yokosuka Power

4. 国内の納入実績

シーメンス・エナジーのガスタービンは、産業用、航空機転用、重負荷用をあわせると7,000台を超える納入実績があり、世界の100を超える国々で運転されている。日本国内では4地点、6台の納入実績があり、営業運転を行なっているプラントを次に紹介する。

4.1 ㈱エフビット横須賀パワー殿向け

横須賀パワーステーション

本発電所は、1995年の電気事業法改正に伴い、1999年に東京電力㈱が募集した電力卸供給事業として落札され、㈱東京ガス横須賀パワーにより建設された。

日本国内で商業運転するコンバインドサイクル発電設備用にシーメンスのガスタービンが初めて採用された発電所で、2006年6月に営業運転が開始された。2021年9月に電力小売事業者であるエフビットコミュニケーションズ㈱に株式譲渡され、エフビットの自社電源として運転されており、2022年には運転期間が17年を迎えた。

コンバインドサイクル発電設備の主要諸元をTable 1、発電所全景をFig. 10に示す。

Table 1 Technical Specification

出力	239.7 MW (別軸式 (GT+ST))
ガスタービンモデル	SGT5-2000E (開放サイクルー軸形)
蒸気タービン型式	単車室単流排気混圧復水式
排熱回収ボイラ型式	水管式単胴自然循環式 (屋外式)
冷却方式	強制通風吸込式直行形 (白煙防止形)
使用燃料	都市ガス (13A)

プラント運転パターンは、DSS (Daily Startup and Shutdown) で運用されており、運用より2022年10月時点で、総起動回数は3,200回を超え、累積運転時間も42,000時間以上の実績を有し、現在も首都圏の電力の安定供給の一翼を担っている。

4.2 沖縄電力㈱殿向け 吉の浦火力発電所

本発電所は、沖縄電力㈱が沖縄本島の電力の安定供給と温室効果ガス (CO₂) 削減を図ることを目的に、石油、石炭に次ぐ第3の燃料に初めて液化天然ガス (LNG) が採用され、コンバインドサイクル発電設備として建設

された。

2012年11月に1号機、2013年5月に2号機が運開し、発電所は2022年11月で10年を迎えるとともに、1・2号機の起動回数と累積運転時間も2022年9月時点でそれぞれ900回/50,000時間を超えて、沖縄本島の電力安定供給に寄与している。

コンバインドサイクル発電設備の主要諸元をTable 2、発電所全景をFig. 11に示す。

Table 2 Technical Specification

出力	502 MW (251 MW x 2基 (1軸式))
ガスタービンモデル	SGT6-4000F (開放サイクルー軸形)
蒸気タービン型式	単車室単流排気再熱混圧復水式
排熱回収ボイラ型式	排熱回収三重圧再熱横置自然循環形
冷却方式	海水冷却式
使用燃料	液化天然ガス (LNG)

また、沖縄本島の電力系統は本土と連系されてない小規模な単独系統であるため、系統運用性が特に重視され、DSS (Daily Startup and Shutdown) が可能なだけでなく、刻々と変化する需要負荷や系統周波数に対応できる負荷応答性に優れた設備として計画された。

本発電所の運開当時に沖縄本島内で供給力が伸長しつつあった再生可能エネルギー (太陽光、風力) も、現在は全発電電力量の4割に到達することもあり、日々の電力需要と供給のバランスをとるうえで本発電所の負荷応



Fig. 11 Overview of Yoshinoura Thermal Power Plant

答性能が極めて重要な役割を担っている。

4.3 株式会社コベルコパワー真岡殿向け 真岡発電所

本発電所は、自然災害が多い日本においてエネルギーインフラ強化の観点から、臨海部に集中する電源のリスク分散にも貢献する重要な電源との位置づけで、国内初となる内陸に立地する大型コンバインドサイクル発電設備として栃木県真岡市内に建設された。2019年10月に1号機が運開、2020年3月に2号機が運開し、2022年11月で1号機は4年目を迎えるとともに、(株)神戸製鋼所の電力供給事業用発電設備として、地域の電力安定供給に寄与している。

コンバインドサイクル発電設備の主要諸元をTable 3、発電所全景をFig 12 に示す。

本発電所は、臨海部に設置される大型発電所で採用される海水冷却式が採用できない内陸に設置されているため、蒸気タービンの排気蒸気を空気冷却式復水器で冷却する方式を採用しているが、発電効率は国内最高レベルの60%以上 (LHV基準) の性能をもつ最新鋭発電所である。

Table 3 Technical Specification

出力	約1,250 MW (624 MW x 2基)
ガスタービンモデル	SGT5-8000H (開放サイクルー軸形)
蒸気タービン型式	三重圧再熱横置排気反動復水式
排熱回収ボイラ型式	三重圧再熱横置自然循環形
冷却方式	空気冷却式
使用燃料	都市ガス (13A)

5. 水素燃焼ガスタービンのロードマップ

今日、ガスタービンは地球温暖化の脅威に対処するために重要な役割を担っている。ガスタービンは、最もクリーンな化石燃料ベースの発電ソリューションのカテゴリーに属し、信頼性が高くオンデマンドな電力を提供することで、増加する再生可能エネルギー負荷の負荷変化



Fig. 12 Overview of Moka Power Plant

に対応させるのに理想的な設備と考えられる。

発電が脱炭素化し、水素経済が進展すれば、ガスタービンはさらに重要な存在となる。水素を燃料として燃焼させ、天然ガスと混焼または完全に置き換えることで、ガスタービンは低炭素、あるいはカーボンフリーの電力ソリューションを提供することができる。

シーメンス・エナジーは、ガスタービンのポートフォリオを、2020年までに天然ガスに体積比20%の水素を混合し、2030年以降は100%の水素で運転できるよう開発を進めており、現在30%の水素パッケージを利用できるようになっている。

2005年から2015年にかけて、シーメンスは大型ガスタービンの水素燃焼技術に焦点を当てた米国DOEプログラムに参加し、HLクラスは最大30%の水素を供給することが可能である。

これにより、HLクラスを導入することで、将来の市場状況や環境要件のもとでも、高い稼働率で資産を運用し続けることができ、高い投資安全性を確保することが可能となる。Fig. 13 に、HL クラスの水素ロードマップを示す。Fig. 14 に、シーメンス・エナジーのガスタービンで運転可能な高水素燃料比率を示す。具体的な能力は、ガスタービンのモデルや組み合わせシステムの種類によって異なる。

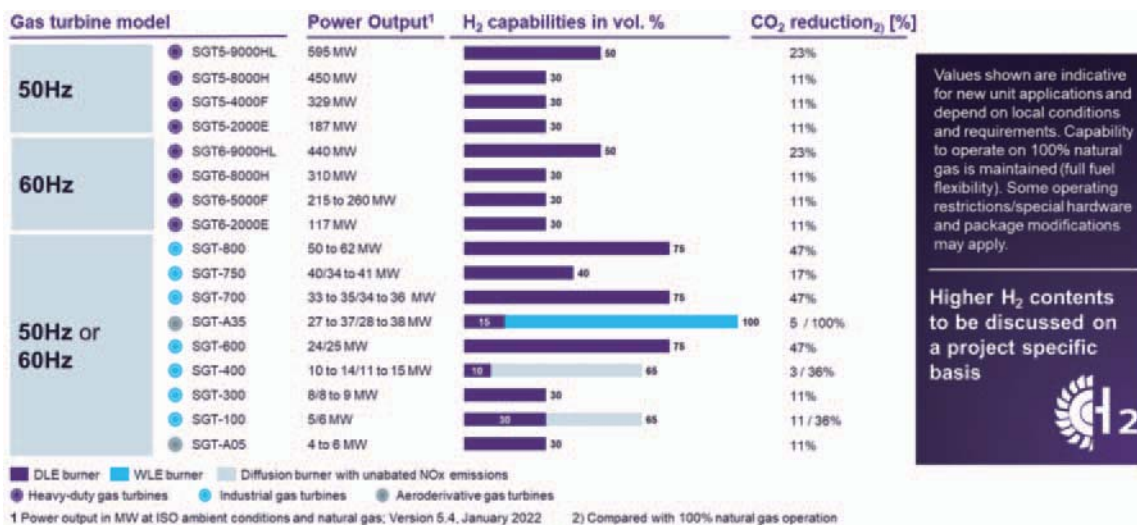
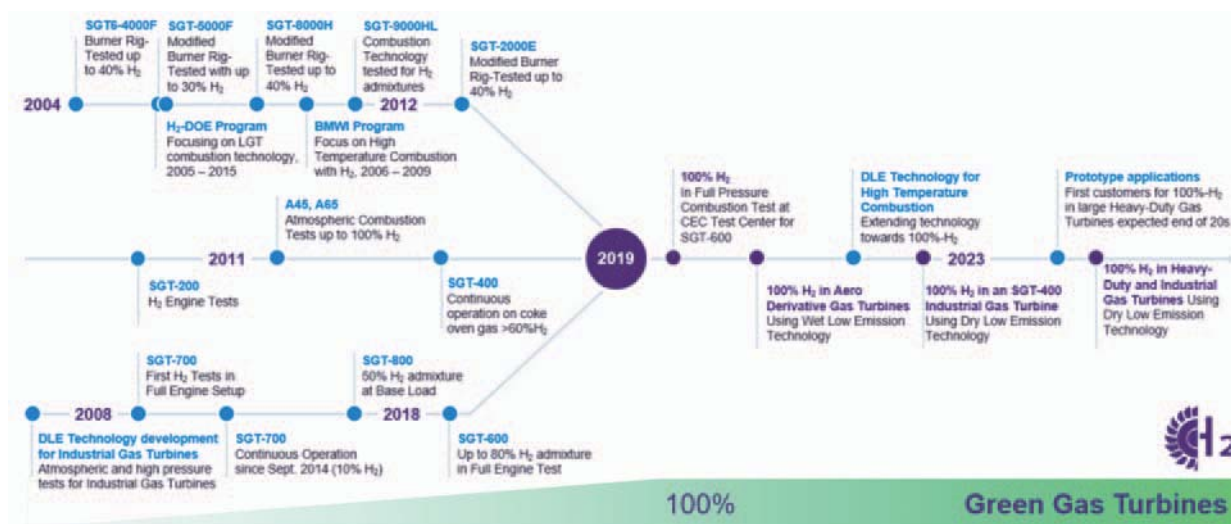


Fig. 13 SIEMENS ENERGY gas turbine portfolio hydrogen co-firing capability for new unit applications. ⁽¹⁰⁾

Fig. 14 SIEMENS ENERGY 100% hydrogen gas turbine roadmap⁽⁰⁾

5. 結言

2050年のカーボンニュートラルの実現に向け、日本国内でも発電設備の低炭素化への取組が急速に進んでいる。シーメンス・エナジーにおいても、次世代のガスタービンの開発への取組が進んでおり、当社もシーメンス・エナジーガスタービンによる日本国内の発電設備の脱炭素化に向けた社会への実現に貢献していく。

謝辞

日本ガスタービン学会の創立50周年記念の節目にて、シーメンスのガスタービンの歩みならびに今後の取組みについて本稿に執筆させていただく機会をいただいた。執筆にあたり、シーメンス・エナジーガスタービンを採用したガスタービンコンバインドサイクル発電設備を運用いただいている(株)エフビット横須賀パワー、沖縄電力(株)、(株)神戸製鋼所の関係者の方々ならびに、シーメンス・エナジーの関係者には、本稿取りまとめに際して資料のご提供ならびにご支援、ご助言をいただいた。ここに期して謝意を表する。

参考文献

- (1) 知念 敦志, 山城 知, 屋宜 誠, “コンバインドサイクル発電 II- (8) 吉の浦火力発電所 1・2号 計画概要”, 火力原子力発電, Vol. 59 No. 10 (2008) pp. 51-53.
- (2) 深山 勝範, “コンバインドサイクル発電 II- (10) 横須賀パワーステーションにおけるコンバインドサイクル発電設備”, 火力原子力発電 Vol. 59 No. 10 (2008), pp. 57-58.
- (3) 山形通史, 門脇徹, “ガスタービンの最新技術 4-1-3 メーカーの系列 シーメンス系”, 火力原子力発電, Vol. 65 No. 10 (2014), pp. 41-46.

- (4) 杉山 孝広, 儀間 武充, 新村 栄一, 山形 通史, “吉の浦火力発電所の概要と運転・保守実績について”, ガスタービンセミナー (第42回) 資料集, (2014), pp. 43-51.
- (5) 藤尾 明久, 山本 晃, 木村 吉範, 荒川 勝仁, 秋山 勝哉, 山極 伊知郎, “内陸型GTCCの建設と運用状況”, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 49 No. 6 (2021), pp. 8-13.
- (6) Gas turbine portfolio brochure (interactive) “We power the world with innovative gas turbine”, <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines.html>>, (accessed on 10 November, 2022).
- (7) HL-class whitepaper 2020: “A Decade In The Marking - Siemens Energy HL-class Now Delivers To The Grid”, <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines.html>>, (accessed on 10 November, 2022).
- (8) Siemens Energy Test Service, <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines.html>>, (accessed on 10 November, 2022).
- (9) Clean Energy Center (CEC) Ludwigsfelde, Germany, <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines.html>>, (accessed on 10 November, 2022).
- (10) Hydrogen power and heat with Siemens Siemens-Energy gas turbine, <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines.html>>, (accessed on 10 November, 2022).
- (11) Siemens-Energy Global Website, <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines.html>>, (accessed on 10 November, 2022).

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン・蒸気タービンの半世紀の歩みと今後の展望【技術】

産業用中小型ガスタービンの進展と将来展望

Progress and Future Prospects of Industrial Small and Medium-sized Gas Turbines

合田 真琴*¹
GOUDA makoto

中安 稔*¹
NAKAYASU minoru

キーワード：産業ガスタービン，コージェネレーション，エネルギーセキュリティ，電源セキュリティ，カーボンニュートラル，水素ガスタービン，再生可能エネルギー

Key Words：Industrial gas turbines, Cogeneration, Energy security, Power security, Carbon neutrality, Hydrogen gas turbines, Renewable energy

1. はじめに

東日本大震災時に発生した広域停電や夏期における計画停電で、非常用発電設備やコージェネレーション設備は幅広い分野で活躍した。これらの自家発電設備の主要原動機が、本稿で述べる産業用中小型ガスタービンである。非常用ガスタービンの場合は、小型・軽量・高始動信頼性・短時間で導入可能などの特長があり、またコージェネレーション用ガスタービンの場合はエネルギーセキュリティ・排熱利用による省エネルギー・事業継続性などが評価されて採用されたものである。近年ではハイブリッド発電としてのデマンドレスポンス対応、再エネとの協調、カーボンニュートラルに向けた水素発電、アンモニア発電などの新しい用途が出て来ているが、産業用ガスタービンはこれらの新しい要求にも十分応えられるものである。

国内における産業用中小型ガスタービンの開発については、1974年の消防法の大改正がきっかけとなって非常用ガスタービンの開発が開始され、続いてオイルショック以降の省エネルギーや環境問題への関心が拡大した1980年代後半からコージェネレーション用ガスタービンが開発、実用化された。現在では、非常用発電、コージェネレーション、いずれの用途でも大容量化の傾向にある。

本稿では、主に30MW級までの産業用中小型ガスタービンを対象とし、前半では現在に至るまでの開発経緯やコージェネレーション設備等の新しい用途開拓の歴史を、後半では政策面からの普及促進動向や今後の展望について述べる。

2. 産業用中小型ガスタービンの進展

2.1 産業用中小型ガスタービンの位置づけ

日本ガスタービン学会では陸船用ガスタービンの国内

生産データを毎年取りまとめて集計している。この生産統計は、戦後間もない1948年に研究用として納入された出力1.64MWの陸船用ガスタービンから始まり現在に至る。

陸船用ガスタービンの生産統計データの過去20年程度のデータ⁽¹⁾を見ると、陸船用ガスタービンの大半は発電用である。さらに発電用として用いられている陸船用ガスタービンは、主に電力会社で使用されている「大型ガスタービン」と、停電時や災害発生時の防災用途に用いられる非常用発電設備や工場や工業団地、ビル等のコージェネレーション設備に用いられる「産業用中小型ガスタービン」に大きく二極化している。

具体的には、容量ベースでは陸船用の9割程度を「大型ガスタービン」が占め、台数ベースでは全体の9割程度を本稿の対象とする「産業用中小型ガスタービン」が占めている。なお日本ガスタービン学会の生産統計データでは小型を出力735kW以下、中型を出力22.064MW以下としている。

2.2 産業用中小型ガスタービン発達の歴史^{(2),(3),(4)}

陸船用ガスタービンの国内生産は、1970年代後半までは年間1～30台のペースで細々と続いてきたが、1977年頃を境に、特に非常用発電用を中心に生産台数が急増し、年間数百台のペースまで生産規模が拡大して来た。その後、1990年代に入ると陸船用ガスタービンの生産台数はほぼ現状のペースに落ち着き、この時期からコージェネレーション用の新市場開拓が活発に行われるようになった。また、次第に生産台数の中心が中型機種に移り、1台当たりの容量が増えた分だけ台数の伸びが鈍化する傾向もみられる。

本稿では参考文献⁽⁴⁾に倣い、戦後間もない時期に始まり現在に至るまでの時代を3分割し、1977年頃までを「黎明期」、それ以降を「急成長期」、1990年代以降を「成熟期」として整理し、それぞれの期間における産業用中小型ガスタービンを取り巻く時代背景や市場動向及びガスタービンの開発動向について紹介する。

また、この間の社会情勢、法令改正と産業用中小型ガ

原稿受付 2022年12月5日

*1 川崎重工業(株)
エネルギーソリューション&マリンカンパニー
エネルギーソリューション
〒650-8670 神戸市中央区東川崎町3-1-1

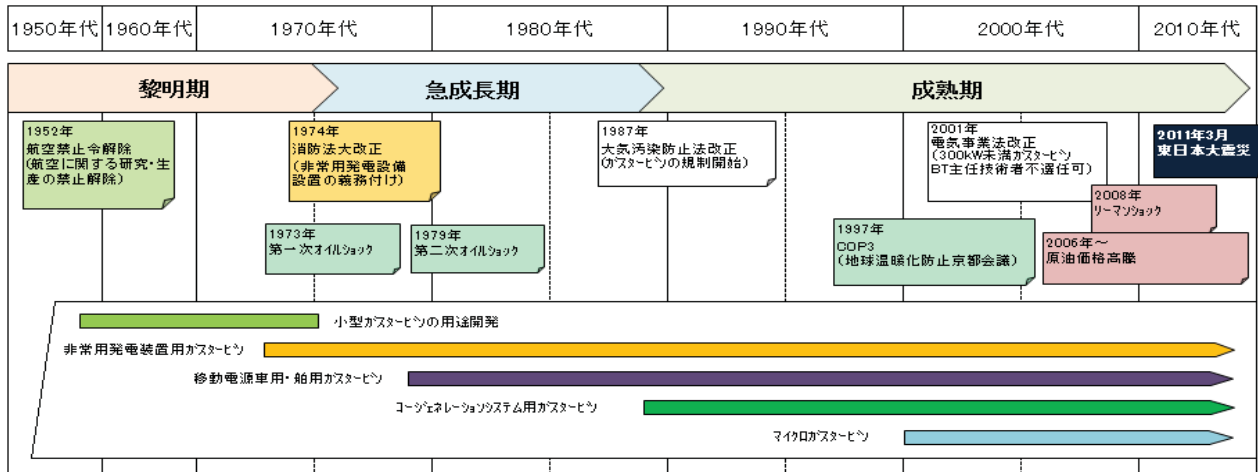


Fig. 1 Development of small and medium-sized gas turbines for industrial applications⁽⁴⁾

スタービンの開発の推移をFig. 1に示す。

2.2.1 黎明期 ガスタービンは第二次世界大戦後、航空機用原動機として目覚ましく発達した。航空分野におけるガスタービンの目覚ましい進歩に刺激され、1940年代後半頃からはこれらの成果を陸船用途に広く応用しようとして、いわゆる航空転用形と呼ばれている航空用ガスタービンを陸船用として使う方法と、航空用で培った技術を生かして新たなガスタービンを作るという、二つの異なる手法で研究開発が進められた。

前者としては、航空用と比較的使用条件が似通った発電用・船用として開発が進められ、1960年代後半から航空転用形等の輸入ガスタービンを船用や非常用発電用の原動機として採用するケースが増えてきた。この傾向は1970年代後半まで続いたが、国産ガスタービンの台頭に伴って徐々に入れ替わっていくことになる（以下、メーカー名は一部省略させていただいた）。本ケースの代表的な航空転用形ガスタービンとしてはIHIのIM100型（米GE社製1MW級）やIM1500型（米GE社製10MW級）が、中小型陸船用ガスタービンとしては神戸製鋼のKG2-3C型（ノルウェーのコングスベルグ製1.2MW級）等がある。

また後者の例としては、大手の自動車メーカーが競って車両・機械駆動用ガスタービンの研究開発を行った。トヨタ自動車は1970年代後半から出力22kWの1軸形再生式ガスタービンを開発し、バッテリーと組み合わせたハイブリット車を開発して走行試験を実施した。当時の技術レベルではガソリン車の燃費を超えることはできなかったが、この自動車は今日の「ハイブリットカー」の先駆けとなり、ガスタービンにおける成果は子会社の小型ガスタービンに活かされている。

2.2.2 急成長期 1972年に大阪千日前デパートで、1973年には熊本大洋デパートで多くの死傷者を出す大災害が連続して発生した。これらがきっかけとなり1974年に消防法の改正が行われ、火災による人命損失危険の特に高い百貨店、地下街、病院等不特定多数の者が出入りする建造物には、既存のものであっても防災用途の非常

用発電設備の設置が義務付けられた。この消防法の大改正により非常用自家発電設備の市場規模が一気に拡大した。

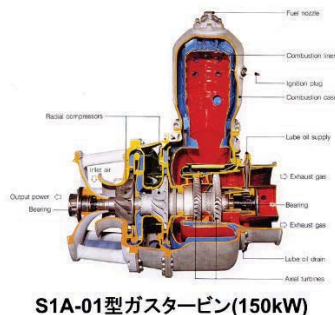
当時、まだ自家発電設備用途に適した中小型の国産ガスタービンは無く、国内メーカーは欧米の先進ガスタービンメーカー（米国ソーラー社、英国セントラックス社など）から輸入したガスタービンを使って自家発電設備として販売した。自家発電設備の原動機としてそれまでディーゼルエンジンがほぼ独占していたが、設置スペースが限られ周辺環境への制限が多い既設ビルを中心にして、小型・軽量で環境にやさしく、始動信頼性が高いガスタービンの評価が高まっていった。

非常用発電設備の市場が拡大し多様化するにつれて、製品ラインナップ・コスト・アフターサービス等の点で輸入ガスタービンの問題点が目立つようになり、その解決策として国産中小型ガスタービンの開発が各メーカーで活発に行われた。主要メーカーの開発動向はおおむね次の様なものであった。

- 1) 航空機用ガスタービンのオーバーホールで得られた技術やディーゼルエンジン用過給機の設計技術を活用して開発（川崎重工業、ダイハツ）
- 2) 海外メーカーとの提携技術で力をつけて開発（神戸製鋼、ヤンマー、新潟原動機）
- 3) 自社開発の航空機用ジェットエンジンを転用（三菱重工）

この時期の代表的な産業用中小型ガスタービンには、川崎重工業のS1A-01型（150kW級、1976年市場投入（以下同様））、神戸製鋼のGT1型（800kW級、1983年）、ヤンマーのAT600S型（450kW級、1983年）、ダイハツのTS-01型（500kW級、1985年）、新潟原動機のNGT2型（1MW級、1988年）等がある。これらのガスタービンの代表例をFig. 2に示す。なお、S1A-01型ガスタービンは、「非常用発電用小型ガスタービンの祖」として国立科学博物館の2011年度の「重要科学技術史資料（未来技術遺産）」に登録された。

国内では1977年頃から定置用の非常用自家発電設備用として中小型ガスタービンの需要が急速に拡大していった。この動きに影響され、移動電源車、ポンプ駆動など、新しい用途が開拓され、産業用中小型ガスタービンは更に広く普及していった。



S1A-01型ガスタービン(150kW)

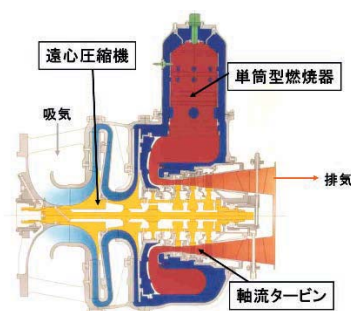
Fig. 2 Example of a gas turbine developed during a period of rapid growth

2.2.3 成熟期 1970年代後半の第二次オイルショック以降、省エネルギー及び環境問題への関心が急速に拡大して行った。また1980年代後半からコージェネレーションに係わる様々な電気事業法の規制緩和が開始され、1990年代から中小型ガスタービンが比較的小規模なコージェネレーション用の低環境負荷の原動機として注目された。ガス会社の市場政策もあり、各メーカーが競って中小型ガスタービンの開発を行い、また海外からのガスタービンの輸入も行われた。更に1990年代後半からは、国際的な地球温暖化問題への関心が高まり、新エネルギーの活用や省エネルギーの推進が強化されて来た。

これらの規制緩和やコージェネレーション推進施策の効果と優れた省エネルギー性や低環境負荷が認められたことにより、1995年から2000年頃にかけてガスタービンコージェネレーション設備の導入が加速的に進んだ。

この時期に国内でコージェネレーション用に開発された代表的な高性能ガスタービンとしては、三井造船のSB5型（1 MW級、1988年）、川崎重工業のM1A-13型（1.5MW級、1989年）、M7A-01型（6 MW級、1993年）、IHIのIM270型（2 MW級、1998年）、新潟原動機のRGT3R型（300kW級、1998年）、トヨタタービンアンドシステムのTG312型（300kW級、2000年）等があり、その代表例をFig. 3に示す。これらのガスタービンの発電効率はおよそ25～30%（低位発熱量（LHV）基準発電端）であるが、コージェネレーションの総合熱効率（＝発電効率＋排熱回収効率）は80%程度（LHV基準）に達する。

一方、1990年代後半から2000年代半ばにかけてガスタービン内部にコージェネレーション設備の余剰蒸気を噴射して発電電力を増大可能な「熱電比可変型ガスタービン」の開発及び導入が進んだ。当時は天然ガスコージェネレーション設備が新エネルギー事業者支援対策補助事業の支援対象に指定されていたため、6～7 MW級



M1A-13型ガスタービン(1.5MW)

Fig. 3 Example of a gas turbine developed in its mature phase

の熱電比可変型ガスタービンの普及に大きな影響を与えたものと考えられる。

更に、1990年代の終り頃から国内においても「マイクロガスタービンコージェネレーション設備」が注目を浴びるようになった。マイクロガスタービンとは、一般には300kW未満の小型ながら再生器を採用する等の方法で大幅に熱効率を改善したガスタービンのことである。現在では燃料費の高騰や市場環境の変化により、2000年代前半のような勢いはトーンダウンしている。

2.3 最近の進展

主に2000年代から現在に至るまでの産業用中小型ガスタービンの進展を以下に紹介する。

2.3.1 コージェネレーション用高効率ガスタービン開発

1980年代後半から1990年代初め頃にコージェネレーション用として国内で開発されたガスタービンはいずれも3 MW級以下の小型であった。非常用とは異なりこれらのガスタービンは研究開発費の負担が大きく、すべてを自社開発で対応するメーカーは限られ、欧米のメーカーとの提携で中型ガスタービン本体を輸入し、自社製のパッケージやコージェネレーション設備に組み込んで、市場に供給するメーカーが多く見られた。

2000年以降になると、急激な原油価格の高騰やリーマンショックを契機とした市場環境の変化に伴い、小型のコージェネレーション設備の採算性が悪化し、より高効率な6～25MW級の中型ガスタービンが市場投入された。

2010年以降になると、事業継続性対応への要求も加味され、更なる高効率化、低エミッションを達成した高性能なガスタービンが開発された。この時期に国内でコージェネレーション用に開発された代表的なガスタービンとしては、川崎重工業のM1A-17型（2 MW級、2010年）、L30A-01型（30MW級、2012年）、M7A-03改良型（8 MW級、2013年）、M5A-01型（5 MW級、2017年）等があり、代表例をFig. 4に示す。

これらのガスタービンは、高効率圧縮機の採用やタービン入口温度（TIT）の高温化、希薄予混合燃焼器の進化など要素技術の発展により発電効率の向上と低エミッションを実現している。現在ではTITは1300℃級に達し、発電効率40%（LHV基準発電端）を達成したガスター

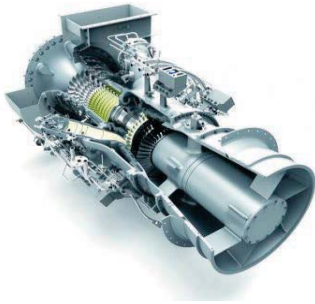


Fig. 4 Example of high efficiency gas turbine (M5A-01)

ビンも世の中に出ている。

2.3.2 低NO_x燃焼器の開発 コージェネレーション用のガスタービンの燃焼器は、市場投入当初、拡散燃焼方式の燃焼器に蒸気噴射や水噴射（ウェット式）を行うことでNO_x低減を図るのが標準であった。1990年代中頃になると更なる環境対応性改善が求められ、より低NO_xでしかも蒸気・水を使わない希薄予混合燃焼方式（ドライ式）の燃焼器が実用化された。この後も、この希薄予混合燃焼技術の進化によりNO_x値は低減し、近年では酸素濃度15%換算値で1桁の超低濃度まで低NO_x化が進んだ燃焼器が商品化されている。また自立運転時も低NO_x運転が可能な燃焼器や従来より低NO_x運転範囲を広げた燃焼器も商品化されている。今後は更に幅広い燃料への対応が求められると考える。

2.3.3 非常用ガスタービンの大型化 1990年代に入ると銀行等の金融関連企業の大型電算センターの新設が増え、非常発電設備として3 MW級といった比較的大容量のガスタービン発電設備を複数台設置する案件が増えた。さらに2000年以降は、インターネットや携帯電話の急速な普及によりIT関連の大手企業によるデータセンターのバックアップ電源として大容量の5 MW級非常用ガスタービン発電設備の納入が増加している。

2.3.4 事業継続へのガスタービンの利用⁽⁵⁾ 東日本大震災以降、大震災や大事故等の想定しない事態が発生しても、事業を中断させない、あるいは中断しても可能な限り短時間で事業を再開させるという、事業継続性の促進を図る必要性が増している。

特に電源確保の目的のためには、燃料供給系統を二重化して信頼性を高めた非常用デュアルフェーゼルガスタービン発電設備や分散型電源としての常用非常用兼用ガスタービンコージェネレーション設備が重要度を増している。また、商用電源の停電対策として次のシステムの導入事例が増加している。

- ・ 停電時でもコージェネレーションシステムを起動させることができるブラックアウトスタートシステム
- ・ 瞬時電圧低下が発生した場合に商用電源と系統解列を行い、コージェネレーションシステムから重要負荷に継続給電を行うシステム

2.3.5 コンバインド型コージェネ設備 近年では、老

朽化したボイラ・タービン発電設備の更新や熱電需要の変化に追従しつつ省エネルギーを図るため、ガスタービンコージェネと蒸気タービンを組み合わせた比較的大容量のコンバインド型コージェネ設備の導入が増える傾向にある。⁽⁸⁾

Table 1 Example of 100MW class system configuration

形式	コンバインド型コージェネ設備
主要構成機器	
ガスタービン (GT)	型式：L30A-01D 燃料：都市ガス (13A) 発電端出力：32.3MW (@15℃) / 基数：3基
排熱回収ボイラ (HRSG)	型式：縦型複圧自然循環式 蒸気発生量 (1基当たり)： 高圧：9.3MPa × 478℃ × 34t/h 低圧：0.6MPa × 200℃ × 12t/h 基数：3基 給水温度：20℃
蒸気タービン (ST)	型式：減速式内部抽気背圧式 発電端出力：10.5MW (定格) 基数：1基

この様な設備では、プラント総合効率の改善、広範囲な高効率運用、高い冗長性による設備信頼性、将来の需要変化に対する柔軟な適用性などを有するのが特徴となっており、今後の普及が期待される。

2.3.6 水素ガスタービンコージェネレーションの実証

新エネルギー・産業技術総合開発機構NEDO助成事業「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」において、兵庫県神戸市ポートアイランドに川崎重工業製ガスタービン発電装置PUC17を用いた水素CGSを設置し、2018年に拡散燃焼器を用いた水素実証運用を行った⁽⁶⁾。Fig. 5は設備全景であるが、水素は液体水素タンクから蒸発器にてガス化された後に水素ガス圧縮機にて加圧、都市ガスはパイプラインから都市ガス圧縮機で加圧されて、それぞれガスタービン発電装置に供給される。水素と都市ガスは混合装置にて混合されるが、水素専焼、都市ガス専焼、水素／都市ガス混焼それぞれのケースについて運用に問題ないことが実証された。



Fig. 5 Kobe hydrogen cogeneration panoramic view

さらに2020年にはマイクロミックス燃焼器の実証運用をNEDO助成事業「ドライ低NO_x水素専焼ガスタービ

ン技術開発・実証事業」にて実施，他に先駆けてドライ方式の水素専焼を実現した⁽⁷⁾。現在も事業を継続しており，水素高割合での運用や水噴射を行う拡散燃焼器より低いNOx排出量を達成する見込みを得ている。

3. 将来展望

今後を展望して，エネルギー政策の動向，ガスタービンの高性能化の将来技術，ガスタービンによるカーボンニュートラルへの取り組みについて紹介する。

3.1 エネルギー政策によるコージェネレーションの普及促進

東日本大震災以降の日本のエネルギーミックス（電源構成）の見直しの中で，コージェネレーション設備は今までの省エネルギー・省CO₂の観点から，分散型電源としてのセキュリティ強化・節電・ピークカット機能や，短期で導入可能な特長等が再評価された。

第6次エネルギー基本計画においてコージェネレーションは，2050年カーボンニュートラルの実現に向け一層推進すべき分散型エネルギーシステムとして位置付けられており，将来的には脱炭素燃料利用が可能なシステムとして期待されている。

中小型ガスタービンでは脱炭素燃料の水素やアンモニア専焼の開発が進められており，コージェネレーション設備の主要原動機として今まで以上に普及促進されることが期待される。またそのためには，産業用中小型ガスタービンの更なる高性能化や低ライフサイクルコスト化が必要とされている。

3.2 ガスタービンの更なる高性能化

産業用ガスタービンの出力・発電効率（LHV基準発電端）に関して言えば，原動機の特徴から発電効率は発電出力が大きくなるにつれて高くなり，また技術の進展により年代を経るにつれて単調に高くなって来ている。

ガスタービンについてはこれまでもTITの高温化や圧力比の上昇による高効率化が図られてきたが，今後もTITの高温化が高効率化の大きな柱と考えられる。TITの高温化はタービン動・静翼の空力技術，冷却技術，耐熱材料技術，遮熱コーティング技術等の発展に依っている。従来より，中小型ガスタービンでは普通鋳造翼が多く用いられ，タービン冷却構造の高度化には寸法的な限界があることから，近年はクリープ強度の高い一方向凝固翼や単結晶翼を採用する機会が増えてきた。また，非常に発達してきた数値流体力学（CFD）を活用して圧縮機部やタービン部の流れ解析や冷却の最適化を行い，損失を極力抑えた設計による効率向上が可能となった。また最近では圧縮機やタービンの多段解析，流体解析と冷却解析の同時解析などの解析手法も進化してきた。

これからもTITの高温化対応技術やCFDを用いた要素性能の向上，またより詳細な各種試験により，更なる高効率なガスタービンが開発されていくものと考えられる。

一方，環境負荷の低減もますます重要な課題となって

いる。排ガス量の多いガスタービンにとっては，大気汚染防止法の枠に留まらず総量規制の対象となる可能性が高いこともあり，低NOx化のための技術革新は今後も続いていくものと考えられる。

3.3 カーボンニュートラルに向けた取り組み

3.3.1 水素ガスタービンの開発 ガスタービンで水素を利用する場合，基本的に燃焼器のみを水素専焼へ対応したものへ交換し，圧縮機とタービンは従来の天然ガス専焼からの変更は無い。

水素は天然ガスに比べて燃焼速度が速く，希薄予混合燃焼器（DLE燃焼器）では燃料中の水素割合が大きくなると燃料/空気予混合部に火炎が逆流する逆火と呼ばれる事象が発生する。また，水素は天然ガスに比べて火炎温度が高くNOx排出量が増加するため，安定燃焼を維持しつつNOx生成量を抑えることもガスタービンでの水素利用の課題である。この水素燃焼の特性や課題に対応する燃焼システムとして，まずは現行の都市ガス専焼燃焼器への水素混焼の製品化が進められている。

カーボンニュートラルへの対応に向けて，水素専焼の燃焼器の開発も進められている。微小な水素火炎を用いた水素専焼のドライ低NOx燃焼器をFig. 6に示す。直径1mm以下の微小な水素噴射孔から水素を噴射し，直交する空気噴流と急速に混合させることで，燃焼安定性に優れる微小な水素火炎を形成し，かつ反応時間を短くすることでNOxの発生を抑制している。⁽⁹⁾



Fig. 6 Dry low NOx combustor with hydrogen combustion

3.3.2 アンモニアガスタービンの開発 低炭素社会のための新たな燃料として期待されるアンモニアと天然ガスの混焼試験が実施され，熱量比率70%の混燃に成功した⁽¹⁰⁾。2MW級のガスタービンでは世界初となり，ガスタービン燃料としてアンモニアを利用する燃焼技術の実用化に目途がついている。

3.3.3 再生エネルギーとコージェネレーションの組合せ スマートエネルギーネットワークに太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギーを大量に導入するためには，これらの不安定な出力が既存の電力系統へ悪影響を及ぼさないように，変動を補完するための周波数調整電源を一定量導入することが不可欠である。

ガスタービンコージェネレーションは排熱回収を含めた総合熱効率が高いために，省エネルギーでミニマムカーボンな周波数調整電源として活用することが期待で

き、急速起動や急負荷変動が可能なガスタービンが要求されている。

3.3.4 コージェネレーションの調整電源としての役割

再生可能エネルギーの導入量増加に伴い、その出力変動が問題となって来ている。その対策としてガスタービンにより出力変動吸収を行い、系統を安定化させる方法も注目されている。

100MWクラスの航空転用型ガスタービンの高速起動パターンをFig. 7に示す。航空エンジン用に設計された軽量ローターやケーシングにより10分間で最大負荷まで到達でき、米国において風力発電の変動を補償する目的で運用されている⁽¹⁾。

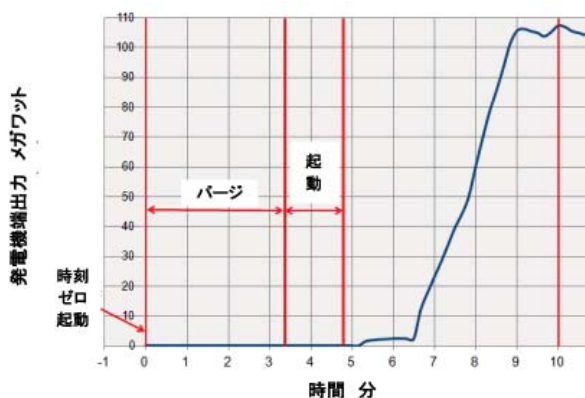


Fig. 7 Startup pattern of 100MW class gas turbine (10 minutes startup)

4. 終わりに

本稿では主に30MW級までの産業用中小型ガスタービンを対象とし、前半では現在に至るまでの非常用発電用としての開発経緯やコージェネレーション設備等の新しい用途開拓の歴史をたどり、後半では政策面からの普及やカーボンニュートラルに向けた取組みについて述べた。産業用中小型ガスタービンは、電源セキュリティ向上や

省エネルギーへの対応、さらにカーボンニュートラルに向けて地球環境に貢献できる将来性のある原動機であると考えられる。

参考文献

- (1) ガスタービン統計作成委員会, 2020年ガスタービン及び過給機生産統計, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 49 No. 5 他
- (2) 日本のガスタービンの歩み 30周年記念写真集, (2002), 日本ガスタービン学会
- (3) 産業技術歴史継承調査報告書 我が国のガスタービン技術の独創性と創造性に関する調査遍, (2003), 新エネルギー・産業技術総合開発機構
- (4) 星野昭史, 平成21年度 技術の統計化調査報告 汎用中小型ガスタービンの技術系統化調査, 技術の系統化調査報告, Vol. 15, 国立科学博物館 (2010)
- (5) 大槻幸雄, 乃村春雄, 井上俊彦, 中安稔, 西谷理, 社会に貢献する中・小形ガスタービン発電装置, (2012), 日本工業出版
- (6) NEDOニュースリリース, 「世界初, 市街地で水素100%による熱電供給を達成」 (2018年4月20日)
- (7) NEDOニュースリリース, 「世界初, ドライ低NOx水素専焼ガスタービンの技術実証試験に成功」 (2020年7月21日)
- (8) 合田真琴, 中安稔ほか 産業用における熱電可変ガスタービンコンバインド設備の導入事例, 日本ガスタービン学会誌Vol. 49 No. 6
- (9) 堂浦 康司, ガスタービンにおける水素燃焼技術紹介, 火力原子力発電会誌 (2021)
- (10) IHI HPプレスリリース: “2,000kWガスタービンで世界初の液体アンモニア70%混焼に成功”, (2021年3月)
- (11) NEDO: “エネルギー・環境新技術先導プログラム」再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発”, (2016年)

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン・蒸気タービンの半世紀の歩みと今後の展望【技術】

ガスタービン熱・流体数値解析技術

Development of Fluid and Thermal Flow Analysis for Gas Turbines



山本 誠^{*1} 黒瀬 良一^{*2} 山本 悟^{*3}
YAMAMOTO Makoto KUROSE Ryoichi YAMAMOTO Satoru

キーワード：ガスタービン，流体解析，燃焼解析，マルチフィジックスシミュレーション

Key Words：Gas Turbine, Flow Analysis, Combustion Analysis, Multiphysics Simulation

1. はじめに

本学会誌の2013年1月号 (Vol. 41, No. 1) に、「ガスタービンのこれまでの40年とこれからの40年」が特集されて以来、早くも10年が経過して、50周年を迎えた。本特集号を見たところ、ガスタービンの熱・流体数値解析技術についてまとめた記事は見当たらないが、それぞれ記事内にたくさん事例が紹介されている。40周年の時点で数値解析技術はすでに設計手法として確立されており、ガスタービンメーカーにおいても広く活用していたことを物語っている。その後、2015年11月号に、「ガスタービン関係の数値シミュレーションの最前線（～現状と今後の展望～）」、2019年11月号に、「マルチフィジックスシミュレーションの進展」などが特集されている。現在、ガスタービンの熱・流体数値解析技術は熱流体物理の高い再現性 (High fidelity) の領域に踏み込んでおり、Large Eddy Simulation (LES) による大規模な数値解析なども実現している。一方では、その信頼性の向上ならびに設計への応用はさらに今後10年が鍵になりそうだ。ここでは、ガスタービンの流体ならびに燃焼の数値解析の分野で国内外の研究を先導してきた山本誠、黒瀬良一両教授にこの10年、さらには50年を振り返って、国内のガスタービン熱・流体数値解析技術について俯瞰しながら解説いただいた。

(山本悟)

2. 流体数値解析

2.1 流体数値解析の歴史

最初に、ガスタービン等に見られるような圧縮性流体に対する代表的な数値解析法の歴史を概観する。

偏微分方程式を離散的な時空間に基づいて解く方法は、イギリスの数学者Southwellが1930年代に緩和法（要するにイタレーション法）を開発したことに始まる。その後、コンピュータが普及し始めた1950年代から、本格的な数値解析法の研究開発が活発化した。1955年には、Peaceman and Rachford及びDouglasがApproximate Factorization (AF) 法と呼ばれる効率的に時間依存偏微分方程式系の解を求める方法を提案した。1959年には、Godunovがセル境界の左右での物理量の不連続を初期値とするリーマン問題を厳密に解くことによって、次の時刻での解を求める衝撃波捕獲を目的とした1次精度の離散化法を提案した。1960年には、Lax and Wendroffが2次精度の中心差分に2次精度の人工粘性を加えた離散化法を提案し、安定した計算を実現した。1969年には、MacCormackがLax and Wendroff法に基づいて2次精度の2段階陽的時間進行法を開発し、高効率な時間進行を実現した。1971年には、Dentonが有限体積法に基づいた圧縮性流体解法を提案し、この手法を1975年にターボ機械の翼間流路解析に用いた。1978年には、Beam and WarmingがAF法に基づいて2次精度の陰的時間進行法を提案し、CFL数に制限されない時間進行が可能となった。また、1980年代には、流束制限関数を導入して数値誤差を増大させないTotal Variation Diminishing (TVD) 法がChakravarthy and OsherやYee and Hartenにより、流束ヤコビアン行列の固有値の正負に応じて離散化を切り変える流束ベクトル分離法がSteger and Warmingやvan Leerなどによって提案され、衝撃波のよりシャープな再現が可能となった。ちなみに、ガスタービンの設計において現在でも利用されて

原稿受付 2022年11月9日

* 1 東京理科大学 工学部機械工学科
〒125-8585 葛飾区新宿 6-3-1
E-mail: yamamoto@rs.tus.ac.jp

* 2 京都大学 大学院 工学研究科
〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C3
E-mail: kurose@mech.kyoto-u.ac.jp

* 3 東北大学 大学院 情報科学研究科
〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01
E-mail: satoru.yamamoto@tohoku.ac.jp

いる流線曲率法は、Novakにより1967年に確立されている。

一方、高レイノルズ数の乱流を再現するための乱流計算に関する研究開発は、数値解析法の研究開発に続いて1960年代後半から活発化した。レイノルズ平均モデル、いわゆるReynolds-Averaged Navier-Stokes equations (RANS) としては、1967年にSpaldingが標準 $k-\epsilon$ モデルを、1972年にWilcox and Alberが $k-\omega$ モデルを、同じく1972年にHanjalic and Launderが応力方程式モデルを提案し、RANSの基礎を確立した。空間平均を用いるLESは、1970年に、Deardroff がチャンネル乱流の計算に成功している。また、乱流モデルを用いない直接計算法であるDirect Numerical Simulation (DNS) は、スーパーコンピュータの登場と同時期にスペクトル法などを利用した高精度な数値計算法が開発され、1982年にMoin and Kimがチャンネル乱流のDNSを行った。1990年代には、各種乱流モデルの精緻化が進み、現在のターボ機械でも利用されているダイナミックSGSモデルが1991年にGermanoらによって、SST $k-\omega$ モデルが1993年にMenterによって開発されている。

現在でも流体の数値解析手法や乱流モデルの研究開発は続けられているが、1990年代までに、流体の数値解析法の基本的な骨格は構築されたと言えよう。

21世紀に入って以降は、産業界での実用化（汎用ソフトウェアの充実）、スーパーコンピュータを用いた大規模計算、複雑物理を取り扱うマルチフィジックス計算へと発展を続けている。

圧縮性流体の数値計算法及び乱流モデルの詳細について興味のある読者は、参考文献(1)(2)などを参照していただければ、全体像及び詳細を理解できるであろう。

2.2 日本ガスタービン学会における流体数値解析の歩み

次に、日本ガスタービン学会が1972年に設立されてからの50年間に、本会及び会員諸氏が流体数値解析にどのように取り組んできたのかを日本ガスタービン学会誌（以下、学会誌）の記事を参照しつつ紹介する。

学会誌第1号（Vol. 1, No. 1）は、創立年である1972年の9月に発行されている。1977年6月号（Vol. 5, No. 17）において、九郎丸元雄・生井武文・井上雅弘（敬称略、以下同様）が「ガスタービン用圧縮機の空力的設計法と性能推定」と題する解説記事を寄稿し、この中で流線曲率法の計算理論を紹介している。この記事が流体数値解析に関するガスタービン学会で最初の記事である。UNIVAC IやIBM701といったデジタル・コンピュータが市販されてから約15年、流線曲率法が開発されて10年ほどの段階でこのような解説記事が掲載されたことは、当時のガスタービン研究者が最先端技術をどん欲に吸収し、ガスタービンの設計に活用しようとしていたことを伺わせる。

ナビエ・ストークス方程式を用いた流体数値計算は、1983年6月号（Vol. 11, No. 41）において、天野良一・

杉山峻一が「ガスタービン翼の液体冷却に関する数値解析」と題する技術論文を発表したのが最初である。この論文では、2方程式型の $k-\epsilon$ モデルを用いて、単純化した冷却通路を有するタービン翼の2次元解析が行われ、翼周りの静圧分布と翼の温度を実験と同等に予測できることが示された。翼内部の熱伝導も考慮された共役伝熱計算となっており、当時としては最先端の研究成果だと思われる。1984年9月号（Vol. 12, No. 46）では、大宮司久明が「ターボ機械の流れの数値解析（その1）」という連載の解説記事において、ナビエ・ストークス方程式など流れの支配方程式に基づく数値計算法及び離散化法を解説している。この記事によると、この当時、ガスタービン学会を始めとして国内の他学協会において流体数値解析に対する複数の調査研究が進められており、流体数値解析に対する当時の注目度・期待度の高さが伺われる。

1985年12月号（Vol. 13, No. 51）には、佐藤幸徳・藤秀実、が解説「燃焼器設計への数値解析の適用と課題」を発表した。この記事は燃焼器の数値計算に関するものであるが、有限体積法（SIMPLE法）と $k-\epsilon$ モデルを使用し、燃焼器ダンプディフューザのフローパターンを2次元解析した結果が示されている（Fig. 1参照）。この図に示された速度ベクトルが学会誌初の流れの可視化結果となった。1986年3月号（Vol. 13, No. 52）では、若松逸雄・橋本孝明が技術論文「超音速軸流圧縮機の流れ場の計算」を発表している。この論文では、2次元オイラー方程式を有限体積法（Denton法）によって解析し、背圧を変化させた場合の衝撃波の変化が再現され、学会誌初衝撃波の可視化結果となった。Fig. 2に計算結

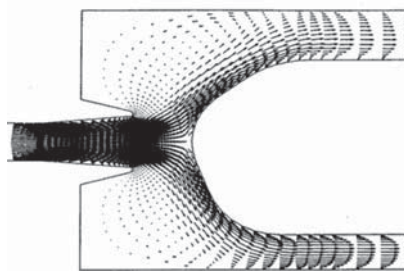


Fig. 1 First visualization of flow field in journal of GTSJ

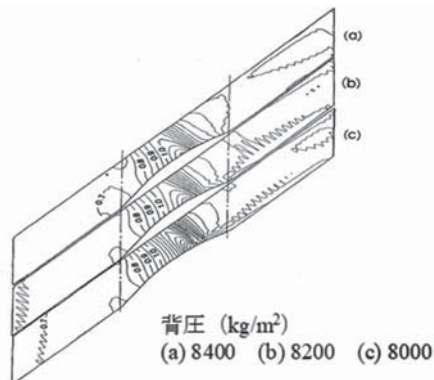


Fig. 2 First visualization of Mach number distribution

果の一部を示す。1987年3月号 (Vol. 14, No. 56) では、三好甫・田村敦宏が解説「航技研数値シミュレータとそのガスタービン研究開発への応用」を発表し、3次元タービン翼の解析結果が紹介された。この解説によれば、スーパーコンピュータを用いた3次元数値解析によって実験と同様の結果を与えることが可能となり (Fig. 3参照)、流体数値解析が実用レベルに達したと述べられている。

1989年6月号 (Vol. 17, No. 65) では、初めて「数値解析・設計」という特集が生まれ、数値解析法、スーパーコンピュータ、逆解析、ファンや軸流タービンの3次元解析などに関する解説が広範に行われた。1990年前後が、ガスタービンの設計・開発において流体数値計算が実用化され始めた段階 (恐らく、予測精度の問題はあったと思われるが...) と考えられる。なお、この特集が発表されてから現在まで、数年に一度の頻度で流体数値解析に関する特集が組まれており、流体数値解析が会員の興味の対象であり続けていることが分かる。

1990年以降、流動現象としては非定常流、遷移、フラッタ、失速点近傍の流れなどに、数値解析法としては高解像度スキーム、LES、最適化などに、計算対象としてはチップクリアランス、タービン翼の冷却通路、回転キャビティ、ターボチャージャ、マイクロ・ガスタービンなどに発展的に拡張された。また、多数の汎用ソフトウェアが市販され、産業界で設計開発に流体数値解析が活用されるようになって行った。

前述のように、21世紀に入って、流体解析は産業界での実用化、大規模計算、マルチフィジックス計算に発展して行ったが、ガスタービン学会においても同様の動向が認められる。2005年11月号 (Vol. 33, No. 6) では、特集「空力騒音」が生まれ、大規模な3次元非定常流計算に基づいて空力騒音を予測する手法が解説され、多くの計算例が示された。2007年7月号 (Vol. 35, No. 4) では、特集「ラージエディシミュレーション (LES) の応用」という特集が生まれ、大規模計算がガスタービン等の設計開発に利用・活用されるようになったことが伺われる。2012年9月号 (Vol. 40, No. 5) では、明連千尋・高橋康雄・加藤泰弘が技術論文「軸流圧縮機遷音速段における3次元翼形状の多目的最適化」を発表した。この論文では、遺伝的アルゴリズムを用いた大規模な形状最適化が行われ、複数の最適解の候補が示されている。一方、マルチフィジックス計算では、以下のような記事が発表されている。2005年7月号 (Vol. 33, No. 4) では、賀澤順一・渡辺紀徳が技術論文「スマート構造を用いた翼列フラッタの能動制御」と題する弱連成を用いた流体・構造連成解析を発表し、学会誌初のマルチフィジックス解析結果を示している。2008年1月号 (Vol. 36, No. 1) では、杉本隆雄・田中良造・仮屋大祐・D. Bohn・K. Kustererが技術論文「冷却翼開発における熱流体連成シミュレーションの適用とパイロメータによる

実機での温度計測」を発表し、内部冷却通路形状を高精度に再現した3次元タービン翼の冷却翼解析を行った。2010年5月号 (Vol. 38, No. 3) では、坂井俊彦・山本誠・水田郁久が技術論文「FEGVにおける着氷現象の数値予測」を発表し、航空用ガスタービンが大気中の過冷却水滴を吸い込むことでFEGVに発生する着氷の時間発展が再現された (Fig. 4)。2019年11月号 (Vol. 47, No. 6) では、特集「マルチフィジックスシミュレーションの進展」が生まれ、様々なマルチフィジックス問題に対する数値解析が紹介された。

以上のように、本会の会員諸氏は世界的な流体数値解析の動向に遅れることなく、解析技術を吸収するとともに、ガスタービンの設計開発のために発展させ続けてきたと言えよう。学会誌の記事は第1号からすべてホームページ⁽³⁾から閲覧できるようになっているので、過去の号も含めて閲覧していただくと幸いです。

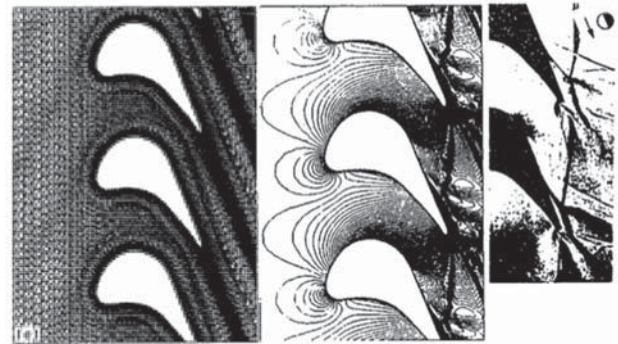


Fig. 3 Comparison of computational result and experiment (Left: Computational grid, Middle: Mach number distribution, Right: Schlieren photograph)

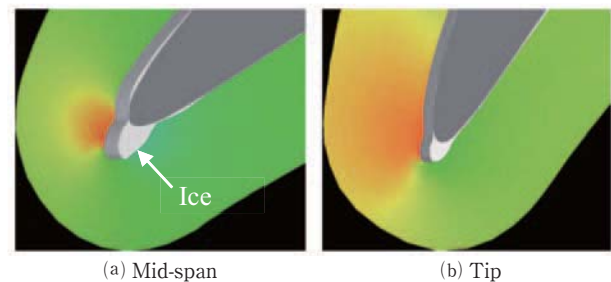


Fig. 4 Ice accretion around leading edge of FEGV

2.3 流体数値解析の今後の展望

最後に、今後の流体解析について私見を述べる。大規模計算は予測精度の向上に、マルチフィジックス計算はガスタービンの安全性や耐久性に直結するものであり、大規模計算とマルチフィジックス計算が産業界での実用化に向けて研究開発が一層進んで行くことは間違いないと思われる。一方で、流体解析が大規模・複雑化すると、計算負荷や計算時間の点が問題になってくるであろう。コストパフォーマンスの観点から、計算負荷が軽く、短時間で結果が得られる流体解析法に対するニーズ

が高まってくるのではないだろうか。機械学習や深層学習など人工知能を利用した流体解析、次元を縮退させたID-CAEのような解析手法の新たな開発も必要になってくると考えられる。ガスタービン分野における流体解析の新たな展開に大いに期待している。

(山本誠)

3. 燃焼数値解析

3.1 燃焼数値解析手法の概要

燃焼とは、可燃性燃料が発熱を伴いながら酸素と反応する現象であるが、反応過程においては数多くの化学種が関与するため、その数値解析は極めて複雑であり、膨大な計算資源を必要とするばかりでなく、安定計算のための高い知識と経験が要求される。例えば、燃料として良く用いられる天然ガスの主成分であるメタンと空気の燃焼では約50化学種・300ステップ反応、ケロシンと空気の燃焼では約300化学種・2000ステップ反応からなる反応機構を考慮する必要がある、これは流れ場の支配方程式（質量と運動量の保存式）に加えてそれぞれ50化学種および300化学種の物質の保存式を連立して解く必要があることを意味する。従って、このような数十～数百化学種の数十～数千ステップ反応から成る詳細反応機構を厳密に解く燃焼場の3次元数値解析、いわゆる燃焼の直接数値解析（DNS）は、最新のスーパーコンピュータを用いた超並列計算を行っても数カ月から数年、もしくはそれ以上かかることが予想され、現実的ではない。そのため、特にガスタービン燃焼器のような実機燃焼器を対象とする場合には、従来から、乱流モデルや燃焼モデルを導入するLESやRANSによるシミュレーション、さらには次元を下げた2次元数値解析が行われてきた⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾。

3.2 燃焼数値解析の歩み -国内のガスタービン関連分野を中心に-

Fig. 5に、日本ガスタービン学会誌（1972年～、日本ガスタービン会議会報を含む）、日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集（1973年～、秋季講演会講演論文集を含む）、およびInternational Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems (JGPP) (2007年～)に記載された記事（論文および解説など）の中で燃焼数値解析に関連するものをピックアップしてカウントした数を発表年毎に示す（なお、ここでは「燃焼数値解析」に明確な定義を定めたわけではないので、大まかな傾向程度に捉えていただきたい）。燃焼数値解析に関する記述が含まれる記事は1980年以降に散見されるが、その全貌を初めてわかりやすくまとめているのは、1985年に日本ガスタービン学会誌に水谷・香月が3回にわたり執筆した「燃焼のシミュレーション」と題した「講義」記事である⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。この「講義」記事の中で、彼らは、燃焼数値解析手法を詳しく解説するとともに、当時の国外の最先端の研究例も紹介している。その後、1992

年、2002年、2007年、2012年にそれぞれ記事数の増加がみられるが、これらは第20回ガスタービン定期講演会講演論文集の「燃焼の数値シミュレーション」オーガナイズドセッションの記事（1992年）、および日本ガスタービン学会誌の「燃焼の数値シミュレーション」（2002年）、「ラージ・エディ・シミュレーション（LES）の応用」（2007年）、「ガスタービンに関連するCFD技術の最前線」（2012年）と題した特集の記事によるものであり、それらを除けば燃焼数値解析に関する記事はほとんど存在しないのが実情である（ちなみに、日本燃焼学会の会誌では、燃焼数値解析に関する記事は1980年代までは同様にほとんどないが、1990年代に入って増加傾向が見られる）。しかし、2015年以降は、徐々にではあるが記事数の増加が見られる。これは、性能世界一になったスーパーコンピュータ「京」（2012年～）、およびそれに続く「富岳」（2021年～）の登場が関係している。これらの高性能スーパーコンピュータを利用できるようになり、特に実機を対象にした燃焼数値解析手法が、それまで大半を占めていたRANSシミュレーションから精度の高いLESへと移行するようになった。これに伴って、燃焼場の予測精度が飛躍的に向上し、企業における燃焼数値解析の信頼性も高まって、産学官における燃焼数値解析の実施例が増加した。

上述したように、2010年以降の燃焼数値解析技術の急激な進歩は、Flameletモデル⁽¹²⁾の拡張など、燃焼モデルの高度化が進んだことはもちろんのこと、上述した「京」や「富岳」の登場にもよるところが大きい。燃焼数値解析の一例として、Flameletモデル⁽¹²⁾を採用したLESの実機燃焼器への適用例をFig. 6, 7に示す。詳細は他文献⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾に記載されているので本稿では省略するが、これまでは1つの燃焼器を対象とすることが限界であったものが、「京」を利用することにより複数の燃焼器や配管内の燃料と酸化剤の流れまでも再現可能となった（メッシュは1億要素規模）。ただし、これらは、「京」の約10,000並列計算でも結果を得るのに1週間程度の計算時間がかかっている。また、燃焼数値解析で予測が最も難しい現象の1つとして燃焼振動があげられるが、ごく最近では、「富岳」を用いて、弱旋回乱流燃焼器内における希薄水素の燃焼振動挙動をLESにより再現することに成功したことが報告されている（メッシュは6億～30億要素規模⁽¹⁶⁾）。これは長時間のデータが必要となるため、「富岳」の約60,000並列計算で10日程度かかっている。

さらに、「富岳」を利用して、燃焼数値解析と構造数値解析との連成や、AI（機械学習）との連携も進められている。具体的には、燃焼-構造連成数値解析については、石炭ガス火焔を対象に、燃焼（ガス化）と構造を同時に解く、燃焼-構造連成数値解析技術の確立を目指した研究が進められている⁽¹⁷⁾。この数値解析では、これまで燃焼側の計算を行う際にパラメータとして与えるしかなかった壁面温度条件を動的に解くことができるため、

より実現象に近い、精度の高い予測が可能となり、実機
の設計や最適操作条件の選定に大いに役立つことが期待
されている。

一方、AI（機械学習）との連携については、
Flameletモデル¹²⁾との連携が進められている。Flamelet
モデルは、火炎特性をデータベース化して利用すること
で、燃焼反応計算にかかる負荷を削減しつつ、高い予
測精度も期待できる手法である。しかし、このモデル
は、複雑な燃焼条件に適用する場合、データベース容量
が急激に増加するという欠点を有するため、適用条件が
シンプルなものに限定されるという制約がある。そこ
で、この問題を解決するために、機械学習の一種である
Artificial Neural Network（ANN）を用いてデータベ
ースを代替するFlamelet/ANN法が提案されている。最
近、本手法が予測精度を保ちつつ、データベースの容量
を大幅に削減する有効な手法となり得ることが確認され
ている^{18),19)}。

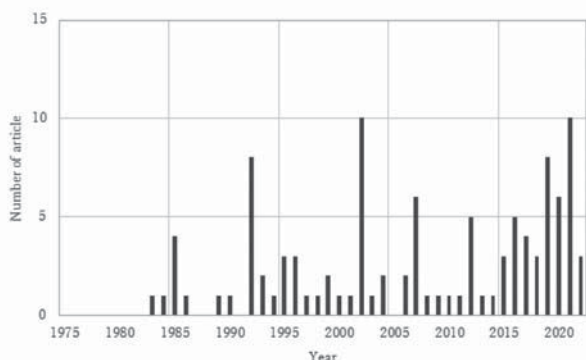


Fig. 5 Number of article on combustion simulation.

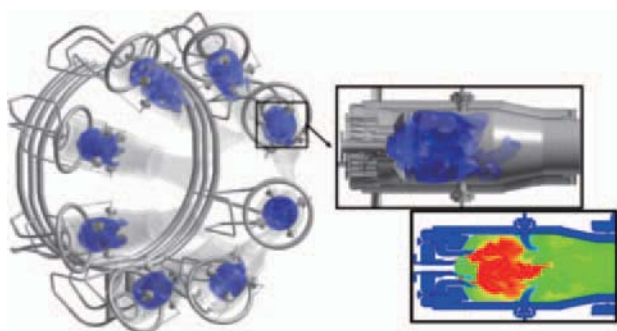


Fig. 6 LES/Flamelet of turbulent combustion in KHI multi combustors for gasturbine engine: Instantaneous distributions of gas temperature.

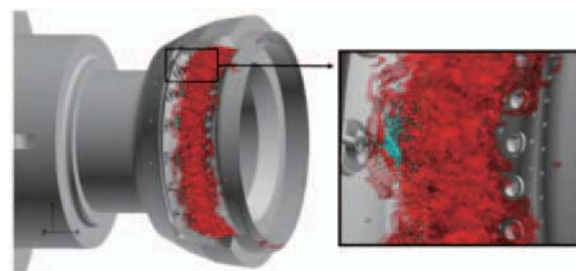


Fig. 7 LES/Flamelet of turbulent spray combustion in JAXA full annular combustor for aircraft engine: Instantaneous distributions of fuel spray and gas temperature.

3.3 燃焼数値解析の今後の展望

以上のように、燃焼数値解析は、燃焼器を設計する上
で欠かせない有力なツールとなっているが、更なる高精
度化と高速化が強く望まれている。また、燃焼騒音問題
の解決に関連した音（圧力変動）との連成や、液体燃料
の微粒化・蒸発・沸騰、さらにはふく射など多種多数
の複雑な現象を同時に解くマルチフィジクスシミュレ
ーションへの期待も高まっている。さらに、実機まるごと
シミュレーションもチャレンジングな課題である。例え
ば、ガスタービンは、主に圧縮機、燃焼器、タービンの
3つのコンポーネントから構成されるが、研究開発段階
では、通常、これらは別々に解析、評価されており、ガ
スタービンとして俯瞰的、統一的な事前評価ができて
いるとは言い難い。特に、フラッシュバックや燃焼振動
は主として燃焼器で発生する非定常かつ不安定な現象
であるが、圧縮機やタービンを含めたガスタービン全体
の圧力変動や速度変動と密接に連動しながら進展する
ため、ガスタービン全体としての評価が不可欠である。
このような状況を受けて、ガスタービンを構成する圧
縮機、燃焼器、タービンを完全に統合してLESで一気
に解く、真のマルチコンポーネント統合シミュレーシ
ョン技術の開発が始まっている²⁰⁾ (Fig. 8)。

(黒瀬良一)

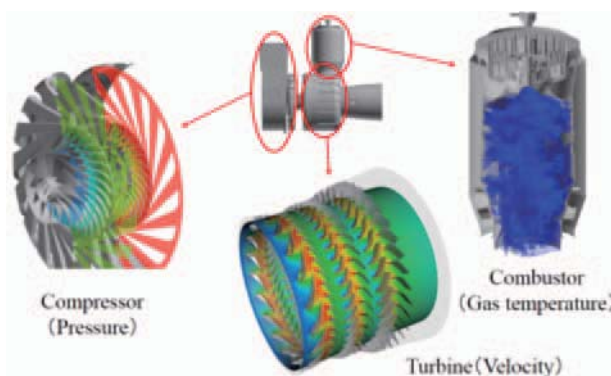


Fig. 8 Concept of multi-component integrated simulation on KHI gas turbine.

4. おわりに

日本ガスタービン学会設立以来50年の年月の中で、山本誠、黒瀬両教授の解説から、ガスタービンの熱・流体数値解析技術が飛躍的に発展してきたことがご理解いただけたかと思う。ガスタービンはCFDの応用先でも、もっとも成功した対象であり、その恩恵は間違いなく多くの企業技術者も享受している。両教授の解説において、ここ10年の熱・流体数値解析技術の中心はマルチフィジクスシミュレーションであったこともうかがえる。今後、10年を展望してみれば、ガスタービンのファン、圧縮機、燃焼器、タービンのCFD研究で培われたそれぞれの最新の熱・流体数値解析技術はインテグレートされて、さらに大規模なスーパーコンピュータを使い、さらにAI技術によりデジタルツイン化されていき、メタバースの世界で、実機と同じく設計・運用ができる時代が来ることを私は夢想する。将来、我が国のガスタービン産業を支える若手技術者・研究者、そして学生が夢を持って取り組めるようなガスタービン熱・流体数値解析技術が今後も発展していくことを切に願う。

(山本悟)

参考文献

- (1) 小林敏雄他編集, 数値流体ハンドブック, 丸善, (2003).
- (2) 笠木伸英編, 乱流工学, 朝倉書店, (2009).
- (3) 日本ガスタービン学会誌, (2022年10月30日閲覧)
<https://www.gtsj.or.jp/journal/index.html>.
- (4) 黒瀬良一, 乱流燃焼流れのLarge-eddy Simulation - 噴霧燃焼への適用 -, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 35, No. 4 (2007), pp. 243-252.
- (5) 黒瀬良一, 燃焼器内乱流燃焼場のCFD, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 40, No. 6 (2012), pp. 282-286.
- (6) 黒瀬良一, ガスタービン燃焼器内乱流燃焼の数値シミュレーション, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 43, No. 6 (2015), pp. 396-401.
- (7) 黒瀬良一, ガスタービンのデジタルツインを目指して, 日本タービン学会誌, Vol. 50, No. 3 (2022), pp. 191-196.
- (8) 長尾 順, 黒瀬良一, 燃焼振動の数値シミュレーション - 「富岳」の活用 -, 日本燃焼学会誌, Vol. 64, No. 208 (2022), pp. 153-160.
- (9) 水谷幸雄, 香月正司, 燃焼のシミュレーション, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 12, No. 48 (1985), pp. 27-33.
- (10) 水谷幸雄, 香月正司, 燃焼のシミュレーション (その2), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 13, No. 50 (1985), pp. 10-16.
- (11) 水谷幸雄, 香月正司, 燃焼のシミュレーション (その3), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 13, No. 51 (1985), pp. 28-35.
- (12) Peters, N., Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion, Progress on Energy and Combustion Science, Vol. 10 (1984), pp. 319-339.
- (13) Hirano, K., Nonaka, Y., Kinoshita, Y., Muto, M., Kurose, R., Large-eddy simulation of turbulent combustion in multi combustors for L30A gasturbine engine, Proceedings of ASME Turbo Expo 2015, (2015), GT2015-42545.
- (14) Nishiie, T., Makida, M., Nakamura, N., Kurose, R., Large-eddy simulation of turbulent spray combustion field of full annular combustor for aircraft engine, Proceedings of International Gas Turbine Congress 2015, (2015), pp. 785-791.
- (15) Tachibana, S., Saito, K., Yamamoto, T., Makida, M., Kitano, T., Kurose, R., Experimental and numerical investigation of thermo-acoustic instability in a liquid-fuel aero-engine combustor at elevated pressure: validity of large-eddy simulation of spray combustion, Combustion and Flame, Vol. 162 (2015), pp. 2621-2637.
- (16) 長尾 順, 庄司 烈, 立花 繁, 横森 剛, 黒瀬良一, 希薄水素乱流予混合弱旋回燃焼器内における燃焼振動のLES, 第49回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2021), B-16.
- (17) 吉村 忍, 山田知典, 渡邊裕章, 黒瀬良一, 吉田隼也, 淀薫, 複数の並列ソルバーを連携活用した石炭ガス化炉のスーパーシミュレーション, 日本機械学会 第34回計算力学講演会 (CMD2021) 論文集, (2021), 048.
- (18) Honzawa, T., Kai, R., Hori, K., Seino, M., Nishiie, T., Kurose, R., Experimental and numerical study of water sprayed turbulent combustion: Proposal of a neural network modeling for five-dimensional flamelet approach, Energy and AI, Vol. 5 (2021), 100076.
- (19) Kasuya, H., Iwai, Y., Itoh, M., Morisawa, Y., Nishiie, T., Kurose, R., LES/flamelet/ANN of oxy-fuel combustion for a supercritical CO₂ power cycle, Applications in Energy and Combustion Science, Vol. 12 (2022), 100083.
- (20) 文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム『「富岳」が拓く Society5.0時代のスマートデザイン』.

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン・蒸気タービンの半世紀の歩みと今後の展望【技術】

ガスタービンの伝熱・冷却技術（50年間の軌跡と今後）

Advancement of Turbine Cooling Technologies over 50 Years and the Future



船崎 健一*1

FUNAZAKI Ken-ichi

キーワード：ガスタービン，タービン翼，伝熱，冷却技術，内部冷却，フィルム冷却

Key Words：Gas Turbine, Turbine vane and blade, Heat Transfer, Cooling Technology, Internal Cooling, Film Cooling

1. はじめに

ガスタービン（以下GTと称す）は，サイクルにおける圧力比，最高温度比増加で熱効率が上がり，出力も増大することから，GTでのタービン入口温度（TIT）は上昇の一途をたどっている。Fig. 1⁽¹⁾にはTITの変遷を示す（この図の元になっているデータは，本学会での調査研究報告書「ガスタービンの高温化と冷却技術」（1997年3月発行；吉田豊明氏主査）で示されたもので，貴重なデータとして多くの資料で用いられている）。ジェットエンジンが登場した1940年（TIT=700℃）から2010年（TIT=1600℃）まで70年間でTITが900℃上昇している（年率13℃程度）。GTの進歩は高温化の賜物と言って過言ではない。

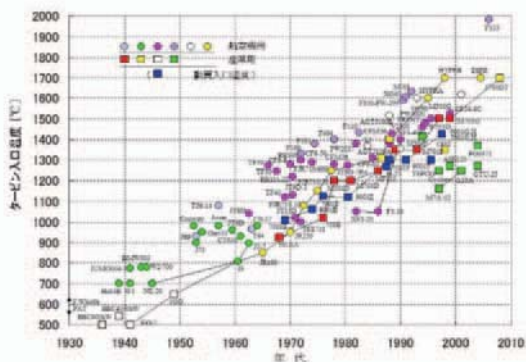


Fig. 1 Trend of TIT since 1930⁽¹⁾

Fig. 1の詳細が解説される機会は少ないと思われるが，この膨大なデータの中に，我が国における大型プロジェクト（所謂国プロ）で開発されたもの（例えばFJR, AGTJ, HYPR, ESPR），また，国プロで培われた技術を元に民間主導で開発されたものなど（例えば，

M701F, M701G）などが含まれており，それらのプロジェクトの中で数多くの冷却技術の開発が行われている。

よく知られているように，GTの高温化を支えてきた技術は，タービン翼用の耐熱材料技術，熱遮蔽コーティング技術，そして冷却技術である。タービン翼の冷却技術に関する解説はこれまでも数多く著されており，本学会発行の「ガスタービン工学」にもまとめられている。今回本稿を執筆するにあたり発刊された学会誌の全てに目を通した。これまでに伝熱・冷却技術に関する数多くの良質な特集・解説記事があり，調べたことはないが，世界にも類を見ない程の質・量の情報であろう。それを通じて，産官学民が総力を挙げてガスタービンの高温化に取り組んだことや本学会が果たした役割の大きさ，特に研究者育成や技術普及のプラットホームとしての存在感を改めて理解することができた。本稿でその全てを解説することは不可能であり，また単なる技術紹介では「屋上屋を架す」事になるので，ここでは本会が創立された1972年からの50年間における伝熱・冷却技術の進展と今後について，GT関連伝熱・冷却の基本を概説したのち，特に国内の研究者，技術者が関与した技術に注目して考察してみたい。また，これらの技術開発に必要な不可欠な支援ツールである実験手法及びCFDについても言及する。なお，ガスタービンの伝熱・冷却問題での対象は燃焼器ライナーやディスクなども含まれるが，ここではタービン翼を対象とする。

2. GT関連伝熱・冷却と冷却タービン翼の進化

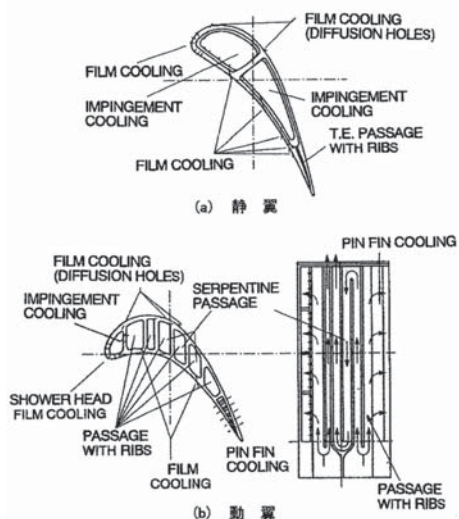
2.1 GTにおける伝熱・冷却の基本

伝熱問題の基本は対象物の温度管理であり，詰まるところ，熱の出入りを制御することである。GTの場合は，翼表面からの熱流入量を抑制しつつ，サイクル効率上許容される流量 w_c 以下の冷却空気を用いて翼内面からの熱吸収量を高め，翼温度 T_w を所定の温度以下に制御する。そこで，タービン翼の温度制御の指標となる冷却効

原稿受付 2022年11月10日

* 1 岩手大学理工学部

E-mail: funazaki@iwate-u.ac.jp

Fig. 4 Cooling schemes for 1700°C class turbines⁽⁸⁾

など)が駆使されていることがこの図から分かる。2010年には、ガスタービン高温化技術の特集が産業用と航空用に分けて2回生まれ、冷却技術に関する詳細な紹介が行われており、航空系GTにおける冷却技術の精緻化に加え^{(9),(10)}、1970年頃から始まった発電系GTの長足の高温化を支えた冷却技術が紹介されている⁽¹¹⁾。

成長期のGT開発を支えた重要な技術として、CFDが研究開発ツールから設計ツールとして普及していった過程は見逃せないだろう。伝熱・冷却に関する数値解法については、翼周り境界層解析に関する記事が初出だと思われる⁽¹²⁾。その後は、1988年、1998年、2004年⁽¹³⁾、2012年、2015年と特集記事の間隔が短くなっており、CFDの進歩と適用範囲や利用対象の拡大の状況が窺い知れる。特に、筆者が記事を著した2004年ごろには伝熱分野へのRANS利用としてはほぼ完成の域に達していたと言える。その後は計算機パワーが向上することでLESなどHigh-Fidelityな解析手法がより普及していった。

2.2.3 成熟期 伝熱・冷却関連の特集に関して2018年の特集⁽¹⁴⁾が最新のものであるが、この記事からフィルム冷却効率や熱伝達率の計測手法として革新的な手法が導入され、コンピュータや各種電子・通信機器の高速化・大容量化によって計測精度の向上とともに計測の限界の拡大も図られ、特に光学的手法による面計測が大きく進歩したことが分かる。その結果として、フィルム冷却効率の計測ではPSP法が標準的手法となり⁽¹⁵⁾、フィルム空気の非定常的な特性も把握できるところまで進展した⁽¹⁶⁾。また、流れ場計測においても、PIV法が一般化するとともに、非定常CFDに肉薄する時間・空間解像度をも備えつつある⁽¹⁷⁾。さらに光学計測の限界を超える「見えない場所での計測を可能にする」MRV法も用いられている⁽¹⁸⁾。

3. 我が国・GT学会の貢献

戦後航空機事業が再開した1952年から70年、ジェット

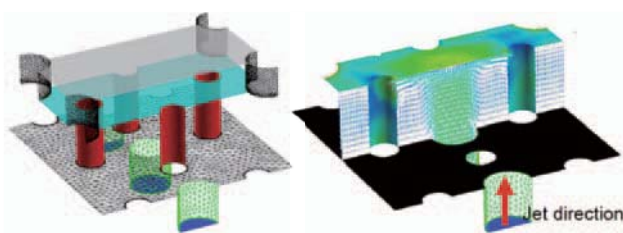
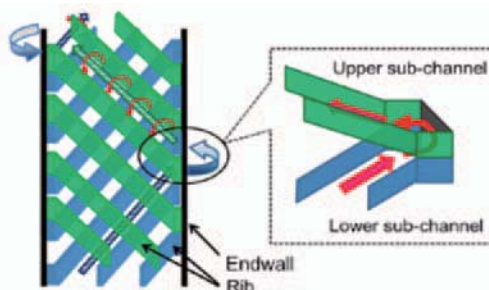
エンジン及び産業用GTの国内開発の過程で多くの技術開発が行われ、GTの高温化に大きく貢献してきた。以下では、我が国の研究者、技術者が深く関与した革新的冷却技術を中心に、内部冷却及びフィルム冷却に分けて紹介する。

3.1 翼内部冷却技術

タービン翼内での熱交換量の増強方法としては、翼内部での伝熱面積の拡大や熱伝達率の増強、また冷却空気そのものの冷却が考えられる。

3.1.1 内部構造の複雑化 一般的の熱交換器では、伝熱面積の増加が効果的とみなされるが、精密铸造による内部冷却流路の複雑化によっても伝熱面積の増加には自ずと限界がある⁽¹⁹⁾。多孔質体を用いることで内部伝熱面積の拡大とフィルム冷却的な冷却である「しみだし冷却」効果を狙うアイデアもあったが、強度面や目詰まりなども懸念されていたこともあり、筆者の知る限りタービン用材料として多孔質体が本格的に開発された例はない。ただし、擬似的に多孔質体を実現するものとして、Lamilloy structureと呼ばれる積層構造が提案された⁽²¹⁾。その派生形の一つとしてFig. 5のようなImpingementとPin-Finの複合冷却構造が提案され、その冷却性能が詳細に調査された⁽²⁰⁾。その発展形として、内部及び外部の伝熱特性同時計測も実施された⁽²¹⁾。

Fig. 6に示すLatticework cooling⁽²²⁾は、複合冷却構造とは若干毛色が異なるが、細い冷却通路が格子状に複数かつ複雑に配置されることで通路内に強い旋回流が発生し、その効果などにより高い伝熱性能を達成している。複雑な内部構造を有するタービン翼は製造面で実現が難しいと考えられており、これまでは研究開発レベルに留まっていたが、金属粉末系3Dプリンターによる製造が実用化し始めている今日、再び注目を集めている。

Fig. 5 Integrated cooling structure⁽²⁰⁾Fig. 6 Latticework cooling (Lattice cooling structure)⁽²²⁾

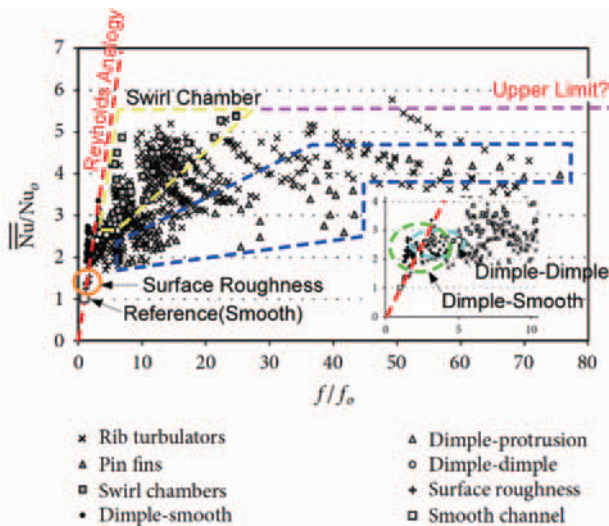


Fig. 7 Heat transfer enhancement by use of various types of cooling methods²³⁾ (modified)

3.1.2 熱伝達率の増強 翼内部での熱伝達率を高める手法としては、インピンジメント、突起、デンプル、旋回など様々な伝熱促進方法がありそれぞれ特徴は異なるが、それらの大半はレイノルズ数の増加で強化され、冷却空気量の増加や流路の狭隘化などで実現される一方、前者は直接的にはエンジンサイクル効率に対するマイナス要因であり、加えて、最終的には主流側に放出するため、主流との混合損失には十分留意しなければならない。

レイノルズ数の増加は圧力損失（圧損）の増加を伴うが、Fig. 7に示すように、熱伝達増強効果の限界が存在するようである（滑面での熱伝達の5～6倍）。また、「レイノルズのアナロジーの呪い(?)」とも言うべき制約も存在し、圧損増加（投資）に比して伝熱促進（収益）は良くても比例的に増加する程度であり（表面粗さやDimple²⁴⁾、またある種のSwirl Chamberなどで実現可能）、大多数の内部冷却手法は圧損増加率が圧倒的に大きい。特にPin-Finは単に熱伝達増加という観点では（円柱という抵抗の大きな要素を用いていることもあり）効果的ではない。勿論、構造面及び伝熱面積の面での評価は別途必要だろう。なお、Pin-Finについては傾斜角や波状壁面の適用による改善などの可能性も示されている²⁵⁾。

Ribについては、総じて高い伝熱特性が得られ、かつ、圧損についても推定しやすい。加えて、Rib高さ、ピッチ、幅、角度など制御因子も多岐にわたるため、私見としては、最も利用しやすい手法であると考えている。Rib付き流路に関する革新はRib配置と形状の変化を付けたことであろう。手前味噌だが、筆者の本学会デビューも角度付きRibに関するもので²⁶⁾、国内では最も早く取り扱った研究の一つであるが、その後安斉ら²⁷⁾によって角度やRib隙間、配置法などについて網羅的に調査が行われ、貴重な設計データが提示されたことは特筆に値する。

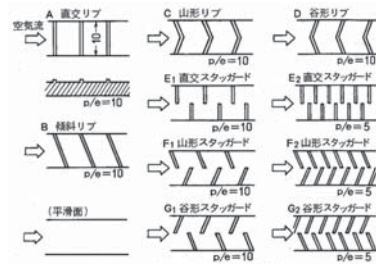


図5 実験供試体リブ形状

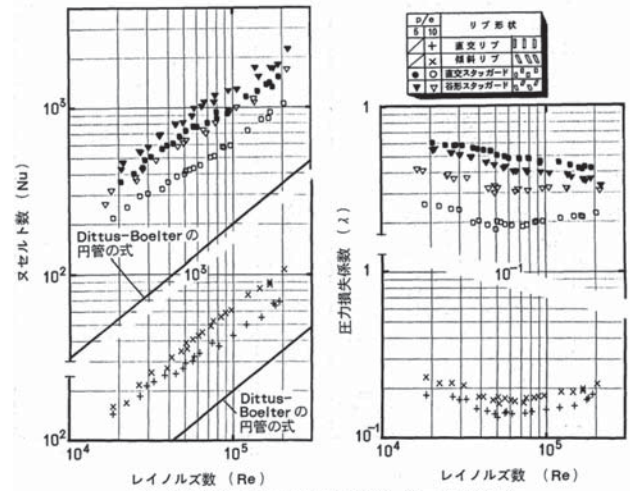


図10 伝熱流動特性 (H=15 mm, d_c=12 mm, e/d_c=0.058の場合)

Fig. 8 Heat transfer enhancement by use of various types of ribs on the cooling channel surface²⁷⁾

3.2 高性能フィルム冷却

式(2)やFig. 2から明らかかなように、内部冷却による熱交換作用後であっても、フィルム冷却用の冷却空気は主流よりも相当低い状態で主流側に噴出されるため、噴出空気が翼表面を適切に覆う場合にはかなりの熱流入の抑制が可能である。フィルム冷却における革新は冷却孔出口形状の変更、具体的にはDiffusor HoleまたはFan-Shaped Holeの導入である²⁸⁾。この形状変化による効果の巨視的な説明は、出口における冷却空気の運動量比の減少による主流への貫通の抑制であるが、流れの構造的にはCRVP (Counter-Rotating Vortex Pair) の制御であると考えられる。CRVPの発生原理については複数の説があるが、ぶら下がり渦 (Hanging Vortex) が支配的という研究もある²⁹⁾。Fig. 9にはRANS解析で求めたFan-Shaped Hole (Penn-State大学で開発された777)からの冷却空気の空間温度分布、壁面上温度分布（フィルム冷却効率に相当）とQ値で同定した渦構造（ヘリシティで着色）と流れ方向温度を示す³⁰⁾。この結果から、冷却孔出口形状を下流側に広げることにより、CRVP自体が弱くなるとともにその発生位置が冷却孔中心から離れるため、Lift-off効果が弱まることが理解できる。

Fan-Shaped Holeの登場後、新たな出口形状の探索が行われたが、その中でもFig. 10のArrowhead形状³¹⁾及びFig. 11のNEKOMIMI形状³²⁾がFan-Shaped Holeを性能面で凌駕するものとして注目された。実際の翼面への成形

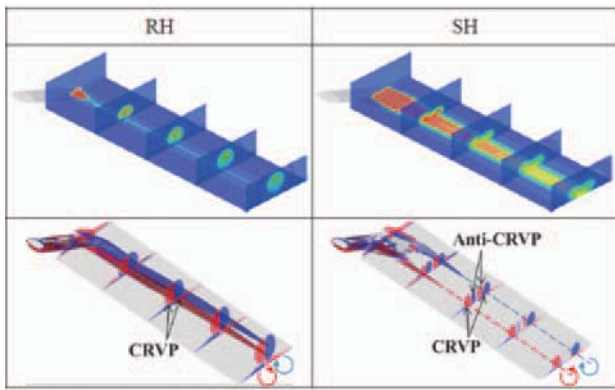


Fig. 9 Spatial distributions of coolant temperature with their footprints meaning film cooling effectiveness (upper row) and vortical structures (lower row)³⁰ (left; Round Hole, right; Fan-Shaped Hole)

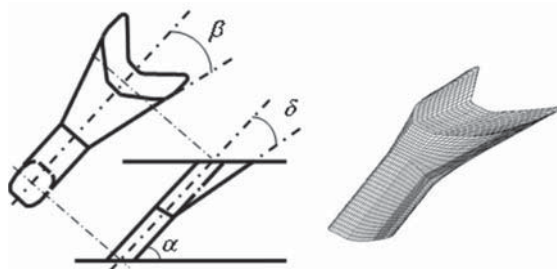


Fig. 10 Arrowhead-shaped cooling hole³³

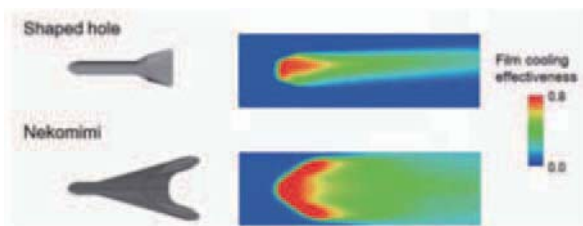


Fig. 11 NEKOMIMI cooling hole³⁴

上の難易度は別にして、今後も最適化手法、機械学習など新たな探索手法の応用により多くの形状が提案され、フィルム冷却効率の改善が図られると予想される。

孔出口形状の変更だけでなく、その周囲の翼面に変化を加えることによりフィルム冷却効率向上を図る研究も多く行われている。その代表例は文献²⁹でもいくつか紹介されているが、Fig. 12には著者らが開発した流れ制御デバイスの原型ともいべきDFCD (Double Flow Control Device)²⁹とその作動原理を示す。DFCDは非常に有効なデバイスであるが、突起型デバイスであるため空力損失増加とともにデバイスへの熱負荷についても考える必要がある。その難点を克服するためにデバイスを冷却孔に近づけることで冷却孔前縁部が主流から遮蔽され、デバイス背面からの冷却が可能となる新たなデバイスも提案されている (V字デバイス)³⁵。

3.3 冷却空気の冷却など

GTの高温化は必然的に圧力比の上昇を伴うため、冷却空気となる圧縮機出口温度も上昇の一途をたどる。こ

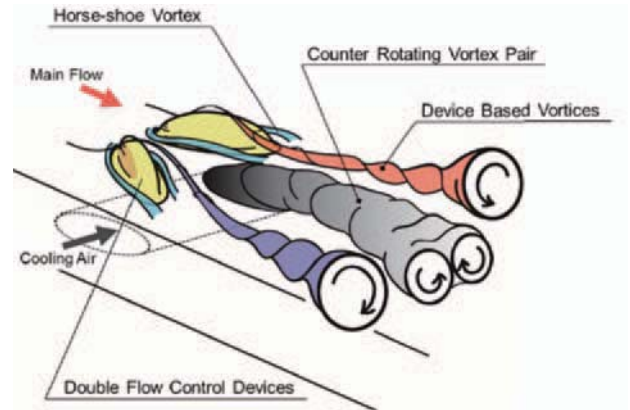


Fig. 12 Simplified mechanism for CRVP suppression by DFCD³⁵

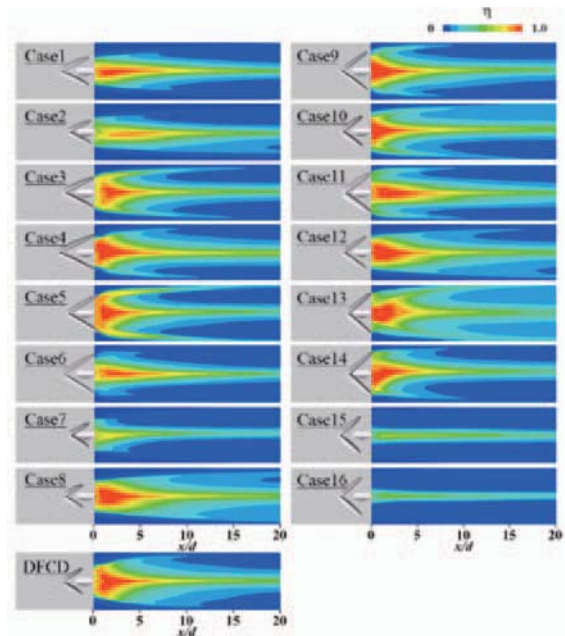


Fig. 13 Contours of film cooling effectiveness obtained by different types of VFCDs in comparison with DFCD³⁵

れに対応するため、冷却空気そのものを冷却するアイデアがある。このこと自体は古くから考えられていたが³⁶、冷却に必要な熱交換器を備えることは特に航空系ではエンジン重量増を招き、かつ、外気との熱交換装置の空気抵抗などもあり、構想程度で留まっていた。その中でも、山脇が提案したナトリウムを利用した冷却構造はその後の先駆的研究となった³⁷。また、二ノ宮ら³⁸は、翼型形状の熱交換器に熱輸送媒体などを適用した軽量中間冷却・再生器 (ICR) をFig. 14のようにエンジンに搭載することで大幅なFuel Burn削減の可能性を示した。

空気以外の冷媒を冷却に使う方法については、発電用ガスタービン (H型) での蒸気冷却で実現されており、水素利用の国際プロジェクトWE-NETではタービンの冷却に水利用も検討され、冷却効率0.9越えなど空気のみでの冷却では考えられない高い冷却性能を有するシステムも開発された^{(8), (39)}。蒸気・水冷却などはシステムの複雑さ、運用の難度に加え高コストであることがネックと

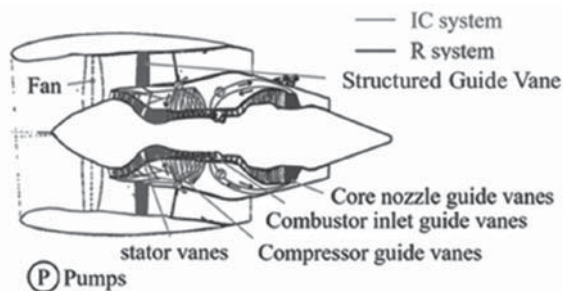


Fig. 14 ICR system for aero-engine[®]

なり現時点では普及していないようだが、今後水素利用が再度脚光を浴びている中、再考されるべき冷却技術である。

4. 今後の展望 (むすびに代えて)

GTSJ創立から50年間におけるタービン高温化に向けた伝熱・冷却関連の技術の進展を概説した。一本調子で高温化が実現したように思われがちだが、多くの先達の努力と情熱、そしてそれを支えてきた国や企業の取り組みあつての偉業であり、それらに対して改めて敬意を表したい。

これからの伝熱・冷却技術の方向性だが、航空業界、発電業界の脱炭素化実現に向けて水素利用の可能性が再びクローズアップされており、それを念頭に置いた研究の展開が期待される。特に航空用では極低温状態での利用となり、冷媒が存在することを活かした冷却技術も検討される可能性があり、その観点からロケットエンジンの技術との連携促進が有効かと思われる。さらに、タービンの冷却のみならず、減速機用潤滑油や電動化に向けての熱管理技術は今後更に重要性が増すと考えられ、軽量熱交換器に関する技術開発は多くの関心を集めている。このようにGTにおける幅広い伝熱・冷却研究の推進が望まれており、これまでGTを扱わなかった国内の大学関係者にも参画の余地が十分にある分野であるが、関心を喚起するため本学会の努力も必要である。

また、製造技術の進歩と新材料の実用化と歩調を合わせるような革新的冷却構造の登場にも大いに期待したい。特にAM (Additive Manufacturing) はこれまで眠っていたようなアイデアが日の目を見ることも十分考えられる。まさに温故知新。その意味でもGTSJ50年を振り返る機会を頂けたことは貴重であった。そして、本稿が読者諸兄に何かしらの振り返りの機会と更なる前進の一助になれば幸いである。

参考文献

- (1) 吉田豊明, 「ガスタービンにおける伝熱・冷却」特集号によせて, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 35, No. 3 (2007), pp. 132-133.
- (2) 工藤一彦, 谷口博, 船崎健一, 小幡正一, 川崎昌美, 航空用エンジン高圧タービン冷却静翼への放射伝熱解析,

- 日本機械学会誌 (B編), Vol. 56, No. 521 (1990), pp. 129-133.
- (3) Holland, M.J. and Thanke, T.F., Rotor Blade Cooling in High Pressure Turbines, Journal of Aircraft, Vol. 17, No. 6 (1980), pp. 412-418.
- (4) 高原北雄, 能瀬弘幸, 蓑田光弘, 西村英明, 吉田豊明, 山本孝正, 井上重雄, 山崎紀雄, 航技研における高温タービンの研究 (第一報), GTCJ, Vol. 2, No. 8 (1975), pp. 9-19.
- (5) 高原北雄, 能瀬弘幸, 蓑田光弘, 西村英明, 吉田豊明, 佐々木誠, 坂田公夫, 熊谷隆王, 航技研における高温タービンの研究 (第二報), GTCJ, Vol. 3, No. 9 (1975), pp. 4-12.
- (6) 小幡正一, ガスタービン翼冷却の基礎研究, GTCJ, Vol. 3, No. 9 (1975), pp. 13-18.
- (7) 能瀬弘幸, 空冷タービン翼の伝熱 (その2), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 9-34 (1981).
- (8) 吉田豊明, 「タービン」(伝熱を中心に), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 36, No. 2 (2008), pp. 78-83.
- (9) 福山佳孝, 航空エンジン高温化の変遷 (ガスタービン高温化対応最新技術動向 (その2: 航空用)), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 38, No. 3 (2010), pp. 136-139.
- (10) 大北洋治, 航空エンジンにおける冷却技術の動向 (ガスタービン高温化対応最新技術動向 (その2: 航空用)), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 38, No. 3 (2010), pp. 146-154.
- (11) 武石賢一郎, ガスタービン翼冷却技術の最新動向 (ガスタービン高温化対応最新技術動向 (その1: 発電用)), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 38, No. 2 (2010), pp. 78-84.
- (12) 能瀬弘幸, 空冷タービン翼の伝熱 (その1), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 9-33 (1981).
- (13) 船崎健一, ガスタービンの冷却問題におけるCFD, 日本ガスタービン学会誌, Vol.32, No. 4 (2004), pp.32-39
- (14) 船崎健一, ガスタービンにおける伝熱・冷却技術の最新動向: 総論, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 46, No. 6 (2018), pp. 421-426.
- (15) 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. 338-343.
- (16) 福岡儀剛, 小田豊, 武石賢一郎, 高速応答型PSPを用いたタービン静翼フィルム冷却の非定常計測, 第48回日本ガスタービン学会定期講演会 (2020).
- (17) 相馬天斗, 山崎悠貴, 船崎健一, 谷口英夫, 長尾隆央, 航空エンジン用低圧タービン翼後縁近傍流れ場のPIV計測-翼面境界層流れと翼後縁近傍流れ場の関連性調査-, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 49, No. 6 (2021), pp. 463-472.
- (18) 正木華妃斗, 新関良樹, 両角亮, 武石賢一郎, 都留智子, 旋回流が正方形管および長方形管の伝熱特性に与える影響について, 第49回日本ガスタービン学会定期講演会 (2021).
- (19) Bunker, R.S., Dees, J. E., and Palafox, P., Impingement Cooling in Gas Turbines: Design, Applications, and Limitations, WIT Transactions on State of the Art in

- Science and Engineering, Vol. 76 (2014).
- (20) 福山佳孝, 中俣千由起, インピンジ冷却, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 35, No. 3 (2007), pp. 169-174.
- (21) ハミドン・ビンサーレ, 船崎健一, 複合型インピンジ冷却構造に関する研究 (実験による内部及び外部伝熱特性同時計測), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 35, No. 6 (2007), pp. 58-66.
- (22) Tsuru, T., Morozumi, R. and Takeishi K., Study on Thermofluid Characteristics of a Lattice Cooling Channel, International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, Vol. 11, No.1, (2020).
- (23) Ligrani, P., Heat Transfer Augmentation Technologies for Internal Cooling of Turbine Components of Gas Turbine Engines, International Journal of Rotating Machinery, Vol. 2013 (2013).
- (24) 村田章, サーペンタイン流路を用いた強制対流冷却に関する研究概説, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 35, No. 3 (2007), pp. 165-168.
- (25) 武石賢一郎, 都留智子, タービン動翼内部流路の熱流動特性に関する研究, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 46, No. 6 (2018), pp. 448-454.
- (26) 船崎健一, Metzger, D.E., 角度付き乱流促進体の研究, Vol. 17-65 (1988).
- (27) 安斉俊一, 川池和彦, 松崎裕之, 竹原勲, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 19-75 (1991).
- (28) Bunker, R.S., Evolution of Turbine Cooling, ASME TURBO EXPO 2017, GT2017-63205 (2017).
- (29) 船崎健一, 流れ制御デバイスによるフィルム冷却の高効率化, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 46, No. 6 (2018), pp. 455-461.
- (30) 佐々木優大, 船崎健一, 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, 第50回日本ガスタービン学会定期講演会 (2022).
- (31) Okita, Y. and Nishiura, M., Film Effectiveness Performance of an Arrowhead-Shaped Film-Cooling Hole Geometry, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 129, No. 2 (2006), pp. 331-339.
- (32) Kusterer, K., Tekin, N., Reiners, F., Bohn, D., Sugimoto, T. and Tanaka, R. and Kazari, M., Highest-efficient Film Cooling by Improved NEKOMIMI Film Cooling Holes-Part 1: Ambient Air Flow Conditions, ASME Turbo Expo 2013, GT2013-95027 (2013).
- (33) 大北洋治, 航空エンジン用タービンにおける冷却性能向上の研究, 東京大学学位論文 (2022).
- (34) 谷口智紀, 都留智子, 堀内豪, 川崎重工における産業用ガスタービンの冷却翼開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 46, No. 6 (2018), pp. 435-441.
- (35) Funazaki, K., Yoshida, N. and Saito, S., Studies on V-shaped Flow Control Devices to Improve Film Cooling Effectiveness for Air-Cooled Turbines, Asian Congress on Gas Turbine, ACGT2022-0084 (2022).
- (36) 吉田豊明, 高温ガスタービンの冷却技術の進展と将来, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 20, No. 80 (1993).
- (37) 山脇栄道, 高性能タービン翼冷却構造の研究, 岐阜大学学位論文 (2004).
- (38) ニノ宮竜成, 伊藤優, 長崎孝夫, 翼型熱交換器で構築した軽量ICRエンジン搭載航空機のフェューエルバー, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 47, No. 6 (2019), pp. 429-436.
- (39) 田沼唯士, 新関良樹, WE=NETガスタービン研究開発と高温・高性能ガスタービンに向けた成果の展開, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 44, No. 6 (2016), pp. 484-491.

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン・蒸気タービンの半世紀の歩みと今後の展望【技術】

GTSJの活動に見るガスタービン燃焼技術の研究開発の概要

Overview of Research and Development of Combustion Technologies for Gas Turbines as Seen in Activities of GTSJ



山本 武*¹

YAMAMOTO Takeshi

キーワード：燃焼技術，燃焼器，発電用ガスタービン，航空機用エンジン，窒素酸化物（NO_x），水素

Key Words：Combustion Technology, Combustor, Gas Turbine, Jet Engine, Nitrogen Oxides (NO_x), Hydrogen

1. 緒言

50年のガスタービン燃焼技術の進展と今後の展望を6ページでまとめるのは至難の業であるので、日本ガスタービン学会（以下、GTSJ）の講演論文集や学会誌の記事のうち、筆者の知識の及ぶものについてまとめた。筆者の見聞や考察不足のため、至らないところ、取り上げた技術に偏りがあると思われるが、ご容赦いただきたい。

定期・秋季講演会で発表された燃焼関連の論文は約540件であり、全論文の約25%に及び、燃焼はGTSJの活動の中で最も多くの研究開発が発表された技術分野の一つである。

ガスタービン燃焼器の主要な技術開発課題の一つに窒素酸化物（NO_x）排出量の低減があり、その開発において、GTSJ発足当時から現在まで、また将来においても常に主要な性能要求となると考える。ガスタービンでは、熱効率向上のため、より高いタービン入口温度が求められるが、燃焼温度の上昇によりNO_x排出量は指数関数的に増加する。燃焼器の研究開発に関わる技術は、燃焼、燃料、材料（耐熱金属、CMC）、試験設備、温度計測、排ガス濃度計測等、多岐にわたるが、本稿で全てを網羅することは難しいので、燃焼器開発で常に課題となるNO_x低減技術と、カーボンニュートラルのため重要となっている水素燃焼技術を中心に解説させていただく。

2. 発電用ガスタービン

2.1 高効率ガスタービンの研究開発

筆者が所属する宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA）の前身である旧航空宇宙技術研究所（以下、NAL）に縁の深い産業用ガスタービンの研究開発は、旧通産省工業技術院で実施されたムーンライトプロジェクトの一環として行われた高効率ガスタービンの研究開発（1978

～1987年）である⁽¹⁾。本プロジェクトでは、総合効率55%（LHV基準）を目標とし、再熱サイクルが採用され、圧力5.5MPa、タービン入口温度1500℃が設定された。燃焼器はキャニュラの高圧燃焼器、再熱燃焼器が開発された。NALではメタン燃料を高圧で供給使用できる高圧燃焼試験設備が整備され、これらの燃焼器の試験が行われた⁽²⁾。本設備は、本プロジェクト後、最高圧力が5.0MPaに下げられたものの、空気加熱器を付加するなどの増強が行われ、3章で示す航空機用エンジンの国家プロジェクトやJAXAの研究開発プロジェクト、外部の設備利用試験等に大いに活用されている。

2.2 低NO_x燃焼器の開発

学会誌の創立40周年記念特集に、塚越⁽³⁾が高温・高効率化をキーワードとして三菱重工業（以下、MHI）の大型ガスタービンの40年間の開発について紹介している。ガスタービンは高効率化のためにタービン入口温度を高める必要があり、燃焼器の排出するNO_xを低減し、環境基準以下に低減する技術の開発が継続して必要となる。

初期のガスタービンでは拡散燃焼方式が用いられていた。NO_x排出量削減のためには、燃焼器内への水や蒸気の噴射が行われていたが、同社はタービン入口温度の上昇に対応するため、予混合燃焼方式を採用した。予混合燃焼は安定燃焼する空燃比範囲が狭く、しばしば燃焼器を破壊する燃焼振動が発生するため、燃焼振動の抑制は予混合燃焼器の開発の最も重要な課題と言える。同社が1984年に開発した1150℃級M701D形ガスタービンでは、燃焼器の尾筒に設置したバイパス弁により空燃比を調整して安定燃焼を実現し、世界で初めて予混合燃焼器を実用化した。

1997年に開発した1500℃級M501G形では、燃焼器壁面をボイラ蒸気で冷却することにより、冷却空気を燃焼用に振り分けることで燃焼温度を下げ、NO_xを削減した。1600℃級M501J形燃焼器では燃焼振動抑制装置による高度な制御で燃焼の安定化を実現した。

40周年特集では、吉田ら⁽⁴⁾が日立製作所（以下、日立）

原稿受付 2022年11月10日

* 1 (国研) 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門
コアエンジン実証 (En-Core) プロジェクトチーム

におけるガスタービン燃焼器開発について解説している。日立では乾式の低NO_x燃焼器を開発し、1990年から大容量ガスタービンに適用してきた。この燃焼器は、安定に燃焼する拡散燃焼の1段目燃焼部が中央に配置され、その周りにNO_x排出が少ない予混合燃焼の2段目燃焼部が環状に配置されている。同燃焼器はフェーズⅠ～Ⅲの3段階を経て開発が進められた。

フェーズⅠ燃焼器は2段目燃焼部の空気量を空気流量調整機構により変化させ、空燃比を制御して低NO_x燃焼と安定燃焼を両立した。

フェーズⅡ燃焼器はタービン入口温度の高温化による燃焼温度の上昇を抑えるため、2段目燃焼部の空気流量を増やし、それによる不安定化に対応するため、ブラフボディ型保炎器を設置した。これにより1300℃級ガスタービンで1100℃級ガスタービンを上回る低NO_xを実現した。

フェーズⅢ燃焼器は2段目燃焼部の空気流量がさらに増やされると共に周方向に4セクタに分割され、それぞれに供給する燃料を別に制御できるようになっている。これによりガスタービンの負荷に合わせて、燃料を供給するセクタ数を増減し、燃料を供給するセクタで適切な空燃比範囲になるように燃料を制御する。負荷の増加とともに、燃料を供給するセクタを増やす毎に、NO_x濃度は減少、増加を繰り返し、全負荷範囲で低NO_xを実現している。

これらの燃焼技術は、中型ガスタービンH-25、H-80に展開されたが、H-25では、拡散燃焼を行う1段目燃焼部からのNO_x排出を低減するため、Fig. 1に示す多孔同軸噴流バーナ（以下、クラスタバーナ）に換装された⁽⁵⁾。

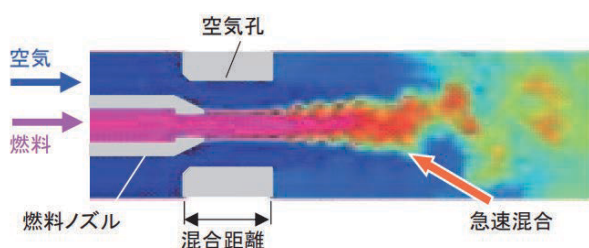


Fig. 1 Structure of the cluster burner and mixture state of fuel and air by CFD

2014年、MHIと日立的の火力発電システム事業が統合され、三菱日立パワーシステムズ (MHPS) が発足、2020年に三菱パワーに改称された。高田ら⁽⁶⁾は同社の1650℃のタービン入口温度を達成したJAC形ガスタービンについて解説している。J型ガスタービンの燃焼器では蒸気冷却方式を用いているが、JAC形ではこれを強制空冷方式に変更して50℃の高温化を実現すると共に、運用性を向上した。

定期講演会で発表された各社の予混合燃焼器の概要を紹介する。東芝の予混合燃焼器は、予混合ダクト内で空気と燃料を混合し、缶型燃焼器の軸方向複数段に分けて

予混合気を導入して燃焼させる方式である。川岸ら⁽⁷⁾は予混合ダクト内での逆火防止のため、CFDを行い各断面で一様な速度分布を実現したことを報告している。川崎重工業（以下、KHI）の1.7MW級ガスタービンM1A-17D用燃焼器について、西ら⁽⁸⁾が紹介した。燃焼器は単筒缶式であり、中央に着火・保炎用のパイロットバーナ、周りに希薄予混合燃焼器のメインバーナ、燃焼器出口近くに追い焚きバーナを持つ。NO_x排出は35ppm以下である。IHIの石川ら⁽⁹⁾は中央に拡散燃焼パイロットバーナ、周りに6本の予混合燃焼メインバーナを持つ液焚き燃焼器を開発し、IM270エンジンでNO_x 30ppm (16% O₂) を達成した。

2.3 水素燃焼技術

三菱パワーはCO₂排出量をゼロにするために、水素やアンモニアを燃料とするガスタービンの開発を開始している。同社は予混合燃焼器を用いるJAC形ガスタービン等については、天然ガスと水素（体積割合30%）を予め混合して燃料として用いる混焼用燃焼器の開発を完了している。H型ガスタービン用燃焼器としてはマルチクラスタ燃焼器を適用し、水素の専焼を目指して開発が進められている。H-25型ガスタービンではマルチクラスタ燃焼器により、30%の混焼が達成されており、こちらも専焼の実現を目指して開発が進められている。

クラスタバーナは酸素吹きCO₂回収・貯蔵付き石炭ガス化複合発電 (IGCC) プラントの水素リッチ燃料ガスタービンのドライ低NO_x燃焼器にも適用され、最大負荷時のNO_x排出濃度9.1ppm (16% O₂換算) を達成した⁽¹⁰⁾。

KHIは2010年に「CO₂フリー水素サプライチェーン構想」を公表し、その実現のために技術と製品の開発に止まらず、商用化を目指した技術実証と協業コンソーシアム構築を行っている⁽¹¹⁾。その一環として、水素ガスタービンの開発が行われ、堀川ら⁽¹²⁾はAcUAS (Aachen University Applied Science) が保有する微小な水素火炎を用いたMicro-mix水素専焼ドライ低NO_x燃焼技術に着目し、産業用ガスタービンの缶型燃焼器に適用した。Fig. 2にMicro-mix水素燃焼の概念図と火炎写真を示す。微小な水素噴射孔（直径1mm以下）から水素を噴射し、直交する空気噴流と急速に混合、水素火炎を形成する。微小な水素火炎を形成することで、局所的な高温域の発生を無くし、反応時間を短くしてNO_xの発生を抑制す

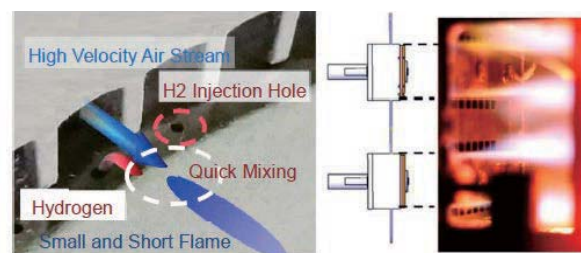


Fig. 2 Micro-mix hydrogen dry low NO_x combustion

ることが可能である。石村ら¹³⁾は、DLE燃焼器に用いている追焚き燃焼も加えて適用することにより、全運転範囲で35ppm (16%換算) を実現したことを報告している。

2.4 中小型ガスタービンの燃焼器

40周年特集では、井上¹⁴⁾により産業用中小型ガスタービンの進展がまとめられている。燃焼器の拡散燃焼から予混合燃焼への移行が1990年頃であること、1990年代の終盤から2005年の間に触媒燃焼が示されている。将来の展望の中で燃焼器に関連するものとして、低NO_x化の技術革新、未利用燃料使用等の燃料多様化への対応、水素燃料への対応が上げられている。

2.5 触媒燃焼器

西ら¹⁵⁾は触媒燃焼ガスタービンM1A-13Xを紹介した。燃焼器の構成は、空気の上流から順に、プリバーナ、メイン燃料混合器、触媒モジュール、尾筒である。プリバーナは空気の一部を使用して希薄予混合燃焼を行って触媒を予熱する。触媒モジュールは2段構造になっていて、上流側には低い温度で着火する白金系触媒、下流側には酸化特性が良好なパラジウム系触媒が用いられている。触媒の長寿命化のために触媒内では予混合気の半分を燃焼させ、残り半分は尾筒で気相燃焼させる。プリバーナ以外ではNO_xが発生する1500℃を超えないように制御することで、排ガス中のNO_x濃度9 ppm (O₂ = 0%) 以下を実現した。

2.6 アンモニア燃焼

壹岐ら¹⁶⁾は、産業総合技術研究所で行われているカーボンフリーアンモニアの製造技術および利用技術の研究開発について紹介している。アンモニアは液化が容易であり、液化ガスとして輸送・貯蔵が可能であるため、水素キャリアとして優秀であるが、燃料として使用する場合、燃焼速度が小さく(メタンの1/5)、着火しにくく、フューエルNO_xが大量に発生しやすい。50kWマイクロガスタービンの燃焼器の開発が行われ、NO_x低減のためにリッチリーン燃焼方式が採用された。定格近くの出力で排気中のNO_x濃度164ppmまで低減し、これを脱硝装置により25ppmに低減して目標を達成した。共同研究者のトヨタエナジーソリューションズ¹⁷⁾は、300kWマイクロガスタービンでアンモニア100%専焼を達成した。

内田ら¹⁸⁾は2 MW級ガスタービンを使用し、液体アンモニアを直接噴霧して燃焼する燃焼器の開発を行った。本燃焼器でもリッチリーン燃焼方式が採用された。試験の結果、アンモニア混焼率25%までの条件ではアンモニアガスと同等のエミッションであること、混焼率70%までは良好な燃焼状態が得られることが確認された。

3. 航空機用エンジンの燃焼器技術の開発

3.1 国家プロジェクト

航空機用ガスタービンの燃焼器技術は、4つの国家プロジェクトを通して開発が進められてきた。

GTSJの前身である日本ガスタービン会議が設立され

た1972年の前年である1971年から1982年まで旧通商産業省工業技術院の大型プロジェクト制度による「航空機用ジェットエンジンの研究開発」が実施され、我が国初の高バイパス比ターボファンエンジン(FJR710)が開発された。燃焼器の開発はKHIとNAL^{19),20),21)}が協力して行った。NALは高圧アニュラ型燃焼器試験装置を整備し、実機条件での試験により燃焼器の開発が実施された。蒸発管形燃焼器、予混合燃焼器等も研究されたが、試作エンジンには、渦巻噴射弁(プライマリ、セカンダリの2燃料系統)とスワラによる旋回流保炎を組み合わせた燃焼器が搭載された。本エンジンはFJR710/600Sに改良され、STOL実験機飛鳥に搭載された。

1989年～1999年には旧通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度による「超音速輸送機用推進システムの研究開発(HYPRプロジェクト)」が実施された。国内エンジンメーカ3社(IHI, KHI, MHI)、海外エンジンメーカ4社(米GE, 米P&W, 英RR, 仏Snecma)、国立研究所(NAL等)が参加する国際共同研究であった。燃料としてメタンを使用し、マッハ3までは可変サイクルターボファン、マッハ3～5までをラムジェットが作動するコンバインドサイクルエンジンが開発された。ターボファンエンジンの燃焼器²²⁾はダブルアニュラ型とし、プライマリステージ、メインステージ共にプライマリノズル(拡散燃焼)を持ち、それを囲む6本の予混合管を斜めに接続することにより旋回を形成する。メインステージは燃焼器の半径方向外側に位置し、エンジンの軸方向下流側に配置されている。本燃焼器により目標であるマッハ3の巡航条件におけるNO_x排出指数5 g/kg(燃料1 kg当りのNO_xのg数)を満足する2.1g/kgをセクタ燃焼器(メインステージは燃焼ノズル3セット分、プライマリステージは燃焼ノズル2セット分)の試験で確認した。ラムジェットは、外周部から中心に向かって配置された複数のプラフボディ型保炎器により構成された。

1999年～2004年には、旧通商産業省(2001年より経済産業省)工業技術院の産業科学技術研究開発制度による「環境適応型次世代超音速推進システム技術の研究開発(ESPRプロジェクト)」が実施された。プロジェクトには国内エンジンメーカ3社(IHI, KHI, MHI)とNALが参加した。燃焼器の形態は、HYPRプロジェクトのターボファンエンジンの燃焼器を基に、ダブルアニュラ型燃焼器が開発された。Fig. 3はシングルセクタ燃焼器(環状燃焼器の燃焼ノズル1セット分を模擬した試験用燃焼器)の概略図である。林ら²³⁾は、メインステージのLPP(希薄予混合予蒸発)プレミキサに液膜式微粒化を採用し、その内側の3つのスワラを隣り合うもの同士旋回方向が逆になるように設計した。これにより、プレミキサ内全体で軸方向の速度が低くなる部分をなくし、逆火や自発点火を抑制することに成功した。シングルセクタ燃焼器試験の結果、巡航条件(燃焼器入口空気温度920K, 圧力1.1MPa, 空燃比31)での目標NO_x

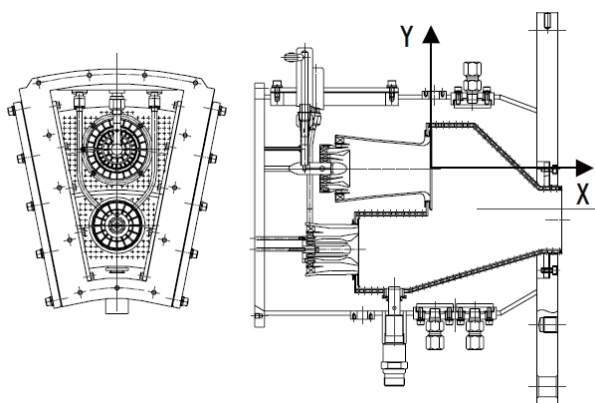


Fig. 3 Schematic drawing of single sector combustor of ESPR project

排出指数 5 g/kg に対して 3.8g/kg を実証し、目標を達成した²⁴⁾。離陸条件（空気温度 790K、圧力 1.9MPa、空燃比 33）での NO_x 排出指数は約 1 g/kg であった。

2003年～2013年には経済産業省の航空機・宇宙産業イノベーションプログラムによる「環境適応型小型航空機用エンジンの研究開発（小型エコエンジンプロジェクト）」が実施された。プロジェクトでは50席クラスリジショナルジェット用小型のエンジンの技術開発が行われた。プロジェクトには国内エンジンメーカー3社（IHI, KHI, MHI）とJAXAが参加した。メーカー3社はそれぞれ異なる燃焼方式の燃焼器を開発した。IHIは急速混合形態、KHIは部分希薄形態²⁵⁾（パイロット付き希薄予混合燃焼方式）、MHIは部分過濃形態²⁶⁾（RQL燃焼方式）を担当した。JAXAは共同研究で各社の燃焼器の研究開発に関わり、JAXAの燃焼試験設備により、燃焼器性能評価を実施した。本プロジェクトの燃焼器のNO_x目標は国際民間航空機関ICAO（International Civil Aviation Organization）の航空環境保全委員会CAEP（Committee on Aviation Environmental Protection）で設定されたCAEP/4基準の50%減である。開発された3形態の燃焼器は共に目標値を満足することが試験によって確認された。急速混合型燃焼器、部分希薄型燃焼器については、環状燃焼器試験が実施された。

私見であるが、GTSJが発足した1972年頃からの30年間は、海外の技術を学び、海外エンジンメーカーと協働して技術を学んだ段階、その後の20年間は自力で技術開発を行い海外メーカーの技術に追いつく段階であり、いよいよこれからは、これまで培った技術を発展させ海外メーカーと伍する時代と考える。

3.2 JAXAの燃焼技術の研究開発

NALは航空エンジンの研究開発プロジェクトに参加する形で研究開発を進めてきたが、JAXAが発足した2003年10月からはJAXAのプロジェクトとして研究開発を進めてきた。

2003年～2014年には「クリーンエンジン技術の研究開発」が実施された。前述の小型エコエンジンプロジェ

クトに若干遅れて開始したが、燃焼器技術については小型エコエンジンと密接に連携して研究開発を進めた。クリーンエンジンでは、小型エコエンジンの燃焼器仕様に合わせて、リッチリーン燃焼器と希薄予混合燃焼器を開発した。リッチリーン燃焼器は環状燃焼器での試験を行い、NO_x排出はリッチリーン燃焼としては低いCAEP/4の62%減が確認された。希薄予混合燃焼器は、中心にパイロット、その周りにメインの予混合流路を持つ燃料ノズルに加えて、燃焼器ライナ側面にエミッション制御燃料ノズル（以下、ECF）が付加されている（以下、予混合2段燃焼器）。ECFをエンジンの30%出力条件で使用することによりスモークが低減され、100%出力条件近くで使用することによりメインの空燃比が高まりNO_xが低減する。マルチセクタ燃焼器（環状燃焼器の燃焼ノズル3セット分を模擬した試験用燃焼器）の結果より、NO_x排出値はCAEP/4の82%減であった。

2013年～2018年には「グリーンエンジン技術の研究開発」が実施された。想定エンジンの圧力比はクリーンエンジンより高い約35とされた。クリーンエンジンで開発した予混合2段燃焼器を基に開発が行われたが、中間出力での燃焼効率改善とスモーク低減のための燃焼室拡大、燃焼振動抑制の原因となる燃焼器ヘッドの再循環流の排除のためのヘッドの円錐形状化、エンジンへの適合性向上のためのECFの小型化が行われた。マルチセクタ燃焼器の燃焼試験の結果、NO_xの排出指数は目標であるCAEP/6の80%を超える85%減であった²⁷⁾。

2019年から2023年までの計画で「コアエンジン技術実証（En-Core）プロジェクト」が実施されている。2030年代に就航が想定されている推力30000lbf（約15トン）級の次世代航空機用エンジンの燃焼器を対象とし、NO_x低減目標をCAEP/8基準の80%減としている。

3.3 バイオジェット燃料の燃焼

藤原ら²⁸⁾は航空機用エンジンの代替燃料として認証されている再生可能代替航空燃料（SAF）について説明し、JAXAで行われた燃焼試験の結果を報告している。試験は、RQL（Rich Quick-quench Lean）燃焼方式のシングルセクタ燃焼器を使用した。試験条件は燃焼器入口空気温度450K、圧力350kPaから空気温度803K、圧力1350kPaまで変化させ、燃料としてHEFA、FT-SPKを混合なしで使用し、ベースラインとして灯油を用いた。試験の結果として、灯油と比較して燃焼性能に顕著な劣化はなく、スモークの排出が少ないことが報告された。

3.4 将来展望

自動車は将来的にはEV（Electric Vehicle）が主となると思われるが、航空機はどうであろうか。旅客機では離陸重量の20～40%が燃料であり、通常は航行によって燃料は減り、着陸までに大部分はなくなるが、バッテリーの電気だけで飛ばそうとするとバッテリーは放電しても軽くないため、その分多くのエネルギーが必要である。また、着陸のときの重量は離陸重量と変わらないため、

仮に燃料と同じ重量の航空機ができたとしても、現在の脚や機体構造より高い強度が求められる。さらに、航空機ではエンジンは多くの時間を高い出力で使用されている。高度を下げる際等、エンジンがアイドルで運転される場合もあるが、全行程の中でその割合は少なく、自動車のように回生ブレーキによりバッテリーを充電することで電気消費量を大幅に削減することは難しいと考える。現在の技術と近い将来に想定される技術の進歩を考慮しても、バッテリーの電気だけで旅客機を運行することは難しく、MEE (More Electric Engine) 技術を適用して効率を高めたうえで、再生可能エネルギーから製造された燃料を使用してエンジンを運転することが最も効率が高いと考えられる。そのため、燃料技術、燃焼技術は将来的にも必要であるどころか、より高度な技術が求められると考える。

4. その他のガスタービン燃焼技術

4.1 燃焼振動の解明と抑制の研究

予混合燃焼はNO_x低減のための最も有力な燃焼方式であるが、しばしば燃焼振動を発生させ、その発生機構は複雑であり、ガスタービン燃焼器の燃焼振動を完全に抑制することは困難である。2000年頃には希薄予混合燃焼で生じる燃焼振動を抑制するための研究の成果が多数報告されている。

吉田ら²⁹は予混合燃料ノズル、保炎器、保炎器下流側に拡散燃焼燃料ノズル持つ多缶構造の燃焼装置で、拡散燃焼用燃料の変動の位相を制御することで燃焼振動の抑制が可能であることを確認した。

井亀³⁰らは急拡大型希薄予混合燃焼装置で生じる燃焼騒音・振動燃焼を、後方ステップ部に設けた2次火炎の熱音響効果で低減することを試みた。燃焼音の音圧信号を遅延、濾波、増幅して高速の燃料流量制御弁に入力し、遅延時間や通過周波数帯域等の制御パラメータの燃焼騒音への影響を調べ、遅延時間と通過周波数帯域を適切に設定することで燃焼騒音が抑制されることを確認した。

山中ら³¹はスワララの中心部に拡散燃焼のパイロットを持つ大気圧の予混合燃焼器について、燃焼振動の発生条件を調査し、共鳴器による大幅な燃焼振動の低減効果を確認した。また、山中ら³²は加圧条件下 (0.7MPa) の燃焼試験においても共鳴器の燃焼振動抑制効果を確認した。

4.2 タービン内燃焼

水素燃焼で興味深いものとして、タービン内燃焼がある。菅ら³³は水素でタービン翼を内部冷却した後、後縁から噴出させて高温高速気流中で燃焼させる水素冷却断熱再熱タービンを提案し、サイクル計算と燃焼試験により、多段再熱サイクルによるガスタービン比出力の大幅な改善と水素吹き出し燃焼実現の可能性を示した。

5. まとめ

日本ガスタービン学会創設から50年間の産業用および航空用ガスタービンの燃焼技術および新燃料の解説の執筆依頼をいただき、途方に暮れたが、産業用ガスタービンについては学会誌の40周年特集の記事および以降の学会誌や講演論文集の記事から燃焼関連部分を抜粋する形で執筆させていただいた。航空機用エンジンの技術開発は国家プロジェクトを中心に行われて来ており、それ以外の技術開発は公開されていないので、国家プロジェクトの燃焼器の研究開発について講演会の論文を基に概要を記載させていただいた。記載した以外にも、自動車用ガスタービン、CGT, AHAT, 超小型ガスタービン等の燃焼技術、CFD技術、計測技術についても書くべきところであるが、紙面の都合で割愛させていただいた。

将来的にも再生可能エネルギーにより発電した電気だけで全てのエネルギーを賄うことは不可能であり、再生可能エネルギーを使用して水素やアンモニア等を製造、貯蔵、輸送し、ガスタービンにより発電することが、将来のエネルギー供給システムの主要な柱となると考えられる。そのため、ガスタービンの燃焼技術は不要となるどころか、より高いレベルの技術が求められると考える。燃焼に関わる技術者、研究者の更なる活躍を期待する。

参考文献

- (1) 坂田公夫, 高効率ガスタービンプロジェクトと航技研における研究開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 44, No. 6 (2016), pp. 459-463.
- (2) 山田秀志, 下平一雄, 堀内正司, 低酸素再熱燃焼器の研究, 第16回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (1988), A-4.
- (3) 塚越敬三, 発電用ガスタービンの高温・高効率化の進展と将来展望, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 1 (2013), pp. 53-58.
- (4) 吉田正平, 笹尾俊文, 林明典, 日立におけるガスタービン燃焼器の開発について, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 1 (2013), pp. 59-64.
- (5) 三浦圭祐, 阿部一幾, 齊藤武雄, 小金沢知己, 小山一仁, LNG焚きH-25ガスタービン用ドライ低NO_x燃焼器の要素技術開発, 第38回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2010), B-3.
- (6) 高田和正, 森本一毅, 若園進, 片岡正人, 由利正則, 1650℃級JAC形ガスタービンの現状と今後の展開, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 49, No. 6 (2021), pp. 426-431.
- (7) 川岸裕之, 岡本浩明, 低NO_x燃焼器予混合ダクトの流体特性, 第21回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (1993), A-7.
- (8) 西宗之, 則本敦史, 細川恭史, 堂浦康司, 山崎義弘, 1.7MW級ガスタービンM1A-17D低エミッション燃焼システムの紹介, 第41回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2013), C-3.
- (9) 石川康弘, 細井潤, 藤秀実, コージェネ用ガスタービン低NO_x液焚き燃焼器の研究, 開発, 第25回ガスタービン定

- 期講演会講演論文集, (1997), B-11.
- (10) 穂山恭大, 浅井智広, 百田聡, 苅宿充博, 八木宣夫, 林明典, 石炭ガス化複合発電向け多孔同軸噴流バーナを備えてドライ低NO_xガスタービン燃焼器の開発, 第41回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2013), C-5.
- (11) 足利貢, 山口正人, 堀川敦史, 国際水素サプライチェーンの構築とガスタービン発電での水素利活用, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 49, No. 2 (2021), pp. 88-93.
- (12) 堀川敦史, 山口正人, 青木茂樹, 2MW級ガスタービン用水素専焼ドライ低NO_x燃焼器の開発とエンジン試験の速報, 第48回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2020), A-11.
- (13) 石村祐宜, 青木茂樹, 松本匡史, 堀川敦史, 山口正人, 中小型ガスタービン発電装置における水素燃焼器開発, 第50回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2022), C-1.
- (14) 井上俊彦, 産業用中小型ガスタービンの進展と将来展望, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 1 (2013), pp. 65-71.
- (15) 西宗之, 黒坂聡, 佐藤毅, 緒方正裕, 触媒燃焼ガスタービン・M1A-13Aの紹介, 第38回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2010), B-10.
- (16) 壹岐典彦, 難波哲哉, 倉田修, Okafor Ekenechukwu, 辻村拓, カーボンフリーアンモニア燃料の製造及び利用技術 - 福島再生可能エネルギー研究所における取り組み -, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 49, No. 2 (2021), pp. 100-105.
- (17) 新井啓介, 河野雅人, 久富直樹, 杉浦寛史, 安井芳則, 石脇史猛, 300kWアンモニア燃焼マイクロガスタービンの開発, 第47回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2019), B-8.
- (18) 内田正宏, 伊藤慎太郎, 須田俊之, 2MW級ガスタービンにおける液体アンモニア直接噴霧燃焼技術の開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 49, No. 3 (2021), pp. 160-164.
- (19) 鈴木邦男, 齊藤隆, 田丸卓, ガスタービン燃焼器の内部ガス測定結果, 日本ガスタービン会議第3回定期講演会, (1975), No. 8.
- (20) 田丸卓, 鈴木邦男, 斎藤隆, 山田秀志, 堀内正司, 下平一雄, 石井浅五郎, 遠崎良樹, 国師正一, ターボファンエンジン用新形式環状燃焼器模型の特性, 日本ガスタービン会議第5回定期講演会, (1977), B-2.
- (21) 田丸卓, 堀内正司, 斎藤隆, 石井浅五郎, 鈴木邦男, 北原一起, ターボファンエンジン用燃焼器の性能向上, 第8回ガスタービン定期講演会 講演論文集, (1980), A-3.
- (22) 木下康裕, 小田剛生, 北嶋潤一, 超音速輸送機用ターボジェットエンジンの低NO_x燃焼器の研究 (性能実証用セクタ燃焼器の試験結果), 第27回ガスタービン定期講演会講演論文集, (1999), B-5.
- (23) 林茂, 山田秀志, 下平一雄, ESPRプロジェクトにおける超低NO_x燃焼器用プレミキサーの開発, 第32回ガスタービン定期講演会講演論文集, (2004), A-6.
- (24) S. Hayashi, H. Yamada, K. Shimodaira, S. Yoshida, T. Oda, H. Ninomiya, B. Jones, Development of Ultra Low-NO_x Combustor Technology for Next Generation Supersonic Transport Engines in ESPR Project, IGTC 2003 Tokyo, (2003), TS-151.
- (25) 松山竜佐, 小林正佳, 緒方秀樹, 小田剛生, 堀川敦史, 木下康裕, 小型エコエンジン用部分希薄燃焼器の開発, 第38回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2010), B-6.
- (26) 森合秀樹, 黒瀬良一, 小森悟, 航空用ガスタービンエンジン燃焼器の希釈流配分およびライナ冷却流流出位置がNO_xに及ぼす影響, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 40, No. 3 (2012), pp. 32-37.
- (27) 吉田征二, 山本武, 下平一雄, 航空機エンジン用予混合2段燃焼器のマルチセクタ試験による性能評価, 第46回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2018), B-6.
- (28) 藤原仁志, 水野拓哉, 岡井敬一, JAXAにおけるバイオジェット燃料の燃焼研究, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 49, No. 3 (2021), pp. 9-16.
- (29) 吉田正平, 平田義隆, 大塚雅哉, 小林成嘉, ガスタービン燃焼器の燃焼振動に関する研究, 第15回ガスタービン秋季講演会講演論文集, (2000), B-3.
- (30) 井亀優, 岸武行, 春海一佳, 平岡克英, 岡秀行, 音響的能動制御による燃焼騒音及び振動燃焼の抑制, 第32回ガスタービン定期講演会講演論文集, (2004), A-7.
- (31) 山中矢, 前田福夫, 土屋利明, 清水雅典, 燃焼振動の低減法に関する研究 (第二報), 第15回ガスタービン秋季講演会 (北九州) 講演論文集, (2000), B-4.
- (32) 山中矢, 前田福夫, 土屋利明, 燃焼振動の低減法に関する研究 - 高圧下での共鳴器による燃焼振動低減 -, 第32回ガスタービン定期講演会講演論文集, (2004), A-8.
- (33) 菅進, 森下輝夫, 平岡克英, 翼列内水素燃焼ガスタービンの研究, 日本ガスタービン学会 第5回定期講演会, (1977), A-6.

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン・蒸気タービンの半世紀の歩みと今後の展望【技術】

蒸気タービンの半世紀の歩みと今後の展望

50 Years of Steam Turbine History and Future Prospects



田沼 唯士*1

TANUMA Tadashi



佃 知彦*2

TSUKUDA Tomohiko



太田 正人*3

OTA Masato



西牧 航志郎*4

NISHIMAKI Kojiro



岩本 和也*5

IWAMOTO Kazuya



栞 隆治*6

HASHI Ryuji

キーワード：蒸気タービン，高温化，高圧化，大容量化，長翼，3次元設計，シール技術，地熱発電，CCUS，燃料転換，電力系統変動抑制，バイオマス発電，モジュール設計

Key Words：Steam Turbine, High Temperature, High Pressure, Large Capacity, Long Blade, 3D Design, Sealing Technology, Geothermal Power, CCUS, Fuel Conversion, Power System Fluctuation Control, Biomass Power, Modular Design

1. 緒言

日本ガスタービン学会が設立された1972年からの50年間の歩みは、我が国の蒸気タービン産業が欧米からの技術導入から脱却して自主技術を確認し、更に世界市場をリードする技術と競争力を手にした歴史でもある⁽¹⁾。

蒸気タービン発電システムが最も多く採用されている火力発電を取り巻く環境が近年大きく変化している。脱炭素への大きな潮流の中で、わが国を含む世界各国において大型火力発電所の建設が次々とキャンセルされたり凍結されたりしている。一方で、わが国の発電量の7割以上は依然として火力発電所から供給されており、急増する再エネ電力の変動による電力系統の不安定を調整し、安定した電力を消費者に提供する役割を果たしているのも火力発電である。

更に今後の火力発電は再生可能エネルギーから生成された水素やアンモニアに燃料転換して行くことと、既存の化石燃料であるLNGの燃焼ガスから二酸化炭素を抽出して利用したり地下貯蔵するCCUSを用いることで

ロエミッション化を図る技術が重要になると思われる。

いずれの場合でも、太陽光や風力による変動再生可能エネルギー電源の変動を調整する役割が必須となる。従来の大型火力発電向けの蒸気タービンは100%負荷での高性能設計を追求していれば良かったが、今後の技術課題は、安定して運転できる最低負荷の引き下げと負荷変動速度の増加である。

本稿では大容量化，高温高圧化，3次元設計とシール技術の高度化による各種性能向上技術の導入，高性能最終段長翼の開発など，1970年代から今日までの蒸気タービン技術の進展を振り返る。そして，2050年カーボンニュートラルを達成するために欠かすことができない蒸気タービンの役割を，太陽光・風力等の変動性再生可能エネルギーによる電力の不安定調整力を強化した蒸気タービン，燃料転換・CCUSに対応したゼロエミッション火力発電用蒸気タービン，地熱・バイオマス発電用蒸気タービンについて展望する。

2. 大容量高性能化技術

2.1 最終段長翼

最終段長翼は蒸気タービンの最も重要な要素の一つであり，蒸気タービンの変遷に深い関わりがある。最終段開発は長翼化の歴史であり，最終段の環状面積を大きくすることにより排気損失を低減し大容量化に対応してきた。60Hz地区向けの最終段開発を例にその変遷を下記に述べる。

1980年代の材料技術，設計技術では最終段の翼長は33.5インチ程度が限界であった。最初に最終段開発にブレードスルーをもたらしたのは，当時既にジェットエンジンのファンブレードに使われていたチタン材を最終段

原稿受付 2022年12月12日

* 1 帝京大学 先端総合研究機構

E-mail: t-tanuma@med.teikyo-u.ac.jp

* 2 東芝エネルギーシステムズ(株) エネルギーシステム技術開発センター

E-mail: tomohiko.tsukuda@toshiba.co.jp

* 3 MHIパワーエンジニアリング(株) 蒸気タービン企画計画部

E-mail: masato.ota.yn@mhi.com

* 4 富士電機(株) 発電プラント事業本部 川崎工場 機械設計部

E-mail: nishimaki-koujirou@fujielectric.com

* 5 新日本造機(株)・技術部

E-mail: kazuya.iwamoto@shi-g.com

* 6 新日本造機(株)・技術部開発課

E-mail: ryuji.hashi@shi-g.com

長翼の材料に使用したことである。チタン材は軽量で比強度が高いことが特徴で、これにより翼にかかる遠心力を低減し最終段の翼長を飛躍的に増大した40インチ翼が開発された。この40インチ翼が開発されたことで、低圧2車室のタンデムコンパウンド機で1000MWの発電出力が実現した。

一方でチタン材は素材として高価であり価格の変動幅が大きい欠点があり、設計技術の進歩とコスト競争力の強化の観点から翼材料を15Cr鋼とした40インチ翼が開発された。この翼ではCFD解析や構造FEM解析を駆使しチップ付近の翼型を極力薄くすることで、遠心力を低減すると共に衝撃波による流体的な損失の低減が図られた。

最新の最終段はさらに長翼化が進んでいる。Fig. 1はチタン48インチ翼⁽²⁾である。この翼の開発では、さらに大きな遠心力に対応するため材料を15Cr鋼からチタンに戻した上、最新の流体技術、構造技術を用いて開発されている。Fig. 2は最終段長翼の適用範囲例を示している。蒸気タービン出力に応じて適切な環状面積の最終段長翼を選定することにより排気損失の低減が可能である。



Fig. 1 Titanium 48-inch last stage blade

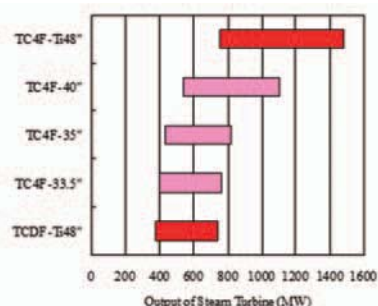


Fig. 2 Application range for conventional plants

2.2 高温化高圧化

蒸気タービンの効率を飛躍的に向上させるには、蒸気条件の向上が不可欠である。Fig. 3にわが国の蒸気タービンプラントにおける蒸気条件と効率の変遷を示す。

1970年代の火力発電用蒸気タービンの蒸気条件は主蒸気圧力24.1MPa、主蒸気/再熱蒸気温度がそれぞれ538/538℃もしくは538/566℃が一般的であり、わが国では既に超臨界の蒸気条件が達成されていた。

1980年代の終わりにはこれまでの蒸気条件を超える世界初の本格的な商用超々臨界圧 (USC) 機として、蒸気条件が31MPa、566/566/566℃となる2段再熱のUSCタービンが商用運転を開始した。蒸気条件の高圧化についてはこれを上回るプラントは現在のところ出現していないが、以後蒸気条件の高温化が主に進められた。USCタービンの開発では、従来の材料に対してCrの割合を増やし高温強度を向上させた12Cr鋼が開発され、静止部・回転部に使われるようになった。

2000年代に入るとそれまでの蒸気温度566/566℃から593/593℃にすることが可能となった。この時代になると、12Cr鋼が進歩し、改良12Cr鋼 (600℃級対応)、CoやBを添加してさらに高温クリープ強度を高めた新12Cr鋼 (630℃級対応) といった鋼種が適用可能となり、蒸気温度をさらに上げることができるようになった。最近では主蒸気温度600℃、再熱蒸気温度630℃のプラントが実現している⁽³⁾。

更なる高温化に向けて、先進超々臨界圧 (A-USC) 火力発電システムでは蒸気温度を700℃以上に高温化することを目指して開発が進められている。2008年度からは経済産業省の開発プロジェクトで、A-USC火力発電システムの要素技術の開発が進められた。A-USC蒸気タービンの技術開発においては、タービン高温部に適用するNi合金の開発、材料特性の把握、及び製造性の検証といった課題が大きなウェイトを占めた。このプロジェクトでは、電力産業用大容量ボイラ・タービンシステム (高温弁を含む) の要素技術開発目標をすべて達成する成果を挙げ、A-USC実プラント建設に必要な技術を確認した。

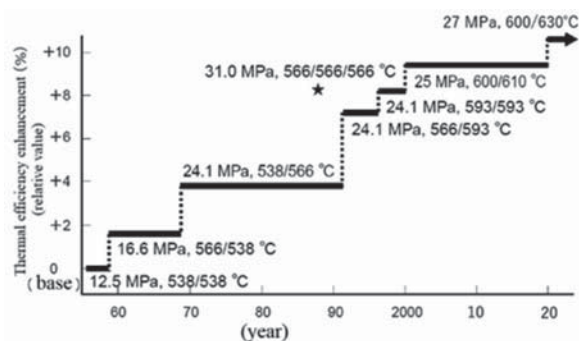


Fig. 3 Trends in main steam condition and thermal efficiency in Japan

2.3 性能評価手法の変遷と高性能技術開発

蒸気タービンの性能はプラント効率に大きな影響を与えるため、以下に挙げる各種のタービン内部損失を低減することは非常に重要である。そのために種々の技術が開発されてきた。

- (1) 翼列損失
- (2) 漏れ損失
- (3) 各ケーシングの吸・排気圧力損失
- (4) 排気損失
- (5) 軸受損失

以下に損失低減施策及び性能評価手法について例を挙げて述べる。

翼列損失の低減は、CFD解析技術を駆使した3次元設計翼の開発による寄与が大きい。タービンの静翼と動翼を3次元的に傾斜させ、それらにおける流量分布と流線をコントロールすることで、二次損失を低減させるアドバンスドフローパターン (AFP) や、プロファイル

損失低減のために反動度を高めた最適反動度翼を開発し、各タービンセクションの条件に合わせて最適化している (Fig. 4)。

漏れ損失の低減技術としては、シール部の間隙を従来値より小さくしても回転部と静止部の接触振動を極力発生させないセンシタイズドパッキン (Fig. 5) 等のシール技術を開発し、漏れ損失を低減している。

蒸気タービン内で発生する損失には相互作用があり、単純に独立して評価できないこともあるので、必要に応じて現象を一括して評価することが重要である。Fig. 6 は高圧タービンの多段階CFD解析結果を実証試験タービンの計測結果と比較したものである。この解析はチップリーク及びラビリンスリークを含んだ高圧タービン全段の多段階解析であり、単段階解析では現れない壁面近傍のリーク流れによる温度上昇の蓄積の様子等をとらえ、単段階解析に比べて解析値と計測値が良く一致していることが分かる。

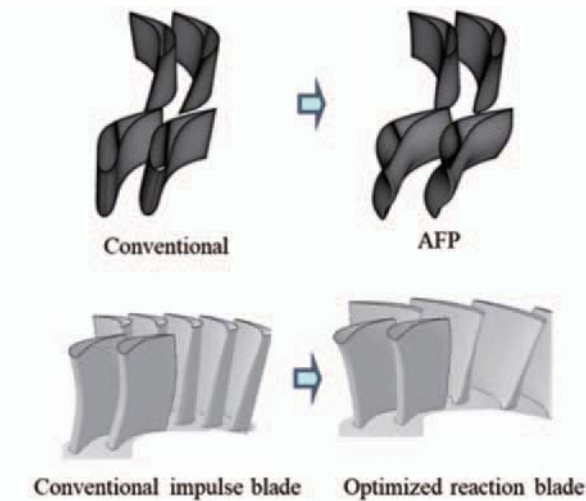


Fig. 4 3D design turbine blade

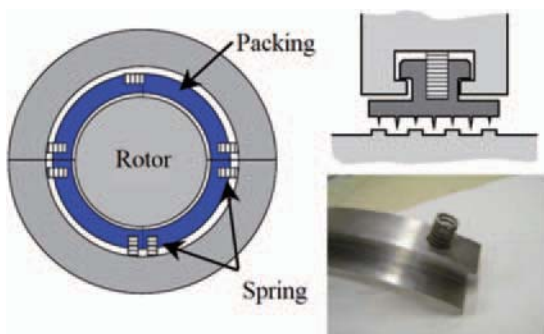


Fig. 5 Sensitized Packing

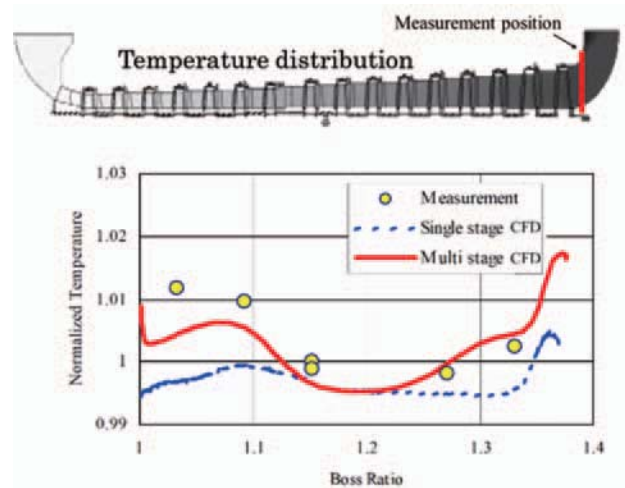


Fig. 6 Results of multistage fluid analysis of high pressure (HP) turbine section

3. 再エネ電力大量導入のために蒸気タービンに求められる機能と技術

近年、発電分野における脱炭素化の潮流が顕著になりつつあり、蒸気タービン発電システムにおいて従来主流であった石炭火力から、より二酸化炭素の排出量が少ない天然ガスを燃料とするガスタービンコンバインドサイクル発電 (GTCC) や太陽光・風力・バイオマス・地熱などの再生可能エネルギーを用いる発電システムが増加している。2015年から2020年の世界の発電新設蒸気タービン発電注量の統計⁽⁴⁾によると、出力比では、石炭火力が依然として7割前後の比率を占めるが、台数比ではGTCCと再生可能エネルギー利用 (バイオマス、太陽熱、地熱) がそれぞれ25%前後で、合計で約半数を占めている。この変化は我が国のタービンメーカー各社が火力・原子力発電用蒸気タービンの大容量化・高温高圧化・高性能化に向けた自主技術を確認して、世界市場を席捲した1970年代以降の50年の歴史の中で、比較的最近の動向であるが、過去に経験の無い大きな転換期を迎えている。

本章では、カーボンニュートラルを早期に実現するために必要な太陽光・風力等の変動型再生可能エネルギー発電の大量投入に向けて喫緊の課題になっている、負荷調整力の強化と運転の柔軟性の向上に関する近年の蒸気タービン技術開発の歩みを紹介する。

3.1 蒸気タービンに求められる運転の柔軟性と負荷調整力と対策

第6次エネルギー基本計画⁽⁵⁾が示す2030年の電源構成では火力発電が依然として41%を占めており、蒸気タービンを用いる火力発電による電力の安定供給と負荷変動の調整力が求められている。欧州は日本よりも早期に再生可能エネルギーの積極導入が始まっており、新たな要求事項を明らかにしている。

欧州ではTable 1に示すGrid Codeで、運転可能周波数に制限が設けられている^{(6),(7)}。ドイツの制限は概ね欧州

の平均的な値と考えられるが、英国は欧州の中では運転可能周波数の範囲が広い。Table 2には、日本国内の電力会社の連続運転可能周波数の上下限（上の2行）と運転限界周波数と運転可能時間の制限値を示す。我が国では従来から蒸気タービンを含む発電システム技術と運用技術の高度化によって高度な系統安定化が可能であった。ただし、電力システム全体に占める大型火力発電システムの割合の低下が進行することで、欧州並みの周波数変動を受け入れる可能性を想定する必要がある。

これらの制限は、主に低圧最終翼およびその上流2段落程度の翼長の大きな動翼の振動応力の制限値によって決められている。近年我が国で開発された最終段長翼は、全世界の市場に適合することを前提として設計されているので、ほとんどの機種は英国の運転可能周波数に対応している。ただし、先端シュラウド、中間スナッパ、植込部構造などの制振構造の経年変化には十分な監視が必要である。使用者とメーカーが協力して運転監視と定期点検を行う必要がある。

欧州圏内では、再生可能エネルギーが増加した結果、石炭火力は系統の要求に迅速に応ずる必要が定められた（Primary Response）⁽¹⁾。Fig. 7に欧州を含む各国のPrimary Responseの要求値を示す。多くの国で、30秒で出力を5%以上増加させる厳しい要求となっている。従来の発電用蒸気タービンは大容量化、高温化でサイクル効率を向上させて、100%負荷での性能を最適化する設計を長らく追及してきた。従って、運転の柔軟性と従来以上の負荷調整力を求める欧州のPrimary Responseの要求に応えるためには従来以上の設計上の工夫が求められる。また、実機での実証が求められている。

出力の急増を実現するために蒸気タービンサイクルとしての対策として、通常は加減弁の急開と燃料の急増で対応する。一方、欧州圏内では、定格負荷で加減弁は全開で運用されることが多い。また、燃料増加と主蒸気量の増加には、若干の時間遅れが生じるので、この方法だけでは迅速な負荷調整は難しい。従ってプラント設備を含めた対策が必要となる。

「復水絞り運転」では、低圧タービン抽気を閉じることによって、タービン通過蒸気量を増大させることで出力を短時間で増大させることができ、迅速な負荷上昇が可能である⁽¹⁾。Fig. 8にプラントシステムの設計と運転への要求事項を示す。復水絞り運転時は、低圧抽気弁を閉じるのでボイラへの給水と脱気器への復水のバランスを取る必要がある。従って脱気器LCVで脱気器レベルを制御する。また、復水貯蔵タンクの設置が必要となる。

Table 1 High and Low cycle operation limit in Germany and UK

50Hz Region		German Transmission Code	UK Grid CODE
Continuously Operable Frequency	Low Limit	49.8	49
	High Limit	50.2	51
Operating Limit Frequency	Low Limit	47.5	47
	High Limit	51.5	52

Table 2 High and Low cycle operation limit in Japanese 50 Hz Region *FRT When applying the continuous operation requirement at the time of accident ** Other cases)

50Hz Region		HOKKAIDO	TOHOKU	TEPCO
Continuously Operable Frequency	Low Limit	48.5 Hz	48.5 Hz	48.5 Hz
	High Limit	50.5 Hz	50.5 Hz	50.5 Hz
Operating Limit Frequency	Low Limit	47.5Hz 2sec	*47.5Hz 2sec **48.5Hz 2sec	-

【Primary Responseの要求事項】 石炭の急増ではフォロー出来ない

Primary Responseの要求事項		代表的な発電所
ドイツ	≥ 2% 30 sec.	- Walsum (790MW since 2013) - Wilhelmshaven (790MW since 2015)
オランダ	≥ 5% 30 sec.	- Rotterdam (790MW since 2014)
ポーランド	≥ 5% 30 sec.	- Kozyrnice (1075MW since 2017) - Turów (500MW since 2019)
ギリシャ	≥ 3% 30 sec.	- Ptolemais (500MW since 2019)
英国	≥ 10% 10 sec.	-
シンガポール	≥ 5% 8 sec.	-
南アフリカ	≥ 3% 10 sec.	-

Fig. 7 Primary Response Requirements in Europe⁽⁹⁾

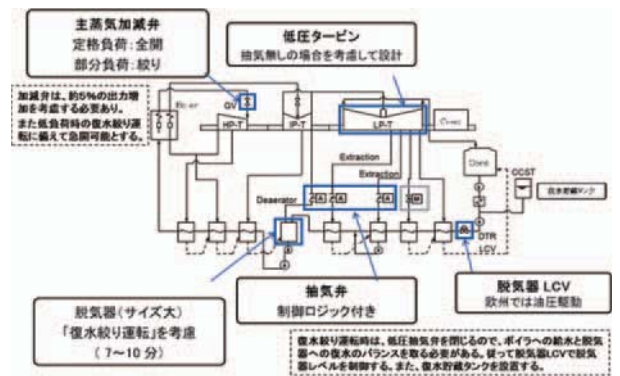


Fig. 8 Requirements for the plant system for Condensate Throttling Operation⁽⁹⁾

3.2 負荷変動速度増加技術

3.2.1 急速起動と熱応力予測 太陽光や風力に代表される変動型再生可能エネルギーによる電力の急減時に電力の安定供給を継続するために、火力発電用等の蒸気タービンは迅速な負荷上昇や急速起動が求められる。Fig. 9に示すようにGTCCでは、ガスタービンが先行起動して、次に蒸気タービンが起動する。蒸気タービンに通気する蒸気は十分に過熱領域にあることが求められる。また、蒸気タービンのロータは、中実形状なので起動途中の蒸気温度上昇とロータに発生する熱応力

に配慮せねばならない。従って負荷変化時の熱応力を正確に予測することが非常に重要となる。Fig. 10 は有限要素解析 (FEA: Finite Element Analysis) モデルの数理的縮退により、高速高精度な数値予測を可能にするモデルオーダーリダクション (MOR: Model Order Reduction) 技術を用いて蒸気タービンケーシングとロータの過渡的な変形を伝熱・構造連成解析で計算して静止部と回転軸との間隙変化を高精度で予測するために開発された技術を示している^{(8),(9)}。この技術を用いることで、起動時間を短縮することが期待でき、更に、設計時に過渡的な間隙変化を予測できるので、高速起動向けの最適設計が可能になる。

3.2.2 熱応力低減技術 急速起動や負荷の急速変化はタービン高温部の熱応力を上昇させるので、ロータやケーシングの熱応力低減設計の高度化が進められてきた。

溶接ロータの形状を工夫して熱応力を低減する設計の例をFig. 11 に示す。このロータは、三菱重工業株式会社高砂製作所内の実証ユニットにある溶接ロータで主蒸気/再熱蒸気入口の高温部を高Cr鋼とし、低圧タービン側は、高靱性材、比較的溫度が低い高圧タービン排気側は通常の低クロム鋼ロータ材を溶接したものである。蒸気入口部に大きなボア (中心孔) を配置することで、ロータに作用する遠心応力と熱応力の総和を最小化することができた。同時に、ロータ各部位の最大温度に対応して必要十分な高温強度を持つ材料を溶接接合することで、起動時間短縮と高信頼性・低コスト化を同時に実現することができた⁽⁹⁾。

3.2.3 最低負荷低減 再生可能エネルギーの大量導入時には、系統安定化のための火力電源をいつでもフルロードまで急速に負荷上昇できる状態に保つ必要がある。この目的のために、蒸気タービンの最低安定運転負荷を引き下げる技術開発が進められてきた。

コンバインド発電システム全体の最低負荷を引き下げ、同時に急速起動を可能にする方法として、ガスタービン (Combustion turbine), 蒸気タービン (Steam turbine), 発電機 (Generator) の配置の最適化がある。Fig. 12 の上図は、典型的な従来型軸配置のCSG配置で、ガスタービンのスラスト軸受けで蒸気タービンスラストも吸収する。一方、下図のCGS配置ではガスタービンと蒸気タービンは独立した個別のスラスト軸受けを持ち、柔軟な運転が可能なシステムとなっている。日本では、CSGの実績が多いが欧州ではCGSが多い。CGSはガスタービン単独で運転可能なので最低負荷確保の面から有利である。ただし、発電機と蒸気タービンの間にあるクラッチの信頼性が重要となる⁽⁹⁾。また、CGS配置では、発電機ロータを引き抜いて点検や修理を行うための運転停止期間が延びるので、発電機にも従来設計以上の高い信頼性が要求される。

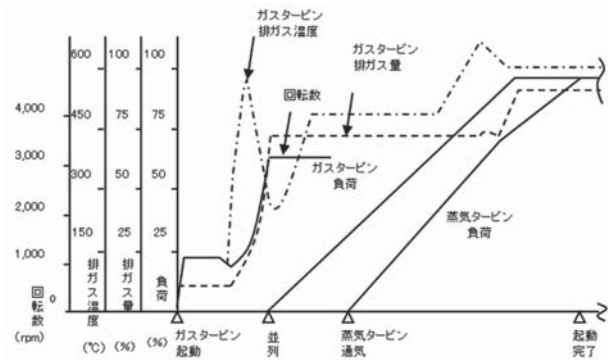


Fig. 9 Typical start-up pattern of GTCC⁽⁹⁾

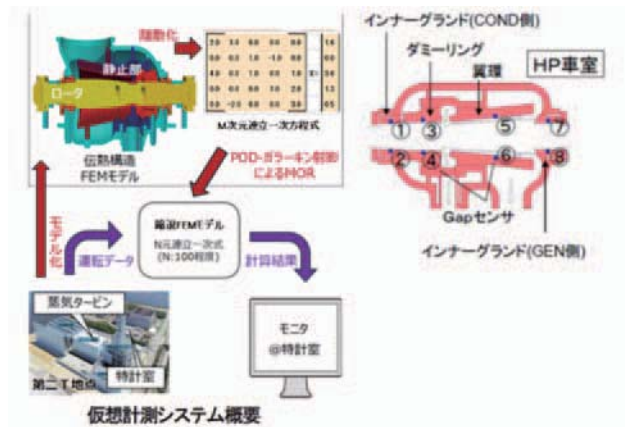


Fig. 10 Thermal stress prediction system⁽⁹⁾

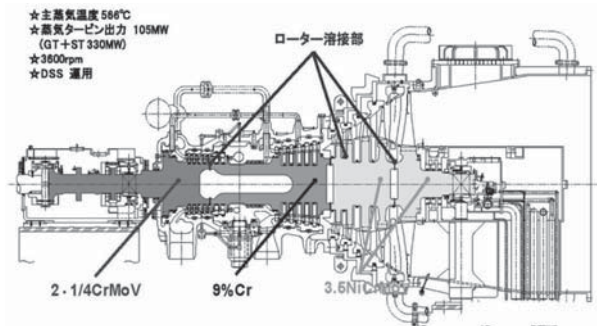


Fig. 11 Weld Rotor⁽⁹⁾

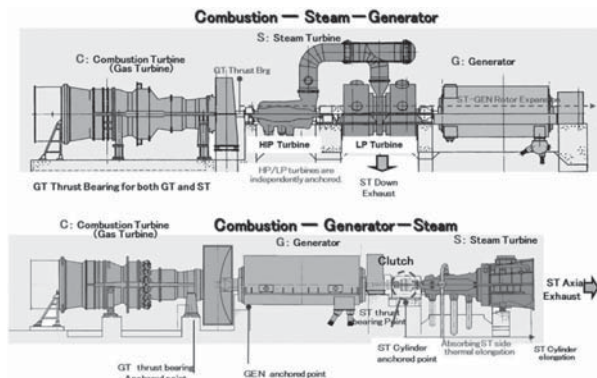


Fig. 12 Rotor combination of GTCC

4. カーボンニュートラルに向けた既設火力への CCS設備導入のための蒸気タービン改造設計

火力発電所から排出されるCO₂を大幅に削減する技術として、化石燃料の燃焼ガスからCO₂を分離・回収し、回収したCO₂を地中や海底に貯留、隔離するCCS（二酸化炭素回収貯留）技術の開発が進められてきた。現在では北米を始めとして世界各地でCCSプラントが稼働を開始している。Fig. 13 に最近のCCSプラントのプロセスフロー図を示す⁽⁹⁾。排気ガスに含まれるCO₂を90%以上回収（純度 99.9vol%以上）することができ、さら省エネ再生システムにより蒸気消費量の低減を実現している。CO₂を含む排気ガスは、排ガス冷却塔で冷やされた後、吸収塔内で吸収液と接触し、排ガス中のCO₂が吸収される。この吸収液は再生塔に送られ、蒸気により加熱されることでCO₂を放出するので、CO₂を分離することができる。Fig. 14にCCSプラントの全景写真を示す⁽⁹⁾。手前の高い塔が吸収塔、その右が再生塔である。CCSで回収したCO₂を石油採掘において油層に圧入して増進回収するEOR（Enhanced Oil Recovery: 石油増進回収）に利用する方法は、回収したCO₂を有効に利用できる。本節ではEOR向けのCCSプラント用に既設石炭火力発電所の蒸気タービン設備を改造した事例を紹介する⁽¹⁾。

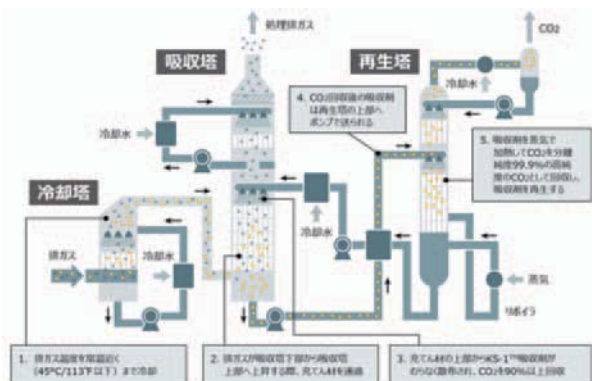


Fig. 13 Process flow diagram of a modern CCS plant ⁽⁹⁾



Fig. 14 Panoramic view of a modern commercial CCS plant ⁽⁹⁾

4.1 改造方法

1969年に運転を開始した他社製Steam Power（石炭焚火力）機による石炭火力発電所を環境対応型として再生を図るべく、CCS設備を設置した実証プロジェクトとして改造を行った。既存のタービン建屋、台座を流用し、復水器、循環水系統等のプラント機器及び配管類の系統も流用した。蒸気タービン本体は既設を全て撤去して置き換えるスクラップアンドビルド案件であったが、既設のタービン台座と復水器を流用するために新設蒸気タービンは改造設計技術を用いて設計・据付された。

4.2 改造前後の仕様比較

改造前後で主蒸気圧力は12.5MPaで変わらないが、出力は150MWから160MWに微増させ、プラント効率向上のため蒸気温度は既設機の条件538/538℃から566/566℃へ上昇させた。CCS設備の再生塔を加熱するためのリボイラにタービンサイクル中から主蒸気量の約35%に相当する大量のプロセス蒸気を供給することが最大の変更点である。この蒸気はCCS設備側が要求する圧力以上となるタービン通路部から抽気する必要がある。但し、蒸気タービンサイクル高圧部から蒸気抽気するほどプラント効率の低下を招くことになるため、今回の設計では、要求される圧力値を確実に確保でき、同時に過剰に高圧側に余裕をとらない位置として、中圧タービン排気をCCS用抽気源に選定した。

4.3 大容量プロセス蒸気抽気を可能にしたタービン設計

一般的にタービンサイクルから大容量プロセス蒸気を抽気する場合には、抽気量によらず供給元圧力を維持するために、タービン内部に調節弁を設置して圧力制御を行うタービン内部調圧方式が採用される。今回の改造では中圧タービン排気をCCS用抽気源としたので、中圧タービンから低圧タービンへ蒸気を導くクロスオーバー管に圧力調節弁を設置することが検討されたが、設備上の制約等で設置が困難であったことから、外部調圧運用を選定した。この運用の場合、Fig. 15 に示す通り、プロセス蒸気抽気の有無により中圧タービン排気の圧力、温度状態量が大きく変化することになる。プロセス蒸気抽気の有無によるタービン内部状態量変化に対応した主な設計検討事項と、その対応内容を以下に示す。

4.3.1 中圧タービンの熱応力制御 急速に抽気を実施した場合、蒸気温度変化率が大きく、ロータ熱応力に留意する必要があるため、長期的な寿命消費を考慮して、抽気量変化レートの制限を設けた。

4.3.2 中圧タービン翼強度向上 抽気時の中圧タービン排気圧力低下により中圧タービン翼列差圧が大きくなるため、それに対応する翼サイズ選定、材質アップによる強度向上を図った。

4.3.3 スラストバランス設計 抽気有無により中圧排気圧力が変化するため、抽気有無両運用時のどちらでもスラスト軸受面圧の許容範囲内でロータスラストバランスが確保できる設計を行った。

4.3.4 タービン伸差変化への対応 抽気有無により中圧排気温度が変化するため、抽気有無両運用時のタービン伸差に対応できる軸方向間隙を確保した。

4.4 改造時における配慮

本ケースの様に他社製既設タービン建屋、台座、復水器を流用するスクラップアンドビルド案件では、流用する既存設備による設計的な制約を受けるため、既設設備の設計情報取得が非常に重要となる。本ケースの場合、低圧タービングランド蒸気配管接続のため既設復水器の設計情報が必要であったが、既設復水器は他社製のため詳細寸法、形状共に不明であり、また蒸気タービン置き換え前に内部確認する機会が得られなかった。既設設備の設計情報不足の中、このような改造工事で最も懸念される既設設備との干渉を回避する為、一例として予め低圧タービン外部車室下半リブを一部切り欠き、グランド蒸気配管を配置することで、既設設備との取合構造を確実に成立させる、等の対応を実施した。

今後、多くの既設石炭火力発電プラントで従来以上に、環境負荷低減対応が求められると予想される。紙面の都合で紹介できないが、既設蒸気タービンを活用した改造を行うことで既設石炭火力のLNGコンバインド火力（GTCC）への転換を実現した事例が出てきている⁽¹⁾。CCS設備の導入やLNGコンバインド火力（GTCC）への転換によって、設備投資費と発電ロス期間を最小に抑えつつ、カーボンニュートラルに向けて、既設石炭火力発電設備の環境負荷低減を進展させることが可能である。

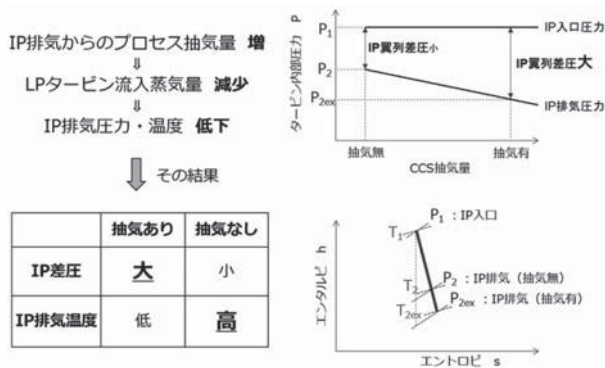


Fig. 15 Schematic diagram of changes in steam properties of steam turbine with and without steam extraction to CCS

5. 地熱用蒸気タービン

5.1 地熱発電の概要

火山帯の地下約500～4,000mには高温・高圧の地熱流体を蓄えた貯留層があり、ここに生産井を掘り地表に噴出させ、そのエネルギーを利用して発電を行うシステムを地熱発電と呼ぶ。噴出する地熱流体は蒸気と熱水が混ざった二相流（0.1～2.5MPa, 100～225℃）であることが多いが、過熱蒸気（ドライスチーム）が噴出することもある。

地熱流体は、雨水が地下水脈を通じて貯留層に供給さ

れ、それが地下数千m以深にあるマグマ溜りにより加熱されることで生成される。地熱流体が高温の場合にはフラッシュ方式が、低温の場合にはバイナリー方式が適用されるのが一般的である⁽²⁾。

5.2 フラッシュ方式

生産井から噴出する地熱流体が熱水を多く含む場合は、セパレータ（汽水分離機）で蒸気と熱水とに分離する。ここで得られた蒸気のみをタービンに供給し発電する方式をシングルフラッシュ方式と呼ぶ。地熱エネルギーの利用効率を高めるために、分離した熱水を下流に設置したセパレータで減圧沸騰させ、さらにタービンに混入する方式も採用される。これをマルチフラッシュ方式と呼び、段数を増やすことで熱効率を向上させることができる。Fig. 16はトリプルフラッシュ方式の機器構成例である。

地熱発電に用いられる蒸気の温度・圧力は火力発電と比較して低いため、蒸気タービンの体格は火力発電用の低圧タービンに類似したものとなる。タービンの出力は蒸気の流量に比例するので、低出力機には単流、高出力機には双流が適用されるのが一般的であるが、蒸気流量が多い場合にはタービンをタンデム構成とし3流、4流が適用されることもある。タービンの排気は双流の場合、下向きや上向きが一般的であるが、単流の場合、性能向上やタービン建屋高さを抑えることを目的として、近年は軸流排気式が採用されることが多い。

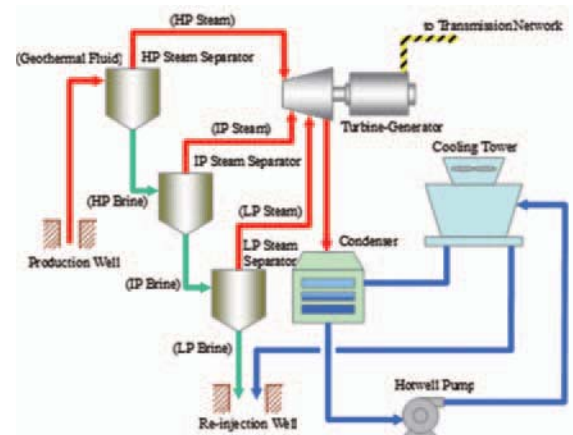


Fig. 16 Multi (triple) flash geothermal power plant

5.3 バイナリー方式

生産井から噴出する地熱流体の温度が低く、水-蒸気を用いたフラッシュ方式では十分なエネルギーが得られない場合、低沸点媒体（代替フロン、ペンタン、アンモニアなど）を使用したバイナリー方式が適用される。Fig. 17はバイナリー方式の機器構成例である。

地熱流体はセパレータで蒸気と熱水とに分離される。蒸気は蒸発器で低沸点媒体と熱交換した後、熱水と合流し予熱器で再度低沸点媒体と熱交換し、還元井から地中に戻される。一方、蒸発器で気化しタービンで動力を発

生じた低沸点媒体は凝縮器で液化され系統内を循環する。

バイナリータービン内を流れる低沸点媒体は腐食性物質を含まないため、使用材料には火力発電用タービンのものが適用できる。低沸点媒体は地球温暖化係数が高いものや引火性が高いもの、毒性が高いものがあり、外部への漏洩がなく媒体と外気が混ざることのない構造とする必要がある。このため、タービン内部と大気を隔てる軸シール部にはメカニカルシールが適用される。

バイナリータービンは小出力なので、一般的には単流となる。また、復水器は空冷式が採用されることが多い。

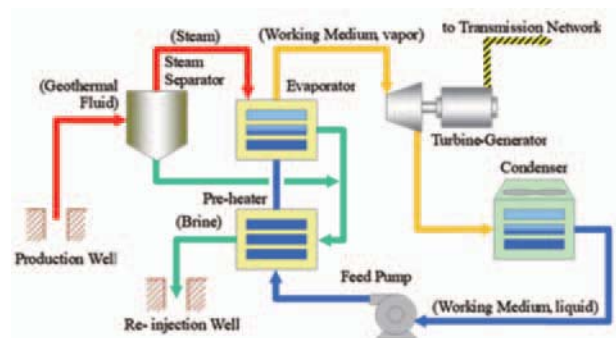


Fig. 17 Binary cycle geothermal power plant

5.4 最近の技術動向

5.4.1 耐食性向上技術

地熱流体には塩化物イオン (Cl^-)、硫酸イオン (SO_4^{2-})、硫化水素 (H_2S)、二酸化炭素 (CO_2)、アンモニア (NH_3)、シリカ (SiO_2) 等の不純物が多量に含まれているため、腐食性成分を含む地熱蒸気が直接流入するフラッシュタービンを長期にわたり安定的に運用するには、全面腐食、孔食、応力腐食割れ、腐食疲労、エロージョン・コロージョンなどに対し設計・製作上十分配慮する必要がある。

耐腐食性を向上させる対策事例としては以下がある。

(1) 耐腐食性材料の適用

一般的に1~2.25%Cr-Mo-V鋼が適用されることの多いタービンロータ材により耐食性の高い12%Cr-5%Ni鋼を適用する場合や⁽³⁾、炭素鋼鋼板が適用されることが多いケーシング材に13%Cr鋼を適用する場合や、12~13%Cr鋼が適用されることが多い静翼（ノズル）や動翼により応力腐食割れ耐性の高い17-4PH材やTi-6Al-4Vを適用する場合がある。

(2) 腐食環境からの遮断

翼部やグランドパッキン部において過度の腐食減肉やエロージョン・コロージョンが生じると翼の緩みやシールフィンの脱落に至る場合がある。その対策として、蒸気に接触する部材表面を12%Cr鋼やNi合金のオーバレイ溶接もしくはタングステンカーバイドのHVOF溶射により被覆し、腐食環境から遮断する。

(3) 応力値の引き下げ

地熱雰囲気下で使用される部材は、腐食疲労強度の低下を考慮して低応力で設計されるが、翼脚部とロータ翼溝

との隙間のように腐食性成分が濃縮しやすい箇所では応力腐食割れや腐食疲労が生じやすくなる。このため、翼脚植込部の翼側及びロータ側それぞれショットピーニングにより圧縮応力を付与し応力腐食割れおよび腐食疲労に対する耐力を向上させる。

5.4.2 シリカスケール付着抑制技術

地熱流体中に含まれるシリカ (SiO_2) や炭酸カルシウム (CaCO_3) などの不純物は、タービン内部で翼やケーシング、ロータなどの部材表面にスケールとして析出・堆積し、車室圧力上昇、出力低下を引き起こす場合があるだけでなく、摩耗損傷や堆積物下腐食（アンダーデポジットコロージョン）や振動の原因となることもある。

不純物は地熱流体中の液相に多く溶解しているため、スケール生成を抑制するためのタービン上流側対策として、セパレータやスクラバなどで可能な限り汽水分離し水分と共に不純物を排出する方法や、薬注などがある。

タービンのスケール対策としては、スケールの堆積や析出による損傷を防ぐため翼間軸方向隙間を大きくすること、翼部スロートを大きくすること、翼部表面に低付着コーティングを施工すること、ノズル内に空けた穴に外部から供給した冷却水を循環させノズル出口部でスケールを析出させないよう水冷却ノズルを設置すること、堆積したスケールを除去するためのブレードウォッシング装置を設置することなどが挙げられる。

5.4.3 メンテナンス技術

地熱用蒸気タービンは過酷な腐食環境のもとで運転されるため、長期にわたる運転中に地熱蒸気中に含まれる腐食性不純物が動翼翼脚とロータとの隙間に堆積することによって翼翼脚にクラックが発生することがある。そこで、運転中に翼が破損するリスクを低減するためにも、定期点検時のクラック検査は重要である。

クラック検査の方法としては、磁粉探傷試験 (MT) や浸透探傷試験 (PT) などが一般に用いられるが、外表面近傍のクラックしか発見できないという制約がある。近年では、超音波フェーズドアレイ法の実用化が急速に進んだことにより、外表面に露出していないクラックを検査する方法として活用されている⁽⁴⁾。

5.4.4 出力増大

決められた蒸気条件下において、蒸気タービンの単機出力を増大させるためには、最終段動翼の流路面積を増大させる必要がある。しかしながら、腐食性の高い地熱蒸気中で使用される蒸気タービンの場合、材料強度の面から翼長に対する制約がより厳しくなる。1ケーシング機世界最大容量地熱用蒸気タービン (147MW, 2008年運開) や、単機世界最大容量地熱用蒸気タービン (2ケーシング, 184MW, 建設中) の最終段翼には、50Hz用798mm翼 (31.4インチ) が採用されている。近年では、最終段動翼の更なる長大化開発が進められ、実用化にも結び付いている。

5.5 地熱コンバインド発電

地熱流体からより多くのエネルギーを取り出す方式として、フラッシュ方式とバイナリー方式を組み合わせた地熱コンバインドサイクルが実用化されている。

Fig. 18に地熱コンバインドサイクルの模式図例を示すが、この例ではフラッシュタービンが背圧化されるためフラッシュサイクル用の復水器および冷却塔が不要となる。これ以外にも生産井の特性、地熱流体に含まれる成分、出力の最大化、設備費の低減等を考慮し各種のサイクルが提案されている。

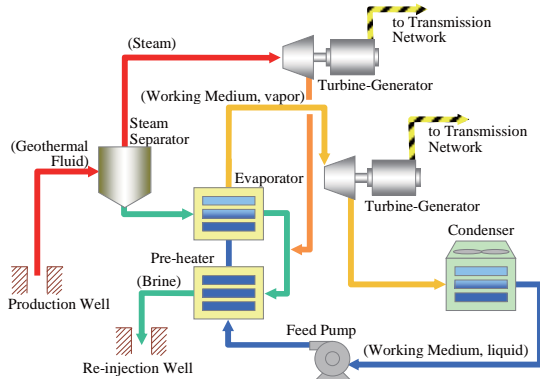


Fig. 18 Geothermal combined cycle power plant

5.6 地熱タービンの今後の展開

環太平洋火山帯に属する日本は豊富な地熱資源に恵まれているが、地熱発電が総発電設備容量に占める割合は約0.3%にしか過ぎない。また過去20年間、日本の地熱資源開発は盛況とは言えない状況であったが、フラッシュ方式では約20年ぶりに松尾八幡平地熱発電所（7.5MW）と山葵沢地熱発電所（46.2MW）が2019年に運開し、2023年、2024年には鬼首地熱発電所（14.9MW）、安比地熱発電所（14.9MW）が運開される計画である。地熱資源はクリーンで気象条件の影響を受けない貴重な国産の再生可能エネルギーである。脱炭素が取りざたされる昨今、長期的な視点に立った地熱資源開発が必要と考えられる。

6. バイオマス向け等の中小型蒸気タービン

6.1 バイオマス発電の概要

バイオマス発電は、ボイラ燃料として木材や農作物残渣およびその他のバイオマス燃料を使用し、その発生蒸気で蒸気タービン発電機を回して発電する発電方式であり、再生可能エネルギーの一躍を担っている。我が国でも2012年より導入された固定価格買取制度（FIT）の対象になったことや、太陽光発電や風力発電とは異なり、非常に安定した電源であることから、近年急速に導入が進んでいる^{[5], [6]}。ここで使用される蒸気タービンは、多様化する自家発電用蒸気タービンにおいてある程度の比率を占める部分的形態と捉えることができ、本章では、このバイオマス発電で使用される蒸気タービン^[7]の構造

と特徴について、その概要を説明する。

6.2 中小型蒸気タービンの適用形態と分類

6.2.1 適用形態 蒸気タービンを使用した自家発電設備には、発電と同時に工場の生産プロセスへタービンの中間段または排気から蒸気を供給する熱電併給型と、発電を主目的とした電力単独型に大別される。

熱電併給型のプラントであっても、ボイラ燃料としてバイオマス燃料を使用していればバイオマス発電との位置づけとなる。この型のプラントでは、タービン中間段からプロセス蒸気を抽気する復水タービンだけでなく、タービンの排気を工場プロセスへ蒸気を供給する背圧タービンも適用となる。

電力単独型のプラントでは、できるだけ発電量を多くするため、一般的にはタービンの排気圧力を真空とした復水タービンが主に適用される。

6.2.2 業種別分類 熱電併給型のプラントでは、サトウキビの搾りかすであるバカスを燃料とする発電が代表例である。

電力単独型のプラントでは、木屑燃料による木質バイオマス発電、パーム油や、もみ殻を用いた発電が典型的であり、国内では主に木質バイオマス発電が盛んに行われている。

6.3 バイオマス発電向け蒸気タービンの一般仕様

6.3.1 タービン型式及び出力レンジ バイオマス発電で主流となる中小規模のものでは、単車室単流形の蒸気タービンを適用するのが一般的となっている。つまり、タービンの主蒸気入口から排気への蒸気流れは、一つの車室（ケーシング）の中を一方方向に流れ、途中で分流しないシンプルな構造となる。また、発電機はこのクラスでは4極機の使用が一般的で、効率の観点からタービンを任意の最適回転数とし、減速機を介して連結するのが一般的である。

6.3.2 入口蒸気条件・排気条件 入口蒸気条件は、発電プラントとしてのプラント効率や、ボイラ側の仕様を考慮した上で決定される。従来は中温中圧クラスの蒸気条件も多かったが、近年では、8 MPa・500℃程度の1500 lb クラス、更に2500 lbクラスの10 MPa・535℃程度を主蒸気の常用蒸気条件とするプラントも増えてきている。主蒸気条件の更なる高温高压化は、プラント効率の向上に寄与するが、13MPa・550℃を超える条件では、タービン材料の特殊化を伴い、対応できるメーカーも限られることから、プラントの設備費用と納期に与える影響が大きく、バイオマス発電では主流とはなっていない。

排気圧力について、背圧タービンの場合は、排気蒸気を送る工場側のプロセス圧力に依存する。一方、復水タービンの場合は、主復水器の計画条件により決定される。この主復水器には冷却水を使う水冷式と、冷却ファンによる空冷式復水器があるが、一般的には水冷式の方が空冷式に比べて高真空となり発電出力は増加する。近年ではプラント効率向上を優先し、できるだけ高真空と

する傾向が出てきている。

6.3.3 タービン排気口 蒸気タービンの排気口は、タービンに接続する主要な蒸気配管の中で通常は最も口径が大きく、排気口の向きは、タービン廻りのレイアウトを決定する重要な要因となっている。

背圧タービンの場合は、排気圧力が大気圧力以上となるために蒸気の比体積が小さく、必要排気口径は比較的小さい。そのため、口径にもよるが排気口の向きは下方向や上方向に加え、横方向の向きが選べる。一方で復水タービンの場合は、排気蒸気の比体積は非常に大きくなるため、排気口サイズは大きくなり、通常は横方向への排気が難しく、従来から下方向か上方向が、基本的な排気口向きとされてきたが、近年ではタービン軸方向へ排気口を配置する軸流排気型も多い。それぞれ、メリット・デメリットをTable 3の表にまとめた。

Table 3 Comparison table of features of three exhaust types

	下排気	上排気	軸流排気
メリット	メンテ性○ 設計容易	配置汎用性 基礎低床化	排気損失小 (効率良) 基礎低床化
デメリット	基礎高さ× 排気損失大	メンテ性△ ドレン回収	メンテ性△ 設計配慮要

6.4 蒸気タービンの構造

6.4.1 中容量蒸気タービン設計・製作上の特徴 中容量蒸気タービンは、機器費用抑制および納期短縮の観点からタービンを構成するパーツ毎のモジュール化設計を考慮しており、これは多くのタービンメーカーで採用されている設計手法である。

Fig. 19に一例として新日本造機株式会社製蒸気タービンにおけるモジュール化設計のコンセプトを示す。この設計手法はマスカスタマイズ手法とも呼ばれるものである。中容量の蒸気タービンは、各工事で仕様は異なり、同じフレームサイズのタービンでも蒸気条件や段落数、抽気の数や位置は工事毎に様々である。しかし、工事毎に全

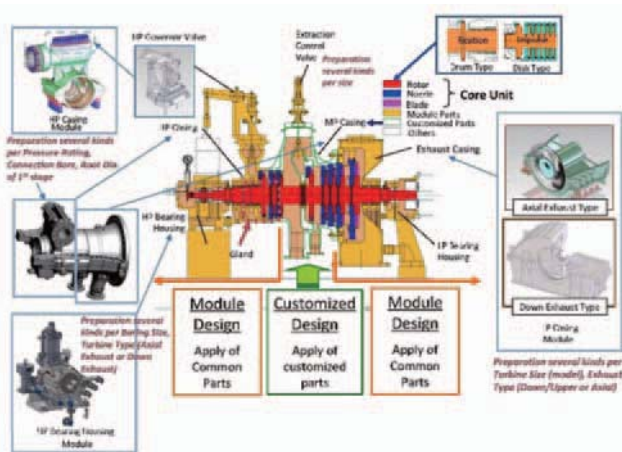


Fig. 19 Example of module design concept Source: Shin Nippon Machinery

ての部品を都度設計しては、機器費用は高騰し、納期も長くなる。従って、工事毎に都度設計する部位と共通化が可能な部位に切り分け、共通化が可能な部位をモジュールとして設計するものである。モジュール部位については、タービンのサイズ毎もしくはサイズをまたがって使用可能であるので、予めラインナップ化して、同じ設計で何度も製作することが可能となり、機器費用抑制および納期面で有利となる。

6.4.2 小型蒸気タービン設計・製作上の特徴

小容量機では特に機器費用を出来るだけ抑えるため、タービンの蒸気条件の対応レンジや段落数、出力レンジを固定化した標準機が選定される傾向にある。但し、標準機を採用するには、まず、蒸気条件および要求出力(蒸気量)を標準機の設計条件に合致している必要があり、この点に関しては、ボイラーメーカーとの協力が有効となる。

中容量機で行われているモジュール設計は、機器費用削減に有効では有るが、都度設計にてカスタマイズするコアユニットが残っており、コストダウンは限られる。従って、小型標準機では、タービン全体を標準化することで、Fig. 20に示す様に全体的にコンパクトな設計すると共に、様々なコストダウンが実施されている。

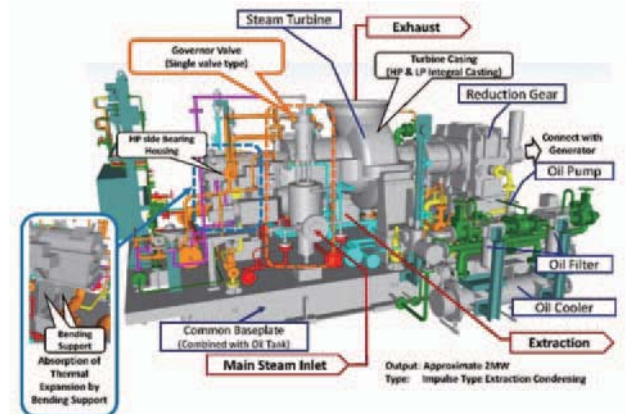


Fig. 20 Typical standardized small steam turbines Source: Shin Nippon Machinery

6.5 バイオマス発電用蒸気タービンの今後

バイオマス発電は再生可能エネルギーの一躍を担う安定電源として、需要は今後も継続することが見込まれる。但し、事業の採算性の観点に加え、環境負荷低減の観点からも高効率化要求の流れは益々強くなると考えられる。当社でのバイオマス発電用蒸気タービンの選定に関しては、過去の商品ラインナップに対し、現在はタービン型式を細分化し、多様化する事業者からの要求に対し最適なタービンサイズ、蒸気条件、設置条件に合わせて選定できる様に対応を行っている⁽¹⁷⁾。このことは、プラントの初期投資額の低減や採算性の改善に寄与していると考えられるが、今後も更なる基本性能の改善に取り組み、更なる高効率化要求に対応していく事が求められている。

7. あとがき

蒸気タービンは今後も安定した電力を供給するために必要な役割を果たす原動機として技術開発が続けられている。更に、2050年のカーボンニュートラルを実現するためにCCUS、燃料転換に対応することで、持続可能な社会の発展にとって重要な役割を担う必要があり、性能向上と運転性の向上のための技術開発を継続してゆくことが求められている。

参考文献

- (1) ターボ機械協会編：蒸気タービン 新改訂版 第2刷, (2017), pp. 9, pp. 202.
- (2) Murata, Y., Shibukawa, N., Murakami, I., Kaneko, J., and Okuno, K., Development of 60Hz Titanium 48-inch Last Stage Blade for Steam Turbine, Proceedings of the ASME 2011 Power Conference, (2011),
- (3) 高江俊介, 電源開発(株)竹原火力発電所新1号機 蒸気タービンの最新技術, 東芝レビュー, Vol. 74, No. 3 (2019).
- (4) McCoy Power Report Excel form 2015 ~ 2020 by McCoy Power Reports, Ltd.
- (5) 第6次エネルギー基本計画, 資源エネルギー庁 (令和3年11月).
- (6) Transmission Code (2019).
- (7) The GRID CODE ISSUE5 REVISION21.
- (8) 「回転機械のフレキシブルな運用を支援するバーチャル計測技術」, 三菱重工技報, Vol. 58, No. 1 (2021).
- (9) 太田正人, 環境負荷の低減を支える蒸気タービン技術, ターボ機械, Vol. 49, No. 9, pp. 17-24, (2021).
- (10) 三菱重工, CO₂回収技術: CO₂回収プロセス, https://www.mhi.com/jp/products/engineering/co2plants_process.html, (参照日 2022年12月7日)
- (11) 赤石裕二, 新田紳二, 既設蒸気タービン改造による環境負荷低減事例, ターボ機械, Vol. 49, No. 9, pp. 25-31.
- (12) 和泉栄, 再生可能エネルギー向け蒸気タービン (地熱発電), ターボ機械第49巻第9号 (2021), pp. 32-38.
- (13) 福田寿士, 石黒淳一, 齊藤象二郎, 地熱発電のしくみとCO₂削減, 三菱重工技報, Vol. 45, No. 1 (2008), pp. 58-60.
- (14) 和泉栄, 田部井崇博, 酒井吉弘, 地熱用蒸気タービンの最新動向, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 46, No. 4 (2018), pp. 268-273.
- (15) 経済産業省, 資源エネルギー庁, 第5次エネルギー基本計画, 同庁再生可能エネルギー関連資料https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/ (参照日 2022年11月16日).
- (16) 固定価格買取制度情報公開用ウェブサイト<https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary> (参照日 2022年11月16日).
- (17) 岩本和也, 再生可能エネルギー向け蒸気タービン (バイオマス発電), ターボ機械, Vol. 49, No. 9, pp. 39-48.

特集：第50回定期講演会 報告

第50回日本ガスタービン学会定期講演会 全体報告

Report of the 50th GTSJ Annual Conference Fukuoka

岡本 光司*1
OKAMOTO Koji

1. 市民フォーラム

定期講演会前日の10月11日(火)に、九州大学伊都キャンパス稲盛ホールにて、ガスタービン市民フォーラムを開催した。このフォーラムは、当学会の活動対象であるガスタービン及びエネルギー関連技術について、学生や一般の方々に広く知っていただくことを目的として開催している。今年は3年ぶりの対面開催であったが、前年まで行っていたオンライン開催にも一定のメリットがあると考え、オンライン配信を加えたハイブリッド開催とした。その結果、現地参加71名に加えてオンライン参加92名と、大変多くの方々にご参加いただいた。

今回の市民フォーラムでは「時代に即した航空機エンジン信頼性向上に向けた取り組み」という題目で、株式会社JALエンジニアリングの広井良典氏に講演いただいた。1960年代以降の航空機の進歩やターボファンエンジンの基礎の説明にはじまり、特に運航整備の観点から様々な課題や工夫、CO₂排出削減の取り組みを含めた今後の進化の方向性などを、具体的な事例を交えながら、学生・一般向けに分かりやすく説明いただいた。講演後には活発な質疑応答が行われ、特に学生や一般からの参加者にとって、エアラインの整備の現場と技術に触れる大変貴重な機会になったと思われる。

2. 定期講演会

市民フォーラムに続き、10月12日(水)及び13日(木)に、同じく九州大学の医学部百年講堂にて、「第50回日本ガスタービン学会定期講演会」を開催した。講演会は講堂の1階と2階を使って行われ、講義室3室、練習室、休憩室、委員会室を設けたほか、建物入口の交流ホール及びロビーに受付と企業展示スペースを設置した。

今回は3年ぶりの現地開催ということで、久しぶりに対面で会う方々が旧交を温める様子が会場のあちこちで見られ、コロナ禍でも対面で講演会を開催する必要性を、あらためて実感した。また、企業展示スペースには7社の参加が得られた。各社製品の展示・紹介が行われ、対面開催ならではの情報交換の場を提供できたと思われる。なお懇親会については、十分な感染予防対策が取れないために、今回は残念ながら開催を見送ることとなった。

原稿受付 2022年11月22日

* 1 東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻
〒277-8561 柏市柏の葉5-1-5
E-mail: k-okamoto@edu.k.u-tokyo.ac.jp



Fig. 1 市民フォーラム



Fig. 2 講演会会場（九州大学医学部百年講堂）



Fig. 3 企業展示

今回の講演会では、初日冒頭に山本誠副会長挨拶、渡辺紀徳創立50周年記念事業実行委員長による創立50周年記念事業及び行事の案内、太田有IGTC実行委員長によるIGTC2023開催案内が行われた後、定期講演会がちょうど50回目という節目を迎えることを記念して、記念講演を開催した。最初に、「学術講演会の50年を振り返って」という題目で、慶應義塾大学の川口修名誉教授に講演いただいた。学術講演会50年の間に起きた様々なエピソードをご紹介いただき、学術講演会の歴史と先達の皆様のご尽力に触れる良い機会になったと思われる。続いて、元三菱重工工業株式会社の青木素直氏に、「世界の頂点を目指せ!」と題して、国産ガスタービン開発の黎明期から現代に至るまでに培われたご経験などについてご講演いただいた。今後を支える世代にむけての提言もいただき、50回記念として有意義な企画であったと思われる。

講演会の参加者総数は161名であった。また今回、50回記念として、学生会員の参加登録費を無料とした結果、学生参加者は31名であった。一般講演については53件の発表件数を集めた。内訳としては、空力14件、材料13件、サイクル・システム7件、燃焼6件、伝熱5件、着氷・二相流5件、振動3件であった。どのセッションにも数多くの方々が参加しており、活発な質疑応答が行われていた。参加者数及び一般講演数については、コロナ禍が終息していない状況にも関わらず、コロナ禍以前の対面開催の頃に近い数となっており、多くの方々が対面での開催を待ち望んでいたことがうかがえる。

講演会2日目午後には福岡市博物館市史編纂室長を務めておられる宮井善朗氏による特別講演「遺跡、遺物から見た福岡市の歴史」が行われ、福岡市内における遺跡発掘調査についてご講演いただいた。従来、特別講演は主に開催場所にちなんだ講演者に講演いただいていたが、こちらもオンライン開催の間は実施できなかったため、3年ぶり開催であった。

特別講演に続いて、先端技術フォーラム「ガスタービンにおけるデータ活用技術の最前線と今後の展望」が、黒瀬良一教授（京大）を座長として、開催された。前半の講演形式は二部構成となっており、第一部は「ガスタービンにおける機械学習やデータ同化の活用」という視点で、菊池亮太氏（京大）から「現実世界とバーチャル空間を融合するデータ同化技術の活用可能性」、古川雅人教授（九大）から「遷音速翼列流れ解析におけるデータ同化の活用」、伊東正雄氏（東芝）から「Flamelet/ANN法を適用した超臨界CO₂タービン燃焼器のLES解析結果と高圧燃焼試験結果との比較について」と題して講演が行われた。第二部は「ソフトウェアベンダーにおける機械学習やデータ同化の取組みと展望」という視点で、澤芳幸氏（ヴァイナス）から「AIと機械学習処理による次世代型最適化設計とPOD/DMD解析：OASIS-AIとVFBasisの概要」、桜井旭氏（アンシス・ジャパン）か



Fig. 4 招待講演（川口修名誉教授）



Fig. 5 招待講演（青木素直氏）



Fig. 6 特別講演（宮井善朗氏）



Fig. 7 先端技術フォーラム（パネルセッション）

ら「Ansysのガスタービン開発向け解析とデータ解析技術の今」と題して講演が行われた。これに続いて行われた総合討論では、黒瀬良一教授（京大）を座長、5名の講演者をパネリストとして、それぞれの分野における機械学習やデータ同化の活用方法の違いや今後の展望などについて議論され、会場からの質疑も含めて活発な意見交換が行われた。先端技術フォーラムの詳細は、本誌別記事にて紹介されているので、そちらを参照されたい。

今回の講演会では27件の学生講演があり、これらを対象に学生優秀講演賞の審査が行われた。学生の講演が終了した2日目の昼休みに審査委員会が行われ、厳正な審査の結果、加藤収眞さん（東京理科大学大学院）、河村栞奈さん（東京大学大学院）、真部魁人さん（九州大学大学院）が選出された。講演2日目午後には審査結果報告が行われ、山本誠副会長より賞状が授与された。

3. 見学会

見学会は講演会翌日の10月14日（金）に行われ、水素エネルギー製品研究試験センター（HyTReC）および水素材料先端科学研究センター（HYDROGENIUS）などを見学した。参加者は43名であった。

HyTReCは、水素エネルギー分野の研究開発を支援するために、水素関連製品の研究試験を行うことを目的として設立された公益財団法人である。タンクやバルブ、シール材など、水素利用に欠かせない様々な製品の試験を行うために、圧力サイクル試験や破裂試験、振動試験など、数多くの試験設備を有している。見学に訪れた際にも多くの試験を実施中であり、非常にニーズの高い施設であるように見受けられた。

HYDROGENIUSは、九州大学と産総研の連携のもとに設立された研究センターであり、水素利用に欠かせない材料技術の研究開発を行っている。センターは、金属材料、高分子材料、トライボロジー、物性、安全評価の五つの研究部門から構成されており、水素脆化をはじめとする、水素利用時に特異な諸問題の解決に取り組んでいる様子が紹介された。

いずれの見学先でも、非常に懇切丁寧に説明をいただき、質疑応答も活発に行われた。

4. 来年度の開催

来年度の第51回定期講演会は、福井県福井市で開催する。会場は福井県国際交流会館、開催日は2023年10月4日（水）と5日（木）となっており、10月6日（金）には見学会を予定している。来年度も引き続き、多くの皆様にご参加いただけることを願っています。

5. 謝辞

定期講演会の準備と実施に多大なご協力をいただいた福岡コンベンションビューロー様、市民フォーラム及び定期講演会でご講演いただいた皆様、先端技術フォーラ

ムの座長・講演者の皆様、見学会の開催にご協力いただきました水素エネルギー製品研究試験センター及び水素材料先端科学研究センターの関係者の皆様に、心より御礼申し上げます。

（学術講演会委員会委員長）



Fig. 8 学生優秀講演賞受賞の皆様



Fig. 9 水素エネルギー製品研究試験センター



Fig. 10 水素材料先端科学研究センター

特集：第50回定期講演会 報告

先端技術フォーラム

「ガスタービンにおけるデータ活用技術の最前線と今後の展望」

Advanced Technology Forum “Frontiers and Future of Data Utilization Technologies for Gas Turbine”

黒瀬 良一*¹
KUROSE Ryoichi

富永 純一*²
TOMINAGA Junichi

藤澤 信道*³
FUJISAWA Nobumichi

菊地 亮太*⁴
KIKUCHI Ryota

古川 雅人*⁵
FURUKAWA Masato

伊東 正雄*⁶
ITOH Masao

澤 芳幸*⁷
SAWA Yoshiyuki

桜井 旭*⁸
SAKURAI Akira

キーワード：ガスタービン，ビッグデータ，データ同化，機械学習

Key Words：Gas Turbine, Big Data, Data Assimilation, Machine Learning

1. はじめに

3年ぶりに対面開催となった第50回定期講演会の先端技術フォーラムは「ガスタービンにおけるデータ活用技術の最前線と今後の展望」をテーマとした。近年，研究，開発，設計，製造，運用，保守など様々な分野でビッグデータの活用が進められ，ガスタービンやエネルギー機器においてもデータ同化や機械学習といったデータ活用技術を適用して，現象の高精度予測や事前検知などが行われている^{(1),(2)}。そこで，本先端技術フォーラムでは，データ同化や機械学習などのデータ活用技術について，関連分野で活躍されている5名の講演者から，大学や企業におけるガスタービンへの適用事例を説明いただくとともに，ガスタービンに限定せずに様々な分野を対象としたソフトウェアベンダー各社での取組みと展望を紹介していただいた。その後，ご講演者の皆様にご登壇頂いて，データ活用技術の今後の展望や，ガスタービンへの展開について総合討論を行った。以下にその概要をまとめる。

原稿受付 2022年11月11日

- * 1 京都大学 大学院 工学研究科
〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C3
E-mail: kurose@mech.kyoto-u.ac.jp
- * 2 JFEエンジニアリング(株) 原動機事業部
〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1
- * 3 早稲田大学 基幹理工学部
〒169-8555 新宿区大久保3-4-1
- * 4 京都大学 産官学連携本部
〒606-8502 京都市左京区北白川追分町
- * 5 九州大学 大学院 工学研究院 機械工学部門
〒819-0395 福岡市西区元岡744
- * 6 東芝エネルギーシステムズ(株) 京浜事業所
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4
- * 7 (株)ヴァイナス 技術一部
〒530-0003 大阪市北区堂島2-1-31
- * 8 アンシス・ジャパン(株) 技術部
〒160-0023 新宿区西新宿6-10-1



Fig. 1 Prof. Kurose, the forum moderator

2. 講演

講演は，「講演① ガスタービンにおける機械学習やデータ同化の活用」として3名，「講演② ソフトウェアベンダーにおける機械学習やデータ同化の取組みと展望」として2名に分けて行った。それらの講演概要は以下のとおりであった。

2.1 講演① ガスタービンにおける機械学習やデータ同化の活用

【S-1】 現実世界とバーチャル空間を融合するデータ同化技術の活用可能性（京都大学 菊地亮太氏）

設計開発から運用時の診断・保守・制御など，製品ライフサイクルを通して，効率よく設計・予測・制御を一貫して行う技術基盤が求められるようになってきた。現実世界の運用稼働条件とバーチャル空間でのシミュレーションには隔たりが存在する。この隔たりを低減する取組みとして，現実世界とバーチャル空間を融合するデータ同化には大きな可能性がある。本講演では，データ同化の適用可能性と適用事例について紹介した。

まず，フィルム冷却流れの予測精度向上のための乱流モデルパラメータ推定の事例を紹介した。高温流に晒されるガスタービン翼の最適設計のように多数回の解析が必要な場合には流体解析に頼る必要があり，精度向上が求められている。乱流モデルの不確かさを低減に注目し，



Fig. 2 Asst. Prof. Kikuchi in his presentation

計測を用いたデータ同化を乱流モデルの高精度化に適用した。推定パラメータを用いることで冷却流の広がり改善されており、フィルム冷却効率の不確かさを低減できた。

次に複雑な非定常流動現象をリアルタイムに予測するために、縮約モデルとデータ同化を組み合わせた事例を紹介した。複雑な非定常流動現象をリアルタイムに予測することは計算コストの観点で未だに困難である。そこでCAEを事前に実施しデータベースを構築し、そのデータベースから低計算コストな縮約モデルを学習する。縮約モデル空間で計測値を用いて、データ同化を実施することで、リアルタイムに三次元場を再構成することが可能となった。

最後に製造プロセスにおいて、時々刻々のデータを取得し、データ同化により状態を予測し、リアルタイムに最適な運転条件を導出し、現場に反映するデジタルツインを、日本酒の醸造現場において実用した事例を紹介した。醸造を表現するプロセスモデルを定義し、製造中の計測データをデータ同化により組み合わせることで、醸造を支援する温度・加水管理について具体的な支援情報を提供することが可能であることを確認した。

物理的な背景を持つCAEや数値モデル、計測をデータ同化により組み合わせることで、設計・製造・運用の高度化に対するデータ同化の活用を紹介した。データ駆動型の生産技術は社会的な要請も高く、IoTやAI、シミュレーションを高度に駆使し、リアル・デジタルが一体となった生産運用現場の構築にとって、データ同化は現実世界とバーチャル空間を繋ぐ技術体系として理解することができる。



Fig. 3 Data assimilation integrating experiment and numerical simulation

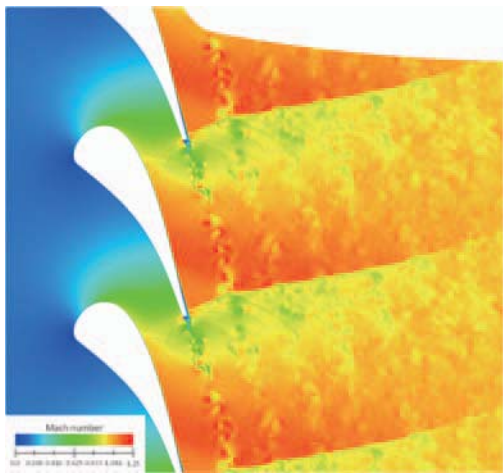
【S-2】遷音速翼列流れ解析におけるデータ同化の活用 (九州大学 古川雅人氏)



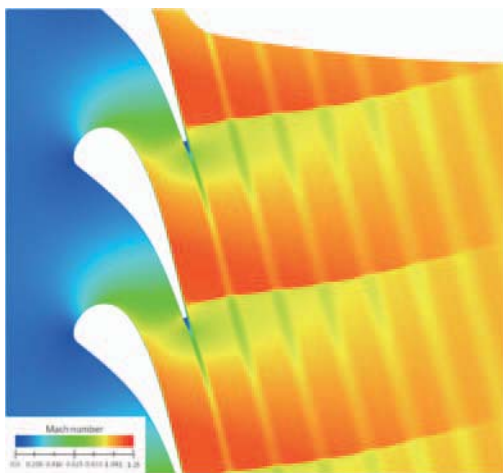
Fig. 4 Prof. Furukawa in his presentation

衝撃波と乱流境界層の干渉現象を含む遷音速翼列のような実用問題における複雑な内部流れ場に対しては、実験流体力学 (Experimental Fluid Dynamics : EFD) と計算流体力学 (Computational Fluid Dynamics : CFD) を併用したEFD/CFDハイブリッド解析 (データ同化ではない) の適用が不可欠であり、講演者がこれまでに実施してきたハイブリッド解析として、圧縮機動翼列における翼端漏れ渦の崩壊、軸流圧縮機における旋回失速の初生メカニズム、圧縮機サージにおける非定常流動現象などを解明した事例をまず紹介した。

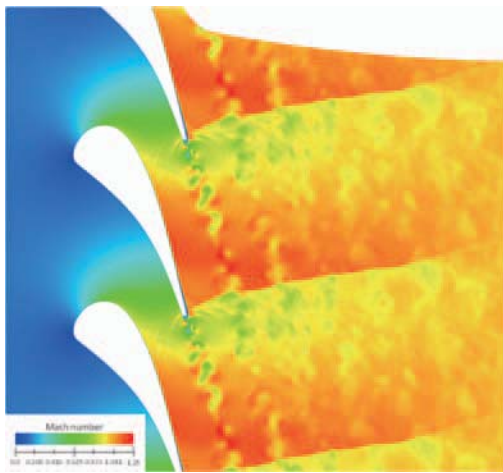
しかしながら、EFD/CFDハイブリッド解析のように、個別に実施されたEFD解析とCFD解析の両結果を単純に比較検討することにより流動現象を分析することでは、両解析結果を有機的に活用することに限界があり、遷音速翼列のような実用問題における複雑な内部流動現象を解明することには限界がみられる。そこで、EFDとCFDの真の融合を実現するデータ同化の活用事例を次に紹介した。具体的には、LES (Large Eddy Simulation) 解析結果を仮想的な実験データと見なし、アンサンブルカルマンフィルタに基づいてデータ同化することにより、遷音速タービン翼列流れのURANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes) 解析における乱流モデルパラメータの最適化を行うと、計算格子解像度がLES解析の1/8であるURANS解析においても、時間的および空間的に正しく非定常現象を捉えることが可能であることを示した (Fig. 5)。さらに、遷音速軸流圧縮機動翼列であるNASA Rotor37を対象に、Adjoint法に基づいて実験データを同化することにより未知境界条件を推定し、RANS解析による内部流動の高精度予測を実現した事例を紹介した。



(a) LES solution



(b) URANS solution with original parameters



(c) URANS solution with optimal parameters

Fig. 5 Instantaneous Mach number distributions at 50 % span section for transonic turbine cascade

【S-3】Flamelet/ANN法を適用した超臨界CO₂タービン燃焼器のLES解析結果と高圧燃焼試験結果との比較について (東芝エネルギーシステムズ 伊東正雄氏)

50MWth超臨界CO₂タービン検証機用の燃焼器を用いた超臨界CO₂燃焼試験結果と人工ニューラルネットワーク



Fig. 6 Mr. Ito in his presentation

ク (ANN) を組み込んだ富岳でのLES/Flamelet/ANN燃焼解析結果の比較について報告した。

本燃焼器はCO₂を媒体としたセミクロードサイクルであり、メタン燃料と酸化剤を量論比で燃焼させ、循環するCO₂により冷却を行うものである。本タービンが設置された米国テキサス州ヒューストンのパイロットプラントにてタービンをバイパスさせ閉サイクルにて燃焼器のみの単体燃焼試験を実施し、8.5MPa/900℃での試験結果を取得した。燃焼器評価として多くのデータを取得し、その中で燃焼器出口温度分布と排気エミッションについて解析結果との比較を実施した。

燃焼LESでは本燃焼器が通常ガスタービン燃焼器と異なり、燃料、酸化剤に加えて冷却用CO₂が存在するため3種吹き込みガス燃焼によるFlamelet法を新たに開発し適用した。また、パラメータが増えたことによるFlameletデータベース情報量削減のためANNを用いた。これらの新たな要素を検証するため、簡易Flameletデータベースにて、各々の標準モデルと本開発ANNモデルを用いて解析を実施し比較した結果、両者に燃焼器内部での温度分布や反応進行度に顕著な差がないことを確認した (Fig. 7)。標準Flameletデータベースは5.22GBとメモリーオーバーにより計算不可であったが、検証されたANNモデルでは0.002GBと大幅に縮小でき計算実行が可能となった。本標準ANN/Flameletを用い富岳にて大規模乱流燃焼解析を実施し20,000並列にて3日程度の計算時間となった。計算の結果、燃焼温度分布では計測値に対し局所的に50℃程度の温度差、エミッションとしてCO濃度は計測値、計算値ともに100ppm前後となり、計算結果は計測値に良く一致している。Oxy-Fuel 燃焼器

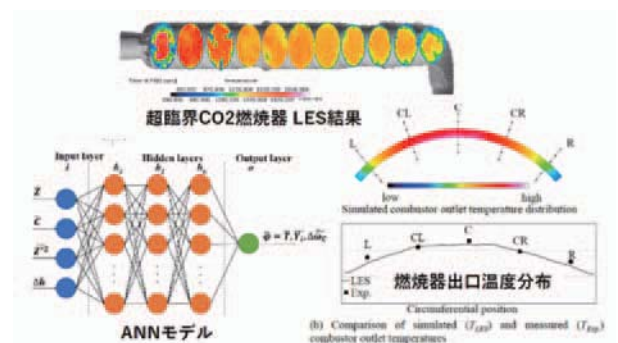


Fig. 7 Results of LES/Flamelet/ANN combustion simulation

にとっては、タービン入口温度制限から量論燃焼からの温度降下が必然であり、循環ガスによる3種流体吹き込みの必要性が高く、増大するFlameletデータベース情報量削減のためANN/Flameletモデルの活用は有効である。

なお、超臨界CO₂タービン検証機は本報告の燃焼試験の後、燃焼器をタービンに装着し試運転を実施、グリッドと並列後に負荷運転を達成、良好な燃焼状態を確認した。今後この負荷域においてもLES結果との突合せを実施していく。

2.2 講演② ソフトウェアベンダーにおける機械学習やデータ同化の取組みと展望

【S-4】 AIと機械学習処理による次世代型最適化設計とPOD/DMD解析：OASIS-AIとVFBasisの概要（ヴァイナス 澤 芳幸氏）



Fig. 8 Mr. Sawa in his presentation

株式会社ヴァイナスでは、1990年代より現在に至るまで最適化設計に対する様々なソリューションとサービスを提供し続けている。1998年のNAL（現JAXA）との共同研究による胴翼形状最適化のための基本アルゴリズムと最適化プログラムの開発に始まり、2000年代の構造解析向け非線形トポロジ最適化、ターボ機械の翼形状や流路の逆解析と最適化設計、2010年代のメッシュモーフイングによる最適化設計、そして2010年代後半以降の多目的最適化設計と今回紹介するAI/機械学習最適化設計まで、それぞれの時代の設計現場のニーズに応え、かつ次世代の最適化設計システムを様々な分野へ提案してきた。

今回の講演会では、AIを使用した次世代最適化シ

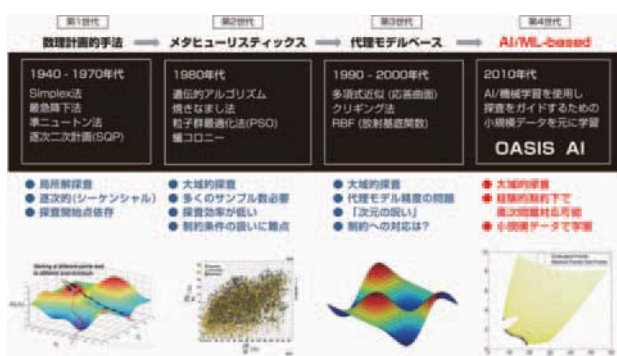


Fig. 9 OASIS AI and optimal design approach

ステムの「OASIS AI」（開発元：カナダ・Empower Operations Corp.）と機械学習処理によるPOD/DMD解析システム「VFBasis」（開発：宇宙航空研究開発機構・機能拡張とパッケージ化：ヴァイナス）を紹介した。

OASIS AIは、最適化設計の第1世代となる数理手法、第2世代のメタヒューリスティック的手法、さらに第3世代では代理モデル（応答曲面法）に続く第4世代と位置付けられ、AI/機械学習により小規模のサンプルを元に学習し探索をガイドしてユーザーの手間を最小限に最適化を実現している。ユーザーによる最適化アルゴリズムの選択やパラメータの調整と複雑なスクリプトの開発は不要で、直感的なGUIとAIにより短時間で、簡単に意味のある設計データの生成と発見を行い、最適なデザインを見つけることができる。講演会では、汎用ターボ機械設計ツールとCFDパッケージと接続して遠心ポンプの効率を最大化した事例と、CFD用メッシュジェネレータPointwiseと接続して非構造メッシュ品質の最適化した事例を紹介した。

VFBasisはPOD（固有直交分解）/DMD（動的モード分解）解析、さらにはその結果から機械学習を利用して重要モードを自動選択することが可能である。非定常CFD解析結果から製品性能を左右する空間パターンの抽出により、流体メカニズムを理解・把握することで、空力性能や騒音問題などの技術課題を解決することができる。講演会では自転車走行時の空力解析結果から低周波帯に重要モードが存在することを導き、そのモードが抗力変動への寄与度について検証した事例を紹介した。今後、ターボ機械における適用事例を重ね、例えば動静翼干渉や燃焼器における振動問題や空調ファンでの騒音問題などへの展開を見込んでいる。

【S-5】 Ansysのガスタービン開発向け解析とデータ活用技術の今（アンシス・ジャパン 桜井 旭氏）



Fig. 10 Mr. Sakurai in his presentation

ガスタービン解析において、主に燃焼器では汎用熱流体解析ソフトウェアAnsys Fluent[®]、圧縮機・タービン等では汎用熱流体解析ソフトウェアAnsys CFX[®]、構造評価では汎用構造解析ソフトウェアAnsys Mechanical[™]といったAnsys[®]社製品が広く使われている。Ansysではそうした物理解析や実験で得られるデー

タを活用するための技術、ソリューションも提供しており、その例をいくつか紹介した。

① データ同定の技術

最適化ソフトウェアAnsys optiSLang™により、実験と解析モデルの結果に差異がある場合のデータ同定が可能である。最適化の仕組みを使って、実験に合う解析モデルのパラメータを自動探索させ、解析の信頼性を向上させることができる。

② データベースのモデル化

Ansys optiSLangは各種データから機械学習などを利用したMOP (Meta-model of Optimal Prognosis: 最適予測メタモデル) を作成することができる。また、システム解析ソフトウェアAnsys Twin Builder™も同様にROM (Reduced Order Model: 縮退化モデル) と呼ばれる過渡・非線形の現象に対しても瞬時に応答を予測するモデルを作成できる。これらはソルバーの代替や実験データの補間値予測等に用いることができる。

③ シミュレーションベースのデジタルツイン

Ansys optiSLangやAnsys Twin Builderでは複雑なシステムモデルを構築でき、その要素としてMOPやROMを使用できる。MOPやROMは物理計算をベースに作成されているため、従来の理論モデルのライブラリと比較して高精度なモデルである。これらの技術により、リアルタイムに回答する高精度なデジタルツインモデルを構築し、予知保全などに活用することが可能である (Fig. 11)。

④ 解析、設計のプロセス、データ管理

開発リードタイムの短縮が要求される昨今において、それを達成するための環境としてSPDM (Simulation Process and Data Management: 解析プロセス・データ管理) の重要性が増している。AnsysはSPDMツールとしてAnsys Minerva®を提供し、ガスタービン開発における開発プロセス、設計データ、実験データ、解析データ、工程などを集約して管理することができる。

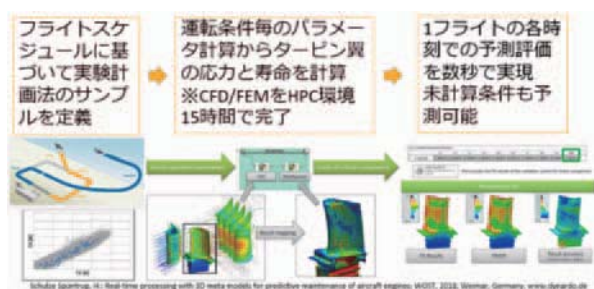


Fig. 11 Predictive maintenance applied by ROM

3. 総合討論

総合討論は、座長から前半3件のガスタービン関係の講演者と後半2件のガスタービン以外を含めたベンダーの講演者、それぞれに質問し、その後、会場の聴講者から質疑や意見を頂いて進められた。

始めに前半3件の講演者に、後半2件のベンダーの講演者の発表からガスタービン分野への応用の可能性について意見を頂いた。菊地氏からはデータのインターフェイスについて、研究者が作るには手間が掛かることから重要と考えていること、また、シミュレーションではインターフェイスが用意される一方で、実験の計測データは特殊なインターフェイスを持つことがあり、処理を工夫するなどしてデータを一元化されれば評価する上で取り扱い易いとの意見が述べられた。これに対するベンダー側の取り組みとして、桜井氏から同定を行うソフトウェアにデータを加工し計測データに入るノイズなどの不必要な値を取り除く機能を導入していること、また、澤氏からはデータが大きい場合のインターフェイスに加えてヒューマンインターフェースも重要で、GUIなどを工夫して現場で使い易くする例が紹介された。

古川氏からは、AIの活用について、人間の手作業が入る解析格子の作成などでベンダーの今後の動向に関して質問された。澤氏からは構造格子で切りたいというニーズに対して複雑な形状は人間では難しく、メッシュの最適化にAIを活用していく必要性はある一方で、限界があり、オールマイティーではなく、タービンや車などに特化してメッシャーを最適化していることが述べられた。一方、桜井氏からは海外のガスタービンメーカーの現状としてマシンパワーに任せて非構造格子で解析を行っており、アンシスとしては大規模、高品質メッシュの作成の効率化に注力しているとのコメントがあった。

伊東氏からは、メーカーとして燃焼器に関して最も気になっている点として燃焼振動を挙げ、例えば気柱振動、ヘルムホルツ振動などによる複合的な現象に加えて、材料や構造に基づく共振やそのレスポンスなども含めたトータルの振動パッケージがあればよいとの意見が述べられた。桜井氏からはAIを活用して解析にはない現象のモデルを解析に取り込むこと、また、澤氏からは燃焼器や機械だけではなく、ビルなどの建物や楽器など様々な振動現象の知識やノウハウを横断して共有、活用できるような仕組み、例えばコンソーシアムなどがあると良いのではないかと意見があった。

次に後半2件の講演者に、前半3件のガスタービンに関する講演を聞いた上で、ベンダー側から提案できることや取り組むべき課題について意見を頂いた。澤氏からは、AIや機械学習で定める基準を人間が判断するため、大学や現場の立場でAIや機械学習を使う上での教育について意見を求めた。菊地氏からは、現実的で実践に沿った良いチュートリアルがあって手元で動かせば理解が一気に促進するという人が多いようで、AI教育シ

システム構築に関するプロジェクトの中で現実的なデータセットを作ってプログラムも共有すると非常に教育効果が高かったという経験を紹介して頂いた。古川氏からは、逆にベンダーに良い人材の教育も含めたパッケージがあれば良いが、そういった意味ではまだまだ機械学習が進んでないのではないか、伊東氏にはメーカーの立場から、企業でもAIの教育を若者中心に進めているが、実際の現象を必ずしも理解していないため基礎的な内容を分かった上でAIを学ぶ必要があるという意見を頂いた。また、桜井氏からは、Menterの乱流モデルの経験定数のデータ同化やAdjointなどを提供しており、使用例を増やしていきたいというコメントを頂いた。

その後、会場からの質疑で、企業の開発現場でデータ同化をいろいろな現象に適用するニーズはあるが、例えばチューニングした乱流モデルをその他の事例に使用するときには恐怖感があり、使用する上でのアドバイスや今後の展望についての意見が求められた。菊地氏からは、ある一つに値を決めるのではなく、不確実性の幅に着目して各パラメータの振れ幅の範囲で値を決めていくこと、可視化などの愚直な手法も必要で上手く使い分けていくことが必要であること、また、古川氏からは、2方程式モデルの標準的な乱流パラメータによるURANSでは非定常現象がほとんど現れないことからLES結果を疑似的な実験と見做して乱流パラメータの最適化を行った事例を紹介して頂き、今後、実験と解析を真に融合することで今までできなかったことができる道具が手に入れられて、全てのケースではなく、そのできなかったことに応用していけばよいとの意見を頂いた。

さらに、乱流パラメータによる同化に関して、流れの重要な特徴量に対してチューニングしたパラメータがどういった感度を持ち、着目した現象に対してロバストなモデルであることを評価する研究が行われているか質疑があった。菊地氏からは、流れのトポロジに合わせて条

件を変えても何か一つに決まるということはないが、逐一な流れは類似のパラメータをPODかDMDで割り振ることは面白いものの実践できている人は少ないとのコメント、また、実験結果を1事例しか持っていない方が多いので、社内で様々な事例を集めて対処することもできると思われるとの意見を頂いた。

これに対して、設計者の立場では圧縮機やタービンの基本の流れは大体わかっていて、例えばクリアランス付近の流れに着目して精度を上げるモデルの作り方があると、場合に応じたモデルを使うことが出来ると良いと思うという意見があり、古川氏から、スパースセンシングという考え方に通じる質問で、PODを通して感度解析をしてどの計測点を選択すれば流れ場全体を再現するのに感度が良いかという研究があること、また、Adjoint法を感度解析に活用することもできるとコメント頂いた。

4. おわりに

本稿では、第50回定期講演会先端技術フォーラム「ガスタービンにおけるデータ活用技術の最前線と今後の展望」における5件の講演、およびその後の総合討論の概要を、座長を務めた黒瀬と学術講演会委員会先端技術フォーラム担当 富永と藤澤、および5名の講演者でまとめて記した。紙面の都合上、講演内容や総合討論の全てを記載できていないことにはご容赦いただきたい。本稿がデータ活用技術の現状把握のみに留まらず、今後の産学官連携研究に向けた議論の一助となれば幸いである。

参考文献

- (1) 黒瀬良一, リアルワールドとデジタルワールド, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 50, No. 3 (2022), pp. 162.
- (2) 黒瀬良一, ガスタービンのデジタルツインを目指して, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 50, No. 3 (2022), pp. 191-196.

日本ガスタービン学会学生優秀講演賞選考結果について

表彰委員会
学術講演会委員会

2022年10月12日(水)、13日(木)に九州大学医学部百年講堂（福岡市）において開催されました第50回日本ガスタービン学会定期講演会における「日本ガスタービン学会学生優秀講演賞」の選考結果についてご報告いたします。

本年、学生優秀講演賞の対象となった講演は、空力関係：11件、燃焼・伝熱関係：7件、相変化関係：4件、材料関係：5件の合計27件でした。発表内容・発表態度等について、複数の審査員により厳正な評価を行い、全ての審査対象講演の終了後に審査会を開催し、以下のとおり授賞が決定されました。

九州大学工学府 機械工学専攻 博士課程2年 真部魁人さん

講演題目：「富岳」を用いた遷音速遠心圧縮機のマイルドサージの大規模DES解析

東京大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻 修士2年 河村葉奈さん

講演題目：「圧縮機翼列における空力騒音の特性と低減方法に関する研究」

東京理科大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 修士1年 加藤收眞さん

講演題目：「解像度可変型MPS法を用いた金属溶融液滴のデポジション現象の数値的研究」

今回、学生優秀講演賞の対象講演27件の発表はいずれも素晴らしく、積極的にご参加頂いた学生の皆様に感謝申し上げますと共に、審査をお願いした方々には、全ての審査対象講演の聴講や審査会の開催など貴重なお時間を頂戴いたしましたことを、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

日本ガスタービン学会学生優秀講演賞

「富岳」を用いた遷音速遠心圧縮機のマイルドサージの大規模DES解析

九州大学 工学府 機械工学専攻 博士課程2年
真部 魁斗



この度は学生優秀講演賞を賜りましたこと、心より御礼申し上げます。本研究は、私が博士課程進学後に取り組んできたものです。スーパーコンピュータ「富岳」を用いた計算で、その莫大なデータの解析には大変多くの苦労がありましたが、選考委員の皆様にご研究発表を選んでいただき、大きな自信へとつながりました。これからも皆様に面白いと思って頂けるような研究を続けていけるよう精進してまいりたいと思います。最後になりましたが、日々ご指導いただいている先生方や共に学ぶ研究室の仲間に、この場を借りて感謝申し上げます。

圧縮機翼列における空力騒音の特性と低減方法に関する研究

東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻 修士2年
河村 葉奈



この度は大変光栄な賞をくださり誠に有難うございます。初めて学会という場で発表をさせていただき、自身の研究を客観的視点から見つめなおす機会となりました。また、様々な方の研究内容やご意見を伺うことができ、自身の視野を広めることができました。発表に際して、ご指導くださった先生方、また、本講演会を運営してくださった皆様へこの場を借りてお礼申し上げます。これを励みに今後一層の研究活動に従事いたします。改めて、この度は誠にありがとうございます。

解像度可変型MPS法を用いた金属溶融液滴のデポジション現象の数値的研究

東京理科大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 修士1年
加藤 収眞



この度、第50回日本ガスタービン学会定期講演会にて学生優秀講演賞に選出していただき、大変光栄に存じます。本発表はガスタービンのデポジション現象の予測に向けて、粒子法の計算負荷を低減する手法の開発に関するものでした。本学会参加を通し、多くのことを経験し学ばせていただきました。この貴重な経験を糧に、今後も研究活動に邁進したいと考えております。

最後に、山本先生、福留先生をはじめ、常日頃からご指導いただいております先生方、共に研究に励む山本研究室の皆様、及び日本ガスタービン学会関係者の皆様に、この場をお借りして深く御礼申し上げます。

学術講演会発表助成について

表彰委員会

2022年10月12日(水)、13日(木)に九州大学医学部百年講堂（福岡市）において開催されました第50回日本ガスタービン学会定期講演会に参加して講演を行った学生に対して、本人からの申請に基づき、交通費の助成を実施した結果についてご報告いたします。

本助成制度は、定期講演会で講演する学生に対して、往復交通費の半額相当を助成することで、ガスタービン関連分野の若手人材の育成や技術の発展を奨励することを目的として設置されたもので、自ら講演する学生であることに加え、日本ガスタービン学会または関連学協会の会員であり、会費の滞納がないことなどが助成の条件になっております。今回の講演会では、9月28日を期限として応募者の募集を行ったところ、7名の応募がありました。表彰委員会内で慎重に審議を行い、「学術講演会発表助成に関する内規」に則り、東京地区からの参加者4名（東京大学2名、早稲田大学1名、法政大学1名）に対しては各1万5千円、宮城地区からの参加者1名（東北大学）に対しては2万円、岩手地区からの参加者1名（岩手大学）に対しては2万5千円、大阪地区からの参加者1名（関西大学）に対しては1万4千円を助成することに決定いたしました。

本助成制度が学生諸君の研究発表を奨励する契機になるとともに、ガスタービンの将来を支える若手人材の育成に寄与することを期待しております。来年度の第51回定期講演会（福井県）でも同様の助成を検討しておりますので、学生諸君の積極的な参加をお待ちしております。

2022年度見学会報告

集会行事委員会

2022年11月11日(金)に本会主催の2022年度ガスタービン学会見学会が北海道千歳市にある防衛装備庁千歳試験場で開催された。新型コロナウイルス感染症拡大防止対策のため、従来より募集人数を減らし16名様にご参加いただいた。

今回の防衛装備庁千歳試験場における見学会は、ガスタービンに関する研究施設に対する知見を深めて頂くことを主目的に、防衛装備庁におけるガスタービンを含めた空力推進技術に関する研究開発活動についても知って頂くことを併せた企画である。

今回は新型コロナウイルス感染症対策として、会場の換気、参加者へのマスク着用をお願い等を行ったうえで本見学会を実施した。

最初に、試験計測棟3階のデータ解析室にて試験場内の研究施設および研究活動を紹介する概要説明があった。同試験場の空力推進研究施設では、航空機及び誘導武器等のエンジン性能・空力性能に関する試験を行っている。

概要説明の後、2グループに分かれて、燃焼風洞装置、三音速風洞装置、エンジン高空性能試験装置の3施設を見学した。

燃焼風洞装置では、本施設が超音速空気吸込式誘導弾用エンジンの各種性能を試験・評価する装置であるとの紹介を受けた後、評価対象となるエンジンを設置するテストチャンバーや前後の吸排気装置を見学した。見学と並行して、装置の能力や稼働の仕組みについて説明を受け、活発な質疑応答が交わされた。

三音速風洞装置では、亜音速、遷音速、超音速の3種類の音速を模擬可能かつ高レイノルズ数が実現可能な風洞装置として紹介を受けた後、同装置を見学することで、装置の規模感について身を以って体感した。

エンジン高空性能試験装置(ATF: Altitude Test Facility)では、施設側制御室にて、エンジン入口空気及び周辺大気圧を調節して高空条件を模擬し、高空におけるエンジン性能を地上にて再現可能な装置であるという説明を受けた。その後、評価対象のエンジンを搭載するテストチャンバーが設置された試験室に移動し、試験装置を実際に見ながら装置の能力やこれまでの試験実績等について質疑応答が交わされた。

今回の見学会において、ガスタービンに関わる施設だけでなく、他の空力推進研究施設全般においても時間の許す限り活発な質疑応答が行われたことを振り返り、参加者の空力推進技術への幅広い関心の高さが窺えた。

最後に、本見学会を実施するにあたり多大なご尽力・ご協力をいただいた防衛装備庁千歳試験場の関係各位、そしてご参加いただいた皆様に、心より御礼を申し上げます。



集合写真

次号予告 日本ガスタービン学会誌2023年3月号 (Vol. 51 No. 2)

特集 日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 (後編)

論説・解説

巻頭言 日本ガスタービン学会創立50周年に寄せて 渡辺 紀徳 (東京大学)

ガスタービン学会半世紀の歩みと将来ビジョン

産官学連携活動の展開 (仮題) 渡辺 紀徳 (東京大学)

学会の公益法人化による再出発とその後 太田 有 (早稲田大学)

国際活動の進展とIGTCの発展 (仮題) 渡辺 紀徳 (東京大学)

男女共同参画の推進 森川 朋子 (三菱重工業)

ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀【組織】

国による航空用ガスタービンに関する取組みと今後の期待

呉村 益生 (経済産業省製造産業局)

ガスタービン・ジェットエンジンとともに歩んだNAL/JAXAの半世紀とこれから

山根 敬 (JAXA)

ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀 (仮題) 壹岐 典彦 (産業技術総合研究所)

物質・材料研究機構におけるガスタービン及びジェットエンジン用材料研究の50年の歩み

原田 広史, 川岸 京子 (物質・材料研究機構)

タービンを支える材料プロセス技術の変遷 村上 秀之 (物質・材料研究機構)

電力中央研究所における発電用ガスタービン研究について

高橋 俊彦, 藤井 智晴, 尾関 高行, 酒井 英司 (電力中央研究所)

ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀【ユーザ】

ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀 (仮題) 清野 幸典 (東北電力)

ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀, 航空エンジン 三ヶ田 一裕 (JALエンジニアリング)

東西南北地水火風 堀川 敦史 (川崎重工業)

※タイトル, 執筆者は変更する可能性があります。

○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
IMEchE (Institution of Mechanical Engineers)	15th International Conference on Turbochargers and Turbocharging	協賛	2023/5/16-17	URL: https://events.imeche.org/ViewEvent?code=CON7527
可視化情報学会	第51回可視化情報シンポジウム	協賛	2023/8/8-10	URL: https://www.vsj.jp/symp2023/



▷ 入 会 者 名 簿 ◁

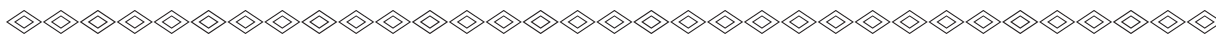
〔正会員〕

片野 佑(小松製作所)

榎原 一平(全日本空輸)

手島 弘貴(三菱重工業)

山田 晋太郎(三菱重工航空エンジン)



◇2023年度会費納入のお願い◇

2023年度会費（2023年3月1日～2024年2月末日）の納入をお願いいたします。会費は、下記の通りとなっておりますので、2023年4月30日までにお納め下さいますようお願い申し上げます。

なお、口座自動振替をご利用の方は、2023年3月23日にご指定の口座よりお引き落としさせていただきます。

<2023年度会費（不課税）>

正会員	8,000円
正会員（65歳以上*）	5,000円
学生会員	2,500円
賛助会員 1口	70,000円

(*2023年3月1日現在)

【納入先】

郵便振替： 00170-9-179578
 銀行振込： みずほ銀行 新宿西口支店
 普通預金口座 1703707
 いずれも口座名は、
 シャ) ニホンガスタービンガッカイ
 ※振込手数料は貴方にてご負担願います。

※会費の納入は、簡単・便利な口座自動振替への切替えをお願いしております。自動振替をご利用されますと、振込手数料は学会負担となります。ご希望の方は巻末の「預金口座振替依頼書」にご記入の上、学会事務局までお送りください。

2022年度役員名簿

会長 福泉 靖史 (三菱重工)
副会長 山本 誠 (東京理科大)
法人管理担当執理事 猪亦 麻子 (東芝エネルギーシステムズ), 飭雅英 (川崎重工), 黒木 英俊 (三菱重工)(兼務), 鈴木 雅人 (産総研), 辻田 星歩 (法政大)
公益目的事業担当執理事 石坂 浩一 (三菱重工), 及部 朋紀 (防衛装備庁), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 黒木 英俊 (三菱重工), 鈴木 雅人 (産総研)(兼務), 高橋 徹 (電中研), 寺本 進 (東大), 山本 悟 (東北大), 渡邊 裕章 (九州大), 渡邊 啓悦 (荏原)
理事 岩井 裕 (京大), 清野 幸典 (東北電力), 仲俣 千由紀 (IHI), 藤原 仁志 (JAXA), 柳内 秀之 (本田)
監事 今成 邦之 (IHI), 二村 尚夫 (JAXA)

2022年度委員名簿 (順不同)

2022年12月16日現在

○は委員長

倫理規定委員会 ○猪亦 麻子 (東芝ESS), 飭雅英 (川崎重工), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 黒木 英俊 (三菱重工), 辻田 星歩 (法政大)
自己点検委員会 ○猪亦 麻子 (東芝ESS), 飭雅英 (川崎重工), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 黒木 英俊 (三菱重工), 辻田 星歩 (法政大)
運営委員会 ○辻田 星歩 (法政大), 猪亦 麻子 (東芝ESS), 飭雅英 (川崎重工), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 黒木 英俊 (三菱重工), 後藤 尚志 (IHI), 酒井 義明 (東芝ESS), 鈴木 雅人 (産総研), 塚原 章友 (三菱重工), 寺本 進 (東大), 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 ○黒木 英俊 (三菱重工), 猪亦 麻子 (東芝ESS), 太田 有 (早大), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 鈴木 雅人 (産総研), 塚原 章友 (三菱重工), 辻田 星歩 (法政大), 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), 伊藤 優 (東大), 岡井 敬一 (JAXA), 岡村 泰博 (IHI), 風見 秀樹 (本田), 岸根 崇 (三菱重工), 渋川 直紀 (東芝ESS), 鈴木 雅人 (産総研), 都留 智子 (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), 山本 誠 (東京理科大), 渡辺 紀徳 (東大)
学術講演委員会 ○岡本 光司 (東大), 糟谷 宏樹 (東芝ESS), 櫻井 毅司 (都立大), 富永 純一 (JEFエンジニアリング), 中山 健太郎 (川崎重工), 范 勇 (産総研), 平川 香林 (IHI), 平野 孝典 (拓殖大), 藤澤 信道 (早大), 古澤 卓 (東北大), 水野 拓哉 (JAXA), 三戸 良介 (三菱重工), 山積 弘信 (本田), 渡邊 裕章 (九大)
集行事務委員会 ○桂田 健 (JALエンジニアリング), 石坂 浩一 (三菱重工), 尾崎 喜彦 (川崎重工), 河上 誠 (日立), 小島 充大 (富士電機), 澤 徹 (東芝ESS), 泰中 一樹 (電中研), 高山 祐輔 (三菱E&Sマシナリー), 仲俣 千由紀 (IHI), 中村 織雄 (本田), 西村 英彦 (三菱重工), 樋口 隆幹 (防衛装備庁), 久枝 孝太郎 (IHI), 吉田 征二 (JAXA)
ガスタービン技術普及委員会 ○高橋 徹 (電中研), 石田 克彦 (川崎重工), 井筒 大輔 (三菱重工), 岡村 直行 (JAXA), 小田 豊 (関西大), 垣内 大紀 (IHI), 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 ○新関 良樹 (徳島文理大), 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), 黒瀬 良一 (京大), 阪井 直人 (川崎重工), 佐藤 哲也 (早大), 渋川 直紀 (東芝ESS), 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), 西内 昌義 (荏原エリオット), 西江 俊介 (三井

E&Sマシナリー), 野原 弘康 (ダイハツディーゼル), 原 浩之 (三菱重工), 平野 篤 (防衛装備庁), 福谷 正幸 (本田), 松崎 裕之 (元東北発電工業), 三ヶ田 一裕 (JALエンジニアリング), 村上 秀之 (NIMS), 森澤 優一 (東芝ESS), 柳内 秀之 (本田), 山下一憲 (荏原), 山本 悟 (東北大), 渡邊 啓悦 (荏原)

論文委員会 ○山本 誠 (東京理科大), 青塚 瑞穂 (IHI), 壹岐 典彦 (産総研), 岩井 裕 (京大), 大北 洋治 (JAXA), 小田 剛生 (川崎重工), 鈴木 雅人 (産総研), 田頭 剛 (JAXA), 寺本 進 (東大), 中谷 辰爾 (東大), 姫野 武洋 (東大), 山田 和豊 (岩手大), 山本 武 (JAXA), 吉岡 洋明 (東北大)

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), 井田 真澄 (ターボシステムズユニテッド), 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), 前田 泰宏 (ヤンマーパワーテクノロジー), 眞鍋 壮 (三菱重工), 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 (長岡技科大), 飭雅英 (川崎重工), 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 (元東北発電工業), 山根 秀公 (防衛装備庁), 輪嶋 善彦 (本田)

広報委員会 ○寺本 進 (東大), 壹岐 典彦 (産総研), 酒井 義明 (東芝ESS), 多田 暁 (JALエンジニアリング), 谷 直樹 (IHI), 藤澤 信道 (早大), 山本 誠 (東京理科大), 吉田 征二 (JAXA)

表彰委員会 ○山本 誠 (東京理科大), 猪亦 麻子 (東芝ESS), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 黒木 英俊 (三菱重工), 山本 悟 (東北大)

将来ビジョン検討委員会 ○高橋 徹 (電中研), 小田 豊 (関西大), 賀澤 順一 (JAXA), 酒井 義明 (東芝ESS), 柴田 貴範 (岩手大), 柴田 良輔 (本田), 寺本 進 (東大), 仲俣 千由紀 (IHI), 半澤 徹 (東北電力), 姫野 武洋 (東大)

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), 川岸 京子 (NIMS), 川澄 郁絵 (本田), 都留 智子 (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 (長岡技科大), 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)

創立50周年記念事業実行委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 太田 有 (早大), 佐藤 哲也 (早大), 鈴木 伸寿 (東芝ESS), 高橋 徹 (電中研), 新関 良樹 (徳島文理大), 姫野 武洋 (東大), 船崎 健一 (岩手大), 松沼 孝幸 (産総研), 山本 誠 (東京理科大)

IGTC2023実行委員会 ○太田 有 (早大), 大石 勉 (IHI), 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), 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), 堀川 敦史 (川崎重工), 武藤 昌也 (名城大), 山本 誠 (東京理科大), 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), 藤木 貴子 (IHI), 藤田 英之 (GE) 前田 大輔 (三菱重工), 森澤 優一 (東芝ESS)

IGTC2023財務委員会 ○大石 勉 (IHI), 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ーです。

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

- タテ（世代）とヨコ（大学、研究機関、産業界）の交流・人脈が広がった。
- 学会誌が充実しており、学会・業界・国外の専門分野の研究動向や技術情報が効率的に得られた。
- ガスタービンに熱い思いを持った人達と、家族的雰囲気や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（2022年3月現在）

会員数：1,782名（正会員 1,755名，学生会員 27名） 賛助会員：105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

新年あけましておめでとうございます。新型コロナウイルスとは長い付き合いとなってしまいましたが、ようやく久方ぶりに縛りの少ない新年を迎えることができました。皆様も少し以前に戻った、良いお正月を過ごされたことと思います。

ガスタービン学会は創立50周年ということで、昨年11月には記念式典も盛会のうちに終えることができましたが、記念事業としてはその他にも様々な企画が進められています。その中で、学会誌としては50周年記念企画をこの1月号と3月号の2巻にまたがってお届けします。また、これに合わせて2022年1月号から1年間表紙に貼付させていただいていた50周年記念ロゴも3月号まで継続して貼付させていただくことになりました。

幸いにして、今回の50周年記念特集では、企画に賛同いただいた皆様から多くの原稿を頂戴することができたため、2号にわたっての特集とさせていただきます。本号でお届けした①寄稿、②ガスタービン・蒸気タービンの半世紀の歩みと今後の展望【技術編】に続き、次号3月号では③ガスタービン学会半世紀の歩みと将来ビジョン、④ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀【組織編】、ガスタービン・蒸気タービンの半世紀の

歩みと今後の展望【ユーザ編】をお届けしますのでご期待ください。

通常、学会誌編集はアソシエイトエディタと呼ばれる各号を担当する代表編集委員と数名の編集委員からなるチームで特集記事を中心とした編集作業を実施していますが、今回の50周年記念特集は、いつもとちょっと異なる形となったため、学会誌編集委員会全員、総がかりでの取り組みとなりました。このため、いつもは各号の担当編集者を紹介させていただいているのですが、今回は割愛させていただきます。本号に学会誌編集委員名簿も掲載されていると思いますので、ご参照いただければと思います。

脱二酸化炭素に舵をきったエネルギー問題は、最近の国際情勢の変化もからんで複雑化し、予断を許さない状況となっていて、ガスタービン・蒸気タービンにとってもまさに転機となる時代かもしれせん。今回の50周年特集記事が故を温めるとともに、将来を考える一助となれば望外の喜びです。

(新聞 良樹)

(表紙写真)

「日本ガスタービン学会誌創刊号（1972年9月号）」

だより

✠事務局 ✠

2年続けて年末の幸先詣で済ませていましたが、今年は元旦に初詣に出かけ、3年ぶりにお正月らしい年明けを迎えました。今年もまた1年、どうぞよろしく願いいたします。

年末に戸棚の中を整理していたら、奥の方から登山用の酸素缶がでてきました。そういえば、万一コロナで自宅療養することになった時に備えて買っていたことを思い出しました。後になって、この程度の酸素では全く役に立たないことを知ったのですが、その頃は品薄になるほどで、誰もが大きな不安を抱えて生活していたことを改めて思い出しました。家族からは、そんなものまで買っていたのかと呆られました。酸素缶はお守りとして、また棚の奥にしまいました。まだ気が抜けない状況とは言え、3年が過ぎてようやく、あの

頃はたいへんだったね、と笑って振り返ることができるようになった気がします。

こうして日常が戻る中、学会でも昨年の秋から対面での行事が再開し、人々の交流の場が徐々に戻ってきました。会場のあちらこちらで楽しそうに会話が弾んでいる様子を見ると、こちらの方まで嬉しくなってきます。そして、参加者の皆さまの感染対策へのご協力に感謝し、無事に1つずつ行事が終わるたびにホッとしています。ただ、3年ぶりの受付業務は、やっぱり色々段取りを忘れていて、バタバタでした(笑)。今年は、より多くの交流の場が戻りますようお願いしております。

(山本由香)

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・研究活動の結果等の報告。
- 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）
 ニッセイエプロ(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. 1 2023.1

発行日 2023年1月27日
 発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会
 編集者 新関 良樹
 発行者 福泉 靖史
 〒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 ニッセイエプロ(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.jaaccc.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。