巻 頭 言

特集：ガスタービン計測技術とデータ活用の最新動向

ガスタービン計測技術とデータ活用の最新動向

Latest Trends in Gas Turbine Measurement Technologies and Data Utilization

大野 貞彦*1
OHNO Sadahiro

昨今，世界的な脱炭素に向けた流れが加速する中で，国内のエネルギー情勢も大きな岐路を迎え，2050年のカーボンニュートラルに向けた2030年にCO_2削減46％を意図した動きの加速や，再生可能エネルギーの一層の主力電源化を意図したエネルギー基本計画の議論が進む等，エネルギーの生産から消費形態に至るまでこれまでに無い抜本的な変革の時期を迎えている。

こうしたエネルギーの生産使用の多様化が進む中では，エネルギーの需給バランスをより高度に調整するマネジメントが求められるが，火力発電，特にGTを用いたプラントの位置づけは短期的には勿論のこと，中長期的にもその調整能力の高さから益々重要になっていくと予想している。

私はこれまでの会社人生の中で，多くの時間を弊社火力発電部門中心に経験してきたが，その中でも国内初の大型GTCCプラントである東新潟火力発電所３号系列を皮切りに，同４号系列，仙台火力４号機，新仙台火力発電所３号系列，そして現在建設中の上越火力１号機等，新設GTCCプラントの建設に，基本設計から現地工事管理に渡るまで四半世紀に渡り深く携わってきた。改めてその歴史を振り返ると，東新潟火力３号系列が営業運転を開始した1984年当時は，大型GTCCの黎明期にあり，様々な面で試行錯誤を繰り返しながら信頼性を確保する日々であった。また，その後の東新潟火力４号系列をはじめ，建設に携わったGTCCプラントの多くが，くしくも当時の世界最高水準の熱効率を達成したプラントであり，最先端の新技術の導入や，熱効率向上に向けた新システムの採用等，数多くの技術アセスメントを行う必要があったため，日々切磋琢磨の中で技術検証を進めた思いが深い。こうした技術アセスメントの機会には，機器の設計段階から関係者が一丸となって十二分な技術検証を行うとともに，常に要素試験や単体試運転，総合試運転の各段階において，常設監視計器の他に特殊計測等も組み合わせながら，そのパフォーマンスの評価を重ねてきた。こうした一連の経験の中で一貫して感じたのは，自分自身の専門分野が電気・制御分野であることもあり，計測技術の信頼性の確保と計測機器が示すデータの重要性である。信頼性の高い計測が安定したデータを供給出来れば，様々な可能性に安心してチャレンジする素地が整い，関係者の士気も高く充実した検証に直結する。至近ではパーツレベルからプラント設計に至るまで設計の高度化が進み，製品製作精度の向上や，さらにはCFDを中心とした解析技術の向上等，ここ四半世紀における技術の進展は著しいが，同時に設備の効率向上要求としての高温化・高圧力比化や，プラント運用条件としての要求事項の多様化もあり，その評価の基本となる計測技術の信頼性確保への技術的要求は高まるばかりである。

繰り返しにはなるが,「計測されたデータ」=「パフォーマンスの見える化」であり，GTの使用環境の厳しさや計測機器配置の自由度の関係から，直接計測が出来ない項目も数多く，外挿による想定値であるものも多い。こうした状況下においても，今後より運用形態が複雑化・多様化する機器の運用を安定的に下支えしていくためには，計測技術のさらなる向上と，その向上がもたらす計測データの「より真の状態を把握させるもの」としての位置付けは重要な意味を持つと感じてやまない。

今回の特集では，様々な測定困難な状況下における最先端の計測技術を多方面からご紹介頂くとともに，定量化の難しい燃焼状態の可視化技術から，計測技術の高度化がもたらす発電プラント安定運用への適用技術，さらには製品品質向上に向けた応用等，興味ある技術を広範にご紹介頂いた。ご執筆頂いた方々に改めて敬意を表したい。何れの論文も会員諸氏の研究や日常の業務において，直接的・間接的に貴重な視座を与えるものと確信している。私個人としても，計測技術の今後の進展に一技術者として引き続き注視していく所存である。

原稿受付　2021年８月３日
＊1　東北電力㈱　常務執行役員
〒980-0014　仙台市青葉区本町１丁目７番１号

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

特集：ガスタービン計測技術とデータ活用の最新動向

多孔プローブの動向とデータ処理への機械学習の適用

Trend of Multi-Hole Probe and Applying Machine Learning to Data Processing of Multi-Hole Probe

山口 博史[*1]　小杉 岳彦[*2]
YAMAGUCHI Hirofumi　KOSUGI Takehiko

キーワード：ガスタービン，ジェットエンジン，計測技術，圧力，AI，機械学習
Key Words：Gas Turbine, Jet Engine, Measurement, Pressure, AI, Machine Learning

1．はじめに

近年，AI，ディープラーニング，機械学習などの言葉を耳にしない日は無いほど我々の生活に人工知能と呼ばれる技術が溶け込んできている。実際インターネット上の質問はAIチャットが答え，最新の自動車では部分的に自動運転が行われ，AIスピーカーに話しかけるだけで様々な質問に答えてくれる世の中がやってきている。AIにはこれらの例のような，人間が行っていたことを代わりに行ってくれる技術だけでなく，AIならではの技術も多く存在する。特に大量のデータ処理，ルールに沿った作業，共通点を見つける作業などは人間が行うよりも早く正確にAIの方が行うことができるとされている。

一方，航空エンジンの開発では，多数の作動ガスの温度や圧力の空力計測が行われている。その中でも多孔プローブによる計測については，その信頼性とコストの低さから現在でも流れの分布を計測するのに多く用いられている。これらのデータ処理には，長く使われてきた歴史的背景と信頼性の高さから，カーブフィッティング等の方法が用いられ続けている。

本稿ではまずこの多孔プローブの種類と，昨今の傾向について簡単に紹介し，次に多孔プローブを使用するにあたって必須な既知の流れによる校正とその結果をどのように用いて流れの分布を把握するかを紹介したい。最後に新しい手法として機械学習を用いて校正結果を学習させた場合にこれまでの方法に比べてどのようなメリットやデメリットがあるかを紹介したい。

原稿受付　2021年７月８日
＊１　㈱IHI　航空・宇宙・防衛事業領域
技術開発センター　要素技術部
試験評価技術グループ
＊２　㈱IHI　航空・宇宙・防衛事業領域
技術開発センター　要素技術部
空力技術グループ

2．多孔プローブ

2.1　多孔プローブの種類

多孔プローブとは計測したい流れ角に感度を持つ計測孔を複数持つプローブの総称で，メジャーなもので３孔ヨーメータ，５孔ヨーメータなどがある。その他にも12孔の物[(1)]，４孔の物[(2)]，１孔の物[(3)]などもある。総じて孔数が増えればプローブヘッドの大きさは大きくなるが，角度を算出するための入力が増えるため使用可能角度範囲が広がり，精度は向上する。逆に孔数が減ればプローブヘッドの大きさを小さく出来るが角度算出のための入力が減るため精度が低くなるか，あるいは精度向上のため多点計測が必要となりトラバース計測するため時間がかかる（１孔プローブなどはプローブを回転させて疑似的に３孔プローブとして使用する）。

2.2　多孔プローブの昨今の傾向

多孔プローブの昨今の傾向としてはAdditive Manufacturing技術を用いて，これまで作ることのできなかった形状や大きさのプローブを製作する[(4),(5)]事例が増えてきた。また，非定常圧力トランスデューサを計測点近くに置くことで非定常データを取得するもの[(6),(7)]や，遷音速領域に特化したプローブ[(4)]などがみられる。IHIでもこのAdditive Manufacturing技術を用いて遷音速領域での計測を可能とすべく，多孔プローブの設計を行っている。本来製作したい物とスケールは異なるが，3Dプリンタを用いて樹脂製のプローブの試作も実際に行っている。(Fig. 1)。この試作プローブにおいては校正風洞における遷音速領域での応答も確認しており，試験に使用できるだけの精度があることが確認できている。本形状に金属Additive Manufacturing技術を用いることで，直径ϕ3.3㎜内に５点の圧力計測プラス熱電対による計測を実装することができる見込みが立っている。

2.3　校正結果の処理手法

多孔プローブのデータはそのままでは只の圧力データにしかならない。そこで，多孔プローブで取得したそれ

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

Fig. 1 Additive manufacturing multi hole probe with temperature measurement

ぞれの圧力値を流れのヨー角，ピッチ角，マッハ数に変換する必要がある。その処理方法として，よく使われるものに多項式によるカーブフィット手法とLook Up Table手法がある。

カーブフィット手法は様々な無次元化した係数を全校正範囲にて一つの式として表し，それぞれの係数からヨー角，ピッチ角，マッハ数を算出する方法の総称である。この無次元化する係数を工夫することで，ロバストかつ十分感度のあるカーブが得られるよう様々な工夫がされている。

もう一つのLook Up Table手法は二つのステップに分かれる。まずはそれぞれの計測孔のデータから，計測対象の流れ状態近傍の校正点を選択する。次に，それらの校正点データ間を直線，もしくは多項式を用いて補間し，現在の流れを算出する方法である。

その他にもSurface Fitting[8]等様々な手法が世間では検討されている。このカーブフィット，Look Up Table，Surface Fittingについてそれぞれの利点と欠点を簡単に紹介する。

最初に，多項式によるカーブフィット手法においては，基本的に校正範囲全てを一つの式で表すことができる点が一番の利点である。欠点はプローブの形状，ヨー角，ピッチ角の範囲等によっては多項式を高次化しないと十分満足いくフィッティングを得られない，もしくは最後まで満足いくフィッティングが得られないことがあげられる。

Look Up Table手法においては，補間データ範囲を絞ることで精度が向上することが利点として挙げられるが，多孔プローブの形状が対称でないと精度が落ちること，範囲を決めて毎回補間をしなければならないこと，たった一点の悪い校正点によって大きく精度が落ちることなどが欠点としてある。

Surface Fittingはカーブフィット手法をさらに3次元的に計算する手法で，精度が十分に高いことが利点としてあるが，計算が複雑でそれぞれの計測点において流れの情報を算出するのに時間がかかってしまうことが欠点として挙げられる。

3．機械学習の多孔プローブデータ処理への適用

3.1 機械学習とは

昨今流行りの機械学習だが，AIと混同されている節もあるため，一般的なAIと機械学習の違いを簡単に説明する。

最初に，AIとはArtificial Intelligenceの略称で，人工知能と訳されることが多い。要するに人工的に作られた知能を持つものであれば何でもAIになってしまう。

次に，機械学習とはMachine Learningと呼ばれ，AIを構成する技術の一つである。簡単に言ってしまうとプログラムをAI化するために沢山のデータを学習させる手法の事である。例えば顔認証や，自動運転，画像認識などが例として挙げられる。

また，機械学習には教師あり機械学習と教師無し機械学習とが存在する。教師無し機械学習は規則性をAI自ら見つけ出す手法で，例えるならインターネットショッピングのおすすめ商品表示機能である。また，教師あり機械学習とはデータと答えをセットで学習させることで，データを与えるだけで正確な答えを導き出す手法になる。今回ヨーメータのデータ処理に機械学習を用いたが，この教師あり機械学習にあたる。

3.2 機械学習のヨーメータへの適用

昨今のAIブームもあり，航空エンジンの計測技術へのAIの適用を検討していたところ，機械学習による多孔プローブのデータ処理について検討の余地があると感じた。

先述した通りAI（機械学習）はルールに沿ったデータの処理，共通点を見つける作業が得意であるという特徴がある。そこでPythonによるプログラミングを実施し，5孔プローブのデータ処理がAI（機械学習）により行えないか試してみた。なお，今回は大まかな流れだけを紹介し，細かいプログラム内容については紹介を省略する。

最初に5孔プローブの圧力孔の定義及びピッチ角，ヨー角の定義をFig. 2に示す。

最初に従来の方法としてカーブフィットによる精度検証結果をFig. 3に示す。この時の校正範囲はマッハ数0.2～0.65，ピッチ角－40°～+10°，ヨー角±25°とした。このときにカーブフィット手法では4次式による近似を行っている。

次に，機械学習による精度検証を行うべくPythonによるプログラムを作成した。この時のフローチャートをFig. 4（学習モデル作成フェーズ），Fig. 5（計算フェー

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

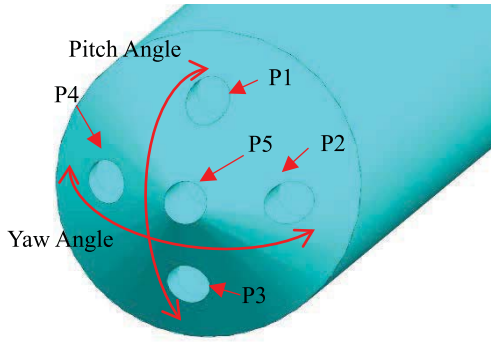


Fig. 2　5hole probe layout

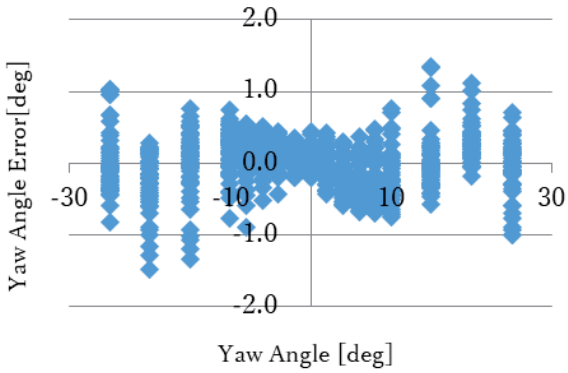


Fig. 3　Yaw angle error from curve fit method

ズ）に示す。

この時，精度向上，利便性向上等様々な目的のために以下の工夫を施している。なお，本稿の機械学習による精度確認において，学習データと検証データは全て異なるデータを使用している。

・予測AI（学習モデル）の作成フェーズと計算フェーズとを分割。こうすることで，予測AI（学習モデル）の作成フェーズにかかる時間を一回だけにし，その学習モデルを用いて実際のトラバース試験等のデータを計算することができるようになった。なお，この予測AIの作成フェーズにかかる時間は学習回数にもよるが長ければ4時間ほどかかるが，計算フェーズは数百点のデータを1分もかからずに処理することが可能となる。

・予測AIの作成フェーズで精度検証を行い，精度が十分でない場合予測AIのチューニングを自動的に行い，十分な精度が得られるように調整を行う。このチューニングを自動的に行う最適化アルゴリズムを用いない場合，個別にチューニングを行う必要があり，同レベルの精度を得るには桁違いに時間がかかる。

・全圧・静圧を直接予測させるのではなく，全圧および静圧を算出するための無次元化した係数を予測させることでマッハ数による影響を極力なくし，精度を向上させた。

・過学習と呼ばれるある偏った条件を学習しすぎたため，汎化能力が低い状態を防止するための仕組みを組み入れた。

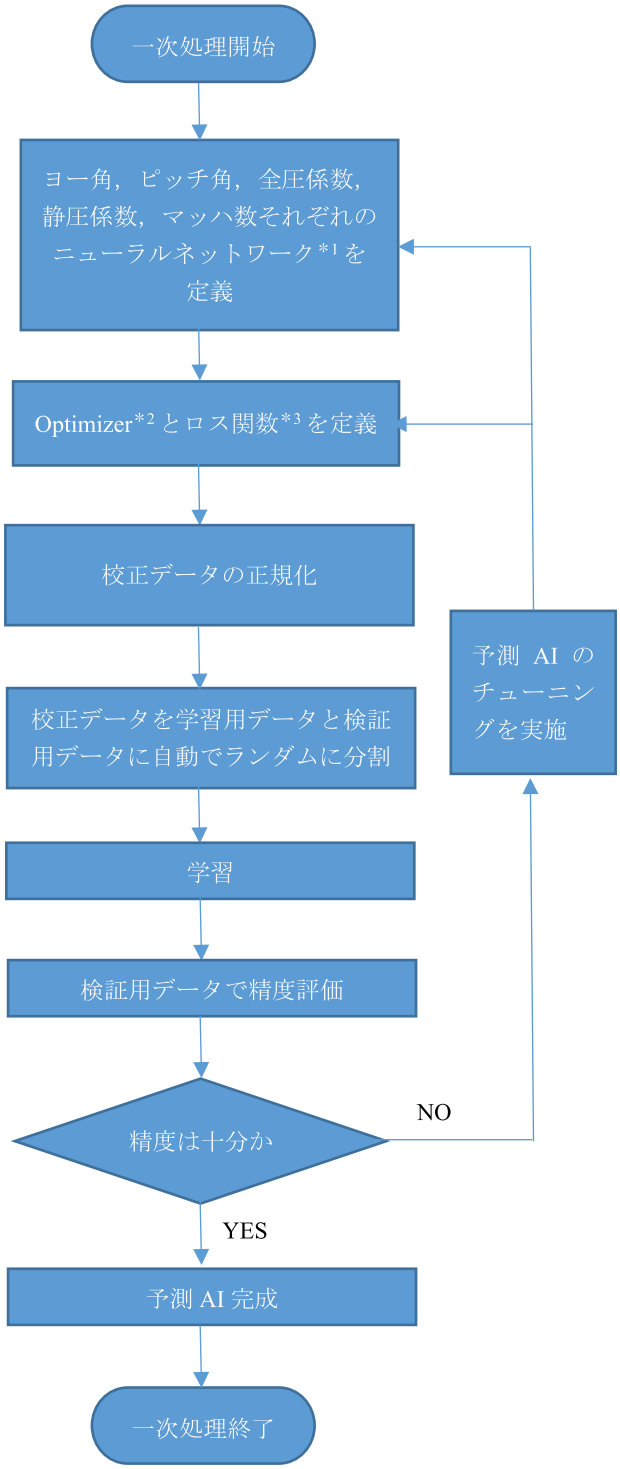


Fig. 4　Program flow chart（Learning phase）

＊1：ニューラルネットワークとは脳の神経回路の一部を模した数理モデルの事であり，機械学習では入力層，中間層，出力層から構成され，階層の深さ，階層内のノードの数などにより学習結果が変わってくる。

＊2：Optimizerとはモデル最適化手法のこと。様々な手法から合った物を選ぶ必要がある。

＊3：ロス関数とは目標と実際の出力の誤差を表すもので，この値が小さくなるようにOptimizerが予測AI（学習モデル）のパラメータを調整する。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

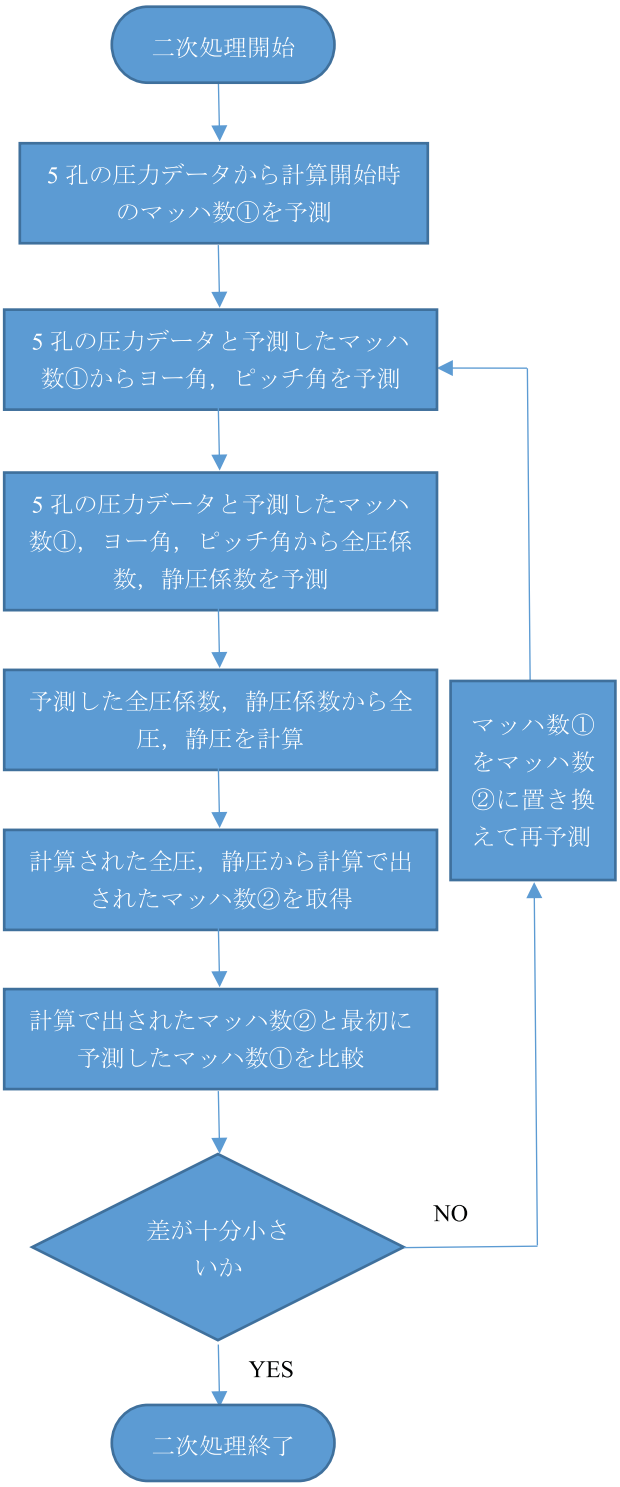


Fig. 5　Program flow chart（Validation phase）

このプログラムで検証したヨー角誤差をFig. 6に示す。これらFig. 3とFig. 6を比較してわかる通り，本プログラムによりカーブフィット手法よりも精度が向上したことが分かる。

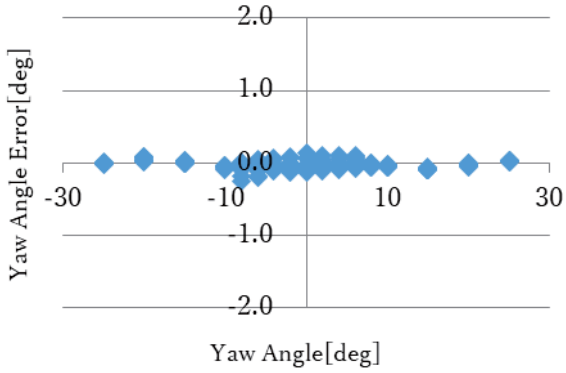


Fig. 6　Yaw angle error from machine learning method

3.4　4 孔プローブの検討

次に本プログラムを用いて，参考文献(8)にあるように，何らかの原因で圧力孔が詰まったり，使えなくなったりした場合にどれだけの精度が出せるかについて検討した。参考文献(8)ではSurface Fittingを用いてデータの処理を行っており，P 1 もしくはP 3 が使えなくなった場合にどれぐらいの精度が出せるかを検討している。本文献の場合，ヨー角±12°，ピッチ角±10°，マッハ数0.17一定の条件下でP 1 が使えなくなったとして，ピッチ角に最大1.4°ほどの誤差が出ている。

そこで，5 孔プローブのP 1 のデータを使わずに機械学習により学習させ，精度検証を行った結果十分な精度が得られることが判明した。その結果の一部をFig. 7に示す。

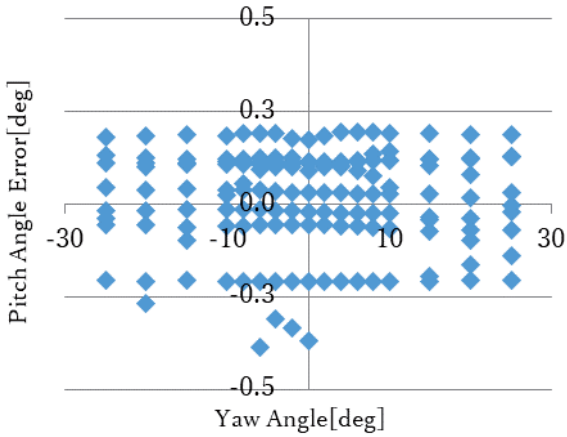


Fig. 7　Yaw angle error from machine learning，without P1 data

実際には精度の悪い点も出ているが，概ね使用に耐え得る精度に収まっているため，学習データのさらなる取得や，プログラムの修正により，4 孔の入力があれば十分な精度を得られることが分かった。

そこで，IHIでは壁側近傍も含んだピッチ角のある流れ場でデータを取得する目的のため 4 孔プローブ（Fig. 8）を製作し，そのプローブの校正を行った。条件はヨー角±20°，ピッチ角－30°～+20°マッハ数0.2～0.8で校正を行い，機械学習を用いて処理を行ったところピッチ角誤差はFig. 9のような結果となった。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

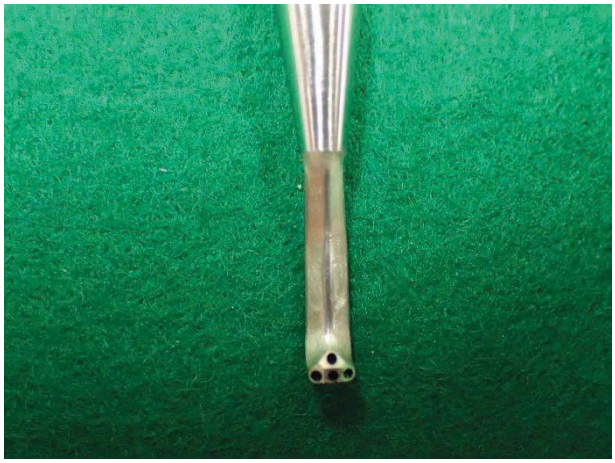


Fig. 8　4hole probe

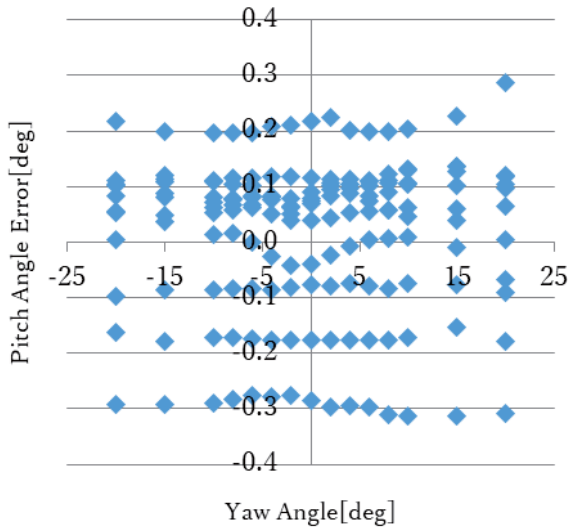


Fig. 9　Pitch angle error of 4hole probe

これによるとピッチ角を得るための入力が５孔プローブよりも１点少ないにも関わらずヨー角，ピッチ角の誤差が±0.4°以下に抑えられている事が分かる。このことにより，４孔ヨーメータでも十分な精度での計測が可能であることが分かった。

なお，Fig. 9で示したデータを算出したプログラムをファン静翼後流でのトラバース試験で得られたデータに用いたところ，若干過学習気味の領域を見ることができた。このことから学習方法に関してさらなる改良が必要であると考える。

3.4　機械学習のメリット，デメリット

機械学習のメリットについては前述したように精度がこれまでに比べて向上することが挙げられる。また，データ処理速度も十分早く，数百点のデータ処理を１分以内で完了させることができる。ただし，この場合学習フェーズとデータ処理フェーズをプログラム内で分ける必要がある。学習については十分な精度を得るため，必要な学習回数を最初に検討することが必要である。今回のプログラムでは学習回数が少なすぎる場合は十分な精度を得られないことがあり，学習回数が多すぎる場合は過学習状態になり，校正した点にすべての結果が寄ってしまう現象もみられた。これがまさに機械学習のデメリットとしてあげられる。これまでカーブフィット等では気にしたことのなかった問題の一つである。なお，本プラグラムでは，過学習対策の一つとしてOptimizerの学習率と重み減衰係数を最適化（チューニング）し，過学習を防止している。ただし，こういった対策を打つまでは，この過学習によって本来得たい答えが得られないことが多々あった。ここで，５孔ヨーメータのデータはピッチ角とヨー角の組み合わせのデータなため学習範囲が広く，過学習対策を十分打つことで影響を小さくする事が出来ると分かった。それでもなおマッハ数及びヨー角，ピッチ角に関して校正する際に出来るだけ偏りのないデータを取得しておくことで精度向上が見込める。また，３孔ヨーメータの校正の場合ピッチ角が入力として存在せず，ヨー角のみが答えとして存在するため，校正した条件でのヨー角に答えが近づきやすい事が分かった。これについては現在プログラムによる過学習の対策などをさらに施すことを試みているが，あまりうまくいく方法が見つかっていないのが現状である。こちらに関しても校正時のデータの取得方法も含めてさらなる改良が必要であると考える。

また，AIで行っていることが人間には直感的に理解できない部分があるため，実は間違った学習をしていてもそれを人間が判定することができない可能性がある。そういったことを防ぐために，校正時に検証用のデータを十分に取得するなどの対策が必要だと考える。

４．まとめ

多孔プローブのトラバース計測というと昔からあるトラディショナルな計測方法であり，あまり改良の余地が無いと思われていたが，昨今の3Dプリンタ技術や，コンピュータ性能の向上により様々な改良が加えられてきた。そこに機械学習を用いることで一層の改良を加えることができた。今回得られた知見を元にさらなる精度向上はもちろんだが，計測範囲の拡大，プローブの縮小化等様々な改良を加えることができると考えられる。また，3Dプリンタ技術と機械学習を融合することでこれまでとは全く異なる形状のプローブも生み出すことが可能と考える。入力と出力さえ与えれば機械学習で答えが出るのだから。今後もAI技術は凄まじいスピードで発展してくと思われるが，トラディショナルなものと組み合わせることで新たな価値を生み出していけるよう最新情報の収集を怠らないようにしたい。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

参考文献

(1) Omniprobe.
＜http://www.aeroprobe.com/＞

(2) Ravirai, Jangir., Nekkanti, Sitaram., Ct, Gajanan., A Miniture Four-Hole Probe for Measurement of Three-Dimensional Flow With Large Gradients, International Journal of Rotating Machinery (2014).

(3) Martin, Johansson., Valery, Chemoray., Linda, Strom., Jonas, Larsson., Hans, Abrahamsson., Experimental and Numerical Investigation of an Aerodynamically Loaded Guide Vane in a Turbine Duct, GT2011-46221.

(4) Alexander, Krumme., Clemens, Buske., Johannes, R, Bachner., Jerrit, Dahnert., Marc, Tegeler., Federica, Ferraro., Simon, Govert., Frank, Kocian., Francesca, di, Mare., Andreas, Pahs., Investigation of Combustor-Turbine-Interaction in a Rotating Cooled Transonic High-Pressure Turbine Test Rig: Part1-Experimental Results, GT2019-90733.

(5) Florian, M, Heckmeier., Daniel, Iglesias., Sascha, Kienitz., Christian, Breitsamter., An Innovatiive Development of a Five-Hole Pressure Probe for Highly Unsteady Flow Phenomena, GT2019-90079.

(6) Fast Response Probe.
＜http://www.aeroprobe.com/＞

(7) FAP-250, FAP-HT-250.
＜https://kulite.com/＞

(8) Tlga, Yasa., Guillermo, Paniagua., Robust Procedure for Multi-Hole Probe Data Processing, Flow Measurement and Instumentation 26:46-54.

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

特集：ガスタービン計測技術とデータ活用の最新動向

遠心圧縮機内の非定常流動現象の計測

Measurement of Unsteady Flow Phenomena in Centrifugal Compressor

大内田 聡*1　OUCHIDA Satoshi
栗田 史哉*1　KURITA Fumiya
玉木 秀明*1　TAMAKI Hideaki

キーワード：遠心圧縮機，計測，旋回失速，サージ，チップクリアランス
Key Words：Centrifugal Compressor, Measurement, Rotating Stall, Surge, Tip Clearance

1．緒言

ターボ機械の空力設計では，内部流れのパターンや損失の発生具合，圧力比や効率などをCFDで評価し，望ましい状態となるまで，その形状に修正を重ねていく。CFDは実験では把握できない流れに関する様々な情報を提供してくれる。しかし，CFDによる流れ場の予測精度は，設計点から離れるにつれて低下する。このため，極端な非設計点ではより高度で大規模な計算が必要となる。圧縮機を例にとれば，回転数一定のもとで流量を減らす，もしくは，流量を一定に保ち圧力を増すと旋回失速やサージなどの不安定現象が起こる。これらの不安定現象の発生によって決められる安定運転限界流量の低減は圧縮機設計における重要な課題となっている。このような作動点に対してCFDを適用するには高い計算コストが必要となる。また，ターンアラウンドタイムが大きくなるために，現状では設計プロセスの中で使うことは難しい。そのため，設計の現場で使用可能なレベルのCFDと実験・計測を併用した流れ場の分析と理解が重要となる。

本稿では，遠心圧縮機の羽根無しディフューザに発生する旋回失速，流量の低下と遠心圧縮機吸込み配管内の流れのパターンの関係，サージ時のインペラとケーシング間のクリアランス（チップクリアランス）変化に関連した計測事例を紹介する。

2．羽根無しディフューザでの旋回失速

Fig. 1に供試圧縮機を示す。インペラ径は130.8mmである。コレクタ部にはPIV用の計測窓と高応答圧力センサ，ギャップセンサが取付けられている。

原稿受付　2021年6月18日
＊1　㈱IHI 技術開発本部
〒235-8501　横浜市磯子区新中原町1番地
E-mail: tamaki5546@ihi-g.com

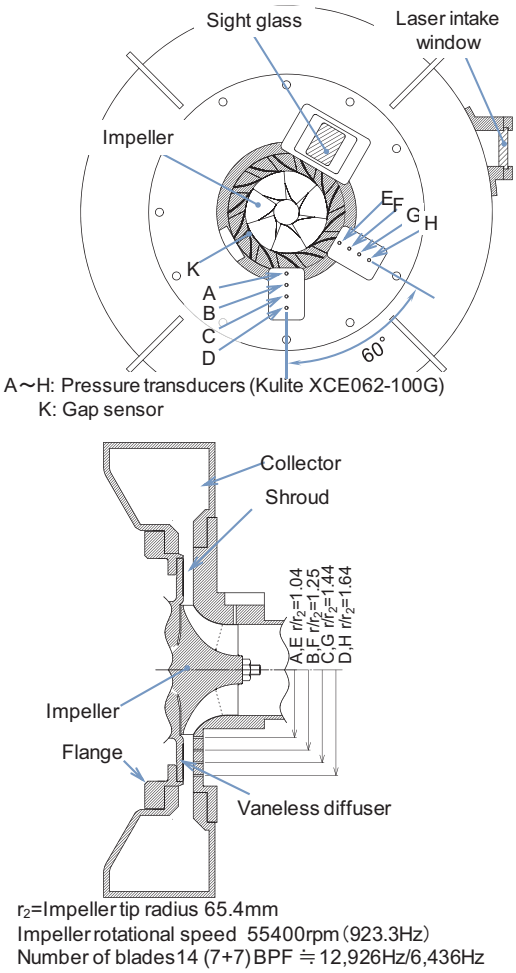
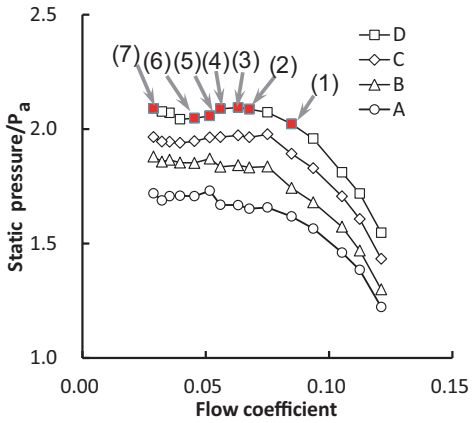


Fig. 1 Schematic of tested compressor with sensors[1]

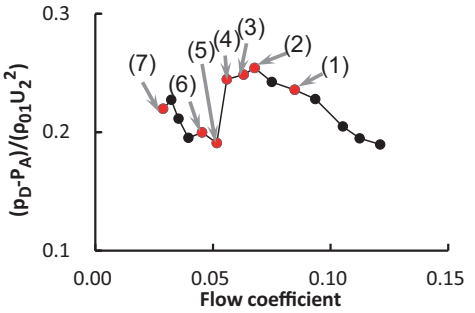
Fig. 2にFig. 1のA ～ Dにおける流量と静圧の関係および羽根無しディフューザの圧力回復量を示す。

圧力変動の周波数と周方向に異なる位置に設置された2つのセンサ間を失速セルが通過する時間を用いて失速セル数を算出できる。Fig. 3にFig. 2中の(1)～(7)の流量

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.



(a) Static pressure



(b) Pressure recovery

Fig. 2 Static pressure and pressure recovery in vaneless diffuser (P_a=ambient pressure, P_A and P_D are static pressures at A and D shown in figure 1, U_2 and ρ_{01} are impeller tip velocity and stagnation density at compressor inlet)[1]

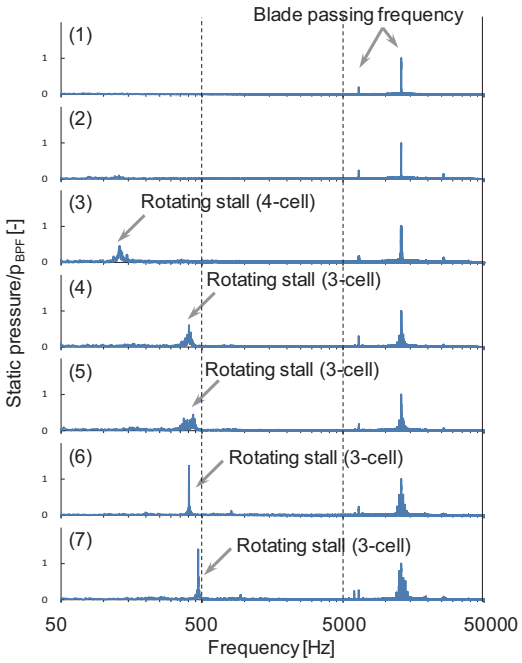


Fig. 3 Frequency of unsteady pressure and number of stall cells at different operating points[1]

におけるFFTの結果と失速セル数を示す。また，Fig. 4に周方向に60度離れたAとEにおける静圧の時間変化を，Fig. 5に同じ周方向位置で異なる半径位置にあるA～Dでの圧力の時間変化を示す。T_{imp}はインペラが1回転するのに要する時間である。Fig. 4，Fig. 5から半径方向に広がる流れ場の塊が一定の速度で周方向に伝播していることが確認できる。

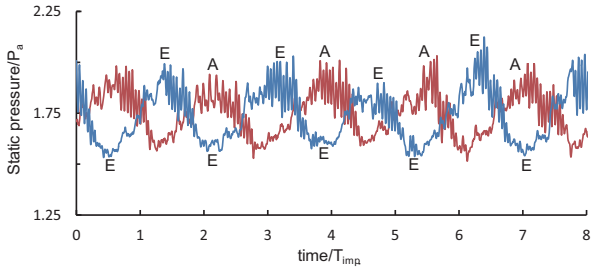


Fig. 4 Pressure signal of A and E at (6) in Fig. 2[2]

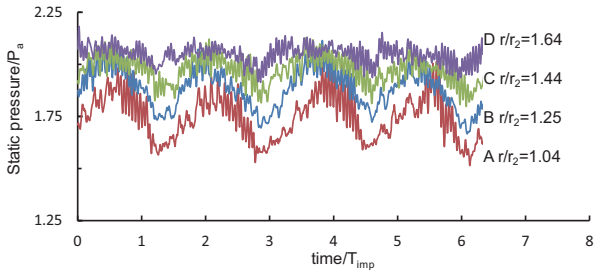


Fig. 5 Time variation of static pressure at different radius positions at (6) in Fig. 2[2]

Fig. 6にPIV計測で使用したフェーズロック・システムを示す。空間的な計測領域は観測窓のサイズの制約を受ける。本供試体では周方向に約10度となっている。ここでは，以下の3つのフェーズロック・システムを使い，旋回失速発生時（Fig. 2の作動点(6)）の流れ場を導いた。

(1) 旋回失速時の圧力信号を使う。旋回失速をある空間構造を持った流体塊の一定角速度での周方向への伝播と見なすと，フェーズロック・システムを使い周方向360度分の失速セルの構造を導き出すことができる。PIV計測を圧力信号のある位相に同期させて行う（Fig. 6中のA）。次に圧力信号の位相を10度ずらし，その位相に同期させてPIV計測を行う。これによって，周方向に10度ずれた空間でのスナップショットを得ることができる。計測のタイミングを10度ずつずらすことで360度分のスナップショットを得ることができる。

(2) インペラ翼位置を用いる。インペラ翼がケーシングに設置されたギャップセンサ通過すると，矩形状のパルス波が出力されるシステムを用いる（Fig. 6中のB）。このパルス波を基準として，インペラが周方向に10度移動するたびにPIV計測を行うと(1)と同様に360分のスナップショットを得ることができる。このスナップショットは，インペラがある特定の位置にある時のインペラの回転に同期した（インペラから見た流れ場が定常であると仮定して導いた）流れとなる。

(3) 旋回失速時の圧力信号とインペラ翼位置を用いる。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

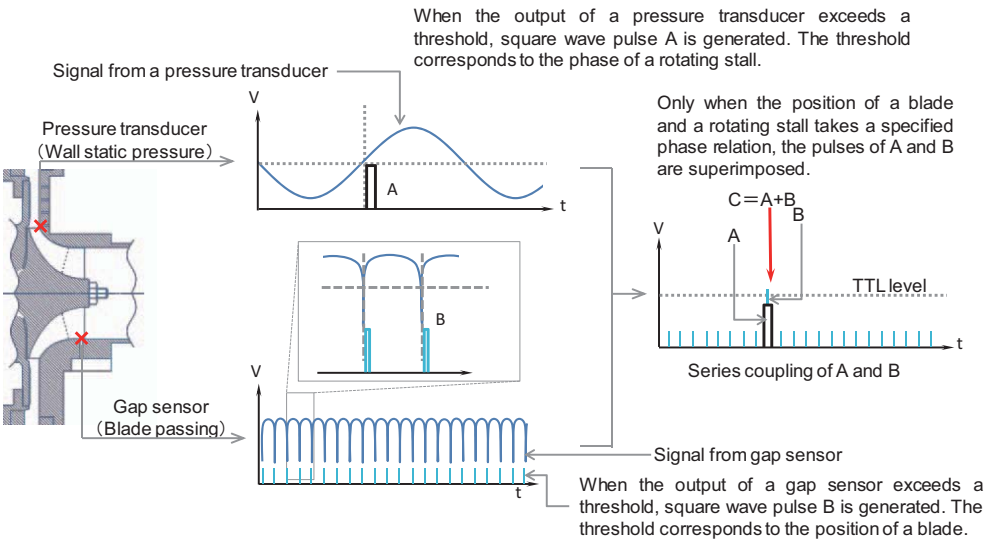


Fig. 6 System to lock phase relation between blade and rotating stall[1]

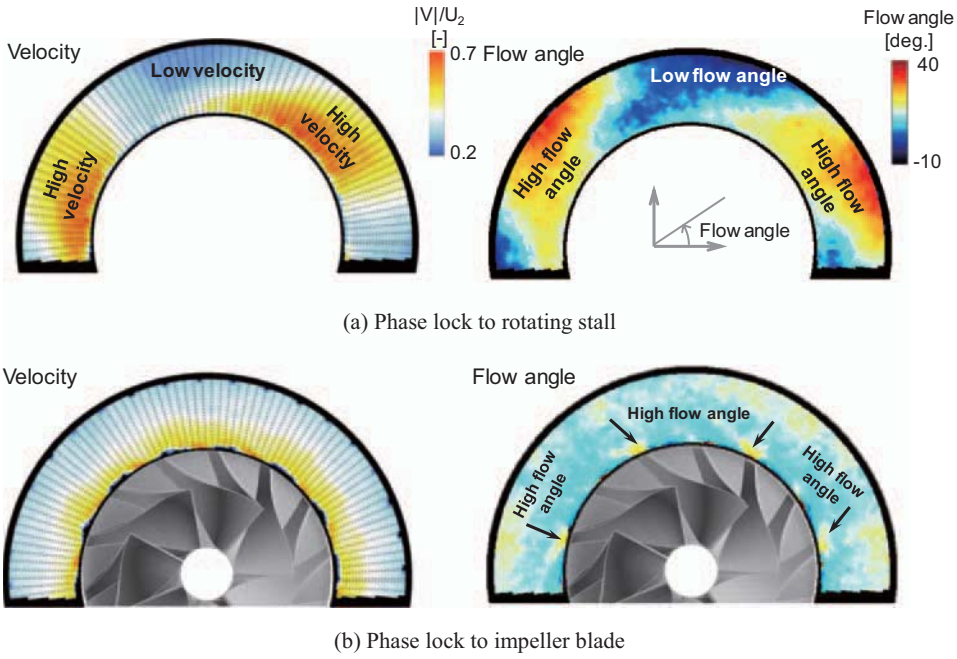


Fig. 7 Velocity and flow angle distribution at 50% span at (6)

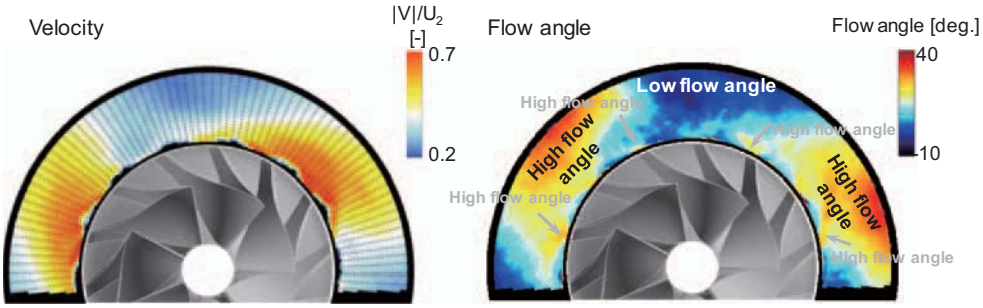


Fig. 8 Velocity and flow angle distribution at 50% span at (6) with phase lock to rotating stall and impeller blade

圧力信号とギャップセンサからの出力を重ね合わせFig. 6中の信号Cを作り出す。信号Cが閾値を超えるごとにPIV計測のタイミングを圧力信号の位相10度分ずつずらしていく。これによって，インペラの回転と失速セルに同期した流れ場が得られる。

Fig. 7 (a)に旋回失速時の圧力信号を使い導いた速度と流れ角分布を示す。U_2はインペラ周速，Vは流速を示す。流れ角は周方向を基準に計測した値である。小さな

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

流れ角で低速度の失速域と，その上流側（図の左側）で大きな流れ角で高速度の領域，下流側（図の右側）で小さな流れ角の領域が観測される。Fig. 7 (b)は，ギャップセンサの信号をもとに導いた速度と流れ角の分布である。ジェット（高流出角の領域）の存在が見て取れる。

Fig. 8に圧力信号とギャップセンサの信号を使い計測した流れ場を示す。失速セル（旋回失速に同期した流れ）とジェット（回転に同期した流れ）が共存する流れ場となっている。

Fig. 9に各スパンでの計測結果から導出した流れ角が0度の等値面を示す。この面は逆流と順流の境界に相当し，失速セルの境界面とも考えられる。図から失速セルは羽根無しディフューザ出口近傍でハブからシュラウドまで発達し，ハブ面に沿ってインペラ出口まで延びる剥離を誘発していることが分かる。

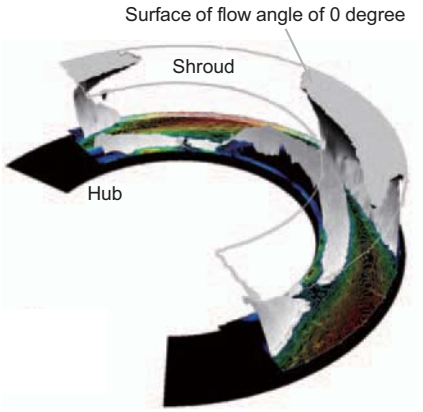


Fig. 9　Zero degree-flow angle surface [1]

3．サージ時の遠心圧縮機吸込み配管内の流れ

外径51mmのインペラを有する過給機用遠心圧縮機を供試圧縮機として流量の減少に伴う圧縮機入口流れの変化を高応答圧力センサとPIVを用いて計測した。

Fig. 10に試験装置の写真を，Fig. 11に圧縮機の特性曲線と計測点を示す。アクリル製吸込み配管を用いたため耐熱性の観点からインペラの周速マッハ数を0.58として実験を行った。Fig. 12 (a)に高応答圧力センサの設置位置をFig. 12 (b)にPIVによる計測断面および計測範囲を示す。

Fig. 13に管軸中央断面で計測された速度分布を示す。Fig. 11のA，Bでは吸い込み配管は上流から下流に向かう流体で満たされているが，C，Dでは壁面近傍に逆流域が見られる。逆流域は配管内で閉じており，配管に流入してくる流れと混合し，再びインペラに流入する循環流れが生じている。Fig. 14は円管断面内の速度分布である。CおよびDではインペラから逆流に起因する旋回流が管壁近傍に発生する。インペラに再流入する流れの一部にインペラの回転と同じ方向の旋回流が誘起される。

Fig. 15にサージ状態でのPIV計測の結果を示す。Tはサージの周期を示す。本試験ではT=0.2 ～ 0.24秒で

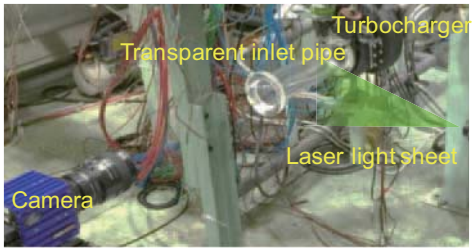


Fig. 10　Picture of test facility

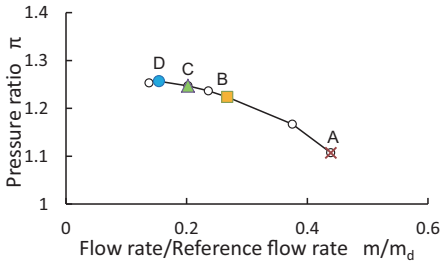
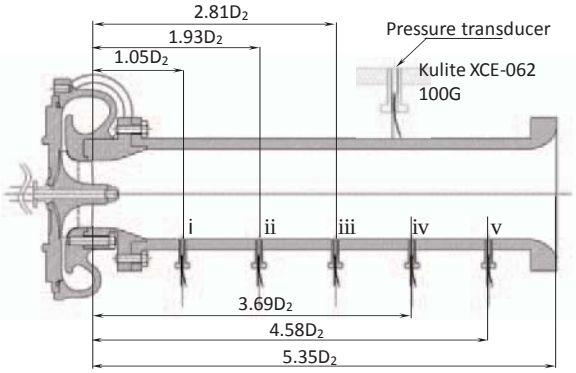
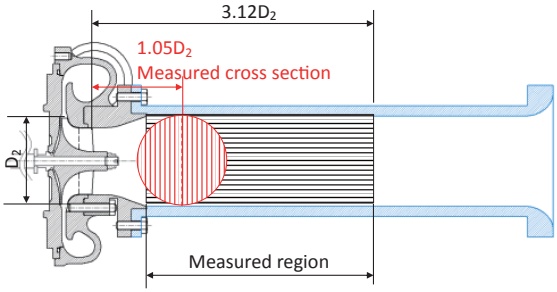


Fig. 11　Tested compressor characteristics [3]



(a) Position of pressure transducer



(b) Measured plane with PIV[3]

Fig. 12　Location of measurement

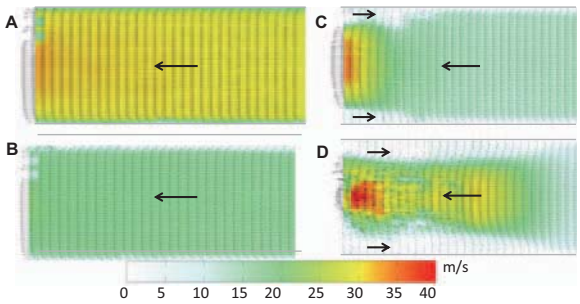


Fig. 13　Velocity vector distribution along pipe axis [3]

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

あった。サージ状態では配管断面の全域にわたり流速が0 m/s以下になる時間帯が存在する。逆流の発生が管壁近傍に限られるC，Dとは異なる流れ場となっている。Fig. 16にB，C，Dとサージ状態での圧力信号のFFT結果を示す。C，Dでは，最下流にあるセンサiで1000Hz未満の周波数帯になだらかなピークを持つ変動が見られるが，最上流のセンサvではその変動は見られない。一方，サージ状態では，最上流のセンサvにおいても4～5 Hzの強い変動が観察される。参考に，作動点C，Dおよびサージ状態におけるセンサvの圧力波形をFig. 17に示しておく。PIVと圧力計測によって，本圧縮機ではサージへ至るまでにインペラ入口部に再循環流が発生する作動点があることが確認された。

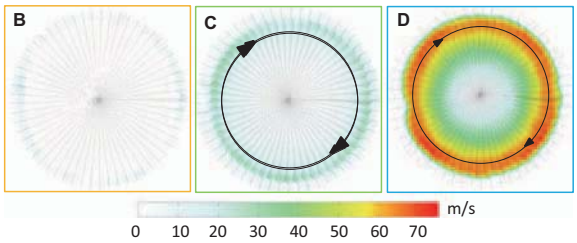


Fig. 14 Velocity vector distribution at 1.05D2 [3]

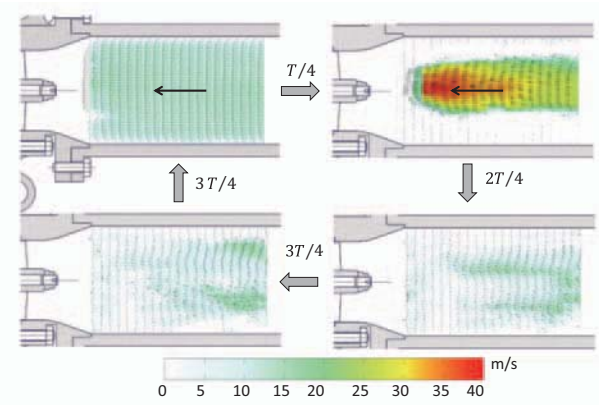


Fig. 15 Velocity vector distribution along pipe axis at surge [3]

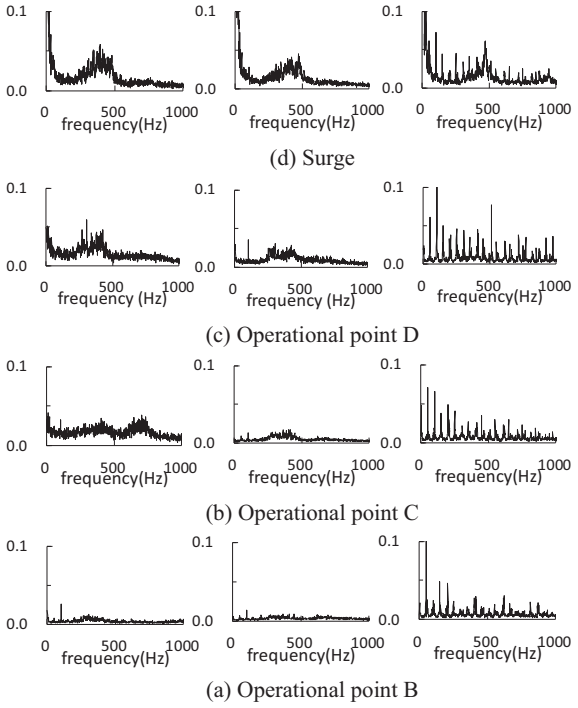


Fig. 16 FFT result at i, iii and v（left: i, middle: iii, right: v）

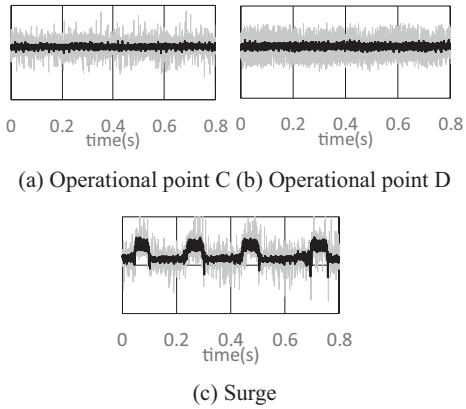


Fig. 17 Signal from pressure transducer at v

4．サージ時のインペラチップクリアランス瞬時値計測

オープンタイプの遠心圧縮機インペラの性能はチップクリアランスからの漏れ流れに大きく影響を受ける。チップクリアランスの大きさは圧縮機の作動条件によって変動するため，チップクリアランスを極端に小さくすることはインペラ翼端とケーシングの接触を招く要因となる。特にサージ突入時には，インペラとロータが圧縮機側へ移動してチップクリアランスが急激に減少する。ここでは，小型の静電容量式センサを用いてサージ状態での遠心圧縮機インペラのチップクリアランスの時間変化の計測結果を紹介する[4]。

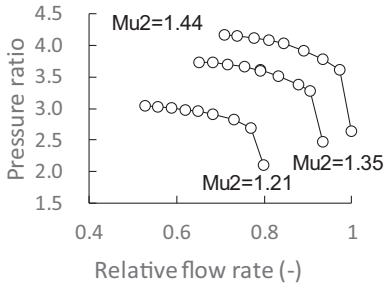


Fig. 18 Tested compressor characteristics

供試圧縮機には外径160mmの産業用遠心圧縮機を用いた。インペラはモータで駆動されている。Fig. 18に本圧縮機の性能を示す。Mu2は周速マッハ数を表す。Fig. 19に本研究で用いた静電容量式センサを示す（Fogale nanotech製，MCC5R-E25 5×12.5）。センサヘッド径はφ5.0 mmである。なお供試インペラの翼端部の厚さは約1 mmである。Fig. 20に試験装置の外観図を示す。ケーシングのインペラ前縁部とインペラ後縁部にそれぞれ4個のセンサを設置した。

Fig. 21にサージ発生時（Mu2=1.44）のインペラ前縁

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

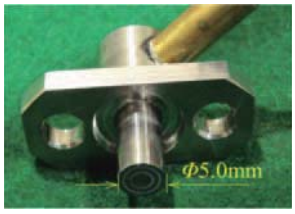


Fig. 19　Capacitive sensor[4]

部チップクリアランスの計測結果を示す。圧縮機入口で計測した静圧の変動に伴いチップクリアランスが変化していることが確認できる。また，左右方向，上下方向のチップクリアランス変動はそれぞれ逆方向に同程度の変動量であり，ロータの径方向の変動を正しくとらえられていると考えられる。

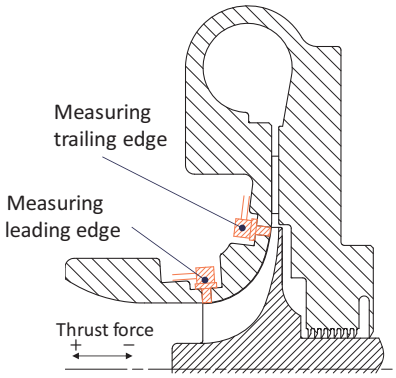


Fig. 20　Cross section of tested compressor[4]

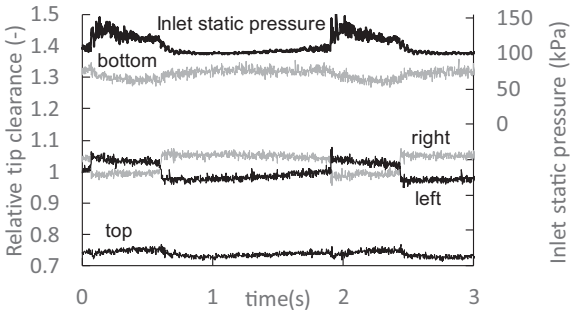


Fig. 21　Tip clearance at leading edge during surge

次に，サージ中のインペラ後縁部チップクリアランスの計測結果をFig. 22に示す（Mu2=1.44）。チップクリアランスは4か所の計測値の平均を用いて評価する。インペラ前縁部での結果と同様に，圧縮機入口部静圧の変動に伴いチップクリアランスが変化する様子を捉えることができている。このチップクリアランスの変化は，Fig. 23に示す圧縮機のサージサイクルの模式図を使い以下のように説明できる。圧縮機流量がある値を下回ると逆流現象が生じ，逆流する流体にインペラ翼が押されることにより急激にチップクリアランスが減少する（A→B, 0.45s）。急激にチップクリアランスが減少した後も逆流は続き，インペラ出口圧が減少し入口圧が増加することにより反スラスト力が増大し，逆流が発生する前よりもチップクリアランスが拡大する（B→C，0.45 ～ 0.95s）。圧縮機流量が正の領域に移動し，圧力比が増大することにより正スラスト力が増大し，チップクリアランスは減少していく（C→D→A ，0.95 ～ 2.95s）。上の括弧内に示すようにチップクリアランスの挙動からサージサイクル中の作動点の移動時間を推測することもできる。

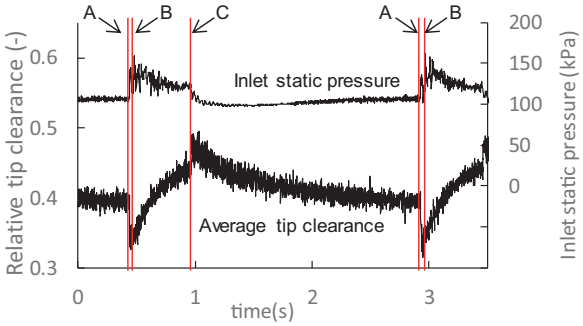


Fig. 22　Tip clearance at trailing edge during surge

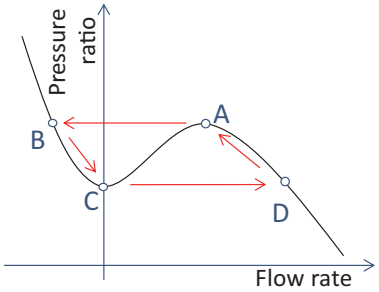


Fig. 23　Schematic of surge cycle[4]

5．おわりに

遠心圧縮機内の非定常流動現象の計測の例として，遠心圧縮機羽根無しディフューザ内での旋回失速，遠心圧縮機内の吸込み配管内の流れ，サージ中の遠心圧縮機の瞬時クリアランス計測について紹介した。本稿が，遠心圧縮機の開発・設計に従事している読者の一助になれば幸いである。

参考文献

(1)　Tamaki, H., Oouchida, S., Unno, M., EFD (Experimental Fluid Dynamics) Applications in Radial Turbomachines, 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC 18), ISOROMAC2019-00213 (2020).

(2)　Ohuchida, S., Kawakubo, T., Tamaki, H., Experimental Study of Rotating Stall in Vaneless Diffuser of a Centrifugal Compressor., Proceedings of the ASME Turbo Expo 2013, GT2013-95468 (2013).

(3)　Tamaki, H., Oouchida, S., Unno, M., Tanaka, R., and Yamaguchi, S., Enhancement of Centrifugal Compressor Operating Range by Use of Inlet Fins., IHI ENGINEERING REVIEW, Vol. 49, No. 2 (2016), pp. 45-55.

(4)　栗田史哉，大内田聡，静電容量センサを用いた遠心圧縮機チップクリアランスの瞬時計測，ターボ機械　Vol. 49, No. 4 (2021), pp. 1-9.

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

論説◆解説

特集：ガスタービン計測技術とデータ活用の最新動向

噴霧燃焼の光学計測

Optical Measurement of Spray Combustion

赤松 史光[*1]
AKAMATSU Fumiteru

キーワード：噴霧燃焼，光学計測，カセグレン受光系，位相ドップラー流速計
Key Words：Spray Combustion, Optical Measurement, Cassegrain Receiving Optics, Phase Doppler Anemometer（PDA）

1．はじめに

2050年に向けてのカーボンニュートラルが宣言される中，今もって，我々の生活は石油をはじめとする化石燃料の燃焼に大きく依存している。化石燃料の燃焼が地球規模での環境問題を引き起こす要因となっていることも紛れもない事実であり，より高度な燃焼制御にもとづいたクリーンかつ高効率な燃焼技術の出現が早急に望まれる。

液体燃料の燃焼形態としては，高負荷燃焼が可能で制御の応答性が良いという理由から，工業的には噴霧燃焼が多用されており，その用途は，ガスタービンをはじめとして，航空機，舶用，自動車等の各種エンジンおよび加熱炉など多岐にわたっている。

しかし，噴霧燃焼は，燃料の微粒化，油滴の気相への分散，蒸発，燃焼といった素過程が同時に相互作用を及ぼしあいながら進行する反応性二相乱流であり，究極の複雑現象ともいわれ，その燃焼制御技術の多くは，試行錯誤的な経験工学に基づくものである。

今，1 ml の液体燃料が粒径20 μmの油滴に微粒化されたとすると，約2.4億個もの油滴が出現することになり，実際の噴霧火炎中には天文学的な数の油滴が存在していることになる。しかも，微粒化によって生成される油滴は本質的に粒径分布を有しており，この油滴粒径の違いが現象をさらに複雑化する原因となっている。

計測の面から考えると，噴霧火炎内の現象や構造をよく理解するには，分散相である液滴と気相の両方を観測する必要がある。しかし，過去に用いられたサンプリングプローブ法ではそれぞれの相の情報を分離することがむずかしいうえに，時間分解能・空間分解能が低く，複雑な火炎構造の変化に対応できる計測が不可能である。また，現在，気体燃料の火炎（ガス火炎）に対して用いられている種々のレーザ計測法の中にも，油滴の存在によって噴霧火炎に対しては容易には適用できないものが多い。したがって，ガス火炎と比べると，噴霧火炎に関して計測可能な物理量の数がどうしても制限されてしまうため，実験的知見が未だ十分に得られていないというのが実情である。

また，実際の噴霧火炎中では，液滴は個々の単滴としてではなく，互いに干渉しあいながら蒸発･燃焼している。そのような考えのもとで，Chiuら[(1)]は何千，何万という数の油滴の集まりを群（クラスター）として扱い，その燃焼挙動を理論的に解析し，油滴の粒径および数密度によって，油滴群の燃焼挙動が異なることを予測した。しかし，この分野における過去の実験的研究は少なく，近年の急速なレーザ計測技術の発達を待って，ようやく多くの実験的知見が明らかになりつつある。

本稿では，近年，噴霧燃焼計測に不可欠となったレーザシートによる噴霧断面像の可視化法と，火炎中の局所領域からのラジカル発光計測について述べるとともに，著者らが開発した噴霧断面像と局所ラジカル発光の同時時系列計測システムを紹介する。また，実際に噴霧火炎に適用した場合の結果を示し，噴霧火炎中での油滴群の燃焼挙動についての考察を試みる。

2．油滴群燃焼理論

前述したように，燃料噴霧中には大小さまざまな粒径を持つ油滴が存在し，これらの流れ場への追従性の違いから，噴霧流中には必然的に不均一な油滴数密度の場が形成されることになる。したがって，噴霧流中には，場所によって油滴数密度の高い領域が存在し，このような油滴の密集効果は，局所的な燃料過濃領域を作り出す結果となる。油滴の密集領域内部では酸素が不足気味になり，火炎がその内部へ進入していくことができず，油滴群は一つの大きな群火炎を形成して，拡散的な燃焼形

原稿受付　2021年７月12日
＊1　大阪大学大学院工学研究科
〒565-0871　吹田市山田丘２－１
E-mail: akamatsu@mech.eng.osaka-u.ac.jp

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

態を呈する。しかし，形成される油滴群が，すべてこのような群燃焼形態を示すというわけではなく，油滴群内に含まれる油滴総数や油滴間距離の違い，すなわち油滴の密集度の違いによって燃焼形態が変化するはずである。この点をふまえて，Chiuらは油滴の群燃焼形態をモデル化し理論解析した[1]。

当初Chiuらは，等間隔で配置された直径dの均一粒径油滴からなる直径D_Cの球形油滴群において，油滴群に含まれる油滴の総蒸発率と拡散による油滴群内外のガス成分交換率の比と定義される群燃焼数Gを用いて，油滴の群燃焼形態を分類している。

$$G = 1.5Le(1 + 0.276Sc^{1/3}Re^{1/2})n_T^{2/3}(d/L) \quad (1)$$

ここで，Leはルイス数，Scはシュミット数，Reは油滴粒径とスリップ速度を用いた油滴レイノルズ数，n_Tは油滴群内部に含まれる油滴総数，dは均一滴油滴直径，Lは平均油滴間距離である。

このGによって分類される4つの燃焼モードをFig. 1に示す。

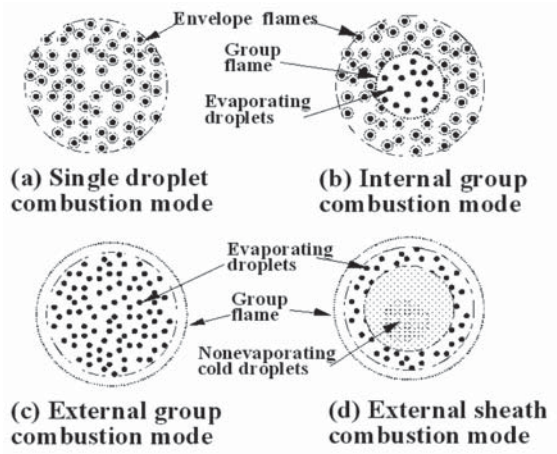


Fig. 1 Various modes of droplet group combustion

(a) $G < 10^{-2}$「単滴燃焼」

個々の油滴は，十分な酸素濃度の雰囲気中で，全周炎に包まれて燃焼する。

(b) $10^{-2} < G < 1$「内部群燃焼」

油滴群中心部で酸素が不足し，群火炎が形成されるが，その周囲には単滴燃焼が存在する。

(c) $1 < G < 10^2$「外部群燃焼」

油滴群内部への酸素の供給が大きく不足し，油滴群外部に群火炎が形成される。

(d) $10^2 < G$「外殻燃焼」

油滴群中心部では油滴の蒸発がまったく起こっておらず，その周囲に油滴の蒸発領域と火炎領域が存在する。

また，無次元油滴間距離Sを，

$$S = (L/10d)/(1 + 0.276\,Sc^{1/3}Re^{1/2}) \quad (2)$$

と定義すると，群燃焼数Gは，Sと油滴群内の油滴総数n_Tを用いて次のように表せる。

$$G = 0.15\,Le \cdot n_T^{2/3}/S \quad (3)$$

ここでルイス数$Le = 1$とすれば，Fig. 2に示すように，S-n_T平面に等G線と各群燃焼形態の現れる領域を示すことができる。

Chiuらは，多くの工業用オイルバーナでは，外部群燃焼が生じていると述べている[1]。

噴霧燃焼を油滴群の燃焼として取り扱い，初めてその挙動を理論解析した「油滴群燃焼理論」ではあるが，モデルの構築過程で，次のような仮定が置かれていることに注意しなければならない。

1．油滴群は球形であり静止雰囲気中に存在する。
2．油滴群は均一粒径の油滴からなる。
3．群火炎は非常に薄いシート状に形成される。

すなわち，いずれの仮定も実現象とは大きく異なっており，本理論の妥当性の評価には，実験的裏付けが不可欠であった。

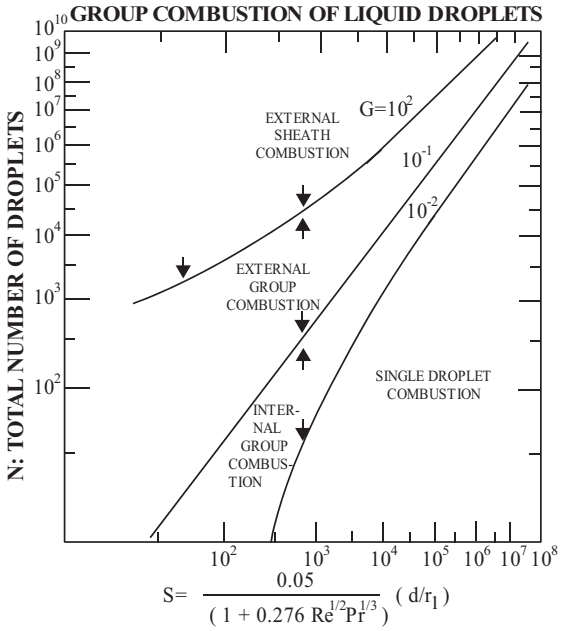


Fig. 2 Various regimes of droplet group combustion [1]

3．予混合噴霧火炎バーナ

実際の噴霧火炎中での現象を実験室レベルで理想化して抽出するには，工業用バーナなどで見られる噴射ノズル近傍での微粒化過程の影響や保炎器後流に形成される循環流や大規模渦を極力排除した，より単純化された流れ場が必要となる。予混合噴霧は，微粒化の完了した油滴を空気流に浮遊させ，油滴と気相の速度差（スリップ速度，Slip velocity）を極力抑えた二相流でであり，水谷ら[2]によって燃焼研究に導入された。

Fig. 3に，当研究室で用いている予混合噴霧火炎[3]の直接写真（露光時間1/15 s）とバーナポート部の詳細を示す。この写真に捉えられている火炎像は，目視による火炎の外観に対応している。

バーナポートは内径52.7 mmで，周囲に幅1 mmの環状の水素拡散パイロットバーナを有している。その外

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

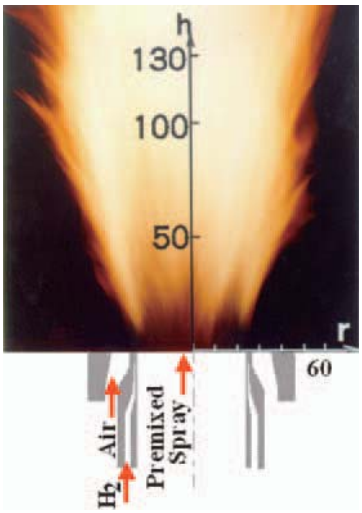


Fig. 3 Premixed-spray burner and the flame

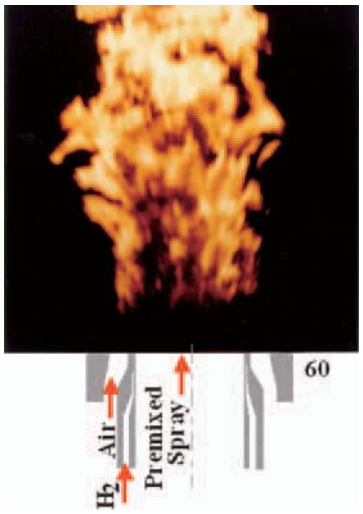


Fig. 4 Short exposure image of the flame

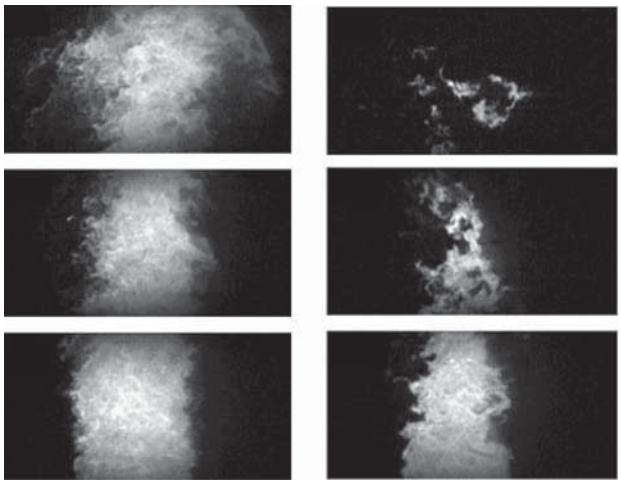
周には同軸・同速の空気を流して火炎を安定化させるとともに，噴霧流線の広がりを抑える構造になっている。バーナポート上流440 mmに設置された二流体噴射弁により微粒化された液体燃料（白灯油）は燃焼用空気と混合され，予混合噴霧としてバーナポートから上方に噴出する。その際に，前述したバーナポート周囲に環状に配置されたパイロットバーナにより保炎され，噴霧火炎が形成される。本研究では，燃焼用空気の断面平均流速5.5 m/s（Re = 19400），灯油－空気質量流量比0.045 kgfuel/kgair（供給当量比0.75に相当），二流体噴射弁の霧化用空気圧力0.4 MPaで実験を行った。計測の際の座標系としては，図中に示すように，バーナポート中心を原点とし，火炎下流方向にh軸を，半径方向にr軸をとった。

4．火炎中の噴霧における油滴群燃焼挙動

Fig. 4に，火炎の短時間露光（1/1000 s）の直接写真を示す。目視では，前述のFig. 3のようになめらかな形状をもつように見える噴霧火炎も，多数の不均質な火炎塊から構成されていることが確認できる。実はこれこそが噴霧火炎中の油滴群燃焼の存在を端的に物語っている。

Fig. 5は，予混合噴霧中にレーザシート光を照射し，噴霧断面を可視化したものであり，(a)が非燃焼時，(b)が燃焼時のものである。非燃焼時には連続して存在していた噴霧流が部分的に消失して，燃え残った噴霧領域が，油滴群（クラスター）として存在していることが分る。

したがって，このように時空間的に非常に不均一な構造をとる火炎中の噴霧の燃焼過程を議論する場合には，位相ドップラー流速計（Phase Doppler Anemometer: PDA）等の単独計測により，一点における油滴と速度を計測し，その時間平均的な統計量を得るだけでは不十分であり，油滴クラスターの存在や燃焼反応の有無といった複数の情報を，同時かつ時系列で連続的に計測することが必要不可欠であることが理解していただけよう。



(a) Non-combusting (b) Combusting

Fig. 5 Unburned spray images

5．測定方法の概略

5.1 噴霧断面像計測

噴霧火炎中においては，多量の燃料油滴が存在するため，油滴そのものがシード粒子となり，レーザシートによって油滴を照射し，油滴からのMie散乱光を撮影することで，火炎中の噴霧断面像が容易に可視化できる。

その際，注意しなければならないのは，噴霧はサブミクロンから数百ミクロン程度の粒度分布を持っており，入射レーザ光強度が同じでも，粒径によってMie散乱光強度が大きく変わることである。粒子からのMie散乱光強度は粒子直径の二乗，つまり，粒子の表面積に比例するため，より小さな油滴を画像上で検知するには，より高出力のレーザが必要となることはいうまでもない。

そのため，レーザシートの光源としては，通常，Nd-YAG（Neodynium Yttrium, Aluminum, Garnet）レーザの第二高調波（2nd harmonic, 532 nm）がよく用いられる[4]。しかし，Nd-YAGレーザは繰り返し周波数10 Hz程度のパルスレーザ（Pulse Laser）であることか

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

ら，現象を時間連続的に観察することはできない。そこで低出力ではあるが，アルゴンイオンレーザ（Argon-ion Laser）などの連続発振レーザ（Continuous Wave Laser）と高速度カメラなどを用いて時間連続的な測定が行われる[5]。また，パルスレーザの高出力と連続発振レーザの長所を併せ持った銅蒸気レーザ（Copper-vapor Laser）などを用いる例も報告されている[6]。

いずれの場合においても，噴霧火炎は輝炎を呈するため，通常，入射光にあわせたバンドパスフィルターが撮像系に取り付けられる。この際，フィルター透過率（Transmittance）や半値幅（Full Width at Half Maximum, FWHM）は撮影画像のS/N比に関係するため，その選定には注意を要する。

5.2 ラジカル自発光計測

火炎中の化学発光（Chemiluminescence）とは，原子および分子種が燃焼反応による余剰エネルギーによって励起され，基底状態に遷移する際に放出する発光であり，各化学種によって放出する波長が異なることから，反応領域の検出や，火炎構造の観察に広く用いられている。中でも，炭化水素系燃料の火炎では，OH，CH，C_2ラジカルによる発光が顕著で，いずれも明瞭な帯構造（band structure）を持つことから，計測の対象となることが多い。

Dyerら[7]によると，OHラジカルは寿命時間が長いために燃焼ガス中に広く分布するが，OHラジカル自発光は，

$$CH + O_2 = CO + OH^* \quad (4)$$

なる反応で生じた励起状態にあるOHラジカル，OH*（*は励起状態を表す）が，

$$OH^* = OH + h\nu \quad (5)$$

のように基底状態に遷移する際に発する紫外域の306.4 nmをバンドヘッドとする発光が主である。ここで，hはプランク定数，νは発光の周波数である。その強度はOHラジカル自身の濃度ではなく，反応(4)の律速因子であるCHラジカル濃度と対応して，燃焼反応領域を中心に出現する。

また，CHラジカル自発光は，

$$C_2 + OH = CO + CH^* \quad (6)$$

なる反応[8]で生じた励起状態にあるCHラジカル，CH*が，

$$CH^* = CH + h\nu \quad (7)$$

のように基底状態に遷移する際に発する431.5 nmをバンドヘッドとする発光が顕著である。その強度は反応(6)の律速因子であるC_2ラジカル濃度と対応しており，おもに炭化水素の初期反応領域で観察される。

これらのラジカル発光信号は燃焼反応と結びついているので，火炎の診断上，非常に有用な手がかりとなる。

6．火炎中での油滴クラスターの形成過程の観察

噴霧火炎中での油滴クラスターの形成過程を詳細に観察するために，噴霧断面像と火炎中の局所領域からのOHおよびCHラジカル自発光の同時時系列計測光学系を構築し，前述の予混合噴霧火炎に適用した[5]。Fig. 6に計測システムを示す。以下では，それぞれの光学系について詳述していくこととする。

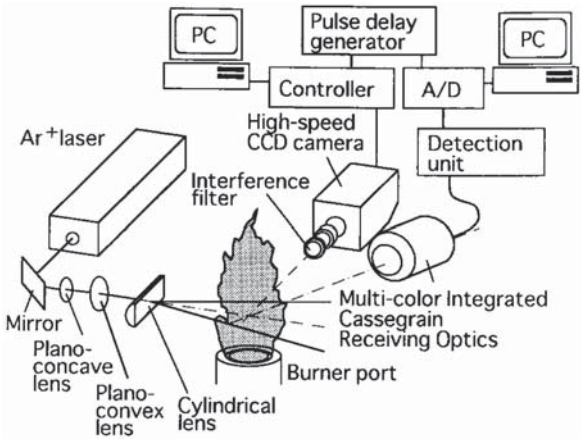


Fig. 6 Measurement system

6.1 噴霧断面像撮影用光学系

火炎中の噴霧断面像撮影の光源には，アルゴンイオンレーザ（Spectra-Physics, Stable 2017, 発振波長514.5 nm，出力2 W）を用いた。レーザ光は，平凹レンズ，平凸レンズ，シリンドリカルレンズにより厚さ約0.3 mmシート光となり，バーナの中心軸を含む垂直断面を照射する。照射された油滴からのMie散乱光像は光干渉フィルタ（日本真空光学製，中心波長514.5 nm，半値幅1.0 nm）により背景光を除去された後に，高速度カメラ（Kodak, Ektapro HS Model 4540）により，9000コマ/sで連続2048枚撮影される（撮影時間228 msに対応）。得られた画像データは，有効画素数128×256 pixel（実空間で70×140 mmに対応）で256階調に変換されディジタル記録される。

6.2 局所ラジカル自発光計測用光学系

火炎からの自発光信号の計測は，従来，市販のガラスレンズを数枚用いた単純な光学系が用いられており，波長による焦点位置の違い（色収差，Chromatic Aberration）や，レンズの内側と外側を通過する光線の集光位置の違い（球面収差，Spherical Aberration）[9]のために空間分解能が低いなどの短所があった。

過去，Kauranenら[10]は，天体望遠鏡等に用いられているカセグレン光学系を用いた多波長画像の同時撮影を行い，ミラー光学系の有用性を示した。

我々は局所領域からの多波長の火炎発光の受光のために，カセグレン光学系を用いることで色収差の問題を解消し，凹面鏡と凸面鏡の組み合わせを最適化するこで球面収差を極力抑えて計測の空間分解を向上させMulti-Color Integrated Cassegrain Receiving Optics（MICRO）を開発した[11],[12]。

Fig. 7にMICROの構成を示す。測定体積からの発光は凹面鏡および凸面鏡により反射され，光ファイバの端面

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

に集光される。光線追跡法を用いて測定体積の大きさを評価した結果，Fig. 8に示すように光軸方向に約1.6 mm，最小ウエスト径が約0.2 mmであり，従来のレンズ光学系よりも集光率分布に優れていることが確認された[11],[12]。

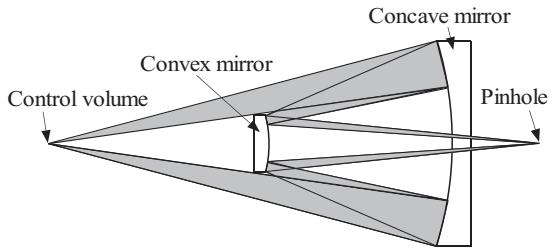


Fig. 7 Configurations of the MICRO system

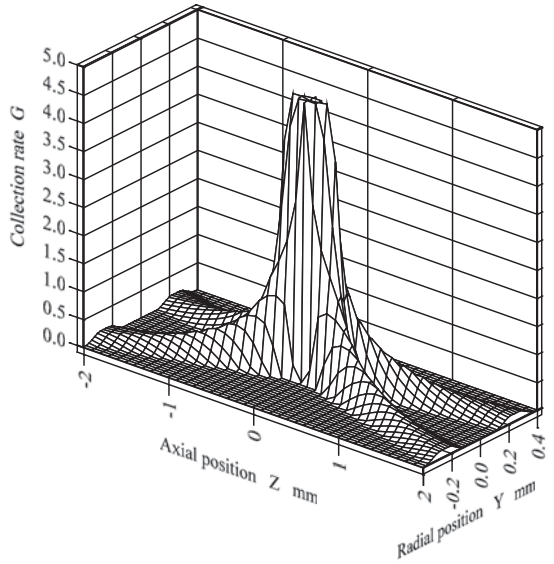


Fig. 8 Collection rate distribution of MICRO

燃焼反応領域と油滴の存在領域の関係について考察を加えるために，火炎中のOHおよびCHバンドの発光信号にあわせて，油滴からのMie散乱光信号を同時に計測した。

MICROによって集光された多色混合光は，光ファイバーを介して高速波長分離器に送られ，ダイクロイックミラーによって波長選択された後に，OH発光用フィルタ（中心波長306.6 nm，半値幅9.3 nm），CHバンド発光用フィルタ（中心波長431.1 nm，半値幅3.0 nm），Mie散乱光用フィルタ（中心波長514.5 nm，半値幅1.0 nm）により各波長に分離され，それぞれの光電子増倍管（PM）によって検出される。

光電子増倍管からの出力電流はI/V変換器により電圧に変換され，V/Vアンプで増幅された後，A/Dコンバータにより，サンプリング周波数100 kHz，12 bitでディジタル記憶される。高速度カメラとA/Dコンバータの同期には，パルスディレイ・ジェネレータ（Stanford Research Systems製，WC Model DG535）を用いた。

6.3 実験結果および考察

Fig. 9にバーナポート近傍のh = 15 ～ 85 mmにおける噴霧断面連続像と，h = 50 mm，r = 15 mmの位置（画像中に＋印で表示）で検出されたOHラジカル自発光信号I_{OH}，CHバンドの火炎発光信号I_{CH}，および油滴からのMie散乱光信号I_{MS}の同時時系列測定結果を示す。以前に行った噴霧断面連続像のみの観察[13]から，バーナポート近傍において，未燃噴霧流が非常に早い速度で部分的に消失する現象が確認された。その一方で，非燃焼時には同様の現象が確認されなかったことから，未燃噴霧流の消失が燃焼反応によるものであることが推察されたが，噴霧断面像は単に油滴の存在の有無を示しているにすぎず，噴霧断面像中の燃焼反応領域について考察を加えることは出来なかった。

しかし本研究では，噴霧断面像と火炎からの発光信号を同時に計測することで，噴霧流の消失原因について，噴霧の存在領域と燃焼反応領域の関係にまで踏み込んだ考察が可能となった。

Fig. 9を見ると，t = 57 ms前後（図中A1 ～ A5の時間帯）において，図中の白矢印で示すように，連続噴霧流が半径方向に急速に消失していく様子が観察される。この時，OH信号，CH信号はともに大きく立ち上がっており，図中＋印の領域において燃焼反応が起こっていることがうかがえる。このことより，噴霧の消失は燃焼反応によるものであり，その燃焼反応領域が速い速度で噴霧流中を特定の方向に移動すること（これを選択的な火炎伝ぱと呼んでいる）で，噴霧流が分断されていることが分る。さらに，図中A2 ～ A3の時間帯において，Mie散乱光信号と火炎発光信号が同時に立ち上がっている。このことは，噴霧境界の内部にまで燃焼反応領域が存在していることを意味している。

次に，t = 64 ms前後（図中B1 ～ B5の時間帯）における，噴霧断面像を観察すると，t = 62.7 ms（B1に対応）において，図中矢印で示した位置から，火炎伝ぱが始まろうとしている。その後，火炎は図中矢印で示すように，左斜め上方に向かって伝ぱしていくことが分る。つまり，この位置より上流側にあった噴霧流は何らかの

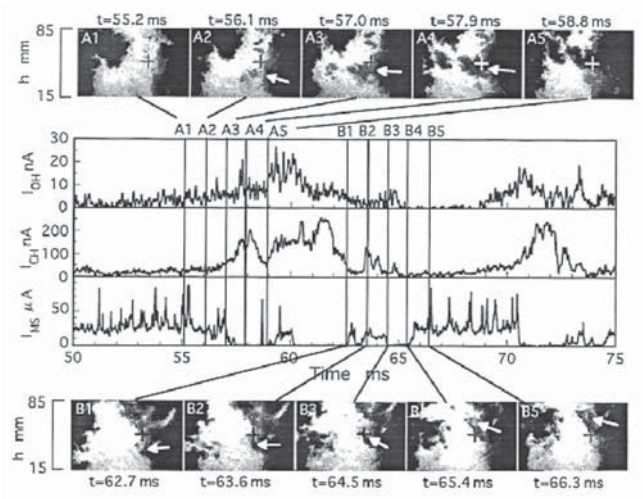


Fig. 9 Simultaneously monitored time-series date

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

理由で，火炎の伝ぱを妨げたと考えられる。このことは，図中のB4 ～ B5で示されるMie散乱光信号の立ち上がっている時間帯では，火炎発光信号の立ち上がりは見られないことにより確認できる。

今後は，どのような条件において火炎が噴霧流中を伝ぱするのかを解明していく必要がある。

7．火炎中の油滴クラスターの群燃焼数挙動の観察

次に，連続噴霧流の分断によって形成された，油滴クラスターの燃焼過程について考察を加える。

Fig. 10は，その計測システム[14]の概要である。Fig. 6の計測システムに，位相ドップラー流速計（PDA）が追加されており，高速度カメラによる噴霧断面像と，火炎中の１点における，OH自発光信号，CHバンドの発光信号，油滴からのMie散乱光信号とPDAによる油滴粒径と速度の，計1画像と５つの局所信号の同時時系列計測が可能となっている。

7.1 位相ドップラー流速計

受光系および信号処理器には市販の装置（DANTEC社製，57X10および58N10）を用いた。また，送光系

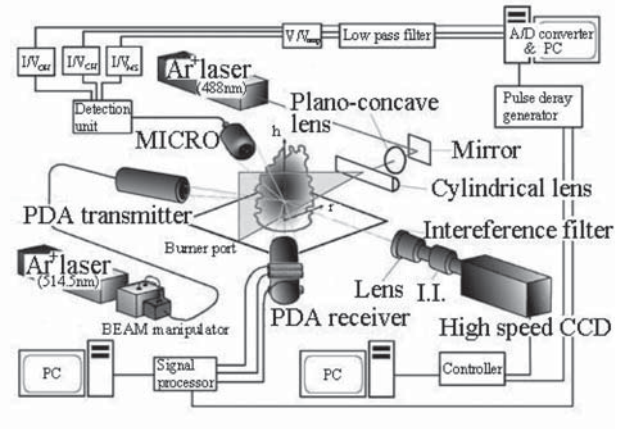


Fig. 10 Measurement system

の光源には，波長514.5 nmのアルゴンイオンレーザ（Spectra Physics社製，Stable2017）を使用した。レーザ光は光ファイバにより送光系に導かれた後に送光系内で二分割され，そのうちの一方がブラッグセルにより40 MHzの周波数変調をうける。送光系から射出される２本のレーザ光は，焦点位置で交差して測定体積を形成する。測定体積を通過する油滴からのドップラー光は，光軸に対して70.3° の方向に配置された受光系により検知され，信号処理器で処理された後，パーソナルコンピュータに記録される。この受光角は，常温で屈折率が1.42の白灯油の油滴に対して，レーザ光の反射光成分が落ち込み，１次屈折光が支配的になる角度である[15]。

本実験で用いたPDAの仕様をTable 1に示す。

7.2 噴霧断面像撮影用光学系

PDA送光系の光源にアルゴンイオンレーザの514.5 nmの波長を用いたので，レーザシート光用には，アルゴンイオンレーザ（Spectra Physics製，BeamLock 2080）の488nmの波長を用いた。シート光により照射された油滴からのMie散乱光像は，光干渉フィルタ，イメージインテンシファイア（I.I.）（浜松フォトニクス製，C6653MOD）を通して，レーザシートに垂直方向に設置された高速度カメラ（Kodak製，Ektapro HS Model 4540）により，13500コマ/sで連続4096枚（撮影時間303 msに対応）撮影される。得られた画像データは，有効画素数128×128 pixel（実空間で30×30 mmに対応）で256階調に変換されディジタル記録される。

Table 1 Specifications of PDA

Transmitting optics	
Wavelength of laser beam [nm]	514.5
Focal length [mm]	310
Spot diameter [μm]	145
Fringe spacing [μm]	5.0
Fringe number	29
Receiving optics	
Focal length [mm]	310
Width of spatial filter [μm]	100
Range of size and velocity measurement	
Maximum diameter [μm]	96.5
Maximum velocity [m/s]	15.0
Minimum velocity [m/s]	-5.0
Bandwidth of signal processor [MHz]	4.0
Frequency shift [MHz]	40

7.3 測定方法および測定領域

画像撮影領域の中心に位置する１点において，前述の高空間分解能を有する集光光学系MICRO[11],[12]による油滴Mie散乱光信号，OH自発光信号，CHバンドの発光信号と，PDAによる油滴粒径，速度の５つの局所信号を同時計測した。画像撮影装置，PDAシステム，A/Dコンバータの同期には，パルスディレイ・ジェネレータ（Stanford Research Systems製，WC Model DG535）を用いた。

計測の際には，画像中心のｈ座標を代表高さh_rとした。画像撮影領域は，油滴群が頻繁に観察されるr = −15 ～ 15 mm，h_r = 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 mmの７領域とした。

7.4 群燃焼数の算出方法

実験データから個々の油滴群の群燃焼数を算出するために，前述のChiuら[1]に理論解析における均一油滴直径dを油滴群内部に含まれる油滴の算術平均粒径d_{10}で置き換え，油滴群直径D_cとしては，画像処理により油滴群の断面積Sを算出し，それと等しい断面積をもつ等価球の直径l_cを用いた。

$$l_c = \sqrt{4S/\pi} \tag{8}$$

予混合噴霧を用いているため油滴と気相とのスリップ速度には非常に小さいため油滴レイノルズ数Re＝0とし，ルイス数Le＝1とおくと，式(3)より，火炎中の個々の油滴群の群燃焼数Gcは，

$$G_C = 1.5 n_T^{2/3} \cdot d_{10}/L \tag{9}$$

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

となる。ここで，平均油滴間距離LはPDAの時系列データを用いて次式により算出した。

$$L=\sum_{i}^{N_c}(t_{i+1}-t_i)\cdot V_i/(N_c-1) \tag{10}$$

ただし，N_cは個々の油滴群内で計測されたPDAデータ個数，t_iはi番目の油滴のアライバルタイム，V_iはi番目の油滴速度である。また，油滴群内の油滴総数n_Tは，直径l_cの球形油滴群の内部に油滴が等間隔Lで充填されているとし，次式により求めた。

$$n_T=(\pi/6\cdot l_c^3)/L^3 \tag{11}$$

7.5 実験結果および考察

以上の手順により，画像撮影により確認された火炎中の個々の油滴群の群燃焼数G_Cを算出し，前述のFig. 2の$S-n_T$平面にプロットしたものをFig. 11に示す。G_CはChiuらの理論解析で予測された範囲に収まっていることが分る。単滴燃焼のものは油滴総数が10個以下のものに限られており，支配的となっている群燃焼形態は，内部群燃焼と外部群燃焼である。

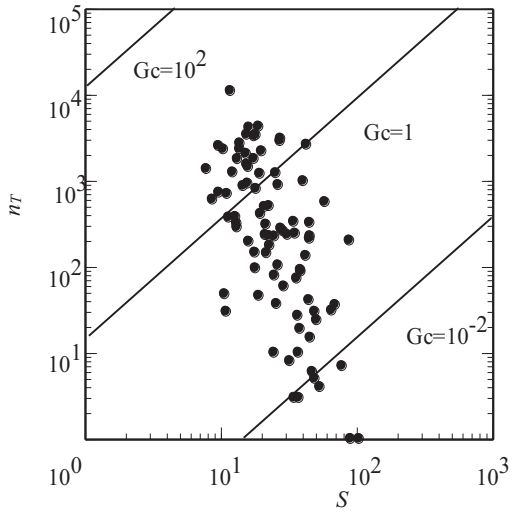
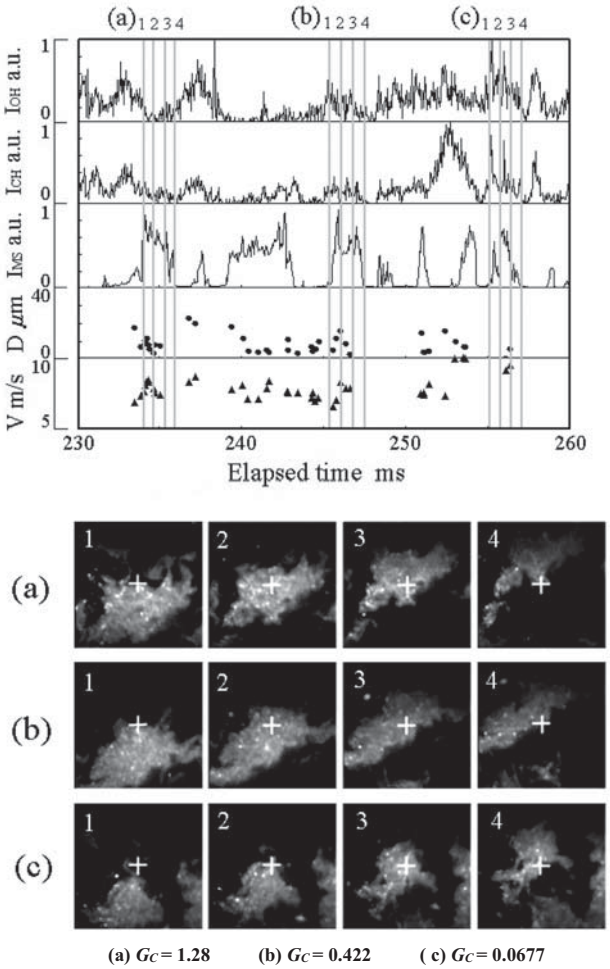


Fig. 11 G number of individual droplet clusters

次に，個々の油滴群に注目し，求めたG_CをChiuらの理論による群燃焼形態の分類に当てはめた場合，実際に観察される群燃焼状態と一致するかを検証した。Fig. 12に，h_r = 110 mmにおけるOH自発光信号，CHバンドの発光信号，油滴Mie散乱光信号，油滴粒径と速度，および噴霧断面画像の同時時系列データを示す。MICROにより得られた発光信号は，最大値で正規化している。画像中の+印で示した点が画像中心，すなわちMICROとPDAの計測点である。噴霧断面像との同時計測を行った結果，どのような形状の油滴群が計測点をどのように通過したのかが確認できる。噴霧断面の連続画像とMICROによるMie散乱光信号との対応がよく取れている。

(a)の油滴群は，G_C = 1.28であり，Chiuらの分類によれば，群燃焼形態は外部群燃焼に相当する。MICROの時系列データを見ると，全体的には，油滴群に対応する油滴Mie散乱光信号の持続期間の前後にOHラジカル



(a) G_C = 1.28 (b) G_C = 0.422 (c) G_C = 0.0677

Fig. 12 Monitored time-series data and images

自発光，CHバンドの火炎発光信号が強く，油滴群内部では火炎発光信号は微弱であることから，油滴群を取り囲むように燃焼反応領域が存在し，その内部では燃焼反応がほとんど起こっていないといえるので，この油滴群全体の燃焼形態は，外部群燃焼と判断できる。よって，この油滴群の実際の燃焼形態は，求めたG_CをChiuらの分類にあてはめた場合と合致しているといえる。しかし，この油滴群の下端へいくにつれ，油滴Mie散乱光信号は弱くなっており，逆に火炎発光信号は強くなる傾向にある。このように，油滴群全体では，その燃焼状態がChiuらの群燃焼形態の分類と合致しているといえども，局所的には，油滴群内の噴霧特性，あるいはその他の条件，例えば，雰囲気温度，燃料蒸気濃度，酸素濃度等の不均一さにより，同一の油滴群内部においても燃焼形態が異なることが分る。

次に，(b)の油滴群に注目すると，G_C = 0.422であり，Chiuらの分類によれば，その群燃焼形態は内部群燃焼に相当する。MICROの時系列データより，油滴群内部で火炎発光信号が検出されているものの，その中心部付近では火炎発光信号強度は弱くなっており，内部群燃焼に近い燃焼状態であると考えられ，この油滴群の群燃焼形態は，Chiuらの分類と一致している。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

(c)の油滴群はG_C = 0.0677であり，Chiuらの理論解析によれば，その群燃焼形態は内部群燃焼に相当する。発光信号の時系列データをみると，火炎発光信号はMie散乱光信号と似た波形を示している。つまり，油滴群全体で燃焼反応が起こっており，単滴燃焼の群燃焼状態であると考えられる。G_C = 0.0677なので，その群燃焼形態は，単滴燃焼に近い内部群燃焼であると考えられるが，Chiuらの分類とは一致しない結果となった。

Chiuらの群燃焼形態の分類と実際に観察される群燃焼形態がどの程度一致するのかを，観察されたすべての油滴群について定量的に確認するために，それぞれの油滴群について，油滴群がMICROの測定点を通過する時間内にOHラジカル自発光が検出される時間割合R_{OH}とG_Cの関係を調べた結果をFig. 13に示す。図中の曲線は，Chiuらの理論解析による分類にしたがう場合に予想される結果である。これらの図から分るように，G_CとR_{OH}には強い相関はなく，G_Cが対応する4つの群燃焼形態と一致しない油滴群が多数観察されることが確認された。

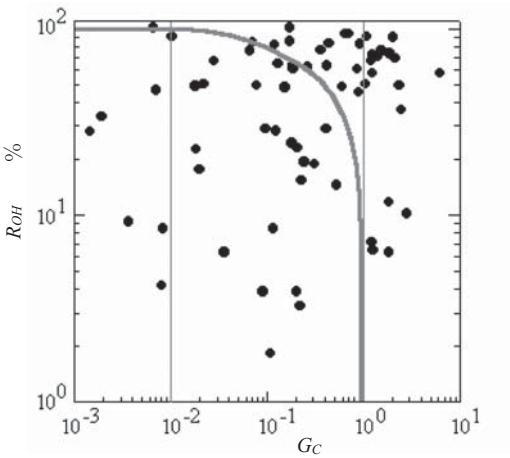


Fig. 13 Relations between GC and ROH

このようなChiuらの群燃焼形態の分類と実際に観察される群燃焼形態の不一致の原因としては，理論解析の際に用いられている様々な仮定が，本実験で対象とした乱流予混合噴霧火炎中で観察される油滴群には当てはまらないことも挙げられるが，Chiu[16]はこの実験事実をうけて，従来の群燃焼数Gを幾何学的群燃焼数（geometrical group combustion number）G_Cとし，実際の油滴群の群燃焼形態は，次式の新しい群燃焼数，

$$G = C_V G_C \tag{12}$$

により決まるとした[16]。ここで，C_Vは蒸発修正係数（Gasification correction factor）で，気流中の相互干渉する油滴群の蒸発率と静止した単独の油滴群の蒸発率の比である。

このことは，噴霧燃焼場の複合計測技術を用いた同時時系列データによる詳細な実験結果を提示したことで，理論と実験の距離が縮小し，実験的知見と理論的考察が有効に結びついた結果であり，大変意義深い。

8．まとめ

本稿では，レーザシート法による噴霧断面像の可視化と火炎内局所ラジカル発光の同時時系列計測システムを紹介し，実際に予混合噴霧火炎に適用した場合の計測結果を示した。

従来の，レーザシート法，PDA計測，火炎発光計測等を単独で用いる方法ではなく，それらを統合して同時時系列計測システムを構築することで，より詳細な観察が可能となり，噴霧火炎中における選択的な火炎伝ぱ現象によって噴霧流が分断されて油滴クラスターが形成され群燃焼することが明らかとなった。

このような複数の計測機器を統合して燃焼診断に用いる研究が増加しており，今後，燃焼研究の分野に新たな知見をもたらすことが期待される。その一方で，大量の計測データの中に潜む現象の本質を見失うことがないように，燃焼工学の研究者には，今後，計測法，解析手法等のより広範な知識が求められるであろう。

参考文献

(1) H. H. Chiu, H. Y. Kim and E. J. Croke, Proc. of The Combust Inst., 19 (1982), pp. 971-980.
(2) 水谷幸夫，西本武雄，日本機械学会論文集，38-311 (1972), pp. 1844-1854.
(3) 赤松史光，水谷幸夫，香月正司，津島将司，趙庸大，日本機械学会論文集，62-596B (1996), pp. 1622-1628.
(4) A. Cavaliere, R. Rugucci, A. D'alessio and C. Noviello, Proc. of the Combustion Institute, 22(1988), pp. 1973-1981.
(5) 津島将司，斎藤寛泰，赤松史光，香月正司，日本機械学会論文集, 66-648B (2000), pp. 307-314.
(6) T. F. Su, J. M. Kozma, C. B. Warrick, P. V. Farrell, Proc. 7th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS-97) Vol. 1 (1997), pp. 183-190.
(7) M. J. Dyer and D. R. Crosley, Proc. Int. Conf. Lasers '84, STS Press, 1985, pp. 211-218.
(8) A. G. Gaydon and H. G. Wolfhard: "Flames; Their Structure, Radiation and Temperature, 3rd Edition", Chapman and Hall, (1970), p. 227.
(9) 岸川利郎，光学入門，(1990), オプトロニクス社.
(10) P. Kauranen, S. Andersson-Engels and S. Svanberg, Appl. Phys. B53 (1991), pp. 260-264.
(11) 若林　卓，赤松史光，香月正司，水谷幸夫，池田裕二，河原伸幸，中島　健，日本機械学会論文集，64-619B (1998), pp. 277-282.
(12) F. Akamatsu, T. Wakabayashi, S. Tsushima, M. Katsuki, Y. Mizutani, Y. Ikeda, N. Kawahara, T. Nakajima, Measurement Science and Technology, 10 (1999), pp. 1240-1246.
(13) F. Akamatsu, Y. Mizutani, M. Katsuki, S. Tsushima, Y.-D. Cho, K. Nakabe, Atomization and Sprays, 7-2 (1997), pp. 199-218.
(14) Akamatsu, F, Optical measurement and numerical simulation of spray combustion, J. Therm. Sci. Tech., Vol. 11, JST0002 (2016) 15-0688.
(15) Dantec PDA Manual, (1992), p. 38, Dantec Inc.
(16) H. H. Chiu, Proc. of the Combustion Institute, 28 (2000), pp. 1095-1102.

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

特集：ガスタービン計測技術とデータ活用の最新動向

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

Application of PSP/TSP to Turbine Cooling Technologies

船﨑 健一*1　藤原 浩介*2
FUNAZAKI Ken-ichi　FUJIWARA Kosuke

キーワード：感圧塗料，感温塗料，過渡応答法，フィルム冷却，内部冷却
Key Words：Pressure-Sensitive Paint, Temperature-Sensitive Paint, Transient Response Method, Film Cooling, Internal Cooling

1．緒言

ガスタービンの熱効率を高めるためにはタービン入口温度（Turbine Inlet Temperature, TIT）を上昇させることが有効であり，TITは高温化の一途を辿っている[1]。一方，TITの高温化はタービンや燃焼器に更なる負荷を課すことになり，部材の温度・熱伝達率予測などの冷却設計技術は極めて高度なもの―より精確且つより詳細―が求められている。冷却設計においては流動と伝熱現象の把握・理解を欠かすことはできず，これまでに多くの実験的研究が実施され，その中で様々な実験技術が提案されてきた。特に光学的手法は一般に①非接触型で流れに干渉しない，②同時多点的な計測ができる，③条件次第では非定常計測も可能等の特徴を有しており，現象に関して極めて有益な情報を与えてくれる。数ある計測技術の中でも感圧塗料（Pressure-Sensitive Paint, PSP）と感温塗料（Temperature-Sensitive Paint, TSP）は後述するように他の手法には無い特長を有しており，実験で採用できる選択肢の幅を大きく広げる。PSP/TSPはある程度の初期投資が必要になるものの，近年は計測に必要な薬剤や計測機材を容易に入手することが可能で，ガスタービンの分野でも伝熱に関する研究の場で適用されている[2],[3],[4]。

本投稿ではPSP/TSPの計測原理や長短の概説をし，著者らの最近の取組みとして，①直線翼列を対象にした翼面上フィルム冷却効率の計測，②タービン翼前縁内部冷却流路の熱伝達率計測を紹介する。

2．PSP/TSPの計測原理と計測の特徴

PSP/TSPはその発光強度が空気中の酸素分圧や温度に対して依存性を有する感圧・感温色素とそれを計測対象物表面に固定させるバインダで構成される。計測系はLEDやレーザーなどの励起光源，塗料を塗布した計測対象物，発光を捉えるカメラと光学フィルタで構成され（Fig. 1），必要に応じて参照用の圧力/温度センサや機器同士の同期用の信号発生器を追加する。最も標準的な手法である強度比法（Intensity Ratio Method）では，PSPの発光強度IPSPと圧力pの関係はStern-Volmer式（式(1)）で表され，TSPの発光強度ITSPと温度Tの関係は式(2)で表される。

$$\frac{I_{PSP.ref}}{I_{PSP}} = A(T) + B(T)\frac{p}{p_{ref}} \tag{1}$$

$$\ln\left[\frac{I_{TSP}}{I_{TSP.ref}}\right] = \frac{E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) \tag{2}$$

ここで，$I_{PSP.ref}$，$I_{TSP.ref}$は適当な基準圧力/温度における発光強度，$A(T)$と$B(T)$はPSPの温度依存項，EとRはそれぞれ活性化エネルギーと一般気体定数である。試験の際は予備試験によって予め圧力/温度との関係を関数として定式化しておき，試験対象の画像から圧力/温度分布を算出し，以後のプロセスで熱流体力学的な考察を

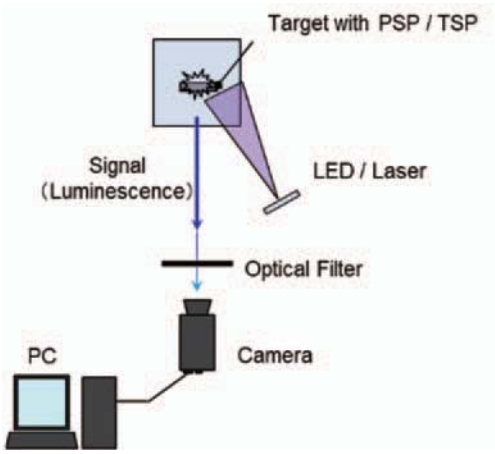


Fig. 1　Components of a measurement system in general

原稿受付　2021年7月2日
＊1　岩手大学理工学部システム創成工学科
E-mail: funazaki@iwate-u.ac.jp
＊2　㈱IHI 航空・宇宙・防衛事業領域 技術開発センター
E-mail: fujiwara1364@ihi-g.com

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

行なう。ただし，式(1)から明らかなように，一般にPSPの発光強度は温度依存性を有するため，圧力だけでなく温度にも注意して試験を実施する必要がある。

これまでに多くの研究によって数々の塗料が作成されており，PSPについては江上ら[5]，Liuら[6]，Kontis[7]よって，TSPについてはKhalidら[8]，Brubachら[9]，Aldenら[10]によってその種類や発光特性，種々の計測手法がまとめられている。特にTSPは極低温[11],[12]から燃焼を含むような高温[10],[13],[14]までの幅広い温度領域に対応可能で，計測対象に応じて適切な塗料を選択することで多種多様な計測ニーズに応えることができる。Table 1・Table 2は代表的な圧力/温度の計測手法をその長所・短所と共に示したものだが，他の計測手法の短所をPSP/TSPが補完することができ，その逆もまた然りである。即ち，実験実施者は予算・時間など様々な制約条件の下，多様な選択肢の中から最適なものを選ぶことでより多くの情報を実験から取得することができる。

Table 1 Merits/Demerits of existing pressure measurement

Technique	Merits	Demerits
PSP	・Non-intrusive ・Two-dimensional ・Transient	・Requires skills ・Chemical waste ・Delay in response due to the thickness ・Temp. dependency
Pressure Holes	・High fidelity ・Transient	・Requires holes ・One-point data

Table 2 Merits/Demerits of existing thermometry techniques

Technique	Merits	Demerits
TSP	・Non-intrusive ・possible in liquid ・versatile options ・Two-dimensional ・Transient ・possible in combustion	・Requires skills ・Chemical waste ・Delay in response due to the thickness
IR camera	・Non-intrusive ・Two-dimensional ・Transient	・prone to noise from ambient environment ・Impossible in liquid nor in combustion
Thermographic Liquid Crystal (TLC)	・Non-intrusive ・possible in liquid	・Requires skills ・Chemical waste ・Delay in response due to the thickness ・Temp. range is much narrower than TSP
Thermocouple	・High fidelity ・Cheep and handy	・Intrusive ・One-point data ・Delay in reponse due to heat capacity

3．計測事例の紹介

3.1 PSPを用いた翼面上のフィルム冷却効率の計測

(1) 計測原理

フィルム冷却は，タービン翼表面などに設けられた冷却孔から冷却空気を吹き出し，翼表面上に比較的低温の熱遮蔽層を作ることで翼表面を高温の燃焼ガスから守る手法であり，これまでに非常に多くの研究が行われてきた[15]。フィルム冷却の性能評価には一般にはフィルム冷却効率 η（Film Cooling Effectiveness）が用いられ，次の式で表される（式(3)）。

$$\eta = \frac{T_g - T_{\mathrm{mix}}}{T_g - T_c} \tag{3}$$

これは，冷却空気（温度T_c）と主流ガス（温度T_g）との断熱混合（温度T_{mix}）の進行度を示すものであり，乱流による熱移動（熱拡散）現象に支配される。フィルム冷却効率の最も直接的な計測法は温度計測であり，Table 1で示されているように熱電対，IRカメラ，感温液晶，TSPなどが用いられているが，物体の熱伝導による損失の影響は不可避であり，高精度の計測を行うことが困難である。また，一般的に「高温」の冷却空気を使用することが多く，実機における密度比を達成できないなどの難点もある。これらの問題を克服する手法として，N_2，ArやCO_2など異種ガスを冷却空気の代用気体として用いるPSP法が提案・改良[16]され，多くの研究者がそれらを用いている。

圧力計測手法であるPSPを用いたフィルム冷却効率の計測には，熱移動と物質移動の類似性，即ち，温度場及び濃度場の支配方程式とその壁面上での境界条件の類似性が利用されている。類似性は乱流Lewis数（熱拡散係数と物質拡散係数の比）がほぼ1の場合に成立し，式(3)のフィルム冷却効率中の温度を濃度Cで置き換えることが可能となる。PSPは酸素分圧に反応するので，濃度として酸素濃度C_{O2}に着目し，主流，冷却空気相当の異種ガス及び混合ガスのそれぞれの酸素濃度を$C_{g,O2}$，$C_{c,O2}$，$C_{mix,O2}$とすると，結局，式(3)のフィルム冷却効率は式(4)のように表現することができる。

$$\eta = \frac{C_{g.O2} - C_{\mathrm{mix}.O2}}{C_{g.O2} - C_{c.O2}} = \frac{C_{g.O2} - C_{\mathrm{mix}.O2}}{C_{g.O2}} = 1 - \frac{C_{\mathrm{mix}.O2}}{C_{g.O2}} \tag{4}$$

ここで，異種ガスは酸素を含まないことから$C_{c,O2}=0$としている。酸素異種ガスの噴出により冷却孔下流の酸素分圧P_{O2}は著しく低下し，周囲の空気との乱流混合により酸素分圧は回復する。この酸素分圧の変化はPSPからの発光強度の変化として検出され，物体表面上の酸素分圧分布が決定される。酸素濃度C_{O2}がモル分率X_{O2}（$=P_{O2}$）とモル質量W_{O2}とで表されること，及び式(1)の圧力比が酸素分圧比で与えられることから，式(4)は次のようになる[17]。

$$\eta = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{P_{O2.air}}{P_{O2.mix}} - 1\right)\frac{W_{mix}}{W_{air}}} \tag{5}$$

(2) 適用事例

Fig. 2に高圧タービン翼の正圧面及び負圧面に設置されたフィルム冷却孔下流のフィルム冷却効率分布を計測するための直線翼列試験装置を示す。計測の空間解像度向上とともに，光学的なアクセスを確保するため大型翼モデルを用いている。翼材料は加工性及び重量を考慮し

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

てABS樹脂である。前述のように，PSPによる発光の強度には温度依存性があり，翼面上の温度分布発生を避けるため熱伝導のよい金属製の翼モデルを用いることもあるが，ここでは十分暖機を行うことで温度の影響を最小限に留めている。異種ガスには，密度比の効果を調査するためN_2とArを用いた。

PSPには，温度依存性が低く感圧色素として常温で高い圧力感度を持つ白金ポルフィリン（PtTFPP），バインダとしては酸素透過性に優れるPtBS（Poly（tert-butylstyrene）を採用し，これらをトルエンに溶解させることで PSPを作成した。励起光源には UVLED光源（浜松ホトニクスLEDH60，ピーク波長400［nm］）を使用した。画像撮影には冷却 CCDカメラ（BITRAN BU-51LN）を使用しており，PSPの燐光のみを捉えるためカメラ前部にロング パス フィルタ（朝日分光 LV0630 通過波長630［nm］～）を取り付けている。計測時は，各撮影条件において60枚の画像を取得し平均化することで定常計測を行った。

Fig. 3に較正装置の概要を示す。真空チャンバー内には，電子冷却素子（ペルチェ素子）が裏面に取り付けられた試験片が設置されており，温度コントローラで試験片の温度を設定している。試験片には供試翼同様に耐久性向上，コントラスト改善を目的としたアンダーコート（白色ベースコート，クリアカラー）及びPSPが塗布されている。真空チャンバー内は真空ポンプにより減圧され，式(1)に基づいて発光強度と酸素分圧との関係（較正関数）を得る。ただし，実際には線形的な関係が得られないこともあり，また，CCDの暗電流ノイズ除去を目的として，次式を使用している。

$$\frac{I_{PSP,ref}-I_{PSP,dark}}{I_{PSP}-I_{PSP,dark}}=f\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) \tag{6}$$

ここで，$I_{PSP,dark}$は暗電流画像，較正関数fはp/p_{ref}に関する多項式である。

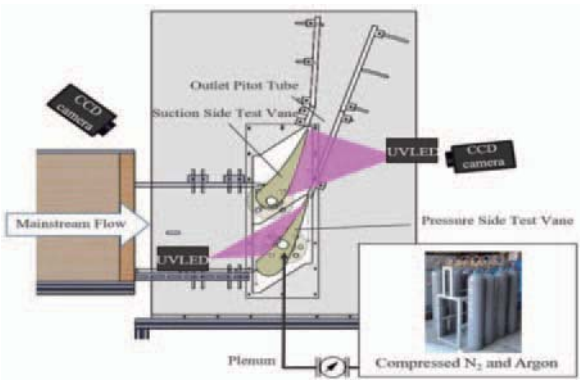


Fig. 2　Linear cascade for film cooling effectiveness measurement by use of PSP technique

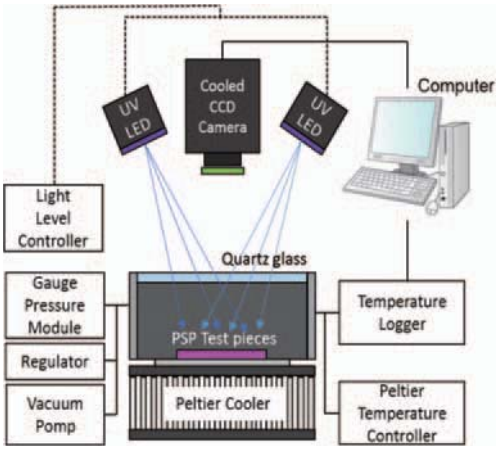


Fig. 3　A schematic of calibration setup

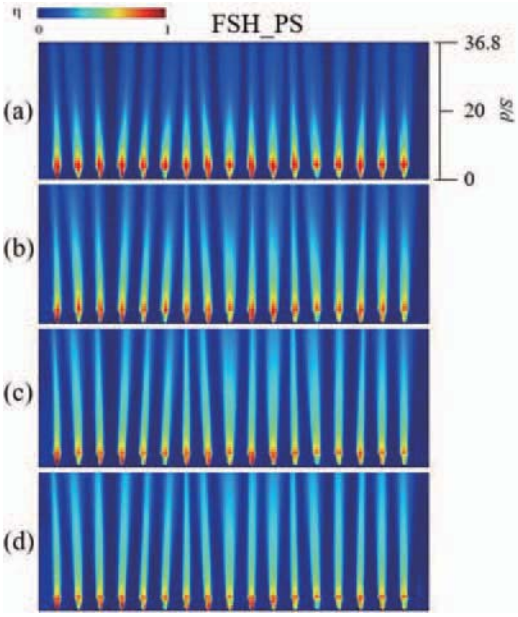


Fig. 4　Film-cooling effectiveness distributions on the pressure-side surface of the test model with fan-shaped holes ((a) BR=0.5, (b) BR=1.0, (c) BR=1.5, (d) BR=2.5)

Fig. 4に，正圧面上でのフィルム冷却効率分布を4つの噴き出し条件で得た結果を示す[18]。ここで吹き出し比BRは主流・冷却側空気の質量流束比（$BR=\rho_c u_c/\rho_g u_g$）である。異種ガスとしてArを用い，密度比は1.38である。冷却孔近傍から下流側へのフィルム冷却効率の分布が鮮明に捉えられており，PSP法がフィルム冷却効率の計測に適したものであることがこの結果からも理解できる。

3.2　TSPを用いた内部冷却流路の熱伝達率の計測

3.2.1　概要　翼面上のフィルム冷却と同様，高温化するTITに対応するため，翼内部にも冷却流路が設けられている。特に翼前縁は熱負荷が非常に高く，効率の良い冷却をするためには冷却機構の特性を把握することが重要となる。これまでに先行研究は数多く行われているが，クロスフロー・インピンジフロー・フィルム冷却の流動要素全てが共存するような系における研究は未だ多くなく，現実のタービンに存在するような複雑な流路形

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

状や流れを対象とした研究・調査は冷却設計に大きく貢献する。本研究では前述した3つの流動要素を含むタービン翼前縁部を模擬した供試体を製作し，TSPを用いた過渡応答法に基づいて内部冷却流路壁面の熱伝達率を計測，伝熱特性についての検討を行なった。

3.2.2 試験装置・試験条件 Fig. 5，Fig. 6にそれぞれ供試体の外形図と実験システムの略図を示す。本研究では高圧タービン翼を拡大したアクリル製の供試体を製作し，クロスフロー（主流）側流路とインピンジ側流路にヒータで熱した空気を供給することでタービン内部の流動を模擬した。インピンジ側からの噴流が衝突する面が計測面で，感温塗料の他，アクリルとの接着性を改善するための透明なラッカーと信号強度を増幅させるための白色のラッカーが塗布してある（Fig. 7）。塗料は比較的高い感温度を有する$Ru(phen)^{3+}$とバインダであるポリアクリル酸（PAA）を溶媒のエタノールに混合して作成した。試験では昇温による感温塗料の輝度値変化をCCDカメラで撮影し，過渡応答法[19]によって熱伝達率を算出する。

実験条件として，クロスフロー側は流路水力直径と平均速度に基づく流路内Reynolds数を$Re_c=3.02\times10^3$，インピンジフロー側は孔直径と孔を通過する体積流量と孔の総面積で求まる平均流速に基づくインピンジReynolds数を$Re_{im}=5.43\times10^3$とし，双方の流路の温度・昇温速度が同じになるようにインラインヒータの出力の調整を行ないながら計測を実施した。紙面の都合上，その他装置・計測手法に関する詳細については既発表の文献[20]を参照されたい。

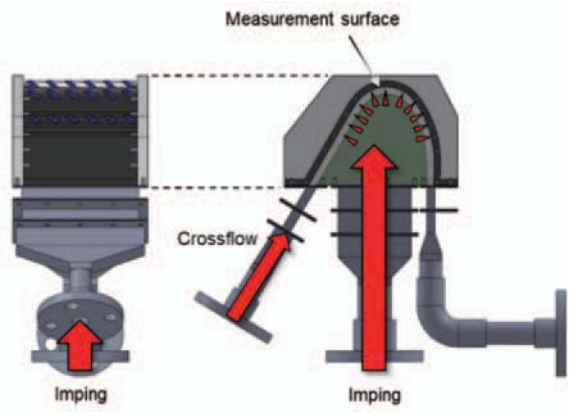


Fig. 5 Experimental apparatus for internal cooling

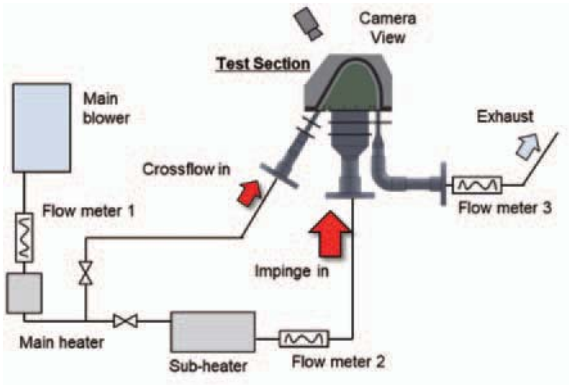


Fig. 6 Experimental system for internal cooling

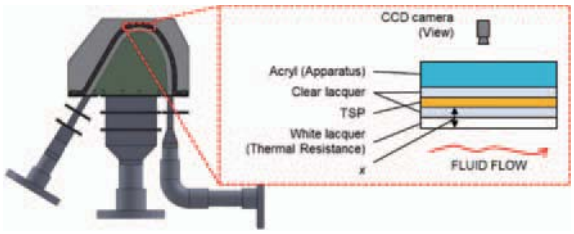


Fig. 7 Layers of paints applied

3.2.3 試験結果・考察 Fig. 8に算出された熱伝達率分布を示す。図を見て明らかなように，インピンジフローが衝突していると考えられる領域は熱伝達率が高くなっており，クロスフローの運動量によって流れ方向に発達していることが分かる。また，インピンジフローによる高い熱伝達率を示す領域同士の間には帯状に熱伝達率が高くなっている領域も観察され，これはインピンジフローによって形成される渦（Fountain 効果[21]）が再衝突や剥離を生じているためである。

熱伝達率の分布を算出するほか，本研究では塗布厚さについての検討も行った。Fig. 9は熱伝達率をh=10, 50, 100, 200W/m^{2}Kとしたとき，壁面からxだけ物質内部（塗布厚さ）に浸透した位置における温度履歴から逆算できる熱伝達率（便宜的に見かけの熱伝達率，h'と呼ぶ）と真値hに対する差異を相対誤差eとして評価したものである。ここで相対誤差は式(7)のように定義し，TSPやラッカーの熱伝導率をλ=0.23W/mKとした数値的な検討を実施した。

$$e=\frac{h-h'}{h} \tag{7}$$

グラフより，塗布厚さが増すほど見かけの熱伝達率が小さくなるため，相対的誤差は大きくなる。これは固体内部へと浸透する熱（情報）の応答遅れによるもので，塗布厚さが増すほど温度低下や応答遅れの増大が発生するため，見かけ上の熱伝達率は過小評価されてしまう。対流熱伝達率のオーダーが一般には約100W/m^{2}K程度であることを考えると，h'の相対誤差が7％程度となる50μmが許容できる塗布厚さの限界であろう。Knappeら[22]は20μm以下を推奨しているが，燃焼流を対象とし

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

た同文献と比較して本研究は熱流束が小さいため，塗布厚さを比較的大きくとることが可能であったと考えられる。塗布厚さによる影響を最小化することは今後の課題である。

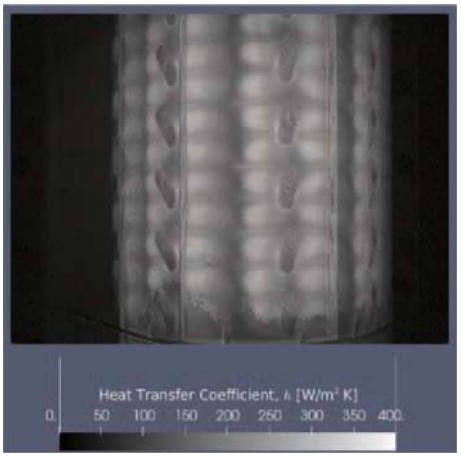


Fig. 8 Distribution of heat transfer coefficient

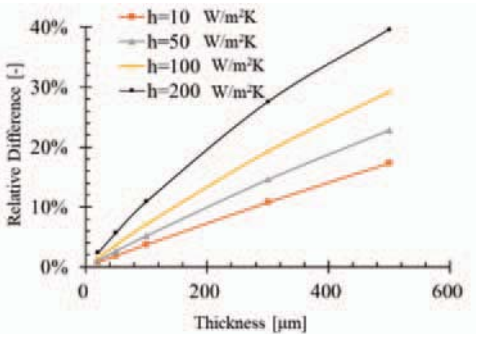


Fig. 9 Effect of thickness (relative error against the true value)

4．結言と今後の課題

本投稿では，翼面上のフィルム冷却効率分布と内部冷却流の熱伝達率分布の計測を例に挙げてPSP/TSPによる計測について紹介をした。

PSPを用いたフィルム冷却効率の計測では，熱移動による手法と異なり熱損失が発生せず，また，モル質量の大きな気体を異種ガスとして用いることで実機相当の密度比も実現可能である（６フッ化硫黄SF6はモル質量が146でかつ比較的安全・安定な気体であり実用例もあるが，地球温暖化効果係数が極めて大きく，回収が必須である）。更に，原理的に面計測であるので，短時間で高精度の分布計測が行える。その意味で，現時点ではフィルム冷却効率計測には最も適した方法と言える。

注意点としては，類似性の成立性，塗装膜厚の影響，観測面との角度や面の曲率などが挙げられる。類似性については，一般の気体の場合であれば乱流Lewis数=1の仮定は妥当とされているが[23]，流れの状態については常に注視が必要である。膜厚についてはTSPのところでも関連する議論を行ったが，膜厚の管理については配慮が求められるものの，時間平均的な流れ場におけるPSP計測に関しては厚めに塗るのがよいとされており[16]，著者らの経験とも合致する。今後非定常現象への関心の高まりからPC-PSPという高速応答型PSPなどの利用例[24]が増えており，非定常流中のフィルム冷却空気の挙動解析なども可能になるであろう。

TSPを用いた計測では，過渡的な温度変化を計測することが可能ではあるが，TSP自身やラッカーの熱容量による熱応答遅れが正確な計測を妨げる要因となっている。このため，塗布厚さを可能な限り薄くすることが強く推奨され，著者らが行なった検討では塗布厚さは概ね50μm程度が上限であると見積もった。一方で塗布の薄さは発光強度の低下にも直接つながるため，励起光の出力増強や露光時間を長くするなどで対応する必要がある。ただし，露光時間の変更で対応する場合は，伝熱現象の時間スケールとの兼合いにもなるので，伝熱学的な要素と計測機器の制限による要素を十分に吟味したうえで実験に臨む必要があり，過渡応答法による熱伝達率計測の場合は特に慎重な検討が必要である。

謝辞

本稿の執筆にあたり，岩手大学の大学院生である漆山諒氏・阿部遼氏に試験実施などのご協力をいただいた。ここに期して謝意を表する。

参考文献

(1) 武石賢一郎，ガスタービン翼冷却技術の最新動向，日本ガスタービン学会誌，Vol. 38, No. 2 (2010), pp. 78-84.
(2) Narzary, D.P., Lui, K.C., Rallabandi, A.P., and Han, J.C., Influence of Coolant Density on Turbine Blade Film-Cooling Using Pressure Sensitive Paint Technique, J. Turbomach., Vol. 134 (2012), 031006-1, DOI: 10.1115/1.4003025.
(3) Wang, G., Ledezma, G., DeLancey, J., and Wang, A., Experimental Study of Effusion Cooling With Pressure-Sensitive Paint, J. Eng. for Gas Turbines and Power, Vol. 139 (2017), 051601-1, DOI: 10.1115/1.4034943.
(4) Chen, X., Krawciw, J., Xia, H., Denman, P.A., Bonham, C., and Carrotte, J.F., Study of an effusion-cooled plate with high level of upstream fluctuation, Applied Thermal Eng., Vol. 184 (2021), 16126.
(5) 江上泰広，染矢聡，松田佑，満尾和徳，沼田大樹，多様な感圧・感温物質とその諸特性，可視化情報，Vol. 37, No. 147 (2017), pp. 11-16.
(6) Liu, T., and Sullivan, J.P., Pressure and Temperature Sensitive Paints, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2005).
(7) Kontis, K., A review of some current research on pressure sensitive paint and thermographic phosphor techniques, The Aeronautical Journal (2007), pp. 495-508.
(8) Khlalid, A.H., and Kontis, K., Thermographic Phosphors for High Temperature Measurements: Principles, Current state of the Art and Recent Applications, Sensors, Vol. 8 (2008), pp. 5673-5744.

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

(9) Brubach, J., Kissel, T., Frotscher, M., Euler, M., Albert, B., and Dreizler, A., A survey of phosphors novel for thermography, J. Luminescence, Vol. 131 (2011), pp. 559-564.

(10) Alden M., Omrane, A., Richter, M., and Sarer, G., Thermographic phosphors for thermometry: A survey of combustion applications, Prog. Energy and Combustion Sci., Vol. 37 (2011), pp. 422-461.

(11) Michael, R.C., Beshears, D.L., Allision, S.W., and Cathy, M.S., Phosphor thermometry at cryogenic temperatures, Review of Scientific Instruments, Vol. 68 (1997), DOI: 10.1063/1.1148125.

(12) Egami. Y., Fey, U., Klein, C., Quest, J., Ondrus, V., and Beifuss, U, Development of new two-component temperature-sensitive paint (TSP) for cryogenic testing, Meas. Sci. Technol. Vol. 23 (2012), DOI: 10.1088/0957-0233/23/11/115301.

(13) Kontis, K., Surface Heat Transfer Measurements Inside a Supersonic Combustor by Laser-Induced Fluorescence, J. Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 17, No. 3 (2003), pp. 320-325.

(14) Nau, P., Yin, Z., Lammel, O., and Meier, W., Wall Temperature Measurements in Gas Turbine Combustors With Thermographic Phosphors, J. Eng. for Gas Turbines and Power, Vol. 141 (2019), 041021-1.

(15) 船﨑健一，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.

(16) Han, J.C., and Rallabandi, A. P., Turbine Blade Film Cooling using PSP Technique, Frontiers in Heat and Mass Transfer, Vol. 1, 013001 (2010).

(17) Charbonnier, D., et al., Experimental and Numerical Study on the Thermal Performance of a Film Cooled Turbine Platform, ASME Turbo Expo, (2009), GT2009-60306.

(18) 漆山諒，船﨑健一，Vital, K.Y.P., 大北洋治，感圧塗料（PSP）を用いた高圧タービンにおけるフィルム冷却に関する研究，第48回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集（2020），B-16.

(19) 船﨑健一，感温液晶を用いた過渡応答熱伝達率計測法の精度（数値実験による評価），日本ガスタービン学会誌，Vol. 28，No. 5, (2000), pp. 397-404.

(20) 阿部遼，斎藤慧，船﨑健一，藤原浩介，出田武臣，クロスフローを伴うインピンジ冷却によるタービン翼前縁内部熱伝達率に関する研究（TSP法による過渡応答計測），第48回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集（2020），B-15.

(21) Paccati, S., Cocchi, L., Mazzei, L., Andreini, A., Numerical investigation on the Effect of Rotation and Holes Arrangement in Cold Bridge Type Impingement Cooling Systems, ASME GT2019-90770.

(22) Knappe, C., Algotsson, M., Andersson, P., Richter, M., Tuner, M., Johansson, B., Alden, M., Thickness dependent variations in surface phosphor thermometry during transient combustion in an HCCI engine, Combustion and Flame, Vol. 160 (2013), pp. 1466-1475.

(23) Kays, W.M. and Crawford, M.E., Convective Heat and Mass Transfer, 2nd edition, McGraw-Hill, (1980), p. 340.

(24) 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講演論文集（2020），B-17.

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

特集：ガスタービン計測技術とデータ活用の最新動向

高速応答感圧塗料による振動翼面非定常圧力計測の進展

Progress in Unsteady Pressure Measurement on Oscillating Blade Using Fast-Response Pressure Sensitive Paint

渡辺 紀徳*1
WATANABE Toshinori

キーワード：ターボ機械，翼振動，フラッター，非定常圧力計測，感圧塗料
Key Words：Turbomachinery, Blade Oscillation, Flutter, Unsteady Pressure Measurement, Pressure-Sensitive Paint

1．はじめに

ターボ機械で発生する翼列フラッターなどの空力弾性振動は，ジェットエンジン・ガスタービンにおける重大な問題として古くから研究が行われてきている。流れと構造が連成して発生する空力弾性振動は発生機構が大変複雑であり，その現象には現在でも未解明の要素が多々存在する。またエンジン性能の高度化により，翼列流れの高速化や複雑化，あるいは翼の軽量化が進んで，翼振動には厳しさが増大しており，新たな不安定要因が生起する状況となっている。

空力弾性振動の現象解明に向けて，数値解析が広範に利用されるようになっており，複雑な流れ現象のシミュレーションや，流体 - 構造連成解析による振動現象へのアプローチにより，大きな進展が見られている。一方で現象の解明に資する実験的な研究はあまり広く行われておらず，翼に働く非定常空気力の詳細な分布などの実験データは極めて限られている状況が続いている。このため，数値解析の妥当性を適切に検証する方法を見出すのが困難ということもしばしば発生している。

このような事情のもと，筆者らは以前学会誌で紹介したように，高速応答型の感圧塗料（PSP）により，振動翼列の翼面上で非定常圧力を計測する研究を進めている[(1),(2)]。前の報告では感圧塗料による計測法の基礎的な知識と，遷音速振動翼列の翼面非定常圧力および翼に働く非定常空気力の計測を試行した例を紹介した。その後，遷音速翼列風洞での実験を進め，翼列流れで発生する衝撃波の挙動と翼列フラッターとの関係を解明する研究を，感圧塗料計測と数値解析の双方で進めている[(3)]。ここでは研究の最近の結果を紹介するとともに，感圧塗料計測の今後の進展について若干の考察を述べる。

原稿受付　2021年７月26日
＊1　東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
〒113-8656　文京区本郷７－３－１
E-mail: watanabe@aero.t.u-tokyo.ac.jp

2．遷音速流れにおける振動翼面の非定常圧力計測

2.1　実験装置

ブローダウン式遷音速直線翼列風洞を用いて，振動翼列の翼に働く非定常空気力を計測する実験を行っている。実験設備については既報[(1)]を参照されたい。Fig. 1に供試翼列の概観，Table 1に主要諸元を示す。翼列は７枚の二重円弧翼（DCA）で構成されており，中央翼をblade 0として図のように番号付けする。非定常空気力の計測は一翼振動法によっており，中央のblade 0のみを強制的に並進加振し，この翼と周囲の静止翼で非定常空気力を計測した後，位相を考慮してそれらの計測結果を重ね合わせ，全翼が任意の翼間位相差で振動するときの非定常空気力を算出する。この実験ではblade 0と，両側の静止隣接翼 blade ±1の３枚の翼で計測を行った。

実験条件をTable 2に示す。流入マッハ数は1.2，インシデンスは０°，翼列前後の静圧比が1.15から1.40までの範囲で加振周波数を変化させて振動翼列実験を行った。加振周波数は20Hzから120Hzまで変えたが，ここでは40Hzの結果を示す。このとき無次元振動数は0.0156である。加振周波数は更に高く設定することが望まれるが，増加させると翼をはじめとする加振系構造の固有振動が無視できなくなり，非定常計測のノイズが大きくなるため振動数が制限されている。翼列は概ね二次元的であるが，0.5mmの翼端間隙が存在するので，わずかながら間

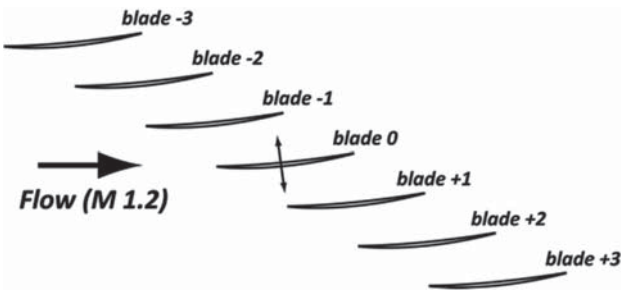


Fig. 1　Test cascade

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

Table 1 Specification of Test Cascade

Airfoil	DCA
Chord length	45.15 mm
Span length	49.5 mm
Pitch length	27.09 mm
Solidity	1.67
Tip clearance	0.5 mm
Maximum thickness	1.807 mm
Stagger angle	55.0°
Camber angle	10°

Table 2 Experimental Condition

Inlet Mach number	1.2
Reynolds number	1.2×10^6
Incidence angle	0°
Pressure ratio	1.15 – 1.40
Oscillation amplitude	0.8mm
Oscillation frequency	40Hz

隙漏れ流れの影響を受ける。測定部の風洞側壁の片側はガラスで内部を観察することができ，また，もう片方の側壁を金属鏡面にすることにより，シュリーレン法またはシャドウグラフ法で流れ場を可視化することができる。

2.2 計測法

PSPの特性や翼表面への塗布方法については既報[(1),(2)]に示した通りである。発光色素にはバソフェンルテニウム[Ru(dpp)3]2+[tris (4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthrolin) ruthenium (II) dichloride complex] を用いる。翼表面に陽極酸化処理を施して陽極酸化被膜を形成させ，発光色素を溶かしたジクロロメタンに浸漬することで発光色素が翼表面に保持され，感圧塗料塗布翼（PSP翼）が作製される。この感圧塗料はAA-PSP（Anodized Aluminum Pressure Sensitive Paint）と呼ばれる。

Fig. 2に計測システムを示す。LED光源からの光をバンドパスフィルタに通し，波長460±50nmの励起光とする。PSPの発光を短波長カットフィルター（透過波長570nm以上）によって取得し，高速度カメラで撮影する。発光強度Iと圧力Pとは次のStern-Volmer関係式で結びつけられる。

$$\frac{P}{P_{ref}} = C_0 + C_1 \times \frac{I_{ref}}{I} \qquad (1)$$

ここで基準値I_{ref}，P_{ref}には風洞の流れのない無風時の発光強度と圧力を用いる。また，校正係数C_0，C_1は翼表面に設けた数点の圧力測定孔で計測した圧力値とPSP発光強度を比較することにより求める。

取得された発光画像の処理方法は既報とほぼ同じであるが，振動翼に対する翼面座標の同定精度を高めるため，座標変換の方法を後述のように改良している。

感圧塗料計測で圧力分布を求めるには，通風時と無風時の画像を取得し，翼面上各点で両者の発光強度比を求める。通風時は空気力により翼がわずかに変形してしまうため，撮影画像をそのまま使用すると翼位置が無風時と一致せず，正しい圧力分布を算出できない。そのため，座標変換の一種であるアフィン変換を使用して，翼を100×250 pixelの長方形に変換する。その後空間ノイズ低減のために自身及び周囲の点で重みつき空間フィルタをかけ，各ピクセルで除算を行って発光強度比を算出する。

アフィン変換を行う際，翼面にドットのマーカー点をもつ翼（ドット翼）を使用した。コード方向，スパン方向それぞれ6点，計36点のマーカー点による位置情報を有する。ドット翼の各点が長方形の各点に対応するようにアフィン変換を行い，カメラ位置を動かさずに翼をPSP翼に差し替えて計測することで，同じ係数を用いればPSP画像もドット翼と同じようにアフィン変換できる。撮影画像内で翼はおよそコード方向250［pixel］，スパン方向100［pixel］の大きさであるため，ドットそれぞれの大きさの長方形に並ぶようアフィン変換を行う。

アフィン変換により，翼根が固定されている場合には十分な精度で翼面の各点の位置が特定され，撮影された翼の長方形への変換が行われる。しかし振動翼については，翼のすべての位置が時間変動するため，この方法だけでは翼面各部の座標に大きな誤差を生じる。そこでハフ変換（Hough transformation）を利用した自動位置同定法を新たに導入し，翼のエッジを高精度で捉える手法を構築した。詳細は文献(4)を参照されたい。

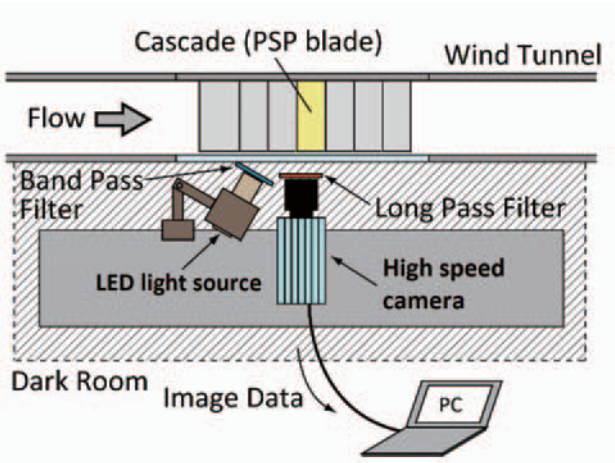


Fig. 2 PSP measurement system[(3)]

2.3 流体数値解析

数値解析の検証は実験結果との比較により行われるが，今回のPSP計測は実験法を構築している途上であるため，実験法の正確さを検証しなければならない。ここではPSPの計測結果を従来の実験法と比較するほか，過去に検証が行われている流体数値解析（CFD）手法も援用して多角的に計測精度を検討することにした。一方，流れ場の情報はPSP計測では明らかにできない部分が多いので，振動翼列の非定常流れをCFDで明らかにし，計測と相補的に現象を理解するアプローチが妥当である。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

ここでは研究室内製RANSコードにより翼列流れの三次元数値解析を行った。非粘性項は三次精度MUSCL法で高次精度化したSHUSスキームにより計算し，時間進行は定常解析では陰的オイラー法，非定常解析では3点後退差分で時間項を評価している。乱流モデルはWilcoxのk-ω二方程式モデルを用いた。計算格子はH-O-H型で，定常解析では1流路を用い，振動翼列の場合は11流路を計算領域とした移動格子で解析した。翼端間隙を実験と同様に設定している。非定常解析は一翼振動法に基づき，中央翼のみを振動させた。翼列入口で実験結果と同じ全圧と全温を境界条件として与え，出口静圧を実験の圧力比PRを実現するように指定した。

2.4　結果と考察

Fig. 3に定常計測の結果例を示す。本報告では翼列入口と出口の静圧比PRが1.25のケースについて述べる。流れ場のシュリーレン写真，油膜法による可視化写真（正圧面および負圧面），PSPにより計測した翼面圧力係数（正圧面および負圧面），中央スパン位置における翼弦方向の圧力係数分布が示されている。圧力係数C_pは

$$C_P = (P - P_{in})/(P_{tot} - P_{in}) \qquad (2)$$

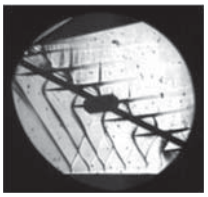
で定義される。ここでP_{tot}は測定部上流全圧，P_{in}は翼列入口における壁面静圧である。翼弦方向の圧力分布図には圧力孔による表面圧力の計測結果もプロットされており，PSPの計測が妥当な圧力分布を得ていることが分かる。また，次に示すCFDから得られた圧力分布も一緒に示されており，実験結果とよく一致している。シュリーレン写真から流れ場には前縁斜め衝撃波と翼間垂直衝撃波が形成されていることが鮮明に分かる。油膜法による翼表面流れの可視化写真と合わせると，垂直衝撃波が正圧面の中央翼弦付近，負圧面の後縁付近に位置していること，前縁斜め衝撃波は負圧面の中央翼弦付近にあることが分かる。垂直衝撃波の後ろでは翼面流れが剥離していると思われる領域が存在する。また，側壁近傍では壁の影響で流れが中央部に向かっており，コーナー剥離や翼端部の漏れ流れの影響が見えている。

Fig. 4にはこのケースに対応する流体数値解析の結果を示す。前述のように中央スパンにおける翼弦方向圧力分布は実験結果と良好に一致している。翼面の圧力分布もPSP計測の結果とよく似ている。翼表面の流速分布は剥離域など詳細な部分には少し異なるところが見られるものの，定性的には実験と似通った結果が得られている。

以上の結果から，翼列流れにおける衝撃波の様子がFig. 5のように捉えられる。前縁斜め衝撃波と翼間の垂直衝撃波が共存する流れで，筆者らはこれをDouble Shocks Patternと呼んでいる。これよりもPRを大きくすると翼間垂直衝撃波が前進し，前縁斜め衝撃波と合体するMerged Shock Patternに移行する。

Fig. 6はPR=1.25のときの，振動翼面における非定常圧力分布の計測例である。0番翼の負圧面および正圧面上の非定常圧力実部の分布をPSPの計測結果とCFDの結果を並べて示した。このケースでは非定常空気力虚部の大きさは実部に比べて非常に小さいので，ここでは省略する。実部の結果から，正圧面では一つの垂直衝撃波，負圧面では前縁斜め衝撃波と垂直衝撃波の二つの衝撃波の挙動により誘起された大きな非定常圧力の領域が顕著に見られる。PSPとCFDの結果は定量的には差異があるものの，定性的には同様の非定常圧力分布を捉えている。

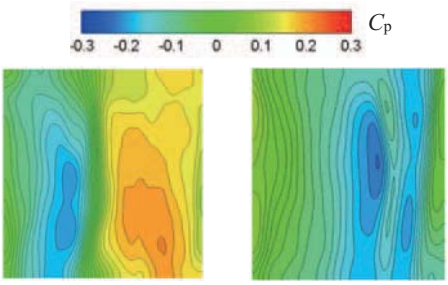
非定常圧力の計測結果および流れ場の可視化結果，更にCFDの結果を総合すると，Fig. 7に示すような衝撃波の非定常挙動を把握することができる。0番翼負圧面と+1番翼正圧面の間の流路では0番翼が下方に動くとき+1番翼の斜め衝撃波は角度が変化せず，0番翼負圧面



(a) Shlieren photo

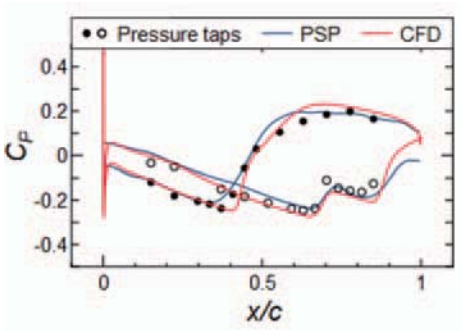
pressure surface　　suction surface

(b) Surface oil flow



pressure surface　　suction surface

(c) C_p distribution



(d) Chordwise distribution of C_p at mid-span

Fig. 3　Steady flow field[3]

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

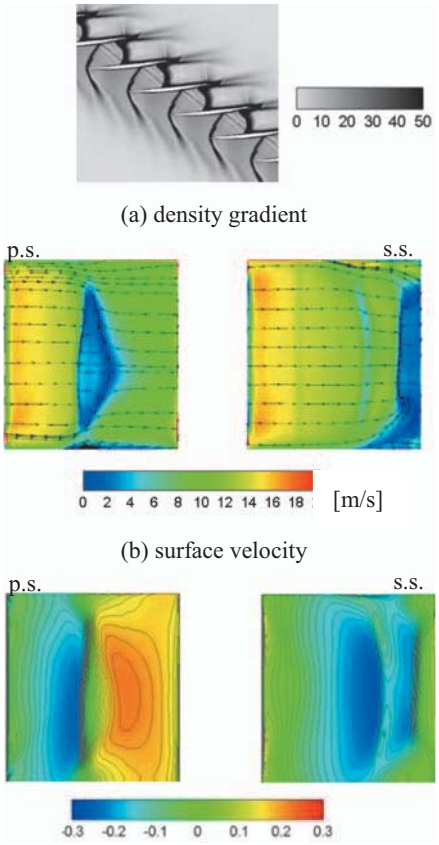


Fig. 4 CFD results of steady flow field[3]

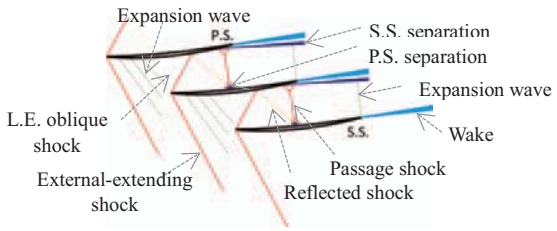


Fig. 5 Sketch of Double Shock Pattern[3]

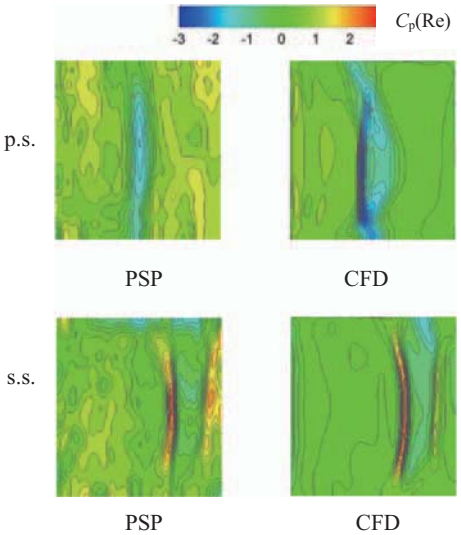


Fig. 6 Unsteady pressure distribution on blade surface[3]
(PSP and CFD, Blade 0, Real part of unsteady pressure)

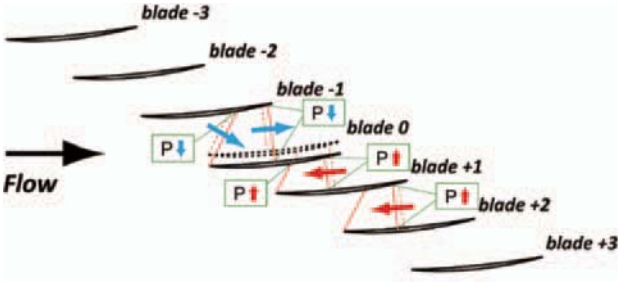


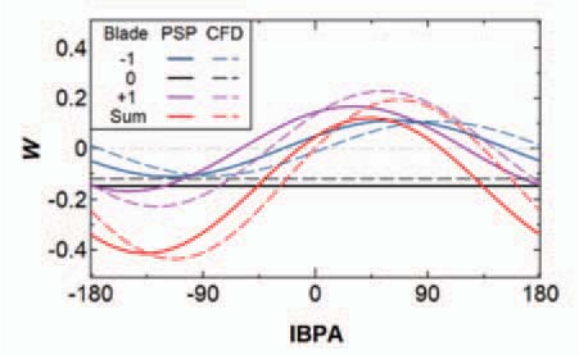
Fig. 7 Shock wave behavior responding to blade movement[3]

上の衝撃波位置は前縁に向かって移動する。翼間流路衝撃波はこれと同じ前縁方向に移動することが観察される。Double Shocks Patternにおけるこの運動方向は，PRの大きいMerged Shock Patternでは全く異なり，衝撃波の挙動が振動不安定性に大きな影響を与えることが詳細に明らかになった。

翼面上の非定常圧力分布に基づき，翼に働く非定常空気力を求めた結果をFig. 8に示す。Fig. 8 (a)は中央加振翼blade 0および両側隣接翼blade ±1に働く非定常空気力から，非定常空力仕事Wを求めた結果を示している。３枚の翼それぞれの仕事と，それらを一翼振動法によって合成し，全翼振動時の非定常空力仕事を算出した結果がプロットされている。横軸は隣接翼間位相差（Inter-Blade Phase Angle, IBPA）で，実線はPSP計測から得られた結果，破線はCFDの結果である。両者は比較的良好な対応を示している。Wが正のとき翼振動は不安定であり，３枚の翼のデータを合成した結果から，IBPAが−40° 付近から120° 付近の領域で振動が不安定となっている。実験結果ではWが最大になるのはIBPAが44° の時である。この時の各計測翼の非定常空力仕事の分布をFig. 8 (b)に，これらを一翼振動法で合成した結果をFig. 8 (c)に示している。やはり衝撃波による非定常空力仕事が顕著に現れており，翼振動の特性が衝撃波の挙動に支配されている様子が明確に観察される。このケースでは非定常空力仕事の符号から，負圧面上の２つの衝撃波による空気力が翼の振動不安定をもたらしていることが分かる。Fig. 8 (d)は(c)と同じ非定常空力仕事分布をCFDの結果から得たものである。PSPによる結果と定性的によく対応する結果が得られている。

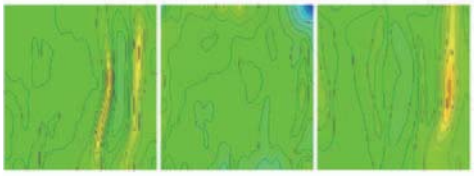
このような翼面上の非定常空気力分布は数値解析では多くの研究で求められているが，実験で取得された例はない。PSPによる計測は，非定常空気力の詳細な分布を明らかにできることから，今後，複雑な流れ場における翼列フラッター現象を解明するための有力な手段となり得ると期待される。また，数値解析法の検証にも有益なデータを提供できるものと思われる。もちろん計測の定量性を高めるため，また，実際的な条件での計測に拡張するために，更に研究が必要である。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.



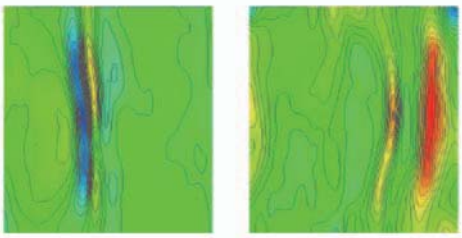
(a) W vs IBPA

-1 P.S.　　0 P.S.　　+1 P.S.



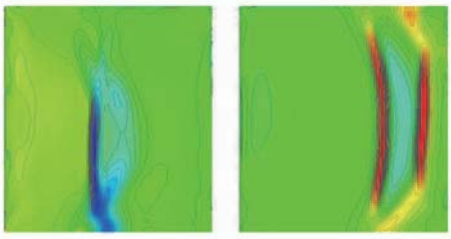
-1 S.S.　　0 S.S.　　+1 S.S.

(b) W on each blade (PSP)



P.S.　　S.S.

(c) Resultant W distribution on blade (PSP)



P.S.　　S.S.

(d) Resultant W distribution on blade (CFD)

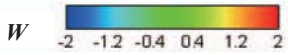


Fig. 8 Unsteady aerodynamic work[3]

3．感圧塗料計測の展開

3.1　計測精度の向上

PSP計測の精度は様々な要因により制限される。既報のように，主なものは発光強度の温度依存性や，圧力分解能の限界，校正における誤差などである。

本研究は衝撃波を伴う遷音速流れにおける振動翼を対象としており，翼には比較的大きな圧力変動が生じるため，信号強度としては有利な条件にあると思われる。温度に関しては，風洞内で翼面上の温度を計測した結果，ほぼ2K以内の分布に収まった。これは文献によればC_pの大きさにして0.015程度の誤差に対応する[5]。また，発光強度の計測分解能を実測で検討した結果，C_pの値として0.007程度の結果を得た。これらの誤差・分解能であれば今回の実験では十分な計測精度を確保できているが，例えば亜音速流れでの同様の非定常計測や，振動しない通常の翼列流れの非定常計測では不十分な分解能・精度である。今後の計測精度の向上にはPSP塗料の技術の進展も望まれるが，既存の手法でも，ハードウェア的に改善が可能な点もある。それは例えば励起光の強化や，カメラなどの計測系の感度向上である。筆者らも試行中であり，光源を強度の大きいLEDおよびレーザーに変更することを検討した結果，安全性への配慮などからLED光源への変更を実施した。また，高速度カメラの更新により，今後の精度向上が期待されている。励起光の強度に関しては，強過ぎると余計な反射光が発生して計測の妨げとなる場合もあるので注意が必要である。

発光画像の取得と処理方法にも様々な改良が考えられる。本実験装置ではガラス製の風洞側壁から励起光を翼面に斜め方向から照射し，ここからの発光を捉えているので，翼面の形状が歪み，画像処理でもとの長方形に変換せざるを得ない。この変換過程で座標情報に誤差が発生し，また振動により翼が若干変形する事情もある。これらの形状誤差要因にも対策が必要となる。風洞内に超小型カメラを設置するなどの方策も今後は考えられるかも知れない。

温度依存性については，PSP計測と同様の系について感温塗料（TSP）を用いた計測を行い，結果を比較してPSPの計測結果を補正する例もある[6],[7]。また，PSPとTSPを混ぜた塗料により，圧力分布と温度分布を同時に計測して温度補償した圧力計測を行う研究もあるが，問題点も多々あり，未だ一般化はされていない。JAXAでは航空機主翼の圧力分布をPSPにより飛行中に計測する研究が行われて成果を上げており，今後の進展が期待される[8]。

3.2　高周波数振動への対応

振動翼列風洞による実験でしばしば問題となるのは，実現できる振動数が低いことである。この実験では実振動数200Hz程度が限界で，これ以上の振動数では翼模型などの振動系のどこかの部分で固有振動の影響による振動が大きくなり，精度の良い実験ができなくなる。使

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

用しているPSPの時間応答性は十分高く，文献値では34.8 μsとなっており[9]，20kHz以上の振動応答性があるので，通常の振動翼列実験には十分である。一方，このAA-PSPは塗装面を陽極酸化処理によって多孔質化する手法で時間応答性を高めているため，使用する金属がアルミニウム合金に限られる。このため，翼の材質を変更して固有振動数を高くするなどの措置が取れない。これに対してポリマー・セラミックPSP（PC-PSP）と呼ばれる高速応答PSPでは，二酸化チタンなどの粒子とポリマーを用いて空隙の多い多孔質層を表面に形成し，塗料のバインダーとして使用する[6],[10]。この手法では翼材料として金属，複合材，アクリルなど広い範囲の選択が可能であり，翼の固有振動数を高めることも可能と考えられる。しかしながら表面粗さの問題などがあり，手法の改良が研究されている。

4．おわりに

高速応答感圧塗料AA-PSPを用いて遷音速振動翼列における翼面非定常圧力を計測する手法について最近の進捗を紹介した。また，CFDの結果と組み合わせて流体関連振動の現象解明にアプローチする可能性を示した。計測精度などまだまだ今後の発展が必要であるが，面の圧力分布を連続的に計測できる手法として，流れ現象の解明やCFDの検証データ取得に極めて有用な計測法であり，これからも利用が拡大されていくものと思われる。塗料自体の高性能化や信号取得および処理技術の向上，また計測法の簡便化と一般化が進展していくことを期待したい。

謝辞

ここで紹介した研究は，東京大学の将来航空推進システム技術創成社会連携講座を中心に実施されている。講座に支援いただいている株式会社IHIに深く感謝する。

参考文献

(1) 渡辺紀徳，感圧塗料を用いた振動翼面上の非定常圧力の計測，日本ガスタービン学会誌，Vol. 47，No. 3（2019），pp. 166-172.

(2) Watanabe, T., Azuma, T., Usawa, S., Himeno, T., Inoue, C., Unsteady Pressure Measurement on Oscillating Blade in Transonic Flow Using Fast-Response Pressure-Sensitive Paint, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 140, pp. 061003-1 - 061003-8（2018）.

(3) Gan, J., Watanabe, T., Himeno, T., Effect of Shock Wave Behavior on Unsteady Aerodynamic Characteristics of Oscillating Transonic Compressor Cascade, ASME GT2021-59416（2021）.

(4) Gan Jiuliang, Unsteady Aerodynamic Characteristics of Compressor Oscillating Cascade in Transonic Flow with Shock Waves, 東京大学博士論文（2019）.

(5) Kameda, M., Tabei, T., Nakakita, K., Sakaue, H. and Asai, K.,“Image Measurements of Unsteady Pressure Fluctuation by a Pressure-Sensitive Coating on Porous Anodized Aluminium”, Measurement Science and Technology, 16（2005）, 2517-2524, 2005.

(6) 中北和之，杉岡洋介，永井大樹，非定常PSP/TSP計測技術，可視化情報，Vol. 38，No. 148，pp. 3-9（2018）.

(7) 永井大樹，満尾和徳，中北和之，杉岡洋介，小澤啓伺，依田大輔，航空宇宙分野におけるPSP/TSPの応用例と現状，可視化情報，Vol. 38，No. 148，pp. 17-24（2018）.

(8) JAXA航空技術部門ホームページ：https://www.aero.jaxa.jp/research/basic/aerodynamic/measurement/news190308.html（参照日2021年7月17日）.

(9) Sakaue, H. and Sullivan, J.P.,“Fast Response Time Characteristics of Anodized Aluminium Pressure Sensitive Paint”, 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, AIAA 2000-0506, 2000.

(10) Tamao Sugimoto, Yosuke Sugioka, Daiju Numata, Hiroki Nagai, Keisuke Asai, Characterization of Frequency Response of Pressure-Sensitive Paints, AIAA JOURNAL, Vol. 55, No. 4, pp.1460-1464（2017）.

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

特集：ガスタービン計測技術とデータ活用の最新動向

ガスタービン動翼の温度計測

Temperature Measurement of Gas Turbine Blade

谷口 智紀[*1]　都留 智子[*2]
TANIGUCHI Tomoki　TSURU Tomoko

キーワード：ガスタービン，動翼，温度計測，パイロメータ
Key Words：Gas Turbine, Turbine Blade, Temperature Measurement, Pyrometer

1．はじめに

ガスタービンの高効率化には高温化・高圧力比化が不可欠であり，その実現のために冷却技術および遮熱コーティングや耐熱合金などの材料技術の開発がこれまで続けられてきた。しかし，近年は高い効率だけでなく，部品の長寿命化や水素を初めとした様々な燃料への対応など要求が多様化している。また，太陽光や風力などの不安定な再生可能エネルギーの導入が拡大していることに伴い，負荷変動に対する高い応答性も求められるようになるなど要求は複雑化しており，タービン部品の作動環境も益々厳しいものとなってきている。このような要求に応え，タービン部品の健全性・信頼性を保証するためには，運用中の各部品の温度をできるだけ高い精度で知る必要がある。近年はコンピュータ性能の進歩とともにソフトウェアも大きく発展し，例えば熱流体連成解析（Conjugate Heat Transfer, CHT解析）によって運用中の部品温度を推定することも容易に行えるようになってきた。しかし，解析精度がまだ十分とは言えないことや，実際の運用では解析で想定していないような条件となっていることも多いことから，最終的には実際の運用状態での温度計測が欠かせない。

タービン部品の中でも回転部品は静止部品に比べてその損傷がガスタービン全体の大規模な被害につながりやすく，特に正確な温度評価が必要となる。一方で回転部品は計測のための施工や出力信号の取り出しなどの点で静止部品の計測に比べて難易度が格段に上がる。また，同じ回転体の計測でも実機試験はリグ試験に比べてガスの温度や圧力，回転数が高く，スペースも限られているなど厳しい条件が揃っており，多くの困難が伴う。加えて近年はガスタービン開発にかけられる期間も短くなる傾向にあり，できるだけ短時間で精度の高い効率的な計測を行うことが望まれる。

実機での温度計測方法としては多くの技術があるものの，精度や計測に要する時間，費用などに一長一短があり万能なものはないのが実状である。本稿では代表的な計測手法について概略を述べるとともに，当社での計測事例を紹介する。

2．タービン動翼の温度計測

当社の常用発電用ガスタービンのラインナップをFig. 1に示す。1 MWクラスから30MWクラスまで幅広い出力レンジのガスタービンを揃えており，非常用の小型ガスタービンも加えるとさらに種類が多くなる。これらの機種の開発においては，性能や信頼性に問題がないことを確認するために様々な試験が行われ，特にタービン部は温度計測試験が繰り返される。

実機での温度計測は，動翼・静翼いずれの場合もリグ試験に比べて遥かに高い温度・圧力下で行われる。また，計測のためのセンサ施工や計測準備にかかる期間，費用もリグ試験とは比べ物にならない上，計測結果の評価に

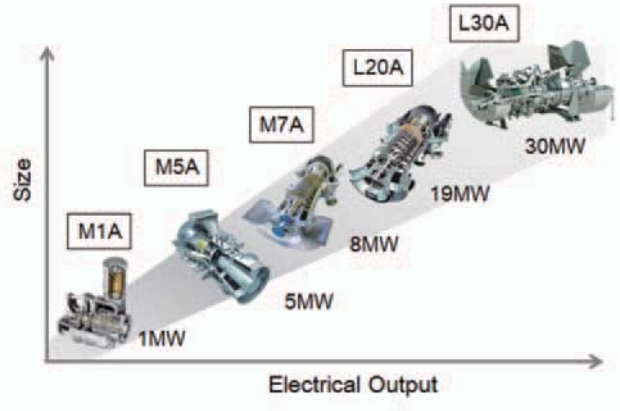


Fig. 1　Kawasaki GT product line

原稿受付　2021年7月12日
＊1　川崎重工業㈱
エネルギーソリューション&マリンカンパニー
エネルギーシステム総括部 ガスタービン開発部
〒673-8666　明石市川崎町1－1
＊2　川崎重工業(株)　航空宇宙システムカンパニー
エンジン技術総括部　エンジン技術開発部
〒673-8666　明石市川崎町1－1

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

も多くの困難を伴う。そのような中で用いられる温度計測手法は動翼・静翼のいずれにも適用できるものがほとんどであるが，動翼特有の難しさとして下記の点が挙げられる。

(1)回転体からの信号の取り出し：静翼であれば翼に施工したセンサケーブル（熱電対など）をそのままガスタービン外部に取り出して計測機に接続すればデータを取得することができる。一方，動翼の場合は回転体のため，センサからの信号を静止体側に取り出すためにスリップリングやテレメータなどの高額なデータ転送機器が必要となる。

(2)回転によるセンサ耐久性の低下：動翼・静翼ともに高温・高圧の厳しい環境下での計測になるが，動翼の場合はこれに加えて回転による遠心力も受けることになる。温度計測用のセンサは遠心力に耐えるように静翼よりも強固な方法で施工されるが，耐久性は静翼の場合に比べると低くなる。当社のような中小型ガスタービンは回転数も高いため，遠心力が大きく，一層の対策が必要となる。

(3)センサ施工による翼強度の低下：翼温度を計測するためのセンサを翼部に埋め込むことが多いが，高温・高応力部品である動翼にセンサを埋め込むための溝や孔を加工することにより翼強度が低下し，翼の損傷を招く恐れがある。当社の中小型ガスタービンでは翼が小さく肉厚も薄いため，加工深さの影響が大きくなる。

3．タービン動翼の温度計測方法

本章では，当社で実績のある方法を中心にタービン動翼の温度計測方法の概略および当社での計測事例を紹介する。Fig. 1に示したように当社では小型から中型まで幅広いラインアップのガスタービンを揃えており，その構造やサイズは大きく異なる。そのため実機の温度計測では，精度やコストだけでなく構造的な制約も大きく，それぞれの機種に適した方法が選ばれる。

3.1 熱電対

熱電対は２種類の金属線の先端同士を接触させて回路を作り，接合点に発生する熱起電力を通じて温度差を測定するもので，それ自体は安価で精度も高いことから工業用の温度計測方法としては最もよく用いられる。

当社ガスタービンの動翼に熱電対を施工した例をFig. 2に示す。作動中の翼の温度を正しく計測するためには，熱電対によって翼周りの流れが乱れないようにする必要があり，翼部に掘った溝に熱電対を這わせてロウ付けなどで固定した後，翼表面を元の形状に仕上げる(Fig. 2)。前章で述べた通り，高温・高応力で運用される翼面に溝を掘ることになるため，事前に強度解析を行い問題がないことを十分に確認した上で施工位置が決定される。翼の後縁や冷却翼で肉厚が薄い部位では，溝加工後の余肉厚さが十分に確保できず，施工範囲が限定されることも多い。

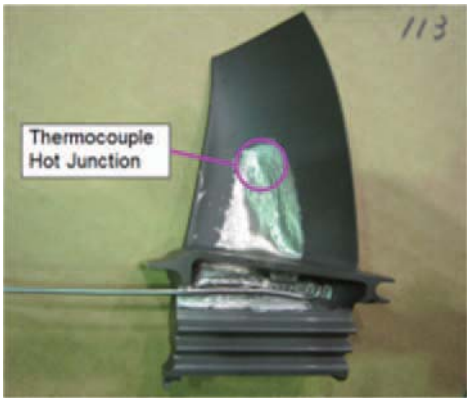


Fig. 2 Embedded thermocouple sensor

動翼に埋め込んだ熱電対からの出力を静止体側に取り出すためには，スリップリングやテレメータなどのデータ転送機器を用いる。これらはロータ軸端に取り付けられ，翼部からの熱電対がロータ内部を経由して軸端まで通されて機器に接続される（Fig. 3)。熱電対は，運転中の高い遠心力によって断線することがないようにしっかりと固定しておく必要があり，配線作業に多くの時間を要することが大きなデメリットとなる（Fig. 4)。

熱電対による計測のもう１つのデメリットとして，局所の温度計測であることが挙げられる。計測されるのは接点部の局所温度のため，広い範囲の温度分布を知りた

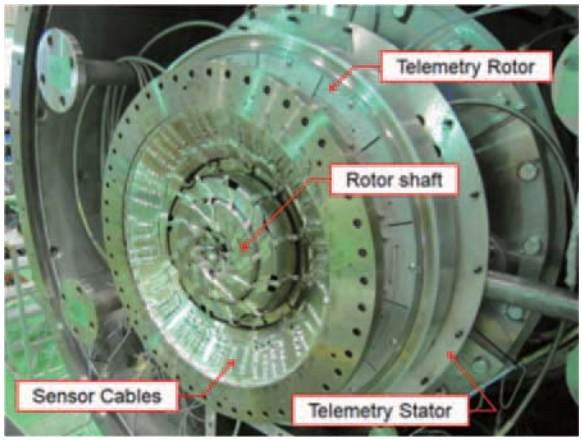


Fig. 3 Telemetry system

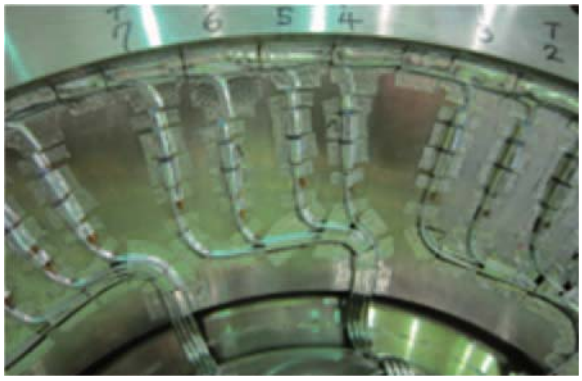


Fig. 4 Instrumentation on turbine rotor

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

いときには多くの熱電対を施工する必要がある。しかし実際には，スリップリングやテレメータのチャンネル数により計測点数を制限される。したがって，翼面の広い範囲の温度分布を得るためには，後述するサーモペイントやパイロメータなどの別の計測手法が併用される。また，計測されるのは接点部が位置する深さでの温度で，表面温度ではない。通常，最も知りたいのは表面の温度であることが多いため，埋め込みによる影響を補正する必要がある。熱電対のシース材質や施工方法によって計測される温度が大きく変わるという報告[1]もあり，正確な温度評価のためには計測だけでなく補正の精度向上が重要となる。特に，冷却翼では翼の肉厚方向（溝深さ方向）に大きな温度勾配があり，埋め込み深さの影響が大きく，補正量も大きくなる。そのため，CHT解析や熱伝導解析によって得られた翼メタル内部での温度分布を元に補正量を決定している（Fig. 5）。

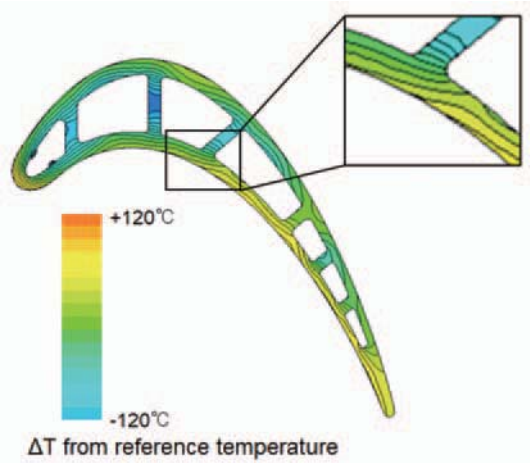


Fig. 5　Blade temperature distribution（CHT analysis）

熱電対での温度計測には上述の通り配線作業や結果の評価にいくつかの困難が伴うものの，ガスタービンの運転パターンを問わずに長時間にわたってリアルタイムで温度を計測し続けることができる点が最大のメリットとなる。後述するが，温度計測方法は多々あるものの運転中に到達した最高温度しか知ることができないものが多い。それに対して熱電対では，温度をリアルタイムで計測することが可能で，起動・停止時や負荷の投入・遮断時のような過渡的な状態でも温度を計測し続けることができる。近年はガスタービンに高い負荷応答性が求められるが，タービン部品は急速な温度・応力変動にさらされるため，その影響評価には過渡状態の温度計測が不可欠である。Fig. 6は当社ガスタービンでの過渡状態の温度計測例で，このように動翼だけでなくディスクについても温度を詳細に計測し，応力解析結果と合わせることにより過渡状態での健全性を評価している[2]。

3.2　サーモペイント

サーマルペイントとも呼ばれる示温塗料で，ペイントに含まれる顔料化合物の熱分解によってその組成が変化

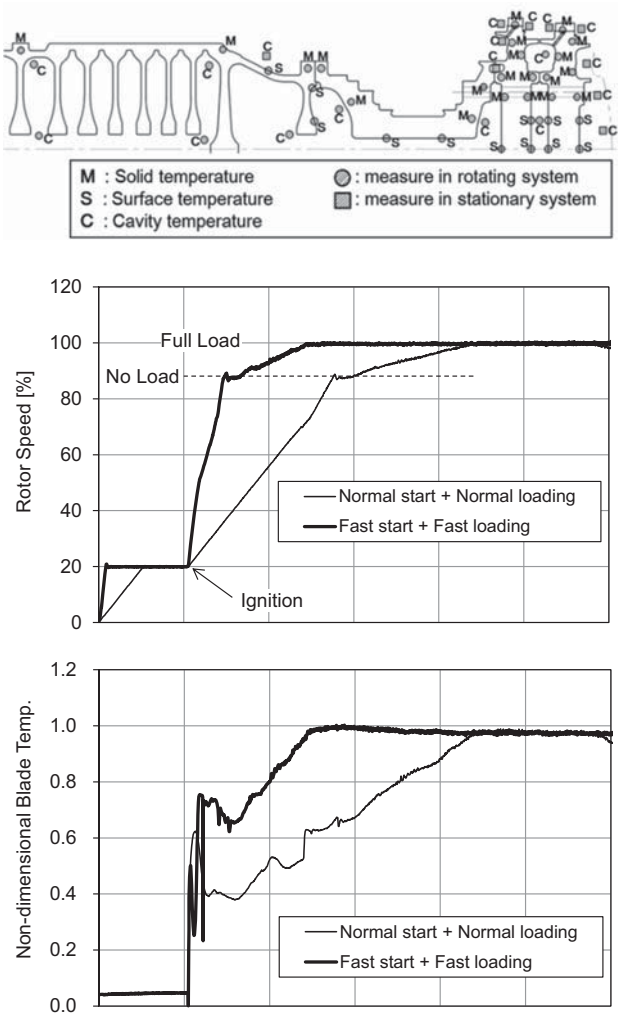


Fig. 6　Temperature measurement under transient condition

し色味が変わることを利用して温度を知ることができる。実機試験に用いられるのはこの色変化が不可逆性のもので，加熱によって一度変色すると温度が下がっても元の色には戻らない。そのため運転中の温度の推移は知ることができず，到達した最高温度のみを計測することになる。また，色変化が起こる温度域が限られているため温度分解能が悪く，計測精度という点では熱電対に大きく劣る。一方で，計測配線の施工作業を必要としないことや塗布範囲に応じて広い領域の温度分布を知ることができ，ホットスポットの有無を容易に確認できること，塗布した面の表面温度を計測することができることなど長所も多い。

色変化が起こる温度域はペイントによって異なるため，計測したい温度域によって複数種のペイントを併用したり使い分けたりする。また，同じペイントでも加熱時間によって色変化が起こる温度が変わるため，運転パターンに合わせた加熱条件で較正試験を行って色見本を作成し，温度評価に役立てている（Fig. 7）。

サーモペイントを用いた温度計測の大きなデメリットとしては，運転パターンの制約と温度評価のために塗布部品の取り出しが必要なことが挙げられる。色変化が起

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

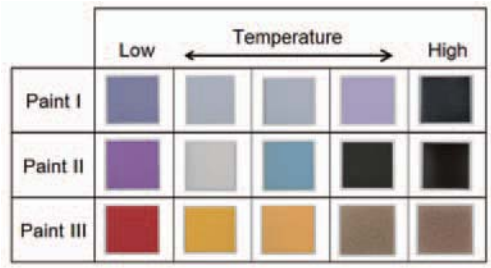


Fig. 7 Color change of thermopaint

こる温度は加熱時間に依存し，また長時間の運転ではペイントが剥離しやすいことから，運転試験は数分間だけ最高温度で保持した後，速やかに停止するようなパターンとなる。したがって，温度計測のためだけの運転となることが多く，他の項目の確認試験と組み合わせることが難しい。また，試験後は温度評価のためにタービン部を分解して塗布部品を取り出さなければならず，運転時間に比べて評価までにかなりの時間を要するため，非効率的な試験となりがちである。しかし，塗料自体は安価で，施工も翼にそのまま塗布するだけと容易なことから，当社では組立・分解が容易な小型機種を中心によく用いられる（Fig. 8）。

Fig. 8 Painted blades

サーモペイントと同様に翼面に塗布して温度を計測するもので比較的新しいものとして，英国のSensor Coating Systems（SCS）社が開発したサーマルヒストリーペイント（Thermal History Paint, THP）がある。これは，発光物質をドープしたペイントを計測対象に塗布して運転した後，取り出して計測した燐光強度の寿命減衰から運転中の最高到達温度を推定するものである。運転パターンに合わせた加熱パターンで較正試験を行い，寿命減衰と温度の関係を得ることにより，運転中の最高到達温度を知ることができる（Fig. 9）。タービン翼などの高温部品では，ペイントの代わりにセラミックコーティングにドープして溶射され，サーマルヒストリーコーティング（Thermal History Coating, THC）と呼ばれるが，計測原理は変わらない。施工及び温度評価は開発元のSCS社で行う[3]。

温度評価のための燐光強度測定はペン型のプローブを

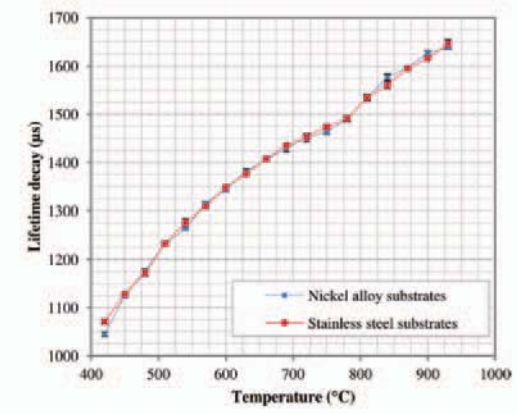


Fig. 9 Calibration of THP and THC [3]

コーティング塗布面に当てて行われるため，任意の位置の温度評価が可能で，サーモペイントと違って温度分解能も高く，詳細な温度分布を得ることができる。Fig. 10は当社での計測事例で，マーカーで示された200点以上の翼面位置で温度評価を行っている。

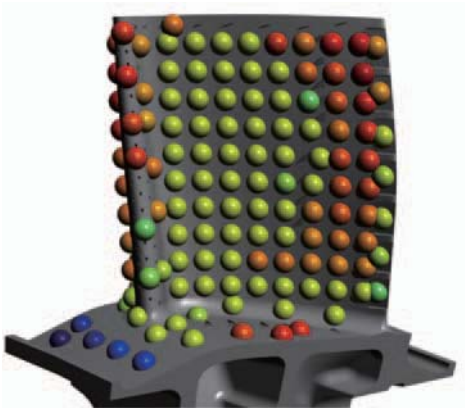


Fig. 10 Temperature distribution obtained with THC

3.3 サーモクリスタル

炭化ケイ素（SiC）の格子構造が温度と時間によって不可逆変化を起こすことを利用して温度を推定する技術で，米国のLG Tech-Link Global社が開発したUniform Crystal Temperature Sensor（UCTS）が代表的である。UCTS（SiCチップ）は0.2×0.2×0.38mmと非常に小さく，これを翼に埋め込んで運転した後，取り出してX線回折を行い，結晶構造の変化から運転中の最高温度を推定する。最高温度しか知ることができない点や，運転後にタービン部を分解して施工部品を取り出す必要がある点ではサーモペイントと変わらないが，運転パターンを考慮して最高温度が推定されるため，運転条件の制約がほとんどない点が大きな長所である。また，センサ自体の精度も±3.3℃と非常に高いため，多くのガスタービンメーカーで使用実績がある[4],[5]。サーモクリスタルを埋め込む穴は深さ0.5mm程度と非常に小さいため，翼面の薄肉部など熱電対が施工しにくい部位でも施工できる。当社動翼の後縁薄肉部に施工した例をFig. 11に示す。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

Fig. 11 Thermocrystal installation

サーモクリスタルは翼面に加工した穴に設置し，伝熱セメントを充填して固定される。穴は浅いものの伝熱セメントの熱伝導率は約 6 W/m・Kで翼母材に比べてかなり小さいため，温度評価の際は熱電対のときと同様に埋め込みによる影響を補正する必要がある。そのため，熱電対のときと同様に，CHT解析結果などを元に補正量を決定している。

3.4 パイロメータ

パイロメータは放射温度計の一種で，計測対象物の表面から放射される光の強度を計測することにより表面温度を求める非接触の温度計測装置である。タービンの温度計測に用いられるパイロメータは単波長のものが多く，放射光の強度と温度の関係は次式で表される。

$$I(\lambda,T)=\varepsilon\cdot\frac{2hc^2}{\lambda^5}\cdot\frac{1}{e^{hc/\lambda kT}-1} \qquad (1)$$

I : 分光放射輝度，ε : 放射率，λ : 波長，T : 温度，
h : プランク定数，k : ボルツマン定数，c : 光速度

ここでλは計測する波長で，タービンの温度計測では近赤外線領域の中から約1.0 μmまたは約1.6 μmの波長が選ばれることが多い。これは，この波長帯であれば主流ガス中の成分からの放射および主流ガス中の成分への吸収による影響を受けずに，計測対象からの放射光を計測できるためである。

当社で用いているパイロメータの主な仕様をTable 1に示す。焦点径は約 2 mmで，この範囲の平均的な温度を計測する。後述する通り，計測中は焦点が移動するため幅広い範囲の温度を計測することが可能である[6]。

計測の際は，放射光を検出するディテクタを内蔵したユニットがガスタービンのケーシング外側に取り付けられ，ミラーやレンズから構成される光学系ユニットのみがケーシング内部に挿入される（Fig. 12）。動翼からの放射光はこの光学系を介してディテクタに取り込まれ，ロータ回転と同期させることにより計測位置を特定することができる。当社で用いているパイロメータはミラーが可動式で径方向の広い範囲を見ることができ，ロータの回転と合わせて全翼の幅広い領域の温度を計測することを可能としている（Fig. 13）。一度の計測で全翼の温度評価が可能で，評価のためのガスタービン分解も必要としないことから，非常に効率的な計測が可能である。

Table 1 Specification of pyrometer

Sampling Rate	1MHz
Wavelength	1.6 μm
Measurement Range	550 ～ 1200 deg.C
Spot Diameter	approx. 2mm
Accuracy	±0.5%RD（≃±2deg.C）

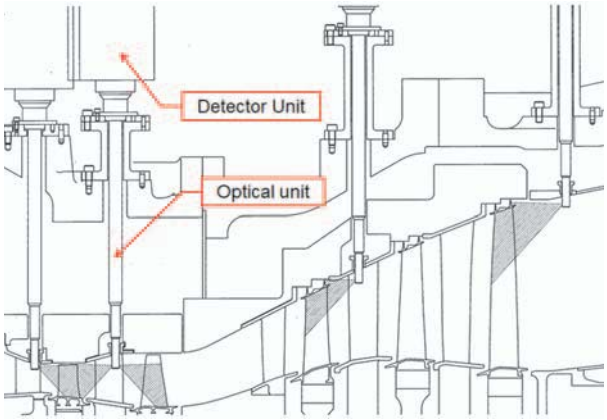


Fig. 12 Pyrometer installation

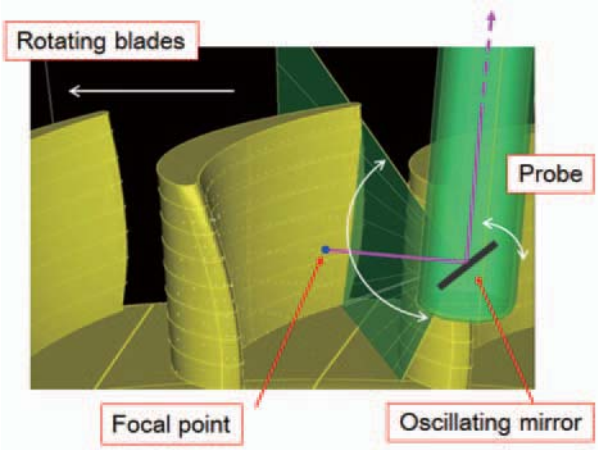


Fig. 13 Pyrometer probe

パイロメータ計測の最大の難点としては，(1)式からも明らかなように，用いる放射率の値によって算出される温度が大きく変わってしまう点が挙げられる。そのためできるだけ正確な値を用いる必要があるが，翼の材質や表面粗度，翼面に対する計測角度など多くの要因によって変化するため，正確な値を知ることが難しい。したがって，Fig. 14に示すように翼と同材の試験片を用いて放射率を計測する要素試験を行ったり[7]，熱電対やサーモクリスタルなど他の手法による計測も合わせて行うことにより，評価精度を向上させている。

パイロメータで計測した 1 段動翼の温度分布をFig. 15に示す。スポット径は約 2 mmであるが，翼腹側の全

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

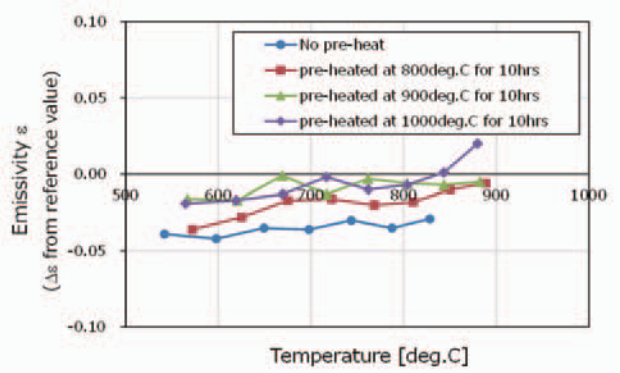


Fig. 14 Measured Emissivity

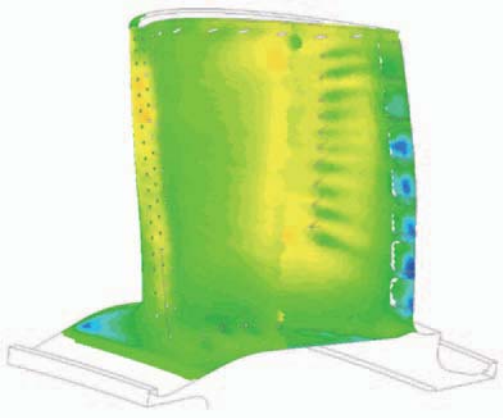


Fig. 15 Pyrometer measurement result

面が計測できており，フィルム空気の流れや温度分布を細かく捉えられていることがわかる。このような詳細な温度分布が得られることから，中型クラスのガスタービンを中心にパイロメータを用いた温度計測を行っている。

4．各計測方法の結果比較

3章で述べた各方法で得られた翼中央断面の温度を比較したものをFig. 16に示す。いずれも計測値を翼表面温度に補正した温度で，補正量は同章で述べた方法により決定した。それぞれ個別に補正量を決定したにも関わらず，得られた結果はよく合っており，各計測方法およびその評価方法の妥当性が確かめられた。

ガスタービンの開発においては温度計測試験が繰り返されるが，このように多くの計測手法を毎回適用するのはコストや時間の関係で非現実的であるため，各計測方法の妥当性が確認されてからは，求められる精度やスピードに応じた方法が適宜選択される。

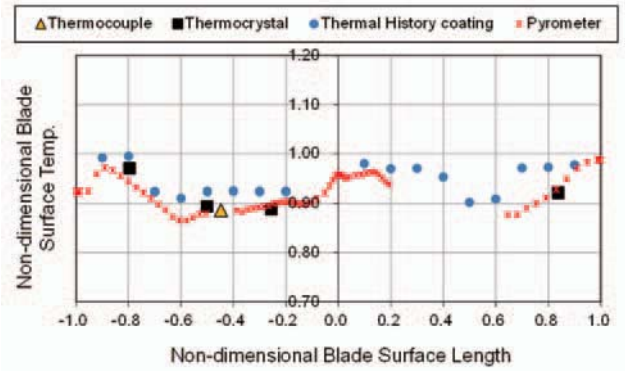


Fig. 16 Temperature distribution on blade surface

5．おわりに

本稿ではタービン動翼の温度計測について，川崎重工での計測事例を中心に紹介した。当社では中小型クラスで幅広い出力レンジのガスタービンを揃えており，計測対象となる動翼のサイズも様々である。また，動翼の作動条件やタービン部の構造などの計測環境も大きく異なり，それぞれに特有の難しさがあるものの，これらの計測により経験と実績を積み重ね，計測技術を向上させてきた。

今後は，三次元積層技術（Additive Manufacturing）の発展による冷却構造の複雑化，脱炭素社会の実現に向けた水素燃料の本格的な導入などにより，タービンの高温化はますます進み，より高い精度での計測が求められるようになると予想される。一方，CHT解析などの温度解析技術はさらに発展し，ガスタービンの開発において大きな役割を果たしていくことが期待される。しかし，そのためには解析精度の検証が不可欠であり，実機での温度計測はより一層重要性を増すであろう。当社としても，今後新たな計測手法の導入も含めて計測技術の向上に努めていく所存である。

参考文献

(1) Ginzbursky,L., et al, “Optimization of temperature measurement technique used in high heat flux environment”, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2011*, GT2011-45269.

(2) Tamai,T., et al, “Kawasaki L30A Gas Turbine Upgrade for Improved Efficiency and Fast Demand Response”, *Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2019*, IGTC-2019-065.

(3) Feist,J.P., et al, “Validation of Surface Temperature Measurements on a Combustor Liner Under Full-Load Conditions Using a Novel Thermal History Paint”, *J. Eng. Gas Turbines Power*, Apr 2017, 139 (4).

(4) Sheth.A., et al, “Uniform crystal temperature sensor (UCTS) application to validation, verification and technical comparison process”, *Proceedings of ISABE 2015*, ISABE-2015-20264.

(5) Ginzbursky,L., et al, “Long duration uniform crystal temperature sensor application in industrial gas turbine for cooling design validation”, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2020*, GT2020-15010.

(6) Taniguchi,T., et al, “Application of an optical pyrometer to newly developed industrial gas turbine”, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012*, GT2012-68679.

(7) Taniguchi,T., et al, “Temperature Measurement of High Speed Rotating Turbine Blades”, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2006*, Paper No. GT2006-90247.

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

特集：ガスタービン計測技術とデータ活用の最新動向

画像解析技術導入による量産エンジン組立品質保証精度の向上

Improvement of Mass Production Engine Assembly Quality Assurance by Introducing Image Analysis Technology

佐野 瞬軌＊1
SANO Shunki

キーワード：目視検査，画像解析，ディープラーニング，ローコード，品質向上
Key Words：Visual Inspection, Image Analysis, Deep Learning, Low-Code, Improvement of Quality

1．はじめに

航空機用ガスタービンエンジンの量産において，その品質保証には高いレベルが求められる。Honda Jetに搭載されているHF120ターボファンエンジンは，米国のHonda Aero, Inc（以下HAI, Fig. 1）にて生産されているが，その工程はFAA（Federal Aviation Administration）による厳しい審査を経て認定され，工程の品質を日々維持改善していくことが求められている。

Fig. 1　Honda Aero, Inc Factory

航空機の生産台数は自動車などに比べるとはるかに少ない。年間10万台以上の生産数があれば，特定部品専用の計測装置を多数並べることにより，品質確認をすべて機械装置にて行う事も有効な手段ではあるが，少量生産の現場（Fig. 2）にとってそれは有効ではない。

そのため，Fig. 3のように人の目視検査に頼らざるを得ない場面が多々あるが，その際に見逃しが発生すると後工程で発見されて修正や改修が発生してしまう。これは納期遅延や，コスト増の要因となるため，そういった目視検査をいかに効率よく計測装置で補い，その精度を向上させていくかが課題である。

Fig. 2　Engine Assembly Area

Fig. 3　Visual inspection

本稿では，目視検査工程に画像解析技術を導入することによって，量産エンジンの組立品質の保証精度を向上させた事例について紹介する。

2．画像解析技術導入の検討

2.1　AIの活用

昨今のIT技術の発達により，AIを活用することによって目視検査を画像解析で置き換えることが可能となってきた。しかしながらすべての工程にAIが適している訳

原稿受付　2021年7月12日
＊1　㈱本田技術研究所
先進パワーユニット・エネルギー研究所 GT開発室
〒351-0193　和光市中央1丁目4番1号
E-mail: shunki_sano@jp.honda

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

ではない。AIを十分に機能させるためには，ディープラーニングの際の学習データが必要である。

部品単体レベルでは，良品と不良品それぞれのサンプルがある程度の数そろわなければ，学習用の供試データが不十分になるためAIは適切に機能しない。例えばエンジン１台に一つしかないFig. 4のような部品の場合，製造されるのは少数である。その中で写真のような不良が発生した場合，たとえ不良率が50％だったとしても，必要なサンプル数を集めるには年単位で時間がかかってしまう。こういった部品は，AIの導入に時間をかけるよりも，不良率の低減に時間をかけた方が費用対効果を高めることが出来る。

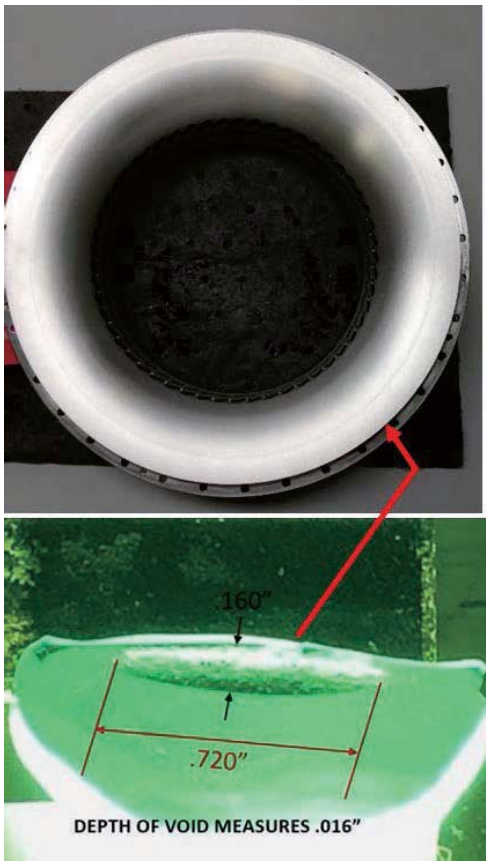


Fig. 4　Engine part and its defective portion

また，部品点数の多いものとして翼部品などが挙げられるが，複雑な曲面を持っていることにより，ライティングのあたり具合によって傷の見え方が変わってしまうため，AIを活用する難易度が高い。人の目によるチェックであれば，部品を持ちながら様々な角度に動かすことによって傷を傷だと認識できるが，AIが判定するベースのデータは１枚の画像である。ピクセルに表現された色の濃淡の配列から傷の特徴を検出するAIでは，傷と傷でないものの特徴に判定基準を引くことが難しい。そのため，Fig. 5のような特定の傷を検出させるためには，部品の部位や傷等の種類ごとにそれ専用の画角とライティングで撮影を行う必要がある。そうなると，部品を固定する治具や照明機器への投資が必要となる為，システム構築の難易度は高くなる。

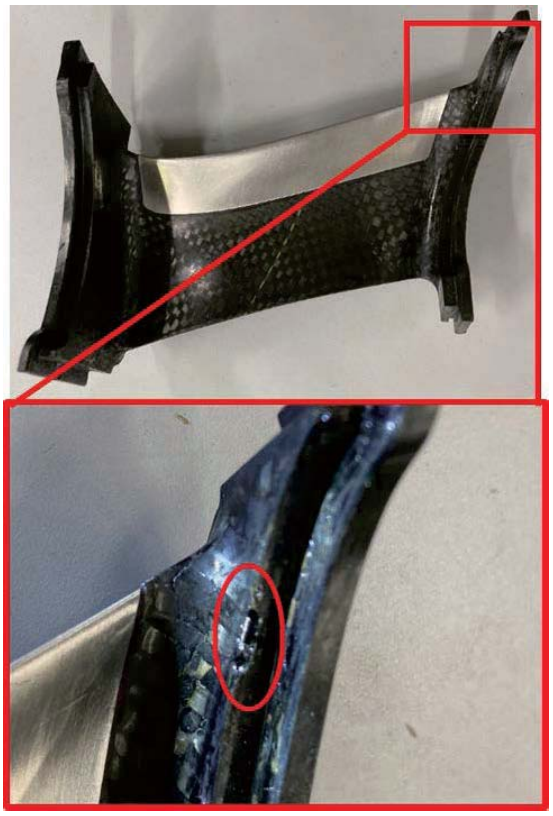


Fig. 5　Vane and defective portion

一方で，組立工程では学習データが足りなかったとしても，誤った組付け方を再現することは時間の許す限り無限に可能である。良品のデータも少し撮影位置を変えるなどすれば大量に用意できるため，数時間から数日程度でAI構築に必要なサンプルデータをそろえることが可能である。また，部品同士の境界線は比較的はっきりしているので，一定のライティングの元であれば，その境界は画像上でも認識可能であり，Fig. 6のように正常と異常の差も明確である。つまり部品ごとにその部品専用の画角とライティングを用意する必要はなく，エンジンの位置と撮影の位置を固定することで，一つの画像の

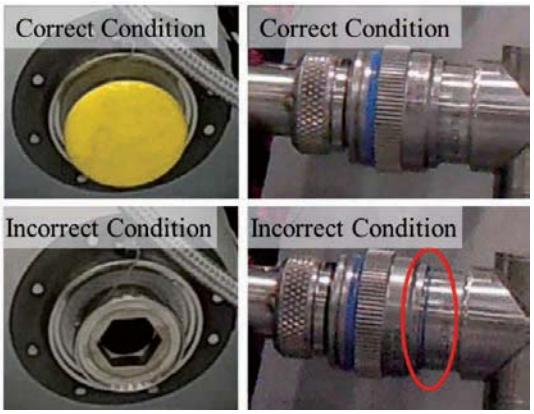


Fig. 6　Parts assembled and their defective portions

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

中で多数の部品の判定をすることが可能なため，比較的治具や照明機器への投資が抑えられる。

以上のことから組立工程の目視検査工程を，AIを用いた画像解析による検査で補っていくことで品質の向上を目指した。

2.2　求められる精度

AIによる組立異常の検出率が100％であればそれに越したことはない。しかしながらそれを目指すのは非常に技術的難易度が高い。膨大な量の学習用データが必要になり，そのデータも良品と不良品の境目に近いデータをそろえる必要が出てくる。それを準備する工数を考えると，コスト効果が出なくなる可能性が高い。

そこで今回は，人の目視検査の後に画像解析アプリケーションを追加することとした。この場合，例えばAIによる異常の検出率が80％であったとしても，人の目視検査のみの場合に対し，画像解析アプリケーションを追加することにより両方の検査で偽正常として流出する件数を20％までに削減でき，現在の５分の１に抑えることができる。つまり元々の人の目視検査による組立異常の流出割合が0.1％だったとすると，0.02％まで抑えることができる。

ただし，検出率は異常の偽検出にも影響があるため，検出率が低いと偽検出も増える。人の目視検査と画像解析装置の結果が異なる場合，検査員の見落としか，画像診断装置の偽検出か，再度その部位を目視検査する必要があり，別途工数がかかる。したがって，不良品の流出を削減できる割合と人の再検査の手間が増える割合のバランスを考えた上でAIの精度目標を設定しなくてはならない。その設定した目標精度が達成できるということを，POC（Proof of Concept）等でしっかり見極めなければ，投資に見合ったリターンを得ることはできない。組立異常の流出による仕損費と，偽検出の確認コストを考慮し，今回は目視検査の不良品流出率を10分の１にするため，AIの検出精度90％を目指した。

2.3　ニューラルネットワークの選定

AIを導入する方法として一般的に，市販ソフト/サービスの購入や，オープンソースを活用する方法がある。

一番コストがかからない方法はオープンソースを活用したアプリケーションの開発である。Convolution Neural Network（以下CNN）であるMask-R CNN[1]などオープンソースが広く公開されている。このようなCNNは一般的な自然画像，例えば人や犬や猫，車や建物といった画像で学習されているが，転移学習などを活用すると，効率的に違う領域のデータの学習に活かしていくことができる。しかしながら長年使用していくことを考えると，プログラムをメンテナンスする必要が出てくる。コーディングで構築したアプリは，メンテナンスをする人の高いITスキルが求められるため，担当者が変わった際に一気にブラックボックス化が進む可能性が高い。

一方で有償のソフト/サービスではローコード/ノーコード化が進んできている。GUI（Graphical User Interface）を持ったソフトを利用すると，IT人材でなくてもアプリケーションを構築することができ，ベンダーで開発したものに近いレベルの物を実現できる。また，自社内/自部門内で開発が完結することから，開発期間が短縮できる。

特に今回は初めての導入となるためTry & Error を短い間隔で数多くこなす必要性を考慮し，市販ソフトを導入する方向で検討した。

3．導入機器

アプリケーションを構築するために最低限必要な以下の通りの機器を導入した。

3.1　画像解析ソフト

導入を検討した中から，弊社の生産工程のロボットのガイダンスなどに用いられている画像処理ソフトシリーズにおいて，ディープラーニングベースの画像解析が可能なものを選定した（Fig. 7）。GPU（Graphics Processing Unit）処理への対応有無やAI学習処理時間などのスペックで比較して優位性が確認できた事が選定理由である。

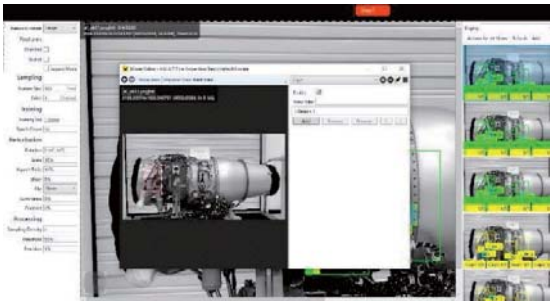


Fig. 7　Image analysis software

3.2　PC

用意したPCのスペックは以下の通りである。

GPU：GeForce GTX 1070　コア：1920
GPUメモリ：GDDR5　8 GB 256bit
メモリクロック：8,008MHz
CPU：intel Xeon

処理能力，GPU（グラフィックボード）ともに，最新スペックは不要で，数世代前のスペックで十分であり，中古のPC等を積極的に活用し，設備導入時の費用的な負担も抑えた。実際に購入したのはGPUのみである（Fig. 8）。

3.2　カメラ

今回検出したい異常の中で，一番小さいものは５mm程度のボルトの頭である。物を認識するのに最低５～10ピクセル程度は必要なことを考慮すると，そこから必要な画素数が分かる。例えば全長1.5mのエンジンを一枚の写真で写したとすると，５mmを検出するのに必要

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

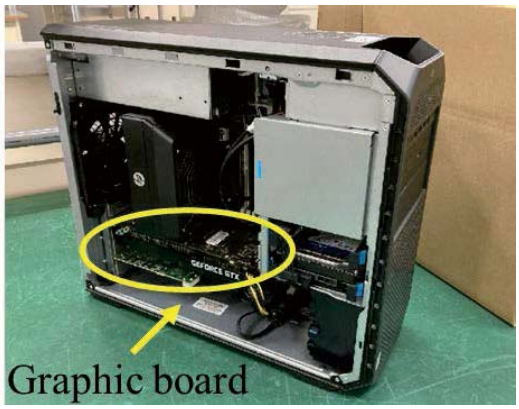


Fig. 8　PC and graphic board

な画素数はおおよそ200万画素以上が求められる（Fig. 9）。一般的な産業用カメラであれば十分にカバーできるレベルである。

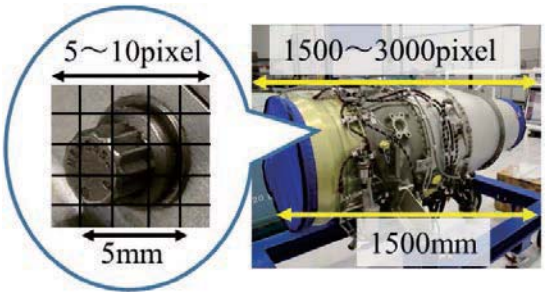


Fig. 9　Number of pixels required

ただし，産業用カメラにはオートフォーカス機能がないので，撮影するには対象物との位置関係を固定する必要がある。検査したい箇所はエンジンの全周にわたるので，複数の角度から撮影するためには，カメラを必要台数分用意し，特定の位置に固定した撮影装置のようなものを作るか，カメラをロボットに持たせて様々な角度から撮影させるなどの方法が考えられる。いずれにしても，装置にある程度の投資が必要となる。

そこで今回はスマートフォンのカメラを活用できないか検討した。会社から支給されているスマートフォンのカメラは800万画素以上であったため，スペックとしては十分であり，オートフォーカス機能があるので，手持ちで撮影することも可能である（Fig. 10）。ただし，不特定の画角のデータから部品を認識させようとすると，

	Industrial camera	Smartphone
Number of pixels	0.3～20MP	Over 8MP
Frame rate	～751 fps	～60 fps
Sensor size	～1inch	About 1/2.5

Fig. 10　Camera specs

膨大な学習データが必要になるため，画角はある程度固定する必要があり，その中で部品を認識させるものとする。その条件の中で手持ちでの撮影を可能とするために，手持ちで撮影された少し画角がずれた写真をベースにした場合でも，ディープラーニングが成立するかを検証した。

前述のとおり，画角をある程度固定する必要があることから，毎回同じ様な画角の写真を撮るために，Fig. 11のようにスマートフォンを二つ並べて固定できる治具を作成した。片方のスマートフォンに撮影する見本の画像を表示しながら，もう片方のスマートフォンでそれと同じ画になるように調整，撮影を行うことにより，手持ち撮影でもなるべく画角がそろうようにした。これにより，ほぼ毎回同じ画角の写真を撮影することを可能とした。

Fig. 11　Smartphone fixing jig

エンジン外周部にある配管・配線を固定するブラケットについて，上述の手法で撮影し，ディープラーニングを行ったところ，Fig. 12のようにすべてのブラケットを認識できることが確認できた。この結果をもって，カメラはスマートフォンのカメラを使用することとした。

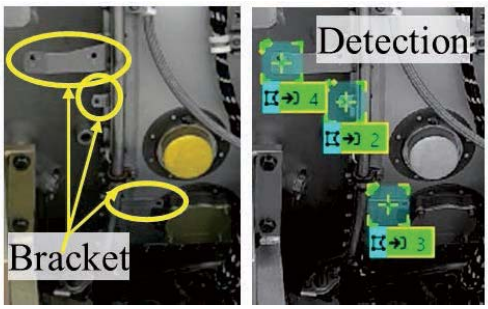


Fig. 12　Bracket detection

4．画像解析アプリケーションの構築

アプリケーション構築の概要としては，学習データの収集，判定フローの構想，学習データの処理を経て，最終的に判定基準の調整を行う。以下これら各ステップについて4.1から4.4に，そして実際のアプリケーション動作環境構築について4.5に詳述する。

4.1　学習データの収集

ディープラーニングを行うにあたり，まずは正常時のデータと異常時のデータを収集した。画像間での画角や

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

コントラストなどの差異を小さくするため，撮影する際のエンジンの場所を固定することにより，ライティングの変化が少ない状況で撮影を行った。また，撮影工数を少なくするため，目視検査ポイントをいくつかまとめて１つの画角に収まるように調整し，最少の撮影回数ですべての目視検査ポイントを撮影できるようにした。

ディープラーニングに必要なデータを収集するため，数が少ない異常データはFig. 13のように様々に誤った組立状況を再現した上で撮影し，データの数を増やした。具体的にはボルトであれば，ボルトが無い状態，ボルトが半分しか締まっていない状態，ボルトが間違った位置に取り付けられている状態などを再現した。また，ブラケットであれば，ブラケットの取り付け位置をずらした状態，向きを逆に付けた状態，取り付けられていない状態を再現し撮影を行った。あくまでも学習時に異常としての判定基準を学ばせるための異常データなので，起きそうな異常ばかりではなく，通常では起こりえないような異常の状態もデータとして収集を行った。

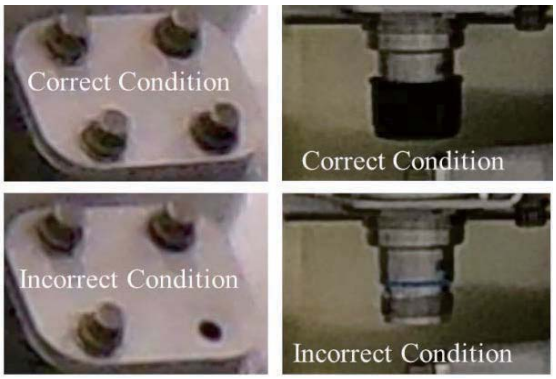


Fig. 13 Simulation of various assembly conditions

4.2　判定フローの構想

まずは一枚の画像の中から異常を判定するフローの構想を検討した。その場合，画像の中には複数の部品が混在しているため，学習した特徴が一方の部品に対しては正常な特徴でも，もう一方の部品に対しては異常となる場合が存在してしまい，異常なものを判別することが不可能であった。つまり，それぞれの部品に正常時と異常時の学習済モデルが必要な事がわかった。そこで，Fig. 14のように２段階の判定を設定した。

まず１段階目で特定の部品を検出させ，２段階目でその部品が正常な状態か異常な状態かを検出させる。例えば，１枚の写真の中に５か所チェックするべき箇所があったとすると，まず一段階目でチェックすべき箇所が写真のどこに存在するかを認識させ，次に認識された箇所を部品単位の画像として切り抜き，その画像に対して部品単位の正常/異常を判定する。この一連の処理を，認識させた５か所に対して並列で行う判定フローとした。

4.3　学習データの処理

学習データの一つ一つに，画像の中でそれぞれの部品を特定するための処理と，その部品が正常か異常かを振り分ける処理を行った。画像の中の部品を特定する作業は一般的にはアノテーションと呼ばれ，この処理を行った上でディープラーニングを行うことにより，画像の中のどの部分がどの部品にあたるのかを学習させることが出来る。その処理で特定した部品を切り出した画像を，それぞれ正常か異常か振り分けを行った。この処理により，正常時と異常時の特徴量の違いを学習させることが出来る。

4.4　ディープラーニングと判定基準調整

前処理を行った学習データを元にディープラーニングを行った。その際に，データの少なさを補うためいわゆる水増し（Data Augmentation）を利用した。水増しとは，特にCNNにて効果を発揮する学習用データを増やす手法で，元のデータに加えて，回転や拡大/縮小，コントラスト等を変化させたデータを大量に作成し，学習データを増やしていく手法である。変化させるパラメータを調整することにより，実際に手撮りした画像から，想定しうる範囲で撮影位置がずれた場所から撮った画像をシミュレートしたような画像を大量に学習させることが出来るため，結果として手撮りに対して耐性を持つことになる。

このソフトでは，ディープラーニングを行った後，異常の検出の基準となる数値がFig. 15のようにスコアとして表現され，異常として判断されている箇所が強調して示され，スコアが高くなる。部品ごとにスコアの傾向の違いはあるが，正常時のデータと異常時のデータのスコアが近いと，検出精度に影響があるため，その場合のみ，異常時のデータを増やし，再度ディープラーニングを行った。それにより，最小限の追加データで検出精度を向上させ，少なくとも事前に用意した検出精度の検証用データにおいては，100％不良を検出できるように

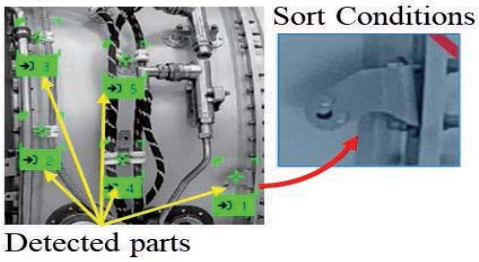


Fig. 14 Example of image processing

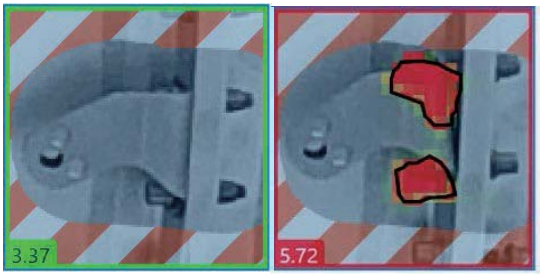


Fig. 15 Example of judgment

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

なった。

4.5 アプリケーション動作環境の構築

画像解析ソフト付属のアプリケーション構築用ソフトを使って，画像判定結果を表示するアプリケーションを構築した。このソフトは特にコーディングが必要なわけではなく，Office系のソフトを扱える知識があれば簡単にアプリケーションを構築できるため，専門業者へ発注する必要もなく実用的なアプリケーションを用意することが出来た。アプリケーションの動作としては，Fig16にある「RUN」ボタンを押すと画像判定が行われ，各撮影ポイントの写真に不良箇所が含まれているかが視覚的にわかるように表示され，その写真をクリックすると，Fig. 17のように詳細の不良箇所が表示される。

ただ，検査作業者がスマートフォンのカメラで指定の箇所を撮影した後に，その写真をそれぞれ特定のフォルダに保存する必要があり，その部分での作業ミスが起きてしまうと，大きな工数ロスが発生することが分かった。そこで，RPA（Robotic Process Automation）を用いてその工程の自動化を行った。RPAとはPC上で行う業務をプログラムされたロボットで自動化するテクノロジーのことである。クラウド上に保存された写真を特定のフォルダに振り分ける部分の工程をRPAで自動化した。RPAもプログラムの作成にはITスキルは不要で，ブロックを積み上げるような感覚で作成できるため，短時間で構築できた。

現地工場メンバーと仮運用のトライアルを実施し，その後にいくつかの改善要望が出されたが，ローコードツールを使用していた効果もあり，迅速な対応が可能であった。これにより，検査作業者の工数増を最小限に抑えながら不良個所を検出するアプリケーションを構築できた。

Fig. 16 Main screens of the built application

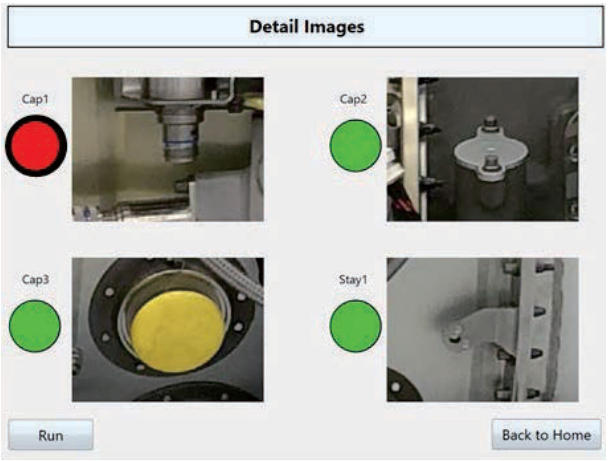


Fig. 17 Detailed screen of the built application

5．導入による効果

エンジン組立工場にて，一部に組立不良を模擬したエンジンを用意し，実際にアプリケーションを使用した。不良を模擬した78か所のうち全ての不良が検出されたため，目標としていた検出率90％を満足した。これにより目指していた不良品流出率を10分の１以下にすることができ，ミニマムな投資/工数の中で品質保証精度の向上に寄与することができた。

今後，量産で使用していく中で不良が検出された際には，そのデータをアプリケーションに取り込み継続的にディープラーニングを行っていくことで，検出精度を維持／向上させていく。

6．まとめ

本稿では画像解析技術を用いて，航空機用の量産ガスタービンエンジンの組立不良を検出するアプリケーションについて紹介した。実際のアプリケーション構築に要した時間は，今までのシステム開発からすると非常に短い期間であった。また，すべて自前で構築したため，不具合への対応や改善等についても迅速に行うことができた。今回の経験を踏まえて，組立工程の検査精度をより向上させていくのと同時に，他の工程で行っている目視検査への展開を目指していく。日進月歩で進化するAIの技術をスピード感を持って積極的に使っていくことで，お客様により質の高い製品を届けていきたい。

参考文献

(1) Kaiming He, Georgia Gkioxari, Piotr Dollar, Ross Girshick, Mask R-CNN, Facebook AI Research.

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

特集：ガスタービン計測技術とデータ活用の最新動向

デジタルソリューションTOMONIによる発電プラント自動自律化と脱炭素社会への貢献

TOMONI Digital Solutions; A Road to Decarbonized Society and Autonomous Power Plant

安威 俊重*1　石垣 博康*1　海野 健二*1　永渕 尚之*1
AI Toshishige　ISHIGAKI Hiroyasu　UMINO Kenji　NAGAFUCHI Naoyuki

キーワード：TOMONI，デジタル技術，自動自律運転，脱炭素，サイバーセキュリティー
Key Words：TOMONI, Digital Technology, Autonomous Power Plant Operation, Decarbonization, Cyber Security

1．はじめに

近年，各種業界においてデジタル技術の有効活用が進んでいる。このような環境の中で発電業界においても，デジタル技術を有効活用することによりプラントの最適運転，信頼性向上及びCO_2削減に役立てる動きが活発化している。当社ではこれまで種々の発電設備に対応した総合デジタルソリューションとして，お客様と“共に”課題を解決，ソリューションを提供するという意味を込めTOMONI$_{TM}$[(1)(2)]の開発を2015年から着手し，2017年より社内業務プロセスの変革と国内外のお客様へのサービス提供を開始した。

当社はこれまでプラント全体及びGTやST，HRSGといった主機のOEM（Original Equipment Manufacturer）として多くの納入実績から得られた知見，経験を活かし，これらをデジタルソリューションと融合させることにより，OEMとして実際の機器設計，運転，メンテナンスという視点から開発したアプリケーションを提供している。例えばプラントの性能特性を把握した上で提供できる性能最適化アプリケーションや，単なる予兆/異常検知にとどまらずOEMとしてのノウハウから導き出した推定原因や処置方針を提供できるアプリケーション等を利用頂く事によって，お客様の収益増加，機器の信頼性向上につなげている。

開発したアプリケーションに関しては，その動作性，操作性を当社高砂工場内にある第二T地点（Fig. 1）で検証し，アプリケーションとしての品質を確認した後にお客様に納入するという，ハードの開発/検証と同じプロセスを取れることも当社の強みである。

本稿では，当社におけるTOMONIデジタルソリューションの開発状況や将来への展望について示す。

Fig. 1　Overview of T-Point 2

2．TOMONI開発

2.1　コンテンツ開発

TOMONIのアプリケーションには，その内容に応じて様々なレベル分けを行っている（Fig. 2）。アプリケーション開発当初は，主にデータの可視化を行う事から始めた（Level1）。得られるビックデータから用途に合わせた自動分析・可視化をすることにより，早期にユーザーが状況を理解して，素早いアクションを取る事が可能となった。例えばGTCCプラントの各機器の様々な状態量を分析・可視化し，ある時点で機器の状態量が短長期的に変動し，プラント運用（信頼性・収益性）に影響を及ぼす可能性がある場合，その機器の点検を推奨する等に役立てる事が出来るようになった。その後，更にOEMのノウハウを活かし性能及び保守の最適

原稿受付　2021年7月12日
＊1　三菱パワー㈱　ICT開発推進部
〒220-8401　横浜市西区みなとみらい3－3－1
E-mail: toshishige.ai.am@mhi.com

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

化に関連するアプリケーション開発に力を入れてきている（Level2）。最近は機器の運転状態や劣化具合をAIにて学習し最適化を行うアプリケーションも開発が行なわれ，更に将来的にはAIを使って複数のアプリケーションが連携したプラントの自動自律運転を目指している（Level3）。

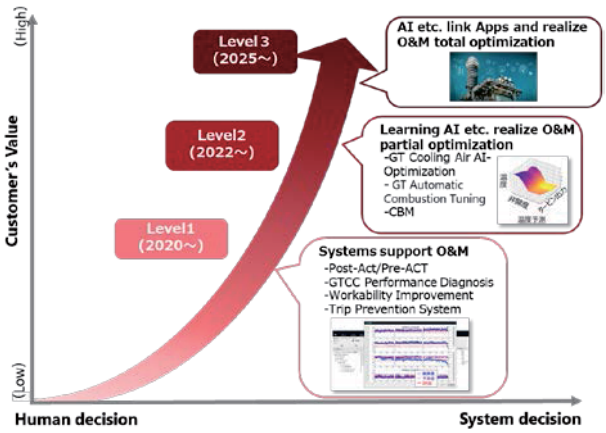


Fig. 2　Level of TOMONI applications

またこれら運転中に使用するアプリケーションに加え，定期検査時に使えるアプリケーション開発にも近年注力している。当社は主機の設計，製作のみならず，豊富なアフターサービスの実績を持ち合わせており，定期検査作業へのTOMONI活用により，安全に寄与する作業性向上や工期短縮につながるアプリケーションを提供している。

2.2　RMCからTOMONI HUBへ

当社は1999年に遠隔監視センター（RMC）を高砂工場に設立し，その２年後の2001年には米国フロリダ州に当社原動機事業の米国拠点であるオーランドサービスセンターを設立し同センター内に遠隔監視センターを設置した。これにより世界各国に納入したGTCCプラントの運転状態を，商用運転開始後もプラントが安全かつ安定的に稼働しているか，効率的な運転が維持できているか等を24時間体制でモニタリングする事が出来るようになった。その結果トラブル発生時の迅速な対応はもちろん，設備トラブルによるプラント停止を未然に防止するなど，稼働率の維持，向上のための技術サービスの提供が可能となった。

現在では新たに当社長崎工場やフィリピンにも遠隔監視センターを設立し，遠隔監視サービスの対象を拡大させ，GTCCに加えてスチームパワーや地熱発電，SOFC（固体酸化物形燃料電池）発電システムなどの運転監視も実施している（Fig. 3）。

遠隔監視を導入することで，発電設備のトラブルは24時間体制の遠隔監視センターにて発生と同時に把握できるようになっている。TOMONI開発以降はデジタルソリューションによる当社・お客様間の意思疎通の共有化が図れ，トラブル発生時のデータに加え，過去のデータも即座に収集・分析可能となったため，復旧に要する時間は飛躍的に短縮された。その結果，お客様にとっての計画外停止期間が短縮され稼働率の向上に寄与できるようになっている。また異常予兆検知技術についてもMT法を適用した異常検知システムの導入により，従来人間系で分析を行っていたパターン監視は自動化され，監視効率化により監視人員を増やさず監視台数を増やすことが可能となった。これによりトラブルの予兆を早期発見し，OEMとしての知見を活かした要因推定を行う事で，トリップ回数も低減することができた。現在はこれに推定要因アルゴリズムを加え，さらなる高度化に取り組んでいる。またお客様とのLTSA（Long Term Service Agreement）契約更新時期を迎えた発電所についてはTOMONIに切り替えていくことで，より安全な通信環境のもと，いつでもどこでもTOMONIが提供するアプリケーション，サービスの利活用を可能にしている。

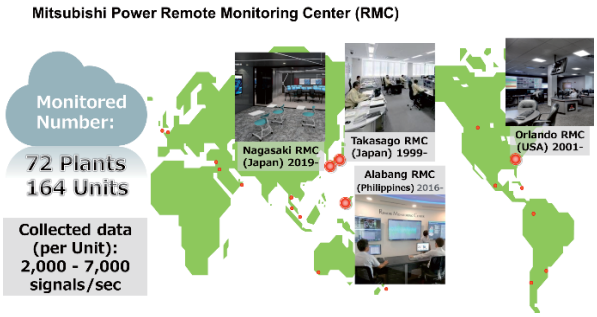


Fig. 3　Performance analysis center

また，GTCCプラントで20年来延べ164台（2021年６月現在）におよぶプラント接続実績は遠隔からの運転監視にとどまらず，膨大なプラント運転データをTOMONIにより視覚化するとともに，試運転，営業運転中のプラント運転データ解析，性能評価に基づく計画値からの差分解析，運用最適化など，当社内の開発，設計部門への展開も広がっている。

昨年来からの新型コロナ禍により国内外の発電所へのエンジニア派遣が困難になったこと，さらに国内では2021年４月１日に電技省令が改正され，汽力および１万kW以上のGTCCを含む火力発電所について事業者が事前にリスク評価（経年劣化，大規模災害，サイバー攻撃，技術員能力等）を行うことで常時監視制御の構外遠隔化が実現可能となったことにより，遠隔操作・監視，遠隔支援がより強力に推し進められる動きになっている。TOMONIによりクラウド経由で現地と当社遠隔監視センターが運転データ，非構造化データを共有することで，在宅環境を含む遠隔からの運転支援や，定期検査中におけるフィールドエンジニアへの支援を容易に実現できる環境を提供できるようになり，デジタル技術が当社の遠隔監視の拠点と発電所が担う役割を大きく変えようとしている。

このように当社遠隔監視センターは，Remote

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

Monitoring Centerの機能に，性能，保守最適化を支援するためのPerformance Analysis Centerの機能を備えたTOMONI HUBと名前を変え，世界中の拠点がデジタルハブとしてシームレスに接続連携し，GTCCプラントをはじめとするプラント設備の運用を最適化し，安心安全を守るための重要な役割を担っている。

2.3　システムセキュリティーの確保

重要インフラを支えるシステムにおいて，外部からの不正アクセスや改ざん等が発生し，安定したエネルギー供給を損なうことがあってはならない。よって発電所が外部とのデータ授受する際に，情報セキュリティー確保が非常に重要となる。TOMONIの導入にあたっては，クラウド接続の技術，運用，実績面で，事業者の理解を得ることが必須である。Fig. 4にプラント設備からTOMONIへのアクセス全体構成とセキュリティー対策の基本的な内容について示す[3]。

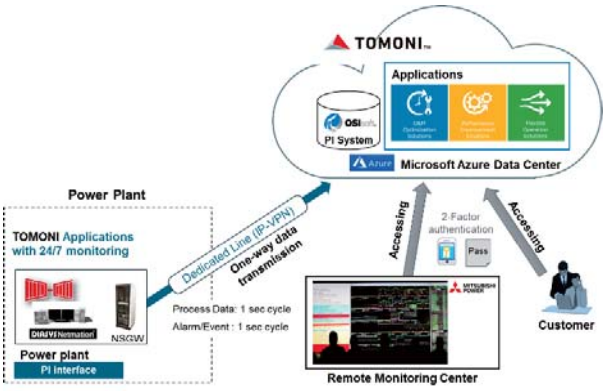


Fig. 4　TOMONI platform/ Connection overview

TOMONIではMicrosoft Azureによるセキュリティーポリシーのもと，当社独自技術も組み込んだ一方向データダイオードを組合せ，プラント設備内にある制御システムへの不正アクセスを防御している（Fig. 5）。

・日々進化するAzureセキュリティー機能
・二要素認証を用いた本人特定
・三菱パワー独自技術を組み込んだ一方向データダイオード（Netmation Secure Gateway）

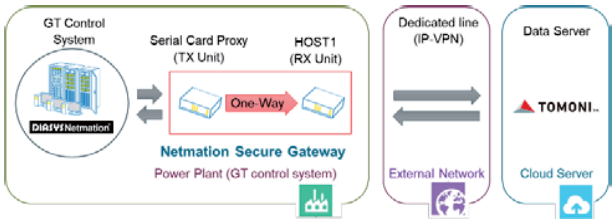


Fig. 5　Security features/ Plant network

当社では北米電力信頼度協議会の重要インフラ保護基準NERC CIPへの対処を10年以上前から当社北米拠点と連携し準拠してきた。また，エッジ側は日本国内の電力システムガイドラインを満足しており，クラウド側も米国国立標準技術研究所NISTに準拠したセキュリティー施策，運用，管理を行っている。

また，サイバーセキュリティー要求に厳しい海外のお客様の要望を受け，改ざん検知機能や侵入検知機能の負荷，ログの収集機能等，セキュリティー機能をグレードアップさせて，お客様の安全安心を得ている。本取組により，国内電力会社に対してもクラウド環境での安全性が評価され，TOMONIサービスが採用されている。

3．TOMONIのGTCCプラントへの適応例

GTCCに関連するアプリケーションとしては，主にプラントの性能を最適にする『性能最適系』アプリケーションと，定期検査や通常のメンテナンスを最適化する『保守最適系』アプリケーションに分けられる。以下にこれらのアプリケーションの概要について説明する。

3.1　性能最適系

プラント効率の向上は，プラント運営費用の中で非常に大きな割合を占める燃料代の削減に直接的に繋がるのみならずプラントから排出されるCO_2低減に貢献する。またプラント出力増加は，当該プラントの売電収入増加につながるとともに，系統内の効率の低いプラントの出力を下げる事が出来，間接的にCO_2低減につながる。よってプラント性能を最適化するアプリは，お客様の収益増加及びCO_2削減に貢献する事から高いニーズがある。

当社はこれまで数多くの性能最適系アプリケーションを開発してきたが，これらの多くは機器を開発，設計，製作，運転，保守をしてきた経験をもとに，物理的，工学的なアプローチに加え，最先端の機械学習を効果的に利用して開発されたもので，以下にその一部を紹介する。

Fig. 6に，タービン２段静翼の冷却空気系統を示す。圧縮機の高圧抽気から導入される冷却空気は制御弁を介してタービン２段静翼の冷却空気に使われるが，一

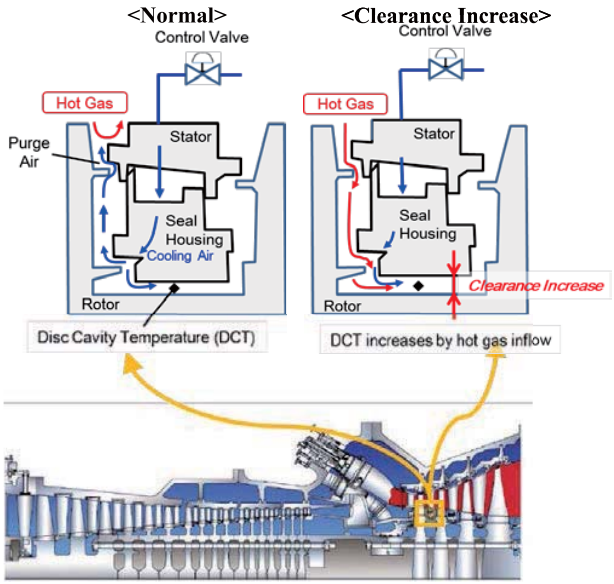


Fig. 6　Row2 turbine vane cooling air scheme

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

部は内側（ロータ側）のシールリング保時環（Seal Housing）に供給され，高温ガスからロータを守るためのパージ空気として使われている。

このパージ空気が健全に供給されているかを監視しているのがディスクキャビティー温度（DCT）である。シールリング保持環と回転系のロータの間にはある程度のクリアランスが保たれているが，経年的にクリアランスが拡大していくと，冷却空気がクリアランスを通り下流側に流れてしまい，シールリング保持環上流側のパージ空気として使われず，結果として高温ガスの巻き込みが発生し，ディスクキャビティー温度がアラーム値に到達する事象が発生する事がある。そのため通常，経年的にクリアランスが増加してもディスクキャビティー温度が上昇しないように制御弁開度にある程度のマージンをつけた設定にしており，結果としてクリアランスが初期状態では過剰な冷却空気を供給する事になる。

そこで機械学習を用いて，クリアランスの状態に応じた最適な弁開度となるよう学習するアプリケーションを開発した[4]。ある大気条件，負荷条件において，制御弁開度を変更することによりディスクキャビティー温度を学習し，それを設定値に反映することにより，ディスクキャビティー温度がアラーム値に達することなく，最適な冷却空気量を設定することに成功した（Fig. 7）。

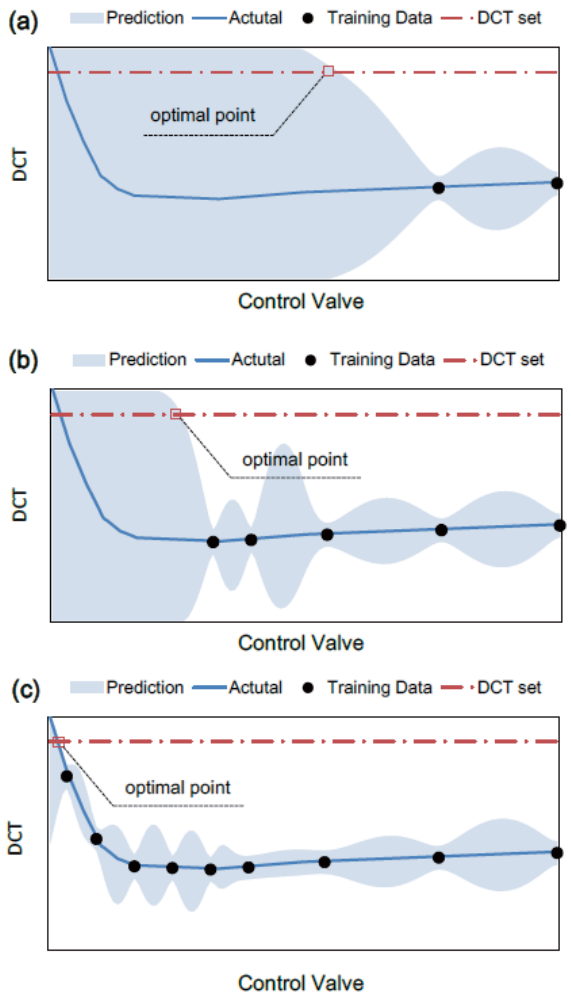


Fig. 7　Prediction result of each simulation point

このアプリケーションは当社高砂工場内の実証発電設備であるT地点及び第２T地点で検証され，±５℃でディスクキャビティー温度を予測できる事が確認された。

これらの制御を，ディスクキャビティー温度を監視しながらのフィードバック制御で行う手法は適していない。それは一度ディスクキャビティー温度が上昇するとシールリング保持環のメタル温度が上昇し，更にクリアランスが拡大してしまい，より過剰な冷却空気が必要となるという負のサイクルに陥り，最適解を見出すことが出来なくなるからである。重要な事は，ディスクキャビティー温度を上昇させることなく最適な制御弁開度を機械学習により選定し，それを制御に入れるという事であり，これはOEMでなければ適応できない知見と言える。

3.2　保守最適系

以前は，所謂“匠”と言われる保守のエキスパートが各発電所には配置され運転データに加え，経験で裏付けされた感覚で機器の経年的な劣化を感じる事により，重大なトラブルを未然に防いでいたという事もあった。しかし近年このような“匠”からのノウハウ伝承が難しく，一方，ガスタービンの新機種開発では性能向上のためタービン入口温度の高温化，大風量化（機器の大型化）が進められ，機器の使用環境はますます厳しいものとなっており，保守に求められる要求は高まっている。そこで当社はOEMの知見を活かし，“匠”には感じられる機器の異常をデータ化し，プラントの重大な損傷を与える前に保守を行う必要性を可視化するアプリも開発している。

Fig. 8は，当社RMCにあるビックデータを分析したGTCCプラントにおけるトリップ要因分析結果である。これを見ると全体のトリップに対して起動中のトリップが全体の24%を占めており，その上位６項目で起動中トリップ要因の約80%を占める事が分かった。

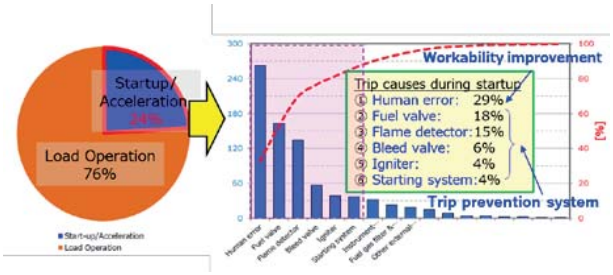


Fig. 8　Trip cause of GTCC plant

ここで最も頻度の多い人的な要因（Human Error）を減らすために作業性向上アプリケーションを数多く開発している。例えば通常運転時は“開”とすべき手動弁を定期検査中に“閉”としていたが，定期検査後に“開”に戻し忘れてプラント再起動時にトリップするのを予防するため，手動弁操作の指示，状態管理が出来るアプリ

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

ケーションを開発した（Fig. 9）。その他，配管や保温の取付位置をガイドするアプリケーション，遠隔で定期検査現地の指導員に指示を出す等数多くの作業性向上アプリケーションがある。

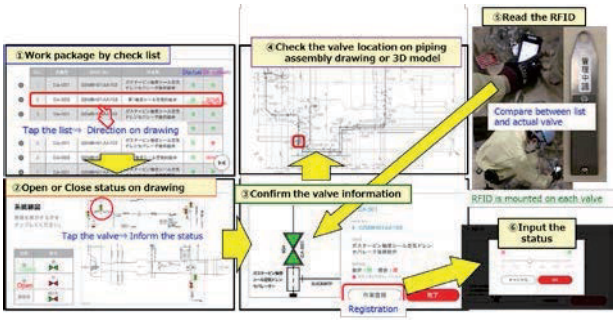


Fig. 9　Manual valve management system

また同様にトリップ要因の高い，起動中の燃料弁，点火栓，抽気弁異常によるトリップを予防するために，プラント停止中にこれらの弁テストを自動で行い，指令に対する実動作の偏差を経年的に監視する事により，必要に応じて保守員がメンテナンスを行い，起動時の不要なトリップを防止する，いわゆるトリップ予防アプリケーションも数多く用意している。その中で燃料弁異常診断システムの画面をFig. 10に示す。

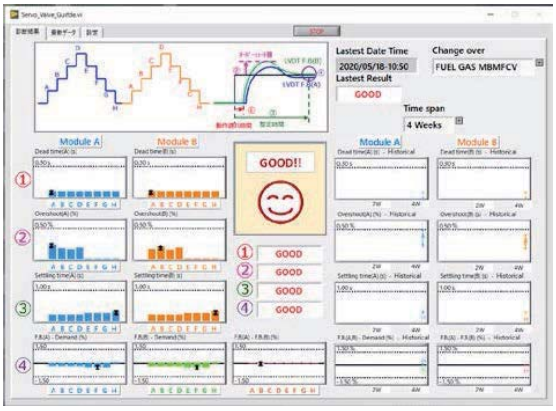


Fig. 10　GT fuel valve diagnosis

またOEMとしての機器設計の知見を活かし，例えば部分負荷では燃焼ガス温度が低いため高温部品の寿命消費が定格負荷運転よりも少ない事を取り入れたアプリケーション開発も行っている。結果的に定期検査インターバルの延長，部品の使用期間延長に繋がるというメリットもあるが，これには保守の観点からはリスクを伴う事になる。これに対して当社は，これまでの本体設計の経験のみならず，材料データ，補修，運転環境等を総合的に判断及び検証を行う事により実現させている。

4．TOMONIの他製品への適応例

脱炭素化，エナジートランジションの潮流の中で，太陽光や風力をはじめとする再生可能エネルギー（以下，再エネ）の導入が進み，ガスタービン単体あるいはGTCCだけでなく，再エネや蓄電池との連携，マイクログリッド全体の最適運用までを，電力事情が脆弱な地域を中心に，当社に求められるようになってきた。これは再エネ発電のメリット，デメリットを踏まえ，太陽光，蓄電池の周波数応答や寿命消費，および前章までに述べてきたGTCCの機械特性，プラント性能を最大限に活かすアプリケーションを適用することによってのみ，電力デマンドに対して安定的・効率的なエネルギー供給を実現することが可能となるためである。

このマイクログリッドにおいて，TOMONIでは，三菱重工業㈱が開発したENERGY CLOUD®[5]のデマンド予測および最適化プログラムを利用，パッケージとして搭載することで，電力需要の予測，再エネ発電量の予測，蓄電池寿命予測を，これらをもとに環境や経済性向上の視点で上位のマネジメントシステムで最適化し，再エネ設備や自動自律化されたGTCCと連携することで，最適なエネルギー需給をサポートすることができる。Fig. 11がその概念図である。

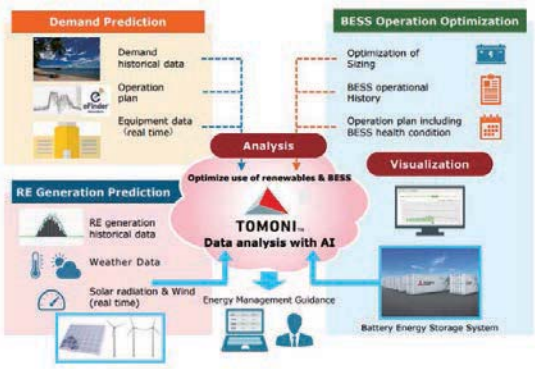


Fig. 11　Optimized energy management

また三菱重工グループでは，国内稼働中のSOFCプラントに対して遠隔監視に加え緊急時の運転対応も可能としており，GTCC向けに開発，適用を進めてきたシステムをベースに，必要な信号点数，データ更新周期，セキュリティー，リアルタイム処理の要求仕様に応じて，初期，運用コストに見合ったシステムを構築している。

以上より応答性，時定数の異なる複数の設備間の連携，最適化には構成機器の特性，運用をより深く理解する必要があり，その解は従来の制御系に加え，物理モデルを用いたリアルタイム計算や統計的手法による予測結果を適切に組み合わせることで得られるものである。これはユーザーである事業者とOEMの知見のいずれが欠けても成立しえないものである。次章に脱炭素社会に向けた当社グループの将来取組みについて紹介する。

5．将来へ向けた取り組み

三菱重工グループでは，ネットゼロカーボン社会に向け，Fig. 12に示す段階的なエナジートランジションを実現する製品と，それを支えるデジタル技術の開発を進

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

めている。火力発電の高効率化と，Fig. 13に示す世界最大級の排出CO_2回収商用化技術により，発生CO_2と排出CO_2を最小化する。

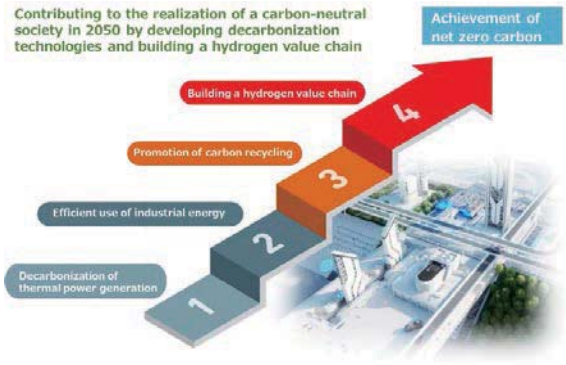


Fig. 12　MHI group's concept of energy transition

Fig. 13　World's largest CO_2 recovery plant

更に，化石燃料からグリーン燃料へ移行する過程において，Fig. 14，15に示す当グループが有する水素・アンモニア燃焼技術を発電設備に展開し，脱炭素実現に貢献する製品を，適切に市場提供していく。

今後導入拡大する再エネを含め，様々なエネルギーリソースを最適に協調運用することにより，安定・安心なエネルギー供給を実現するデジタル技術を拡充・高度化することで，Fig. 16に示す設備の健全な運用・保全を支援するソリューションサービスを提供する。

併せて，前章で説明したENERGY CLOUD®により，産業分野でのお客様のプロセス最適化まで含めたソリューションサービスも提供する。

Fig. 14　Hydrogen GT

Fig. 15　Hydrogen Gas Engine

Fig. 16　Smart energy supply chain hydrogen GT

6．まとめ

脱炭素化に代表されるダイナミックな市場及び社会要望の変化や，コロナ禍に代表される不確実な事業環境の変化に対応し，サステイナブルなエネルギーソリューションを提供し続けることが我々の使命である。これまで当社ではGTCCのOEMとして機械特性を活かした性能最適化，シミュレーション技術を用いた運用最適化を取り入れたアプリケーションをTOMONIに搭載し，提供することにより，収益増加，機器の信頼性向上及びCO_2低減等の社会ニーズに貢献してきた。

今後三菱重工グループとしてネットゼロカーボン社会実現に向け各種製品開発を継続していくが，これらハードの技術開発で得られた知見にデジタル技術を融合させることにより，脱炭素社会へのエナジートランジションを強力に推進していく。

参考文献

(1)　石垣博康，毛利悟，後藤大輔，永渕尚之，MHPS-TOMONI:火力発電Digitalizationプラットフォーム　クラウド/エッジサービスとシステムアーキテクチャ，三菱重工技報，Vol. 55 No. 4（2018）pp. 1-7.

(2)　平崎大二郎，遠藤彰久，遠藤格，MHPS-TOMONI®:デジタルソリューションによる発電プラントの高度化，三菱重工技報　Vol. 56 No. 3（2019），pp. 1-6.

(3)　石垣博康，海野健二，クラウド/エッジ技術によるデジタルソリューションとプラントO&M高度化，計装，Vol. 63 No. 12（2020）pp. 9-14，工業技術社.

(4)　Tateishi, T., Yoshioka, S., Nagai, H., Takenaka, R., Optimization of Turbine Disc Cavity Cooling Flow Control based on Machine Learning, Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo, IGTC-2019-222 (2019).

(5)　田中暁，野口敏秀，鈴木忠，榎本智之，岡田英生，森原雅之，パワー＆エネルギーソリューションビジネスの展開，三菱重工技報　Vol. 55 No. 4（2018），pp. 1-5.

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

2021年ASME国際ガスタービン会議
1．全　般

寺本 進*1
TERAMOTO Susumu

1．概要

2021年のASME Turbo Expoは，6月7日㈪から11日㈮にかけて，ポータルサイトとZoomを組み合わせた完全オンラインのVirtual Conferenceとして開催された。

昨年の参加者からのフィードバックを反映して“live”イベントが充実され，一般講演は⑴paper ⑵事前収録したVideo on Demand（VOD）によるプレゼン ⑶会期中のlive presentationおよび質疑の3段階で発表，プレナリーセッションは事前収録したプレゼンを流した後にライブの質疑，チュートリアルは原則として完全ライブで行われた。一般講演のVODやプレナリー セッションの事前収録動画は会期終了後も一定期間視聴可能である。参加者同士のコミュニケーションツールとしては，ポータルサイト上での1対1のテキストメッセージのほか，“Roundtables”としてチャットルームが設定できる仕組みが用意されていた。展示はSponser 12社，Exhbitor 25社の出展社ごとにポータルサイト上にページが割り当てられており，資料や動画の閲覧ができる他，説明者と個別チャットができるようになっていた。

オンライン会議・講演会が定着して，講演者・運営側・参加者とも慣れてきたせいか，全体としてはスムーズに運営されている印象を受けた。

この講演会をどう利用し，どのように感じたかは，様々な意見があるだろう。筆者は，現地（米国東部時間）午前中，日本時間夜遅くだけの参加と割り切り，08:00のプレナリセッションを聞いた後，午前中のセッションに参加していた。午後のセッションは日本時間深夜から未明になってしまうのでリアルタイム参加は諦め，気になる論文は後で論文やVODを確認していた。少なくとも現地午前中に関する限りは，プログラムをチェックして興味ある論文に印をつけ，セッションルームを行き来してライブ講演と質疑を聞くという普通の学会と同じ行動パターンであり，大きな違和感はなかった。

一方で，VODの方は使い方が難しいと感じた。幾つか見たものの，30分のプレゼン動画をフルに視聴した事は結局一度も無かった。通常の講演プレゼンテーションをそのままVODにすると，（ネイティブ著者も非英語圏著者のどちらでも）PCに向かって淡々と原稿を読み上げる単調なものになりがちであり，またある程度進まないと発表概要がわからない。日本時間昼間にVODを見る場合は他の用務の合間での作業になるので，「自分にとって面白い発表だけを効率良く見たい」という意識が先にでてしまい，なかなか本題に入らない単調なVODを黙って見続けることが難しく感じた。海外出張していればその期間は当然現地の行事に集中するし，リモート参加の場合でも日本の遅い時間であれば講演会以外の用務は基本的に無いので「効率よく見たい」という意識にはならないし，何となく出席したセッションで思いがけず面白い講演に出会うこともあるのが講演会の魅力の一つなのだが，必ずしも講演会に集中できるとは限らないオンライン講演会が当たり前になったら，参加者としては講演会に集中できる時間を確保する，発表者としては最初に概要を話す等，双方が工夫をする必要があると感じた。

オンライン講演会のもう一つの課題は，質疑だろう。発表に対する質問はZoomのチャット機能を用いて受付けられており，気軽に質問できることもあって特にプレナリセッションでは多くの質問が寄せられていた。寄せられた質問の中から座長がピックアップをして講演者に質問するのだが，数が多いので質問全体を見た上で重要なものを質問するというよりも，チャット欄で上の方に表示されているもの（早めに書き込まれた質問）を中心に質問する形にならざるを得ないように感じた。また，テキストチャットだと質問の意味が通じず，座長が「直接音声で質問しなおして欲しい」と質問者に促す場面も少なく無かった。対面講演会でも適切な質問運営は難しいが，オンライン講演会では違った難しさがありそうだ。

会議全体は，朝一番にプレナリセッションを設け，初日はオープニングの後にキーノート講演，二日目以降はパネルディスカッションの後に各種表彰が行われTom Sawyer Awardの受賞者として元MHIの青木素直氏が紹介された。

初日は今回のテーマである“Sustainable Energy — Accelerating the Transition by Advancing Turbine Technology”に沿ってモデレータのPenn state Prof. Karen Thole，DOE Mr. Rich Dennisがゼロカーボンに向けたターボ機械の重要性を述べた後，Dr. Michael Webberから講演があり，パワー密度，燃料多様性といったターボ機械の優位性や，多分野技術融合やスピーディーな技術開発の重要性が指摘された。2，3日目は“Opening up the Design Space”として，それぞれ

原稿受付　2021年6月28日
＊1　東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻
〒113-8656　文京区本郷7-3-1

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

水素・バイオ燃料，CFD・機械学習に関するパネルディスカッションが開催され，ゼロカーボン社会に向けた各社各組織の模索が紹介された。オンラインの影響か，最近の傾向なのかは判別できないが，プレナリ，パネルとも，スピーカーの熱の入れ具合のばらつきが大きい印象を受けた。

別記事の統計によれば，発表論文数は712と昨年（1160），一昨年（927）から大きく減少した。また，ポータルサイト上に登録されている参加者は1563名と通常開催時の半分以下で，オンライン開催だった昨年の1632名からも減少している。一通りの講演と質疑ができるよう様々な工夫がされているとは言え，対面でのやりとりができる対面会議とオンライン会議では参加のモティベーションが変わるのは否めない。来年までにはコロナ禍が収束すると予測して，次回Turbo Expo 2022は６/13-17の日程でオランダ ロッテルダムで開催される予定になっている。来年こそは対面での講演会を期待したい。

2．航空用ガスタービン

浅子 知昭*1
ASAKO Tomoaki

1．概要

今年の航空エンジン関連（Aircraft Engine Committee（AEC）主催）のセッション数は，全部で７セッション，発表は24件であった。テクニカルセッションの発表形式は発表・質疑ともライブで行われた。ただし，VOD（Video on Demand）として，あらかじめ録画された発表をセッションの前後に聴講できることは昨年と同様である。また，今年はチュートリアルセッションやパネルセッションも期間内に行われたが，これらは基本的にはライブによるものだけであり，他のライブセッションと重なると聴講できない点が残念であった。

今年のテクニカルセッションは５セッションあり，その内容とそれぞれのセッションでの発表数は，①先進的な将来エンジン技術（５件，これには燃焼と排出物，新コンセプト，ハイブリッド航空エンジンという副題がついている），②インレット・ダクト・境界層吸い込み（５件），③モデリング・シミュレーションと検証（５件），④熱管理と航空エンジンのオイルシステム（５件），⑤計測の話題（５件，これは制御コミッティとのジョイントセッション）であった。また，チュートリアルセッションは，ターボシャフトエンジンのサイクル設計と最適化に関するものであり，パネルセッションとしては，航空エンジンにおける機械学習と題されたものが行われた。航空エンジン関連のテクニカルセッションの数は，昨年はバーチャル会議となる前に予定されていた14セッションがバーチャル会議となることで６セッションに減っていたが，それと比べても今年は１セッション減っている。

テクニカルセッションでの発表に至るまでの件数を見ると，アブストラクトの提出は50件あり，その中の９割程度が受理された。受理されたアブストラクトの中からドラフトペーパーは24件が提出され，この中の22件がテクニカルセッションの発表件数である。これにチュートリアルセッションの１件と，パネルセッションの１件を加えた24件がAEC主催のセッション全体での発表件数となる。なお，発表に至るまでの件数を昨年のバーチャル会議となる前の数値と比較すると，アブストラクトの提出件数が99件から50件と半減し，それに伴いアブストラクトの受理件数も同様の割合で減少している。ドラフトペーパーの提出は69件が24件となり，その中からドラフトペーパーが受理された件数も減少している。アブストラクト提出数に対する発表件数の割合が昨年の５割程度に対して今年は４割程度となっているが，アブストラクトが受理された件数に対するドラフトペーパーの提出割合は昨年７割程度だったものが５割程度へ低下している。セッション数や発表件数の減少により発表の分野が狭くなったように感じたものの，個々の発表の質の低下は，それほど感じなかった。

なお，AEC主催のセッション以外となるが，推進と圧力ゲインサイクルというテクニカルセッション（発表件数５件）があり，これを含めた６つのテクニカルセッションについて次項に示す。

2．テクニカルセッション内容

2.1 先進的な将来エンジン技術

この中では，可変ピッチファンの逆推力時に排気ダクト端部に取り付けたラバー製のリップを膨らました場合の流れ場についての発表（GT-59526），パラレルハイブリッドエンジンの軸回転数の選定について（GT-59500），燃焼器の吹き消えに対する噴霧特性の影響を調べるための実験的研究（GT-58658），シンプレックスタイプの燃料噴射弁の性能改善に関する研究（GT-58751），燃焼と

原稿受付 2021年８月３日
＊１ ㈱IHI 航空・宇宙・防衛事業領域 技術開発センター
エンジン技術部 性能・システム技術グループ
〒196-8686 東京都昭島市拝島町3975-18

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

空力を統合した燃焼器設計（GT-58945）の発表があった。

2.2　インレット・ダクト・境界層吸い込み

ここでは，電動ファンを備えた機体風洞試験による境界層吸い込みエンジンの入口ディストーションの特徴と生成のメカニズムに関する研究（GT-59079），ショートインテークとファンを組み合わせたCFDによる流れ場の検討（GT-58829），ブレンデッドウィングボディ機に取り付けられたインテークダクトの空力特性（GT-60335），Y字形状のインテークダクトの空力性能を調査した研究（GT-58849）などの発表があった。

2.3　モデリング・シミュレーションと検証

このセッションでは，公開されている情報を用いてエンジン性能モデルを合わせこむ方法についての研究（GT-59489），ターボファンエンジンのガスパス解析に関する発表（GT-59089），幾何形状と空力的な状態を考慮した排気ノズル特性マップについて（GT-60029），ターボジェットエンジンのウインドミルモデルについて（GT-58503）の発表があった。

2.4　熱管理と航空エンジンのオイルシステム

ここでの発表は，低バイパス比ターボファンエンジン用の熱管理システム設計に関するもの（GT-58942），エンジンオイルシステムのスカベンジラインの二層流体のシミュレーションに関する研究（GT-58988），熱交換器を備えた燃料供給システムの評価検討（GT-59992），ベアリングチャンバー内のフィルム状のオイルの熱伝達に関する研究（GT-58964）などであった。

2.5　計測の話題

このセッションの中では，タービン入口温度計測に関するもの（GT-58998），音響による温度計測に関する研究（GT-60266），シュリーレンを用いた噴流の温度計測について（GT-59690），動翼のチップクリアランス計測に関するもの（GT-58621）などの発表があった。

2.6　推進と圧力ゲインサイクル

ここでは，パラレル電動ハイブリッド推進システムのオペラビリティに関する検討（GT-58655），ローテーティングデトネーションエンジンのパッセージ形状の影響に関する研究（GT-59111），中間冷却器に着目した中間冷却再生サイクルエンジンの性能検討（GT-59187）などが発表された。

3．産業用ガスタービン

壹岐 典彦*1
IKI Norihiko

1．概要

産業用ガスタービンでは，発電用途，産業用途と熱電併給，超臨界CO_2発電，石油・ガス産業，船舶のテクニカルセッションのうち，超臨界CO_2発電と石油・ガス産業用途の論文の数が多かった。他のセッションでの論文は少なく，デジタル化，機械学習，脱炭素，水素等に関連するものが目立つ形となっている。石炭，バイオマス，代替燃料 についても関連するものを紹介する。

2．テクニカルセッション内容

2.1　発電用途

論文数は８件であった。デジタルツインなどデジタル化に関して，蒸気タービンブレードの異常識別（GT-58698），機械学習による時系列モデリングで予測性能強化（GT-59082），ガスタービンデジタルツイン-オペレーター（GT-59572），データフュージョンのプロジェクト（GT-58933）が発表された。また，ガスタービン燃焼器内の火炎の音響効果（GT-59317），HRSG性能保証に対する発電所性能改善（GT-59291），24缶ガスタービンの部分負荷性能の改良（GT-59457），Hクラスガスタービンの開発と検証（GT-59470）の発表があった。

2.2　産業用途と熱電併給

論文数は７件であった。再熱ガスタービンのエンジン劣化が及ぼす影響（GT-59778），航空転用ガスタービンの脱炭素社会対応（GT-60264），ガスタービン排熱回収における有機ランキンサイクルと超臨界CO_2サイクルの比較（GT-59180），四段軸流圧縮機の段間噴射による性能向上（GT-58560），タービンブレードとベーンの積層造形が可能にする燃焼温度向上が小型熱電併給プラントのサイクル効率へ及ぼす影響（GT-58718），太陽電池パネル－水素製造設備－水素貯蔵設備－ガスタービン発電を組み合わせた試験施設（GT-59218），ガス圧力低下用タービン膨張機発電装置の経済分析（GT-60317，石油・ガス産業のGT-60125の続報）の発表があった。

2.3　超臨界CO_2発電

論文は最も多く26件で，圧縮機に関するものが多かった。燃焼による直接加熱のシステムに関して，設定燃焼温度での効率最大化（GT-59962），１MW直接燃焼燃

原稿受付　2021年７月30日
＊1　産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所（FREA）再生可能エネルギー研究センター　総括研究主幹（兼）省エネルギー研究部門　熱流体システムグループ付
〒963-0298　郡山市待池台２－２－９
E-mail: n-iki@aist.go.jp

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

焼器の設計（GT-60294），酸素燃焼燃焼器用インジェクター（GT-60328），高レイノルズ数超臨界CO_2を使用した内部冷却（GT-59630）の発表があった。燃焼による間接的な加熱のシステムに関して，石炭火力発電所の性能と経済性（GT-58867，58865），ガスタービン排熱回収用超臨界CO_2発電のエクセルギー分析（GT-59195），10MWeパイロットプラントの実証試験（GT-58981）の発表があった。集光型太陽熱プラント（CSP）用のシステムに関して，費用対効果の高いオプション（GT-59756），乾式冷却器空気側性能の影響（GT-59936），顕熱蓄熱材搭載CSPの設計性能分析（GT-59331）が発表され，溶融塩との熱交換に関して，過渡解析（GT-59276），最適化（GT-59939）の発表があった。

圧縮機に関して，性能マップ（GT-60275，58763，60252），設計ツール（GT-59961），性能測定（GT-59527），試験システムの予備設計（GT-59228），2.5MWe超臨界CO_2圧縮機の操作と制御（GT-59359）の発表があった。膨張機に関して，軸流タービンのCFD（GT-58883），ピストン膨張機（GT-60251）の発表があった。

また，CO_2混合物に作動媒体変更した際の性能（GT-60293），ディープラーニングに基づく設計外条件での性能に関する空力予測（GT-60056），３次状態方程式における超臨界疑似沸騰（GT-58788），450～650℃での鋼の延性に対する超臨界CO_2の影響（GT-59383），タービン軸端のドライガスシールチャンバーの冷却構造（GT-59177）の発表があった。

2.4 石油・ガス産業

論文数は15件で，混相流やファウリングに関するものが多かった。海底油田で海中設置する遠心圧縮機での湿りガス圧縮-ファウリングの影響（GT-59543），ナノ粒子の堆積物成長のモデル（GT-59458），多段試験圧縮機固定翼のファウリング推定のCFDと実機データからの定量的アプローチ（GT-59449），小型多段圧縮機における様々な洗浄液の評価（GT-59455），濃霧条件での二相流の全圧測定手法とレーザー流速測定（LDA/PDA）との比較（GT-59190）が発表された。気液スクラバーに関して，スクラバーレベルコントローラーの開発（GT-59078），レシプロコンプレッサー吸引部での湿りガス形成とキャリーオーバー（GT-59353）の発表があった。３次多項式近似を使用した遠心圧縮機性能近似法（GT-59678，59715）の発表があった。

天然ガスに関して，パイプラインへの水素混入の電力と圧縮の分析（GT-59398），ガス圧低下用タービン膨張器発電装置の設計と分析（GT-60125，続報は産業用途・熱電併給のGT-60317），小規模LNGコンセプト（GT-58989）の発表があった。ガスタービンの運用に関して，ガスタービントリップ予測への機械学習適用（GT-58914，58916），海洋油田のガスタービンの休止時間と健全性評価（GT-59318）の発表があった。

2.5 船舶

論文数は２件で，深海油田用シャトルタンカーのVOC処理のガスタービン発電装置（GT-59075），ガスタービン４基統合のCOGAG動力推進装置の船舶-エンジン-プロペラのマッチング特性（GT-59788）が発表された。

2.6 石炭，バイオマス，代替燃料

関連する論文10件を以下に紹介する。バイオマス利用に関して，ガスタービンDLE燃焼器での液体バイオ燃料使用（GT-58761），石炭－バイオマスIGCCの部分負荷運転（GT-59830）の発表があった。石炭や固体燃料に関して，石炭の25MWthフレームレス高圧酸素燃焼パイロットプラント開発（GT-60120），ロータリーデトネーションエンジンでの炭素・炭化水素粒子のシーディング（GT-58802）の発表があった。液体燃料に関して，熱分解油の噴霧燃焼（GT-59206）が発表された。

水素に関して，水素－天然ガス混合気失火時の排気ダクト内の圧力上昇予測（GT-59777），水素－天然ガス混合気の層流燃焼速度（GT-58870），水素マイクロミックス燃焼の不安定性（GT-59842）が発表された。また，CO_2回収と水素製造を組み込んだガスタービンベースの電気自動車充電ステーション（GT-60176）と燃料電池車用水素ステーション（GT-60269）が発表された。

4．小型ガスタービンおよびセラミックス

金子 雅直*1
KANEKO Masanao

Microturbines，Turbochargers & Small Turbomachines Committeeが主催するテクニカルセッションでの発表件数は，「Radial Inflow Turbines」の５件（日本から１件），「Turbocharger System and Compressors」の５件，小型ガスタービンに関する「Combustion, Fuels and Components」の５件（日本から１件）および「Rotordynamics and Testing in the Design Loop」の３件であった。総論文件数は18件で，

原稿受付 2021年７月21日
＊1 東京電機大学 理工学部 機械工学系
〒350-0394 比企郡鳩山町石坂
E-mail: kaneko@mail.dendai.ac.jp

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

昨年の31件から大幅に減少しており，過去６年の中でも最も少ない論文件数であった。

Ceramics Committeeが主催するテクニカルセッションでの発表件数は，「Mechanical Behavior of Ceramics and CMCs I」の４件，「Mechanical Behavior of Ceramics and CMCs II」の４件および「Thermal and Environmental Barrier Coatings」の３件であった。日本人研究者が関係している発表はなかった。総論文件数は11件で，昨年の13件と同程度であった。

いずれのテクニカルセッションでも，最初の２件は発表時間30分（発表：20分，質疑応答：10分）でプレゼンテーションを行い，残りのプレゼンテーションの発表時間は10分（発表：８分，質疑応答：２分）であった。以下に各セッションにおける主な発表の概要を示す。

１．Microturbines, Turbochargers & Small Turbomachines

「Radial Inflow Turbines」のセッションでは，燃料電池用過給機を構成するタービンの空力性能に結露が及ぼす影響の数値解析を用いた調査（GT-58472），過給機を構成するタービンを対象とした空力弾性応答のROM（Reduced-order Model）の開発（GT-58759），有機ランキンサイクルプラント向けラジアルタービンを対象とした，静・動翼非定常干渉に超音速ノズルの設計パラメータが及ぼす影響の数値解析を用いた調査（GT-59123）に関する発表があった。その他に，GT-58934はAdditive Manufacturingを利用した研究で，高回転数での運転を想定したラジアルタービン羽根車の内部冷却流路の設計と試験について報告していた。また，三菱重工業の研究グループが，数値解析結果から得られた流れ場を分析し，ロータの形状変更によりVGTラジアルタービンの振動応答が改善したことを報告していた（GT-59139）。

「Turbocharger System and Compressors」のセッションでは，固定式発電向け内燃エンジンの全体効率の向上を目的とした過給機の空力最適化手法の提案（GT-58843），過給機を構成する圧縮機のサージ限界を予測する手法の提案とその評価（GT-59439），舶用過給機を構成する圧縮機の多点三次元設計最適化手法の提案（GT-59518），内燃機関用過給機を対象とした，一次元気体挙動シミュレーションと２種類のミーンラインプログラムを統合した分析・設計手法の提案（GT-60326）の発表があった。また，GT-58840では過給機を構成する圧縮機を対象に，全周計算結果と同程度の予測精度を維持したまま計算領域の縮小により計算負荷を低減する手法を提案していた。

小型ガスタービンに関する「Combustion, Fuels and Components」のセッションでは，Inside-Outセラミックタービン向けの熱遮へいコーティングされたチタン合金冷却リングの構造性能と冷却性能の評価（GT-58869），１軸式ガスタービンのNARX（Nonlinear Autoregressive with Exogenous Inputs）モデルを用いた動特性予測手法の開発（GT-58960），3.2 kWマイクロガスタービンの燃焼器を対象とした燃料の異なる２条件におけるRANSとLESの計算結果の比較（GT-59618），廃熱変換システムとしての超臨界CO_2ブレイトンサイクルマイクロタービンのレイアウト最適化（GT-59654）に関する発表があった。また，産業技術総合研究所の研究グループが，50 kWクラスのアンモニア燃焼マイクロガスタービンを対象に起動過程の特性を調査した結果について報告していた（GT-59448）。

「Rotordynamics and Testing in the Design Loop」のセッションでは，テスラタービンの静的試験装置の設計と流れ場の可視化（GT-59175），スパイラル溝軸受により支持された剛性ロータの動的挙動の分析（GT-59513）および高速回転ターボ機械向けの翼端隙間計測システム（GT-59517）に関する発表があった。

２．Ceramics

「Mechanical Behavior of Ceramics and CMCs I」のセッションでは，SiCf/SiC複合材の引張応力下における室温でのマトリックスき裂の開始と疲労荷重下における後続損傷進展の特徴を調査した研究（GT-03796），繊維強化CMCを対象とした繊維の損傷を考慮したマイクロメカニカル引張圧縮疲労ヒステリシスループモデルの開発（GT-58485）や，1,316 ℃でのMI SiC/SiC CMCの層間せん断時における寿命限界挙動を調査した研究（GT-60277）に関する発表があった。また，室温から1,200 ℃の温度範囲におけるCMCの脆性マトリックス損傷の開始と進展挙動の内部状態変数理論，破壊力学および温度依存材料特性などに基づく予測手法の開発に関する発表もあった（GT-59789）。

「Mechanical Behavior of Ceramics and CMCs II」のセッションでは，平均直径150 μmのアルミナ粒子を用いて1,200 ℃の模擬燃焼環境下におけるMI SiC/SiC CMCのエロージョン挙動を調査した研究（GT-59125），ICME物理ベースアプローチを用いた室温および高温環境におけるCMCのエロージョン挙動と残留強度の予測に関する研究（GT-59782），SiCベースCMC内の損傷進展を調査した研究（GT-60395）の発表と，UHTC（Ultra High Temperature Ceramics）の材料特性の分析に関する発表があった（GT-60384）。

「Thermal and Environmental Barrier Coatings」のセッションでは，Inside-Outセラミックタービンの冷却リング内部表面に対する熱遮へいコーティングの適応性の調査（GT-58972），Siボンドコートの有無が耐環境コーティングの最高ボンドコーティング温度に及ぼす影響の評価（GT-59408）およびドーパントが熱遮へいコート内部の応力とひずみに及ぼす効果の調査（GT-59649）について発表があった。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

5．ターボ機械の性能と流れ
5.1軸流関係　5.1.1ファン・圧縮機

関 亮介*1
SEKI Ryousuke

ファン・圧縮機の空力分野では全10セッションにて44件が発表された。昨年度の66件からは減少したものの，一昨年度は40件であり，概ね例年と同程度であった。国別では米国からが10件と最も多く，次いで英国と独国から各7件であった。各セッション（太字はセッション名）における主な発表の概要を以下に示す。

圧縮機設計

コーナー剥離のトポロジーについて実測とCFDでの剥離におけるロスの連続性に着目し，剥離構造の非定常的な変化を分析した研究（GT-58730），周方向の非一様性が多段下での性能評価に与える影響を調査した研究（GT-59968）について報告された。

圧縮機設計Ⅱ

低*Re*数下での翼の剥離（剥離泡，遷移，再付着）とウェイクの効果についてDNSと実測から調査した研究（GT-59284），ケーシングトリートメントがチップでの*Re*応力生成に及ぼす影響の調査（GT-60314），前縁突起形状（クジラのヒレ）が性能に与える影響（GT-58798）等が紹介された。

圧縮機設計手法

衝撃波損失のロスモデルの提案（GT-58580），CDA翼のロスに与える*Re*数の効果（拡散，乱流生成，等）をLESで調査した研究（GT-58665）等，報告された。

チップクリアランス流れ

可変静翼部penny cavityの損失発生メカニズムに着目し，プラットフォームの傾斜がキャビティと主流に及ぼす影響を試験とCFDで調査した研究（GT-59182），大クリアランス条件のチップ漏れ流れを対象にLES・URANSの予測差の要因を調査した研究（GT-58745）等が発表された。

エンドウォール・シール漏れ流れ

シュラウド付き多段圧縮機の設計点での静翼前後ハブ流れの非定常挙動の調査（GT-58551），静翼ハブキャビティ内の流れ場，及び，漏れ流れが性能に与える影響（GT-60103，60115）等が発表された。

失速・インレットディストーション

高迎角条件での航空エンジンファンインテイクにおけるスイープの影響の調査（GT-58569），単段での*Re*数変化に対する旋回失速のセルサイズや速度，特性線のヒステリシスに着目し，非定常計測で調査した研究（GT-58457），動翼チップの周方向全圧ディストーションがファン安定性に及ぼす影響を調査した研究（GT-59851）等が報告された。

実験・リグ・設備運用

回転の効果が翼列の流れ構造に及ぼす影響をWall-modeled LESで調査した研究（GT-58793），高速多段圧縮機に挿入したプローブが性能・流れ場に与える影響に関して調査した研究（GT-01098），RANSと実験データの同化による性能予測（GT-59200）等が発表された。

遷音速圧縮機

AIを用いて遷音速ファンの効率を制約範囲内で最適化する高速・低コスト手法を開発した研究（GT-59166），遷音速圧縮機で発生した旋回失速・サージを含む6つの非定常現象を実験的に調査した研究（GT-58828）等が発表された。

ファンとプロペラの設計

亜音速～遷音速ファンの前縁欠損が失速に与えるメカニズムを調査した研究（GT-59495），超高バイパス比ファンの空力性能・複合材ファンブレードのインレットディストーションに伴う空力弾性の検証に関する研究（GT-58941）が紹介された。

製造，変形及び劣化

複合材ファンの表面のうねりが層流-乱流遷移・プロファイル損失に与える影響の調査（GT-58676，58678），小型化が進む航空エンジンのコア圧縮機翼の製造限界と後縁損失がプロファイルロスに与える影響（GT-59452）等について発表がされた。

原稿受付　2021年7月7日
＊1　三菱重工業㈱　総合研究所　ターボ機械研究部
ターボ機械第二研究室
〒676-8686　高砂市荒井町新浜2－1－1
E-mail: ryosuke.seki.en@mhi.com

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

5.1 軸流関係　5.1.2 タービン

濱崎 浩志*1
HAMAZAKI Hiroshi

軸流タービンの空力に関するセッションでの論文総数は14件であった。内訳は欧米から9件，アジアから5件（うち1件は日本）であった。昨年度の35件に比べると半数以下に減っている。一時期隆盛を極めた低圧タービンのHigh Lift化に関する論文数は大きく減り（今回は2件），関心が非定常性や要素間干渉などに移行したためと推測される。以下，各セッションについて概要を記述する。

Loss Generation & High Fidelity CFDのセッションでは，Endwall Lossに及ぼす翼列入口条件の影響を調査した論文（GT-59694）があり興味を引いた。この中で1950年代のHawthorneによる二次流れ理論式と，CFDによるSecondary Kinetic Energyによる比較考察を実施しており，1950年代の理論式が最近のCFD結果と定性的に非常に良い一致をしていることを示している。GT-59606では，2次流れロスに及ぼす上流翼のWake通過の影響についてCFDと翼列試験結果を比較しながら2次流れロスの非定常性の影響を考察している。High Fidelity CFDに関しては，HPT段を対象としたDNS解析およびLES解析を行いレイノルズ数と主流乱れの影響について，Entropyロス解析による翼列間干渉ロスなどを調査しているもの（GT-58995）や，HPTノズルを対象に入口温度分布のロスへの影響をLES解析で調べたもの（GT-58816）などがある。

Wake, Transition & Purge Flowsのセッションにおける低圧タービン翼の境界層遷移に関するものとしては，従来からのWake通過による遷移について論じたもの（GT-58563）や，低圧タービン翼面速度分布を模擬した平板試験で表面粗さの影響を調査したもの（GT-59192）がある。また，動翼入口からのPurge空気が動翼流路を通過する際の挙動について，上流ノズルの中空孔にボアスコープを通しVolumetric Velocimetry Systemを利用して，Purge空気の動翼翼間への混入流れを可視化したもの（GT-59701）がある。計測手法に独創性があり興味深い。

High Speed LPT & Turbine Rear Structuresのセッションでは，高速3段IPTの設計について従来のLPTとの比較を通じて翼列ロスの変化の傾向を論じているほか，試験結果についての説明がなされている（GT-59219）。

Component Interactionのセッションでは，Turbine Center Frame（TCF）上流のHPTからのPurge空気がTCFを通過する際に主流とどのような干渉をしているのかについて，Purge空気にSeeding（CO_2やN_2Oを使用）を混ぜ，その濃度計測をもとに評価を行っており，HPT動翼ハブ二次流れやTip Clearance流れ，TCF内の二次流れとの干渉が計測されている（GT-58586）。

最後に，Aerodynamic Analysisのセッションでは，TPIV（Thermographic particle image velocimetry）を使うことで計測プローブの影響なく，計測される速度データと温度データの情報から圧力場を求めるという内容の発表があった（GT-59388）。この論文ではCFDの流れ場に対してTPIV計測の解像度に即してデータ収集することで，精度良く全圧を求めることができることを示しており今後の計測技術として期待できそうである。

原稿受付　2021年7月16日
＊1　㈱IHI　航空・宇宙・防衛事業領域
〒196-8686　昭島市拝島町3975-18

5.2 遠心関係

玉木 秀明*1
TAMAKI Hideaki

遠心関係では，4セッション，16件の発表があった。昨年の33件に比べると約半分に減少している。発表の内訳は遠心圧縮機に関するものが11件，ラジアル・斜流タービンに関するものが5件である。欧州から13件，アジアから3件（日本からは1件）の報告があった。ニューラル・ネットワーク（ANN）を活用した最適化設計とその効果の検証についての報告が多くみられた。

ANNを用いた最適化設計として，GT-59998では高ボス比遠心圧縮機インペラとその静止流路，GT-59473では空力と構造強度の両者を満足する遠心圧縮機インペラ

原稿受付　2021年6月25日
＊1　㈱IHI　技術開発本部
〒235-8501　磯子区新中原町1番地
E-mail: tamaki5546@ihi-g.com

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

と羽根付きディフューザの設計，GT-59736ではガスエキスパンダー用斜流タービンロータ，GT-59382ではラジアルタービンのスキャロップ形状の設計について報告している。また，GT-59334ではCFD結果から遠心圧縮機内に発生する損失を壁面摩擦，２次流れ，翼端漏れ渦，衝撃損失に機械的に分類し，逆解法によって主な損失を低減する形状を見出す設計法を提案している。

遠心圧縮機の性能改善の試みとして，GT-59255では羽根付きディフューザのハブ，シュラウドおよびハブとシュラウドにエンドウォール形状を適用し効率向上と作動域拡大への効果を調べている。GT-59555では可変インレットガイドベーン（VIGV）の使用を前提に設計された前縁にバレルタイプのスウィープ，後縁にバウを持つ点切削によるインペラと従来の母線切削によるインペラの性能の比較と，その差異の原因分析を行っている。GT-58548ではVIGVの閉じ側での損失の急増を抑えるためにIGVを前半部と後半部に分割して流れの転向をそれぞれで半分ずつ受け持つVIGVモデルを製作し，従来型VIGVに対する優位性を調べている。また，GT-59723では超臨界CO_2ブレイトンサイクル用遠心圧縮機にVIGV，可変ディフューザを導入する利点を１次元性能予測モデルを使い調査している。

流れの非定常性に関する議論としては，GT-59462では羽根付きディフューザを有する遠心圧縮機に対してURANSとRANSを適用し，流れの非定常性がインペラ性能へ及ぼす影響を調査している。GT-58876では羽根付きディフューザを有する遠心圧縮機の流れをURANSとNonlinear Harmonic法で解き両者の比較と，実験で得られた静圧の時間変化を用いた精度検証を行っている。

遠心圧縮機の基本性能の調査として，GT-60204ではHeとNeの混合ガスであるネリウム向け遠心圧縮機試験装置を用いてレイノルズ数，周速マッハ数，比熱比が遠心圧縮機のポリトロープ効率に及ぼす影響を調査している。GT-59902ではオープンインペラとクローズインペラの性能比較を行っている。

過給機用ラジアル・斜流タービンとしては，エンジン搭載時の性能を重視し，GT-59382では低U/C（Uはロータ入口チップ周速，Cは理論ガス速度）での性能改善のためのマルチエントリー・スクロールの設計とその効果について調査している。また，GT-60069ではエンジン脈動流下でのツインエントリタービンの性能を予測する１Dモデルについて報告している。ラジアルタービンの過給機以外の用途としてはGT-60239ではターボコンパウンド用の低圧・低速タービンの設計について述べている。なお，本タービンロータは入口羽根角がラジアルではなくキャンバーを持っている。

5.3 非定常流れと数値流体力学

宮澤 弘法*1
MIYAZAWA Hironori

1．概要

ターボ機械の非定常流れでは３セッションで14件の講演があった。昨年の９セッション，29件の講演からは大幅に減少している。今年度は中国から３件，アメリカ，インド，イタリア，ドイツから２件，日本，フランス，スウェーデンから１件ずつ発表があった。設計手法とCFDモデリングにおいては，10セッションで42件の講演があった。昨年の13セッション52件の発表に対して減少している。国別の発表件数はアメリカが最多で10件，次いでイギリスから９件，ドイツから５件，イタリアと中国から４件ずつとなっていた。日本からもLESとDESのセッションにおいて１件の発表があった。

2．Unsteady Flow in Turbomachinery

非定常流れ関係では，タービン，コンプレッサー，キャビティー流れとアプリケーション関連のセッションがそれぞれ１つずつ組まれた。タービン関連では航空機エンジンの高圧タービンにおけるエントロピー波と呼ばれる渦度と温度の乱れが段の空力特性等に与える影響を実験により調査した研究（GT-59598）と燃焼室とタービンのLESの計算において，その結合部の境界で双方向の影響を考慮しながら各要素を独立して計算できる境界条件の与え方を提案・評価した研究（GT-58854）が報告された。さらに，燃焼器とタービンの相互作用のモデリング（GT-59344），低圧タービンにおいて異なる解像度の格子とスキームを用いたLESから求めた損失と実験値の比較（GT-59095），非定常流動と翼の伝熱についての連成シミュレーション手法の提案（GT-60276）について10分間のショートプレゼン形式で報告された。

圧縮機関係では遠心圧縮機のディフューザー内部の失速現象を初生から旋回のメカニズムにわたって詳細に解析した研究（GT-59869）と軸流の２重反転ファンの低回転時の不安定流動について，実験に基づいた検証を行った研究（GT-58937）について報告された。Rapid

原稿受付 2021年７月20日
＊1 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: hironori.miyazawa.c3@tohoku.ac.jp

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

Talkでは遠心圧縮機内部の非定常流動（GT-59921），遷音速圧縮機内部の翼端漏れ渦の崩壊（GT-58492）についてCFDを用いて解析した研究について発表された。

その他，航空機エンジンのキャビティーから流入・流出する流れと低圧タービンを通過する流れの非定常な相互作用プロセスをURANSを用いて解析し，損失発生メカニズムを明らかにした研究（GT-59932）などが報告された。非定常流れ全体として，ターボ機械とその他の要素の相互作用によって引き起こされる非定常現象に着目し，大規模な解析だけでなくモデル化によって精度とコストを両立させようという取り組みが多く見られた。

3．Design Methods & CFD Modeling for Turbomachinery

ファン・圧縮機のセッションでは静翼のコーナー剥離流れに対する既存のRANSモデルの問題点を指摘し，改善を試みた研究（GT-59468）や，物質の付着に起因する圧縮機翼面粗さが遷移モデルの設定に及ぼす影響を調査した研究（GT-60003）などが報告された。燃焼器関連では燃料噴射装置をタービン軸回りに螺旋状に配置する新たなコンセプトの燃焼器の流れについてCFDを用いて調査した研究（GT-59286）などについて発表された。タービンの最適化については，高圧タービン翼の将来の劣化の影響を考慮した上で設計時の形状を最適化するために，機械学習や統計的手法を駆使しながら適切なパラメータの組み合わせを求めた研究（GT-59520）が最も印象的であった。遠心圧縮機関連ではインペラ出口における速度三角形の最適化（GT-59210）などについて報告された。

LESとDESについては，DDESの式に修正を加えることによってRANSからLESへの移行の部分で生じる非物理的な影響を低減させる研究（GT-59077）やハーモニックバランス法をLESに拡張し，翼列の非定常流れを解析した研究（GT-59193）などが報告された。その他にはRANSコードに非平衡境界層の影響をモデル化して導入する研究（GT-58645）や非定常流れのセッションにも見られた燃焼器とタービンの相互作用を考慮した境界条件を与えてシミュレーションをした研究（GT-59329）などについても発表された。

6．伝熱関係

都留 智子*1
TSURU Tomoko

1．全般

伝熱関係の分野では，論文セッションが18，チュートリアルセッションが１の合計19セッションが開催された。論文セッションでの発表件数は合計87件と例年の半分以下まで落ち込んでおり，オンライン開催の影響が顕著に現れている。分野別の発表件数の傾向としては例年同様フィルム冷却が最も多く，内部冷却がそれに続く形ではあったが，フィルム冷却の発表件数は例年の３割程度と大きく減少していた。しかし，その中で機械学習やAdditive Manufacturing（AM）等といった新しい技術との組み合わせに関する話題は関心度が高く，特に機械学習については設計パラメータが複雑に絡むような伝熱分野においても計算機能力の向上に伴い最適化設計の実用化が近づいてきている雰囲気が感じられた。

地域別に見るとアメリカ29件，ヨーロッパ27件，中国27件と，ほとんどの発表がこの３つの地域に集中しており，日本と韓国は１件ずつで寂しい印象であった。来年は対面開催が復活する兆しも見えているようだが，多くの地域から研究者が再び集まり議論できる場が戻ってくることを期待したい。

2．各分野の傾向

2.1　フィルム冷却

フィルム冷却では，発表件数（28件）の２/３近くが数値解析によるもので，Conjugate Heat Transfer（CHT）解析（GT-59015）や非定常解析（GT-58661, 59050, 59062, 59196, 59663, 59825）といった大規模な解析が主流になってきている。

フィルム孔の加工方法や材質の多様化に対する研究発表としては，放電加工と３D造形による孔の流量係数の違いを調べたもの（GT-59038，59638）や，CMC材料にフィルム孔を施工した場合の繊維の向きの影響（GT-59062），孔の代わりに多孔質材を設置した場合（GT-58991）などが紹介された。中でもGT-59062では繊維の向きによってフィルム冷却効率が大きく低下するメカニズムを流れ場の可視化結果を基に分析しており，数値解析ベースでの考察ではあるが参加者の関心も高く非常に興味深いものであった。

その他，新しい実験方法としてはトランスピレーショ

原稿受付　2021年８月３日
＊１　川崎重工業㈱　航空宇宙システムカンパニー
航空エンジンディビジョンエンジン技術総括部
エンジン技術開発部　エンジン熱技術課
〒673-8666　明石市川崎町１－１

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

ン冷却のような密な冷却構造のフィルム冷却効率や熱伝達率を評価するために面ヒータをマイクロリソグラフィーで造形する方法（GT-59275）が提案された。AMの実用化に伴い，従来のスケール感から一桁下がった領域で必要となる精密な実験方法のニーズに応えていくには，業界を超えて幅広い技術を活用する必要があり，数値解析の高精度化と同様に実験方法についてもまだ調査の余地が多そうである。

2.2 内部冷却

内部冷却では23件の発表があった。単一の冷却構造というよりは例えばインピンジ冷却とリブあるいはピンの組み合わせといったような複合構造を題材とした研究紹介が多く，少ない発表数の中でJet Impingementのセッションは二つ開催されていた。そのような複合構造の研究としては，ターゲット面にピンを設置した場合のピンの大きさと伝熱促進の関係を調べたもの（GT-58813），流路高さの影響を調べたもの（GT-59343），翼前縁を模擬したインピンジ流路に設置するリブの形状の検討（GT-58897）などが紹介された。また，その他冷却性能改善方法として，流路を段違いに形成する構造（GT-58913, 58895）や衝突噴流の手前で流路を分岐する（GT-59080）といったクロスフローに関する話題も提供された。

これらの研究はAMによる流路の微細化・複雑化をいくらか想定しているものと推測されるが，形状の自由度が増すことにより設計の思想も切り替えていくことの重要性を改めて感じた。そのAMについては，数は少ないものの今年もセッションが組まれており，タービン翼内部流路の製作誤差に関する検討（GT-59114，59684）やセラミック材料にピンフィン流路を造形して伝熱特性を調べたもの（GT-60100）について発表があった。また，AMとは少し違うがCMC材料の繊維の向きが伝熱・流動特性に与える影響を実験的に調査し従来型の冷却構造と比較した研究（GT-59588）も紹介され，活発な議論が行われていた。

2.3 二次空気関係

二次空気系に関しては16件の発表が行われ，圧縮機ロータの回転キャビティ流れと伝熱，リムシール部の主流巻き込み特性に関する研究がその半数程度であった。いずれにおいても非定常性に着目した発表が目立ち，回転キャビティ内に発生する大規模渦の挙動を圧力計測により分析した結果（GT-59090，59605）などが報告された。また，実機環境における二次空気の挙動に着目した研究としてエンジン加速時の二次空気流れの遅れがタービンの空力・伝熱に与える影響（GT-59142）やActive Clearance Control用の空気配管位置が周辺の伝熱に与える影響（GT-59158），ブラシシールの回転試験（GT-02234）が報告された。

2.4 最適化

最適化に関しては，フィルム冷却に関してサロゲートモデルによる孔形状や配置の最適化（GT-59015, 59269），Adjoint法によるShaped hole形状の最適化（GT-59332）によるフィルム冷却性能の改善についての報告があった。GT-59269では，フィルム冷却の不確かさ解析にモンテカルロ法を使用した事例が紹介されている。

内部冷却関係でも，Adjoint法とCHTを組み合わせて翼内部流路を最適化したもの（GT-59422），リブ付き流路の多目的最適化（GT-58725）について報告された。いずれも流路構造は単一で比較的シンプルな流路についての最適化事例であるが，複数流路を組み合わせた実機に近い形状で計算できるようになる日は遠くなさそうである。実験のコスト削減に大きく寄与することが期待できるが，最適化のための設定，得られた最適解の分析など，冒頭で述べたように設計パラメータの多い伝熱分野では計算する側に高いセンスを求められそうである。

7．燃焼および燃料関係

堀川 敦史*1
HORIKAWA Atsushi

1．概要

Combustion, Fuels & Emissionsの燃焼および燃料関係では，論文セッションが20セッション，論文発表数は100件。論文発表の筆頭者の所属を国別に分類すると，ドイツが25件，アメリカ23件，インド10件，中国９件，イタリア８件，イギリス５件，日本３件（共著を含むと５件）。プレナリー/パネルセッションが４セッション，チュートリアルセッションが１セッションの計25セッションが開催された。

原稿受付 2021年７月27日
＊1 川崎重工業㈱ 技術研究所 熱システム研究部 研究一課
〒673-8666 明石市川崎町１番１号
E-mail: horikawa_a@khi.co.jp

2．テクニカルセッション

2.1 燃焼振動，燃焼不安性

Combustion Dynamicsでは，今年も多くの発表があった。系のモデリング等に関する研究（GT-58903，59321，

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

58947，59972，59866）が報告された。現象の解明では，燃焼器内の圧力多点計測から燃焼振動モードの特定（GT-59098）やハイスピード（以降，HS-と記す）PIV（Particle Image Velocimetry），HS-OHラジカル自発光計測もしくはHS-OH PLIF（Planar Laser-Induced Fluorescence）を併用した流動場ならびに火炎（熱）発生の計測とPOD（Proper Orthogonal Decomposition）を適用した固有モードの特定等（GT-58832，59113，60011，59718，58358，60216）に関する報告があり，計測システムおよび計測結果の解析技術の高度化が感じられた。また，URANS（Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes）やLES（Large Eddy Simulation）を用いた燃焼CFD解析からFTF（Flame Transfer Function：火炎伝達関数）の導出や解析結果の音響FEMへの適用に関する研究（GT-59267）の報告があった。

2.2　燃焼CFD解析

噴霧の着火，火炎伝播に関するLES（GT-59380，58770）やメタン/水素/空気の予混合バーナを対象に火炎伸長と熱損失モデルを加えた解析結果と実験結果の比較（GT-59063）が報告された。水素専焼（100%水素燃焼）micro-mix燃焼技術に関連し，詳細反応モデルを用いた NOx生成とその圧力依存性の予測（GT-58926）が報告された。産業用・航空用ガスタービン燃焼器への適用では，大型ガスタービン缶型燃焼器のLESによる各運転条件における火炎挙動の予測（GT-60184），航空用アニュラ燃焼器のLES，FGMと詳細反応モデルを用いた解析結果と実験結果の比較ならびに並列計算時の計算コストの比較（GT-59395）がそれぞれ報告された。また，解適合格子の燃焼CFD解析への適用とLESにおけるメッシュ数の削減効果（GT-59100）についても報告があった。

2.3　液体燃料，バイオ燃料，合成燃料

DLE燃焼器のDual Fuel化（GT-59162）が報告された。基礎研究では，単孔から噴射される燃料の挙動（GT-59421），圧力変動が付加された流れ場における液膜微粒化の噴霧特性に関する研究（GT-58862），潤滑油の高温着火に関する研究（GT-60043）がそれぞれ報告された。

2.4　水素燃焼技術と発電実証

水素・天然ガスの混合ガス燃料への対応では，既存のDLE燃焼器もしくは小改良を施したDLE燃焼器での要素試験，安定燃焼とNOxについて調査等（GT-58650，58986，59074，59236）が報告された。水素専焼では，micro-mix燃焼技術を用いた燃焼器要素開発と発電実証（GT-59666）が報告された。

2.5　燃焼器部品冷却

壁面近傍に形成されるメタン/空気，水素/空気の火炎形成とガス温度分布，壁面への熱流束計測（GT-59170），エフュージョン冷却ライナー近傍でのHS-OH PLIF計測による燃焼ガスと冷却空気の干渉に関する研究（GT-59306）が報告された。また，Jet-AとHEFA燃料（バイオジェット燃料：Hydroprocessed Esters and Fatty Acids）の燃焼CFD解析・CHT（conjugate heat transfer）解析による燃焼器ライナー温度の予測と比較に関する研究（GT-59443）も報告された。

3．パネルセッション

プレナリーセッションでは「Opening up the Design Space to Afford Efficient Gas Turbine Using H2 and Biofuels」，パネルセッションでは，「H2 Utilization / Transportation/ Storage/ Production and CCS」，「Use of Ammonia as Energy / Hydrogen Carrier in Gas Turbine」，「Hydrogen Combustion - a Thermoacoustic Perspectives」が組まれ，脱炭素社会に向けた動きを反映したものとなった。それぞれのセッションで，水素やアンモニア発電に向けた技術開発，発電プロジェクト等が紹介された。

8．材料，構造および製造技術

平口 英夫*1
HIRAGUCHI Hideo

1．全般

2020年度に続き，2021年度もコロナ禍であったことから，TurboExpo2021は「Virtual Conference」として開催された。各プレゼンターはZoomを使用してプレゼンテーションを行った。材料，構造および製造技術の「Technical Track」は，「Manufacturing Materials and Metallurgy（製造と冶金）」と「Structures and Dynamics（構造とダイナミクス）」であり，それぞれ25件と24件（Bearing and Seal Dynamics，Rotordynamics およびAerodynamicsは除く）の発表があった。「構造とダイナミクス」の分野における内訳は，「疲労，破壊および寿命予測」が14件，「設計と工学における新手法」が5件，「確率論的手法」が5件である。「製造と冶金」

原稿受付　2021年7月19日
＊1　技術士（機械部門 登録番号：93064）
（公）日本技術士会所属
〒105-0011　港区芝公園3－5－8　機械振興会館
E-mail: hideoh@abox2.so-net.ne.jp

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

の中の「積層造形（Additive Manufacturing, AM）」のセッションおよび筆者がプレゼンテーションを行った「構造とダイナミクス」の中の「疲労，破壊および寿命予測」のセッションにおける発表内容について概説する。

2．製造と冶金：積層造形

「製造と冶金」の「Technical Track」において，25件のうち3Dプリンターに該当する「積層造形」5件について報告する。前半2件は「Deep Dive」と名付けられた30分（発表：20分，質疑応答：10分）のプレゼンテーション形式であり，後半3件は「Rapid Talk」と名付けられた10分（発表：8分，質疑応答：2分）のプレゼンテーション形式で実施された。

RWTH Aachen Universityからは，「積層造形部品の電気化学的欠陥分析（EC-D）」（GT-59482）に関する報告があった。これは，電気化学的欠陥分析が，非破壊X線検査で検出可能な巨視的欠陥を全て検出することができ，さらにX線検査では検出されない微小な欠陥も検出可能であることを示す内容であった。

Pennsylvania State Universityからは，「積層造形における溶融池の形状に対する組成の影響を要約した計算研究」（GT-59738）に関する報告があった。これは，積層造形における微細構造の制御に用いられる溶融池の形状・寸法について，組成とプロセスパラメータの両方の影響を評価し，溶融池の寸法は，密度，液相線温度，および比熱と強い相関関係を示すことが分かったという内容であった。

Siemens Energy（Berlin）からは，「IN625からL-PBFで製造されたハニカムの性能試験」（GT-58844）に関する報告があった。これは，L-PBF（レーザー粉末床溶融結合法）で製造されたハニカムの摩擦と漏れの性能を調査し，表面がやや粗いものの，当該性能は従来のハニカムとほぼ同等であり，L-PBF設計による将来の性能向上が期待できるという内容であった。

Pennsylvania State Universityの別の研究チームからは，「L-PBFを使用して加工されたIN738LCの微細構造」（GT-58786）に関する報告があった。これは，積層されたIN738LCにおいて，積層領域に存在するボイドの割合はビルドの高さ方向に沿って減少し，多結晶粒子サイズもビルドの高さ方向に沿って特徴ある変化を示すことが判明したため，この結果を今後の高γ’Ni基超合金の積層造形に活かしていくという内容であった。

Siemens Energy（Orlando）からは，「L-PBFにおける表面粗さのレーザー入射角とコンポーネントビルド方向への依存性」（GT-59755）に関する報告があった。これは，表面法線に対するレーザー入射角は表面粗さに大きな影響を及ぼすことから，レーザーマシン，層の厚さ，およびビルドプレートの方向のパラメーター全体と表面粗さを体系的に比較して，当該入射角と表面粗さとの相関関係を求め，将来の表面粗さの迅速な認定基準の策定に発展させるという内容であった。

3．構造とダイナミクス：疲労，破壊及び寿命予測

「構造とダイナミクス」の「Technical Track」において，「疲労，破壊および寿命予測」の中に，さらに3つのセッションがあり，これらについて各々前半は「Deep Dive」2件，後半は「Rapid Talk」3件についてプレゼンテーションが行われた。上記のうち，「Constitutive Materials Modelling」では，アルミニウム合金の短亀裂領域における疲労損傷検出のためのエネルギー散逸測定基準に関する報告（GT-58787），単調および低サイクル疲労下での一方向凝固Ni基超合金の結晶粘塑性モデルに関する報告（GT-59581）等があった。「Fatigue Damage Analysis」では，より高いタービンサイクル温度に向けた二重ケーシング蒸散冷却部品のクリープ疲労設計に関する報告（GT-58836），高温多軸疲労の実験的および数値的調査に関する報告（GT-58959），離散コサイン変換を用いたガスタービン用単結晶Ni基超合金の転位密度とクリープ歪み速度との関係評価に関する報告（GT-58801）等があった。「Data Driven Life Analysis」では，フレッティング疲労－ショットピーニングによる強化への統合シミュレーションアプローチに関する報告（GT-59905）等があった。

各セッションの質疑応答は，各プレゼンテーションの終了ごとに行われ，セッションチェアから必ず一つ質問が出されており，テンポよく会議が進行され好印象を与えていた。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

9．ロータダイナミクスとベアリング

金子 康智*1
KANEKO Yasutomo

1．全般

この分野は，シールや軸受の動特性を含めたロータの振動に関連する論文と，翼振動に関連する論文とに大別できる。今年度のロータダイナミクスに関連する論文数は約100件であり，昨年度の論文数（約150件）から大幅に減少している。新型コロナウイルスの感染拡大により，今年度は論文申し込み時からオンライン開催になることが決定していたことが論文数減少に影響していると推察される。講演はDeep Dive（30分）とRapid Talk（10分）に分かれており，Deep Diveで興味ある論文が発表されていたため，Deep Diveの論文を中心に紹介する。

2．ロータダイナミクス

様々な力学的特性を有するロータを適切な手法でモデル化し，振動特性を解析している論文が多い。具体的には，蒸気タービンロータにおいて最終段動翼の共振通過時に軸受で計測された翼軸連成振動のメカニズムの解明（GT-59160），ラビンリンスシールまで含めた遠心圧縮機全体をCFDでモデル化してシステム全体の動特性を解析（GT-59725），実機で計測されたデータを重回帰分析し，その結果を利用して発電機ロータの熱曲がりを予測する手法（GT-60036）などが報告された。

3．ベアリング

専用の試験設備を利用して加振試験を行い，様々な特徴を有する軸受の特性を計測し，予測値と比較している論文が多い。具体的には，ティルティングパッド軸受のパッド材料を鋼から銅に変更した場合の軸受特性を実測して解析結果と比較（GT-59401），パッドに多孔質のカーボングラファイトを使用したときの軸受特性の計測（GT-59131），軸受損失の低減を目的に油量を絞ったときの油温や動特性の計測（GT-58771）などが報告された。また，密封容器内でのガスフォイル軸受の動特性の計測（GT-69468），2段バンプフォイル軸受の動特性の解析（GT-59937）などが報告された。

4．シール

バルクフロー理論やCFDを利用して様々なシールの特性を解析し，実験と比較した論文が多い。具体的には，気液二相流ポンプの環状シールの特性を計測し予測値と比較（GT-60106，60108），二相流条件下でラビリンスシールやポケットダンパシールの特性を予測するモデル式を提案し計測結果と比較（GT-58958），ドライガスシールの作動中のクリアランス計測法と予測法を開発してモデル試験で検証（GT-58547）などが報告された。また，CFDを利用して環状シールの不安定化力を低減させるスワールブレーカの効果を検証（GT-58956）なども報告された。

5．翼振動

翼振動の論文は，ミスチューン現象の解析，ダンパ翼の振動やラビングなどの非線形振動の解析，非定常流体力による応答解析（NSVやフラッタを含む）に大別できる。ミスチューン現象に関しては，インテンショナルミスチューンを利用して強制振動や自励振動を低減する設計手法（GT-58470, 59283, 59528 59927），ニューラルネットワークを利用してミスチューン系のパラメータを同定する手法（GT-59887），モーダルパラメータの回転数依存性を考慮した共振通過時の過渡応答特性の解析（GT-58982）などが報告された。翼の非線形振動に関しては，動翼とケーシングのラビング振動の解析（GT-58931, 59008, 59216, 59298），2翼を2個の加振器で位相差加振して回転中と同じハーモニック加振力を再現しダンパ翼の減衰特性を計測（GT-59272）などが報告された。非定常流体力に関する論文は，CFDとFEMを組合せて様々な機種に発生する非定常現象を調査している論文が多い。具体的には，アニュラー型燃焼器により生じる後流動翼への加振力のCFD解析（GT-59040），多段軸流圧縮機の翼列干渉力（2段上流静翼のウェーク）による動翼の共振応力の解析と計測（GT-59149），動翼のシュラウド先端からの漏れ流れや静翼のシールからの漏れ流れが動翼の強制振動に及ぼす影響の解析（GT-58766, 58779）などが報告された。また，構造（ミスチューン系）と流体を完全に連成させたモデルによる応答解析（GT-59124），計測値と解析値の差異を究明するために翼列干渉力のサイドバンドを考慮した応答解析（GT-58780）なども報告された。

原稿受付　2021年6月22日
＊1　龍谷大学 先端理工学部 機械工学・ロボティクス課程
〒520-2194　大津市瀬田大江町横谷1－5
E-mail: y_kaneko@rins.ryukoku.ac.jp

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

10. 蒸気タービン

妹尾 茂樹*1
SENOO Shigeki

5件の論文セッションで，21編の発表があり（内GT-60247はライブ発表無），日本からの発表は4編だった。運転負荷範囲拡大（GT-58704，59315），起動停止回数や負荷変化速度の増加（GT-59135，59252，60049，60355）を目的とした，運転柔軟性向上に関する発表が多かった。これらの研究は，非定常現象や運転条件が変化する動的システムを対象とし，定常状態や定格負荷を対象とする研究に対し，より複雑な現象の解明と制御を目的としている。そのため多くの研究は，大規模非定常解析（流体・熱・振動・応力・変形）と試験計測の両面から詳細に分析されている。信頼性に関する発表（GT-01893，58497，58509，59242，59535）が多かったことに対し，効率向上を直接の目的とした発表は1編（GT-59268）のみであった。発電用の大型だけでなく，産業用の小型蒸気タービンに関する発表も多かった。

1．運転柔軟性向上

シュツッツガルト大学の3段低圧モデル蒸気タービンを対象に，低流量条件で起きる旋回失速現象が，試験と非定常流解析（URANS，DES）により比較分析された（GT-58704）。試験では，最終段静動翼間外周壁の非定常圧力を計測し，設計流量の18，12，6.3％の条件で，回転数の2倍以下の5つの周波数を持つ大きな圧力変動が観測された。一方，URANSは12％流量以下，DESは6.3％流量でしか，大きな圧力変動が再現されなかった。試験の旋回失速は，流量に大きく依存せず，回転数の45-50％の速度で旋回する。その旋回速度特性を非定常流解析により予測するためには，試験と同じく流量を増加させる方向で解析することが重要で，流量を減らす方向で解析すると，特に18％流量条件で，旋回失速の回転速度と圧力変動を，試験より大きく評価する。また，最終段静動翼間静圧のトラバース計測で観測された，流量低下に伴い動翼のポンピング効果で静圧が増加し，その翼高さ範囲が拡大する現象は，解析では捉えられていない。

運転停止時の高圧タービン車室の熱応力評価を目的に，内外車室間の熱伝達を，試験とLESにより評価した（GT-59153）。熱伝達は，高温の内車室外面上部から熱プリュームが上昇する自然対流に，軸方向流れによる強制対流が加わった複雑な現象となる。LESによる内外車室間の温度分布と内車室外面の熱伝達率の周方向分布は，試験結果と良く一致した。壁面レイノルズ応力の非等方性を考慮することが重要であると分析している。

高速起動時の熱応力を評価するために，MAN社12MW蒸気タービンの，高圧車室内面における断熱温度と熱流束の時間変化を計測した（GT-59252）。そのために壁面断熱温度と熱流束を計測できるセンサーを開発している。

2．長翼開発

Siemensが，3600rpm機用鋼製40.7インチ最終長翼段（L-0）とその上流段（L-1）を開発した（GT-59315）。DSS（dairy start and stop）運転に適応し，かつ広負荷範囲での性能と信頼性を，真空回転試験とモデル蒸気タービン試験により検証した。最終段動翼はフリースタンディング翼で，翼根部は湾曲逆クリスマスツリー型である。シュツッツガルト大学の3段低圧モデル蒸気タービン試験により，排気圧力は30kPaまで，負荷は極低負荷から高負荷までの条件で，過大な振動応力が発生しないことを確認している。

高負荷かつ軸流マッハ数0.3の低体積流量条件の時，翼間位相差90°前後の後ろ回りモードで，空力減衰比が負となり非失速フラッターリスクが生じるが，製造公差範囲内の翼固有値ばらつきを考慮したミスチューニング配置に，先端負圧面後縁側を削る固有振動数調整を翼一枚おきに加え，翼一次曲げ固有値を意図的ミスチューニング配置させることにより，非失速フラッタを回避している。

また，低負荷・高排気圧力条件で，失速フラッタ（翼周速の約30％の速度で翼回転逆向きに連れ回る旋回失速）を示す非定常圧力変動が，初期設計翼の蒸気タービン試験で観測されたが，改良した最終翼の試験では，圧力変動振幅は許容値範囲内に抑制できた。この改良の具体策は公表されなかったが，ターボ機械を低負荷・低体積流量などの広い作動範囲に適用すると，不安定な流体関連振動対策に苦労することを正直に示した，共感の持てる発表だった。

3．湿り蒸気

三菱パワーのガスタービンコンバインドサイクル発電所（T地点）の，105MW蒸気タービン実機最終段静翼正圧面に，三種類の水膜分離スリットを実装し，水膜分離性能を計測した（GT-59541）。スリットから中空静翼内部に吸引された気液二相蒸気は，断熱された配管でサイクロンセパレータに導かれ気液分離されたあと，それ

原稿受付 2021年6月30日
＊1 三菱重工業㈱
〒676-8686 高砂市荒井町新浜2－1－1

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

ぞれ流量計測される。スリット内に水膜を貯める段差を設けた形状が，分離水膜量に対し随伴蒸気量を低減でき，効率的な液膜分離構造であることが示された。

3段低圧モデル蒸気タービンの，圧力比と流量を固定し，入口温度を変えて，最終段出口湿り度を0％（dry），6.7％，8.4％と変えた試験結果を，非平衡凝縮を考慮した蒸気流解析により分析した（GT-59645）。試験のTotal-to-total効率は，dryに対し，出口湿り6.7％で2.8％低下，出口湿り8.4％で3.6％低下した。解析による凝縮開始位置は，平衡湿り度約3.5％の位置であり，出口湿り6.7％では最終段（L-0）静翼，出口湿り8.4％では最終段前段（L-1）動翼となる。その結果段落負荷配分が変わり，出口湿り8.4％では，最終段入口全圧が小さくなり最終段負荷が減少，L-1段負荷が増加する。最終段静翼で過冷却状態となるため流量係数が大きくなり，入口全圧が下がるためと分析している（報告者はこの分析に少し疑問を持っているが）。

4段低圧モデル蒸気タービンを対象にした平衡蒸気流解析を実施し，段落平均湿り度に基づく湿り損失補正（バウマン則）を加えることで，タービン効率が試験結果と良く一致することが示された（GT-59241）。

4．機械学習の適用

西安交通大学から，深層学習を適用した3編の研究（GT-59234，60049，60335）が報告された。どの研究も，入出力変数が多いビッグデータに対する統計解析手法と割り切って適用されており，深層学習そのものは研究対象ではなく，適用効果を評価した発表であった。深層学習で得られた相関関係は因果関係が明確でないため，社会システム（発電所や電力ネットワークなど）中の機械（蒸気タービンなど）に適用した場合，認識（分類），解釈，判断，行動の役割を，人間とどのように分担するかは，まだ研究と検証が必要な課題との印象を受けた。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

11. 統計資料

学会誌編集委員会
Journal Editorial Committee

本年に採択された技術論文件数および過去５年間に発表された技術論文件数をFig. 1 ～ Fig. 14に示す。各分野における論文件数の変動の分析等にお役立でていただけると幸甚に存じる。なお，図中の数値は，基本的に本年分についてはProceedingsに収録されている論文，過去５年分についてはASME Digital Collection（https://asmedigitalcollection.asme.org/GT）に収録されている論文を集計したものであり，各図における論文件数の集計対象セッションはTable 1に示す通りである。

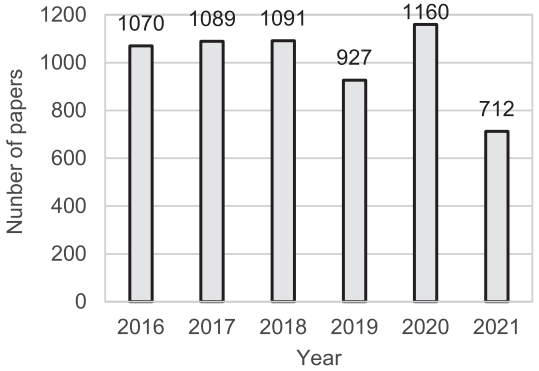


Fig. 1　All Technical Sessions

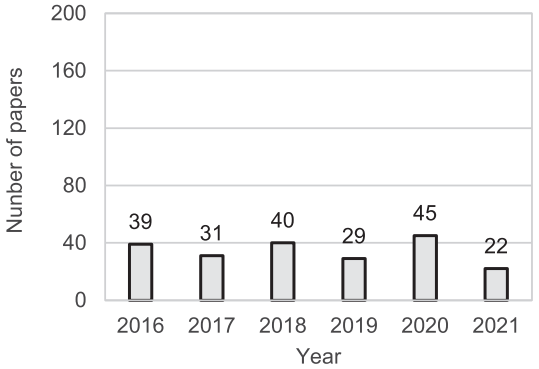


Fig. 2　Aircraft Engine

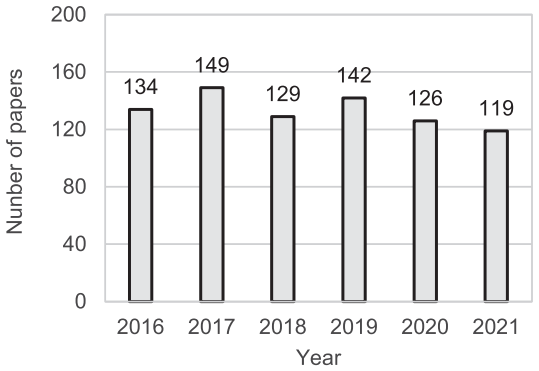


Fig. 3　Industrial Gas Turbine

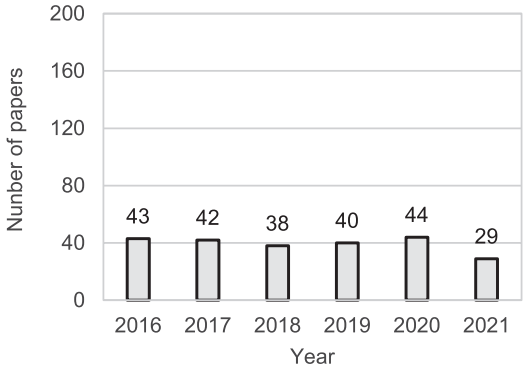


Fig. 4　Small Gas Turbine and Ceramics

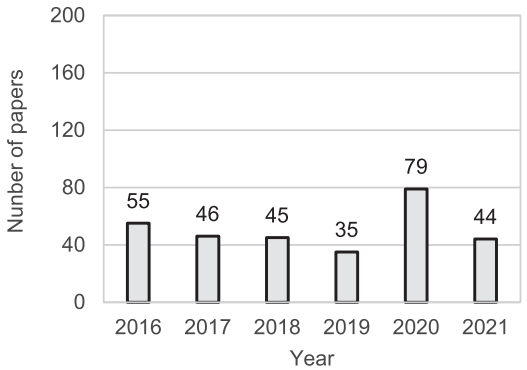


Fig. 5　Turbomachinery（Axial Flow Fan & Compressor）

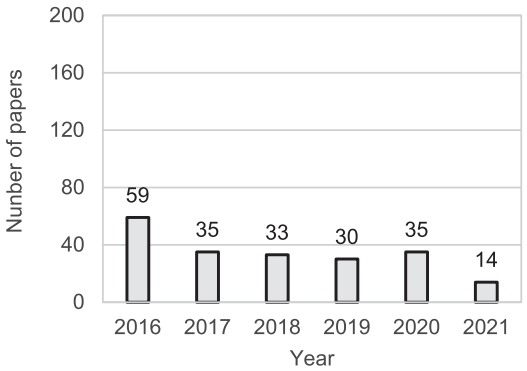


Fig. 6　Turbomachinery（Axial Flow Turbine）

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

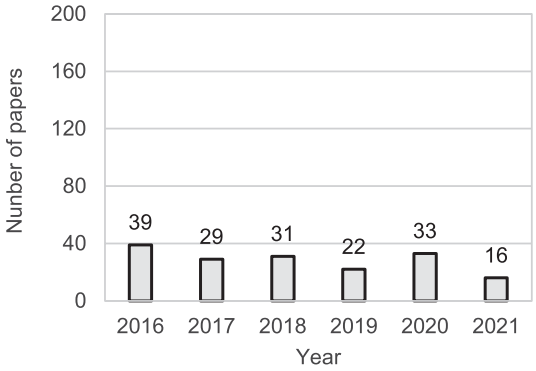


Fig. 7 Turbomachinery (Radial Turbomachinery)

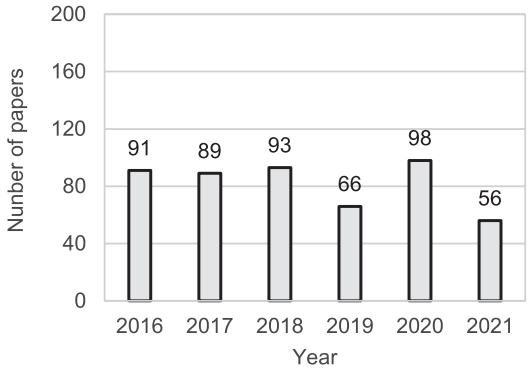


Fig. 8 Turbomachinery (Unsteady Flow and Computational Fluid Dynamics)

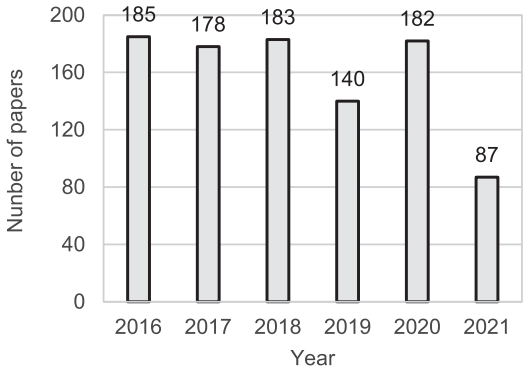


Fig. 9 Heat Transfer

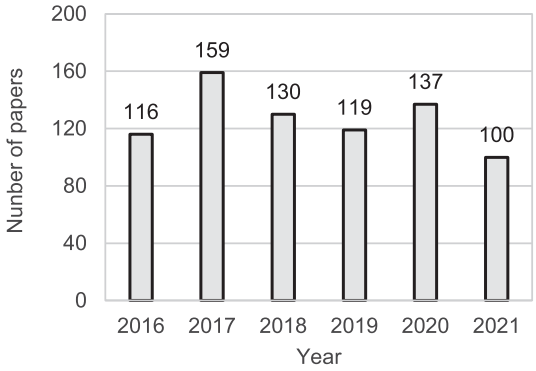


Fig. 10 Combustion and Fuels

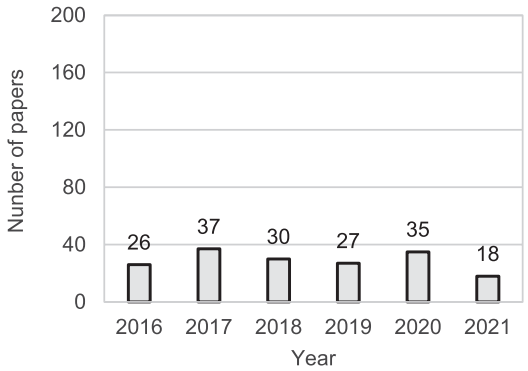


Fig. 11 Controls and Diagnostics

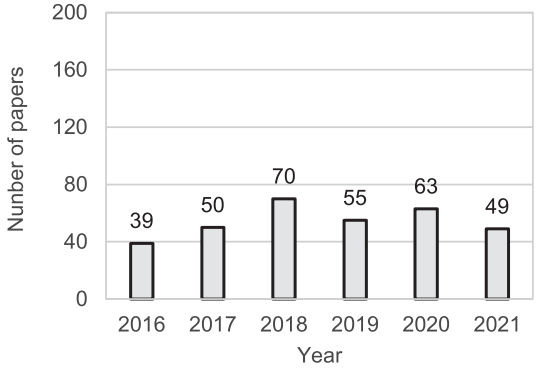


Fig. 12 Material, Structure and Manufacturing Process

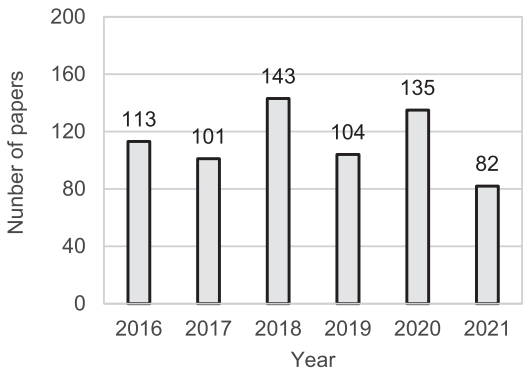


Fig. 13 Rotordynamics and Bearings

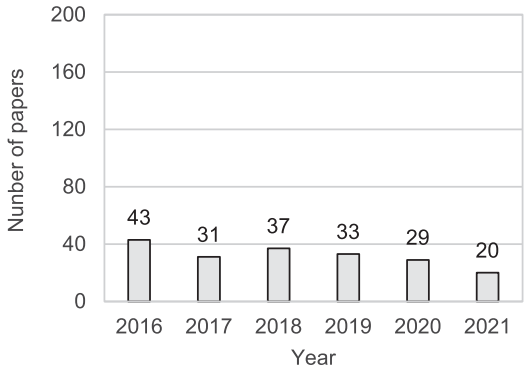


Fig. 14 Steam Turbine

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

Table 1

図番号	集計対象セッション
1	全テクニカルセッション
2	Aircraft Engine Committeeが主催したテクニカルセッション
3	Coal, Biomass, Hydrogen & Alternative Fuels Committee, Cycle Innovations Committee, Electric Power Committee, Industrial & Cogeneration Committee, Marine Committee, Oil & Gas Applications Committee, Organic Rankine Cycle Power Systems CommitteeおよびSupercritical CO_2 Committeeが主催したテクニカルセッション
4	Microturbines, Turbochargers & Small Turbomachines CommitteeおよびCeramics Committeeが主催したテクニカルセッション
5	Turbomachinery Committeeが主催した「軸流ファン・圧縮機」に関するテクニカルセッション：Axial Flow Fan & Compressor Aerodynamics
6	Turbomachinery Committeeが主催した「軸流タービン」に関するテクニカルセッション：Axial Flow Turbine Aerodynamics
7	Turbomachinery Committeeが主催した「遠心圧縮機・ラジアルタービン」に関するテクニカルセッション：Radial Turbomachinery Aerodynamics
8	Turbomachinery Committeeが主催した「設計手法とCFDモデリング」および「非定常流れ」に関するテクニカルセッション：Design Methods & CFD Modeling for Turbomachinery, Unsteady Flows in Turbomachinery
9	Heat Transfer Committeeが主催したテクニカルセッション
10	Combustion, Fuels & Emissions Committeeが主催したテクニカルセッション
11	Controls, Diagnostics & Instrumentation Committeeが主催したテクニカルセッション
12	Manufacturing Materials & Metallurgy Committeeが主催したテクニカルセッションおよびStructures & Dynamics Committeeが主催した「エマージング手法」,「疲労，破壊と寿命予測」および「確率論手法」に関するテクニカルセッション：Emerging Methods in Design & Eng., Fatigue, Fracture & Life Prediction, Probabilistic Methods
13	Structures & Dynamics Committeeが主催した「ロータダイナミクス」,「構造力学と振動」,「軸受とシールの動力学」および「空力励振と減衰」に関するテクニカルセッション：Rotordynamics, Structural Mechanics & Vibration, Bearing & Seal Dynamics, Aerodynamics Excitation & Damping
14	Steam Turbine Committeeが主催したテクニカルセッション

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

資源とエスプレッソの街パースより

From Perth, with the Flavour of Espresso/Resources

黒川 英人*1
KUROKAWA Hideto

キーワード：豪州，資源，天然ガス，LNG，パース，生活
Key Words：Australia, Resources, Natural Gas, LNG, Perth, Life

1．はじめに

筆者は豪州にて天然ガスプロジェクトの事業運営に携わっており，西豪州パースにて業務を行っている。西豪州の州都であるパースは豪州の他の大都市であるシドニーやメルボルンと比べて知名度は低いが，「世界一美しい都市」や「世界一孤立した都市」といった呼ばれ方をする特徴的な都市である。また，豊富な天然資源に恵まれている豪州の中でも，鉄鉱石などの鉱業や石油・ガスなどの資源産業が盛んな西豪州の中心都市として発展してきた都市でもある。今回本稿への寄稿の機会を頂いたため，豪州のエネルギー事情，パースでの仕事や生活をご紹介させていただく。

Fig. 1　パース市街地

2．豪州のエネルギー事情とLNG

米国やカナダほどではないが，豪州は一人当たりのエネルギー消費量が比較的多い国である。日本の１次エネルギー消費量は19.1 PJ（2019年）[1]であるが，人口が日本の約５分の１である2500万人の豪州の１次エネルギー消費量は6.2 PJ（2018-19年）[2]となっている。エネルギー構成として石油が４割弱，石炭と天然ガスがそれぞれ１/４程度という構成は日本に近いが，石炭と天然ガスの割合は生産国でもあるためか日本よりやや多い。原子力は無く，近年再生可能エネルギー（以下，再エネ）の導入量が著しく増加しているが，まだ再エネの１次エネルギーに占める割合は6.4％と，元々水力が一定量ある日本の9.2％と比べて意外と低い。

豪州の資源産業は，国内総生産GDPに占める割合は１割程度ではあるものの，輸出高においては全体の半分以上を占める重要な産業であり，鉄鉱石，石炭，LNG（液化天然ガス）等を，日本を含むアジア各国に輸出している。日本に輸入される石炭の６割以上，LNGの約４割は豪州産であり，貿易相手国として結びつきが強いだけでなく，日本へのエネルギー安定供給の観点でも重要な国である。特に西豪州は州総生産GSPに占める資源産業の割合が約４割[3]と高く州内経済への影響が高いため，主要企業の動向や業界の話題も頻繁に新聞やニュースに取り上げられる。周囲に鉱業関係者も多く，何気なく会話していた子供のクラスメートの母親が実は元ドリラー（日本ではあまり出会うことの無い石油・ガス田の井戸掘削技術者）だったり，探鉱技術者だったりすることも珍しくない。

豪州のLNGプロジェクトは1989年に生産を開始したNWS（North West Shelf）プロジェクト，2006年に生産を開始したBayu-Undan & Darwinプロジェクト以降，2010年代に８件のLNGプロジェクトが生産を開始し，現在10件のLNGプロジェクトが稼働している。2019年に豪州のLNG輸出量は7700万トンとなり，僅差でカタールを抜いて世界一となった。LNGは豪州の重要な輸出産業の一つであるとともに，一部は国内へのエネルギー供給を担う基幹産業となっている。西豪州からのLNG輸出量は豪州全体の輸出量の半分以上を占めており，パースには州内のLNGプロジェクトのオペレーターだけでなく，他州のLNGプロジェクトのオペレーターの本社や支社，加えてプロジェクトを支えるコント

原稿受付　2021年８月10日

＊1　東京ガス㈱　海外本部　海外事業企画G
Tokyo Gas Australia Pty Ltd Level 11, Brookfield Place Tower 2, 123 St Georges Terrace, Perth WA 6000 Australia

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

ラクター等の関係企業のオフィスも多数あるため，豪州LNG産業の中心都市と言えるだろう。

豪州国内の電力事情に目を向けると，豊富で安価な石炭に依存しているものの，近年，石炭火力発電所の閉鎖，太陽光や風力といった再エネ導入量の増加により，全発電量に占める石炭の割合は低下してきている。2000年初頭の発電に占める燃料の割合は石炭：ガス：再エネ＝８：１：１であったが，2019年には石炭の比率は56％まで低下してきており，一方でガスの割合は21％，年々導入量が増えている風力や太陽光により再エネは21％まで増加している[2]。昨年日本でも非効率な石炭火力発電所の休廃止が話題になったが，近年豪州でも石炭火力発電所の閉鎖が話題になっている。東海岸を中心に各州の電力需要を担ってきた100万kW以上の石炭火力発電所の閉鎖は電力市場への影響が大きい。ヴィクトリア州の電力需要の約２割を担ってきたHazelwood発電所の閉鎖（2017年）はまだ記憶に新しく，今後計画されているニューサウスウェールズ州のLiddell発電所（2022～2023年）についても電力市場への影響が懸念されている。州単位で見ると再エネ導入率の高い州もある。南豪州では風力を中心に再エネ導入量が増加しており，2018年には総発電量に占める再エネ比率が50％を超えた。タスマニア州は元々水力が豊富であり，2020年には総発電に占める再エネの割合が100％に達している。Small-scale Solarと呼ばれる住宅やビルの屋根に設置する太陽光発電の普及率が高いのも豪州の特徴である。国内発電量の５％近くをSmall-scale Solarが担っており，2020年末時点での総容量は2.7 GWに相当する[4]。日照率の高いパースの住宅地を車で走ると，ほとんどの住宅の屋根に太陽光発電パネルが設置されているのを目にするが，現地の知人の話では数年で設置費用の元が取れるため多くの住宅に設置されているとのことである。

エネルギー生産国なので，電気代やガス代が安いかと思いきや，日本とあまり変わらないのが実態である。地震国ではないので欧米の主要都市と同様に比較的古い住宅が多く，冷暖房も全室一括制御であったり，白熱灯／蛍光灯を多く使用していたりするため（プラグや設備が合わずLEDに切り替えられないものもある），日本より高い電気代を支払うこともある。赴任時に最初やるべきことに住まい探しがあるが，日本では見られない「築100年のLovelyでCharmingなレンガ造りの家」といった物件が当たり前のように賃貸市場に出ているのも驚きである。石油も一部は国内生産しているものの半分以上は輸入に依存している。ガソリン価格は日本より２～３割安いが，小売りの慣習なのか曜日によって価格が２割近く変動するため振れ幅は日本より大きく，筆者の住むパース近郊では毎週火曜日が最安日となっている。

豪州は天然資源に恵まれているものの，近年の低炭素社会やCO_2ネット・ゼロを目指す時代の流れの中で石炭産業への風当たりは強くなってきており，クリーンエネルギーと言われてきたLNGであっても温室効果ガス低減のための規制対応や企業努力が求められている。一方で，広大な土地に加え再エネ適地も多いことから，数百MWからGW級の大規模な再エネ発電所の建設や検討が続いている。再エネの電力利用だけでなく，再エネ由来のクリーンな水素・アンモニアの将来的な国内利用や輸出を見据え，技術実証やプロジェクト検討などの取り組みも始められている。カーボンクレジットに関する事業開発や企業間のM＆Aも活発化しており，また，バッテリー関連でも原料となるリチウム鉱山の開発やニッケル・コバルトの探鉱活動が増加している。連邦政府や各州政府も長期的な観点で新たな産業育成のための政策や補助金等を発表し支援を強化している。低炭素社会，将来のCO_2ネット・ゼロ社会を見据え各国で取り組みが始まっている中，資源大国豪州の動向が注目されている。

３．パースでの仕事

豪州の西側約１/３を占める西豪州は，日本の約７倍にあたる広大な面積を有している一方で，人口は約260万人と京都府とほぼ同じであり，東海岸各州と比べても人口密度の低い州である。州都パースはスワン川のほとりに位置する自然豊かな美しい都市であり，周辺地域を含めると州人口の８割にあたる約200万人が生活している。最も近い100万人以上の都市である南豪州アデレードまで約2100 km，首都キャンベラまで約3100 kmの距離があり，世界一孤立した都市とも呼ばれている。豪州在留邦人約10万人のうち西豪州の在留邦人は約8000人と言われているが，日系企業のオフィスも多く街中で日本人を見かけることも多い。

筆者の勤務する東京ガスオーストラリア社では，当社が参画している５つのLNGプロジェクト（Bayu-Undan & Darwin，Pluto，Gorgon，QCLNG，Ichthys）の事業運営を行っている。各プロジェクトでは，オペレーターと呼ばれる企業がプロジェクトを取り仕切り運営を行っているが，ノンオペレーターと呼ばれる当社のような参画企業も，プロジェクト参画者として年間事業計画や将来開発計画の精査，運営委員会等の会議体への参加，予算管理，監査や監督官庁への対応などを行っている。プロジェクトによっては，LNG船の出荷販売や豪州国内

Fig. 2　オフィス内での打合せの様子（左側が筆者）

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

でのガス販売，拡張計画等に関する契約交渉等もあり業務内容は多岐にわたっている。

オペレーターでは数百名のスタッフがプロジェクト運営や開発検討に携わっているが，当社のようなノンオペレーターは，通常数名，出資比率が高い企業でも十数名程度のスタッフで対応している場合が多い。当社は各プロジェクト約３名で対応しているため，少人数で上記のような多岐にわたる業務を効率的に進めていかなければならない。既に稼働しているプロジェクトの事業運営であるため定型的な業務が多いと思われがちだが，日々のオペレーションや規制当局への対応だけでなく，最近ではCO_2排出規制や設備拡張に関する新規案件なども出てきており，毎週新しい動きがあるといっても過言ではない。関係者も多く，日頃から各プロジェクトのオペレーターや参画企業であるオイルメジャーや現地資源企業，日系企業などの関係各社と密にコミュニケーションをとりながら業務を進めている。

話は変わるが，豪州に来て驚いたのが，紅茶ではなくコーヒー文化ということである。豪州は英連邦王国の一国なので紅茶をイメージしていたが，圧倒的にコーヒーの方の人気が高い。イタリア系移民が持ち込んだエスプレッソをもとに独自のコーヒー文化が根付いており，米国発祥の某有名チェーンも撤退を余儀なくされている。人口比ではパリよりもカフェが多いとのこと，確かにカフェの数が多くコーヒーの種類も多い。エスプレッソの上にスチームドミルク入れたFlat Whiteが定番であり，お湯にエスプレッソを加えたLong Blackが日本のコーヒーに近い。だいぶメニュー等に慣れてきたとは思っているが，カフェで順番待ちをしていると「Long Mac（Macchiato），double shot, less hot water and formed milk」といった手練れ感のある注文を聞くこともあり奥が深い。

打合せというと会議室をイメージする方がほとんどかと思うが，パースではカフェで打合せを行うCoffee Meetingがポピュラーであり，街中のカフェのいたるところで行われている。１対１や少人数での簡単な打合せや情報交換を行う時は基本的にCoffee Meetingであり，筆者も週に何回かカフェで打合せを行っている。席同士は多少離れているものの，周りから時折Drilling（掘削），Subsurface（地下），Ferrite/Magnetite（酸化鉄），Corrosion/Erosion（腐食/浸食）といった単語が漏れ聞こえてくるのもパースならではである。本稿のタイトルであるが，紙面で香りが伝わらないのは重々承知の上で，パースの街中のカフェでエスプレッソの香りと共に日々繰り広げられているCoffee Meetingの雰囲気が少しでも伝わればと思い，付けさせていただいた。

仕事中の移動手段が基本的に「歩き」であるのもパースの特徴である。市内のCDB（Central Business District）にあるSt Georges Terraceという通りの周辺約１kmの範囲に多くの企業や政府系機関，法律事務所，

Fig. 3　オフィスビルの立ち並ぶSt Georges Terrace

会計事務所などのオフィスがあるため，基本的に歩いて他社やカフェに移動する。一本の通りを行ったり来たりするため，移動中に他社関係者に出会うことも多く，会議からの帰り道に暫くぶりの知人と出会い，そのままカフェでCatch-up（近況に関する情報交換）をすることも時々ある。

年に１～２回程度だが，LNG液化・出荷基地のある西豪州北部の現場や，国内他都市への出張の機会がある。パース空港の国内線ターミナルやチャーター機ターミナルにいくと黄色やオレンジ色の蛍光色の付いたつなぎの作業着と安全靴を履いている搭乗者を多く見かける。豪州では鉱山などの僻地の現場での勤務形態として，最寄りの都市から飛行機で現場に行き２週間～数週間ごとに勤務と休暇を繰り返すFIFO（Fly In Fly Out）という勤務形態があるが，これらの搭乗者の多くがFIFO作業者である。特に西豪州はFIFOが多いため，路線によっては通常の国内線でも搭乗者の半分以上が作業着ということもあり，スーツを着ていると完全に浮くことなる。日本では見ない光景であり，初めて目にした時は驚いたが，これも鉱業の盛んな豪州ならではの光景である。

４．COVID-19の影響

昨年から世界中で猛威を振るっているCOVID-19に関して豪州でも様々な形で影響が出ているが，国境・州境閉鎖を含む政策対応や，ロックダウン（都市封鎖）を行っているため，これまでの感染者総数は約３万5000人（2021年７月末現在）と人口当たりの感染者数では他国と比較して少ない。豪州政府は2020年３月に豪州国民，永住者とその家族を除く日本を含む海外からの渡航者の全面入国禁止を発表し，現在も日豪間の移動は基本的にはできない状況が続いている。西豪州政府も2020年４月頭に州境閉鎖，移動規制を含む検疫規則を発令しその後もアップデートしているが，入国時の隔離指示に違反したり定められたCOVID検疫規則を破ったりすると最大12カ月の懲役か５万ドル（約400万円）の罰金というのには驚いた。実際に，2020年７月にフットボールの試合中にフィールドに入った男性が規則に違反したとして５万ドルの罰金を科せられ，2020年８月には密かに州境を超えて入国した他州の女性が懲役６カ月を言い渡された。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

西豪州ではこのような徹底的な政策もあり2020年４月以降市中感染者ゼロ（海外や他州からの入国者，入港船の船員などの隔離者は除く）の状態が10カ月続いていた。しかし2021年１月末に１人の市中感染者が見つかったため５日間のロックダウンが行われた。この「１人ロックダウン」は世界中に報道されたが，逆に10か月間も市中感染者が出ていなかったことに各国メディアが反応した。その後も何度かロックダウンが行われたが，感染者に関する政府発表が行われたその日の深夜からロックダウンというのが定番になっている。パース市内の人々も，日頃から州政府の指示に従いスマートフォンのアプリによるスーパー等の訪問先での入場登録を行っており，ロックダウン時も皆マスクを着用するなどしっかりとルールを守っている。厳格かつスピード感のある政策対応，州境や空港などでの水際対策に加え，ルールをしっかりと守る市民，そして孤立している都市であることが幸いしているのかもしれない。

COVIDは海外赴任者の移動にも大きな影響を与えた。当社も2020年４月に日本からの着任が決まっていた赴任者数名が渡航できず，約半年間の渡航待機，リモート勤務を余儀なくされた。ほとんどの赴任者が４月に渡航する予定で住居を引き払っていたため，東京のホテルやウィークリーマンション，時には実家などを転々としながらオンラインで海外業務を行うといった経験をしている。渡豪後も２週間の隔離が必要であり，ホテルの部屋から１歩も出られない隔離生活は特に小さい子供のいる赴任者にとってはかなり大変だったと聞いている。

以前からこちらにいる赴任者もCOVIDの影響で日本への一時帰国や出張ができないため，皆２年近くまたはそれ以上日本に帰ることができていない。長期間帰国できなくなると，家族や親戚はもちろんのこと，本場の日本食が恋しくなる。パース市内には日本食材店もいくつかあり，ラーメン屋や回転ずし，それなりの「日本食」が食べられるレストランは何軒かある。しかし，蕎麦屋や牛丼屋，豚カツなどの専門店は無く，これらの日本食が無性に食べたくなる時もある。食べられないと自前で作るしかなく，最近上達したスキルの一つに自宅での豚カツ作りがある。ちょっと良い豚肉を調達するために少し離れたところにあるブッチャーまで行かなければならないが，最近は月１回の豚カツが我が家の定番メニューになっている。

パースにおけるCOVIDの状況は落ち着いているものの，度重なるロックダウンによってオンライン会議が当たり前になってきたこともあり，パース市内の近場の企業との打合せであってもオンラインで行うことが増えている。昨年オフィスで，一人一人がオンライン会議のために会議室を使ってしまうため会議室不足が課題として顕在化した。当社は今年６月にパース市内でオフィスの移転を行ったが，良いタイミングであったため，一人でオンライン会議や電話会議に参加するための個室を複数設置したり，全ての会議室にオンライン会議対応の設備を導入したりしている。

Fig. 4　一人でオンライン会議等に使える個室

５．パースでの生活

豊かな自然に囲まれているパースでは，市内中心部から車を30分～１時間程度走らせると，インド洋に臨む白砂のビーチや空気の澄んだ渓谷や森林公園，ワイナリーの立ち並ぶのどかな丘陵地帯など，都市の喧騒から離れた場所にたどり着くことができる。また，動植物の固有種も多く，日本では目のすることにできない野生のカンガルーや大きなトカゲ，見たこともない植物も見ることができる。

広々とした公園も市内に多数点在するが，中でもキングスパークはニューヨークのセントラルパークより大きく，都市にある公園としては世界最大級（400 ha）であり，西豪州の固有種を含む種類豊かな植物や動物を目にすることができる。広い芝生や植物園，遊歩道，子供の遊び場やカフェもあり，予定の無い週末にふらっと行って芝生に寝そべっているだけでも気持ちが良い。パース市街地を見下ろすことのできる場所は観光スポットとなっており，昼間の景色だけでなく夜景が奇麗な場所でもある。

豪州はスポーツが盛んな国だが，独自のスポーツ文化が発展しており，人気のあるスポーツが日本と全く異なる。最も人気があるのはオーストラリアン・フットボールと呼ばれるラグビーをもとにして豪州で独自に発展した球技であり，２番目に人気があるのはクリケット，３番目をラグビーや，ゴルフ，テニスやサッカーが争って

Fig. 5　郊外で出会える野生のカンガルー

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

Fig. 6 広大なキングスパーク

いる。また，英連邦の国々で女性を中心に親しまれているネットボールも盛んである。オーストラリアン・フットボールはAFLというプロリーグで試合が行われており，シーズン中は毎週末市内のパース・スタジアムで試合が行われている。初めて観戦したときは全くルールが分からなかったが，何度も見ていると面白くなり，今ではパース近郊の港町フリーマントルのチームを応援するようになっている。

日本でも趣味で和太鼓を叩いていたが，パースに来てからも縁あって市内で最も大きな和太鼓グループ「太鼓音」に入ることができ，地元の様々なイベントでパフォーマンスをしてきた。毎年三月に行われるパース日本祭りでフィナーレを務めるグループであり，日豪文化交流に末席ながら参加させていただいている。また当グループは上記AFLチーム，フリーマントル・ドッカーズのサポーターを務めており，パース・スタジアムのホームゲームでは毎試合選手入場時にフィールド上で和太鼓によるチアリングを行っている。私も何回か参加したが，６万人収容のスタジアムのフィールド上で観客を見上げながら現地のプロスポーツチームを応援するといった貴重な経験はなかなかできるものではない。COVIDや業務の影響もあり最近なかなか参加できていないが，落ち着いたら早々に復帰したい。

筆者は当社入社前に米国で勤務していたこともあり，パース勤務が決まった時も言語に関してはそれほど心配していなかったが，現地独特の言葉や発音，いわゆるオージーイングリッシュには着任当初かなり苦労した。また，基本的に英国英語であり，米国英語との言い回しや単語の違いには今でも気付かされることが多い。LNG生産の副産物にコンデンセートと呼ばれる液体重質分があるが，最初電話で「Condy」と言われたときは分からず，後にCondensateを意味することを同僚に教えてもらった。例を挙げると切りがないが，朝食をBrekkie，バーベキューをBarbie，チョコレート・ビスケットをChoccy Biccy，上記Australian FootballをFooty，Thank youをTa，AfternoonをArvoと呼ぶことがあり，短くするものや，「y」や「ie」を付けるものが多い。米国の「Thanks friend, have a good afternoon!」はこちらでは「Ta mate, have a good arvo!」（タ，マイト，ハヴァグッアーヴォ）となる。最後にオリンピック関連の俗語を一つ。初めて「Bradburied」を聞いた時はCondy同様全く意味が分からなかったが，オージーに聞くと豪州では一般的な俗語動詞とのこと。2002年冬季オリンピックのショートトラックで，他の選手の失格や転倒により幸運にも豪州に金メダルをもたらしたSteven Bradbury選手から，予想外に成功を手にしてしまうことを「Bradbury」と言うらしい。これも現地にいなければ聞かない言葉の一つである。

Fig. 7 パース日本祭にて，「太鼓音」の仲間と

6．あとがき

パース勤務５年目となりこちらでの生活には慣れてきたものの，習慣，言語等で驚いたり苦労したりすることは尽きない。海外生活は米国に続き二度目だが，家族，仕事の同僚，趣味の仲間や知人，近所の人々など，多くの方々の支えがあって生活できている。仕事でもプライベートでも予想外なことがいろいろと起きるが，経験や勉強になることが多く，自身が置かれている今の環境と周囲の人々に感謝しながら引き続きパースでの仕事や生活を楽しみたい。

最後に，本稿への寄稿に協力いただいた当社エネルギーソリューション本部ソリューション技術部の松井徹GM，東京ガスオーストラリア社の田部井純CEOをはじめ，日頃からお世話になっている皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

(1) 経済産業省資源エネルギー庁，総合エネルギー統計2019年度確報版.
(2) Australian Energy Update 2020, Energy.gov.au, Department of Industry, Science, Energy and Resources.
(3) WA Economic Profile and COVID-19 Supplement, November 2020.
(4) Clean Energy Regulator: Postcode data for small-scale installations ＜http://www.cleanenergyregulator.gov.au/RET/Forms-and-resources/Postcode-data-for-small-scale-installations#Summary-of-postcode-data＞（参照日2021年７月31日）.

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

資　料

2020年ガスタービン及び過給機生産統計

ガスタービン統計作成委員会

ガスタービン統計作成委員会は，2020年１月から12月におけるガスタービン及び過給機の生産状況を調査・集計して生産統計資料を作成いたしましたので，ここにご報告申し上げます。

陸舶用ガスタービンは14社，航空用ガスタービンは３社，過給機は９社に統計データの提供をご依頼し，ご提供いただいた範囲で生産統計資料として集計いたしました。なお，過給機はすべて排気タービン方式のターボチャージャーであり，機械駆動によるものは含まれておりません。資料提供にご協力いただいた関係各社に対し，この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

Ⅰ．概要

１．2020年陸舶用ガスタービン生産統計概要

⑴　生産台数および出力（図１）をみると，台数は前年の214台に対し181台で，前年に比べて33台（16%）の減少となった。出力区分別の前年との比較では，小型は35台減少，中型が２台減少，大型は４台の増加となった。また，出力では前年の3,735MWに対し3,951MWと，前年から216MW（６%）の増加となった。出力区分別の前年との比較では，小型は12MWの増加，中型が60MWの増加，大型は167MWの増加となっている。出力区分別の傾向は次の通りとなった。

ア）小型（735kW以下）は前年と比べて，台数は51%の減少，出力は56%の減少で，それぞれ37台，15MWとなった。

イ）中型（736～22,064kW）は前年と比べて，台数は２%の減少，出力は21%の増加で，それぞれ125台，343MWとなった。

ウ）大型（22,065kW以上）は前年と比べて，台数は27%，出力は４%の増加で，それぞれ19台，3,593MWとなった。

⑵　用途別（表１，図２，図３）をみると，ベースロード発電用（BL），非常用発電用（EM），その他（MC）用途の他，今年も艦艇用（MM），実験用（XP）に実績があった。台数で最も多いのは非常用発電用（EM）の135台（75%），出力で最も多いのはベースロード発電用（BL）の3,589MW（91%）である。また，艦艇用（MM）は大型で２台，実験用は小型で１台計上された。前年同様，ピークロード発電用（PL），商船用（M），石油化学プロセス用（OR），その他のプロセス用（PR），空調用（ACD）は実績なしとなった。全体的な構成は例年と大きく変わっていない。

ア）非常用発電用（EM）は前年と比べて，台数は36台（21%）減少の135台，出力は１MW（１%）増加の274MWとなった。出力区分別にみると，小型は台数で39%，出力で36%の減少，中型は台数で12%減少，出力で３%の増加となった。今年，小型は台数，出力ともに減少し，中型は，台数は減少したが，出力は増加となっている。

イ）ベースロード発電用（BL）は前年と比べて，台数は９台（30%）増加の39台，出力は133MW（４%）増加の3,589MWとなり，台数，出力ともに増加した。出力区分別にみると，小型は台数で75%，出力で95%の減少，中型は台数で90%の増加，出力で158%の増加，大型は台数で13%，出力で３%の増加となっている。１台あたりの出力を前年と比べると，小型：前年243kW/台，今年45kW/台，中型：前年2.7MW/台，今年 ４MW/台，大型：前年 228MW/台，今年 207MW/台となっており，小型，大型において小出力化，中型においては大出力化という結果となった。

ウ）艦艇用（MM）は今年，台数で２台の実績があった。

エ）実験用（XP）は今年，台数で１台，出力で45kWの実績があった。

オ）その他用途向け（MC）は前年と比べて，台数は１台増加の４台，出力は３MW増加の８MWとなっている。

⑶　燃料の種類別（表２，図４，図５）にみると，台数ではガス燃料が前年から７台減少の29台，液体燃料が前年から30台減少の148台となっている。出力ではガス燃料が前年から12%減少の3,050MW，液体燃料が前年から43%増加の374MWとなっている。台数，出力についてガス燃料は減少，液体燃料は増加している。構成比率は，台数ではガス燃料が全体の16%に対し，液体燃料が82%，出力ではガス燃料が77%に対し，

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

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

液体燃料が10％で，割合として台数は液体燃料，出力はガス燃料という傾向が継続している。また，前年に実績がなかったその他（MF）は，今年実績があった。

ア）液体燃料では，台数，出力ともに最も多いのが重油１種（H1）で，台数は90台で燃料全体の50％，出力は124MWで燃料全体の3%をそれぞれ占めており，前年と比べると台数は28%，出力は29%の減少となっている。台数でみると，灯油（T）が30台，軽油（K）が28台となり，前年と比べると灯油（T）は７％，軽油（K）は12%の増加となっている。出力でみると，灯油（T）が82MW，軽油（K）が169MWとなっており，前年と比べると，灯油（T）は113％，軽油（K）は256％の増加となっている。灯油（T）は今年，台数・出力ともに増加し，軽油（K）も，台数・出力ともに大幅増加となった。

イ）ガス燃料では，天然ガス（GNG）が12台，都市ガス（GTW）が14台と台数が多く，合計で燃料全体の14％を占めている。他の燃料としては，液化天然ガス（LNG）が３台ある。出力では天然ガス（GNG）が最も多く，2,935 MWで燃料全体の74％を占めている。次に出力が多いのは液化天然ガス（LNG）の67MW，以下は都市ガス（GTW）の48MWとなっている。今年は台数では都市ガス（GTW），出力では天然ガス（GNG）がトップとなった。液化石油ガス（LPG），石油プラントオフガス（GOG）は今年も実績がなかった。昨年実績があった石炭（ガス化）ガス（GRF）は今年実績がなかった。

ウ）燃料別比率を出力区分別にみると，台数の上位３種は，小型が重油１種（59%），灯油（22％），軽油（14%），中型が重油１種（54%），灯油（17%），軽油（17%）で，大型は天然ガス（58%），液化天然ガス（２％），軽油（11%）となっている。全体では重油１種（50%），灯油（17%），軽油（15%）となっている。出力の上位３種は，小型が重油1種（66%），灯油（18%），軽油（15％），中型が重油1種（33%），軽油（25%），灯油（23%）で，大型は天然ガス（74%），液化天然ガス（11%），石炭（ガス化）ガス（９％）となっている。全体では天然ガス（81%），軽油（２％），液化天然ガス（２％）となっている。

エ）２種類以上の燃料が使用できるものは，全体で19台，2,106MWであった。

注：燃料の集計にあたっては，２種類以上の燃料を使える場合は，納入時点で最も多く使用する燃料で集計している。

⑷　納入地域別（表３）でみると，台数では国内向けが前年に比べて43台減少の148台，輸出向けが10台増加の33台となった。出力では国内向けが前年に比べて94MW減少の358MW，輸出向けが309MW増加の3,592MWとなっている。

ア）国内向けは総台数の82%，全出力の9%を占めており，全体に占める割合を前年と比べると，台数では７ポイントの減少，出力では３ポイントの減少となっている。出力区分別に台数，出力を前年と比べると，小型で35台減少，出力は12MWの減少，中型で９台，２MWの減少，大型では１台増加，80MWの減少となっている。前年は小型の出力，中型，大型で台数，出力ともに減少となっていたが，今年は小型，中型で台数出力ともに減少，大型では台数は増加しているが，出力は減少している。また，その他は今年，出力で６MWを計上した。

イ）輸出は総台数の18％，全出力の91%を占めており，前年と比べた全体に占める割合は，台数では７ポイント増加，出力でも３ポイント増加となっている。前年より台数は10台増加し，出力は309MW増加している。出力区分別に台数・出力を前年と比べると，小型は前年同様，今年も実績なし，中型で７台，61MWの増加，大型で３台の増加，247MWの増加となっている。輸出先別にみると，台数ではアジア（91%），ロシア・NSI諸国（６％）の順で，アジアは前年から30ポイントの増加となっている。出力でもアジア（88%），ロシア・NSI諸国（８％）の順となっている。アジアは前年と比べて，台数は16台の大幅増加であり，出力は2,187MWの増加となっている。また，昨年実績がなかった欧州が，今年は実績計上となっている。

⑸　被駆動機械別（表４，図６，図７）では，これまでと同様に，台数，出力とも発電機（G）がほとんどを占め，全体に占める割合は台数で98%，出力で98％であった。発電機（G）について出力区分別にみると，小型では26台の減少，出力は前年に比べて減少しており，中型では台数は減少，出力は増加，大型でも台数，出力とも増加している。それぞれ前年と比べると，台数では中型が２％の減少で，大型は13％の増加であった。出力では小型が39%の減少，中型が21%の増加，大型が３％の増加となっている。水ポンプ（W）は全体で，前年に比べて７台，２MWの減少となっており，出力区分別にみると，小型は台数で７台，出力で２MWの減少，中型は台数で１台，出力で0.1MWの増加となっている。また，推進機または回転翼（PRR）は前年同様，今年２台となった。また，その他圧縮機（GC）は前年同様に実績なしとなった。

⑹　出力区分別（表５）を前年と比べると，小型は全体で台数，出力ともに減少している。さらに詳細な区分別にみると，０～146kWでは，３台の減少，出力

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

は微減，147 ～ 367kWでは16台， 4 MWの減少，368 ～ 735kWでは16台， 7 MWの減少となった。中型は全体で台数は減少・出力は増加したが，さらに詳細な区分別にみると，736 ～ 4,412kWでは19台，51MWの減少，4,413 ～ 10,296kWでは15台，84MWの増加，10,297 ～ 16,180kWでは昨年実績なしであったが，今年度は2台，28MWを計上した。，16,181 ～ 22,064kWでは前年同様， 1 MWの減少となった。大型は全体で台数・出力ともに増加し，さらに詳細な区分別にみると，22,065 ～ 44,129kWで 5 台，178MWの増加，44,130kW以上では， 1 台，11MWの減少となった。台数の多い順では，736 ～ 4,412kW，368 ～ 735kWと147 ～ 367kWが同数で2番目となっており，昨年度3番目であった147 ～ 367kW が2番目となっている。また出力の多い順では44,130kW以上，22,065 ～ 44,129kW，736 ～ 4,412kWとなっており，前年と2番目と3番目の順位が入れ替わっている。

(7) 発電用ガスタービン用途別（表6）の台数と出力を前年と比較すると，事業用は，国内では0台となり，前年と比べて台数は1台，出力は160MWの減少となった。輸出では13台，3,397MWとなり，前年と比べて台数は5台，出力は768MWの増加となった。自家用は，国内が142台，271MWとなり，前年と比べて台数は35台，出力は15MWの減少となった。輸出は20台，196MWとなり，前年と比べ台数は9台の増加，出力は252MWの減少であった。事業用は，前年に比べて国内では台数，出力ともに減少し，輸出では台数，出力とも増加した。自家用は，台数は前年に比べて国内は減少したが，輸出は増加した。出力は国内，輸出ともに減少した。

2．2020年航空用ガスタービン生産統計概要

(1) ターボジェットエンジン／ターボファンエンジンの新規製造状況については，昨年と同様にP-1固定翼哨戒機用のF7-10のみであり，製造台数は昨年同様の2台増の21台であった。その他に国内で開発されたターボファンエンジンとして，HondaJetに搭載されているHF120があり，2014年に米国連邦航空局（FAA）の型式承認を取得し，2015年に出荷が開始されている。HF120エンジンは米国GEホンダ・エアロ・エンジンズ社製であり，米国内で製造されているため，本統計には含まれていない。（表7，図8参照）

(2) 前年同様にターボプロップエンジンの新規製造は無く，ターボシャフトエンジンの新規製造状況はT700のみとなり，製造台数は昨年の10台から4台増の14台であった。（表8，図9参照）

(3) 民間航空機用エンジン向けモジュールの新規製造状況については，2015年からの5年間増加傾向にあり，特に過去3年は毎年約3割増を記録していたが，2020年はコロナ禍により前年から1,856台減少し，2,468台となった。（図10参照）

(4) 日本の航空用ガスタービン生産全体の動向としては，近年防衛省向けエンジンは製造台数にあまり変化はないが，戦闘機用エンジン「XF9-1」が研究試作されている。防衛装備庁が令和元年9月から10月に飛行状態を模擬した条件下で各種の性能確認を実施，令和2年7月に制御機能等を確認するために必要なデータ取得を完了している[1]。一方民間航空機用エンジン向けモジュールの製造台数については，コロナ前までの世界的な航空機需要の増加[2]に伴い，Trent1000，GEnx，新機種のTrentXWB，PW1100G-JMのモジュール製造，部品製造が本格化，更にビジネスジェット機であるGlobal7500に搭載されているPassport 20（2018年12月に就航）が量産された。コロナ禍により，今後数年は落ち込みが見られるものの，次世代大型民間輸送機B777Xシリーズに搭載予定のGE9X（2020年9月にエンジン型式承認を取得）等，新機種エンジンの国際共同開発が行われている状況[2]や，2024年には旅客需要が2019年水準を超えて回復すると予想されている[3]ことから，中長期的には今後も民間航空機用エンジン関連の占める割合が増加する傾向は続くと見られる。

出典(1)：防衛省ホームページ　https://www.mod.go.jp/atla/kousouken.html

出典(2)：一般社団法人　日本航空宇宙工業会「令和3年版　日本の航空宇宙工業」

出典(3)：一般財団法人　日本航空機開発協会「民間航空機に関する市場予測　2020-2040」

3．2020年過給機生産統計概要

(1) 生産台数（表9）については，主に自動車向けに使用される圧縮機翼車外径100mm以下のClass 1 過給機の生産台数は2010年以降増加を続ける世界自動車生産台数を背景に2019年まで増加傾向を保っていたが，2020年はCOVID19等の影響により減少に転じ，約492万台となった。主に建設機械，陸上発電設備，小型船舶用機関等向けに使用される圧縮機翼車外径101mm ～ 200mmのClass 2 過給機の生産台数は，2019年下半期から続く建設機械生産台数の低迷およびCOVID19の影響を受け，前年比55%減の約8000台となった。主に船舶用機関向けに使用される圧縮機翼車外径201mm以上のClass 3 以上の過給機については，Class 3，Class 6 は減少しているものの，Class 4，Class 5，Class 7，Class 8，Class 9 においてはそれぞれ約21％増， 8％増，12%増，25%増，36%増となっており，総じて前年度比約5％減の1832台となった。歴史的な国内新造船不況となった2016年から底を

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

抜けたものの，2020年開始の新しい環境規制に先駆けた2019年における駆け込み需要やCOVID19の影響もあり，主に小型の過給機において前年度比で大幅減となったものと考えられる。

(2)　生産型式数（表10）について，2020年は前年比3型式減の75型式（全Class含む）であり，ほぼ変化が見受けられなかった。これはますます厳しくなる環境汚染物質に対する規制に対応するため，従来型エンジンに搭載する旧過給機型式の淘汰が前年までに進んだからであると考えられる。環境対応の新型エンジンに対応した新過給機型式の投入も進んでいるが，今後も各種規制に対応した高度な環境技術を持つ過給機のラインアップが増えてくるものと考えられる。

Ⅱ．統計

1．陸舶用ガスタービン

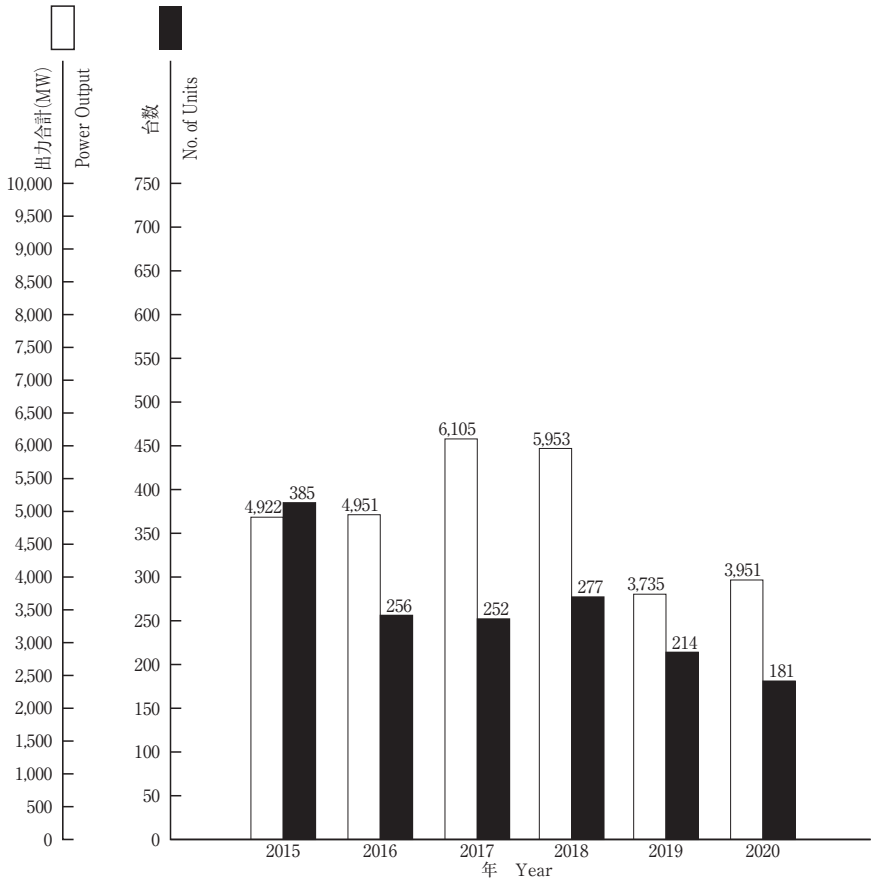


図１　陸舶用ガスタービン

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

表1　2020年用途別生産台数及び出力（kW）

区分　Size		小型　Small Unit ～735kW		中型　Medium Unit 736～22,064kW		大型　Large Unit 22,065kW～		全　出　力 Total	
用　途 Application	コード Code	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)
ベースロード発電用 Generator Drive for Base Load	BL	1	45	21	76,230	17	3,513,220	39	3,589,495
ピークロード発電用 Generator Drive for Peak Load	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
非常用発電用 Generator Drive for Emergency	EM	35	14,793	100	258,729	0	0	135	273,522
商　船　用 Merchant Marine	M	0	0	0	0	0	0	0	0
艦　艇　用 Military Marine	MM	0	0	0	0	2	80,000	2	80,000
石油化学プロセス用 Oil Refinery and Chemical Process	OR	0	0	0	0	0	0	0	0
その他のプロセス用 Miscellaneous Chemical Process	PR	0	0	0	0	0	0	0	0
実　験　用 Experimental	XP	1	45	0	0	0	0	1	45
空　調　用 Air Conditioning	ACD	0	0	0	0	0	0	0	0
そ　の　他 Miscellaneous	MC	0	0	4	7,598	0	0	4	7,598
合　計 Total		37	14,883	125	342,557	19	3,593,220	181	3,950,660

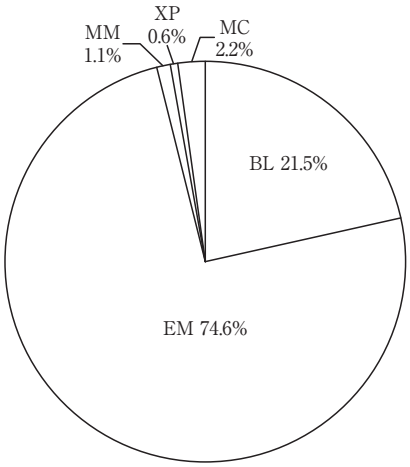


図2　2020年用途別生産台数割合（%）

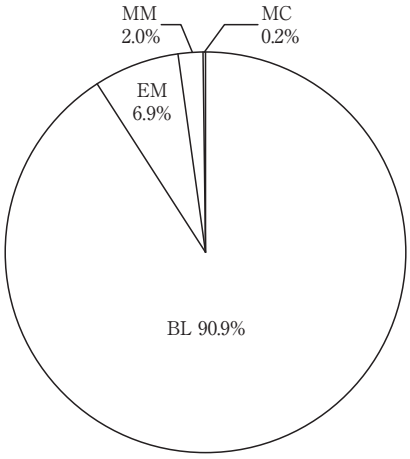


図3　2020年用途別出力割合（%）

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

表２　2020年燃料別生産台数及び出力（kW）

区分　Size			小型　Small Unit ～735kW		中型　Medium Unit 736～22,064kW		大型　Large Unit 22,065kW～		全　出　力 Total	
燃料種類 Kind of Fuel		コード Code	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)
ガス燃料 Gaseous Fuel	液化天然ガス Liquefied Natural Gas	LNG	0	0	1	7,610	2	59,460	3	67,070
	天然ガス Natural Gas	GNG	0	0	1	7,610	11	2,927,420	12	2,935,030
	液化石油ガス	LPG	0	0	0	0	0	0	0	0
	石油プラントオフガス	GOG	0	0	0	0	0	0	0	0
	石炭（ガス化）ガス	GCG	0	0	0	0	0	0	0	0
	プロセスガス	GRF	0	0	0	0	0	0	0	0
	都市ガス Town Gas	GTW	2	90	12	48,022	0	0	14	48,112
	高炉ガス Blast Furnace Gas	BFG	0	0	0	0	0	0	0	0
	ガス燃料　小計 Sub Total		2	90	14	63,242	13	2,986,880	29	3,050,212
液体燃料 Liquid Fuel	灯油 Kerosene	T	8	2,751	22	78,882	0	0	30	81,633
	軽油 Gas Oil	K	5	2,200	21	86,474	2	80,000	28	168,674
	重油１種 Heavy Oil No.1	H1	22	9,842	68	113,959	0	0	90	123,801
	液体燃料　小計 Sub Total		35	14,793	111	279,315	2	80,000	148	374,108
	石炭	CB	0	0	0	0	0	0	0	0
	固体燃料　小計 Sub Total		0	0	0	0	0	0	0	0
その他 Miscellaneous Fuel		MF	0	0	0	0	4	526,340	4	526,340
合　計 Total			37	14,883	125	342,557	19	3,593,220	181	3,950,660

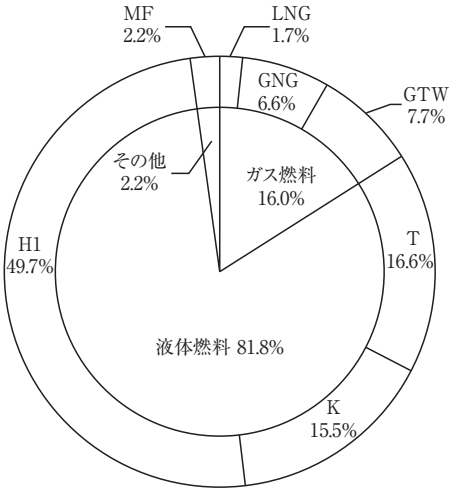


図４　2020年燃料別生産台数割合（%）

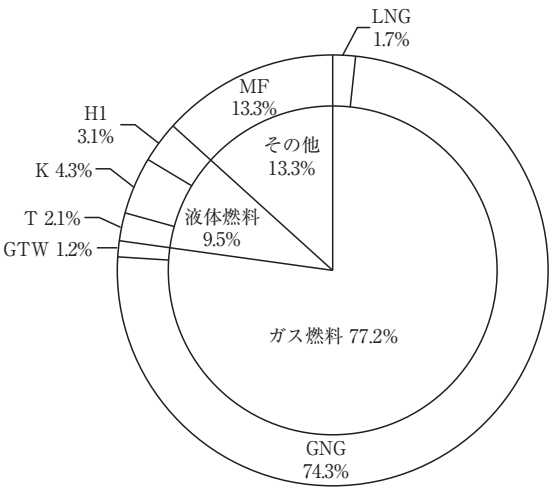


図５　2020年燃料別出力割合（%）

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

表3 2020年地域別納入台数及び出力（kW）

地域 Location	区分 Size	小型 Small Unit ～735kW		中型 Medium Unit 736～22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW～		全出力 Total	
		台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)
国内向け Domestic Use	北海道 Hokkaido	1	500	5	6,400	0	0	6	6,900
	東北 Tohoku	2	950	6	13,610	0	0	8	14,560
	関東 Kanto	18	7,357	55	151,545	0	0	73	158,902
	中部 Chubu	7	2,945	13	27,810	0	0	20	30,755
	近畿 Kinki	3	1,331	16	40,524	0	0	19	41,855
	中国 Chugoku	0	0	6	7,844	0	0	6	7,844
	四国 Shikoku	0	0	1	2,000	0	0	1	2,000
	九州 Kyushu	6	1,800	4	7,006	0	0	10	8,806
	沖縄 Okinawa	0	0	0	0	0	0	0	0
	艦艇用 Military Marine	0	0	0	0	2	80,000	2	80,000
	その他 Miscellaneous	0	0	3	6,618	0	0	3	6,618
国内向け 小計 Sub Total		37	14,883	109	263,357	2	80,000	148	358,240
輸出向け For Export	北米 North America	0	0	0	0	0	0	0	0
	中南米 South Central America	0	0	0	0	0	0	0	0
	アジア Asia	0	0	16	79,200	14	3,086,820	30	3,166,020
	大洋州 Oceania	0	0	0	0	0	0	0	0
	欧州 Europe	0	0	0	0	1	144,000	1	144,000
	ロシア・NIS諸国 Russia・NIS	0	0	0	0	2	282,400	2	282,400
	中東 Middle East	0	0	0	0	0	0	0	0
	アフリカ Africa	0	0	0	0	0	0	0	0
	非公表	0	0	0	0	0	0	0	0
輸出向け 小計 Sub Total		0	0	16	79,200	17	3,513,220	33	3,592,420
合計 Total		37	14,883	125	342,557	19	3,593,220	181	3,950,660

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

表 4　2020年被駆動機械別生産台数及び出力（kW）

区分　Size		小型　Small Unit ～735kW		中型　Medium Unit 736～22,064kW		大型　Large Unit 22,065kW～		全　出　力 Total	
被駆動機械 Driven Machinery	コード Code	台数 Units	出　力 Output (kW)	台数 Units	出　力 Output (kW)	台数 Units	出　力 Output (kW)	台数 Units	出　力 Output (kW)
発電機 Electric Generator	G	37	14,883	124	341,577	17	3,513,220	178	3,869,680
水ポンプ Water Pump	W	0	0	1	980	0	0	1	980
推進機または回転翼	PRR	0	0	0	0	2	80,000	2	80,000
動力計	DM	0	0	0	0	0	0	0	0
その他圧縮機	GC	0	0	0	0	0	0	0	0
合　計 Total		37	14,883	125	342,557	19	3,593,220	181	3,950,660

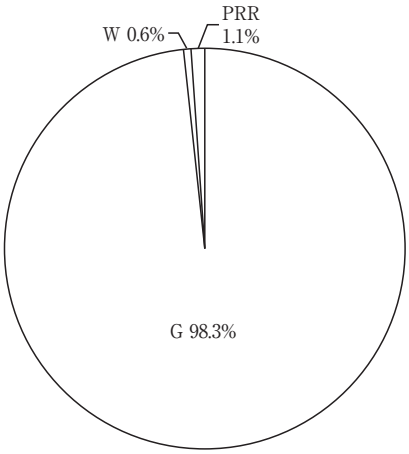


図 6　2020年被駆動機械別生産台数割合（%）

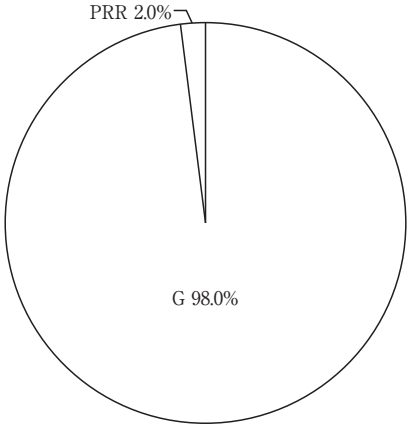


図 7　2020年被駆動機械別出力割合（%）

表 5　2020年出力区分別生産台数及び出力（kW）

出　力　区　分（kW） Units Output		台数 Units	出　力 Output（kW）
小　型 Small Unit 0～735kW	0～146	2	90
	147～367	12	3,031
	368～735	23	11,762
	小計　Sub Total	37	14,883
中　型 Medium Unit 736～22,064kW	736～4,412	99	171,317
	4,413～10,296	23	124,040
	10,297～16,180	2	28,000
	16,181～22,064	1	19,200
	小計　Sub Total	125	342,557
大　型 Large Unit 22,065kW～	22,065～44,129	8	274,780
	44,130～	11	3,318,440
	小計　Sub Total	19	3,593,220
合　計　Total		181	3,950,660

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

表6　2020年発電用ガスタービン用途別生産台数及び出力（kW）

区分　Size		小型　Small Unit ～735kW		中型　Medium Unit 736～22,064kW		大型　Large Unit 22,065kW～		全　出　力 Total	
用　途 Application	コード Code	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)
国内事業用 ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	0	0	0	0
国内事業用 ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
国内事業用 非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
国内事業用 試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
国内事業用 その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Domestic/Public Use 国内事業用　小　計　Sub Total		0	0	0	0	0	0	0	0
国内自家用 ベースロード発電用	BL	1	45	21	76,230	0	0	22	76,275
国内自家用 ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
国内自家用 非常用発電用	EM	35	14,793	84	179,529	0	0	119	194,322
国内自家用 試験用	XP	1	45	0	0	0	0	1	45
国内自家用 艦艇用	MM	0	0	0	0	0	0	0	0
国内自家用 その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Domestic/Private Use 国内自家用　小　計　Sub Total		37	14,883	105	255,759	0	0	142	270,642
国内合計　Domestic Use Total		37	14,883	105	255,759	0	0	142	270,642
輸出事業用 ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	13	3,396,800	13	3,396,800
輸出事業用 ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
輸出事業用 非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
輸出事業用 試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
輸出事業用 艦艇用	MM	0	0	0	0	0	0	0	0
輸出事業用 その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
For Export/Public Use 輸出事業用　小　計　Sub Total		0	0	0	0	13	3,396,800	13	3,396,800
輸出自家用 ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	4	116,420	4	116,420
輸出自家用 ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
輸出自家用 非常用発電用	EM	0	0	16	79,200	0	0	16	79,200
輸出自家用 試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
輸出自家用 艦艇用	MM	0	0	0	0	0	0	0	0
輸出自家用 その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
For Export/Private Use 輸出自家用　小　計　Sub Total		0	0	16	79,200	4	116,420	20	195,620
輸出合計　For Export Total		0	0	16	79,200	17	3,513,220	33	3,592,420
事業用 ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	13	3,396,800	13	3,396,800
事業用 ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
事業用 非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
事業用 試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
事業用 艦艇用	MM	0	0	0	0	0	0	0	0
事業用 その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Public Use 事業用　合　計　Total		0	0	0	0	13	3,396,800	13	3,396,800
自家用 ベースロード発電用	BL	1	45	21	76,230	4	116,420	26	192,695
自家用 ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
自家用 非常用発電用	EM	35	14,793	100	258,729	0	0	135	273,522
自家用 試験用	XP	1	45	0	0	0	0	1	45
自家用 艦艇用	MM	0	0	0	0	0	0	0	0
自家用 その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Private Use 自家用　合　計　Total		37	14,883	121	334,959	4	116,420	162	466,262
総　計　Grand Total		37	14,883	121	334,959	17	3,513,220	175	3,863,062

Note：Code Explanation　BL：for Base Load　PL：for Peak Load　EM：for Emergency

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

2．航空用ガスタービン

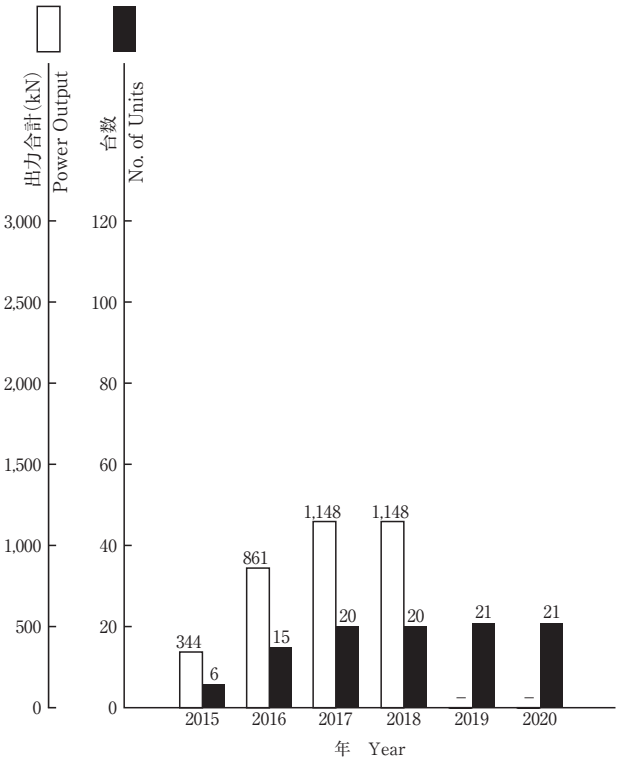


図８　ターボジェットエンジン／ターボファンエンジン

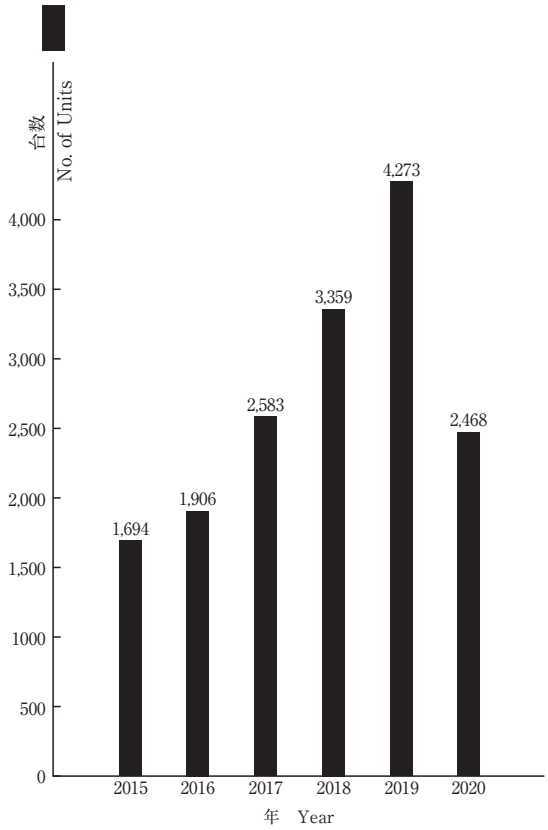


図10　民間航空エンジン用モジュール

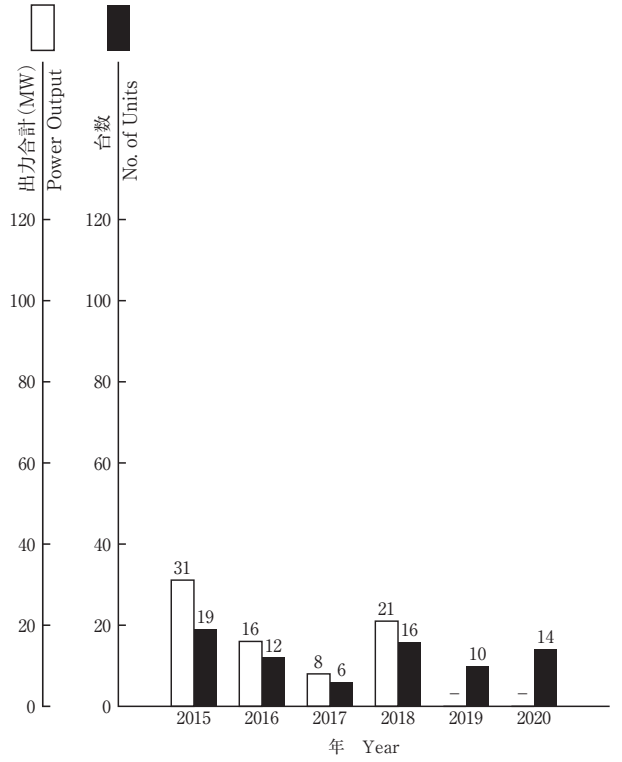


図９　ターボシャフトエンジン／ターボプロップエンジン

表７　2020年ターボジェットエンジン／ターボファン・エンジン生産台数及びスラスト合計（kN）

生産台数 Number of Units	21	スラスト合計※1 Thrust	－

※１　海面上静止常用スラスト
Normal Thrust at Sea Level Static Condition

表８　2020年ターボシャフトエンジン／ターボプロップ・エンジン生産台数及び出力（kW）

区　分 Size	0～735kW		736kW～		全出力	
用　途 Application	台数 Units	出力※2 Output (kW)	台数 Units	出力※2 Output (kW)	台数 Units	出力※2 Output (kW)
固定翼機 Fixed Wing Aircraft	0	0	0	0	0	0
ヘリコプタ用 Helicopter	14	－	0	0	14	－
補助機関駆動用 Aux. Drive Units	0	0	0	0	0	0
合　計 Total	14	－	0	0	14	－

※２　海面上静止常用出力
Normal Output at Sea Level Static Condition

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

3．過給機

表９　クラス別の年間生産台数

区　分 Size Class	圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
Class 1	0～ 100	約441万	約441万	約462万	約518万	約583万	約492万
Class 2	101～ 200	35,810	34,041	39,008	37,067	17,867	8,012
Class 3	201～ 300	668	951	897	1,005	1,154	1,009
Class 4	301～ 400	183	196	164	172	165	200
Class 5	401～ 500	214	299	239	181	216	233
Class 6	501～ 600	241	233	173	196	213	174
Class 7	601～ 700	184	148	88	85	100	112
Class 8	701～ 800	35	22	38	47	44	55
Class 9	801～ 900	11	25	44	10	36	49
Class 10	901～1000	0	0	0	0	0	0
Class 11	1001～	0	0	0	0	0	0
合計 Total※4		37,346	35,915	40,651	38,763	19,795	9,844

Class 1 の台数が多いため，Class 2 ～ 11の合計を示す。
As the Production number of Class1 is too many, Total number only includes Class2 to Class11.

表10　クラス別の型式数※3

区　分 Size Class	圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
Class 1	0～ 100	55	50	48	48	49	46
Class 2	101～ 200	29	20	25	21	21	20
Class 3	201～ 300	18	15	16	15	15	15
Class 4	301～ 400	18	12	13	10	11	10
Class 5	401～ 500	16	13	13	12	11	12
Class 6	501～ 600	16	14	12	9	9	8
Class 7	601～ 700	17	7	8	6	5	5
Class 8	701～ 800	5	5	3	4	4	2
Class 9	801～ 900	9	4	5	2	2	3
Class 10	901～1000	0	0	0	0	0	0
Class 11	1001～	0	0	0	0	0	0
合計 Total※4		128	90	95	79	78	75

※3 型式はいずれも排気タービンである。
Every model is an exhaust turbine type supercharger.

※4 合計数は，圧縮機翼車外径100mmを越す分を示す。
Total number of superchargers over 100mm in impeller diameter is shown.

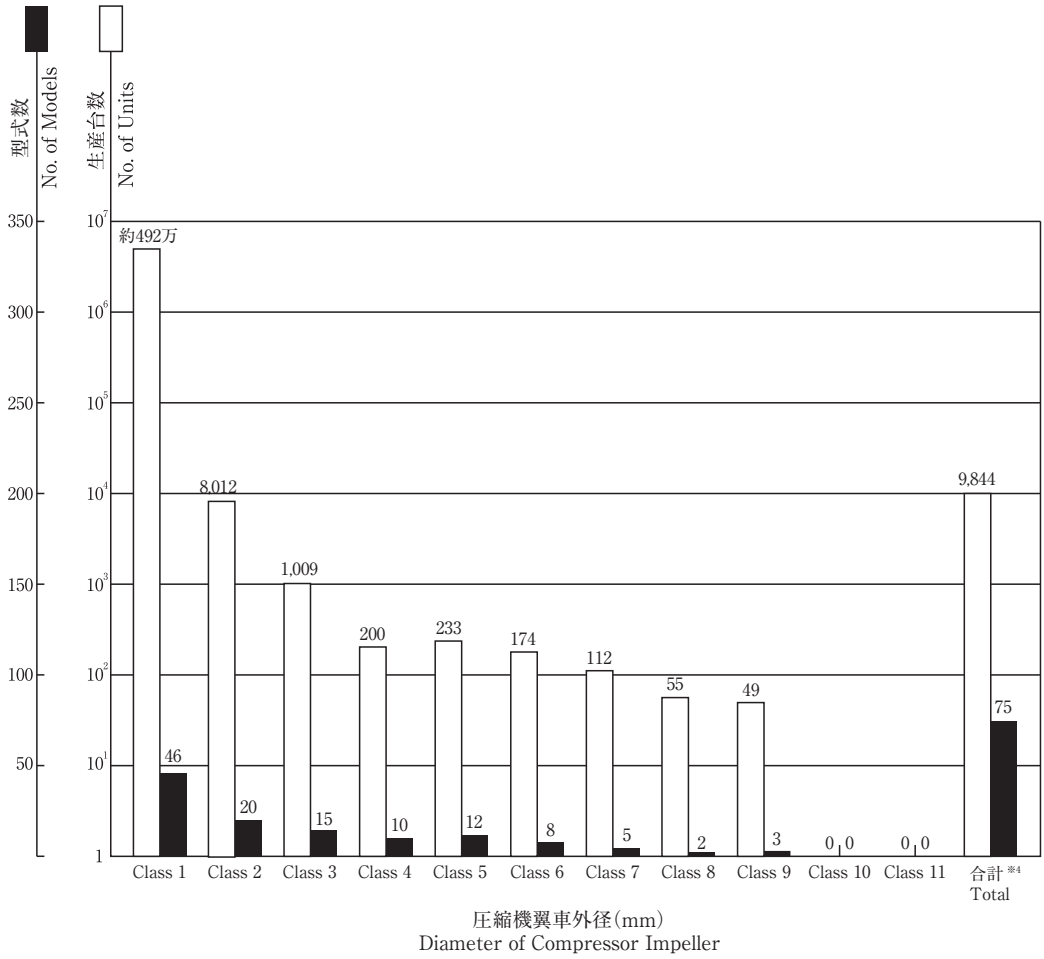


図11　2020年過給機生産台数及び型式数（注※4は表10を参照）

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

会　告

第49回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会（オンライン）のお知らせ

第49回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会を，以下のように開催します。
多数のご参加をお待ちしております。

主　　催：公益社団法人 日本ガスタービン学会
協　　賛：協賛団体は，学会ホームページ（https://www.gtsj.or.jp/）をご覧ください。

開 催 日：
・講演会　2021年10月13日㈬，14日㈭
・見学会　2021年10月15日㈮

開催場所：
・Zoomによるオンライン講演室

講 演 会：
・講演会プログラムを次ページに示します。
・一般講演：空力，燃焼，材料，システム，伝熱，タービンなど
・先端技術フォーラム：脱炭素社会実現に向けたガスタービン技術（仮題）
・基調講演：脱炭素社会に向けたガスタービン関連技術の展開と産官学連携　渡辺 紀徳 氏（東京大学）
・招待講演：航空推進：ガスタービンの進化と将来技術（仮題）神永 晋 氏（ロールス・ロイスジャパン株式会社）
　　低炭素，脱炭素時代のエネルギーベストミックス　松崎 裕之 氏（東北発電工業株式会社）

参加登録費（税込）：
・会員・協賛団体会員　14,300円（ただし，学生は論文集ありで3,300円，論文集なしで1,100円）
・会員外　19,800円（ただし，学生は論文集ありで6,600円，論文集なしで3,300円）

見 学 会：
・日　時：10月15日㈮　9：00 ～ 12：00（予定）
・開催場所：Zoomによるオンライン見学室
・見学先：川崎重工業㈱ 水素GT実証プラント，㈱本田技術研究所 ジェットエンジン関連施設，三菱重工業㈱ガスタービン関連施設などの見学を予定しています。
・参加費：無料
・参加資格：定期講演会参加登録者または日本ガスタービン学会会員および学生（会員・非会員）
　　日本ガスタービン学会会員および学生は見学会のみの参加も可能です。詳細は学会ホームページにてご確認ください。申込締切後，参加可否を申込者全員にご連絡いたします。
・申込方法：10月 6 日㈬までに学会ホームページにてお申込みください。（要事前登録）

参加申込方法：
・学会ホームページ（https://www.gtsj.or.jp/）から登録されるか，本号掲載の参加申込書に必要事項をご記入のうえ，学会事務局宛にお申し込みください。
・参加登録は必ず事前登録にてお願いします。講演者も参加登録をお願いします。
・参加登録者にはご入金確認後に，オンライン講演参加（入室）に関する情報をお送りします。
　なお，オンライン開催のため，当日登録はございません。
・申込締切日：10月 6 日㈬，参加費払込締切日：10月 7 日㈭

市民フォーラム：
・講演会の前日に，オンラインにて大学生・高専生・高校生・一般の方を対象とする「ガスタービン市民フォーラム2021」を開催します。
・講師：木下 康裕 氏（川崎重工業株式会社）
・演題：未定
・日時：10月12日㈫　16：20 ～ 18：00（16：00開場）
・会場：Zoomによるオンライン講演室
・参加費無料・事前登録制となります。
・詳細及び参加登録については，学会ホームページ（https://www.gtsj.or.jp/）に掲載予定です。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

第49回日本ガスタービン学会定期講演会（2021年10月13～14日）

参加申込書　**申込締切：10月 6 日㈬**

日本ガスタービン学会 行（FAX：03-3365-0387 / E-mail: gtsj-office@gtsj.or.jp）

●参加者の連絡先（複数人申込まれる場合は，代表者の方の連絡先）

会社／大学等名称	
所在地	〒
TEL	
E-mail	

●参加者名

フリガナ 氏　　名*1	所　　属	TEL E－mail	所属学会 （GTSJ会員No.）	見学会 参加 （15日）	会員 資格 （正/学）

＊1　登壇者の方は，氏名の後に○を記入してください。
論文集なし（学生のみ）の場合は，下記の参加登録費の金額に反映してください。

●事務局への連絡事項

払込方法（○印をつけてください。）　**※必ず，10月 7 日㈭までにお払込みください。**

1．銀行　（みずほ銀行　新宿西口支店　普通　1812298）
2．郵便振替　（00170-9-179578）
3．PayPal決済　（クレジットカード）※後日，支払い先情報をメールにてお送りします。

送金金額＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿円

※領収書は，ご入金確認後，登録のご住所に論文集CDと一緒に郵送いたします。
※請求書は，原則発行いたしません。公費払い等で発行が必要な方は，事務局までご相談ください。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

会　告

第49回日本ガスタービン学会定期講演会プログラム：第1日【暫定版】

（一般講演　講演時間15分　討論5分，〔学〕：学生優秀講演賞の審査対象講演，連名者の所属が省略されている場合は後者と同じ）

第1日
10月13日

1A室

9:00	開会の挨拶

1A室

	基調講演 座長：渡邊裕章（九大）
9:05	【P-1】 脱炭素社会に向けたガスタービン関連技術の展開と産官学連携 渡辺紀徳（東大）
9:50	

	1A室	1B室
	燃焼1	空力（圧縮機1）
10:10	【A-1】Investigation on Steam Dilution Effects on Non-Premixed Hydrogen-Oxygen Impinged Jet Flame ＊Hazim Shehab, Yong Fan, Norihiko Iki , Osamu Kurata, Hirohide Furutani (AIST)	【B-1】[学]圧縮機翼列の失速特性改善に向けた翼端漏れ流れの計測と翼端溝加工 ＊高島涼太郎，岡優介，佐藤拓(高知工科大院)，森下勇希，野崎理，荻野要介，筒井康賢(高知工科大)
10:30	【A-2】Investigation of a flamelet model for staged combustion ＊Yu Panlong（九大院），黒瀬良一(京大)，渡邊裕章(九大)	【B-2】[学]BLIにおけるインレットディストーションが遷音速ファンの空力特性に及ぼす影響 ＊後藤光（東大院），渡辺紀徳，姫野武洋（東大），岡田隆一，佐藤大祐（IHI）
10:50	【A-3】Experimental validation of a numerical model for atmospheric H2/CH4 fueled micromix flames ＊KRONIGER Daniel，HORIKAWA Atsushi，OKADA Kunio，UCHIYAMA Yuta，ASHIDA Yuji（川崎重工）	【B-3】[学]Adjoint法によるデータ同化を用いた遷音速軸流圧縮機内部流動の高精度予測 ＊伊藤流石（九大院），古川雅人（九大），山田和豊（岩手大）
11:10	【A-4】水素・天然ガス混焼時のMicro-mix燃焼器の燃焼振動について ＊神谷浩武，Daniel Kroniger，堀川敦史，山口正人(川崎重工)	【B-4】[学]電力負荷変動対応時の実機ガスタービンコンプレッサー内部非定常流動解析 ＊萩田泰晴，徳山好紀(東北大院)，宮澤弘法，古澤卓，山本悟(東北大)，梅沢修一（東京電力），米澤宏一（電中研），鈴木武志，大森修一（東京電力）
11:30		【B-5】[学]遠心圧縮機の羽根なしディフューザ失速における羽根車内部流れ場の影響 ＊上利祐貴，山尾佳史（早大院），藤澤信道，太田有(早大)
11:50		
12:10		

（昼休憩）

	1A室	1B室
	空力（圧縮機2）	性能1
13:30	【A-6】遷音速遠心圧縮機における翼列干渉に伴う非定常効果の数値的研究 ＊久保浩介（岩手大院），山田和豊（岩手大），岩切健一郎（三菱重工）	【B-6】[学]パルス燃焼と定圧燃焼を組み合わせた圧力増大燃焼ガスタービンの性能評価 ＊関口武央，中村駿介（都立大院），櫻井毅司（都立大）
13:50	【A-7】産業用ガスタービン圧縮機の動特性予測 ＊小池裕司，岸真人，高木一茂（三菱重工）	【B-7】[学]サイクル解析に向けたガスタービン搭載用ウェーブロータのモデル構築 ＊西岡立成(東大院)，岡本光司，寺本進(東大)
14:10	【A-8】境界層吸い込み（BLI）を模擬したディストーション下における翼傾斜がファン性能に及ぼす影響に関する数値解析 ＊正木亮好，河野雅大（早大院），佐藤哲也（早大），岡井敬一，賀澤順一，正木大作（JAXA）	【B-8】[学]地上型圧縮空気エネルギー貯蔵(CAES)による中容量ガスタービン発電システムの出力増加率の検討 ＊後藤絢大，野々村弘樹(東北大院)，中野晋，竹田陽一（東北大）
14:30	【A-9】乱流生成量に着目した多段翼列計算におけるミキシングプレーン位置の影響評価 ＊谷直樹（IHI）	【B-9】[学]既存重構造ガスタービンと固体酸化物形燃料電池（SOFC）の ハイブリッドシステムに関する基礎検討 ＊矢嶋遼太郎（東北大院），中野晋，竹田陽一（東北大）
14:50	【A-10】生体模倣技術を応用した軸流圧縮機の高性能化 ＊石飛悠希，高橋正憲，三浦聡允（川崎重工）	
15:10		

	2A室	2B室
	燃焼2	二相流・相変化
15:30	【A-11】50kW級液体アンモニア燃焼マイクロガスタービンの開発 ＊春日俊相(トヨタ自動車)，大友光彰(豊田中研)，安井芳則(トヨタエナジーソリューションズ)，壹岐典彦，倉田修，井上貴博，范勇(産総研)	【B-11】[学]乱流気流に駆動された壁面上液膜の三次元構造と液滴飛散の数理モデル ＊井上拓哉（九大院），井上智博（九大）
15:50	【A-12】安定燃焼評価に向けた近赤外TDLASによる当量比変動計測 ＊宮崎洸治，近藤明生，田村一生，岸本章裕，磯野充典，齋藤敏彦(三菱重工)	【B-12】[学]氷粒子付着判定とマルチショットを導入したアイスクリスタル着氷の数値的研究 ＊稲川美緒（東理大院），福留功二，山本誠(東理大)
16:10	【A-13】天然ガス焚きDLE燃焼器における水素混焼時の火炎可視化計測および排ガス性能調査 ＊芦田裕司，岡田邦夫，櫻澤俊明，堂浦康司，堀川敦史（川崎重工）	【B-13】[学]CFRP 電熱防氷システムの加熱効率化に向けた電流印加手法の検討 ＊西山和希，岩間輝佳(高知工科大院)，水野拓哉，鈴木正也，賀澤順一(JAXA)，野崎理(高知工科大)
16:30		

	2A室	2B室
	性能2	燃焼・伝熱
16:50	【A-14】ターボジェットエンジンの運転試験とサイクル解析 ＊二村尚夫(JAXA)	【B-14】[学]水素の噴射孔径が浮き上がり火炎の燃焼状態に及ぼす影響 ＊半谷和瑳(都立大院)，櫻井毅司，湯浅三郎(都立大)
17:10	【A-15】小型SOFC-GT複合サイクルエンジンの起動試験 ＊小島孝之，田頭剛，岡井敬一，小林宙，西沢啓（JAXA）	【B-15】[学]アンモニア燃焼の着火遅れ時間，層流燃焼速度およびMarkstein長さに関する評価 ＊鮎川真也，甲斐玲央（京大院），黒瀬良一（京大）
17:30	【A-16】水素専焼ドライ低NOx燃焼技術を用いた熱電供給実証 ＊堀川敦史，山口正人，荻野智行，足利貢，青木茂樹（川崎重工）	【B-16】[学]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 ＊長尾順（京大院），庄司烈，立花繁（JAXA），横森剛（慶大），黒瀬良一（京大）
17:50	【A-17】大気環境を考慮したガスタービン用吸気フィルタの差圧上昇の推定 ＊尾関高行，松井陽平，藤井智晴（電中研）	【B-17】[学]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 ＊正木華妃斗（徳島文理大院），新関良樹（徳島文理大），両角亮（徳島文理大院），武石賢一郎（徳島文理大），都留智子（川崎重工）
18:10		

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

第48回日本ガスタービン学会定期講演会プログラム：第2日

（一般講演　講演時間15分　討論5分，〔学〕：学生優秀講演賞の審査対象講演，連名者の所属が省略されている場合は後者と同じ）

第2日
10月14日

	3A室	3B室
	招待講演1	招待講演2
9:00	【I-1】 航空推進：ガスタービンの進化と将来技術（仮） 神永晋（ロールス・ロイス　ジャパン）	【I-2】 低炭素，脱炭素時代のエネルギーベストミックス 松崎裕之（東北発電工業）
9:40		

	3A室	3B室
	CMC・TBC	空力（タービン・振動1）
10:00	【A-18】ジルコニア系連続繊維を強化繊維とする酸化物系CMCの開発 ＊長谷川良雄，秦青，鉄井利光（物材機構）	【B-18】［学］生体模倣による航空エンジン用低圧タービンの高効率化の研究 ＊佐藤聡，小野寺優介（岩手大院），船崎健一（岩手大），古川樹生（IHI）
10:20	【A-19】レーザーホログラフィー干渉計を用いたSiC繊維強化SiC複合材料の損傷評価 ＊廣嶋登，田中義久，香川豊（東京工科大）	【B-19】［学］超高負荷タービン直線翼列内の二次流れの前縁フィレットによる抑制効果 ＊小田竜太郎（法政大院），辻田星歩（法政大）
10:40	【A-20】実機使用済ガスタービン動翼におけるTBCのYSZ－単斜晶に着目した使用温度の推定 ＊高橋智（東京都立大），岡田満利（電中研），伊藤明洋（中部電力）	【B-20】［学］遷音速軸流タービン翼列の翼負荷分布が形状損失に与える影響 ＊長谷部潤（法政大院），辻田星歩（法政大）
11:00	【A-21】温度勾配下熱サイクルによる遮熱コーティング（TBC）はく離の条件に関する検討 ＊岡田満利，北澤留弥，高橋俊彦，尾関高行（電中研）	【B-21】［学］ターボチャージャ用タービン動翼の共振通過時の過渡応答特性と寿命評価 金子康智（龍谷大），＊影大雅（龍谷大院），竹下友祥（三菱重工）
11:20	【A-22】遮熱コーティング（TBC）の微視組織変化が温度勾配下熱サイクルによるき裂成長に及ぼす影響に関する検討 ＊北澤留弥，岡田満利，尾関高行（電中研）	
11:40		

（昼休憩）

	4A室	4B室
	空力（タービン）	材料
13:00	【A-23】感度解析を援用した超音速タービン段の高効率化に関する研究 ＊船崎健一（岩手大），小田島達哉（シャープ），川崎聡（JAXA）	【B-23】［学］選択的レーザー溶融法により造形されたTi-48Al-2Cr-2Nbの超塑性変形と異方性 ＊藤井達也，水田和裕（都立大院），筧幸次（都立大）
13:20	【A-24】タービンテストリグ出口案内翼への最適リブレット効果予測と、そのレーザー加工によるリブレット性能評価 ＊白石雅之，土橋晋太郎，一ノ瀬剛，柴崎祐一（ニコン），P.A.Leitl，A.Flanschger，S.Schreck，R.Benauer（Bionic Surface Technologies），S.Pramstrahler，A.Marn（TU Graz）	【B-24】ガスタービン材料の単結晶Ni基超合金の加速クリープ域におけるクリープ歪み速度と組織図との関係の離散コサイン変換による数値的評価について ＊平口英夫（日本技術士会）
13:40	【A-25】超小型ジェットエンジンの最適リブレット計算とそのレーザー加工、およびエンジン性能での効果検証 ＊稲崎慎也，佐藤真路，一ノ瀬剛（ニコン），P.A.Leitl，A.Flanschger，S.Schreck，R.Benauer（Bionic Surface Technologies GmbH）	【B-25】新規高純度鉄基鍛造合金の開発 ＊鉄井利光（物材機構），平城智博，三上慎太郎，大友直也（東邦亜鉛）
14:00	講演取り下げ【A-26】遠心圧縮機の翼振動に関する研究 －ケーシングトリートメントを起因とした強制振動－ ＊下原直人，時枝克典，沼倉龍介，服部博明（IHI）	【B-26】高温部品用Ni基AM材の材料特性に及ぼす造形および熱処理条件の影響 ＊赤間大地，谷川秀次，種池正樹（三菱重工），西海高史，小牧孝直，片岡正人（三菱パワー）
14:20		【B-27】ガスタービン圧縮機部材へのレーザー加工によるリブレット形成と機械特性評価結果 ＊綿引健二，蘆田憲一，土橋晋太郎，土橋広和，佐藤真路，一ノ瀬剛（ニコン）
14:40		

	F室
	先端技術フォーラム：脱炭素社会実現に向けたガスタービン技術（仮題）
15:00	≪講演≫ ≪総合討論≫
17:30	

	F室
17:35	閉会の挨拶
17:45	

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

会　告

第50回ガスタービンセミナー開催のお知らせ

第50回ガスタービンセミナーを下記の通り開催いたします。

産官学の最前線で活躍されている方々を講師にお迎えし，航空用および発電用のガスタービンに関する最新技術動向についてご講演いただきます。（詳細につきましては，11月号学会誌，ホームページ等で後日お知らせいたします）

1．日　　時：　2022年１月27日㈭　09：30 ～ 17：00（予定）
　　　　　　　　28日㈮　09：30 ～ 17：00（予定）

2．開催方式：　オンライン開催

3．テ ー マ：　「ガスタービンの最新技術動向」（予定）

4．参加要領：　11月号学会誌，当学会ホームページに掲載予定です。（https://www.gtsj.or.jp）

◇◇

第33回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

学生及び技術者（ガスタービン初心者）を対象とした標記シンポジウムを開催いたしますので，奮ってご参加ください。今回は例年より講義内容を縮小し，オンラインで開催いたします。

1．日　　　時：　2021年12月21日㈫
2．開 催 方 式：　オンライン開催
3．プログラム：
　・ガスタービン概論
　・ガスタービンの実際
　注：都合によりプログラム内容を変更する場合もございます
4．対　象　者：　大学，高等専門学校，大学院在籍者，ならびにガスタービン初心者の社会人
5．参 加 要 領：　11月号学会誌，当学会ホームページに掲載予定です。（https://www.gtsj.or.jp）

◇◇

2021年度若手技術者交流会 開催中止のお知らせ

集会行事委員会

今年度開催を計画しておりました若手技術者交流会は，新型コロナウイルス感染症の拡大防止と参加者および関係者の健康や安全面を考慮し，中止することといたしました。皆様には，お詫びを申し上げますとともに御理解いただきますようお願い申し上げます。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

会　告

2021年度日本ガスタービン学会賞候補募集のお知らせ（再掲）

応募締切日：2021年10月29日㈮

日本ガスタービン学会では，下記の趣旨により２年毎に学会賞（論文賞，技術賞および奨励賞）の贈呈を行っております。つきましては，今年度も下記要領により学会賞の募集を行うこととなりましたので，お知らせ致します。

募集要領

１．日本ガスタービン学会賞の趣旨

本会はガスタービンおよびエネルギー関連技術に関する工学および技術の発展を奨励することを目的として，優れた論文，技術ならびに新進会員個人の業績に対して，それぞれ日本ガスタービン学会論文賞，技術賞，奨励賞を贈り，表彰を行う。

２．対象となる業績

⑴論文賞：日本ガスタービン学会誌および日本ガスタービン学会英文電子ジャーナルJGPP（International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems）に2017年11月以降2021年10月迄に公表された論文で，独創性があり工学および技術に寄与したもの。

⑵技術賞：ガスタービンおよびエネルギー関連の技術で画期的な新製品の開発，製品の品質または性能の向上，材料開発，制御計測および保守技術の向上等に寄与したもの。

⑶奨励賞：日本ガスタービン学会誌および日本ガスタービン学会英文電子ジャーナルJGPP（International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems）に2017年11月以降2021年10月迄に公表された独創的な論文（本人が中心的役割を果たしたもの）。なお，萌芽的研究も対象とする。

奨励賞の候補者は，1986年４月２日以降生まれの個人とする。ただし，論文賞，技術賞あるいは奨励賞をすでに受けた者および今年度の論文賞，技術賞内定者は奨励賞を受けることはできない。

３．受賞件数

論文賞２件，技術賞２件，奨励賞２名程度とする。

４．表彰の方法

審査の上，表彰状および賞牌を授与する。

５．表彰の時期

表彰は，2022年４月開催予定の日本ガスタービン学会総会において行う。

６．応募の方法

公募によるものとし，論文賞，技術賞は推薦または本人より申請，奨励賞は推薦による。なお，一度申請して受賞しなかったものでも，再度応募して差し支えない。

７．提出書類

推薦または申請には，本会の所定用紙に必要事項を記載して，１件につき正１通，副２通（コピーで可）の計３通を提出する。

・日本ガスタービン学会賞（論文・奨励）申請書・推薦書

・日本ガスタービン学会賞（技術）申請書・推薦書

所定用紙は本会ホームページ（https://www.gtsj.or.jp/）からダウンロード可能。

８．提出締切日

2021年10月29日㈮17時必着

９．提出先

〒160-0023
東京都新宿区西新宿７－５－13
第３工新ビル402
公益社団法人日本ガスタービン学会
表彰委員会　宛

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

会　告

技術論文投稿方法の変更について

学会誌編集委員会
論文委員会

日本ガスタービン学会におきましては，学会誌に投稿する和文技術論文およびInternational Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems（JGPP）に投稿する英文技術論文について，技術論文投稿システム（Editorial Manager）による査読・投稿管理を行うことにいたしました。

具体的な投稿方法につきましては学会HP「投稿および原稿執筆要領」を参照ください。
https://www.gtsj.or.jp/method/index.html

技術論文投稿システムへの移行により，論文査読・採否決定・掲載までの手続きを今まで以上にスピードアップします。奮ってご投稿いただきたく，改めてお願い申し上げます。

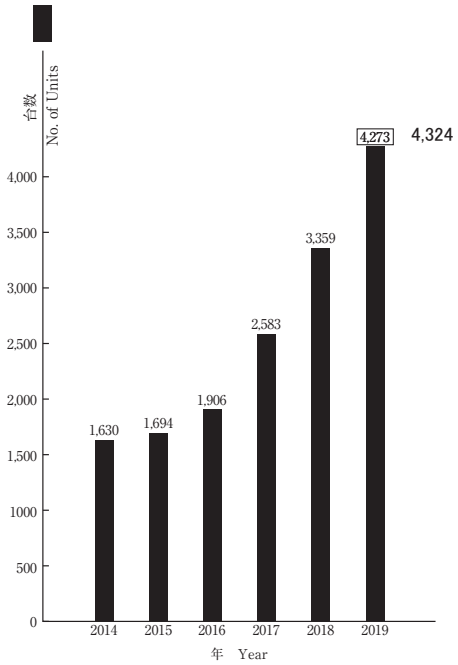
「ガスタービン及び過給機生産統計」(2020年９月号掲載)に関するお詫びと訂正

ガスタービン統計作成委員会

2020年９月号（Vol. 48, No. 5）に掲載した「ガスタービン及び過給機生産統計」の図10と本文の一部に誤記がありました。読者の皆様にはご迷惑をおかけしましたことを謹んでお詫びし，以下の通り訂正致します。

図10（民間航空エンジン用モジュール）の2019年の台数
誤）　4,273
正）　4,324

本文 p.59，左段，２.⑶の２－３行目
誤）　2019年は4,273台となり，過去最高を更新した。
正）　2019年は4,324台となり，過去最高を更新した。



Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

○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
日本機械学会 関西支部	第22回秋季技術交流フォーラム	協賛	2021/10/15-16	URL：https://jsmekansai.org/
日本機械学会	No.21-82基礎教育講習会-エンジン技術の基礎と応用（その34）	協賛	2021/11/5	URL：https://www.jsme.or.jp/event/21-82/
日本機械学会 関西支部	第376回講習会「実務者のための流体解析技術の基礎と応用（各種シミュレーション技術の適用事例紹介付き）」	協賛	2021/11/10	URL：https://jsmekansai.org/
東京大学大学院工学系研究科 「富岳」成果創出加速プログラムプロジェクト	文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用」第２回シンポジウム	協賛	2021/11/26	東京大学大学院工学系研究科吉村研プロジェクト事務室TEL:03-5841-0238
日本機械学会	第９回先進エンジンシステムのモデリングと診断に関する国際会議（COMODIA2022）	協賛	2022/7/25-28	URL：https://www.jsme.or.jp/conference/comodia2022/

▷ 入　会　者　名　簿 ◁

〔正会員〕

石飛 悠希（川崎重工業）　岡 顕久（川崎重工業）　高橋 正憲（川崎重工業）　山田 洋輔（川崎重工業）
三上 慎太郎（東邦亜鉛）　元川 恭助（本田技術研究所）　菊地 広介（三菱パワー）

次号予告　**日本ガスタービン学会誌2021年11月号（Vol. 49 No. 6）**

特集　至近の火力電源の運用・建設状況と将来火力発電技術の展望
論説・解説
巻頭言　原 三郎（電力中央研究所）
至近におけるGTCCの運用状況と耐力向上に向けた取組みについて
小山 一直，鎌田 嘉尚，松村 龍志（東北電力）
内陸型GTCCの建設と運用状況　山本 晃（神戸製鋼所）
1650℃級JAC形ガスタービンの現状と今後の展開
高田 和正，森本 一毅，若園 進，片岡 正人，由里 雅則（三菱重工業）
CO_2分離・回収型酸素吹IGCCの開発状況と今後の展望について　柴田 彰（大崎クールジェン）
CO_2分離回収設備の商用化に向けた最新動向　長谷川 圭介，千葉 典子（東芝エネルギーシステムズ）
次世代電力システムの展望と高効率火力発電への期待　岸岡 伸和（三菱電機）
負荷調整役割としての航空転用型ガスタービンと可搬型ガスタービン・パッケージFast Power 40の展望
安部 裕志（IHI原動機）
産業用における熱電可変型ガスタービンコンバインド設備の導入事例
合田 真琴，原田 哲也，小池 晃司，岡田 竣，中安 稔（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。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

2021年度役員名簿

会長　太田 有（早大）

副会長　福泉 靖史（三菱重工）

法人管理担当執行理事　大石 勉（IHI），黒木 英俊（三菱パワー）（兼務），鈴木 雅人（産総研），辻田 星歩（法政大），笠 正憲（川崎重工）

公益目的事業担当執行理事　石坂 浩一（三菱重工），及部 朋紀（防衛装備庁），黒木 英俊（三菱パワー），鈴木 伸寿（東芝エネルギーシステムズ），鈴木 雅人（産総研）（兼務），高橋 徹（電中研），新関 良樹（徳島文理大），姫野 武洋（東大），渡邊 裕章（九州大），渡邉 啓悦（荏原）

理事　岩井 裕（京大），桂田 健（JALエンジニアリング），清野 幸典（東北電力），福谷 正幸（本田技術研究所），藤原 仁志（JAXA）

監事　今成 邦之（IHI），二村 尚夫（JAXA）

2021年度委員名簿（順不同）

2021年9月3日現在
○は委員長

倫理規定委員会　○笠 正憲（川崎重工），大石 勉（IHI），黒木 英俊（三菱パワー），辻田 星歩（法政大），姫野 武洋（東大）

自己点検委員会　○笠 正憲（川崎重工），大石 勉（IHI），黒木 英俊（三菱パワー），辻田 星歩（法政大），姫野 武洋（東大）

運営委員会　○辻田 星歩（法政大），大石 勉（IHI），黒木 英俊（三菱パワー），酒井 義明（東芝ESS），鈴木 雅人（産総研），塚原 章友（三菱パワー），寺本 進（東大），新関 良樹（徳島文理大），姫野 武洋（東大），松沼 孝幸（産総研），村田 章（東京農工大），笠 正憲（川崎重工）

企画委員会　○黒木 英俊（三菱パワー），鈴木 雅人（産総研），塚原 章友（三菱パワー），辻田 星歩（法政大），新関 良樹（徳島文理大），姫野 武洋（東大），村田 章（東京農工大），安田 聡（三菱パワー），笠 正憲（川崎重工），輪嶋 善彦（本田），渡辺 紀徳（東大）

国際委員会　○渡辺 紀徳（東大），伊藤 優（東大），太田 有（早大），岡井 敬一（JAXA），岸根 崇（三菱パワー），渋川 直紀（東芝ESS），鈴木 雅人（産総研），谷 直樹（IHI），都留 智子（川崎重工），寺本 進（東大），福田 雅文（高効率発電システム研究所），船崎 健一（岩手大），邉 英智（本田），山根 敬（JAXA），山本 誠（東京理科大）

学術講演会委員会　○渡邊 裕章（九大），岡嶋 芳史（三菱重工），岡本 光司（東大），尾関 高行（電中研），糟谷 宏樹（東芝ESS），岸部 忠晴（三菱パワー），北村 英二郎（本田），富永 純一（JFEエンジニアリング），中山 健太郎（川崎重工），平川 香林（IHI），平野 孝典（拓殖大），范 勇（産総研），藤澤 信道（早大），古澤 卓（東北大），水野 拓哉（JAXA）

集会行事委員会　○姫野 武洋（東大），安藤 友香（防衛装備庁），石坂 浩一（三菱重工），伊藤 祐太（本田），尾崎 喜彦（川崎重工），桂田 健（JALエンジニアリング），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），西江 俊介（三井E&Sマシナリー），西村 英彦（三菱パワー），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（三菱パワー），岡田 満利（電中研），岡村 直行（JAXA），小田 豊（関西大），垣内 大紀（IHI），窪谷 悟（東芝ESS），寺本 進（東大），長谷川 晃（JALエンジニアリング），林 明典（三菱パワー），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），荒木 秀文（三菱パワー），壹岐 典彦（産総研），岩井 裕（京大），大塚 裕也（本田），加藤 千幸（東大），金子 雅直（東京電機大），黒瀬 良一（京大），古池 隆洋（東京ガス），酒井 英司（電中研），阪井 直人（川崎重工），佐藤 哲也（早大），渋川 直紀（東芝ESS），鈴木 雅人（産総研），清野 幸典（東北電力），田尻 敬次（荏原エリオット），寺本 進（東大），中野 賢治（IHI回転機械エンジニアリング），野原 弘康（ダイハツディーゼル），八田 直樹（三井E&Sマシナリー），原 浩之（三菱パワー），福谷 正幸（本田），藤原 仁志（JAXA），北條 正弘（JAXA），松崎 裕之（東北発電工業），三ヶ田 一裕（JALエンジニアリング），宮入 嘉哉（防衛装備庁），村上 秀之（NIMS），室岡 武（IHI），森澤 優一（東芝ESS），山下 一憲（荏原），渡邉 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），恵比寿 幹（三菱重工エンジン＆ターボチャージャ），榊 誠司（川崎重工），澤 徹（東芝ESS），須古 弘規（ターボシステムズユナイテッド），前田 泰宏（ヤンマーパワーテクノロジー），眞鍋 壮（三菱パワー），山上 展由（三菱パワー）

産官学連携委員会　○岸部 忠晴（三菱パワー），壹岐 典彦（産総研），今村 満勇（IHI），岡崎 正和（長岡技科大），及部 朋紀（防衛装備庁），北山 和弘（東芝ESS），幸田 栄一（電中研），野崎 理（高知工科大），原田 広史（超合金設計研究所），二村 尚夫（JAXA），松崎 裕之（東北発電工業），笠 正憲（川崎重工），輪嶋 善彦（本田），渡辺 紀徳（東大）

広報委員会　○鈴木 伸寿（東芝ESS），壹岐 典彦（産総研），尾関 高行（電中研），酒井 義明（東芝ESS），谷 直樹（IHI），長谷川 晃（JALエンジニアリング），山本 誠（東京理科大），吉田 征二（JAXA）

表彰委員会　○福泉 靖史（三菱重工），黒木 英俊（三菱パワー），新関 良樹（徳島文理大），姫野 武洋（東大），笠 正憲（川崎重工）

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），半澤 徹（東北電力），寺本 進（東大），仲俣 千由紀（IHI），姫野 武洋（東大）

男女共同参画推進委員会　○川澄 郁絵（本田），猪亦 麻子（東芝ESS），川岸 京子（NIMS），都留 智子（川崎重工），森川 朋子（三菱パワー），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），筧 幸次（東京都立大），金久保 善郎（IHI），岸部 忠晴（三菱パワー），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），岡田 満利（電中研），佐藤 哲也（早大），鈴木 伸寿（東芝ESS），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準備委員会　○寺本 進（東大），大石 勉（IHI），太田 有（早大），岸根 崇（三菱パワー），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（三菱パワー），姫野 武洋（東大），平川 香林（IHI），武藤 昌也（名城大）

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

編集後記

本号の編集も佳境を迎えた2021年８月初旬，テレビでは連日のように東京オリンピックでの日本選手団の快進撃が伝えられました。コロナ禍により開催が一年延期となり，また国内では直前まで開催の是非が議論される中で，一年遅れの大会に向け調整を続けてきた選手たちの苦労は計り知れませんが，すっかり世界との壁を感じさせなくなった選手たちの活躍と自信に満ちたプレーには，まだまだ先の見えないコロナ禍にあって，連日大きな勇気をもらいました。

さて，本号では「ガスタービン計測技術とデータ活用の最新動向」と題して特集を組ませていただきました。デジタル技術やシミュレーション技術が目覚ましい進化を遂げる中で，最近ではAI技術を駆使した設計・解析の最適化も可能となってきており，これまで熟練の技術と経験を要した設計の最適化は，最新のデジタル技術によって比較的短時間のうちに期待するバランス解を得られるようになってきました。しかし最適解の精度を左右するのは，疑いなくその前提条件となる個々のシミュレーションの精度であり，シミュレーションの精度を検証するために不可欠となる「計測技術」は，シミュレーション技術とともに まさに車の両輪のごとく進化を続けていく必要があります。また，複雑なシステムにおいては過渡的な非定常現象など正確な数値シミュレーションが難しい条件によって，システムの最適解そのものが左右される場合も多々あり，リアルワールドを扱う計測技術の進歩は，今後我々が解決すべき工学的問題が高度化すればするほどその必要性が高まるものと感じています。

今回，初めて学会誌のアソシエートエディターを務めさせていただくこととなり，不慣れな中 昨年より編集委員の方々から様々なアドバイスをいただきながら議論を重ねて参りました。特集テーマの選定にあたっては，数多くのガスタービン関連領域から読者の皆さんに興味を持っていただけるテーマをいかに絞り込んでいくべきか悩みましたが，「計測技術」についてはエンジニアリングに携わる皆さんが，その専門性は様々でも，その重要性や課題感について考えを共有できる領域であると感じたこと，またコロナ禍で出社率が制限されるなか，日替わりの交代勤務によって現場のテスト業務をサポートしているテスト技術者の姿にも後押しされる思いで本テーマを選定させていただきました。依然と続くコロナ禍において，日々様々な領域でエンジニアリングを実践されている皆さまのご興味に沿えれば幸いです。

最後に，本号を編集するにあたりご協力いただきました委員会の皆さま，お忙しい中 本号への執筆を快く引き受けてくださり，時間を惜しまず執筆にご協力いただきました皆さまに心より感謝を申し上げます。

（福谷正幸）

● 9月号アソシエイトエディタ
福谷 正幸（本田技術研究所）
● 9月号担当委員
阪井 直人（川崎重工業）
原 浩之（三菱パワー）
室岡 武（IHI）

（表紙写真）
今回の表紙については，【論説・解説】の著者より流用およびお借りしています。
詳細については，下記記事をご参照ください。

・「遠心圧縮機内の非定常流動現象の計測」……（P.324 ～ 329）
・「噴霧燃焼の光学計測」……（P.330 ～ 337）
・「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」……（P.338 ～ 343）
・「ガスタービン動翼の温度計測」……（P.350 ～ 355）
・「デジタルソリューションTOMONIによる発電プラント自動自律化と脱炭素社会への貢献」…（P.362 ～ 367）

☘事務局だより✉☘

この夏は，オリンピックとパラリンピックの開催，コロナ第５波での感染急拡大，日本各地の豪雨災害が重なり，stay home でテレビを見ているだけなのに，頭の中は喜怒哀楽全方向に慌ただしく動いている，そんな毎日だったように思います。そして今年の定期講演会も長引くコロナ蔓延のため，昨年同様オンライン開催となりました。今年は昨年のノウハウを生かせば準備は楽勝だと思っていたのですが，すっかり忘れています。昨年，情報収集から準備検討，本番まで短期間で一気にこなしたため，その分，忘れるのも早い（学生時代の試験勉強一夜漬けのような）のかもしれません。今年は昨年の資料を見直して思い出しながら行きつ戻りつの準備となりそうです。

日本ガスタービン学会は来年で創立50周年となります。定期講演会やセミナーも第49回，第50回というカウントです。過去の資料を見ると創立当初の講演会や学会誌など興味深いものがあります。講演論文は手書きが多く，学会誌にはほのぼのとした挿絵があったりします。でも体裁は変わってもその時々の講演者や委員の方々の緊張感や思いなどは変わらないのかもしれないと感じます。この長い間，学会誌や論文集の編集発行をご担当いただいたニッセイエブロの秋本さんが今秋定年でご退職されるとのこと。長くご担当いただいたこともあり，私たちの気が付かないところや，うっかり依頼し忘れていることなどタイミングよくご連絡してくださったり，さりげなくご助言をくださるなど，事務局一同，たいへん頼りにしておりました。寂しさを感じつつ，この場をお借りして感謝申し上げます。

今年も後半にはイベントが続きます。オンラインの手軽さを逆手に，この機会に積極的にご参加いただきたく，よろしくお願いいたします。

（中村 優美）

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2018年７月13日改定

1．本会誌の原稿はつぎの３区分とする。

A．依頼原稿：学会誌編集委員会（以下，編集委員会）がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は本学会会員（以下，会員）外でもよい。

B．投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。

C．学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告，会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。

1.2．技術論文の投稿については，「技術論文投稿要領」による。

1.3．英文技術論文の投稿については，Instruction to Authors, JGPP（International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems）による。

2．依頼原稿および投稿原稿は，論説・解説，講義，技術論文，寄書（研究だより，見聞記，新製品・新設備紹介），随筆，書評，情報欄記事の掲載欄に掲載することとし，刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説，講義	6ページ以内
技術論文	「技術論文投稿要領」による
寄書，随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内

3．原稿の執筆者は，本会誌の「学会誌原稿執筆要領」に従って原稿を執筆し，編集委員会事務局（以下，編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記１に示す。

4．依頼原稿は，編集委員会の担当委員が，原稿の構成，理解の容易さ等の観点および図表や参考文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて，執筆者への照会，修正依頼を行う。

5．投稿原稿のうち技術論文以外のものは，編集委員会が審査し，本会誌への掲載可否を決定する。

6．投稿原稿のうち技術論文の審査，掲載については，「技術論文投稿要領」に従う。

7．依頼原稿の執筆者には，学会事務局から原則として「学会誌の執筆謝礼に関する内規」第２条に定めた謝礼を贈呈する。

8．非会員の第一著者には掲載号学会誌１部を贈呈する。

9．本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程」による。

10．他者論文から引用を行う場合，本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記１　原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）
ニッセイエブロ㈱ 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. 49　No. 5　2021.9

発行日　2021年９月17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　太田 有
〒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
㊔ 1703707
印刷所　ニッセイエブロ㈱
〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17
明産西新橋ビル
Tel. 03-5157-1277

©2021，公益社団法人日本ガスタービン学会

複写複製をご希望の方へ
公益社団法人日本ガスタービン学会では，複写複製に係る著作権を一般社団法人学術著作権協会に委託しています。当該利用をご希望の方は，学術著作権協会（https://www.jaacc.org/）が提供している複製利用許諾システムを通じて申請ください。

Download service for the GTSJ member of ID , via 3.143.110.165, 2025/05/15.