

特集：最近のガソリンエンジン用過給機の動向

特集「最近のガソリンエンジン用過給機の動向」

Special Issue “Recent Trends of Charging Technologies for Gasoline Engines”



太田 有^{*1}
OHTA Yutaka

2014年9月から欧州ではガソリンおよびディーゼル車からの大気汚染物質の排出規制値を定めた新しい排ガス規制“Euro6”が開始された。この“Euro6”の排出基準は非常に厳しく、例えばNO_x基準は1992年に導入された“Euro1”の基準に対して60%以上も低い値が設定されている。このように、自動車用エンジンの研究開発の歴史は常に大気汚染物質の排出規制値との戦いであり、各メーカの技術者はこの排出規制値をクリアするために絶えず新技術・新製品を開発し続けてきたと言っても過言ではない。新しい排出基準は特にディーゼル車のNO_xに対して厳しい内容になっており、自動車メーカは悲鳴をあげていると聞く。一方、本特集で取り上げたガソリン車についても最新の規制値をクリアすることは容易ではなく、例えばEUの自動車が排出するCO₂の規制値は、2021年に向けて段階的に厳しくなることが既に決まっている。燃料測定基準がより実際の走行条件に近い世界統一基準へと変更されることも厳しさに拍車をかけているようだ。

このように自動車の燃費向上や環境問題は今や世界的な関心事であり、その対策の一例として欧州では1990年代より「ダウンサイジング」コンセプトが提案されてきた。エンジンの排気量を小さくしてパワーの不足分を過給機で補うという発想には、燃費は度外視してもパワー強化をという従来の過給機のイメージしかない著者には理解し難いものであるが、燃費向上のみならず小排気量化によって自動車税の軽減にも繋がるというのであれば話は別である。この「ダウンサイジング」コンセプトの導入から既に20年以上が経過した現在、このコンセプトを支える過給機の技術は格段に進歩している。この特集ではその過給機の最新技術および将来展望をご紹介頂いた。

まず初めに、川崎重工業の市氏、内山氏、齋藤氏に過給機を備えた大型二輪車用エンジンの開発についてご紹介頂いた。過給機本来の魅力である加速感を体感するために、小型・軽量で高回転時の流量が大きく、回転数変化に素早い追従が可能な遠心圧縮機をクランク軸から機

械駆動するスーパーチャージャを選択し、自社設計による開発、エンジンとのマッチング、用途に合わせた作り込みなどが詳述されています。しかも、低回転数域での使用頻度を増やすことで摩擦損失を低減させ、自然吸気エンジンより燃費性能が向上したことが報告されています。

三菱重工エンジン&ターボチャージャの前川氏およびIHIの馬場氏にはそれぞれ、過給機新技術の開発を進めていく過程において、排気ガス規制やエンジン熱効率の向上に向けて過給機に要求される諸課題に対して両社で近年導入された将来技術を紹介して頂いた。その中でも特に、より高出力や過渡時の特性改善が期待できる電動過給機については、過給機の回転数が上がるまでに時間を要する、いわゆる「ターボラグ」問題の解決や低速域での性能向上策として大きな将来性が感じられます。

最後に本田技研の坂井氏には、Hondaが環境性能と運転する楽しさの両立を目指した直噴過給エンジンVTEC TURBOを紹介して頂いた。「ダウンサイジング」コンセプトの弱点の一つである低回転数域でのトルク特性や応答性の改善を指向した取り組みや、高効率化、高圧力比ワイドレンジ化、高耐熱化という過給機に対する普遍的な要求に対しての取り組みを詳述して頂くと共に、将来要求される過給機性能についての考察が紹介されています。

日本の市街地のように発進と停止が頻発し、高速度で巡行できる道路が少ない環境下でこの「ダウンサイジング」コンセプトが本当に定着するのかが当初懐疑的な見方が多かったが、この特集記事からもわかるように欠点と思われていた諸問題は最新技術によって次々と克服され、今や我が国で先行して発達したハイブリッド技術を脅かす存在にまでなっている。ハイブリッド車に勝る乗り心地やトルクフルな発進性能には価値が認められるので今後は両技術がどのように競い合っていくのか、更には今後進むであろうパワートレインの電動化に向けて過給機の果たす役割がどう変化していくのかが興味深いところです。最後に、ご寄稿頂いた皆様に御礼を申し上げると共に、本特集記事が会員の皆様の一助となることを期待しております。

原稿受付 2018年8月27日

*1 〒169-8555 新宿区大久保3-4-1

E-mail: yutaka@waseda.jp

特集：最近のガソリンエンジン用過給機の動向

大型二輪車用過給機および過給エンジンの開発

Development of Supercharger and Engine for Motorcycle



市 聡顕*¹ 内山 悠太*² 齋藤 将仁*²
 ICHI Satoaki UCHIYAMA Yuuta SAITOU Masahito

キーワード：過給，レシプロエンジン，効率

Key Words：Supercharging, Reciprocating Engine, Efficiency

1. はじめに

Kawasakiは二輪車に対する多様な顧客の要望にこたえ 日常では体感することのできない加速感を提供するため2015年に過給エンジンを搭載したNinja H2 (図1) /H2R (図2) を開発した。さらに、2018年には日常の



Fig. 1 Ninja H2



Fig. 2 Ninja H2R

原稿受付 2018年 8月 1日

- * 1 川崎重工業(株) モーターサイクル&エンジンカンパニー
 〒673-8666 明石市川崎町1番1号
 E-mail: ichi_s@khi.co.jp
- * 2 川崎重工業(株) 技術開発本部
 〒673-8666 明石市川崎町1番1号
 E-mail: uchiyama_yuuta@khi.co.jp
 E-mail: saitou_masahito@khi.co.jp

利便性を向上させた Ninja H2 SXを開発した。本稿では「自社製過給機」・「過給機とエンジンのマッチング」・「用途に合わせた過給機の作り込み」について紹介する。

2. Ninja H2/H2R用過給機

2.1 モデルの特徴と過給機の選定

Ninja H2/H2Rの排気量は共に1Lで過給機を含むエンジンの主要部品は共通である。主な違いは吸気系・排気系とカムシャフトのプロフィールである。公道走行用のNinja H2は最大出力147kW (200PS) 整備質量238kg, クローズドコース専用のNinja H2Rは最大出力228kW (310PS) 整備質量216kg と最大出力を整備質量で割った比出力が非常に大きく最大加速度が大きい。

搭載するエンジンにはクランク回転数で13,000r/min以上の高回転域まで力強く伸びるエンジン特性と、以下のような特性をライダーが感じることができることが求められる。

- ・ツキ感：スロットル操作した瞬間(0.1秒以内)に、素早く追従した過不足ない応答が得られる感覚
- ・スロットル操作に応じたりニアでクイックなレスポンス：数秒間の操作量と応答量が常時対応している感覚
- ・加速フィーリング：数秒から数10秒にわたり加速の過程で、意図通り加速が実感できる感覚

乗用車の過給機にはターボチャージャーが多く用いられているが、原理上ターボラグを0にすることは困難であり上記のような要求を満たすことが難しい。電動アシストターボチャージャーは二輪車に搭載するには大掛かりになるという問題がある。

そこで、機械駆動式のスーパーチャージャーを選択した。乗用車で一般的に使われる容積式過給機は低回転で大きな圧力比を得ることができる一方、高回転での使用には制限があり、装置の容積・質量とも二輪車に搭載するには大きく重いという問題がある。また、慣性質量が大き

く速いレスポンスを得ることは困難である。

前述の要求を満足するため、小型・軽量で高回転時の流量が多く、回転部の慣性質量が小さいことから回転数変化にすばやく追従が可能な遠心式過給機をクランク軸から機械的に駆動する方式を選択した。

最適な過給機特性を得るため、自社設計にて過給機を開発し、社内にて製造（加工，組立，調整，性能測定）することとした。開発に当たっては、当社のガスタービン部門及び技術開発本部の協力を得て二輪エンジン設計者が専用設計を行った。

2.2 吸気温度抑制

一般的に過給エンジンではインタークーラを用いることで吸気温度を低減し、充填効率の向上とノッキング抑制により、高効率・高出力を得る手法が採用される。しかし、二輪車においては搭載スペース・質量が限られることから、過給機の圧縮効率に着目した。圧縮効率とは取り出し可能な仕事量（等エントロピー仕事）に対して実際に取り出した仕事量の比であり、仕事の差分は熱として吸気温度上昇につながる。過給機の圧縮効率を高めることで吸気温度上昇を抑制すると共に、ノッキングの懸念があるエンジンの高負荷領域と過給機の高効率領域を一致させることで異常燃焼を抑制し、インタークーラを不要とすることを目標として開発を行った。つまり、温度上昇した空気を冷却するのではなく、温度上昇そのものを抑制するアプローチである。

この目標の達成のために過給機に求められる特性は以下の3点である。

- ① 過給機の圧縮効率が高い
- ② 高圧縮効率領域が広い回転数にわたり存在する
- ③ 実使用領域と過給機の高効率領域が一致している

2.3 Ninja H2/H2R用過給機の特徴

図3に一般的な遠心式過給機とNinja H2/H2R用過給機の圧縮効率を示すコンプレッサマップを示す。横軸に過給機から出力される質量流量を、縦軸に圧力比を示している。図中右下から左上方向に太線で図示したラインは、インペラの等回転数での特性を示す。右側に位置する大流量時の圧力比に対して下流側で流量を制限すると圧力比が上昇することを示す。左下の太線はインペラの

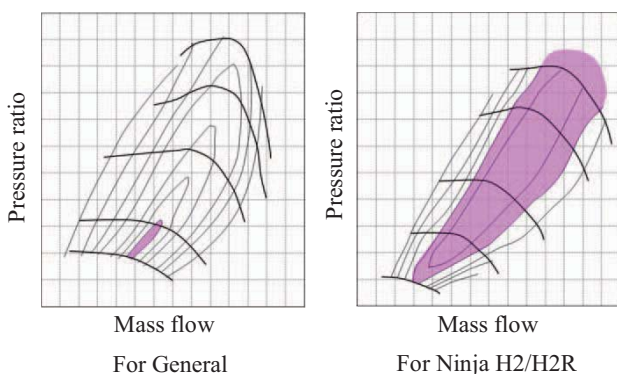


Fig. 3 Compressor map

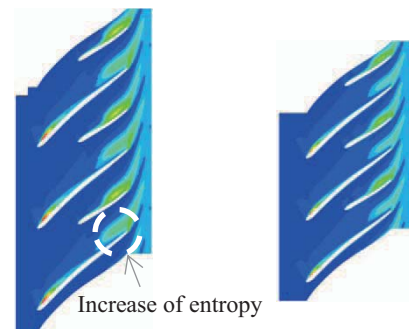
低回転時を示し、右上の太線は高回転時の特性を示す。

細線で示すラインは圧縮効率の等高線である。中心ほど圧縮効率が高い。塗りつぶし領域は一定以上の圧縮効率領域を示す。左に示す一般的な遠心式過給機では塗りつぶして示す高効率領域はコンプレッサマップ上の部分的な領域に限られる。対して右に示すNinja H2/H2R用過給機は塗りつぶして示す高効率領域が広く、尾根状につながっているという特徴を有する。また最高効率が高い。Ninja H2/H2R用過給機はインペラの回転数によらず常に高効率領域が存在することを示しており、前述の特性を実現していることがわかる。二輪車のように回転数の変化を伴うエンジンに適している。

2.4 過給機的设计

過給機的设计手法について簡単に述べる。まずエンジンの目標出力を達成するため、過給機の質量流量・圧力比・回転数・圧縮効率といった空力特性の目標値を決定する。

とりわけ、回転翼であるインペラは駆動部の動力を作動流体へ伝える役割を担うため、空力設計上最も重要である。開発初期にインペラの基本的な幾何特性（翼枚数・ハブ径・インデューサ径・翼厚さ・レイク角・バックワード角等）を決定するにあたり、空力損失の低減に向け、翼枚数を検討した一例を図4に示す。翼枚数が少ない場合と多い場合を比較すると、少ない場合は翼間距離が大きく、流体のエネルギー損失を表すエントロピーの悪化領域が拡大するため、翼枚数を増やして整流能力を高めた。

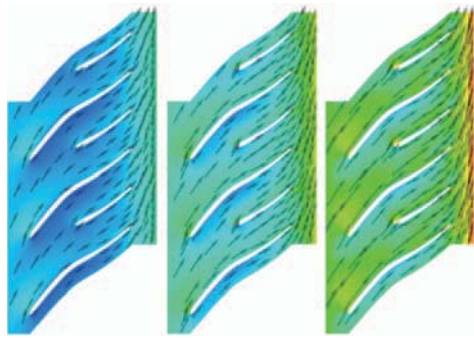


A small number of blades A large number of blades

Fig. 4 Analysis of entropy distribution between blades

得られた基本翼形状を元に、さらなる最適化を図った。流体の入射角と翼の入口角を揃えて、前縁での衝突損失を低減した。加えて、前縁半径や翼厚さの分布等の最適化を図り、幅広い回転域において流れの剥離や失速を抑制した。その結果、図5に示す翼間流れ解析結果のように、低・中・高回転の各回転数において損失の少ない流速分布が得られた。

また、インペラ的设计においては、回転中の遠心力により発生する応力の低減やエンジン等振動源との共振を回避することも必要であり、空力設計と構造設計のバラ



Low speed Middle speed High speed

Fig. 5 Analysis of flow velocity distribution between blades

ンスが重要になる。

さらにコンプレッサハウジングの設計を行い、流路内流れ解析により流路形状を決定する。ハウジングはインペラで加圧、加速された空気動圧分を静圧回復するディフューザも兼ねており、適切な容量の流路設計が必要である。(図6)

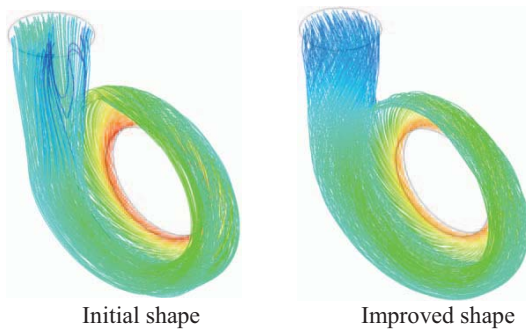


Fig. 6 Analysis of flow velocity distribution in compressor housing

2.5 コンプレッサハウジングのコンテインメント性

過給機とライダーの乗車位置は非常に近いが、遮蔽板の設置は質量増になることから好ましくない。このため万が一インペラが破損した場合でもコンプレッサハウジングの内部に破片を閉じ込めるコンテインメント性が必要である。強度のみならず軽量であることが重要であることから、衝突解析を用いた開発を行った。(図7) この解析はジェットエンジンのファンケース設計に用いる技術の横展開であり、飛散させたインペラの挙動およびその衝突により生じるハウジングの損傷状況を高精度にシミュレーションすることが可能である。衝突解析を駆使

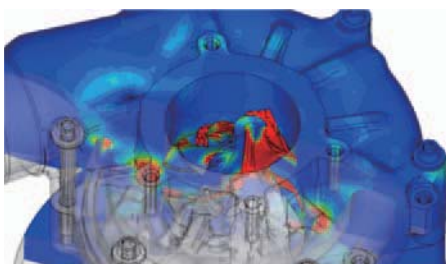


Fig. 7 Collision analysis

し、軽量かつコンテインメント性を有する独自のハウジング形状を開発するとともに実物を用いたコンテインメント・リグ試験を実施し、その性能の検証を行った。

2.6 軸受構造

過給機の回転軸は最高回転数が130,000 r/minに達し、共振が発生した場合にはインペラの破損につながる恐れがある。本過給機ではオイルフィルムダンパ機構を用いて制振を行っている。図8に軸受け構造を示す。高速回転を支える軸受け部は、低摩擦損失とすばやいレスポンスのため一般的なすべり軸受けではなく、転がり軸受けを採用した。軸受けケーシングの外側に油膜層を設けてダンピング効果を得ている。この効果は油膜厚さによって変化することから、膜厚選定を行い最適な膜厚に設定した。

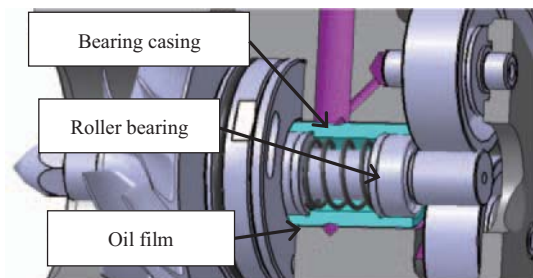


Fig. 8 Bearing structure of supercharger

2.7 過給機の駆動

図9に過給機の駆動部を示す。クランクシャフトから中間軸を介しチェーンによりエンジン背面の過給機と同軸のシャフトを駆動している。このシャフトと過給機のために航空機用エンジンでも用いられる遊星歯車増速機を配置し、8倍増速している。総増速比は9.18倍である。クランク回転数14,000 r/min時にインペラ回転数は約130,000 r/minとなる。

遊星増速機はフリクションローラではなく歯車を用いていることから専用オイルが不要で大幅な部品点数の削減と省スペース化・軽量化を実現している。またスリップを起こさないため駆動損失が小さい。(図10)

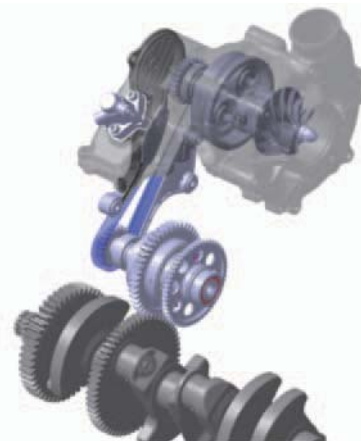


Fig. 9 Structure for driving supercharger



Fig. 10 Planetary gear

本機構にはすべり部が存在しないことから、エンジンのクランク軸回転数によってインペラ回転数が決定する。このため、エンジンが回転していれば常に過給が可能であると共に、エンジンの回転数と負荷によってコンプレッサマップ上の作動点が定まる。反面、二輪車の回転数の変化は非常に大きい、インペラはさらに9倍以上の強制回転数変化を受けることになり、各部に高い信頼性が求められる。

2.8 インペラ入口流れ改善

インペラ入口の吸気流速は100m/s以上に達する。インペラを固定するナットは六角形状のものを使うことが一般的であるが、本過給機では図11に示すように先端を凸とした袋形状とした。この結果インペラ入口部の乱れが抑制され過給機の効率が向上しエンジン出力が向上した。



Fig. 11 Fixing nut of impeller

2.9 インペラ加工

インペラはアルミ鍛造ブロックから総削りにて製作している。二輪車は前述のとおり比出力が非常に大きいため、過給機性能・エンジン性能の差が加速時の車体挙動に影響し、ライダーは1%未満の出力差であっても識別することが可能である。インペラ翼形状について、例えば翼先端の向かい角が大きくなる側と小さくなる側でエンジン性能測定および実走フィーリング確認を行い、影響がない範囲に加工許容差を設定した。

2.10 組立調整

過給機の性能はインペラとコンプレッサハウジングの隙間の寸法（チップクリアランス）によって変化する。この点についても、エンジン性能測定および実走フィーリングに影響を与えない範囲に組立の許容差を設定した。

3. 過給機上流下流の流路設計

過給機を二輪車において高効率で用いるためには、過給機単体の圧縮効率を高めることはもちろんのこと、過給機上流の流れ、下流の流れを適切に設計することによって吸気系全体で損失を低減させ、エンジンの吸気温度上昇をいかに低く抑えるかが重要である。

3.1 過給機下流の流れ

直列4気筒過給エンジンにおいて高出力を実現するためには各気筒に均等に新気を供給することと、新気分配の過程で不要な乱流を発生させないことが重要である。このため、過給機下流と各気筒の吸気ダクト間に設けた吸気チャンバは図12に示すとおり扇型形状として、吸気流路長を均等にした。また流路を曲げると圧力損失を生じるため、過給機と吸気チャンバは直線的に配置した。

3.2 過給機配置

扇型吸気チャンバを実現するためには過給機出口はエンジンセンターに配置する必要がある。また、過給機はクランク軸からエンジン内部の構造により駆動するため、過給機は図12に示すとおりエンジン背面に配置した。



Fig. 12 Layout of supercharger

3.3 過給機上流の流れ

走行風を利用して出力を向上するラムエアシステムを採用するため、ラムエアダクト形状の検討を行った。走行風は車体前方のよどみ点から吸気すると最もラム圧が高くなる。一方過給機はエンジン背面に配置するため、この間をどのようにつなぐかが課題となる。また、走行中に大きく変わるライダーの乗車姿勢変化に影響を与えてはならない。Ninja H2/H2Rでは図13に示すように車体側面視で、エンジン側方をできる限りストレートにつなぐよう配置した。しかし、車体上面視では前方から後方への流れを、左から右への流れに90°方向転換しなくてはならない。過給機入口の空気流量に偏りが生じると、過給機の圧縮効率が下がるため、過給機入口ではできる限り均等な分布にする必要がある。そこで、図14に示すように大きなRで方向変換すると共に、上流から下流に向かって断面積を徐々に小さくするように形状を決定した。

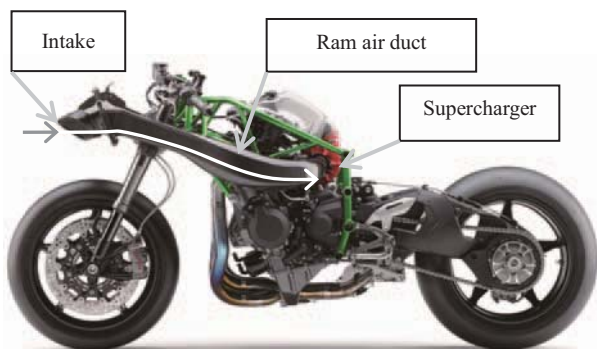


Fig. 13 Side view of the vehicle (Ninja H2R)

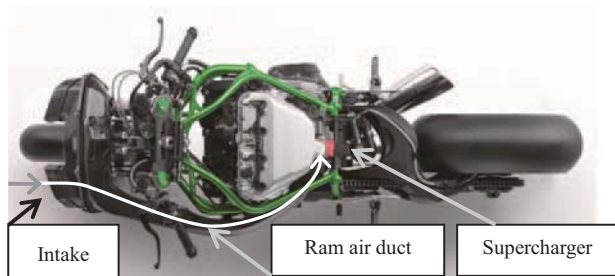


Fig. 14 Top view of the vehicle (Ninja H2R)

さらに圧力損失を小さくするため、ダクト断面形状は外側を凸としたD型断面とした。また雨天走行時の水切り性能を考慮した形状とした。

図15にNinja H2のラムエアダクト内のガス流動解析結果を示す。ダクトは圧力損失を小さくすると共に、過給機入口の圧力分布が均等になるように形状を決定した。

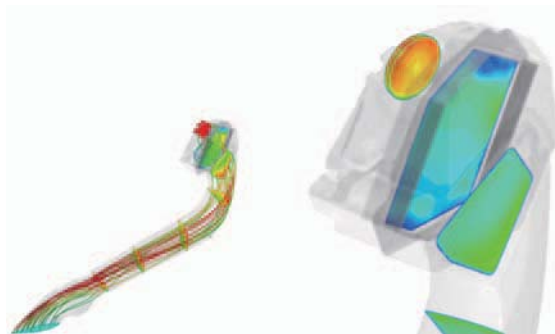


Fig. 15 Analysis of intake air flow (Ninja H2)

4. エンジン設計

エンジンは過給することで最高のパフォーマンスを発揮するように設計した。

4.1 燃焼室形状

過給により多くの空気を燃焼室に供給しても異常燃焼が発生した場合はこれを避けるために大幅に出力を低下させなければならない。エンジンとして高出力を達成するためには、ノッキング抑制技術が欠かせない。

まず、燃焼室形状はスキッシュを廃止したフラット形状とすることによりノッキングの発生を抑制した。燃焼室形状の精度を向上するため、シリンダヘッドの燃焼室、

吸排気バルブ、ピストン頂部を機械加工することにより、形状、容積（圧縮比）のばらつきを低減した。（図16, 17）



Fig. 16 Shape of combustion chamber



Fig. 17 Shape of piston top

4.2 燃焼室冷却

燃焼室冷却もまた異常燃焼を防ぐために重要な要素である。燃焼室を効率よく冷却するため、図18に示すように水通路をできる限り拡大した。

排気ポートは各バルブから独立したストレート形状とし、図19に示すように排気管との接続部は長円形状としている。これにより排気効率が向上して内部EGR量が減少し、ノッキング抑制に効果を発揮する。また、排気ポート間に水通路を配置することが可能となり、燃焼室の冷却性能が向上した。



Fig. 18 Cooling water passage of cylinder head



Fig. 19 Shape of exhaust gas outlet

4.3 エンジンと過給機のマッチング

図20に再度コンプレッサマップを示す。中央のハッチング部はNinja H2Rでスロットル開度 1/2 ~ 全開で使用する領域を示す。過給機の高効率領域とエンジンの高負荷領域が一致していることが分かる。異常燃焼が問題となる高負荷運転領域と過給機の高効率領域を完全に一致させることで、吸気温度を低減し異常燃焼を防いでいる。

2.2項で示した3つの要求特性を満足したことにより、インタークーラを用いることが不要となり大幅な部品点数の削減と軽量化を達成した。このようなマッチングが可能となったのは、エンジンと過給機を同時開発・自社生産することによって、相互に最適の状態に設計した結果といえる。

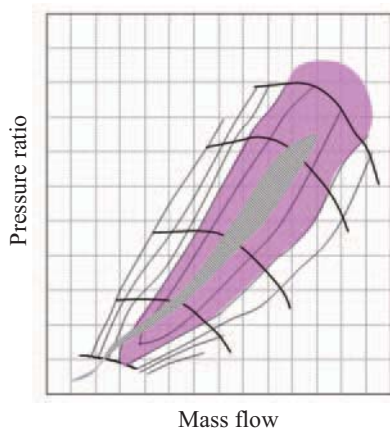


Fig. 20 Matching of engine and supercharger

5. 用途に合わせた過給機の作りこみ

パフォーマンスに特化したNinja H2/H2Rに対して、燃費性能、快適性、二人乗り、荷物積載性など日常の利便性を向上させたNinja H2 SX (図21)を開発した。開発に当たってはエンジンの基本レイアウトは踏襲しつつ、過給機は自社開発の利点を生かして、求められるエンジン特性に合わせて最適設計を実施した。



Fig. 21 Ninja H2 SX

5.1 インペラ形状

Ninja H2/H2RとNinja H2 SXのインペラ形状を図22に示す。日常の扱いやすさを向上するためNinja H2 SX用インペラは、低流量時の圧縮効率を高めることを狙い

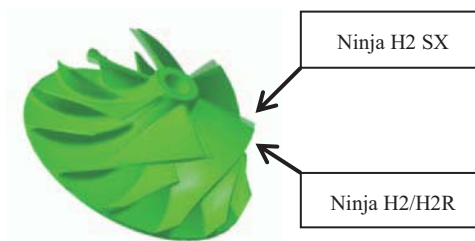


Fig. 22 Form of impeller

として、翼の迎え角を変更した。

5.2 コンプレッサマップ

Ninja H2/H2RとNinja H2 SXのコンプレッサマップを図23に示す。左に示すNinja H2/H2R用過給機に対して、右に示すNinja H2 SX用過給機は高効率点が低回転かつ低流量側に存在し、さらに最高圧縮効率が高く狙い通りの特性を示している。

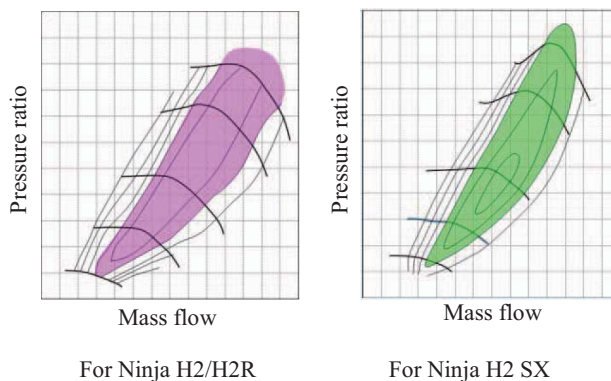


Fig. 23 Compressor map

6. 機関性能

6.1 エンジン出力

図24にエンジン出力を示す。自然吸気の既存機種と比較した場合、Ninja H2R は過給エンジンを搭載することにより、1.5倍の出力を発揮する。また、公道仕様のNinja H2 の最大出力は既存機種と同じであるが、全域でトルクが大きく、加速時の加速感は非常に大きい。さらにNinja H2 SXでは低中回転時のトルクをさらに向上させ日常使用での扱いやすさを高めた。

6.2 燃費性能

Ninja H2 の燃費はWMTC (Worldwide Motorcycle Emissions Test Cycle) モードで14.7km/L と自然吸気の既存機種14.5km/Lよりも良い値となっている。これは過給により低回転領域でのトルクが大きくなったことにより、低回転域の使用頻度が高まりフリクションロスが低減したことによる。さらにNinja H2 SXでは圧縮比を8.5から11.2に高めるなどの改良を行い17.9km/Lと大幅に向上させた。

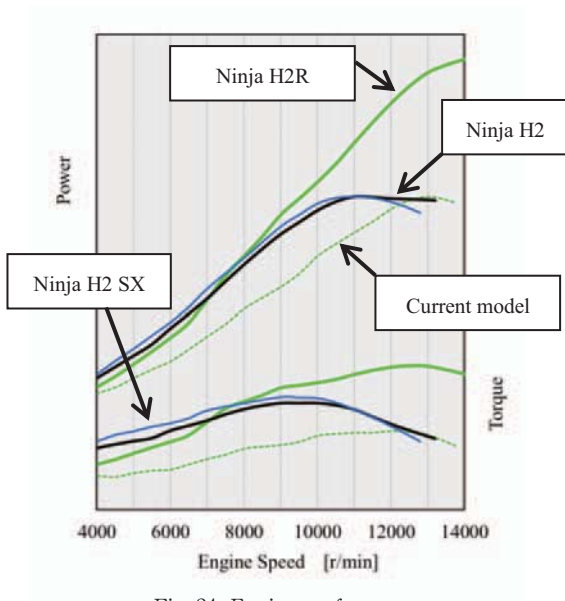


Fig. 24 Engine performance

7. まとめ

Kawasakiは日常では体感することのできない感動的な加速感を提供するため過給エンジンを搭載したNinja H2/H2Rを開発した。自社製過給機とエンジンを同時開発することにより、それぞれを高効率で活用することに成功し、燃費性能も向上した。また、部品点数の削減と軽量化を達成した。

さらにNinja H2 SXでは、過給機・エンジンを日常の利便性と環境性能向上のために改良し、低回転時のトルク向上と燃費性能の大幅向上を達成した。

今後ともKawasakiは「Fun to Ride」「Ease of Riding」「環境性能」をキーワードに世界のライダーに豊かな生活と夢を提供しながら地球環境の未来に貢献する二輪車を開発していく。

特集：最近のガソリンエンジン用過給機の動向

乗用車用ターボチャージャの将来技術と最新技術動向

Future Technology of Turbocharger for Passenger Car



前川 昌三*¹
MAEKAWA Shozo

キーワード：ターボチャージャ，ミラーサイクル，EGR，過渡特性，高温対応

Key Words：Turbocharger, Miller cycle, EGR, transient performance, high temperature durable material

1. 緒言

ターボチャージャは、エンジンに供給する空気を圧縮するコンプレッサ（圧縮機）と、燃焼ガスを膨張させて回転エネルギーを取り出すタービンとが同軸上にある機器の総称であり、ガスタービンやジェットエンジンから燃焼器を取り除くとほぼ同様の構造になる。ただし乗用車用ターボチャージャは、コンプレッサ側とタービン側ともに遠心（ラジアル）式である点が軸流式（ガスタービンやジェットエンジンとは異なる。遠心式は空気の圧縮時または燃焼ガスの膨張時に遠心力を活用できるので、小型化が可能でかつ小型でも高効率という利点があり、乗用車用等の小型ターボチャージャに採用されている（一部の船用等の比較的大型のターボチャージャでは軸流式タービンを採用）。ただし多段式には向いておらず、2段階までが量産されており、圧縮比も実用的には5未満とガスタービンやジェットエンジンと比較して低い特徴がある。

ターボチャージャは主に乗用車用、トラック・バス用、産業機器用及び船用で使用されているが、最近では乗用車用とトラック・バス用の生産台数が他の適用先と比較して圧倒的に多い。2017年の自動車生産台数⁽¹⁾は全世界合計で97百万台（乗用車が73百万台、ピックアップトラックを含むトラック・バスが24百万台）であり、そのうちターボチャージャを搭載する車両台数は当社推定で40百万台前後なので、搭載率は40%と推定される。2000年代以降にターボチャージャの搭載台数、搭載率とも増加したが、これは主に排気ガス規制と燃費規制に対応するため、これ以降ターボチャージャは従来のディーゼル車だけでなくガソリン車でも採用が大幅に増加しており、今後も伸長が期待される。現時点ではガソリン車用

途はターボチャージャ全体の生産台数のうち当社推定で50%強だが、2020年以降は70%超になると予想している。これは欧州を中心にディーゼル車の需要が減少しているためである。

本論文では主にガソリン乗用車用ターボチャージャの将来技術について、エンジンからの要求を含めて説明する。

2. エンジンからの要求

2.1 排気ガス規制対応

各国・地域の排気ガス規制は、2005年以降の欧州EuroIV規制、日本新長期規制、米国Tier2等により、有害物質の排出量を厳しく制限するようになった⁽²⁾。ただしガソリン車の場合には通常三元触媒を用いており、重量比で空気と燃料が約14.7対1、つまり過不足なく燃料が反応できる理論空燃比（ストイキオメトリー）の燃焼状態であれば、効率的に炭化水素（HC）、一酸化炭素（CO）、窒素酸化物（NOx）の有害物質が除去されるので、できるだけストイキオメトリーで燃焼するように運転モードに合わせて燃料噴射量と吸入空気量が制御されている。通常は酸素センサーを用いて排気ガス中の酸素濃度を計測して緻密なフィードバック制御を行っており、ターボチャージャは燃焼状態に応じた必要な空気（酸素）を供給する必要がある（ターボチャージャへの要求①）。

またエンジン始動直後等の低温状態では三元触媒は十分に作動しないため、できるだけ早期に触媒を活性化（昇温）させる必要がある（要求②）。

2.2 燃費規制対応

日本でも2018年10月以降に発売される新車から新たな燃費測定基準WLTC（Worldwide harmonized Light vehicle Test Cycle）が適用される⁽³⁾。これは現行のJC08モード（日本）のように、各国・地域ごとに異なる燃費測定方法を全世界で統一したもので、図1に比較を示す。急加速・急減速となる走行モードが増加しており、過渡時の特性が重要となる（要求③）。

原稿受付 2018年7月23日

* 1 三菱重工エンジン&ターボチャージャ
ターボ事業部技術部
〒252-0244 相模原市中央区田名3000番地
E-mail: syozo_maekawa@mhieth.mhi.co.jp

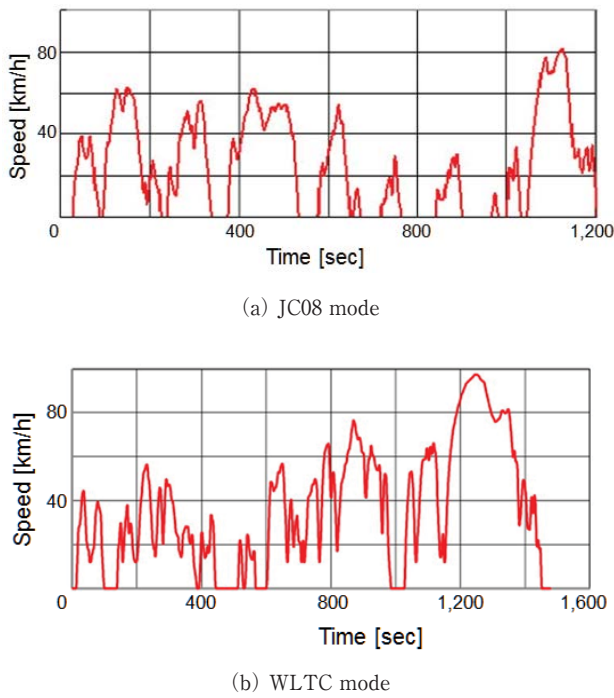


Fig. 1 Light duty vehicle test mode

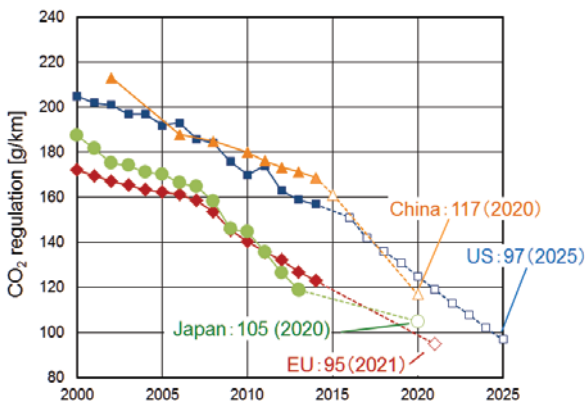


Fig. 2 Fuel consumption (CO₂ emission) regulation

図2に各国・地域ごとの燃費規制値を示す⁽⁴⁾。2020年以降は概ね100g/km以下が必要となるが、日本のJC08モードに換算すれば23.2km/L以上の燃費となる。そのため自動車会社各社とも電動車（電気自動車、ハイブリッド車及びプラグインハイブリッド車）の販売と並行して通常エンジンの燃費向上、熱効率向上に取り組んでいる。

2.3 熱効率向上に必要な技術

今後のエンジン熱効率向上には、以下の対応が必要である。

2.3.1 エンジン圧縮比向上

エンジンの理論サイクル熱効率は⁽⁵⁾

$$\eta = 1 - \frac{1}{\pi^{\kappa-1}}$$

- η：理論サイクル熱効率
- π：圧縮比
- κ：比熱比

であり、圧縮比を上げるか比熱比が大きくなれば理論サイクル熱効率が向上する。使用する燃料によっても比熱比はほとんど変化しないため、高圧縮比の対応が必要となる（要求④）。

ただしガソリンエンジンの場合には、圧縮比が高くなるとシリンダ内の温度が上昇してノッキング（異常燃焼）が発生するため、通常は10～12程度に抑制している。最近ではシリンダ内への燃料直接噴射の採用で燃料の気化潜熱を活用して温度上昇を抑制し、更なる高圧縮比を実現している。

2.3.2 高EGR (Exhaust Gas Recirculation) 率

一般的なガソリンエンジンの場合で、燃焼によって生じた熱量のうち、有効仕事となるのは熱効率最大点近傍でもおおよそ30%、排気ガスとして排出される排気損失は30%、エンジンを冷却することで冷却損失が33%で、機械摩擦損失は7%になる⁽⁶⁾。機械摩擦損失にはポンピング損失が含まれるが、これはスロットルバルブで流量を調整する際に発生する圧力損失である。このポンピング損失は、エンジンの低負荷時等で必要な空気量が少なくなるとスロットルバルブを閉めるために更に大きくなる。

そこで運転モードに合わせて燃料を噴射し、三元触媒が効果的に作動するストイキオメトリ燃焼状態になる空気（酸素）を吸入させ、残りをEGRによってエンジン入口側に還流した排気ガスを活用することでポンピング損失を低減する手法がある。酸素をほとんど含まない排気ガスは燃焼には関与しないので、熱容量が増加した効果があり燃焼温度が低下するため、ノッキング防止にも有効である。

ただしターボチャージャ付きエンジンの場合、エンジン入口もしくはターボチャージャのコンプレッサ出口側の圧力は大気圧より高圧なので、大気圧に近いタービン出口側から排気ガスを還流させるべく、EGR率をあまり高くできない。そのため大気圧程度のコンプレッサ入口側にEGRを還流することでEGR率を高めるLPL-EGR (Low Pressure Loop EGR) への対応が必要である（要求⑤）。図3にLPL-EGRのシステム構成図を示す。通常はEGR途中に冷却装置があり、エンジン充填率低下を防止している。

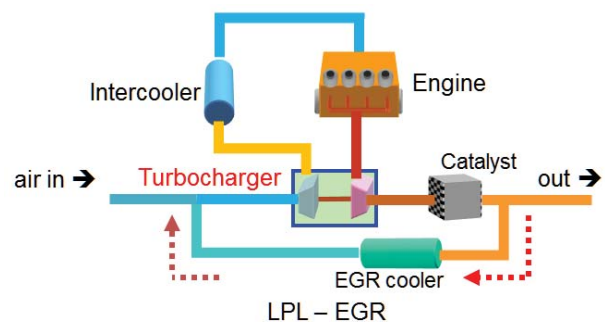


Fig. 3 Schematic diagram of LPL - EGR

2.3.3 ミラーサイクル対応

ガソリンエンジンは以下の4工程（オットーサイクル）を繰り返す。

- 吸気行程
- 圧縮行程
- 燃焼行程
- 排気行程

空気を圧縮する圧縮行程でエネルギーが必要となる。そこで圧縮行程の途中まで吸気弁を開いておき（遅閉じ）、圧縮に要するエネルギーを減らして熱効率を向上させるミラーサイクルの採用例が増えている。または吸気行程の途中で吸気弁を閉じ（早閉じ）、シリンダ内に入る空気量を減少させて同様に圧縮に要するエネルギーを減らす手法もある。いずれの場合でも吸気弁が開いている短時間に必要な空気をシリンダ内に送り込むために、コンプレッサの高圧縮化の要求がある（要求④）。

2.4 ターボチャージャへの要求

排気ガス規制及びエンジンの熱効率向上に向け、ターボチャージャへの要求をまとめると以下になる。

- ①緻密なエンジン制御に対応した空気の供給
- ②早期の触媒活性化
- ③過渡時の特性改善
- ④コンプレッサの高圧縮化
- ⑤LPL-EGRへの対応

上記要求を実現するために、以下のターボチャージャの将来技術を適用するエンジンが多くなっている。それぞれの将来技術の下段に解決可能なエンジンからの要求を示している。

- (1) 可変式タービン
 - ①③④
- (2) 低慣性モーメントホイール
 - ③
- (3) 高圧縮仕様コンプレッサ
 - ④
- (4) LPL-EGR対応表面処理
 - ⑤
- (5) モーター制御式（電制）アクチュエータ
 - ①②③
- (6) 電動コンプレッサ
 - ①③

3. ガソリン乗用車用ターボチャージャの将来技術

3.1 可変式タービン（VG turbine）

ガスタービンやジェットエンジンと異なり、通常の乗用車用ターボチャージャでは、タービン側に静翼に相当する部分がない。これは幅広いエンジンの運転モードに対応するため、W/G（Waste Gate）ポートと呼ばれる排気ガスをバイパスする通路の開閉でターボチャージャの回転数やエンジン出力の制御を行っている。

過渡時の特性改善（③）にはよりエンジン低回転から

十分にターボチャージャを作動させる必要があり、タービン動翼入口側に静翼の可変機構（以降でノズルアッセンブリーと呼称）を有する可変式タービンを採用し、よりスロート面積を絞ることでエンジン低回転での特性を改善できる。図4に概略構造を示す。この可変式タービンは、排気ガス温度が700～850℃と相対的に低いディーゼル用で実用化されてきたが^⑦、材料と構造の最適化によって900℃を超えるガソリン用にも最近では採用できるようになった。特にケーシング（ハウジング）と比較

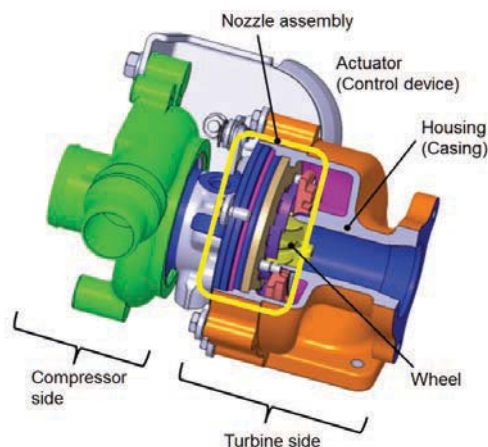
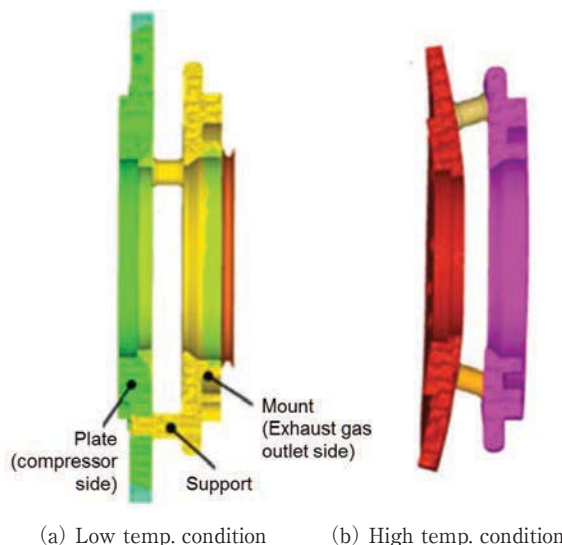
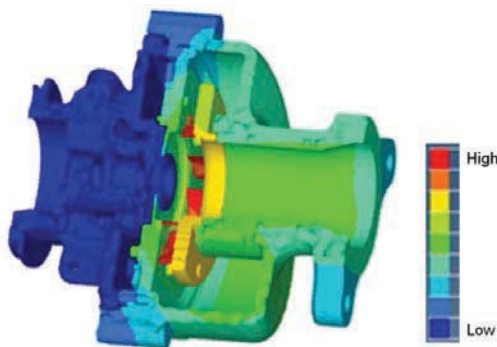


Fig. 4 VG (Variable Geometry) turbine outlook



(a) Low temp. condition (b) High temp. condition



(c) Transient temp. distribution (heat-up)

Fig. 5 Typical deformation condition (FEA result)

して薄肉部材で構成されるノズルアッセンブリーの構成部品の熱容量は小さいので、過渡時等の温度変化が大きい場合にはノズルアッセンブリー内でも温度分布が生じ、短時間内でそれぞれの部品が別々に熱変形する。このような過酷な状態でも問題なく各部品が作動できるように解析によって事前評価を行い、材料・構造を選定している。図5に代表的な解析結果を示す。

3.2 低慣性モーメントホイール

回転体の慣性モーメントを低減することが、過渡時の特性改善(③)のもう一つの方法としてある。タービン動翼の低密度材としてチタンとアルミの合金(TiAl合金)は量産化されているが⁸⁾、減圧吸引法等の特殊製造法が必要なため適用は一部に限定されている。

そのため通常材料(インコネル材)を用いてタービン動翼の形状最適化を検討する場合、通常の遠心(ラジアル)形状ではなく、斜流形状(図6参照)を適用する。これは形式数 k を用いて考えると理解しやすい。形式数は以下のように定義される⁹⁾。

$$k = \omega \times \sqrt{Q} \div W^{3/4}$$

ω : ターボチャージャの角速度

Q : 体積流量

W : 単位流量当たりの仕事量

過渡時の特性が改善されると従来と同一のエンジン回転数時(≒エンジンから排出される排気ガス量)でもターボチャージャの回転数が増加するので形式数が大きくなる、つまり斜流形状または軸流形状が適する。

形式数の分子はタービン動翼を通過する流量、分母は取り出せる仕事量なので見かけの流路幅を広げる必要がある。そのためタービン動翼入口側を削除した形状となり、遠心(ラジアル)形状より慣性モーメントは小さくできる。ただしその分だけ流体と接触する面積が減少するので、タービン動翼の負荷が増加して損失が増加しやすくなるので、ケーシングを含めて翼形状の最適化を行っている。

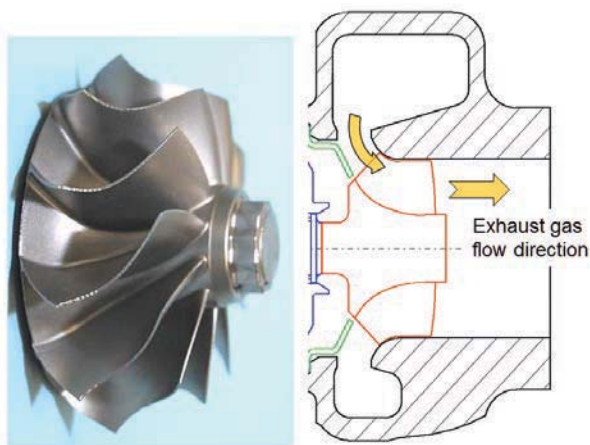


Fig. 6 Mix flow turbine wheel

3.3 高圧縮仕様コンプレッサ

高圧縮仕様(④)になればコンプレッサ翼の負荷が増加するので流動悪化や損失が増加しやすくなる。また過渡時の特性改善(③)にも対応するには低流量時の特性、つまりサージ特性の改善が重要になる。そのため詳細な内部流動を捉えるために大規模非定常解析を行って形状の検討・評価を行う¹⁰⁾。図7に解析結果の一例を示す。

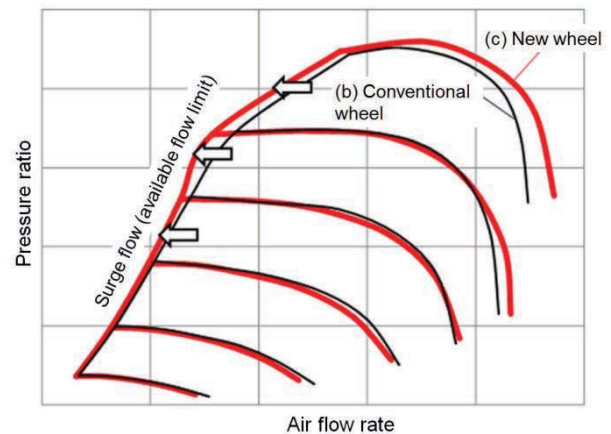
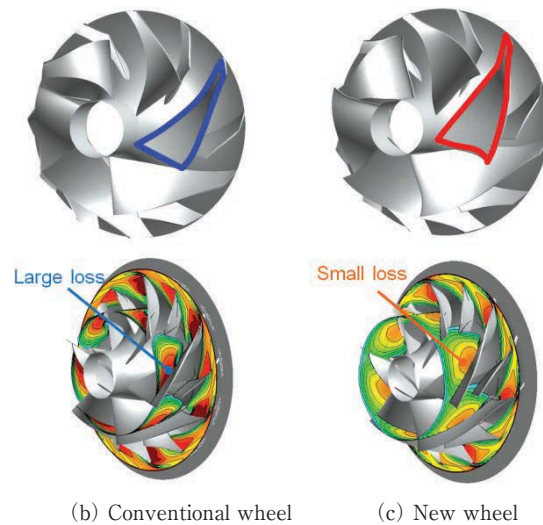
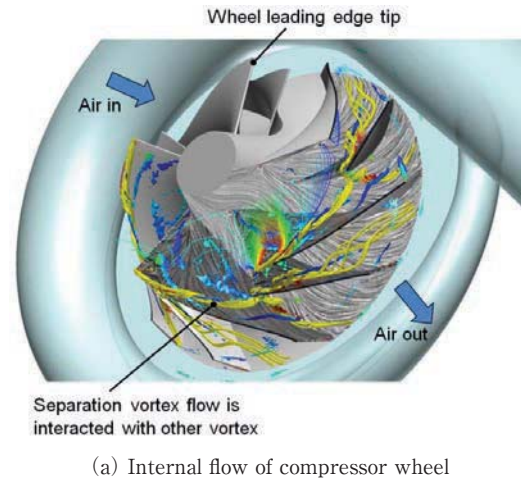


Fig. 7 High pressure compressor wheel result

コンプレッサ翼前縁端部からの剥離渦流れと翼面からの剥離流とが干渉し、大きな内部損失が生じている。(c)に示す翼前縁部の改良を含む改良形状だとこの剥離渦流れが抑制されて内部損失が減少し、結果的に効率向上と高圧縮比を達成している。また高圧縮コンプレッサ翼を駆動するのに十分な仕事量をタービン側で確保するには、可変式タービンだと小型でも対応可能なので有利である。

3.4 LPL-EGR対応表面処理

LPL-EGR (⑤) を採用した場合、還流される排気ガス中に含まれるNO_x等の化学成分によるコンプレッサ側の化学的腐食と凝縮水による物理的摩滅が懸念される。特にコンプレッサ翼は高速で回転しており、凝縮水による物理的摩滅と溶け込んだ化学成分による化学的腐食の複合破壊が懸念されるため、表面にコーティングを適用する。図8にコーティング適用有無による耐久評価試験後の状況比較を示す。コーティング適用により十分な耐久性を確保できている。



(a) No surface coating (b) With surface coating

Fig. 8 Effect of surface coating on compressor wheel

3.5 モーター制御式（電制）アクチュエータ

エンジンの燃焼状態に応じて適切な空気量を供給するためには (①), エンジンECUの指令に対応する必要がある。そのために従来の空気式に代わりモーター制御式（電制）アクチュエータでW/Gポートの開閉やノズルアセンブリの動作を緻密に制御する製品が増加している。

電制アクチュエータを用いることでエンジン始動直後に下流側の三元触媒に排気ガスを意図的にバイパスさせることも可能で、結果的に早期の触媒活性化 (②) を実現できる。同様にエンジン低回転にはコンプレッサ側から取り出せる圧縮圧が低く従来の空気式だと十分な駆動力が確保できない場合もあるが、電制式だとモーターにより十分な駆動力を確保できるので、過渡時の特性改善 (③) も容易に対応できる。

3.6 電動コンプレッサ

これまでの説明では、排気ガスのエネルギーを活用する通常のターボチャージャの新技术について説明してきたが、より高出力化や過渡時の特性改善で更なるエンジン熱効率向上を実現するために、当社では電動コンプレッサを開発中である¹¹⁾。図9にシステム構成図を示す。通常の二段過給式ターボチャージャの高圧側もしくは低圧側ターボチャージャをモーター駆動式の電動コンプレッサに置き換えたシステムである。

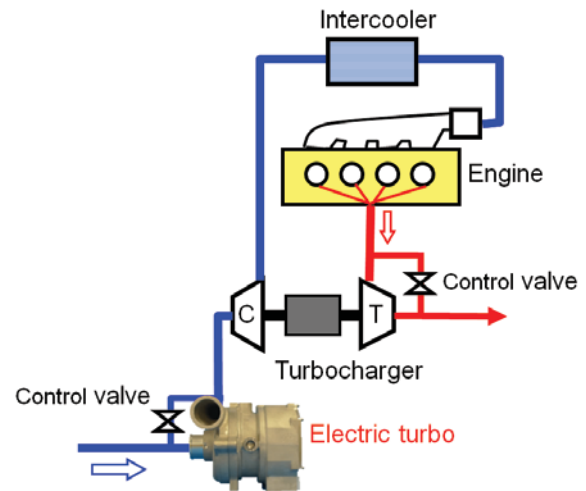


Fig. 9 Schematic diagram of electric turbo (with 2-stage system)

通常の単段ターボチャージャを搭載した1.4Lガソリンエンジンと、排気量を20%削減した1.1Lガソリンエンジンに電動コンプレッサを搭載した場合のエンジンシミュレーションを実施した。結果を図10に示す。同一定常エンジントルクの状態でも、電動コンプレッサシステムは燃費が約8%向上することを確認した。また必要エンジントルクに達する時間も約50%短縮可能なことが確認でき、過渡時の特性も改善 (③) できる。

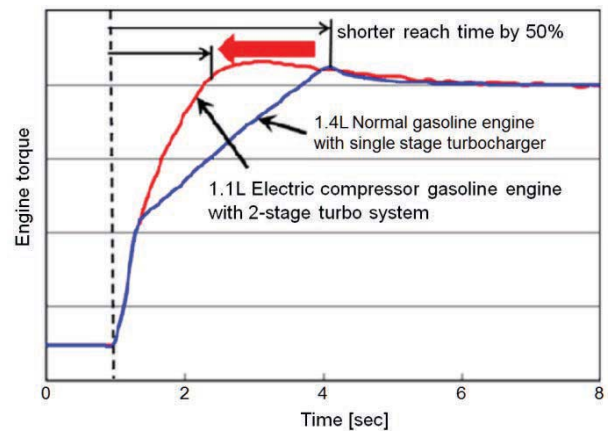


Fig. 10 Effect of Electric compressor

4. まとめ

低炭素社会に向けて通常のエンジンの燃費向上、熱効率向上の要求は強く、ターボチャージャの新技术の開発を引続き進めていく。並行して将来パワートレインのハイブリッド車や電気自動車・燃料電池車に適したターボチャージャもしくは過給システムの開発を継続していく。

参考文献

- (1) 一般社団法人日本自動車工業会 世界生産・販売・保有・輸出
<<http://www.jama.or.jp/world/world/index.html>> (参照日2018年6月20日)。
- (2) 国土交通省 自動車の排出ガス規制 (新車)

- <http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk10_000001.html> (参照日2018年6月20日).
- (3) 国土交通省 乗用車の排出ガス・燃費試験法に国際基準 (WLTP) を導入
<http://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha10_hh_000172.html> (参照日2018年6月20日).
- (4) 環境省 諸外国における車体課税のグリーン化の動向
<https://www.env.go.jp/policy/tax/misc_jokyo/attach/trend.pdf> (参照日2018年6月20日).
- (5) 中島泰夫, 村中重夫, 改訂自動車用ガソリンエンジン, (2004), p. 16, 山海堂.
- (6) 村上正, 常本秀幸, 自動車エンジン工学, (2004), p. 44, 山海堂.
- (7) 大迫雄志, 陣内靖明, 佐俣章, 鈴木浩, 茨木誠一, 林慎之, 自動車用高性能・高信頼性VGターボチャージャの開発, 三菱重工技報, Vol. 43, No. 3 (2006), pp. 31-35.
- (8) 柳禎彦, 鷺見芳紀, 高林宏之, 高温特性に優れたタービンホイール用TiAl合金の開発, 大同特殊鋼技報, Vol. 85 (2014), pp. 121-125.
- (9) 大橋秀雄, 流体機械, (1987), p. 139, 森北出版.
- (10) Tomita, I., Ibaraki, S., Furukawa, M., and Yamada, K., The Effect of Tip Leakage Vortex for Operating Range Enhancement of Centrifugal Compressor, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 135, No.5 (2013), 051020.
- (11) 山下幸生, 茨木誠一, 住田邦夫, 恵比寿幹, 安秉一, 萩田浩司, 自動車用エンジンのダウンサイジングに貢献する電動スーパーチャージャの開発, 三菱重工技報, Vol. 47, No. 4 (2010), pp. 12-17.

特集：最近のガソリンエンジン用過給機の動向

最新の乗用車用過給技術動向

Latest Charging Technology Trend for Passenger Vehicle



馬場 隆弘*1

BAMBA Takahiro

キーワード：WLTC, RDE, ダブルスクロールタービン, 可変容量タービン, 可変コンプレッサ, 電動ターボ
 Key Words: WLTC, RDE, Double Scroll Turbine, Variable Geometry Turbine, Variable compressor, Electric turbocharger

1. 緒言

地球温暖化対策および地域環境保全の観点から、主要市場で車両からの排気ガス規制が年々厳しくなることが予見されている。図1に主要各国のCO₂排出量規制予測を示す。欧州では2021年に、北米では2025年にも100g/kmを切る。排出量そのものの厳格化に加え、CO₂であればより実走行に近付けた世界共通の評価モードWLTC (Worldwide light duty test cycle)、排ガスであれば実走行に相当する排出量を計測するRDE (Real driving emission) が導入される。導入当初は緩和係数 (CF: Conformity factor) による緩和措置が取られるものの段階的に厳格化され、2023年からはCF=1となる。したがって、従来のような低負荷・低エンジン回転数での評価ではなく、エンジン作動域全域で評価されることになる。法規制となる見込みは現時点では小さいが、消費者が気にするのは実燃費であることから、RDEでの燃費評価も必然となると見込まれている。急激な法規制の変化に対応するために、パワートレインの電動化はもはや免れられないトレンドである。しかしながら、最も法規制が進む欧州や中国における劇的な予測であっても2030年にはまだ75%程度の車両が内燃機関を有すると見込まれている⁽³⁾。

高圧縮比・希薄燃焼で作動するディーゼルエンジンはガソリンエンジンよりも高熱効率でCO₂削減の点で有利である。1台当たりの平均CO₂排出量を低減するには有効な手段であるが、RDE下でNO_x排出量制限以下に抑えるためにLNT (Lean NO_x Trap), SCR (Selective Catalytic Reduction), SDPF (Diesel particulate filter with SCR coating) 等が必要になり、非常に高価なものになってしまうため、今後の市場は限定的になると予測

される。したがって、乗用車の内燃機関としては、熱効率に劣るガソリンエンジンをベースに高効率化し、排ガス基準も同時に満たすことが最も現実的となっている。

厳格化されるCO₂排出量および排気ガス規制に対応するために、乗用車メーカー各社は大きく分けて2つの方向性を打ち出している。一つは内燃機関の高効率化であり、もう一つはパワートレインのハイブリッド化である。本稿では、これらの要求に応える過給機の技術動向を論説する。

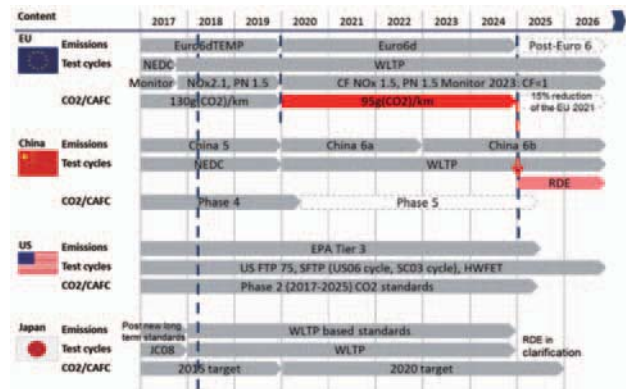


Fig. 1 Emission Regulation Forecast

2. 内燃機関の高効率化と排気ガス対策

2.1 将来規制に対するガソリンエンジンの課題

従来の直噴過給ガソリンエンジンには、排気ガスが顕著に出る運転条件が三つある。図2に一例を示す。エンジン低速からトルク点近傍での掃気 (Scavenging)、定格出力点近くでの触媒容量不足 (Critical catalyst space velocity) およびエンジン保護を目的とした燃料過剰噴射 (Component protection) である。NEDCやJC08といった従来の評価モードでは、エンジンの負荷が比較的小さいところのみを使うためこれらの運転条件を使わず問題にならなかった。しかしながら、ディーゼルゲ

原稿受付 2018年8月22日

* 1 (株)IHI 車両過給機SBU 技術統括センター開発部
 〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番地
 E-mail: takahiro_bamba@ihi.co.jp

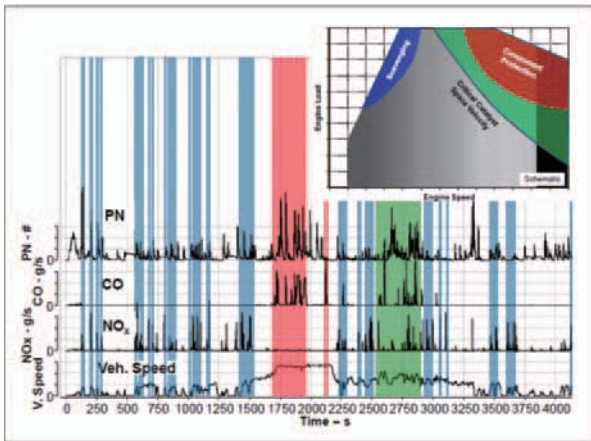


Fig. 2 Emissions of a downsized turbocharged GDI engine in an SUV in RDE⁽¹⁾

トを発端とした排気ガス量の実写上でのリアルタイム計測の普及により、急激に厳格化されてきた規制値に反して実排出量はほとんど減っていないことが明らかになってしまった。モードでの排気ガス量と実排気ガス量の差は、小さいものでも3倍弱ある(図3)。

RDEが適用されることによりこの乖離はほとんど無くなるが、乗用車メーカーは排気ガス排出量が多くなるモードに対して抜本的に対策を取る必要に迫られている。掃気を無くすことは低速トルクや過渡応答性の低下につながる。触媒容量の増加に加え、過給エンジンではPM(粒子状物質)の除去が必要になることからGPF(ガソリン用微粒子フィルタ)の実装が不可欠になり、過給機背圧の増加は避けられない。そのうえで三元触媒を全運転領域で活性化させる必要があるため、全域 $\lambda=1$ (等量比)燃焼を保つことが不可欠になり排温が高温化する傾向にある。これらの制約の中で、ディーゼルエンジンと比較して熱効率に劣るガソリンエンジンを高効率化し、排気ガス規制とCO₂排出量制限の両立をさせる必要が、乗用車メーカーには求められている。

適用が想定される低燃費エンジン技術として、ミラー/アトキンソンサイクル、HCCI(予混合圧縮着火)、大量EGR(排気ガス再循環)などが検討されている。これらの技術は熱効率の向上に寄与するが、総じて比トルクが低くなり、ドライバビリティーの低下を招くという欠点がある。この欠点を補うために、エンジンとしては行き過ぎたダウンサイジング過給エンジンからライトサイジングへのトレンドとなる。過給機は高圧縮比化と特に高圧力比域でのサージ改善が必要となる。また、エンジンの高熱効率化により排気ガスに残されたエネルギーは減る方向にあるため、タービンは高効率化・高出力化が必須となる。

2.2 ダブルスクロールタービン

通常過給機は、定格出力を補うために使用される。しかしエンジン低流量側では、エンジンと過給機の流量特性が合わずターボラグと呼ばれる過渡応答性の悪化に苦しむことがある。コンベンショナルなモノスクロール(Mono scroll)の過給機であっても、IHIが得意とする低慣性モーメントの斜流タービンを最適設計することで過渡応答性をある程度は改善できる⁽⁶⁾。

タービンをマルチエントリー化することも過渡応答性を改善する手段となる。各スクロールの容量を気筒毎の排気脈動に合わせて設計することで脈動を効果的に利用してタービンを回すことができるだけでなく、排気干渉を低減し、エンジンのガス交換を向上させることに寄与する。一般的にはスクロールを軸方向に重ねたツインスクロール(Twin scroll)が採用されてきた。しかしながら、全域 $\lambda=1$ 燃焼を保つことを考えると、100kW/L以上となる高比出力エンジンでは排温が1000℃を超える高温になるため、二つのスクロールを分ける仕切り板の製造性を保ったまま、高温疲労強度を保つ設計をすることが非常に難しい。

ダブルスクロール(Double scroll)と呼ばれるもう一つのマルチエントリータービンがある。概略図を図4に

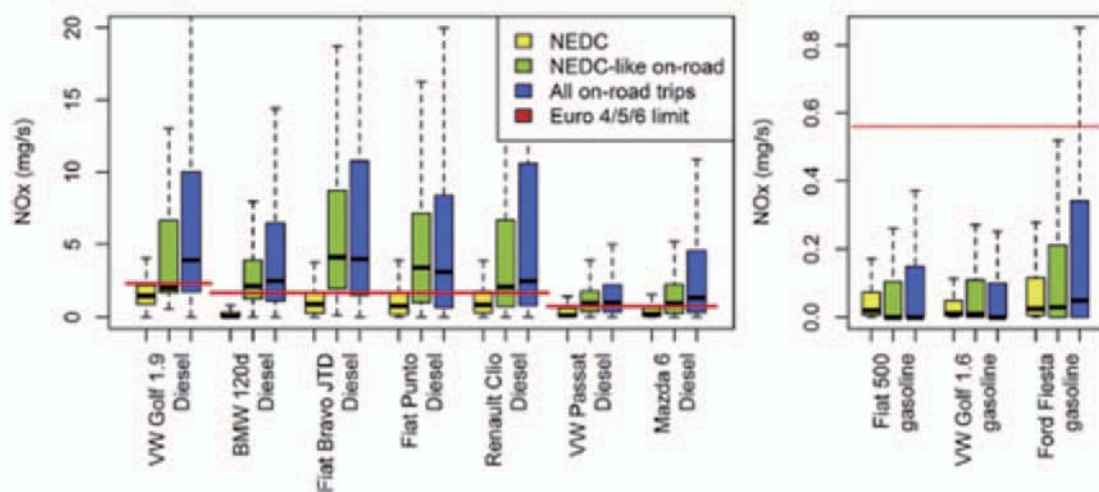
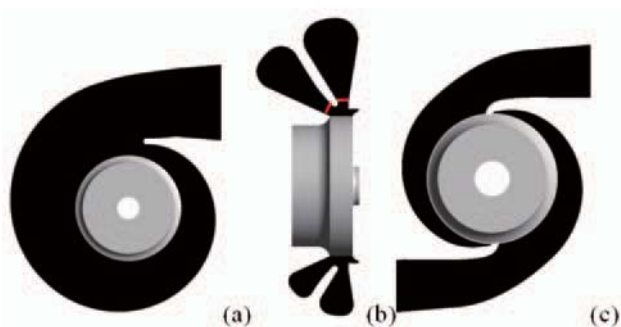


Fig. 3 Time-specific NOx emissions measured over the NEDC, on the road under NEDC-like conditions (green), and on the road as measured with PEMS over all available trips (blue); the red lines represent the applicable emission limits⁽²⁾

Fig. 4 (a) Mono scroll (b) Twin scroll (c) Double scroll⁷⁾

示す。ダブルスクロールタービンは仕切り版がなくなるため、高温化対応がしやすくなると言われている。また、スクロール間を連通する部分が二か所の舌部近傍に限られるため、ツインスクロールよりも排気干渉低減性能に優れる。しかしながらダブルスクロールタービンは船用での適用実績はあるが、乗用車用途ではまだ量産実績はない。その一因として、図5に示すようにエンジン背圧が上がり過ぎてしまい、定格出力にネガが出てしまうことが挙げられる。それを回避するためにはスクロールコネクション (S/C, scroll connection) という二つのスクロールを連通させる機構を設ける必要がある。Walkingshawら⁷⁾はS/Cを適切に設計することで、既存のツインスクロールタービンと同等の定格性能と過渡応答性を保ちながら、排気干渉を低減することができることを示した。すなわち、相応に燃費も低減できることが期待される。ウェイストゲートバルブとS/Cを一体化で

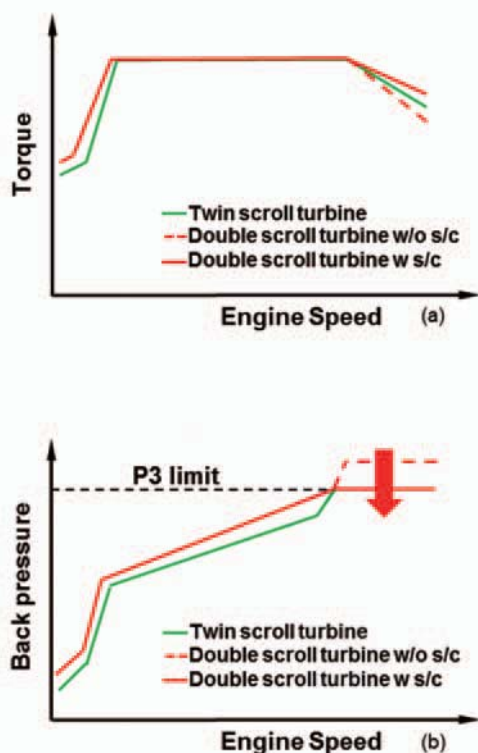


Fig. 5 Schematic of full load (a) torque and (b) engine back pressure with different multi-scroll turbines

きれば、得られる燃費向上効果に対するコストも比較的安く抑えられる。IHIは、ウェイストゲートバルブとS/Cを一体化した形態での開発を進めている。

2.3 高温対応可変容量タービン

VWが2016年に高温対応可変容量タービンを搭載したガソリンエンジンを発表⁹⁾して以来、次世代の過給パワートレインとして脚光を浴びている。可変容量タービン自体はディーゼルエンジンにとって不可欠な技術であるが、排温が200℃程度上がるガソリンエンジン向けには、設計技術の困難さから適用が阻まれてきた。

Aymannsら⁴⁾やGlahnら⁵⁾などの最近の論文にあるように、その流れを変えたのはミラーサイクルとの相性である。ミラーサイクルは、吸気弁の遅閉じ・早閉じに関わらず、比較的単純なシステムかつ低コストで、燃費向上に貢献する手段として主流となりつつある。ミラー化により、エンジンの幾何的な圧縮比を大きく取りつつも実質的な圧縮比を低下させることで、空気流量当たりの膨張仕事をより多く取り出せるうえ、燃焼温度および排温の低減させることができる。この効果により、ミラータイミングの度合にも寄るが、全域 $\lambda=1$ を保ったとしても、90kW/L程度の比出力であれば排温を980℃程度に抑えることができる。

一方でミラー化はエンジンの容積効率を低下させるため、同じ定格出力を保つには過給を強化する必要がある。すなわち、コンプレッサの圧縮比を低速トルクの小空気流量域から定格出力の大流量域まで高く保つ必要がある。コンプレッサの駆動動力は従って大きくなり、低速トルクと定格出力での背圧制限を同時に満たすためには、ワイドレンジに渡って高い動力を取り出すことができる可変容量タービンが非常に魅力的な手段となる。

IHIはVGS (Variable Geometry System) と呼ぶ、低速トルクから定格出力まで高効率かつ開度マージンを十分に持った、低慣性モーメントかつワイドレンジな可変容量タービンをガソリンエンジン用に開発した⁶⁾。IHI内製の最適化ツールを駆使し、空力性能に加え許容回転数と低慣性モーメントを両立させるVGSタービンを開発することに成功した。既に950℃までの機種開発は完了しており、980℃での検証も完了する見込みである。さらなる高温化への開発も並行して進めている。非常にワイドレンジで高効率なコンプレッサと組み合わせることで、IHIはミラーサイクルを適用したガソリンエンジンの性能を最大限に引き出す解を提供する準備が整った。

2.4 可変コンプレッサ

ミラーサイクルを適用した場合、過給機のコンプレッサには高圧力比化およびワイドレンジ化が求められることは、既に上述した。特にサージ側の作動域を拡大し、同時に効率を高く保つことが求められるが、単段のコンプレッサには非常に難しい要求である。

サージ側のレンジを確保し、効率を向上させる手段の一つとして可変コンプレッサがある。産業用などではコ

ンプレッサの負荷変動を制御するためにVIGV（可変インレットガイドベーン）を適用するケースが多いが、機構が複雑なうえ、車両用の小型コンプレッサではVIGVの圧損低減が難しく採用されることがない。近年ではGrigoriadisら¹⁰⁾がVTC（Variable trim compressor）と呼ばれる、吸込流路を一部ブロックするような可変機構を提案し注目を集めた。

IHIはインレットを主流とバイパス流路を持ち、バイパス流路を開閉するシャッターを設けることで、同様の効果を得る可変コンプレッサを提案した⁸⁾。試作機を図6に、性能変化を図7に示す。サージ側の作動領域は元のサージ流量に対して30%以上拡大し、元のサージ流量点での効率率は最大で6.5%pts向上した。現在はコンパクト・軽量化を進めている。



Fig. 6 Prototype of variable compressor from IHI

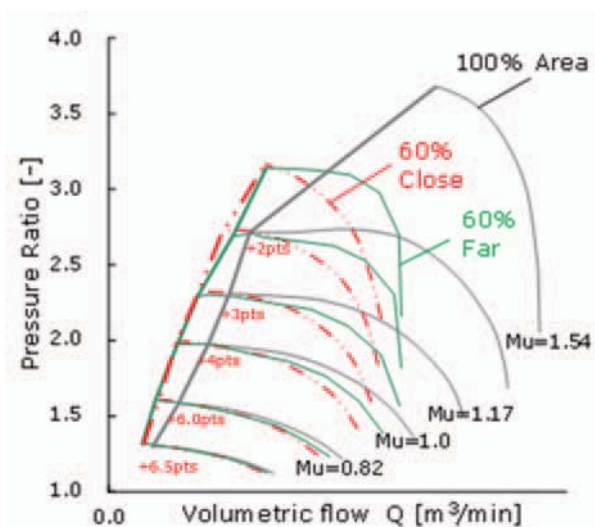


Fig. 7 Performance improvement by IHI variable compressor

3. パワートレインおよび過給機の電動化

3.1 電装系の48V化

乗用車に要求されるCO₂排出量規制は2021年に95g/kmまで強化され、さらなる規制強化の動きは必至である。自動車メーカーとしては、販売台数の大半を占める内燃機関エンジンを搭載した車両の燃費向上を迫られており、2025年以降、内燃機関のみのパワートレインは激減し、何かしらの電動化が進むと見られている。最低限のコストでCO₂排出量規制に対応するために、欧州の乗

用車メーカーを中心に48V電源システムを搭載したマイルドハイブリッドの開発が活況を呈してきている。48V電源システムは、ストロングハイブリッド自動車のようにドライブシャフトを直接駆動するほどの電力は生み出せないが、従来の12V電源システムよりも数倍の電力を生み出すことができる。

3.2 電動ターボ

48V電源システムを背景に、従来の過給機に加え電動ターボを配して、過給システムを多段化する動きがある。排気エネルギーがわずかであるエンジン低速域でも、モーターによりコンプレッサを駆動して、圧縮空気をエンジンに強制的に送り込むことができるため、エンジン低速域でのトルクの向上およびターボラグの解消が期待できる（図8）。すなわち電動ターボは、比トルクが小さいミラーサイクルや大量EGRなど低燃費エンジン技術の足りない点を補うのに適したソリューションの一つであると言える。2016年にAudiが電動ターボを搭載したV8ディーゼルエンジンを発表¹¹⁾して以来、既に一部の車種に搭載され始めている。

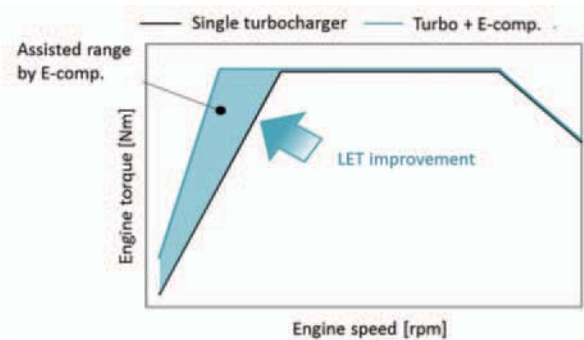


Fig. 8 Performance benefit from 2-stage charging

IHIは過渡応答性を重視し、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）製のコンプレッサホイールを特徴とした低慣性モーメントの電動ターボを開発している。外観図を図9に、CFRP製コンプレッサホイールを図10に示す。高効率な永久磁石モーターを採用し、過給に必要な電力を可能な限り節約している。コンプレッサホイールは、エンジニアリングプラスチックであるPEEKに炭素繊維



Fig. 9 E-compressor from IHI



Fig. 10 CFRP compressor wheel

を配合し、射出成形のみで製作する。製造性を考慮し極端なバックワードは付けない設計としている。近年中に試作ラインを整備し、量産開始も視野にに向け生産体制も整え始めている。

4. まとめ

今後ますます厳格化される排気ガス・燃費規制に対応するうえでパワートレインの電動化は避けられない。しかし、一気にEV（電気自動車）シフトが起こるとは考えにくく、大部分の乗用車用パワートレインには当面内燃機関が併用される。そういった環境を背景に、将来主流を占めるであろうエンジン技術を俯瞰し、IHIが最適であるとする過給技術の開発動向を紹介した。IHIの得意とする「ものづくり力」で、低炭素社会に向けた乗用車の低燃費化と低排気ガス化に貢献できる製品の開発を続けていく。

参考文献

- (1) Kapus, P. and Brunner, M., China - Ready: Is the Global Technology Toolkit Sufficient for China?, 28th International AVL Conference Engine and Environment 2016 (2016).
- (2) O' Driscoll, R., ApSimon, H. M., Oxley, T., Molden, N., Stettler, M. E. J. and Thiyagarajah, A., A Portable Emissions Measurement System (PEMS) study of NOx and primary NO2 emissions from Euro 6 diesel passenger cars and comparison with COPERT emission factors, Atmospheric Environment 145 (2016) pp. 81-91.
- (3) Scharf, J., Ogrzewalla, J., Wolff, K., Uhlmann, T., Thewes, M., Balazs, A., Grzeschik, P., Görgen, M., Yadla, S., Baumgarten, H., Wittler, M. and Nebbia, C., Gasoline Engines for Hybrid Powertrains - High Tech or Low Cost?, 38th International Vienna Motor Symposium (2017).
- (4) Aymanns, R., Xia, F., Franzke, B., Lückmann, D., Uhlmann, T., Höpke, B., Tharmakulasingam, R., Combining Miller Cycle and VTG - A promising concept for future gasoline engines?, 21st Supercharging Conference 2016 in Dresden (2016).
- (5) Glahn, C., Kluin, M., Hermann, I. and Königstein, A., 980°C Gasoline Variable Turbine Geometry - The Affordable Upcoming Technology for High-Volume Efficient Engines, 26th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology (2017), pp. 469-487.
- (6) Starke, A., Leonard, T., DeSantis, R. and Filsinger, D., The Evolution of Mixed Flow Turbochargers from IHI, 22nd Supercharging Conference 2017 in Dresden (2017).
- (7) Walkingshaw, J., Iosifidis, G., Scheuermann, T., Filsinger, D. and Ikeya, N., A Comparison of a Mono, Twin and Double Scroll Turbine for Automotive Applications, Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2015-43240 (2015).
- (8) Fujiwara, T., Bamba, T., Numakura, R., Sasaki, Y. and Yokoyama, Y., Variable geometry compressor development to improve operating range and efficiency for automotive turbocharger, Proceedings of the 13th International conference on Turbochargers and Turbocharging, IMechE, London (2018) pp. 57-69.
- (9) Eichler, F., Demmelbauer-Ebner, W., Theobald, J., Stiebels, B., Hoffmeyer, H. and Kreft, M., The New EA211 TSI® evo from Volkswagen, 37th International Vienna Motor Symposium (2016).
- (10) Grigoriadis, P., Muller, S., Benz, A., Sens, M., Variable trim compressor - a new approach to variable compressor geometry, IMechE 10th International Conference on Turbochargers and Turbocharging, London, UK (2012).
- (11) Heiduk, T., Weiß, U., Fröhlich, A., Helbig, J., Zülch, S. and Lorenz, S., The new Audi V8 TDI engine, 37th International Vienna Motor Symposium (2016).

特集：最近のガソリンエンジン用過給機の動向

ガソリンエンジンの技術動向と過給機への要求性能

Technology Trends of Gasoline Engine and Performance Requirement for Turbochargers



坂井 敏之*¹
SAKAI Toshiyuki

キーワード：過給機，過給エンジン，ダウンサイジング，コンプレッサ，タービン，熱効率

Key Words：Turbocharger, Charged engine, Downsizing, Compressor, Turbine, Thermal efficiency

1. はじめに

乗用車用ガソリンエンジンにおいて、ダウンサイジング過給コンセプトによる燃費向上技術が欧州OEMから普及し、現在ではガソリンエンジンにおいてスタンダードな技術となった。ダウンサイジング過給コンセプトは燃料直噴技術と組み合わせたエンジンの高圧縮比化を軸に、小排気量化と低回転化によるフリクション低減と合わせて燃費向上に寄与する技術であり、車両性能としても文字通り軽量、コンパクトなパワートレインによる運動性能向上やパッケージング向上が実現される。また、今後想定される燃費・エミッション規制に対しても、走行性能を犠牲にすることなく解決する手段の一つであると考えられる。近年のガソリンエンジン用過給機においては、このエンジンコンセプトへの対応として、高効率化、高応答化、高耐熱化などの開発が進み、エンジンの高出力、高応答を実現するべく進化が続いている。年々、空力効率の向上とインペライナーシャ低減は進み、ダウンサイジング過給エンジンの導入時期と比較しても大幅な性能向上が実現された。これら過給機の進化は更なるエンジン性能向上と走りの商品魅力向上に寄与している。今後もエンジンコンセプトの進化とともに過給機が開発が進められていくことが期待される。

過給システムとしては、エンジンの比出力、応答性の向上を目的に、可変性、複合化、電動化など多岐に渡るシステムの開発が進んでいる。ディーゼル過給エンジンでは、エンジン運転条件に応じてタービンノズルの流路面積を変化させる可変ジオメトリタービンや、複数の過給機を組み合わせる複合化技術がすでに普及している。ガソリン過給エンジンに対しても、これらの可変性、複合化等の技術は、応答性能の向上など商品魅力に大きく寄与する技術である。しかし、高回転高負荷における排

気ガス温度の高い運転領域への対応やシステムの複雑化によるコストの増加、燃焼室から触媒までの熱ロス増加による触媒早期暖機性能の低下などの課題があり、可変性、複合化等の適用例は少ない。

Hondaにおいては、走りと燃費を両立する技術であるEARTH DREAMS TECHNOLOGYシリーズの一環として、VTEC TURBOエンジンを展開⁽¹⁾⁻⁽³⁾している。図1は自然吸気エンジンに対するVTEC TURBOエンジンのラインナップと位置づけを示したものである。

本稿では、ガソリン過給エンジンと過給機への適用技術、過給機研究結果を踏まえ、将来要求される過給機性能についての考察を紹介する。



Fig. 1 EARTH DREAMS TECHNOLOGY

2. VTEC TURBOエンジン

2.1 開発の狙いと主要諸元

Hondaでは、環境性能と運転する楽しさの両立を目指し、世界戦略エンジンとして開発した直噴過給エンジンであるVTEC TURBOエンジンをラインナップしている。エンジン全体の共通の技術として高タンブル吸気ポートと吸気および排気カムシャフトに装備されるDual-VTC (Dual Valve Timing Control)、マルチホールサイド直噴インジェクタと電動W/G (Wastegate) 付きシングルスクロール過給機を適用した。欧州、北米向けに展開し

原稿受付 2018年7月20日

*1 (株)本田技術研究所 四輪R&Dセンター
〒321-3393 芳賀郡芳賀町下高根沢4630番地
E-mail: Toshiyuki_Sakai@n.t.rd.honda.co.jp

ている1.0/1.5/2.0Lエンジンの主要諸元を表1に示す。

出力と燃費性能両立の観点から、圧縮比は10前後を想定、エンジン熱効率は最大38%を達成している。低速トルクと高出力の両立という走りからの要求に対して、シングルスクロール過給機の採用にて実現している。エンジンの比出力は94kW/L以上となり、BMEP (Brake Mean Effective Pressure) は2000kPa以上をワイドレンジで実現している。これらの目標を実現した過給技術について紹介する。

Table 1 Engine and Turbocharger specifications

Engine	P10A	L15B	K20C
Displacement (cm ³)	988	1496	1996
Cylinder configuration	In-line 3-cylinder	In-line 4-cylinder	In-line 4-cylinder
Maximum Power (kW/rpm)	95/5500	143/6000	188/6500
Maximum Torque (Nm/rpm)	200/2250	260/1600-5000	370/1500-4000
Compression ratio (-)	10	10.3	9.8
Bore (mm)	73	73	86
Stroke (mm)	78.7	89.4	85.9
Valve train	DOHC In-Ex VTC		
Turbocharger type	Single scroll turbocharger		
W/G type	Electric W/G actuator		
Exhaust gas temperature (°C)	Maximum 950		
Turbine housing material	DIN1.4837		

2.2 過給機適用技術について (共通技術)

2.2.1 シングルスクロール過給機

目標とする出力、燃費、コストが高次元でバランスする最適諸元を検討した結果、シングルスクロール過給機を採用した。エンジン目標性能から要求される効率、流量レンジを満足させつつ極力小型のタービン/コンプレッサホイールを適用することで低回転からの高トルクと高応答性を達成した。エンジンの性能検討においては一次元シミュレーションを用いて定常性能および過渡応答性能の評価を実施した。

過給機仕様については、特に低回転領域のトルク向上と最大出力の確保に主眼をおき、コンプレッサについては流量特性のワイドレンジ化、および高効率な特性が要求される。また、サージマージンやインペラ限界回転数に対する設定は、高地、極低温、高温環境下での使用を考慮する必要がある。

Hondaでは、過給機単体性能計測ベンチを稼働しており、一般的な過給機性能評価試験に加えて以下の2項目について評価を実施している。

1) タービン性能のワイドレンジ計測

過渡応答性能評価にあたっては、CCLU (Compressor

Closed Loop Unit) を用いたタービン性能のワイドレンジ計測を実施し、得られたBSR (Blade Speed Ratio) 特性を踏まえた一次元シミュレーションを実施する。通常の計測範囲ではタービン性能の多くの領域が外挿による予測効率となるが、本計測によりタービン性能評価ポイントを増やすことで外挿範囲の縮小と精度の向上を実現し、より高精度な過渡応答性能予測が可能となった。

2) 吸気系部品を装着したサージライン評価

コンプレッササージによるコンプレッサ破損回避、およびコンプレッササージ音に対してはサージ領域の改善が必要とされる。コンプレッサの流量特性については入口流路の形状により変化することが知られており、同一のインペラにおいても入口流路形状の差異によって10%程度サージラインの変化が生じる。入口流路影響によるサージラインの変化の一例を図2に示す。

自社テスト設備において、コンプレッサ前の吸気系部品を装着してサージラインの検証を実施することで、吸気系部品を最適設計することが可能となり、サージ領域の改善と高流量側のチョーク影響を最小限とすることができる。図3は吸気系部品を装着した過給機単体試験の状態を示したものである。

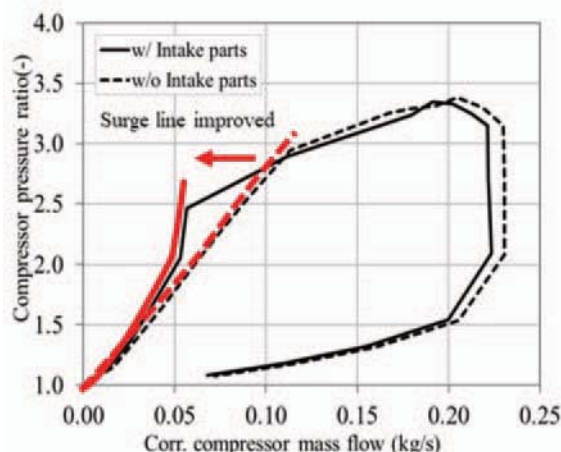


Fig. 2 Compressor flow character comparison of results w/ and w/o intake parts

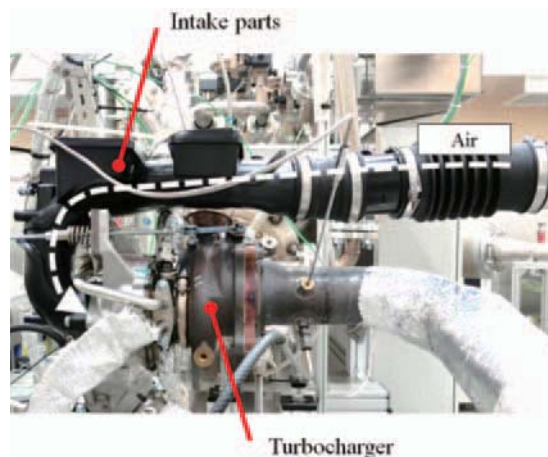


Fig. 3 Turbocharger performance measurement with intake parts

2.2.2 電動W/Gの採用

電動W/Gの採用により、最適な過給圧制御が可能となる。図4に過給機の外観を示す。エンジンのスロットリングによる低負荷領域はW/Gバルブを開いてタービン仕事を抑制し、排気のポンピングロス低減することで燃費を改善している。また、電子制御の吸気スロットルとW/Gバルブ開度の協調制御により、車両要求トルクに対して最適な開度設定を実現し、目標とした過渡応答性能を達成した。

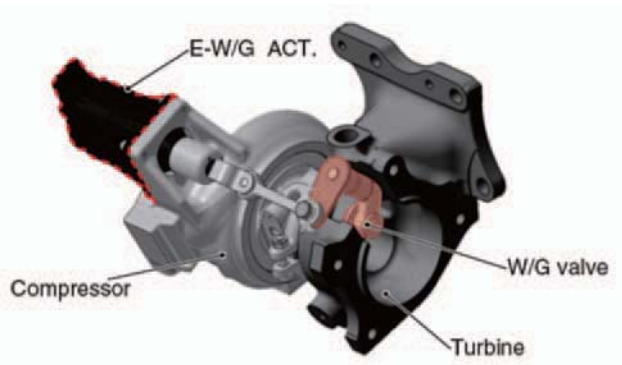


Fig. 4 Turbocharger assembly

2.2.3 タービン高耐熱対応

エキゾーストマニホールド一体のシリンダヘッドによる高効率な排気ガス冷却と高耐熱ステンレス鋼製タービンハウジングを採用し、タービン入口排気ガス温度950℃に対応可能な仕様を確立した。これにより燃料噴射増量による排気系部品の保護領域を減らし、高回転高負荷領域での燃費を改善している。

タービンハウジングは耐熱性の高いオーステナイトステンレス鋼を採用するが、耐熱温度を高めるためには高コストなNiの含有比を高めてゆく必要がある。代表的な耐熱鋼のNi含有量を表2に示す。また、亀裂の進展を抑止するため、肉盛りによる対策を講じることで生じる重量増加が懸案となる。これらの課題に対し、コスト・ウェイトバランスを最適化するため、亀裂進展の予測に基づく最適形状をシミュレートし、実機エンジンを

用いた熱疲労解析との連動によって、タービンハウジングの軽量化と信頼性確保の両立フローを実現した。

Table 2 Turbine housing material specifications

Turbine housing material	Nickel content (%)	Limit temperature (°C)
DIN1.4837	11-14	-950
DIN1.4848	19-22	-1020
DIN1.4849	36-39	-1050

3. 将来技術と要求される過給機性能

3.1 ガソリンエンジンの動向

図5にIEAによる乗用車用パワートレイン市場保有台数割合予測⁴⁾を示す。車両電動化が進む中、2016年の調査によるとプラグインハイブリッド車を含めた内燃機関(ICE: Internal Combustion Engine)搭載車両の数は2040年まで増加するとの予測がなされている。このことから、乗用車の電動化が進む今後においても、内燃機関の進化は必要不可欠であり技術開発が重要である。

3.2 熱効率向上に向けて

ガソリン過給エンジンの更なる熱効率向上に向けてはさまざまな取組みがなされているが、代表的なアプローチとして高圧縮比化があげられる。高圧縮比化で課題となるノッキングに対して、EGR (Exhaust Gas Recirculation) 導入やIVC (Intake Valve Close) タイミングの進角/遅角により実効圧縮比を下げ、燃焼室圧縮端温度を低下させるミラーサイクルコンセプトが有効である。

高圧縮比、EGR導入運転で課題となるのが、必要空気量を確保するための過給仕事の増加である。EGR導入やIVCタイミングの進角/遅角により、同一吸気圧条件下での吸入空気量が低下するため、要求空気量を確保するためには同一エンジン負荷においてより高い過給圧が必要となる。低負荷域から過給仕事が必要となるため、可変ジオメトリタービンや複合化、電動コンプレッサの適用が有効な手段となりうる。これら技術は、応答性の改善手法として従来から研究が進められているが、熱効

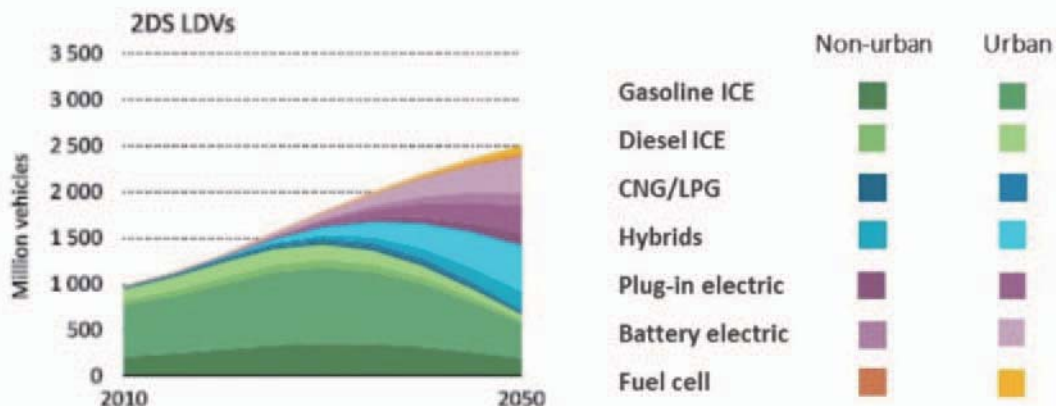


Fig. 5 Urban and non-urban vehicle stocks scenario (2DS: 2°C scenario)

率向上を実現するための手段としても有効であり、更なる技術開発、コストの低減が期待される。

コンプレッサおよびタービンの作動領域については、従来のガソリン過給エンジンの作動領域から大きく変化する。最大出力点でのコンプレッサ圧力比は従来の2.5程度から船舶用やディーゼル過給エンジンで適用している圧力比3-4程度が必要となり、タービンについては大幅な高効率化、もしくは複合化や可変化による低流量域の高膨張比化が必要となる。これは、ガソリンエンジン過給機とディーゼルエンジン過給機の特徴がより近くなることを示している。

Hondaでのエンジン研究⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾から熱効率向上に向けた過給機への要求を考察する。この研究では、低速域の最大熱効率と高回転後負荷までのエンジン全運転領域をカバーするために複合過給システムを前提としている。シングル過給と複合過給を比較したシステム図を図6に示す。

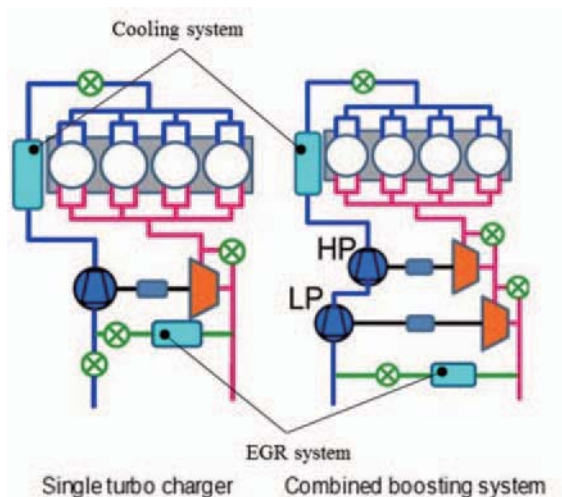


Fig. 6 The comparison of boosting system

図7にエンジン回転数2000rpm, BMEP800kPa, MBT (Minimum spark advance for the Best Torque) 時における、EGR割合と過給圧に対するエンジン最大熱効率のシミュレーション結果を示す。従来のガソリン過給エンジンではスロットリング領域である回転数、負荷条件において過給仕事が必要となり、圧縮比が17(同図(b))から15(同図(a))に低下すると必要過給圧は50kPa以上高くなる。エンジン開発において、出力要求が高いほど高圧縮比は難しくなることから、エンジン熱効率向上のためには研究結果以上の過給圧が要求されると考えられる。

前述の最大熱効率向上と出力両立の研究は複合過給機を前提としたが、過給機単体空力性能改善での対応としては、シングルスクロールでのタービン効率向上の観点で研究⁽⁸⁾を行った。産業用過給機で用いられる、固定ノズルとラジアルタービンの組み合わせによるタービン効率の向上を目指しており、流量特性を悪化させることな

く最大で2ptのタービン効率向上が得られた。図8は固定ノズル付きラジアルタービンの概観を示す。固定ノズルの場合は可変ジオメトリタービンに対して、クリアランス設定による効率低下を最小化することが可能となり、ノズルによる最適流入角度の空力性能向上効果を最大限に得ることができる。大幅なコスト増となる複合過給システムに対して、低流量側もしくは高流量側などどちらか一方のエンジン運転ポイントに合わせた設計を行うことで、低コストでのエンジン性能向上が期待できる。

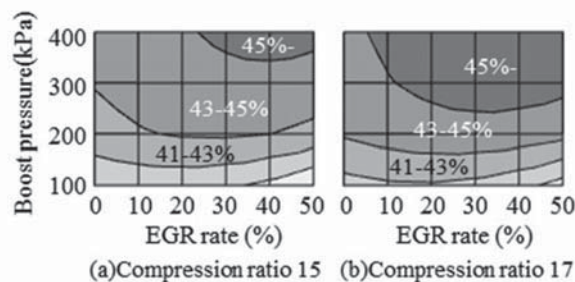


Fig. 7 Estimated result of brake thermal efficiency at engine speed = 2000rpm, MBT.

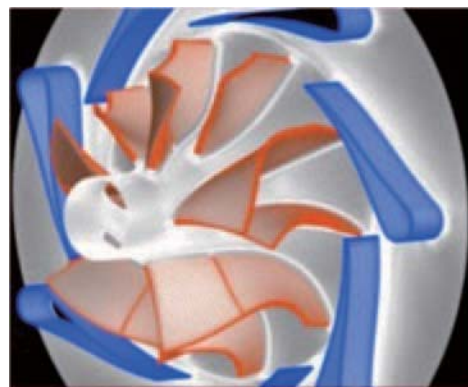


Fig. 8 Radial turbine with nozzle vane

3.3 エミッション法規制への対応

ガソリン過給エンジンの課題として、熱効率向上と合わせてエミッション低減要求がある。欧州、北米をはじめとする先進国では2020年から2025年にかけてエミッション規制が強化される。図9に各国のエミッション規制タイミングを示す。

従来評価モードに対して、新規制での特徴としては、表3に示すように、市街地、郊外、高速走行などの走行シーンを取り込んだRDE (Real Driving Emissions) モードの導入があげられる。RDEモードにおいてはエンジン運転時におけるあらゆるシーンでクリーンな排気エミッションが求められる。また、従来の台上試験ではなく実際の市街地走行にて車両にPEMS (Portable Emission Measurement Systems) と呼ばれるオンボード計測器を取り付けて計測されることも大きな変化点である。RDEモードによる評価は、従来の台上モード計

測手法に対して、ユーザーの運転条件に近い試験法として位置づけられ、エンジン作動点はより高負荷、高回転領域に範囲が拡大される。従来評価モードであるWLTC (Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle) モードとの比較においては、図10に示すように要求加速度が高くなるため、エンジンへの要求負荷は増加する。

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
US								SULEV30	
China	CN4		CN6b		CN6a		CN6b(RDE)		
EU	EURO6-d temp.			EURO6-d(RDE)					
India	BS-VI		BS-VI step1			BS-VI step2(RDE)			

Fig. 9 Emission regulations

Table 3 RDE conditions

	City	Rural	Motorway
Speed (km/h)	-60	60-90	90-115
Distance (km)	16-	16-	16-
Percentage of the total distance (%)	29-44	33±10	33±10
Total Time (min)	90-120		
Ambient conditions	Temperature: 3 to 30(°C) Altitude: -700 (m) Delta Altitude(Start to Finish): -100(m)		
Other conditions	City: Vehicle stop percentage 6-30(%) Highway:100(km/h)-, 5 (min)-		

以上のことから、ガソリン過給エンジンにおいてはより高負荷、高回転領域でのクリーンなエミッション性能が要求され、GPF (Gasoline Particulate Filter) など排気ガス規制対応部品の装着や全エンジン運転領域においてストイキメトリ (理論空燃比) 燃焼での運転への対応が必要となる。GPF装着については作動点の変化に適した流量特性設定にて対応が進むと考えるが、ストイキメトリ燃焼運転領域の拡大については燃料増量による排気温度低減が困難となることから、より高排気温度に対応したシステムの開発が必要となる。図11はモード走行時のエンジン作動点範囲と従来の燃料増量による排気系保護領域のイメージを示す。RDEモードで想定されるエンジン運転領域全域でエミッション低減を実現するためには排気系保護領域の縮小が必要であることがわかる。

過給機においては、VTEC TURBOエンジンで採用されている950°C高耐熱のタービンホイールおよびタービンハウジングに対して、より高温環境下での耐熱性能が要求される。排気ガス温度1050°Cを想定した開発は完了しているが、現在までの適用は一部にとどまっている。今後は、水冷エキゾーストマニホールド化によるタービン入口温度低減や、船舶および一部の乗用車でも適用されている水冷タービンハウジング技術による鋳鋼ステン

レス材以外を用いた高耐熱化対応が予想される。排気ガス冷却による高耐熱化対応は材料置換に頼らない一方、エンジン始動直後の触媒早期暖機性能や低負荷領域での過給エネルギーロスにつながるなどの課題が生じる。

可変ジオメトリタービンにおいては低速、高速両領域でのタービン流量特性の持ち分けが可能であり、低速域の過給仕事を維持したうえで、高速領域では排気ポンピング低減と合わせてシングルスクロール過給機に対して出力向上を図ることが可能である。現在、可変ジオメトリ機構はディーゼルエンジンの排気ガス温度880°C程度の環境下では信頼性確立が出来ている。今後はガソリンエンジンに合わせた950°C、もしくはそれ以上の排気ガス温度に耐えられる可変機構の開発が進められることが期待される。

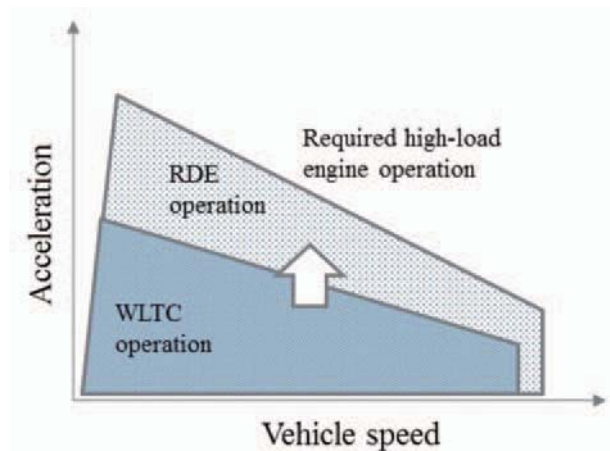


Fig. 10 Comparison vehicle speed and acceleration

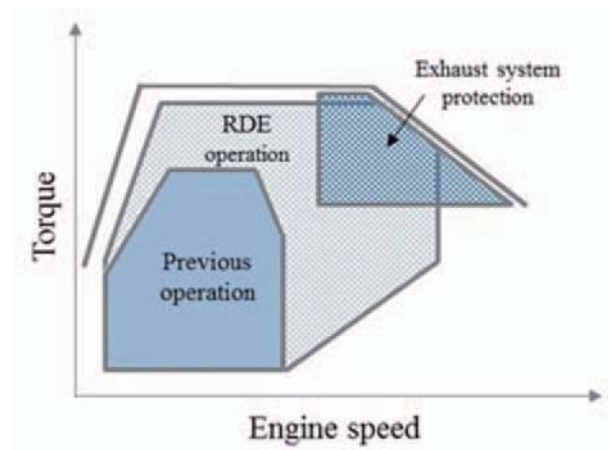


Fig. 11 Engine operation for exhaust system protection

4. まとめ

ガソリンエンジン進化に対応するための過給機への要求は、高効率化、高圧力比ワイドレンジ化、可変ジオメトリ機構を含めた高耐熱化という従来からの普遍的なテーマの更なる進化が期待され、具体的には以下の2点があげられる。

(1)熱効率向上に向け、従来は非過給域であった、低回転、

低負荷領域に対応した過給システム

(2) エミッション規制に対応するため、燃料増量による排気系部品保護を必要としない、高耐熱タービンシステム

エンジン開発における過給機選定においては、一次元シミュレーションの活用が前提であり、新たなエンジンコンセプトを容易に机上検討できる環境が整っている。現存する過給機性能をもとに流量、効率特性をパラメータスタディすることで比出力、熱効率向上への可能性は日々研究されており、過給機への要求もさらに詳細化されると考える。

自動車産業においては、電動化、電動車両の普及など新たな価値への転換期を迎えているが、内燃機関の搭載車両増加も見込まれることから環境負荷低減のための進化は必要不可欠である。お客様へ環境性能と走る喜びを提供するため、過給システムと合わせてエンジンの研究が必要と考える。

参考文献

- (1) 前山一樹, 小松弘崇, 浅利大, 町田菜穂子, 寺尾朗, 吉尾悠, 柴田光弘, 新型1.0L直列3気筒ガソリン直噴過給ダウンサイジングエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 29, No. 1 (2017), pp. 1-9.
- (2) 中野弘二, 和田裕介, 城野実考, 成廣繁, 新型直列4気筒ガソリン直噴過給ダウンサイジングエンジン, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1 (2016), pp. 133-139.
- (3) 舟根匠, 古俣誠二, 柿沼隆, 都知木博一, 新型NSX用3.5LV型6気筒過給エンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 29, No. 2 (2017), pp. 19-27.
- (4) International Energy Agency: Part2 Towards Sustainable Urban Energy Systems, Chapter 5 Sustainable Urban Transport, Energy Technology Perspective 2016, p. 236.
- (5) Kenichiro Ikeya, Masanobu Takazawa, Taketo Yamada, Shinrak Park, Ryutaro Tagishi, Thermal Efficiency Enhancement of a Gasoline Engine, 2015 SAE International, 2015-01-1263 (2015).
- (6) 田岸龍太郎, 池谷健一郎, 高沢正信, 山田健人, ガソリンエンジンの正味熱効率45%達成技術, Honda R&D Technical Review, Vol. 27, No. 2 (2015), pp. 1-10.
- (7) 高橋のぶ, 高熱効率ガソリンエンジンの進化としてのダウンサイジング, Honda R&D Technical Review, Vol. 27, No. 2 (2015), pp. 11-19.
- (8) 久野直樹, 伊藤直紀, 朴辰洛, 傾斜角度を持つスプリッタつきラジアルタービンの研究開発, 第44回日本ガスタービン学会定期公演会論文集, (2016), pp. 37-42.

動翼シュラウド漏れ流れ制御による蒸気タービンの段効率向上

Improvement of Steam Turbine Stage Efficiency by Controlling Rotor Shroud Leakage Flows

柴田 貴範*¹
SHIBATA Takanori福島 久剛*²
FUKUSHIMA Hisataka瀬川 清*²
SEGAWA Kiyoshi

ABSTRACT

Shroud leakage flow with large tangential velocity produces a significant aerodynamic loss due to the mixing with the main stream flow. In order to reduce the mixing loss, two distinct ideas of the rotor shroud exit cavity geometry were investigated using computational fluid dynamics (CFD) analyses and experimental tests. One idea is an axial fin from the shroud downstream casing to reduce the axial cavity gap, the other is a swirl breaker placed in the rotor shroud exit cavity to reduce the tangential velocity of leakage flow. Test results showed that the axial fin and the swirl breaker improved turbine stage efficiency by 0.2% and 0.7%, respectively. The swirl breaker is an effective way to improve steam turbine stage efficiency because it can effectively turn the rotor shroud leakage flow in the direction of the main blade passage flow.

Key words : Steam Turbine, Low Aspect Ratio Blade Row, Rotor Shroud Leakage Flow, Mixing Loss

1. 緒言

蒸気タービンは、主に火力・原子力発電に利用されており、世界総発電量の60%近くを担う主力原動機である⁽¹⁾。近年、地球温暖化防止や環境負荷低減の観点から発電プラントの更なる高効率化が求められており、蒸気タービンの効率改善は今なお重要課題の一つである。

蒸気タービン高・中圧段の内部損失は、(1)翼型損失 (Profile loss)、(2)二次流れ損失 (Secondary flow loss)、(3)漏れ流れ損失 (Leakage flow loss) に大別される。このうち、翼型損失と二次流れ損失は、翼に起因する損失であり、翼形状の改良により低減できる可能性がある。一方、漏れ流れ損失は、回転系と静止系との間のシール部に関与するもので、その損失の大小は、漏れ量だけでなく、漏れ流れと主流との合流の仕方 (すなわちシール部やキャビティ部の形状) にも大きく影響を受けることが、近年明らかになりつつある。

この漏れ流れ損失に関して、2000年以降の欧州を中心に、シール形状の最適化や漏れ流れと主流の干渉形態の影響を調査する研究が精力的に行われてきた。その先駆的な解説としてDenton⁽²⁾は、翼端漏れ流れに起因するエントロピー生成が、主に漏れ流れと主流が混合する際に生じることを指摘している。さらに、漏れ流れの旋回速

度成分は、ラビリンスシール内部の混合過程ではあまり変化せず、流入した流れと同等な旋回速度成分がシール出口においても維持されることも指摘している。それゆえ、漏れ流れが有する旋回速度成分を、主流と混合する前に減少させることが、効率向上の観点から重要である。

漏れ流れの旋回速度を除去する試みとして、いくつかの研究例が開示されている。Wallisら⁽³⁾は、動翼シュラウドの漏れ流れ流路面に、旋回速度成分を除去して動力化するための補助翼を装着した。しかしながら、その補助翼装着により、シュラウドキャビティ部において主流の出入りが激しくなったため、有効な効率向上が得られなかったようである。さらに、シール部出口のケーシング側に、軸方向流出を強化するための整流板を設置した試験も実施した。この場合は、タービン効率の改善と動翼出口における旋回速度成分の低減を確認できたとしている。他方、Rosicら⁽⁴⁾は、シール部の出口キャビティ部に、入口翼角を静翼流出角に一致させ、出口翼角を軸方向に向けた湾曲ベーン (厚み一定の翼) を設置し、その効果を試験で確認した。最も効率が上がったのは、動翼1ピッチ当たりにベーン8枚を設置したケースで、下流の静翼への流入角が改善される効果も含めて0.4%の段効率向上が確認された。シュラウド漏れ流れの旋回速度成分の除去は、動翼下流での混合損失を低減できると同時に、段下流の静翼への流入角も一様に近づけるため、下流段静翼の二次流れの発達を抑える効果もある。

また、シール部に整流板などを入れないまでも、シュラウド前後のキャビティ形状を最適化する研究も、数多

原稿受付 2017年8月22日

査読完了 2018年6月13日

*1 三菱重工(株)

〒676-8686 高砂市荒井町新浜町2-1-1

*2 三菱パワーシステムズ(株)

く行われている。Pfauら⁽⁵⁾は、主流に再流入する漏れ流れの周方向非一様性や、主流流れがキャビティに逆流するのを防ぐため、非軸対称な形状をしたシュラウドやケーシング端面を提案している。特に、翼端漏れ流れ流路の出口側形状に着目した研究として、Rosicら⁽⁶⁾は、流れ解析による形状サーベイの結果として、従来よりも損失低減効果の大きい出口キャビティ形状を提案している。また、Barmपालiasら⁽⁷⁾は、特に入口キャビティの体積や軸方向ギャップの影響を調査し、ギャップを狭めることは段効率の向上につながり、少なくともTroidal渦の発生が消えるまでは段効率向上に寄与できるとしている。

本研究でも、シュラウド漏れ流れの巡回速度の除去に着目し、Wallisら⁽³⁾やRosicら⁽⁴⁾の補助翼やベーンよりも簡便な構造の巡回速度除去デバイス（巡回防止板）を考案、その効果を流れ解析と空気タービン試験で評価した。本報では、それらの結果について報告する。

主な記号

C_0 : 断熱熱落差等価速度 [m/s]

$$C_0 = \sqrt{2(h_1 - h_{3ss})}$$

C_x : 動翼根元軸コード長 [m]

G : 出口キャビティ軸方向間隙 [m]

h : 比エンタルピー [J/kg]

\dot{m} : 質量流量 [kg/s]

s : 比エントロピー [J/kg/K]

T : 温度 [K]

U : 周速 [m/s]

U/C_0 : 速度比（根元） [-]

V : 流速 [m/s]

η : 効率 [-]

添え字

l : 漏れ流れ成分

m : 主流成分

ss : 静エネルギー等エントロピー過程

z : 軸方向成分

θ : 周方向成分

1 : 静翼入口

2 : 静翼出口

3 : 動翼出口

2. 動翼シュラウド漏れ流れ

2.1 シュラウド漏れ流れ流路

蒸気タービンに限らず、すべてのターボ機械は、回転系と静止系の間に両者の接触を避けるための間隙が存在している。軸端部やシュラウド部などでは、その間隙を通過する漏れ流れを最小化するためのシール機構を備えている。そのシール機構として、複数のフィンと膨張室が備わったラビリンスシールを用いることが一般的であ

る。ラビリンスシールは、シール機構がない場合に比べて漏れ量削減が可能だが、有限なフィン先端間隙の存在により、漏れ量が完全に零になることはない。このような漏れ流れは、単にその流れの持つエネルギーが有効利用されないことが問題だけでなく、主流に再流入する際に更なる付随的な損失が発生するという点でも問題である。

動翼端部の漏れ流れ流路の一例を図1に示す。蒸気タービンの高・中圧段では、漏れ流れ損失と翼振動の観点から、動翼端部にシュラウドをつけるのが一般的である。そのシュラウドと対向するケーシング面には、漏れ流れを抑制するためのシールフィンが複数設置されている。また、シュラウドの径方向厚みに応じて、シュラウド前後キャビティの径方向深さが確保されている。さらに、起動時におけるロータとケーシングの軸方向の熱伸び差を考慮して、キャビティ部分の軸方向間隙が確保されている。これらのことから標準的な蒸気タービンでは、他のターボ機械よりも大きなシュラウドキャビティが翼端近傍に存在することになり、漏れ流れそのものによる損失だけでなく、キャビティが存在することによる損失も、他のターボ機械に比べ顕著になりやすい。

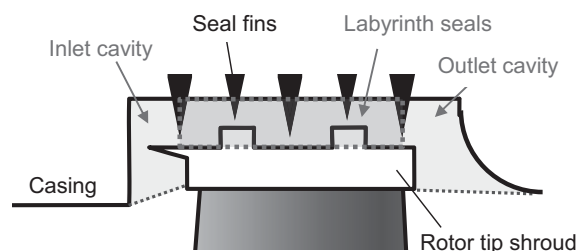


Fig. 1 Rotor shroud seal and cavity arrangement

2.2 漏れ流れによる損失の発生メカニズム

本研究で着目している漏れ流れ損失を、その発生メカニズムの観点から区別する。一つ目はバイパス損失である。これは漏れ流れが動翼部をバイパスすることに起因する損失で、その大きさは漏れ量の大小に依存する。二つ目は主流と漏れ流れの混合損失である。これはバイパスした漏れ流れが主流に再流入する際に生じる損失で、その大きさは、漏れ量の大小のみならず、漏れ流れと主流の混合形態（両者の流速差や流れ方向の違い）にも依存する。三つ目は後段翼列の干渉損失である。この損失は、漏れ流れが下流静翼と干渉することに起因する損失で、漏れ流れの流れ角と下流翼の入口翼角が異なるほど損失が増加する。本研究では、これらの損失のうち特に混合損失に着目し、損失低減の可能性を検討した。

混合損失の発生メカニズムについて詳述する。図2に示すように、動翼の上流から来た流れは大半が動翼部に流入するが、一部はシュラウド外周の漏れ流れ流路へと流れ込む。この漏れ流れは、動翼部をバイパスするため、転向することなく動翼下流へと流れていく。その結果、

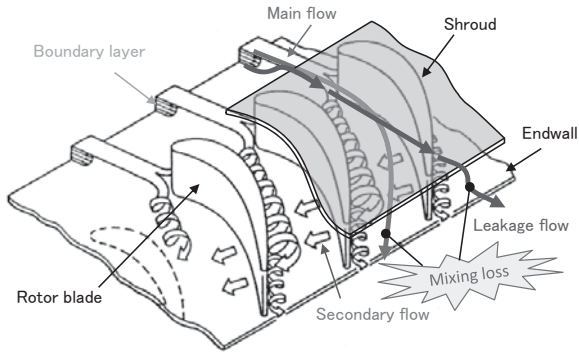


Fig. 2 Schematic illustration of the rotor shroud leakage flow (Modified figure based on Langston⁽⁸⁾)

流れ流路の出口において、流れは主流と大きな速度ベクトルの違いを持って、合流することになる。この速度ベクトルの違いが混合損失の主要因である。

上記のような混合損失についてDenton⁽²⁾は、単一のシールフィンのみを有した流れ流路流路に関して、次のような混合損失モデルを導出している。すなわち、流れを非圧縮で近似し、相対系における流れ (l) と主流 (m) の全温が等しいことに着目すると、動翼出口において主流と流れの混合に起因するエントロピー生成 Δs は、次式で表される：

$$T\Delta s = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_m} \left[V_\theta^2 \left(1 - \frac{V_{\theta l}}{V_{\theta m}} \right) + V_z^2 \left(1 - \frac{V_{z l}}{V_{z m}} \right) \right] \dots\dots\dots(1)$$

ここで \dot{m} , V_θ , V_z は、それぞれ質量流量、周方向速度、軸方向速度であり、 l , m の添え字はそれぞれ流れと主流の速度成分を表している。この式から、流れに起因する混合損失は、流れ量だけでなく、流れと主流の流速差に比例して増加することが理解できる。

今回の動翼仕様では、相対系での周方向速度 V_θ が軸方向速度 V_z の約3倍に相当するため、軸方向よりも周方向の流速差を小さくする方が損失低減にとって効果的である。つまり、主流と混合する前に、流れの旋回速度成分を除去することが高効率化に寄与する。さらに、このことは下流静翼への流入角度分布の改善にも繋がるため、後段干渉損失の低減にも役立つ可能性がある。

3. 供試対象

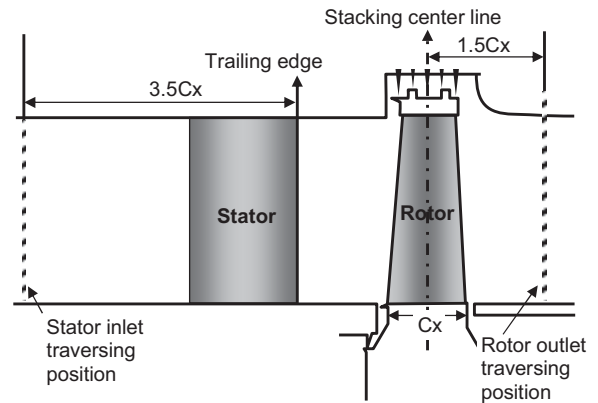
3.1 供試翼

今回の検討対象であるタービン翼の代表仕様および設計条件を表1に示す。設計点における翼根元の反動度は中間反動度に相当し、翼のスパン方向の速度分布である渦形式は、自由渦である。

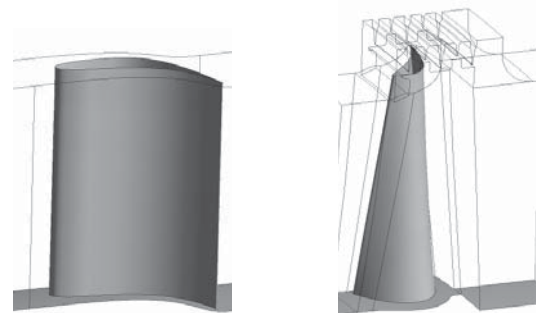
試験における子午面形状および翼形状を図3に示す。静翼は単一翼素断面の翼で、スパン方向の速度三角形の変化に応じ、スロート・ピッチ比 s/t が変化した形になっている。静翼および動翼のアスペクト比 (= 翼長/軸コード長) は、それぞれ2.0および2.6で、静動翼ともに比較的大きいアスペクト比を有している。このため、ハ

Table 1 Turbine representative specification

Mass flow rate	kg/s	10.4
Inlet total pressure	kPa	166
Inlet total temperature	K	363
Outlet static pressure	kPa	127
Rotational speed	rpm	4150
Vortex design	-	Free vortex
Velocity ratio (Root), U/C_0	-	0.56



(a) Meridional shape (base shroud cavity case)



(b) Stator blade shape (c) Rotor blade shape

Fig. 3 Tested blade geometries

ブ、シュラウド端壁部の二次流れは互いに干渉することがなく、はっきりした主流部が形成されることが、過去の実験結果から判明している⁽⁹⁾。

3.2 キャビティ形状

試験に使用した3種のキャビティ形状を図4に示す。今回、形状変更したのは動翼下流のケーシング形状のみで、静翼と動翼の形状は完全に同一である。キャビティ形状の作り込みは流れ解析を用いて行い、シュラウド下流キャビティへの主流の入り込み防止や流れの旋回除去に配慮してサーベイを行った。最終的に採用した形状が図4である。

図4(a)は、従来の標準的な動翼下流キャビティで、本検討のベース形状とすることができる。動翼から出た主流がスムーズにケーシング部に流入するよう、ケーシング入口部の形状は大きな円弧で構成されている。しかし、軸方向間隙は軸コード長の約1/3と大きく、動翼下流に比較的広いキャビティ領域を有している。

これに対し図4(b)は、ケーシング流入部に軸方向突起を設けた改良案で、突起により動翼主流がキャビティへ流入するのを防ぐと同時に、突起の内周面に傾斜をつけて動翼を出た直後の主流がスムーズにケーシング面に沿って流れることを意図している。また、動翼シュラウドの後端とケーシングの突起先端の軸方向間隙はベースよりも狭いので、主流がキャビティ部分を通る際の剪断層の発達も抑制されるであろう。よって本案により、軸方向間隙を狭めた効果とケーシング流入部の形状を変更した効果の両方を把握することができる。

さらに図4(b)の突起の外周側キャビティ内に、周方向等間隔に板状のリップを挿入した案が図4(c)である。リップの存在により、漏れ流れの持つ周方向速度の低減を企図している。本研究では、このリップを旋回防止板と呼ぶこととする。今回、旋回防止板の設置枚数は動翼と同一で、動翼1ピッチ当たり1枚の旋回防止板を配置した。この枚数は、Rosicらのキャビティベン⁽⁴⁾の1ピッチ8枚と比べると明らかに少なく、形状も簡素である。

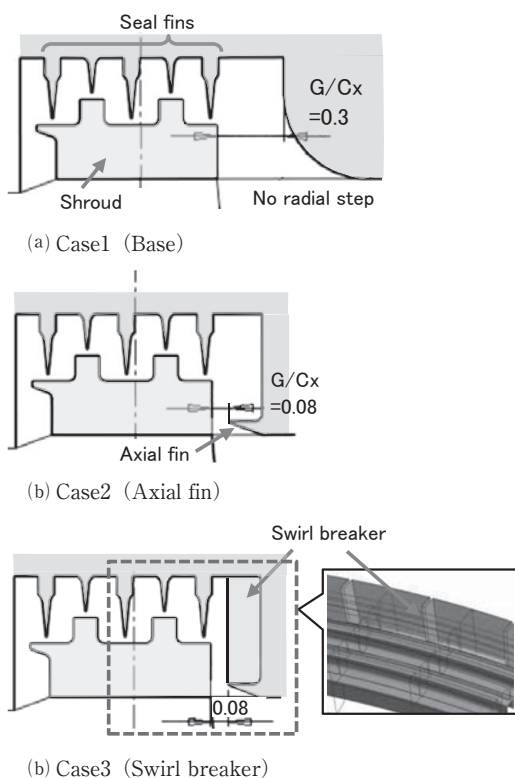


Fig. 4 Tested shroud cavity geometries

4. 流れ解析

4.1 流れ解析手法

流れ解析は、漏れ流れ流路も含む単段体系で行った。解析体系の一例として、軸方向突起 (Case2) を適用した場合の解析体系を図5に示す。より現実に近い試験状況を模擬するため、シュラウドシール部だけでなく、ハブ側漏れ流路に繋がるロータ軸封部 (図示省略) も、計算領域に加えて解析した。

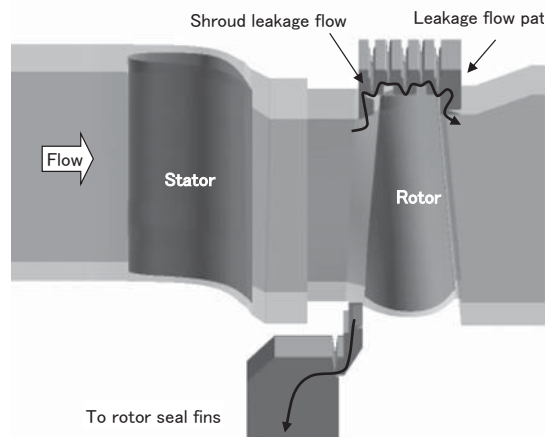


Fig. 5 Computational domain

解析に用いた計算格子について説明する。二次流れの巻き上がりなど、細かな流動も詳細に捕えるため、トータル1700万点の計算格子を利用した。シュラウドシール部 (図6参照) には、160万点の計算格子を配置し、ラビリンス流路内の複雑な流動現象も捕捉できるように配慮した。翼間格子の生成には、ANSYS® TurboGrid™ を用いたが、シュラウドシール部や軸封部の格子生成にはANSYS® ICEM CFD™ を利用した。いずれの領域もHexa格子で分割し、壁近傍には格子を寄せて境界層の捕捉に配慮した。



Fig. 6 Computational grid for a shroud leakage flow passage

流れ解析は、ANSYS® CFX® を用いて行った。解析手法の詳細を表2に纏める。乱流モデルとしてはShear Stress Transportモデルを用い、Gamma Theta Modelを用いて乱流遷移も評価した。作動流体は理想気体として取扱い、その粘性係数は、空気に関するSutherlandの式を用いて算出した。試験条件に合わせた境界条件を用い、入口で全圧、全温、流れ角を、出口で静圧を与えて解析した。

実測結果を基に、流れ解析の精度を検証した。図7は、ベースのキャビティ形状 (Case1) に対する、実測 (EFD) と解析結果 (CFD) の比較である。代表的な結果として、段効率と動翼出口における絶対流出角の分布を示した。本図から分かるように、解析結果は実測と良く一致しており、流れ場の定性的な傾向を十分に捉えて

Table 2 Numerical models

Item	Numerical model
Turbulence model	Shear Stress Transport
Equation of state	Ideal gas
Transition model	Gamma Theta model
Viscosity	Sutherland's formula

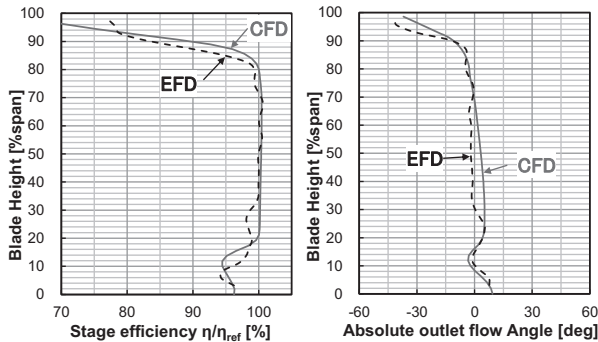
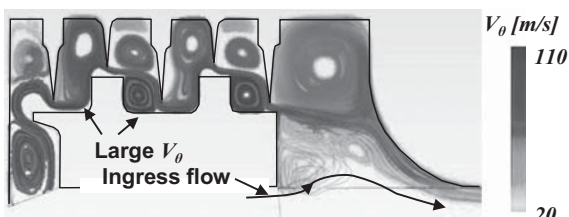


Fig. 7 Comparison of experimental results (EFD) with computational ones (CFD)

いる。しかし厳密に言えば、今回着目しているシュラウド側の近傍（翼高さ80%以上の領域）の流れ分布に関しては、定性的な傾向は捉えられているものの、定量的な一致は十分ではない。実測に比べると、解析では流れの影響が外周側に限定され、翼の内周側には到達しにくい傾向にあるようである。

このときのシュラウド近傍の流線を図8に示す。本図からわかるように、シュラウドの下流端には、主流が巻き込まれる逆流領域が発生している。このような逆流現象は、現実には非定常性の強い流れと推測されるが、解析では実用的な時間で評価する観点から、乱流モデルを用いた定常解析を行った。このため、現実よりも大きい乱流粘性が生じ、逆流領域の非定常性を減衰させ、シュラウド後流の影響が実際よりも局所的なものになったと考えられる。このような現象を、より高精度に捕えるためには、LESなどの非定常乱流解析を行う必要があるが、日常的な設計検討に用いるレベルの計算機の能力では非実用的な手法と考えている。

本研究では、定常解析であっても少なくとも流れ角分布の定性的な傾向は捕捉可能であると考え、実測で観測された効率変化の分析に本定常解析を利用した。

Fig. 8 Calculated flow patterns within the shroud leakage flow path for Case1 ($U/C_0=0.56$)

5. 空気タービン試験

5.1 試験設備の概要

本研究で用いた空気タービン設備について概説する。同設備は、供試対象であるタービン本体に加えて、高圧空気源としての遠心二段圧縮機と、タービン出力を消費する電気動力計とからなる。遠心圧縮機の仕様は、吐出圧力300kPa、最大風量50000m³/h (Normal) で、消費電力は2700kWである。

試験における空気タービンの運転方法について説明する。圧縮機は吐出圧を保持した状態で運転され、その下流の放風弁と圧力調整弁により、所定のタービン流量および入口圧を実現する。また、タービン軸に直結された電気動力計には速度調整機能があり、タービン回転数が一定となるように制御することができる。試験の際、圧縮機とタービンの軸振動、軸受温度は常に監視されており、回転系としての信頼性を保持した運用が可能である。

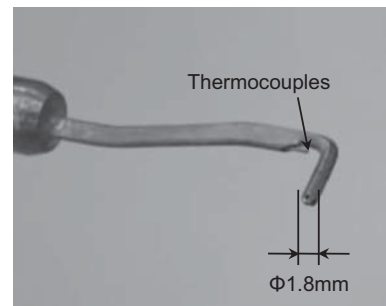


Fig. 9 Five-hole probe for traversing a rotor outlet flow

5.2 計測手法

タービン性能の算出に関わる代表的な計測項目を中心に説明する。

タービンへ流入する空気流量はオリフィス流量計で測定し、測定誤差を抑えるため十分な直管長さを有する配管部分に設置した。

段性能の把握は5孔ピトー管で行い、静翼入口と動翼出口の2ヶ所（図3(a)参照）におけるトラバース計測で評価した。5孔ピトー管の先端近傍には熱電対も設置されており、圧力と同時に温度も計測可能である（図9）。また、5孔ピトー管の特性は事前の較正試験で把握しているため、全圧・全温以外にマッハ数や流れ角なども評価可能である。トラバースで得られた全温・全圧分布を基に次式により段効率を評価し、性能良否を判断した。

$$\eta = \frac{h_{01} - h_3}{h_{01} - h_{3ss}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

今回は動翼シュラウドの漏れ流れの挙動に着目しているため、出口キャビティ近傍の局所流れを詳細に捉える必要がある。そのため、動翼下流のトラバース計測には、先に示した小型のピトー管（直径φ1.8mm）を用い、計測データの空間分解能を高めるよう配慮した。

6. 結果および考察

6.1 段性能に与えるキャビティ形状の影響

試験で得られた性能計測結果を基に、各キャビティ形状が段性能に与える影響を評価した。図10は、各キャビティ形状に対する段性能の比較で、縦軸は段効率 η 、横軸は翼の根元で評価した速度比 U/C_0 である。本図から、軸方向突起を設けたCase2は、ベース形状のCase1よりも、全速度比域において効率が0.2%向上することが分かる。流れ解析によると、Case2の漏れ量の主流流量比は、ベース差+0.01%でほとんど変化しないため、効率改善の主要因は漏れ流れと主流の混合損失の違いと言える。流れ場の詳細は後述するが、キャビティの軸方向距離を狭め、主流のケーシング流路面へのスムーズな流入を促進することで、有意な段効率改善につながった。この改善量は、翼形状の改良で得られる効果と比べても遜色ないため、蒸気タービンの性能改善のためには、翼形状のみならず、キャビティ形状にも配慮した設計が重要であると言える。

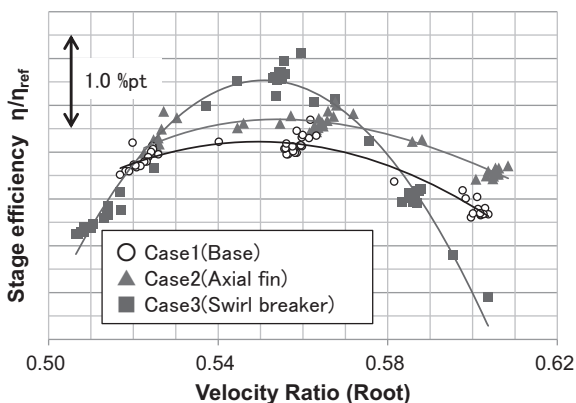


Fig. 10 Overall stage performance for three shroud cavity cases

さらに旋回防止板を設けたCase3は、Case1よりもピーク性能付近で段効率が0.7%向上し、設計速度比0.56近傍で顕著な性能改善効果が確認された。しかしその一方で、設計速度比から離れた領域では効率が低下（例えば $U/C_0=0.60$ 付近では0.8%程度低下）した。Case3は、速度比に対してやや急峻な特性を有しているが、これには後述するように、旋回防止板の旋回除去効果が大きいことが関与している。

なお、図10から分かるように、各試作形状の効率値はバラつきを有している。このバラつきは、運転条件の微小な変動や試験日、計測時間帯の違いから生じるものであり、完全に取り除くことはできない。本研究では、計測回数が多く、かつ実機において重要視される設計速度比付近（ $=0.55 \sim 0.57$ ）の性能について、効率値のバラつきを統計学的に処理し、各キャビティ形状による効率向上量を評価した。

6.2 効率改善効果の分析

スパン方向の流れ場分布を基に、前節で述べたキャビティ形状変化による効率改善効果を分析する。

図11は、同じ速度比におけるベース形状（Case1）と軸方向突起（Case2）のフローパターンの違いである。流出角の正方向の定義は、図12に示す。図11(a)の段効率分布を見ると、軸方向突起の追設により、外周側に近い領域の効率が向上していることが分かる。図11(b)はCase1に対するCase2の段効率差で、本図からも外周側の領域の効率改善が明確である。動翼出口における絶対系周方向速度の違いを図11(c)に示す。若干ではあるが、軸方向突起の追設により、外周側近傍の旋回速度が抑制されていることが見て取れる。

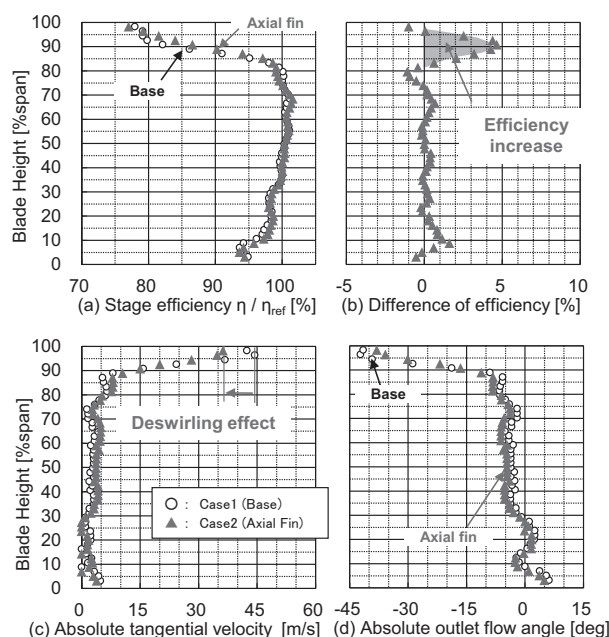


Fig. 11 Measured flow distributions at the rotor outlet traversing position for Case1 and Case2 ($U/C_0=0.56$)

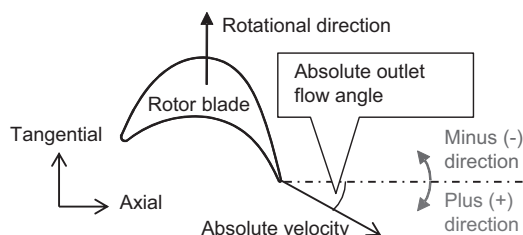


Fig. 12 Definition of the absolute outlet flow angle

流れ解析の結果を図13に示す。軸方向突起の追設は、主流がキャビティ内へ流入するのを防ぐと同時に、キャビティ近傍における安定的な渦流れ①～③の形成に役立っている。これらの渦流れのうちの①と③は、シュラウド流れの主流と、旋回速度の小さいケーシング壁面近傍の境界層流れとの間で運動量交換を促進し、若干ではあるが漏れ流れの旋回速度を低減する効果がある。

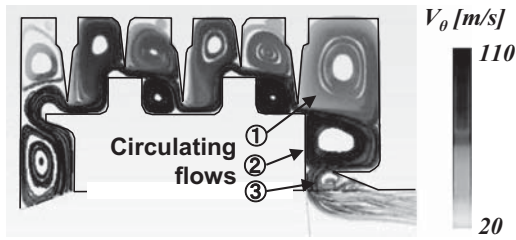


Fig. 13 Calculated flow patterns within the shroud leakage flow path for Case2 ($U/C_0=0.56$)

他方、渦流れ②は、高周速で回転するシュラウドの境界層流れと運動量交換するため、漏れ流れ主流の旋回速度を増強する効果がある。これら背反する効果の結果、漏れ流れは僅かではあるが、旋回速度が減少する方向に変化したのであろう。漏れ流れの旋回速度成分の減少は、図13右端の流線の色が図8よりも淡くなっていることから明らかである。結局、軸方向突起の追設は、主流のキャビティへの流入防止と、下流のケーシング流路面へのスムーズな流入促進、および漏れ流れの旋回速度除去により、混合損失を低減したものと考えている。

さらに、旋回防止板を設けたケースを、以下に分析する。図14に、同じ速度比におけるベース形状と旋回防止板を設けたケースの比較を示す。図14(a)の段効率分布から旋回防止板の設置により、翼の外周側の段効率が向上していることが見て取れる。このときの動翼出口における周方向速度の違いを図14(c)に示す。旋回防止板の設置により、外周側の周方向速度が大幅に減少している。この周方向速度の除去効果は、単なる軸方向突起よりも明らかに大きく、翼先端近傍において30deg近くも絶対流出角が小さくなっている（図14(d)）。これにより、翼の外周側の段効率が顕著に改善し（図14(b)）、漏れ流れと

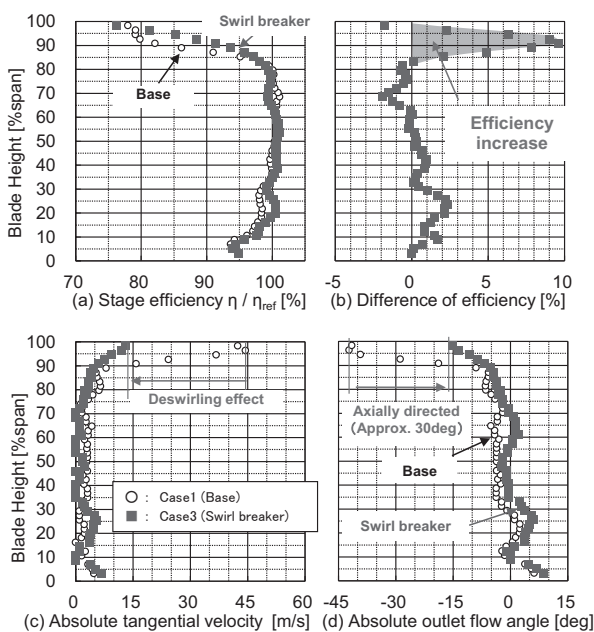


Fig. 14 Measured flow distributions at the rotor outlet traversing position for Case1 and Case3 ($U/C_0=0.56$)

主流の混合損失の低減が大幅な段効率の改善につながった。さらに、多段の状況下においては、図14(c)の流れ角の均一化が下流翼のインシデンス損失改善にもつながり、更なる効率改善効果を期待できる。混合損失低減と流れ角の整流効果により、旋回防止板は蒸気タービンの効率改善の非常に有効な手段となり得る。

流れ解析結果を基に、旋回防止板の効果を説明する。図15は、旋回防止板を設けた際のシュラウド近傍の流れ場である。ここでも濃淡は周方向速度を表している。図13, 15との比較により、漏れ流れの持つ旋回速度がキャビティ内部で急速に減速されていることが分かる。今回設置した旋回防止板は、動翼枚数と同数で、類似の研究例であるRosicら⁽⁴⁾のペーン設置数（1ピッチ当たり8枚）に比べると明らかに小さい。今回、強い渦流れが形成されているキャビティ部分に旋回防止板を設置することで、強い旋回速度を持つ漏れ流れと、旋回が除去されたキャビティ内部流れの混合が促進され、大きな旋回速度除去効果が得られたと考えている。

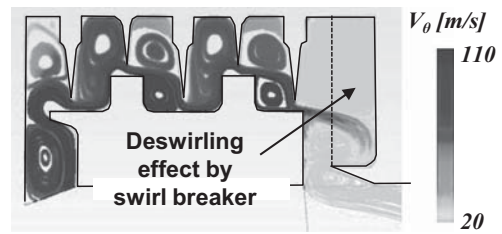


Fig. 15 Calculated flow patterns within the shroud leakage flow path for Case3 ($U/C_0=0.56$)

流れ解析の定量的な予測精度を把握するため、ベース形状に対する旋回防止板の段効率および流れ角の違いを、解析と実測とで比較した。その結果を図16に示す。流れ解析は定性的には実測を再現しているものの、解析の方が効率改善効果を過小評価している。これは、4.2節でも述べたが、漏れ流れと主流の混合プロセスが本来非定常的なものであり、今回の乱流モデルを用いた定常解析では、混合領域が過小に評価され、損失の定量的な予測が難しかったと考えている。一方、流れ角の変化につ

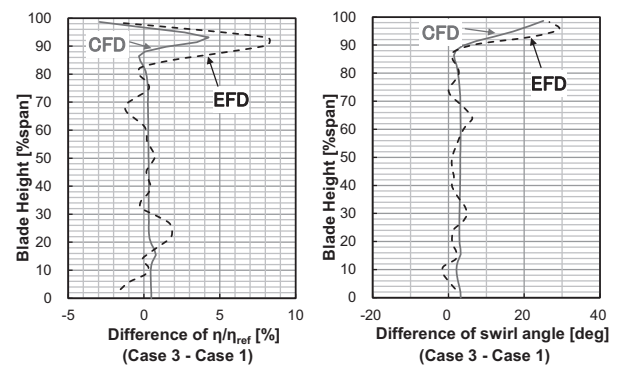


Fig. 16 Measured flow distributions at the rotor outlet traversing position for Case1 and Case3 ($U/C_0=0.56$)

いては、少なくとも最大値に関し、解析と実測とで定量的にも良い一致を示した。よって、定常解析であっても、フローパターンについては予測が可能と考えている。今後、流れ解析を用いて更なるキャビティ形状の最適化を行う場合、流れ角の変化に着目して改良効果を確認することが、改良良否の判断の一つの目安になるであろう。

前節で述べたように、旋回防止板の設置は設計速度比近傍で大きな効率改善効果を生み出したものの、設計速度比から離れた運転条件では段効率の低下につながった。この要因を大速度比側の試験結果を基に分析する。

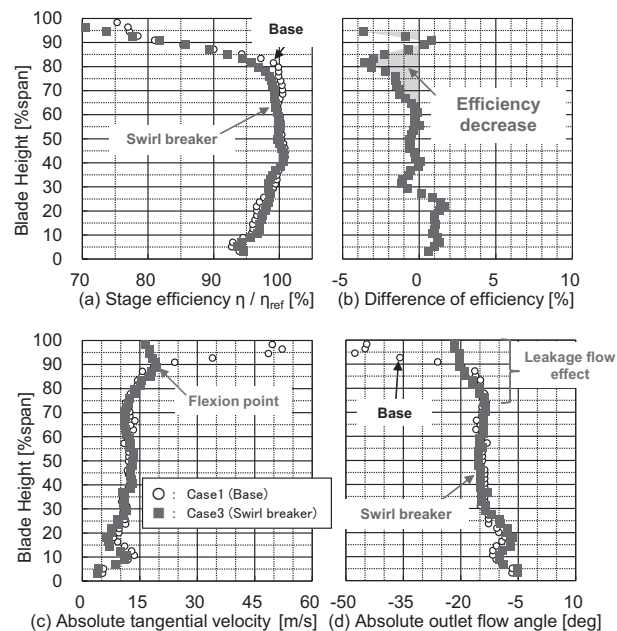


Fig. 17 Measured flow distributions at the rotor outlet traversing position for Case1 and Case3 ($U/C_0=0.60$)

図17(a)の効率分布を見ると、ベースケースと旋回防止板とで、翼高さ65～90%付近の効率分布は同等だが、翼高さ90%よりも外周側と65～90%付近で、旋回防止板の方が効率が低めになっている。このことは、図17(b)の段効率差にも表れており、旋回防止板による外周側フローパターンの変化が段効率低下につながった。

速度比が大きくなった場合の流れ角の変化を説明する。流量と圧力比を維持したまま、速度比を大きくした場合、速度比が大きくなるにつれて主流の絶対流出角がマイナス側（動翼轉向不足の方向）へと変化する。他方、流れ流れは、旋回防止板により常に周方向速度が抑えられた形となるため、主流の流れ角との差が小さくなる。その結果、動翼出口の流れ角分布は一様な方向に近づくことになる（図17(d)）。このときの絶対流出角分布を詳細に見ると、翼高さ75%付近から翼先端側に向かって流れ角が変化しており、ベースよりも流れ流れの影響範囲が拡大していることが分かる。また、旋回速度分布（図17(c)）については、外周端部の旋回速度が主流部よりも小さくなりすぎて、翼高さ90%付近に変曲点を持つような

分布となっていることが分かる。

流れ流れの影響範囲が拡大した理由を、図18に基づき説明する。本図は、動翼下流側から見たベースケース（Case 1）のフローパターンの模式図である。この場合、流れ流れは、動翼シュラウド側二次流れと対向する方向に流れるため、二次流れの巻き上がりを抑制する効果がある。他方、旋回防止板のCase 3では、その流れ流れの旋回速度成分が小さくなっているため、二次流れが動翼を出た後も巻き上がりを継続し、スパン方向に損失領域が拡大したものと、実験結果に基づき推察している。

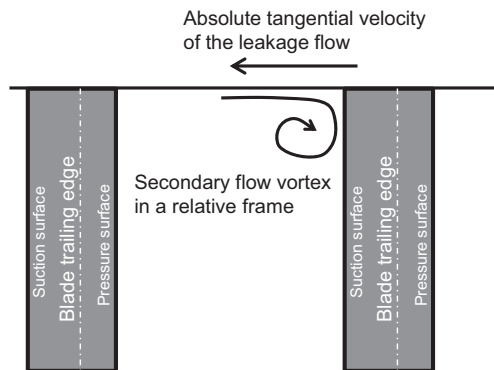


Fig. 18 Schematic illustration of rotor secondary flow and shroud leakage flow for Case1 from axial upstream direction

上記フローパターンの変化と損失との関係は、以下のようである。図14(c)と図17(c)におけるCase 1の旋回速度分布を比較して分かるように、高速度比条件では、流れ流れも含め、設計条件よりも旋回速度が大きくなる。この旋回速度の大きくなった流れ流れを、旋回防止板により旋回速度を大きく減速させたため、流れ流れ自身の損失が増加し、翼高さ90%以上の高損失領域として現れた。さらに、旋回防止板により流れ流れの旋回速度成分が弱まった効果により、動翼二次流れの巻き上がりが促され、翼高さ65～90%付近の損失増加に繋がった。このように高速度比条件で軸方向流出からずれた主流に対し、旋回防止板により流れ流れの旋回速度成分を大きく減速させ過ぎたことが流れ流れの損失増加を招き、また二次流れの成長も促進させ、段性能の劣化につながったと考えられている。

以上のように、旋回防止板は、主流の旋回速度の大小に関わらず流れ流れの旋回速度成分を常に小さく抑えることができるため、軸方向流出の段への適用が有効である。旋回防止板の適用により、段効率が速度比に対して急峻な特性になるものの、蒸気タービン実機の運転時においては速度比がほとんど変化しないため、軸方向流出の設計段に適用すれば、旋回防止板は非常に有効な効率向上策になり得る。

7. 結言

動翼のシュラウド漏れ流れと主流の混合損失に着目し、流れ解析と要素試験を用いて、動翼下流のキャビティ形状が段性能に与える影響を評価した。それにより、以下の結論を得た。

- (1) 軸方向突起を設けることは、主流のキャビティへの漏れ込みを防ぐだけでなく、動翼先端漏れ流れの旋回速度成分の除去にも繋がり、段効率が0.2%改善した。
- (2) さらにキャビティ内部に旋回防止板を設けることで、漏れ流れの旋回速度を大幅に除去することができ、設計点における段効率が0.7%改善した。
- (3) しかし設計速度比から離れた運転点では、主流が軸方向流出からずれるため、旋回防止板を設置した方が漏れ流れと主流の混合損失が増加し、段効率が低下する。

参考文献

- (1) 田沼唯士, “世界の電力需要動向と蒸気タービン”, ターボ機械, Vol. 40, No. 5 (2012), pp. 2-8.
- (2) Denton, J. D., “Loss Mechanisms in Turbomachines”, Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 115, No.4 (1993), pp. 621-656.
- (3) Wallis, A. M., Denton, J. D. and Demargne, A. J., “The Control of Shroud Leakage Flows to Reduce Aerodynamic Losses in a Low Aspect Ratio”, Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 123, No. 2 (2001), pp. 334-341.
- (4) Rosic, B and Denton, J. D., “The Control of Shroud Leakage Loss by Reducing Circumferential Mixing”, ASME GT2006-90946 (2006).
- (5) Pfau, A., Kalfas, A.I. and Abhari, R.S., “Making Use of Labyrinth Interaction Flow”, ASME GT2004-53797 (2004).
- (6) Rosic, B, Denton, J. D., Curtis, E. M. and Perterson, A. T., “The Influence of Shroud and Cavity Geometry on Turbine Performance - An Experimental and Computational Study, Part 2: Exit Cavity Geometry”, ASME GT2007-27770 (2007).
- (7) Barmपालias, K. G., Kalfas, A. I, Abhari, R. S., Hirano, T., Shibukawa, N. and Sasaki, T., “Design considerations for axial steam turbine rotor inlet cavity volume and length scale”, ASME GT2011-45127 (2011).
- (8) Langston, L. S., “Crossflows in a Turbine Cascade”, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power, Vol. 102, No. 4 (1980), pp. 866-874.
- (9) Segawa, K., Shikano, Y., Tsubouchi, K. and Shibashita, N., “Development of a Highly Loaded Rotor Blade for Steam Turbines”, JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, Vol. 45, No. 4 (2002), pp. 881-890.

2018年ASME国際ガスタービン会議

1. 全 般

田沼 唯士*¹
TANUMA Tadashi

2018年6月11日(月)から15日(金)までの5日間、Norwayの首都Oslo近郊のLillestrømでASME International Gas Turbine Institute主催のTurbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition(国際ガスタービン会議)が開催された。会場はLillestrøm駅から徒歩5分ほどのNorway Exhibition and Convention Centre(Norges Varemesse)と隣接するThone Hotel Arenaで、近くを流れるNitelva川と森林に町並みが点在する北歐らしい景観を望めることができ、彫刻などの美術オブジェが所々に置かれた河川岸の遊歩道が近く、会議の休憩時間にすぐ降りて行くことができた。図1は会場から見たNitelva川と対岸の景観である。

ASME Turbo Expoは航空エンジン、ガスタービン、蒸気タービン、風車、ファン及び送風機等のターボ機械の研究開発や応用技術に関する技術講演会と製品及びサービスに関連する展示会で構成される。近年はオーガニックランキンサイクルや超臨界CO₂などの発電用新サイクル、ターボ機械の製造技術・金属及びセラミックス材料、石炭・石油・天然ガス・バイオマスなどの燃料に関連するセッション等が加わり、研究発表の対象を広げている。今回はTurbomachinery, Heat Transfer, Structures and Dynamics, Steam Turbines等の24のCommitteeから45のTechnical Trackが設けられ、合計で約1100件の論文が24室のセッションルームで平行して発表された。



Fig. 1 Landscape from Norges Varemesse

原稿受付 2018年8月10日

* 1 帝京大学 戦略的イノベーション研究センター
流体及び構造解析・設計応用研究部門
〒173-8605 板橋区加賀2-11-1

日本ガスタービン学会はParticipating OrganizationとしてASME Turbo Expoを協賛しており、今年度も会場内の展示会場に提供されたブースで日本のガスタービンと学会活動を紹介する展示を行った。更に、IGTC2019 First CircularとACGT2018のパンフレットを配布して本会が主催・共催する国際会議への参加を呼びかけた。

初日に開催されたオープニングプレナリーセッションでは、実際に発電に使用できる世界初のガスタービンが1903年にNorwayの技術者Ellingによってこの地Osloで開発され、後に4MWの発電を行ったことが紹介された。このElling gas turbineのロータがNorwegian Museum of Science and Technologyの提供でExposition会場に展示されて、来場者の注目を集めていた(図2)。この展示のパネルで、現存する世界最古のガスタービンロータと紹介されていた。恒例となったTurbo Expo Keynote Panelの今年のテーマは“Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) in the Light of Digitalization”で、SiemensとGEの技術責任者が講演を行った。両社ともデジタルデータ群(設計データ、IoTで集積するデータ等)で実際の生産プロセス、製品、運転プロセスの物理モデルをクラウドまたは現場のコンピュータ上に構築することで、MROビジネスを最適化・加速化できるとしている。今回発表されたASME IGTI Awardsでは三菱重工株式会社の内田澄生氏が論文“Comparison of a Single and Double Lip Rim Seal Geometry”で2016 ASME Gas Turbine Awardを連名で受賞した。

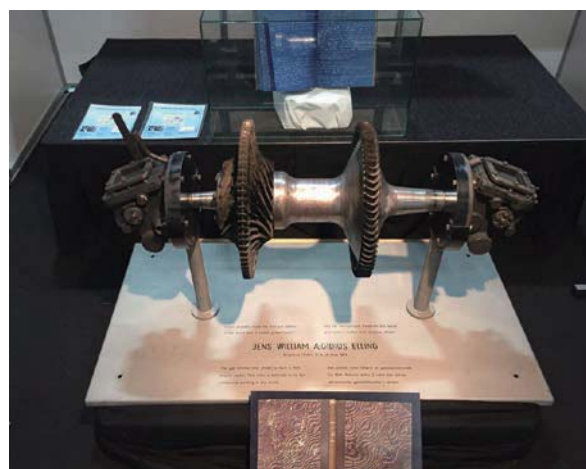


Fig. 2 Elling gas turbine (at the Turbo Expo Exposition booth on donation from Norwegian Museum of Science and Technology by courtesy of ASME IGTI)

Turbo Expoで発表される論文数は、以前は1200件を超えていたが、昨年から若干減少し、今年もAcceptされた論文はほぼ昨年並みの件数となった。査読ルールが厳密になったこと等が影響したと思われる。会期中のCommittee Meetingで紹介されたIGTIの取組の中で、論文数より論文の質を重視する方針を今後も続けるとの項目があった。一方、査読管理システムから要求される査読レポートの記述量が増えたことで査読者の負担が増加している。このことを考慮していると思われるが、不十分な完成度の論文を投稿して査読者の支援で論文の完成度を高めようとする一部の著者の姿勢を容認しないとの方針が伝えられた。

今回もメーカーや大学・研究機関等からの若手技術者・研究者が多数参加して、活発に発言していたのが印象的だった。初日の月曜午後に会場のNorges Varemisse西口エントランスホールで開催されたウェルカムレセプションの様子を図3に示す。

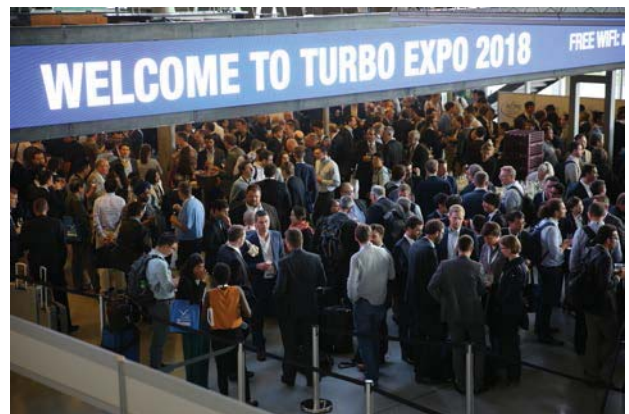


Fig. 3 Welcome reception (by courtesy of ASME IGTI)

注目を集める日本からの論文発表が多数あり、来年のTurbo Expo 2019 Phoenixでも多くの優れた研究成果が発表されることを願っている。

2. 航空用ガスタービン

浅子 知昭*¹
ASAKO Tomoaki

1. 概要

航空エンジン関連 (Aircraft Engine Committee主催) のセッション数は、全部で15セッション (2017年: 11件 / 2016年: 11件 / 2015年: 12件) であった。セッションの内訳は、パネルセッションが4セッション (同1 / 1 / 0件)、チュートリアルセッションが2セッション (同2 / 2 / 3件)、残りの9セッション (同8 / 8 / 8件) がテクニカルセッション (論文発表) であった。

テクニカルセッションでの発表数は、40件 (同31 / 38 / 39件) であり、昨年よりも増加している。また、これらとは別にCycle Innovation Committeeとのジョイントセッションとしてガスタービンエンジンの概念設計に関するチュートリアルセッションが1つ行われた。このチュートリアルセッションは2016年にAircraft Engine Committee主催で行われていたものと同じ発表者のものである。また、例年騒音関係のセッションが、Turbomachinery Committeeとのジョイントセッションで行われているが今年はジョイントセッションという形では行われなかった。(なお、以下の数値を含め、セッション数、発表件数とも筆者による集計値である。)

原稿受付 2018年7月5日

*1 (株)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
〒196-8686 昭島市拝島町3975-18

2. チュートリアルセッション

今年チュートリアルセッション (2件) は、①APU (航空機の補助動力装置) に関するものと、②ガスタービンエンジンの基礎についてであった。このうち、APUに関するものは、昨年に引き続き行われた。また、ガスタービンの基礎については、エンジン作動の基本原理や航空用ガスタービンに使われている材料の説明など、まさに基礎的な内容であったが聴講者は多かった。

3. テクニカルセッション

論文発表のセッション9件の内訳と各セッションでの発表件数 (カッコ内の数値) は、①インレット (7件)、②オペラビリティ (5件)、③エンジン全体の性能と新エンジンコンセプト (7件)、④プロペラとオープンロータ (2件)、⑤燃焼器と排出物 (2件)、⑥オイルシステムと熱管理 (6件)、⑦エンジン整備と機上での劣化のモニタリング (4件)、⑧ナセル・排気ノズルとミキサ (5件)、⑨モデル化・シミュレーションと検証 (2件) である。昨年に対してプロペラ関係、モニタリング関係、ナセル・排気ノズル関係のセッションが追加になっている。

このうち、筆者が聴講したなかで聴講者数の多かったと感じたものは、インレットに関するもの (特に亜音速機用エンジンのインレットに関するもの (GT-76398, 75090など)) であり、昨年に引き続き感心の高さを伺

合わせた。また、ナセル、オペラビリティ (GT-75204, 77089など) もインレットと同様に、エンジンの大径化に向けて影響のあるテーマであり、後述するパネルセッションと合わせ、このようなテーマに関しての発表数・聴講者数が多くなっていると感じた。なお、聴講者の減少傾向が続き、昨年はセッション自体が無くなっていたプロペラとオープンロータに関しては、関連するセッションは復活しているものの、発表自体が2件 (GT-76183, 75973) しかなく、聴講者も多いとは言えない状況であった。

発表者を国別で見ると (カッコ内は騒音関係を含んだ過去の件数)、日本3件 (2件)、中国6件 (7件)、米国6件 (13件)、英国5件 (7件)、ドイツ10件 (12件)、フランス1件 (3件) カナダ5件 (2件)、その他ヨーロッパ4件 (3件) となっている。

4. パネルセッション

今回パネルセッションは4件と過去の1件よりも大幅に増えたが、その内容は、①CO₂排出量削減のための革新的な推進システムコンセプトに関するもの、②将来の先進的な機体と航空用エンジンとの統合設計に関するもの、③米空軍で行われた、練習機 (プロペラ機形態) の機体とプロペラの実物形状を3D計測することで作成したDigital Twin (実物をそのまま摸した「双子」のシミュレーションモデル) を用いてのプロペラを換装した場合の効果の検討に関するもの、④Ice CrystalによるIcingに関するものであった。

これらのうち、①のCO₂排出量削減のための革新

的な推進システムコンセプトに関するセッションでは、Snecma社 (フランス)、Delft工科大学 (オランダ)、Chalmers大学 (スウェーデン)、Cranfield大学 (英国) が登壇した。この中で、Snecma社はオープンロータに関しての発表を行っていた。Delft工科大学の発表は、液化天然ガス燃料による推進システムをCranfield大学の発表では、液体水素燃料によるCO₂フリーの輸送を前面に推していた。

また、②の将来の先進的な機体と航空用エンジンとの統合設計に関するセッションでは、Airbus社、United Technology Research Center, NASA Glenn Research Center, NASA Langley Research Center, Pratt & Whitney社がパネラーとして登壇。会場はそれほど大きくはなかったものの聴講者多数であった。内容としては、亜音速輸送機用の機体と推進システムに関するものであり、超高バイパス比エンジン (UHB)、エンジンによる境界層吸込み (BLI)、電動推進・Hybrid推進、オープンロータなどの将来の推進システムとDouble Bubble形態、Hybrid Wing Body形態、Blended Wing Body形態、Over Wing Nacelle形態などの将来の革新的な機体形態の特徴と課題などが示されていた。特にAirbus社からの発表では、UHBに関してエンジン径や重量の影響、ショートインレットの必要性とその課題などの従来から言われているような課題に加え、逆推力装置の形態の変更やそれに伴う吸音パネルの配置、エンジンの加速時間、アイドル時のオペラビリティなど、より細かく具体的な課題が述べられていた。

3. 産業用ガスタービン

壹岐 典彦*¹
IKI Norihiko

産業用ガスタービンは以下に示す8セッション開催され、“Oil and Gas Applications”と、ガスタービン関連の発展的研究の“Cycle Innovations”, “Supercritical CO₂ Power Cycles”の3セッションで全体の半分以上を占めた。産業用ガスタービンの論文発表数は118件と昨年より2割近く少なかった。

1. Electric Power : 発電用途

論文数は10件で、昨年より1件増加した。フレキシブルな発電装置の最適デザイン (GT-75214)、コンバイ

ンドサイクルのエクセルギーとコストを合わせた評価 (GT-76989)、市場の不確実性を考慮してエネルギー供給を議論したもの (GT-75030)、フレキシブルな運転と低エミッションを狙った燃焼システム (GT-75764)、Hクラスガスタービンコンバインドサイクルの改良 (GT-76911)、Fクラスガスタービンのアップグレード技術 (GT-77274)、一社の発電用ガスタービン技術をまとめたもの (GT-76665)、1600℃級ガスタービンの空気冷却技術の開発 (GT-77273)、HRSGのダクトファイアリング (GT-75768)、ガスタービンの給気フィルターの経済的最適化 (GT-75435) の発表があった。

原稿受付 2018年7月28日

* 1 (国研) 産業技術総合研究所
〒305-8564 つくば市並木1-2-1
E-mail: n-iki@aist.go.jp

2. Industrial and Cogeneration : 産業用途と熱電併給

論文数は11件で、昨年と同数であった。冷熱・熱・電力の統合ユニットのモデリング・最適化のための統合シミュレーションツール (GT-75193), 風力発電システム統合システムのためのガスタービンコジェネのエネルギー貯蔵についての最適化 (GT-76688), 再生可能エネルギーによる発電の変動を安定化する目的の製水装置とガスタービンの統合システム (GT-75216), 海洋用途多段ガスタービン熱電併給の最適化解析 (GT-76025), ガスタービンエンジンのモデルの不確実性の量的評価 (GT-77052), 大型ガスタービンの試験 (GT-76350), パラレルコンピュータによる最適設計 (GT-76469), 多段圧縮機の可変静翼ペーンの最適マッチング (GT-76005), クリアランス制御技術 (GT-75652), 湿り空気圧縮時の液滴衝突の実験 (GT-76544), 給気フィルターエレメントの試験 (GT-75428) の発表があった。

3. Oil and Gas Applications : 石油・ガス産業用途

論文数は30件で、昨年より2件増加した。洋上でのガスタービンの汚れ (GT-75613, GT-75618, GT-76947), スケールモデルの実験の数値解析調査 (GT-75694), ガスタービンの状態監視関係 (GT-75007, GT-76849), 洋上運転における安全性 (GT-75003), 予測法 (GT-75006, GT-75046), 圧縮機駆動用ガスタービン (GT-75002, GT-75567), 複数ブランドのターボ機械の混成 (GT-75628) の発表があった。

圧縮機について、湿りに関するもの (GT-75058, GT-75236, GT-76429), 失速やサージ (GT-75521, GT-76179, GT-76185, GT-76188, GT-77222), 熱的計測 (GT-75020, GT-77016), デジタル圧縮機解析 (GT-76583), 電動ガスブースター (GT-77006) の発表があった。

また、フリーパワータービン (GT-75108), 天然ガス膨張器の流れ (GT-75211), 液化天然ガス製造過程からの熱回収 (GT-75370), 遠心ポンプ内の空気/水二相流 (GT-75380), 湿りガスの流量計測 (GT-76190), ブレード空気再循環システム (GT-75876) の発表があった。

4. Marine : 船舶用途

論文数は13件で、昨年より2件増加した。デトネーション燃焼を用いた船用ガスタービンの熱力学的性能の向上 (GT-75493), 高圧ブレードと低圧ペーンが存在におけるタービン間ダクト流れの数値シミュレーション (GT-75516), 船用ガスタービンの要素/材料におけるCMAS効果 (GT-75865), 高速度ガスタービン船用推進システムのSSSクラッチの適用と経験 (GT-75869), 船用の新しいCOGAG推進システム (GT-75908), 塩の霧のスケール下の圧縮機の性能変化 (GT-75981), 水中爆発に曝された船舶構造とガスタービンの動的応答の数値

解析的調査 (GT-75987), ディーゼル電動とガスタービン統合システム (CODLAG) の作動特性のシミュレーション (GT-76029), 研究室環境下の実際の船用エンジンのための給気と排気の新しい手法 (GT-76043), 船用ガスタービンのためのタービン空力最適化デザインシステムの調査 (GT-76617), 軍艦用ハイブリッド電動動力プログラム (GT-76928), 水陸両用戦闘車両用ガスタービンエンジン燃焼用空気孔保護シュラウドの開発と試験 (GT-76945), 海軍の推進用クラッチの比較 (GT-77291) が発表された。

5. Coal, Biomass and Alternative Fuels : 石炭, バイオマス, 代替燃料

論文数は9件で、昨年より6件減少した。フレキシブル運転下のIGCCの性能予測 (GT-75198), タービンベースの熱電併給プラントのライフサイクル環境影響 (GT-76856), バイオ燃料混合の場合の排気 (GT-75136), バイオ液体燃料の利用 (GT-76759), 合成ジェット燃料の反応モデル (GT-76997), レーザー着火 (GT-77238), 燃料噴流の分裂 (GT-75945, GT-75950), ジェット燃料の熱安定性解析 (GT-76209) が発表された。

6. Cycle Innovations : 革新サイクル

論文数は12件で、昨年より27件減少した。デトネーション燃焼関係 (GT-75534, GT-76798, GT-76435), モデルベースガスタービン制御を用いたコンバインドサイクル発電所の起動最適化 (GT-76230), 空気分離ユニット付セミクローズド酸素燃焼コンバインドサイクルの性能 (GT-76218), 太陽熱-ガスタービンハイブリッドシステムの技術的経済的解析 (GT-77090), 太陽熱-ガスタービンハイブリッドシステムのオーバースピードの解析 (GT-76370), オフガス再循環によるMCFCマイクロガスタービンハイブリッドの性能拡張 (GT-76014), サイクル不確実性を考慮したハイブリッドシステム内の圧縮機不安定性解析 (GT-76504), 燃料噴射弁の番号付けとフィルム冷却を用いることにより超高効率ガスタービンエンジンの静翼ブレードの表面温度を低減する数値的研究 (GT-75967), インタークーリング再生コンセプトをベースとした可変再生サイクルの性能 (GT-76778), 燃焼後CO₂回収 (GT-77084) の発表があった。なお、航空用と小型ガスタービンは除外した。

7. Supercritical CO₂ Power Cycles : 超臨界CO₂ 発電サイクル

論文数は27件で、昨年より8件減少した。圧縮機について、数値解析 (GT-75102, GT-76943), 実験的診断 (GT-77026), インペラの相対速度比 (GT-75590), 圧縮機入口圧の影響 (GT-75182), 新ターボ圧縮機試験 (GT-77044) の発表があった。

また、タービン設計 (GT-75356, GT-76508), ター

ビンの軸力バランス (GT-76019), 圧縮機と冷却器における混合の影響 (GT-75568), CO₂へのガス混合の研究 (GT-76386), 熱交換器 (GT-75196, GT-76975, GT-77197), 燃焼器 (GT-75169, GT-75547, GT-75557, GT-77087), 高圧CO₂流の数値解析 (GT-75592), 臨界状態の流れのモデル開発 (GT-75934), テストループ (GT-75873, GT-76488), EUプロジェクトでの設計 (GT-75154), 集光型太陽熱用サイクル (GT-77106), 多相圧縮ポンプ (GT-77011) の発表があった。

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, 小型ガスタービンに関する「燃焼と燃料」の3件, 「設計, 開発と性能」の3件, およびターボ過給機に関する「性能とシステム」の2件, 「タービン」の9件, 「圧縮機」の6件である。総論文件数は23件で, 昨年から9件減っている。これ以外には「ベアリング」に関するチュートリアルが1件あった。

Ceramics Committeeが主催するテクニカルセッションでの発表件数は, セラミックス基複合材に関する「試験とモデリング」の11件と, 「要素と解析」の4件である。総論文件数は15件で, 昨年から5件増えている。これ以外にチュートリアルが2件あった。

1. 小型ガスタービン・小型ターボ機械

小型ガスタービンに関する「燃焼と燃料」のセッションでは, 数値解析的手法を用いたエアブラスト噴霧ノズルを有する液体燃料用希薄予混合予蒸発燃焼器の開発 (GT-75789), アンモニアを燃料とする低NO_x旋回流燃焼器の開発 (GT-75993) についての発表があった。また, 二燃料法においてバイオガス中のCO₂濃度をより高くするバイオガスの供給と燃焼に関する研究 (GT-76667) についての発表もあった。「設計, 開発と性能」のセッションでは, 小型遠心圧縮機を対象に関数同定問題に基づくデータ駆動型予備設計手法を提案し, その結果を1次元モデルの結果と比較することにより同手法の有効性を評価した研究 (GT-76349) と, 小型ガスタービンへの超臨界CO₂ブレイトンサイクルの適用可能性を調査した研究 (GT-76656) に関する発表があった。その他に,

8. Organic Rankine Cycle Power Systems : 有機ランキンサイクル発電システム

論文数は6件で, 昨年より1件増加した。ディーゼルエンジンの廃熱利用 (GT-75126), 二種類の熱源に対応 (GT-77129), 試験装置 (GT-75301), 作動媒体成分の影響 (GT-75442), クリアランスやラビリンスシールの影響 (GT-75612), ヘキサメチルジシロキサン超臨界圧の特徴 (GT-76260) の発表があった。

ノルウェーのKongsberg社における50年間にわたるガスタービン開発史を紹介する発表 (GT-75313) があった。

ターボ過給機に関する「性能とシステム」のセッションでは, 逆ブレイトンサイクルの有効性をタービンや圧縮機の入口温度をパラメータに調査した研究 (GT-75386), およびエンジンとの干渉を考慮した過給機の次元解析手法を提案し, その解析結果を実験結果と比較した研究 (GT-76470) について発表があった。「タービン」のセッションでは, 脈動流に関連する発表として, ダブルスクロールタービンにおける動的翼応力をエンジンの作動状態をパラメータに数値解析的に調査したもの (GT-76590) や, DESを用いてタービンの性能に排気マニホールドが及ぼす影響を調査したもの (GT-76706) などがあつた。冷却関係として, 数値解析的手法と実験的手法を用いてラジアルタービンの内部冷却技術を開発し, その効果を調査した研究 (GT-76378, GT-76384) の発表があつた。VGT (variable geometry turbocharger) 関係では, 従来に比べて可変部品を減らしたIGV (inlet guide vane) を提案し, それを軸流タービンとラジアルタービンに適用して性能試験を行った研究 (GT-77048) に関する発表があつた。その他に, 翼端間隙内における圧力勾配に起因する流れの運動量とそれと逆方向に流れるシュラウド壁面上の粘性に起因する流れの運動量の比を予測する手法に関する研究 (GT-76490) や, Diffuser-collector システムを備えた可変静翼を有する軸流タービンの過給機への適用性を調査した研究 (GT-75403) などについて発表があつた。「圧縮機」のセッションでは, 作動範囲の拡大に関連したもののとして, 圧縮機特性の安定性ならびにサージマージンを向上させ, さらに高流量作動点における効率と音響挙動への影響を最小化するポーテッドシュラウドケーシングトリートメントの開発 (GT-75033) や, 再循環ケーシングトリートメントの予備設計に用いるMean-lineモ

原稿受付 2018年8月1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

デルの開発 (GT-75717) などについての発表があった。また、その他に、異なる作動流体の性能試験結果を比較可能な性能評価パラメータを提案し、同パラメータにより空気へのCO₂の混合割合を変化させた複数の作動流体を用いた性能試験の結果を整理し、有効性を調査した研究 (GT-75747)、圧縮機入口側の配管形状がチョーク流量に及ぼす影響を実験的および数値解析的に調査した研究 (GT-76321)、2種類のポリユートの内部損失生成機構を数値解析的に調査・比較した研究 (GT-76694) などについて発表があった。

2. セラミックス

セラミックス基複合材 (CMC) に関する「試験とモデリング」のセッションでは、三種類のSiC/SiC CMCを対象に高温機械的性質と引張-引張疲労を調査した研究 (GT-75051)、SiC系CMCにおける剥離伝播を実験的および数値解析的に調査した研究 (GT-75571) について発表があった。また、SiC_f/SiCについては、室温と高温状態において疲労荷重下におけるSiC_f/SiC複合材内のひずみと破壊の分布をDIC (digital image correlation) 測定、電気抵抗測定およびAE (acoustic emission) 測定を用いて調査した研究 (GT-75791)、in-situ X線CTを用いて静的引張荷重下のSiC_f/SiC CMCを調査した研

究 (GT-75795) についての発表があった。エロージョン関係では、粒子速度200 m/sと300 m/sにおけるざくろ石粒子によるガスタービングレードCMCの壊食挙動を大気温度において調査した研究 (GT-75827) についての発表があった。その他に、セラミック強化材内部の荷重伝達を調査した研究 (GT-77068) と、室温と高温において酸化物系と非酸化物系のCMCにおける層間破壊特性を比較する理論の構築を試みた研究 (GT-77133) についての発表や、NAVAIR (U.S. Navy Naval Air Systems Command) プロジェクトで開発された Mode I CMC CGR (亀裂成長抵抗) 試験法の一つに対するASTM試験規格の開発 (GT-77147)、1482°Cでの作動を目標とした高温部材の開発が進められているTTT (NASA Transformational Tools and Technologies) プロジェクトにおける成果 (GT-77282) などについての発表があった。「要素と解析」のセッションでは、三次元織物SiC/SiC CMCを用いて製作した中実ペーンの実エンジン環境での試験結果 (GT-75446)、SiC/SiC CMCタービンペーンの実際の航空用ガスタービンで生じる衝撃現象に対する抵抗を調査した研究 (GT-76116)、SiC/SiC CMCの載荷中のin-situ損傷検出にマルチプローブDCPD (direct current potential drop) 法を用いた研究 (GT-75803) などについての発表があった。

5. ターボ機械の性能と流れ

5.1 軸流関係 5.1.1 ファン・圧縮機

山田 和豊*¹

YAMADA Kazutoyo

ファン・圧縮機関係では、13セッションが生まれ、45件の発表があった。国別の内訳は、中国からの発表が全体の約4割にあたる17件あり、次に、アメリカ7件、ドイツ6件、イギリス・カナダ4件であった。発表件数は昨年とほぼ同数で変化はなく、国別にみた割合についても昨年と同様であった。

クリアランス流れ関係については、ケーシングトリートメントおよびファン・圧縮機の安定性のセッションを含めて、3セッションであった。ケーシング近傍のクリアランス流れ場について、数値計算結果をもとに、絶対速度で描かれる動翼に相対的な限界流線を詳細に分析した研究 (GT-75916) があった。ケーシングトリートメント関係では、最高効率点近傍において、軸方向ケーシング溝がクリアランス流れに及ぼす影響をSPIVによ

る詳細な流れ場計測から調査した研究 (GT-77071) が発表され、同じ対象について大規模LES解析を実施して失速マージンおよび効率の変化についてその流動メカニズムを調査した研究 (GT-75040) が報告された。また、ケーシングトリートメント付き圧縮機について、翼先端隙間の増加による性能および失速マージンの変化を数値的に調査した研究 (GT-77203) があった。安定性に関するセッションでは、翼先端の負荷が異なる二種類のファンについて、実験的・数値的に失速初生から失速成長後における流動メカニズムを調査した研究 (GT-75153) が報告された。

端壁流れ関係は、流れ制御のセッションを含めると、クリアランス流れ関係と同じく3セッションが組まれていたが、発表のほとんどは中国からであった。多段圧縮機静翼のハブ側で発生したコーナーはく離に関して、その流れ構造および翼列干渉に伴う非定常挙動を大規模数値解析で詳細に調査した研究 (GT-76480) や、様々な拡散係数の翼に対してコーナーはく離の形成メカニズ

原稿受付 2018年7月30日

* 1 岩手大学 理工学部システム創成工学科機械科学コース
〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5
E-mail: kyamada@iwate-u.ac.jp

ムを解析するとともに、後縁隙間による流れ場の改善効果を調査した研究 (GT-76072) があった。コーナーはく離に伴う損失の低減に関して、スーピングジェット (GT-76052)、コンタリング (GT-76247)、渦発生装置と境界層吸い込み (GT-75520) などの効果が調査されていた。他に、前縁がコード方向に波形の翼やスタッキングがピッチ方向に波形の翼について、はく離制御効果を調査した研究 (GT-76147) が発表された。

設計関係は、最も多い4セッションが組まれていた。発表は最適設計を行った結果についてが多い。新しいコンセプトを調査した研究として、固定ストラットと可変フラップからなる入口案内羽根について、最適空力設計を実施した研究が発表された (GT-75489)。また、Adjoint法により最適化された三次元静翼について、その性能を実験的に検証した研究 (GT-76826) が発表された。ファン設計では、可変ピッチファンについて、逆スラスト状態での三次元流れ場の詳細が数値計算により調査されていた (GT-75739)。他に、インレットディストーションが安定性に及ぼす影響 (GT-76673) や前進スweep翼の試験結果 (GT-75562) などの研究発表が

あった。遷音速圧縮機の設計では、翼列内で生じる衝撃波と境界層の干渉に伴う非定常流動に関して調べた研究 (GT-75528) や、衝撃波干渉に伴うはく離についてバンブを用いた翼形状の最適化を実施した研究 (GT-77065) の発表があった。

性能および効率の更なる向上のために、設計空間拡大を目的としてタンデム翼が研究されている。タンデム翼の最適化を実施し、開発されたタンデム翼について詳細な実験を行った研究発表 (GT-75132) があった。二重反転ファンにタンデム翼を組み合わせ、圧力上昇や失速マージンなどの性能を従来の二重反転ファンと比較して数値的に調査した研究 (GT-75477) もあった。

製造時やエロージョンによる動翼の形状変化が性能に及ぼす影響に関して、支配的な形状因子をパラメトリックに調査した研究 (GT-75935) や、光学計測により実際に形状を再現してその影響を数値的に評価した研究 (GT-76340) があった。乱流と遷移のセッションでは、境界層遷移を調査するために制作された実験装置 (GT-76507) や、計測法 (GT-76573) などが紹介された。

5.1 軸流関係 5.1.2 タービン

松沼 孝幸*1

MATSUNUMA Takayuki

軸流タービンの空気力学の分野では、エンドウォール形状、翼先端漏れ流れ、低圧タービンの空気力学、非定常流れと遷移、空気力学研究、空力性能と設計の6セッションで33件の発表があった。発表件数は昨年35件と同程度である。筆頭著者で分類すると、地域別では、欧州17、北南米9、アジア6、豪州1の順で、国別では、米国8、ドイツ6、中国4、イタリア3、英国2、日本ほか1と続く。研究手法は、CFDと実験14件、実験のみ10件、CFDのみ9件と分類される。CFDでは、RANSが17件 (うちURANSは1件)、LESが8件で使われている。RANSでは、 $k-\omega$ SST乱流モデルが7件、 γ -Re θ 遷移モデルが5件で適用されている。CFDと実験を組み合わせた研究は、様々な流れ場で計算と実験の比較による解析精度の検証を行っている。CFDのみの研究は、境界層の剥離・遷移、乱流スケールなどのLESが比較的多い。実験のみの研究は、能動制御や受動制御、遷音速領域での翼後縁の放出渦、境界層の剥離・遷移、翼表面粗さの影響など、CFDでは解析が難しい流れ場の詳細な計測を

行っている。低圧タービン関連の15件では低レイノルズ数域での剥離・遷移の研究が多く、高圧タービン関係の11件では上流の不均一流れや壁面のパージ流れの影響の研究が多い。翼形状は、環状翼列 (13件) よりも直線翼列 (18件) を使った研究が多い。ほとんどが亜音速流れの研究である中で、2件の遷音速流れの研究 (翼先端からの漏れ渦、翼後縁からの流出渦) は特に興味深かった。**エンドウォール形状** 数年前に流行した非軸対称エンドウォールの研究は、高解像度LDV計測 (カールスルーエ工科大学, GT-75061)、設計と最適化、二次流れ損失 (西北工業大学, GT-76070, 76159) の3件であった。

翼先端漏れ流れ 流入渦と漏れ流れの空力干渉 (北京大学, GT-75138)、シユラウド形状の影響 (ロシア・リュリカ設計局, GT-75416)、DBDプラズマアクチュエータによる漏れ流れ抑制 (産総研, GT-76680)、ボルテックスジェネレータによる漏れ流れ遮断 (ペンシルベニア州立大学, GT-76994) の4件が発表された。

低圧タービンの空気力学 高マッハ数の翼先端の漏れ流れ (ミュンスター応用科学大学, GT-76366) は、衝撃波の発生する流れ場における翼先端漏れ流れの挙動を明らかにして、従来の亜音速での漏れ流れ研究とは異なる新しい研究であった。その他、乱流スケールの

原稿受付 2018年7月5日

*1 (国研) 産業技術総合研究所

〒305-8564 つくば市並木1-2-1

E-mail: t-matsunuma@aist.go.jp

効果 (ハノーファー大学, GT-75162, 75163), CFDによる二次流れの予測 (ワルシャワ工科大学, GT-75673), 粗さのモデリングと境界層遷移・損失への影響のLES (サウサンプトン大学, GT-75796), 低レイノルズ数での剥離予測への乱れ度とレイノルズ数の利用 (バイラー大学, GT-75976), エンドウォール流れのLESとRANS (メルボルン大学, GT-76233, フローレンス大学, GT-76450), 二次流れへの境界層内側の影響 (フィレンツェ大学, GT-76737), 境界層へのパルス吹き出しの干渉現象 (ミュンヘン連邦軍大学, GT-75475) が発表された。

非定常流れと遷移 最も注目を集めていたのは、遷音速翼の後縁損失における渦放出の役割 (ケンブリッジ大学, GT-75707) で、シュリーレン法による可視化と全圧プローブによる損失計測から、非定常な衝撃波が発生する流れ場を詳細に調べて、異なる後縁形状の影響を明らかにした。他には、バイパス遷移への熱的影響 (VKI, GT-75676), 圧力勾配と熱伝達のある剥離境界層のLES (北京航空航天大学, GT-76338), フルイディックオシレーターによる境界層制御 (ミュンヘン連邦軍大学, GT-76174), タービン出口ケーシングの二次流れと損失への表面粗さの影響 (チャルマース工科大学, GT-75541), 低主流乱れ条件の可変速パワータービン翼

列のLES (オハイオ州立大学, GT-77120) が発表された。
空気力学研究 タービン翼列の製造変位量の空力的・機械的解析 (ハネウエル, GT-75536) は、3Dスキニングで翼の製造誤差を実際に計測し、空力性能と構造に及ぼす影響を調べていて興味深い。その他には、ハブとシュラウドにパージ流れのある高圧タービン動翼の定常CFD (グラーツ工科大学, GT-75642), 翼列の入口・出口での全温の再配分 (ノートルダム大学, GT-77281), ターボポンプ推進タービンでの単相・多相流れの比較 (ブラジル航空工科大学, GT-76879), 静翼-動翼キャビティのシーリング効果の計測 (ペンシルベニア州立大学, GT-77105), 様々なリムシール形状とパージ割合での上流キャビティのある翼列のCFD (CERFACS, GT-76615), 高圧タービン用シュラウドCMC動翼 (N&Rエンジニアリング, GT-76827) が発表された。

空力性能と設計 燃焼器ライナー冷却・スロットフィルム冷却・エンドウォールコンタリングのある第1段静翼流路の空力計測と解析 (ミネソタ大学, GT-76345), 中圧タービンの設計 (ペーカー・ヒューズ, GT-76036), 表面曲率・勾配に基づく随伴を用いた高圧タービン動翼の高信頼性品質評価 (ロールスロイス・インド, GT-75157) の3件が発表された。

5.2 遠心関係

玉木 秀明*¹
TAMAKI Hideaki

遠心関係では、7テーマ、10セッションが生まれ、31件の発表があった。内訳は、欧州から16件 (英国5件, 独4件, 仏3件など), アジアから11件 (中国5件, 日本4件など), 北米から4件 (米国3件など) であった。遠心圧縮機については、作動域の拡大を目的とした研究・開発および、失速・サージ現象の理解に関するものが多数を占めている。また、CFDや実験結果を詳細に分析し、低次元性能予測モデルの開発、改善の試みも多く見られた。なお、失速・サージ現象については、Unsteady Flows in Turbomachineryでも発表されているので、そちらも参照して頂きたい。31件の発表の内、ラジアルタービンの発表件数は7件であった。この内6件が斜流、ラジアルタービンの設計法に関するもので、他1件は、過給機用軸流タービンの開発に関するものであった (GT-75453)。ラジアルタービンについてはMicroturbines, Turbochargers and Small

Turbomachines (3セッション, 11件) で数多く取り上げられているが、ここ数年、多数取り上げられていた脈動流下におけるタービン性能に関する研究は数を減らしている。これは、過給機に関する国際会議 (IMECHE主催 Turbocharger and Turbocharging) がTURBO EXPOの1か月前に開催され、そちらの方へ、論文が流れたことが影響している可能性がある。遠心圧縮機の作動域拡大の試みとしては、最高圧力比が2レベルの産業用遠心圧縮機に対する入口循環型ケーシングトリートメントの有効性をCFD、実験の両面から検討したもの (GT-76461), 羽根付きディフューザからの境界層吸出し (GT-75365), シンセティック・ジェット (GT-76330) の有効性をCFDにより検討したものがあった。また、圧縮機失速点近傍でインペラ入口に現われる再循環流とIGVとの干渉を利用した作動域拡大 (GT-75097), 作動域と高効率を両立させる上で、好ましい方法であると考えられている羽根付きディフューザとインペラのマッチング手法を小ソリディティ、羽根無しディフューザまで拡張した (GT-75902) 発表があった。失速・サージ現象に関するものとしては、遠心圧縮機に対

原稿受付 2018年7月26日

*1 (株)IHI 技術開発本部

〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番地

E-mail: hideaki_tamaki@ihi.co.jp

しても軸流と同じスパイク・ストールへ至る流れの構造が存在するか、ポリュートはそれに対してどのような影響を及ぼすかをCFDと実験結果を併用し明らかにしたもの (GT-75765), 過給機圧縮機下流の吸気バルブによる背圧変動と圧縮機の作動域の関係についてCFDをベースに調べたもの (GT-76851) があった。低次元性能予測モデルの開発および改善については, パイプディフューザの性能予測に対して境界層積分方程式を適用したもの (GT-76231), インレット・ディストーションが仕事係数, 効率変化に及ぼす影響について実験データをベースに, Reduced Frequencyとの関係に落とし込もうという試み (GT-75494), すべり係数を予測するためのThree-Zone Modelの提案 (GT-75324), 低流量側における圧力特性 (P-Q) 曲線の負勾配と減速率, インシデンス等のパラメータとの相関を調べたもの (GT-75096) があった。また, 作動域拡大, 低次元性能予測以

外では, インペラの翼端隙間を意図的に変化させ, その影響を調べたもの (GT-75345, GT-76837), PSPを用いた圧力計測 (GT-76837, GT-76267), 単段圧縮機でエコマイザー・サイクルを実現しようとする冷凍用圧縮機の開発 (GT-76967), 大容量産業用圧縮機の開発 (GT-75024) の発表があった。タービンについては, ラジアルタービンの初期設計で利用されるRodgers & Geiserのチャート (軸流タービンのSmithチャートに対応するもの) のアップ・デート (GT-75533), 過給機用斜流タービンのコーン角, 羽根角とタービン性能, 慣性モーメントとの関係, および, エンジンの加速特性に着目した両パラメータのトレード・オフ設計に関する発表 (GT-75096) があった。タービンノズル関連では, 等角写像を用いたベーン設計の提案 (GT-75013), ソリディティと翼厚さが, 流れ場とタービン性能に及ぼす影響を調べたもの (GT-75107) があった。

5.3 非定常流れと数値流体力学

鈴木 正也^{*1}

SUZUKI Masaya

1. 概要

非定常流れについては, 全10セッション, 38件の発表があった。昨年の8セッション31件と比較するとやや増加傾向にある。国別では, 中国11件, ドイツ7件と2か国で半数を占めた。日本からは2件の発表があった。数値流体力学については, 全15セッション, 55件の発表があった。昨年の13セッション58件と比較すると, ほぼ横ばいを見てよさそうである。国別では, 英国11件, ドイツ9件, 米国8件, 中国7件, フランス7件が大多数であり, 残念ながら日本からの発表はなかった。

2. 各セッションの動向

2.1 Unsteady Flow in Turbomachinery

例年通りの傾向と思われるが, 圧縮機のストール・サージ, 動静翼干渉に関する研究例が多数見られた。他には, 翼端漏れ流れやキャビティに着目した研究も関心が強かったように思われる。

研究手法については, 実験を主体とした研究は10件程度で, CFDを用いた研究が多かった。乱流の取り扱い, LESが6件, DESやSAS等のRANS/LESハイブリッド系が7件, RANSが17件であり, 思いの外RANSが多

用されていた。実験やRANSはどちらかと言えばパラメトリックな研究に使用され, ハイブリッドやLESは限られたケースの現象解明や解析手法そのものを対象とした研究に適用される傾向が見られた。また, POD等を活用してデータを低次元に縮約することで現象を理解しようとする試みが増えているようだ。

LESの例では, 圧力計測用のキール管を埋め込んだタービン翼を構造格子で解像し, wall resolved LESにより解析した研究 (GT-77012) やリムシール流れをレベルセット法と直交格子を組み合わせてMILESで解析した研究 (GT-75022) があった。ハイブリッド系では, 遠心圧縮機のストール (GT-75462) やディスクキャビティ流れ (GT-76327) をDESにより解析した研究が発表された。

2.2 Design Methods & CFD Modeling for Turbomachinery

設計手法に関しては, ミーンライン法とスルーフロー解析による翼列設計やネットワークを利用した冷却流れ設計を基本としつつ, チョーク付近の予測 (GT-75362), 幅広い作動条件への対応 (GT-75394), スミスチャートの改善 (GT-75845) 等の取り組みが見られた。

動静翼干渉を低コストに解析可能な方法としてハーモニックバランス法が着目されているが, やはりドイツからの発表が際立っていた (GT-75495, 75626, 76703, 76749)。また, 高コストなURANSを避けて定常RANSを巧みに使用した研究 (GT-75115), 混相流計算を単

原稿受付 2018年7月23日

*1 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
航空技術部門
〒182-8522 調布市深大寺東町7-44-1
E-mail: suzuki.masaya@jaxa.jp

相流計算とモデルの組み合わせで代替した研究 (GT-75194) 等の工夫がなされた発表があった。

High-Fidelity CFDに関しては、LESが11件、ハイブリッドが3件で、非定常流れのセッションとは内訳に違いがあった。4年間かけて基礎的な流れから多段圧縮機までLESの計算手法を比較した研究 (GT-75523) は興味深かった。ハイブリッドに関しては、Enhanced

DDES-SA, SST-DDES, SST-SASを比較した研究 (GT-75047), SSTとRSMに基づくURANSとSASを比較した研究 (GT-76537) があり、各種法の優劣が部分的ながらも評価されていた。その他、エンジン全体解析のため、RANS, NLH, LESをカップリングした研究 (GT-76870) は目新しかった。

6. 伝熱関係

堀内 豪*¹

HORIUCHI Takeshi

酒井 英司*²

SAKAI Eiji

1. 伝熱全体*¹

伝熱セッションにおける論文数は183編 (チュートリアルセッションは除く) あり、例年通りターボ機械に次いで2番目の数であった。伝熱委員会単独のセッションが136編、ターボ機械・燃焼委員会との共同セッションがそれぞれ35編、12編あった。例年通り論文数が多かったフィルム冷却と内部冷却を中心に、主要カテゴリーの動向を以下に紹介する。

2. フィルム冷却*²

フィルム冷却は、最も発表件数の多いカテゴリーで、18のセッションから59件の発表があった。フィルム冷却効率への種々の因子の影響として、主流の流速変動 (GT-75836, GT-75440), 内部流 (GT-75389, GT-76904, GT-76268), 内部冷却流路におけるリブの向きや配置 (GT-75794, GT-75857) の影響が調べられた。孔形状によるフィルム冷却性能向上として、シェイプト孔の複合角度 (GT-75726), 丸孔をベースにした孔形状 (GT-76380), Y字孔 (GT-75992), 遺伝的アルゴリズムで選択された孔形状 (GT-75439), 波状トレンチ (GT-75173), トレンチ内への後方吹出し (GT-76676) などについてフィルム冷却効率や熱伝達率が調べられた。

Additive Manufacturing (AM) 関連では、Tree構造を有する孔の冷却性能が調べられ、単孔に比べて50%以上の冷却性能の向上と、分岐を増やすことでさらなる温度低下が期待できることが報告された (GT-75918)。AMで製造したポーラスメディアの流量係数 (GT-75019) や冷却効率 (GT-76166) が調べられた。また、Sweeping Jetを翼背面に適用し、フィルム冷却効

率や熱伝達率、全圧損失をシェイプト孔と比較した研究 (GT-77099) や、表面粗さや閉塞率の不確かさを考慮した猫耳孔の多目的ロバスト最適化についての報告 (GT-76424) があった。

プラットホームにおけるフィルム冷却効率に関しては、流入角 (GT-75037), フィレット形状 (GT-76316), 孔配置 (GT-75272), 吹出し角度 (GT-75877), 3D壁 (GT-76844) の影響が調べられた。

数値解析手法に関しては機械学習によってRANSの乱流モデルの精度向上を目指した研究 (GT-75444, 76927), 実験手法に関しては、フィルム冷却構造の解明を目的に、3D PIV (GT-75411), ハイスピードPIV (GT-76458), MRTやMRV (GT-76874) を用いた報告があった。

3. 内部冷却*¹

内部冷却は、全9セッションで計34件 (実験: 19件, 解析: 15件) の発表があった。また、その他のTrackにも内部冷却を対象とする発表があったため、これらを含めて最新動向を紹介する。

新しい冷却手法として、ダブルウォール内に設けたSloping Sheetの伝熱特性に関する数値解析 (GT-76625), タービン静翼の前縁部に適用されたSweeping Jetによるインピンジメント冷却の伝熱特性計測 (GT-77073) などの報告があった。AM関連では、Adjoint法を用いた波形マイクロチャネルの形状最適化と伝熱特性の計測 (GT-75429) やダブルウォール冷却流路内のWall Jetに関する研究 (GT-77000) があり、これらはAMで製作したテストピースを用いて伝熱試験を実施していた。

回転効果に関する研究としては、コリオリ力の影響を低減させるサーペンタイン流路内部の熱伝達率計測 (GT-76684, 76689) に関する報告があった。また、実機の内部冷却流路を模擬した拡大試験モデルを対象に、PIV計測 (GT-75715), 熱伝達率分布計測とPIV・油膜法による流れの可視化, RANS解析 (GT-76225), 熱伝達率分布・圧力損失計測 (GT-77217, 77218) によって、

原稿受付 2018年7月13日

* 1 川崎重工業(株) 技術開発本部 技術研究所

〒673-8666 明石市川崎町1-1

E-mail: horiuchi_takeshi@khi.co.jp

* 2 (一財) 電力中央研究所 エネルギー技術研究所

〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1

E-mail: e-sakai@criepi.denken.or.jp

詳細に伝熱特性を調査している研究もあった。その他には、MRIを使用した冷却流路内部の流れ場計測 (GT-76409, 76741) や既存冷却翼の冷却効率向上のための最適化 (GT-75616) などの報告があった。

4. 伝熱一般*²

伝熱一般では、9つのセッションで28件の発表があった。プラットホームの熱伝達率低減に対する渦発生デバイスの効果 (GT-75176)、主流乱れ度が翼腹面の熱伝達率に及ぼす影響をLESにより詳細に調べたもの (GT-77135) などがあった。ピオ数を合わせた円筒前縁モデルの実験により、インピンジメント冷却の効果は小さく、フィルム冷却孔内の対流伝熱とフィルム冷却が支配的であることが報告された (GT-75334)。

5. 燃焼器壁*²

燃焼器関連では、4つのセッションで13件の発表があり、フィルム冷却の熱的モデルを用いた燃焼器CHT解析 (GT-76779)、CHT解析と感温塗料による計測結果との比較 (GT-76578) などがあった。なお、燃焼器ライナーのインピンジメント冷却についてレビュー記事がまとめられており有用である (GT-76335)。

6. Conjugate Heat Transfer*¹

全2セッションで計7件の発表があった。論文数は昨年と同様であり、Heat Transfer Committee 内で1つのTrackとして独立してからは最少であった。発表は

タービン冷却翼に関するものが最も多く、実機翼を対象にした計測温度との比較による予測精度の検証 (GT-75649) や冷却改良の検討と実験的検証 (GT-75669)、冷却効率におけるフィルム効率とピオ数の影響に関する数値解析 (GT-76162)、各種冷却方式やフィルム空気吹き出し方向の組合せによる複数のダブルウォール冷却構造に対する冷却効率計測 (GT-77230) の報告があった。また、燃焼器のライナー冷却を対象に、ターゲット面に設けたリブやピンフィンがインピンジメント伝熱に与える影響を調査した研究 (GT-76969) もあった。その他には、蒸気タービンの急速起動・停止過程の非定常解析を念頭に、従来よりも低い計算コストを実現するための新しいAdaptive Time Stepping手法の提案と検証 (GT-75740)、AMで製作した小型熱交換器の伝熱特性計測 (GT-75991) が報告されていた。

7. ロータ内部流れ*¹

二次空気系とシールは、全11セッションで計35件の発表があった。全体的な印象としては数値解析による研究発表が多く、その約半数が非定常解析による研究であった。例えば、格子ボルツマン法を用いた大規模LES解析による回転キャピティ内の対流熱伝達に関する研究 (GT-76832)、WMLESモデルを適用したLES解析による予旋回ノズルの流れ場に関する研究 (GT-75112)、LES・URANS解析によるリムシールの流れ場に関する研究 (GT-75116) などが挙げられる。

7. 燃焼および燃料関係

浅井 智広*¹
ASAI Tomohiro

1. 概要

燃焼、燃料および排出物 (Combustion, Fuels & Emissions) の分野では、論文セッションが33、パネルセッションが2、チュートリアルセッションが4の計39セッションが開催され、発表件数は論文発表130件、パネル発表10件、チュートリアル発表5件の計145件であった。これは米国開催であった昨年の発表件数172件より少ないが、昨様が特別多かったため、例年の件数に戻った。論文発表の筆頭者の所属を国別に分類すると、

アメリカが40件と最多で、次いでドイツ23件、イギリス13件、中国11件、フランスとカナダともに7件、スイス6件であり、日本は3件であった。昨年はドイツが最多だったが、今年はアメリカが最多となった。アジアでは中国が最多の11件に対し、日本は3件と少なかった。来年は日本からも多くの発表を期待する。

論文発表を主なテーマ別に分類すると、「燃焼力学」が10セッション・38件と例年通り最多で、次に「燃焼器の設計・開発」が4セッション・19件、「燃焼モデリング」が3セッション・10件、続いていずれも2セッションの「環境汚染物質の形成・制御」、「交差噴流・旋回流」、「新燃焼方式」、「着火・自着火」、「逆火・吹き消え」であった。また「高濃度水素燃焼」と「微粒化と噴霧」からともに4件の発表があった。

今年の特徴は、圧力ゲイン燃焼という新しいテーマの

原稿受付 2018年7月20日

*1 三菱日立パワーシステムズ(株)
ターボマシナリー本部ガスタービン技術総括部 中小型ガスタービン技術部 中小型ガスタービン設計開発グループ
〒312-0034 ひたちなか市堀口832-2
E-mail: tomohiro3_asai@mhps.com

論文・パネル・チュートリアルセッション、さらに高サイクル燃焼不安定のパネルセッションが開催された点である。これらのテーマへの関心の高さを表しており、今後、主要なテーマのひとつになっていくと考える。また、昨年に引き続き、チュートリアルセッションも多く5件開催された。このような講義は、初めての参加者や本分野に携わって日の浅い参加者にとって有益であり、本分野の技術レベル向上のため、今後もチュートリアルセッションを続けてほしい。

毎年、各分野の会合が開催され、その分野の主要な方々が多数出席して、今年の論文の傾向や来年のテーマについて議論される。この会合には誰でも出席でき、本分野の主要な方々と議論できる良い機会となるため、来年参加する人は本会合にもぜひ出席してほしい。

2. 個別セッション

2.1 燃焼力学 (Combustion Dynamics)

例年、このセッションの発表件数が最も多く、本分野の一大セッションである。内容は主に燃焼不安定現象の解明、不安定性解析、モデリング、振動制御から構成される。

燃焼不安定現象の解明では、レーザ計測により火炎挙動を調べた研究 (GT-75304, 75427, 75554, 76105, 76963, 77051) が報告された。不安定性解析やモデリングでは、解析とレーザ計測により火炎伝達関数を調べた研究 (GT-75146, 75460, 75529, 75559, 76381) が報告された。振動制御では、ヘルムホルツ共鳴器 (GT-75070) や多孔ライナ (GT-75406, 75689, 75837, 76318) を用いた受動制御、アクチュエータ (GT-75408) や音響スピーカー (GT-75472) を用いた能動制御、さらにマルチノズル燃焼器の燃料ステージング方法による振動抑制効果を調べた研究 (GT-75423) が報告された。また、GT-77034, 77101では再熱燃焼器で発生する高サイクル燃焼不安定の研究を目的に、モデル燃焼器を設計・製作し、その試運転結果が報告された。今後、この燃焼器を用いた高サイクル燃焼不安定の様々な研究成果が報告されると考える。

2.2 燃焼器の設計・開発

(Combustor Design & Development)

これまで本セッションでは、ガスタービンの標準的な燃料である天然ガス焚きの燃焼器の発表が中心であり、多種燃料を対象にした燃焼器の発表は燃料多様化のセッションに分類されていたが、今年は本セッションの30%

強が燃料多様化関係の発表であり、燃料多様化対応燃焼器がより一般的になりつつある。

本セッションは主に運用性向上と燃料多様化の二テーマに大別される。運用性向上は、燃料ステージングの改良 (GT-77248) や抽気空気循環システムの適用 (GT-75876) が報告された。燃料多様化は、水素含有燃料 (GT-76374, 77164)、石油ガス (GT-75891, 76374)、天然ガスと不活性ガス (N_2 や CO_2) の混合ガス (GT-76234, 77164)、アンモニア (GT-75993) 焚きの燃焼器開発が報告された。特にGT-75891は、同一バーナ構造で天然ガスと石油ガスの両方の燃焼が可能なデュアルガス焚きドライ低 NO_x 燃焼器の開発が報告され、燃料多様性の拡大の点で重要と考える。また、最近は天然ガスに不活性ガスが混合した燃料を対象にした報告が増加した。GT-75701は運用性向上と燃料多様化の両方の内容を含み、外部からの熱供給が不要な自己熱改質により天然ガスを H_2 含有ガスに改質し、それを利用することでCO排出を低減し、低負荷の運転範囲の拡大を図った研究であり、本システムのコンセプトも提案している点で興味深い。

2.3 燃焼モデリング (Combustion Modeling)

本年度も数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics : CFD) を用いた研究が多数報告された。本セッションでは、Large Eddy Simulation (LES) を用いた報告が半数以上を占めた。その中でガス燃料でのLES燃焼解析 (GT-75601, 76216)、実燃焼器体系の油噴霧解析へのLES適用事例 (GT-75131, 75329, 76125) が報告された。特にGT-75601では予混合燃焼と拡散燃焼をシームレスに解析できるモデルが報告された。その他のセッションでも、非定常性の強い燃焼振動 (GT-76434) や逆火 (GT-76229) について、LESを適用して現象解明に取り組む傾向がみられた。

2.4 圧力ゲイン燃焼 (Pressure Gain Combustion)

圧力ゲイン燃焼とは、爆ごう (デトネーション) 等を利用して、燃焼室内の全圧を入口流の全圧よりも上昇させる非定常現象を意味し、上昇した全圧が初期圧力に膨張する際に仕事を取り出すことができる。この燃焼形態は高効率、低燃費、低 CO_2 排出などの利点がある。

チュートリアルセッションでは会場が満席になるほど盛況で、参加者の関心の高さがうかがわれた。論文セッションでは、回転デトネーションエンジンの研究 (GT-75534, 75878, 76798, 77258)、パルスデトネーションエンジンの研究 (GT-75510, 76842) が報告された。

8. 制御と診断

佐藤 眞一郎*¹
SATO Shinichiro

1. 全般

制御と診断関連では、8セッションで30件の発表（昨年比7件減）と関連セッションがあった。分野別の発表数は、制御が7件、診断が13件、計測が10件だった。国別にみると、アメリカ・ドイツ・中国・イギリスがほぼ同数で、合わせて全体の8割を占めた。今年の傾向は、「データやエンジンモデルを活用した診断と保守を、技術と商業の両面から考える」と要約できる。

制御分野と診断分野を通じ、エンジンのモデル化の手法において物理則またはデータを基にした場合の双方の優位性について、個体への適応や過渡変化での精度を題材に活発な議論がみられた。計測分野では、カメラや電磁誘導型センサを利用し、目視では発見が難しい微細な異常を簡単な観察で検出する技術が紹介された。また、パネル・セッションとチュートリアル・セッションでは、エンジンの運用で得られる大量のデータの活用について各社のアプローチが紹介された。以下、個別に報告する。

2. 個別セッション

2.1 制御分野

制御分野は、2セッションで7件の発表があった。例年みられた電動化の話題はなく、エンジンモデルおよび他分野横断の技術の発表が主だった。エンジンモデルの研究では、半陰解法を用いて精度を維持しつつ時間刻みを大きくした研究（GT-75353）、回転軸を低次の物理則でその他の部位をデータでモデル化した研究（GT-75847）、データに基づくエンジンモデルで予測制御をした研究（GT-75860）があった。他分野横断の研究では、低圧タービン翼負圧面のはく離制御に関する研究（GT-75128）、圧縮機の性能マップを多項式近似した研究（GT-76399）、定容サイクル向けの燃料間欠噴霧バルブ列制御に関する研究（GT-75295）があった。

2.2 診断分野

診断分野は、4セッションで13件の発表があった。例年通り、異常値検出の参照値としてのエンジンモデルの発表が主だった。エンジンの劣化に着目した研究では、経時変化を加味して整理したデータに基づくエンジンモデルでエミッションを予測した研究（GT-76650）、タービン効率を指標に翼洗浄の時期を最適化した研究（GT-75267）、センサ値の経時変化を加味して6種の診断理論

の性能を比較した研究（GT-76647）があった。過渡変化に着目した研究では、タービン翼後端損傷時に一時的に圧縮機出口温度が上昇する現象を物理則でモデル化した研究（GT-75374）、センサ値を周波数解析しノイズの影響を抑えてセンサ故障を検出した研究（GT-75229）があった。データに着目した研究では、7つの産業用ガスタービンの測温データから参照データ群を作成しセンサ値の異常を検出した研究（GT-75286）、データに基づくエンジンモデルと、圧縮機マップを線形化して組込んだ物理則に基づくモデルの精度を比較した研究（GT-76630）があった。その他、物理則に基づくエンジンモデルに主要部位の単独の故障を模擬した入力で結果をライブラリ化しエンジン故障を検出した研究（GT-76414）、エンジンモデルに主要部位の複数の故障を模擬した入力で結果をライブラリ化し故障の原因究明を自動化した研究（GT-75540）が会場の注目を集めた。

2.3 計測分野

計測分野は、2セッションで10件の発表があった。例年より画像解析の話題が多くみられた。カメラの画像解析によって、翼面上に投影した幾何パターンから翼の変形を検出した研究（GT-76793）、排気密度分布を算出しホットセクションの冷却不足やクリアランス拡大を検出した研究（GT-75384）、コーティングを施した壁面へのレーザー照射と組み合わせ1700Kまで測温した研究（GT-75293）があった。また電磁誘導型センサで、翼の振動を検出した研究（GT-76657）、潤滑油内のデブリの質量を計測した研究（GT-75224）があった。その他、軸に縞模様のテープを貼り光学センサで角速度を計測し軸の振りモードを検出した研究（GT-76406）、タービンケースの熱伝達率を主流全圧から推定した研究（GT-76906）、火山灰にプラズマを照射し粒子の大きさを計測した研究（GT-77137）、熱電対がさらされる環境温度別に外皮の残厚をデータベース化した研究（GT-76221）があった。

2.4 パネル・セッション

パネル・セッションでは、P&W社、MTUメンテナンス社、Air France Industries社、Strategic Power Systems社からパネラーが登壇し、ガスタービンの運用で得られるデータの使用方法について活発な議論が交わされた。パネラー全員の共通認識は次の3点に要約される。

- ・大量のデータを設計担当者や保守担当者が利用しやすいよう整理するフレームワークに投資が必要である。
- ・データの所有権はメーカーではなく製品の顧客に帰属する。他の顧客とのデータ共有方法の構築は業界とし

原稿受付 2018年7月19日

* 1 (株)本田技術研究所 航空機エンジンR&Dセンター 開発室
〒351-0193 和光市中央1-4-1
E-mail: shinichiro_sato@n.n.rd.honda.co.jp

での課題である。

- ・ガスタービンのデジタル化に近年巨額の投資が行われており、市場の有望性やデータ利用の効率化という点で理解できる。一方で、現実には人的能力の限界や製造能力の限界があり、十分な投資効果が得られるかは慎重に見極める必要がある。

2.5 チュートリアル・セッション

チュートリアル・セッションでは、GE Global Research社によるデジタル・ツインの講義が行われた。講師はまず、「デジタル・ツイン」の同社での定義を「学習機能

付の物理則」と定めた。次に、デジタル・ツインの導入により保守回数が減り顧客は稼働時間の拡大を、メーカーは保守コストの削減ができ双方にとって金銭的メリットがあると強調した。続いてデジタル・ツインの開発史が紹介された。技術進展のきっかけは、00年代に高速通信網が整備され個体の常時モニタリング環境が整ったことで、10年代前半にはエンジンモデルが高度化し寿命予測の精度が高まり、個体への適応も可能になった。現在では個体の運用条件ごとに保守時期の最適化を行っている。

9. 材料、構造および製造技術

浅井 邦夫*¹
ASAI Kunio

1. 全般

材料、構造および製造技術の分野では、製造と冶金 (Manufacturing Materials and Metallurgy) から27件、構造とダイナミクス (Structures and Dynamics) から108件 (ロータダイナミクス、シールは除く) 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19件、新設計手法が11件、確率論的手法が13件、空力振動および減衰が24件、構造力学・振動および減衰が41件である。筆者が主に出席した積層造形 (AM)、疲労・破壊および寿命予測に関するセッションの発表内容について概説する。

2. 積層造形

キーノート、チュートリアル、2件のパネルセッション、20件以上の技術発表があり、急速に開発が進むAMに高い関心が寄せられていた。ガスタービン部品へのAM適用に関する将来予測 (GT-76686) では、製造技術ごとに造形可能な寸法や適用材料を整理した一覧が紹介された。AM材の静的強度は casting 材と同等である場合が多いが、疲労強度の低下が課題である。例えば、粉末床溶融結合 (PBF) で造形したTi-6Al-4Vの高サイクル疲労 (HCF) に関する発表 (GT-75978) では、造形後にHIPや熱処理、表面研磨をしても、表面近傍の100 ~ 200 μm のボイドが起点となり疲労強度のばらつきが大きいとの報告があった。分解能50 μm のCT検査では前述したボイドが試験前に検出できなかったとの報告があり、非破壊検査の精度向上が課題である。

AMにより設計自由度が増えるため、従来の切削加工では実現できなかった特殊構造の特性を確認した報告が多数あった。例えば、PBFで試験体内部に未焼結部を残すことにより、バルク材に対して約10倍の高減衰化を図った報告 (GT-75977) や、ラティス構造の採用により casting 材に対して比強度 (破断強度/質量) が1.69倍になったとの報告 (GT-75904) があった。熱伝達のセッションでは、AMで製造した特殊構造の冷却性能や流量係数などに関して5件の発表があった。冷却孔の表面粗さに着目して、フィルム冷却による冷却効率と流量係数を実験的に検討した発表 (GT-77287) では、表面粗さが大きいと流路面積が低下して、流量係数が低下したとの報告があった。選択的レーザー焼結法 (SLS) によるポーラス状構造の浸出冷却性能が、フィルム冷却より高いことを実験的に示した報告 (GT-76166) があった。

コーティングへのAM適用例として、指向性エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition) により造形した酸化物分散強化コーティングの熱サイクル寿命は、一般的なTBCより長寿命であり、薄く耐久性のある酸化アルミナ層が強度向上に寄与したとの報告 (GT-76274) があった。

3. 疲労、破壊、クリープ

タービン材料の熱疲労に関する研究では、試験体に急激な温度差を付与して熱応力を発生させる試験装置の開発に関する報告があった。例えば、円筒状試験体の外面を高出力のハロゲンヒータで加熱して内面を圧縮空気冷却する装置の開発 (GT-76519) や、火炎による急速加熱と高速圧縮空気による冷却機構を備えた装置を開発して、TBC剥離寿命を評価した報告 (GT-77283) があった。TBC剥離寿命は、トップ/ボンドコート境界温度だけでなく、板厚方向の温度差に大きく依存したとの報

原稿受付 2018年7月18日

* 1 三菱重工(株) 総合研究所 強度・構造研究部 強度第二研究室
〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1
E-mail: kunio_asai@mhi.co.jp

告がされた。

低サイクル疲労 (LCF) に関して8件の発表があり、画像相関法で計測したひずみエネルギーによりLCF寿命を評価した報告 (GT-76973), Ni基DS材の逆位相条件での熱機械疲労 (TMF) に関する報告 (GT-77224), 単結晶材 (SC) の確率論的なTMF評価 (GT-75927) があった。タービンノズル材MAR-M24を対象に, Chabocheの構成式を適用して, ラチェット変形や繰返しに伴う応力-ひずみ挙動の変化を評価した報告 (GT-75974) があった。J積分によりLCFき裂進展速度を評価した研究 (GT-77059) では, Haynes230は500°C以上, フェライト鋼は300°C以上でき裂進展速度が急増したとの報告があった。

Ni基単結晶材の1186Kにおけるクリープ速度が, 起動停止を模擬した繰返し負荷・除荷波形の重畳により増加したとの報告 (GT-75813) があった。起動停止の増加に伴い, LCFだけでなくクリープ速度についても負荷波形効果の考慮が必要になりうる。また, タービン翼連結部を対象に, ステライト溶射によりフレッティング疲労強度がTi-6Al-4V母材に対して約2倍に向上したとの報告 (GT-75282) があった。

4. 補修, 寿命評価・延長

MRO (Maintenance, Repair, and Overhaul) とデジタル化に関するキーノートがあり, アフターサービスが本学会の主テーマの一つであった。肉盛り溶接補修に関する発表が4件あった。動翼先端の肉盛り溶接に関する報告 (GT-75696), 高 γ' 合金の補修溶接材の改良により溶接性を高めた報告 (GT-75862), M247パウダーに0.4~0.6wt%のBを添加して溶接補修時のき裂発生を抑制した報告 (GT-75870) があった。レーザ肉盛り溶接によるタービン部品の補修に関する発表 (GT-75060) では, 従来のTIG溶接やプラズマアーク溶接と比較して入熱が少ないため溶接変形が軽減できる長所があり, 小型部品の補修では現地施工が可能との報告があった。

寿命評価や延長に関する報告では, 実機で使用したGTD111 DS材にHIPと完全溶体化処理を実施して, 粗大化した γ' 相が微細化し, クリープとLCF寿命が回復したとの報告 (GT-75432) があった。F-Classガスタービンロータのき裂発生事例と寿命延長に関する報告 (GT-76925), カップリングボルトのサグ曲げ応力によるHCFき裂進展に関する報告 (GT-76968) があった。

10. ロータダイナミクスとベアリング

井上 剛志*1
INOUE Tsuyoshi

1. 全般

この分野では, ロータダイナミクス (35件), 気体軸受 (12件), 流体軸受 (12件), シール (18件), 磁気軸受 (4件), スクイズフィルムダンパ (3件), 実験 (6件), 最適化 (5件), ブレードの振動関係 (36件) のセッションがあった。アメリカからの参加者とヨーロッパからの参加者のバランスは良く, 全体として発表後の討議は活発であった。

2. ロータダイナミクス

基礎的なものが多く, ロータダイナミクス解析のチュートリアル (GT-77359), 非線形調和解析手法に関するチュートリアル (GT-77353) があった。部分構造合成法による非線形振動解析 (GT-75186), 弾性支持部も考慮した固有値のMAC法解析 (GT-76481), 非線形性を持つ系のバランスング (GT-75145) があった。

3. ベアリング

全体としては, 数値解析による定量的検討を行ったものが多い。フォイル軸受では, ピエゾアクチュエータを用いた, ガスフォイル軸受の外輪制御 (GT-76273), フォイル軸受のクリアランスの適応制御 (GT-76204) があった。トップフォイル下面にメタルメッシュを用いたスラスト軸受 (GT-75340), 各種コーティングを施した場合のフォイル軸受の特性比較 (GT-75595), ハイブリッドエアフォイル軸受のインジェクション角度の影響に関する数値解析と実験結果の比較 (GT-75983) の報告があった。

シール密閉型スクイズフィルムダンパ軸受 (SFD) の開発と実験的な検証および動特性解析 (GT-76312, GT-77212), そのオイルフリー環境での利用の検討 (GT-76308) の報告があった。SFDのシールにOリングとピストンリングを用いた場合の実験的比較 (GT-76224), 水潤滑SFDのクリアランス内部の2重クリアランスによる減衰性能向上 (GT-76404) が報告された。

下面2パッドテイルテイングパッドジャーナル軸受 (TPJB) の3次元THL解析とパッドのFEM解析によるオイル流入率とスターブ状態の考察 (GT-75593), そ

原稿受付 2018年6月29日

*1 名古屋大学大学院工学研究科
〒464-8603 名古屋市中種区不老町
E-mail: inoue.tsuyoshi@nagoya-u.jp

の垂同期振動を調べたもの (GT-75607) があった。TPJBについて熱と圧力の解析を行い、実験との良好な一致を報告したもの (GT-77151)、さらにその支配方程式のシンプル化を検討したもの (GT-75659) が報告された。起動時に静圧を付加するハイブリッド動圧TPJBについて調べたもの (GT-75256) があった。

その他、空気混入時のフローティングリングジャーナル軸受の定常特性 (GT-75887)、非真円ジャーナル軸受の形状をフーリエ級数で表し静的特性に対する形状の考察を行ったもの (GT-77210)、ジャーナル軸受の $y+$ や δ^* などの数値を合わせるための考察 (GT-75597)、ロータ系全体の総合評価によるジャーナル軸受の最適化 (GT-75790) が報告された。

4. シール

ラビリンスガスシールの静特性と動的係数 (GT-75205)、ラビリンスシールの様々な形態に対する検証 (GT-75251)、インターロッキング型のラビリンスシールの動特性係数とスワールプレーキの影響 (GT-75885) の報告があった。ポンプシールの入口部Rに対するバル

クフロー解析のパラメータ決定をCFDで検討したもの (GT-75414)、ドライガスシールに関してレイノルズ方程式を用いて熱・流体・構造連成解析 (GT-75458)、メカニカルシールとラビリンスシールの組み合わせについてのCFDと実験結果の比較 (GT-75503)、ターボチャージャーロータ用の非接触メカニカルシール (GT-77126) が報告された。ステータあるいはロータが柔軟支持された場合のメカニカルシール可動部の振動や固有値 (GT-77198, GT-77200)、ポケットダンパシールの各種ノッチや部分分けの場合の漏れ量の実験との比較 (GT-76864) があった。

5. ブレード

インパクトダンパを用いた自励振動の抑制とその設定方法 (GT-75188)、摩擦ダンパによる境界条件切替を用いた制振効果 (GT-75290)、エアロダイナミクス力との連成を考慮した非線形解析 (GT-76814) の報告があった。また、ピエゾを用いたセミアクティブ制振とその最適配置による多モード制振 (GT-77025) があった。

11. 蒸気タービン

妹尾 茂樹*¹
SENOO Shigeki

論文数は37編で、昨年度の31編より増加した。9件の論文セッションに加え、パネル、チュートリアルセッションが1件ずつ行われた。フレキシビリティ運用性拡大 (高速起動、部分負荷運転など) が研究の大きなトレンドで、そのための非定常複合現象解析と、機械学習などの最新デジタル技術やAdditive Manufacturing (AM) の活用に関する研究の注目度が高かった。

1. パネルセッション: Maintenance, Repair Overhaul and Upgrade of Steam Turbines

市場は性能重視からフレキシブル運用性重視に変わってきている。その対応として、最新デジタル技術を活用した遠隔監視による余寿命評価技術や、AMを利用した補修技術などが紹介された。一方課題として、寿命を決める部位の応力や温度の直接計測は難しい場合が多いため、配管の蒸気状態量、静止部温度や、軸・翼振動の計測値から余寿命を高精度に予測する物理モデルと、タービン内部のシール間隙や温度の時刻歴変化の計測技術の

必要性が挙げられた。また運転時間に起動停止回数を考慮したEquivalent Operation Hours (EOH) を、部分負荷運転や負荷変化速度などの詳細な運転状態を考慮して高度化し、適切な補修時期を見極める技術や、現状の実機監視はGTCC用蒸気タービンが大部分で、石炭火力発電用蒸気タービンの監視導入例が少ない問題などが議論された。

2. チュートリアルセッション: Wet steam

非平衡凝縮モデルなどの湿り蒸気流解析手法や液滴計測技術、また高亜音速流中での液膜から粗大液滴への分裂現象などが講義された。残された課題として、解析では液滴径の数密度分布のモデル化と解析方法、試験では粗大液滴の径と速度の計測がある。

3. 論文セッション

3.1 フレキシブル運用

非定常複合現象解析がキーワードの一つである。

高速起動のために、待機中に高温空気と数百回転の低速運転により高中圧段を暖気する手法の確立のために、昨年に続き非定常流体伝熱連成解析 (GT-75926) と、その結果を用いた実設計に使える1次元モデルが報告さ

原稿受付 2018年7月6日

*1 三菱重工業(株) 総合研究所

〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1

E-mail: shigeki_senoo@mhi.co.jp

れた (GT-76091)。また太陽熱発電用蒸気タービンに対し、非定常伝熱構造解析を用いた起動曲線最適化 (GT-75829, 75174) が行われた。

低圧長翼段・排気室関係では、非設計点の非定常流に関する研究が多かった。低負荷運転時の振動応力評価のための大規模非定常流体構造連成解析 (GT-76498)、高負荷時の排気室ディフューザ上での衝撃波-境界層干渉による翼振動加振力をディフューザ形状変更により低減 (GT-75499)、部分負荷時の入口旋回流による離特性に対する流体解析精度を1/10スケール排気室空気試験で検証し、その解析を用いた検討により、40%負荷では軸方向に小さいディフューザの方が性能の良い評価となったこと (GT-75375) などが報告された。

また軸受の軸振動監視から低圧最終段動翼振動を検出する監視技術 (GT-76565) も注目度が高かった。

3.2 最新デジタル技術, AM活用

機械学習を活用した形状最適化 (GT-75261) は、Gaussian covarianceを用いて少ないサンプル数でDeep Neural Networkが学習できるように工夫がされている。しかし、サンプルはCFDで求めているため120個しかなく、一般のビッグデータを用いた機械学習に比べると圧倒的に少ない。また、確率的な手法によりロバスト性を考慮したシール形状最適化 (GT-75262) と、固有直交分解 (proper orthogonal decomposition) を利用した非定常複雑流体場からの物理現象抽出法 (GT-75312) が報告された。これらの最新デジタル技術を用いた研究は、そのまま設計適用できるレベルにはまだないと思われるが、今後の発展への期待が大きく、盛況であった。また蒸気タービンへの適用が進んでいないAMを、補修に適用して残留熱応力と補修時間を低減した発表 (GT-75066) も、今後の方向性を示す事例として好評だった。

3.3 湿り蒸気

最終段静翼に耐久性も考慮した撥水性コーティングを施工し、液滴付着量を低減することで、タービン効率が向上した (GT-76854, 77296)。複数の要素試験から1/3スケールモデルタービン試験まで実施され、実機にも適用されている。一方、液滴接触角と付着液滴量との関係には明確な傾向は見られず、詳細な物理機構解明はこれからである。実機サイズの原子力用高压試験タービンの湿り度と効率とが詳細に計測された (GT-75049)。開発された湿り度計の特徴は、ハロゲン-重水素を光源とし紫外光域の短波長光まで用いることで、従来のハロゲン光源に対しより微細な液滴を計測可能としたことである。

3.4 性能向上

長翼も含め翼開発による性能向上の報告はなかった。動翼先端の漏れ流れ旋回速度抑制による混合損失低減 (GT-75269, 75270)、シール部に流体をシート状に吹き込み漏れ流れをブロックし、かつシールフィン上流に渦を形成して漏れ流量低減 (GT-75835)、シュラウド無し翼先端間隙部にジェットを吹き込み、漏れ渦干渉損失低減 (GT-76336) などが報告された。

4. 蒸気タービン委員会

昨年度のbest paper awardがOxford大とGE powerによるタービン停止時の非定常自然対流伝熱連成解析法の論文 (GT2017-63592) に対して贈られ、ここでもフレキシブル運用対応の複合解析技術の重要性が再認識された。来年のセッションテーマの議論をした後、夜半近くまで日の沈まないオスロのインド料理屋に繰り出し、国・産学・メーカーの枠を超えて親睦を深めた。

12. 展 示

谷 直樹*1
TANI Naoki

展示は2日目 (6月12日) の昼から開始され、計94の展示ブースが6月14日までの3日間にわたって出展された (写真1)。今回は北欧で開催であったためか、ガスタービンの大手メーカーからの展示は無く少し寂しい状況であったが、世界最古のガスタービンと言う非常に珍しい物が展示されていた (後述)。展示は試験・計測 (17) コンサルティング・エンジニアリングサービス

原稿受付 2018年7月6日

*1 (株)IHI 航空・宇宙・防衛領域 技術開発センター要素技術部
システム・基盤技術グループ
〒190-1212 西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229

(16)、解析ソフトウェア (13) といった、ガスタービンを支える技術の展示が多かった (カッコ内は件数)。国別では米国が43件とほぼ半数を占め、次にイギリス13件、ドイツ12件であった。アジア勢では日本2件、韓国、中国がそれぞれ1件の計4件。開催国ノルウェーからは2件であった。そのほかではロシア、カナダ、南アフリカ、スペインなどから1件ずつの展示があった。ノルウェー開催と言うことで、欧州全体で39件の展示があり昨年度より増加しているが、米国からの展示は半減以下となっている。

展示会場の奥に昼食会場があるため、必ず展示コー



写真1 Expo Hallの様子 (photo courtesy of ASME/IGTI)

ナーを見ていただけるようになってきているのは、必ず展示を見る事が出来る、と言うことで展示側、見学側双方にとって便利であった。試験や計測関連の業者の多くはデモ機を持ち込んでおり、実機を見ながらの商談が出来る。また、近年は非常常シミュレーションも盛んになってきていることから、シミュレーション関連の展示では派手な動画も多く見られた。このような有用かつ目立つ展示に加え、エコバッグやステッカーなどのグッズを要しているブースも多く、各社集客の工夫に余念が無い。

展示コーナーには学生のポスターセッションコーナーも設けられ、日本からの1件を含め計41件の発表がなされている。一部のポスターではパンフレットや縮小版を何部か持ち帰りが出来るような工夫がなされており、ポスターの分かりやすさ、研究内容以外でも目を引く工夫が見られた。足を止めて読み入る方も多く、一定の興味を引いていた。展示初日の昼には発表者を交えたポスターセッションもあり、活発な議論が交わされていた。

ポスターセッションとは別に、会場の一角にはプレゼンテーションコーナーもあり、事前に申請した各社が順次自社製品の売込みを行っていたが、学会のセッションと重なっていた時間帯に開催された発表の場合は集客と言う面で今一つの状況だった様である。しかし、各社の戦略や新商品のプレゼンをまとめて聞くことができると言うことで、一度に多くの情報を仕入れることが出来る点は非常に有用である。

前述したとおり、今回はガスタービン大手メーカーの展示が無いため、実機やフルスケールモックアップなどの展示は無く、最も目立つ展示はターボ機械の解析ソフ

トウェアの大手であるANSYSとNUMECA社であった。その奥にひっそりと世界最古のガスタービンのロータが展示されていた。残念ながら写真の入手が出来なかったが、両吸い込み式の遠心インペラ1段に軸流タービンが組み合わされており、基本構成は現在の小型ガスタービンと同じである。しかし、翼は近年のNC加工削りだしで設計されたものと異なり、圧縮機、タービン共にソリデティが極めて高い板金製の翼を溶接して作成されている。回転数やタービン入口温度に関する説明が無かったが、耐熱、材料強度に苦労したであろう事は容易に想像できる。現在のガスタービンと同じ所、違うところをつぶさに観察出来たのは貴重な機会であり、非常に良い勉強となった。

展示2日目(学会3日目)には展示ホールにてレセプションが行われ、ドリンクを片手にソフトウェアや計測機のデモンストレーションを見たり、商談(雑談?)にと大いに盛り上がった。開発の苦労話や、導入による成果などの情報を収集するのは、学会セッションでの発表とはまた違った魅力があり、自身の技術開発やその売り込みに対するモチベーションアップにもつながる。特に近年ではシミュレーション、計測共に高精度が要求されており、各社共に苦労していると共に、差別化技術として注力している模様。

日本ガスタービン学会からもブースを出展させていただき、Turbo Expo.に参加している国際委員、学会員が交代で展示対応を行った。桜と富士山の写真を用いたクリアファイルに、今年夏に盛岡で開催されるACGT (Asian Congress of Gas Turbine) と、来年度11月に東京で開催されるIGTC (International Gas Turbine Congress)、学会紹介を納めて245部用意した。アジア圏の方にはACGT出席予定とのお話を頂くことも多く、皆さん来日を楽しみにしているとのことであった。また、IGTCへの関心も高く、開催日時や場所、アブストラクト締切日に関して詳細な質問を多数頂いた。また、複数の展示ブースの方から「IGTCで展示したいのだがどうすればいい」と言う問い合わせも頂き、宣伝効果としては抜群であった。結局、クリアファイル一式は2日目で全て配布しきった。

展示最終日の昼休みには、Closing CeremonyとTurboExpo2019のキックオフが展示会場内で行われ、2019年、米国のPhoenixでの再会を約して終了した。

2017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、関係各社の協力を得て2017年1月から12月の間におけるガスタービン及び過給機を生産状況を調査・集計し、生産統計資料を作成した。資料提供を、陸船用ガスタービンは14社、航空用ガスタービンは3社、過給機は9社に依頼し、提供を受けた範囲で生産統計資料を纏めた。なお、過給機はすべて排気タービン方式のターボチャージャーであり、機械駆動によるものではない。

1. 概要

1. 2017年陸船用ガスタービン生産統計概要

(1) 生産台数および出力(図1)をみると、台数は前年の256台に対し252台で、前年に比べて4台(2%)の減少となった。出力区分別の前年との比較では、小型が19台の減少、中型が14台、大型は1台の増加となった。また、出力では前年の4,951MWに対し6,105MWと、前年から1,154MW(23%)の大幅な増加となった。出力区分別の前年との比較では、小型が5MWの減少、中型が34MW、大型は1,125MWの増加となっている。最近6年間でみると台数では最も少なく、出力では3番目となっている。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22%、出力は13%の減少で、それぞれ67台、31MWとなった。

イ) 中型(736~22,064kW)は前年と比べて、台数、出力とも10%の増加で、それぞれ156台、386MWとなった。

ウ) 大型(22,065kW以上)は前年と比べて、台数は4%、出力は25%の増加で、それぞれ29台、5,688MWとなった。

(2) 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)、およびその他(MC)用途の他、今年は艦艇用(MM)、実験用(XP)も実績があった。台数で最も多いのは非常用発電用(EM)の189台(75%)、出力で最も多いのは

ベースロード発電用(BL)の5,647MW(92%)である。また、前年実績のなかった、艦艇用(MM)は中型で4台、実験用は大型で1台計上された。前年同様ピークロード発電用(PL)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12台(6%)減少の189台、出力は4MW(1%)増加の283MWとなった。出力区分別にみると、小型は台数で23%、出力で18%の減少、中型は台数で5%、出力で4%の増加となった。今年、小型は台数・出力とも大幅減、中型は台数・出力とも増加となっている。

イ) ベースロード発電用(BL)は前年と比べて、台数は1台(2%)増加の51台、出力は980MW(21%)増加の5,647MWとなり、台数は微増、出力は大幅に増加した。出力区分別にみると、小型は台数で25%、出力で783%の増加、中型は台数変わらず、出力で26%の減少、大型は台数変わらず、出力は22%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45kW/台 今年318kW/台、中型:前年5.7MW/台 今年4.3MW/台、大型:前年163MW/台 今年199MW/台となっており、小型、大型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4台、出力で47MWの実績があった。

エ) 実験用(XP)は今年、台数で1台、出力で120MW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2台増加の7台、出力は4MW増加の9MWとなっている。

(3) 燃料の種類別(表2, 図4, 図5)にみると、台数ではガス燃料が前年から1台増加の56台、液体燃料が前年から5台減少の196台となっている。出力ではガス燃料が前年から24%増加の5,790MW、液体燃料が前年から14%増加の316MWとなっている。台数はガス燃料が微増、液体燃料は微減で、出力はガス燃料、液体燃料とも大幅に増加している。構成比率は、台数ではガス燃料が全体の22%に対し液体燃料が78%、出力

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

ではガス燃料が95%に対し液体燃料が5%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顕著である。

ア) 液体燃料では、台数・出力ともに最も多いのが重油1種(H1)で、台数は124台で全体の49%、出力は164MWで全体の3%をそれぞれ占めており、前年と比べると台数は2%、出力は1%の減少となっている。台数で見ると、灯油(T)が25台、軽油(K)が47台となり、灯油(T)は前年に比べ32%の減少、軽油(K)は前年に比べ27%の増加となっている。出力で見ると、灯油(T)が35MW、軽油(K)が116MWとなっており、前年と比べると、灯油(T)は42%の減少、軽油(K)は132%の大幅な増加となっている。灯油(T)は、今年台数・出力ともに大幅に減少し、軽油(K)は、台数・出力ともに大幅な増加となった。

イ) ガス燃料では、天然ガス(GNG)が25台、都市ガス(GTW)が23台と台数が多く、合計で全体の19%を占めている。他の燃料としては、液化天然ガス(LNG)が7台、高炉ガス(BFG)が1台ある。出力では天然ガス(GNG)が最も多く3,879MWで全体の64%を占めている。次に出力が多いのは液化天然ガス(LNG)の1,607MW、以下は都市ガス(GTW)の195MW、高炉ガス(BFG)の110MWとなっている。昨年は台数・出力ともに液化天然ガス(LNG)が最多だったが、今年は台数・出力とも天然ガス(GNG)がトップを占めた。また、今年の実績は、天然ガス(GNG)、液化天然ガス(LNG)、都市ガス(GTW)に、高炉ガス(BFG)が加わった。液化石油ガス(LPG)、石油プラントオフガス(GOG)、石炭(ガス化)ガス(GCG)は今年も実績がなかった。

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(64%)、軽油(19%)、灯油(13%)、中型が重油1種(52%)、軽油(22%)、都市ガス(13%)で、大型は天然ガス(69%)、液化天然ガス(24%)、都市ガスと高炉ガス(3%)となっている。全体では重油1種(49%)、軽油(19%)、灯油と天然ガス(10%)となっている。出力の上位3種は、小型が重油1種(67%)、軽油(21%)、灯油(12%)、中型が重油1種(37%)、軽油(28%)、都市ガス(19%)で、大型は天然ガス(68%)、液化天然ガス(28%)、都市ガス(2%)となっている。全体では天然ガス(64%)、液化天然ガス(26%)、都市ガス(3%)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20

台、451MW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用する場合は、納入時点で最も多く使用する燃料で集計している。

(4) 納入地域別(表3)で見ると、台数では国内向けが前年に比べて7台減少の220台、輸出向けが3台増加の32台となった。出力では国内向けが前年に比べて753MW増加の2,200MW、輸出向けが401MW増加の3,906MWとなっている。

ア) 国内向けは総台数の87%、全出力の36%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2%の減少、出力では7%の増加となっている。また前年から台数で3%減少し、出力では52%の増加となっている。出力区分別に台数・出力を前年と比べると、小型で19台、5MWの減少、中型で8台増加、2MWの減少、大型では台数は4台、出力は760MWの増加となっている。前年は小型・中型で台数・出力ともに減少、大型は台数が増加、出力は減少となっていたが、今年は小型で台数・出力とも減少、中型は台数増加、出力は微減、大型は台数、出力とも大幅増加となっている。また、前年に実績がなかった艦艇用向けは、今年は台数で4台、出力で47MWを計上した。

イ) 輸出は総台数の13%、全出力の64%を占めており、前年と比べて全体に占める割合は台数では2%増加、出力では7%減少となっている。前年より台数は3台、出力は401MW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6台、36MWの増加、大型で3台の減少、365MWの増加となっている。輸出先別にみると、台数ではアジア(47%)、中南米(19%)、欧州とアフリカ(16%)の順で、前年実績のなかった中南米が、今年は2番目となった。出力では中南米(45%)、アジア(41%)、ロシア・NSI諸国(8%)、アフリカ(5%)の順となっている。今年は中南米が台数・出力ともに大幅に増加し、出力では最も多くなっている。アジア向けは前年と比べて、台数は5台、出力は1,721MWの大幅な減少となっている。

(5) 被駆動機械別(表4、図6、図7)では、これまでと同様に、台数・出力とも発電機(G)がほとんどを占め、全体に占める割合は台数、出力とも97%であった。発電機(G)について出力区分別にみると、小型では台数・出力ともに前年に比べて減少しており、中型では台数は増加、出力は微減、大型では台数は変わ

らず、出力は大幅増加している。それぞれ前年と比べると、台数では小型が20%の減少、中型が8%の増加である。出力では小型が13%、中型が2%の減少、大型が22%の増加となっている。水ポンプ(W)は全体で、前年に比べて1台、1MWの減少となっており、出力区分別にみると、小型は台数で2台の減少、出力は微増、中型は台数が1台の増加、出力は1MWの減少となっている。その他の被駆動機械では、前年実績なしの推進機または回転翼(PRR)が、今年2台、41MWとなり、その他圧縮機(GC)も1台、120MWの実績があった。

- (6) 出力区分別(表5)を前年と比べると、小型は全体で台数・出力ともに減少している。さらに詳細な区分別にみると、0～146kWでは、台数では2台、出力では0.1MWの減少、147～367kWでは5台、1MWの減少、368～735kWでは12台、3MWの減少となった。中型は全体で台数・出力ともに増加したが、さらに詳細な区分別にみると、736～4,412kWでは13台、9MWの増加、4,413～10,296kWでは1台、17MWの減少、10,297～16,180kWは実績なし、16,181～22,064kWでは2台、41MWの増加となった。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6台、172MWの減少、44,130kW以上では、7台、1,297MWの増加となった。台数の多い順では、736～4,412kW、368～735kW、44,130kW以上となっており、1・2番目は前年から変わってないが、前年は4番目だった44,130kW以上が今年は3番目に多くなっている。また出力の多い順では44,130kW以上、736～4,412kW、22,065～44,129kWとなっており、前年と変わっていない。
- (7) 発電用ガスタービン(表6)の台数と出力を前年と比較すると、事業用は、国内では9台、1,624MWとなり、前年と比べて台数は2台、出力は544MWの増加となった。輸出では16台、3,449MWとなり、前年と比べて台数は変わらず、出力は387MWの増加となった。自家用は、国内が200台、520MWとなり、前年と比べて台数は15台の減少、出力は158MWの増加となった。輸出は16台、457MWとなり、前年と比べ台数は3台、出力は14MWの増加であった。事業用は、前年に比べて国内では台数、出力とも増加し、輸出は台数変わらず、出力は増加した。自家用は、前年に比べて国内の台数は減少したが、国内の出力、輸出の台数・出力とも増加した。

2. 2017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20台、合計推力は1,148kNであった。製造台数は昨年の15台から増加した。その他に国内で開発されたターボファンエンジンとして、HondaJetに搭載されているHF120があり、2014年に米国連邦航空局(FAA)の型式承認を取得し、2015年に出荷が開始されている。(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、合計台数は6台、合計出力は8,052kWであった。製造台数は昨年の12台から減少した。(表8、図9参照)
- (3) 民間航空機用エンジン向けモジュールの新規製造状況については、過去5年間、航空輸送需要の回復に伴い増加傾向にあり、2017年は2,583台となり過去最高を更新した。従来機種用モジュール(V2500, CF34)が高い生産台数を維持しているだけでなく、新機種用モジュール(Trent1000, GEnx, TrentXWB, PW1100G-JM)の量産が順調に増えている。2015年からPW1100G-JMエンジンのファンモジュールと低圧圧縮機モジュールの製造が開始されているが、2016年1月にPW1100G-JMを搭載したA320neoが商業運航を開始し、本格的な量産に入っている。(図10参照)
- (4) 日本の航空用ガスタービン生産全体の動向としては、近年防衛省向けエンジンの製造台数はあまり変化がないが、将来開発プロジェクトとしてXF5が開発されており、ステルス性能を持った先進技術実証機「X-2」に搭載され、2017年10月に試験飛行を終了した。一方民間航空機用エンジン向けモジュールの製造台数については、増加傾向にあり、今後世界的な航空機需要の増加¹⁾に伴い、Trent1000, GEnx, 新機種のTrentXWB, PW1100G-JMのモジュール製造、部品製造が本格化することが予測される。更にビジネスジェット機であるGlobal7500及びGlobal8000に搭載されるPassport 20(2018年度中に就航予定)や次世代大型民間輸送機B777Xシリーズに搭載予定のGE9X(2018年にエンジン型式承認を取得予定)等、新機種エンジンの国際共同開発が複数行われている状況²⁾であり、今後も民間航空機用エンジン関連の占める割合が増加する傾向は続くと思われる。

出典(1): 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 2018-2037」

出典(2): 一般社団法人 日本航空宇宙工業会「平成30年版 日本の航空宇宙工業」, ISSN 0910-1527

3. 2017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増加傾向を保っており、前年比5%増の約462万台となった。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 過給機は、前年比15%増の約3.9万台となった。主に船舶用機関向けに使用される圧縮機翼車外径201mm以上のClass 3 以上の過給機については、Class 8, Class 9の大型サイズは増加しているものの、Class 3 からClass 7のサイズにおいて、それぞれ6%減、16%減、20%減、26%減、41

%減となっており、総じて12%減の約1.6千台となった。歴史的な国内新造船不況となった2016年から底を抜けたものの、2020年に始まる新規制に向け、多くの船主が市場動向を伺っている状況にあるためと考えられる。

(2) 生産型式数(表10, 図11)について、2017年は前年比3型式増の143型式(全Class含む)であった。これはますます厳しくなる環境汚染物質に対する規制に対応するため、従来型エンジンに搭載する旧過給機型式の淘汰が進んだものの、環境対応の新型エンジンに対応した新過給機型式の投入も進んでいるためと考えられる。今後も各種規制に合わせて、高度な環境技術を持つ日本メーカー製品の過給機のラインアップは更新されていくと考えられる。

II. 統計

1. 陸船用ガスタービン

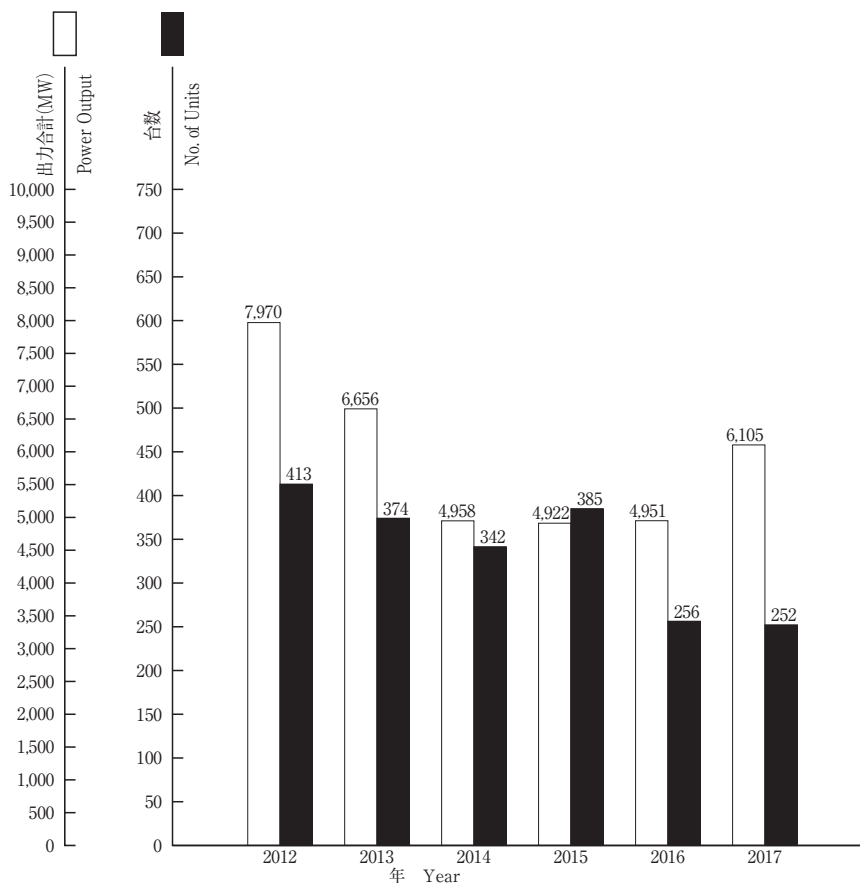


図1 陸船用ガスタービン

表1 2017年用途別生産台数及び出力 (kW)

用途 Application	区分 Code	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)
ベースロード発電用 Generator Drive for Base Load	BL	5	1,590	18	76,620	28	5,568,420	51	5,646,630
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	61	28,431	128	254,634	0	0	189	283,065
商船用 Merchant Marine	M	0	0	0	0	0	0	0	0
艦艇用 Military Marine	MM	0	0	4	46,788	0	0	4	46,788
石油化学プロセス用 Oil Refinery and Chemical Process	OR	0	0	0	0	0	0	0	0
その他のプロセス用 Miscellaneous Chemical Process	PR	0	0	0	0	0	0	0	0
実験用 Experimental	XP	0	0	0	0	1	119,900	1	119,900
空調用 Air Conditioning	ACD	0	0	0	0	0	0	0	0
その他 Miscellaneous	MC	1	713	6	8,298	0	0	7	9,011
合計 Total		67	30,734	156	386,340	29	5,688,320	252	6,105,394

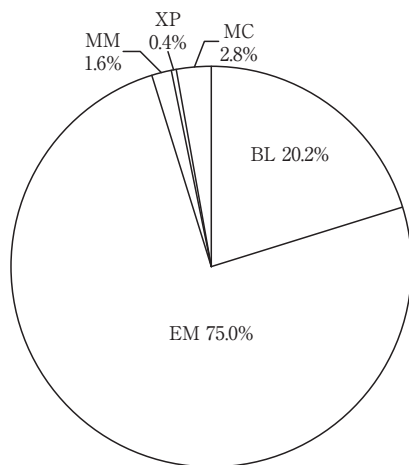


図2 2017年用途別生産台数割合 (%)

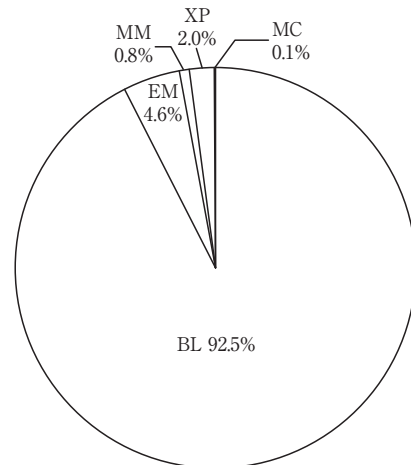


図3 2017年用途別出力割合 (%)

表2 2017年燃料別生産台数及び出力 (kW)

燃料種類 Kind of Fuel		区分 Code	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)
ガス燃料 Gaseous Fuel	液化天然ガス Liquefied Natural Gas	LNG	0	0	0	0	7	1,606,700	7	1,606,700
	天然ガス Natural Gas	GNG	0	0	5	26,810	20	3,852,020	25	3,878,830
	高炉ガス Blast Furnace Gas	BFG	0	0	0	0	1	109,700	1	109,700
	都市ガス Town Gas	GTW	2	90	20	74,588	1	119,900	23	194,578
	液化石油ガス	LPG	0	0	0	0	0	0	0	0
	石油プラントオフガス	GOG	0	0	0	0	0	0	0	0
	石炭(ガス化)ガス	GCG	0	0	0	0	0	0	0	0
ガス燃料 小計 Sub Total			2	90	25	101,398	29	5,688,320	56	5,789,808
液体燃料 Liquid Fuel	灯油 Kerosene	T	9	3,831	16	31,000	0	0	25	34,831
	軽油 Gas Oil	K	13	6,350	34	109,908	0	0	47	116,258
	重油1種 Heavy Oil No.1	H1	43	20,463	81	144,034	0	0	124	164,497
	液体燃料 小計 Sub Total			65	30,644	131	284,942	0	0	196
その他 Miscellaneous Fuel		MF	0	0	0	0	0	0	0	0
合計 Total			67	30,734	156	386,340	29	5,688,320	252	6,105,394

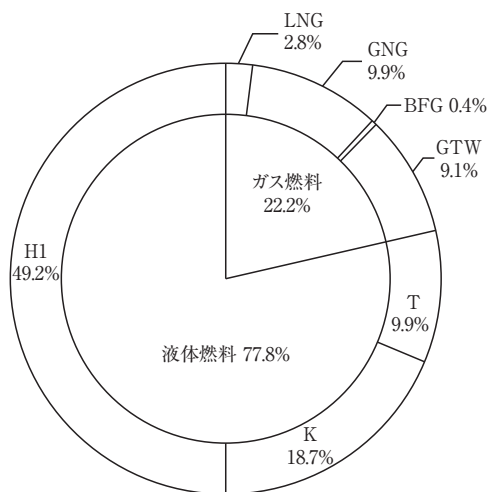


図4 2017年燃料別生産台数割合 (%)

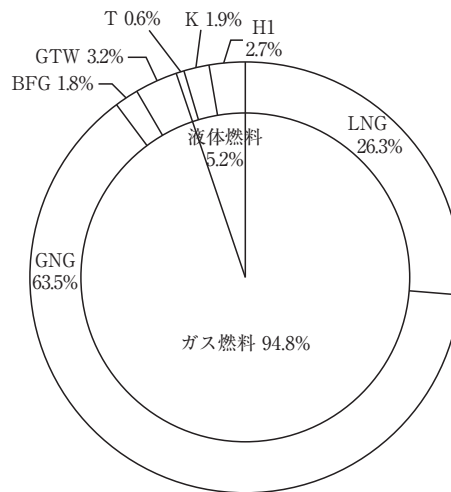


図5 2017年燃料別出力割合 (%)

表3 2017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		0	0	8	11,600	0	0	8	11,600
	東北 Tohoku		7	2,962	8	16,430	0	0	15	19,392
	関東 Kanto		33	15,556	60	124,780	6	1,072,560	99	1,212,896
	中部 Chubu		9	4,674	20	45,688	2	320,000	31	370,362
	近畿 Kinki		8	3,547	20	54,646	0	0	28	58,193
	中国 Chugoku		1	600	2	1,600	0	0	3	2,200
	四国 Shikoku		3	1,150	3	3,500	0	0	6	4,650
	九州 Kyushu		6	2,245	14	19,200	1	86,450	21	107,895
	沖縄 Okinawa		0	0	0	0	0	0	0	0
	艦艇用 Military Marine		0	0	4	46,788	0	0	4	46,788
その他 Miscellaneous		0	0	3	5,298	2	360,400	5	365,698	
国内向け 小計 Sub Total			67	30,734	142	329,530	11	1,839,410	220	2,199,674
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	6	1,768,600	6	1,768,600
	アジア Asia		0	0	9	30,000	6	1,584,300	15	1,614,300
	大洋州 Oceania		0	0	0	0	0	0	0	0
	欧州 Europe		0	0	5	26,810	0	0	5	26,810
	ロシア・NIS諸国 Russia・NIS		0	0	0	0	1	317,100	1	317,100
	中東 Middle East		0	0	0	0	0	0	0	0
	アフリカ Africa		0	0	0	0	5	178,910	5	178,910
輸出向け 小計 Sub Total			0	0	14	56,810	18	3,848,910	32	3,905,720
合計 Total			67	30,734	156	386,340	29	5,688,320	252	6,105,394

表4 2017年被駆動機械別生産台数及び出力 (kW)

被駆動機械 Driven Machinery	区分 Size コード Code	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)
発電機 Electric Generator	G	66	30,021	151	342,152	28	5,568,420	245	5,940,593
水ポンプ Water Pump	W	1	713	3	3,000	0	0	4	3,713
推進機または回転翼	PRR	0	0	2	41,188	0	0	2	41,188
動力計	DM	0	0	0	0	0	0	0	0
その他圧縮機	GC	0	0	0	0	1	119,900	1	119,900
合計 Total		67	30,734	156	386,340	29	5,688,320	252	6,105,394

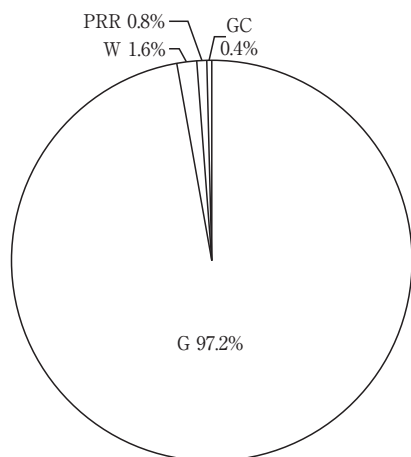


図6 2017年被駆動機械別生産台数割合 (%)

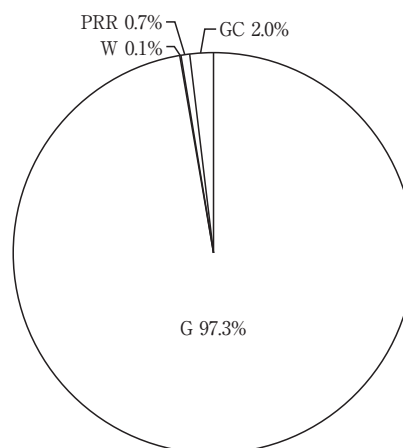


図7 2017年被駆動機械別出力割合 (%)

表5 2017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)	
		台数	出力
小型 Small Unit 0~735kW	0~146	2	90
	147~367	15	3,830
	368~735	50	26,814
	小計 Sub Total	67	30,734
中型 Medium Unit 736~22,064kW	736~4,412	143	269,052
	4,413~10,296	11	76,100
	10,297~16,180	0	0
	16,181~22,064	2	41,188
小計 Sub Total	156	386,340	
大型 Large Unit 22,065kW~	22,065~44,129	3	83,910
	44,130~	26	5,604,410
	小計 Sub Total	29	5,688,320
合計 Total	252	6,105,394	

表6 2017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	
			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)
用途 Application	コード Code									
国内事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	9	1,623,710	9	1,623,710
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Domestic/Public Use 国内事業用 小計 Sub Total			0	0	0	0	9	1,623,710	9	1,623,710
国内自家用	ベースロード発電用	BL	5	1,590	13	49,810	1	95,800	19	147,200
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	61	28,431	119	224,634	0	0	180	253,065
	試験用	XP	0	0	0	0	1	119,900	1	119,900
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Domestic/Private Use 国内自家用 小計 Sub Total			66	30,021	132	274,444	2	215,700	200	520,165
国内合計 Domestic Use Total			66	30,021	132	274,444	11	1,839,410	209	2,143,875
輸出事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	16	3,449,110	16	3,449,110
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
For Export/Public Use 輸出事業用 小計 Sub Total			0	0	0	0	16	3,449,110	16	3,449,110
輸出自家用	ベースロード発電用	BL	0	0	5	26,810	2	399,800	7	426,610
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	9	30,000	0	0	9	30,000
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
For Export/Private Use 輸出自家用 小計 Sub Total			0	0	14	56,810	2	399,800	16	456,610
輸出合計 For Export Total			0	0	14	56,810	18	3,848,910	32	3,905,720
事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	25	5,072,820	25	5,072,820
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Public Use 事業用 合計 Total			0	0	0	0	25	5,072,820	25	5,072,820
自家用	ベースロード発電用	BL	5	1,590	18	76,620	3	495,600	26	573,810
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	61	28,431	128	254,634	0	0	189	283,065
	試験用	XP	0	0	0	0	1	119,900	1	119,900
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Private Use 自家用 合計 Total			66	30,021	146	331,254	4	615,500	216	976,775
総計 Grand Total			66	30,021	146	331,254	29	5,688,320	241	6,049,595

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

2. 航空用ガスタービン

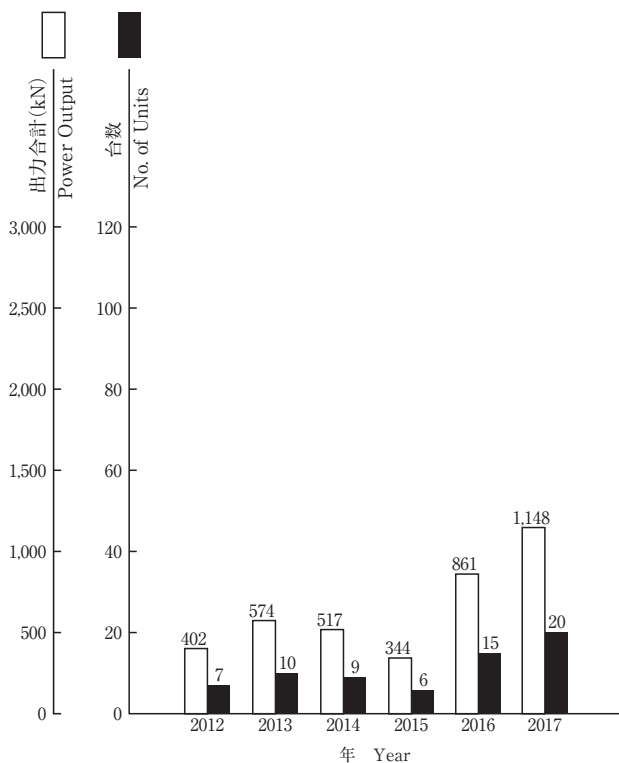


図8 ターボジェットエンジン／ターボファンエンジン

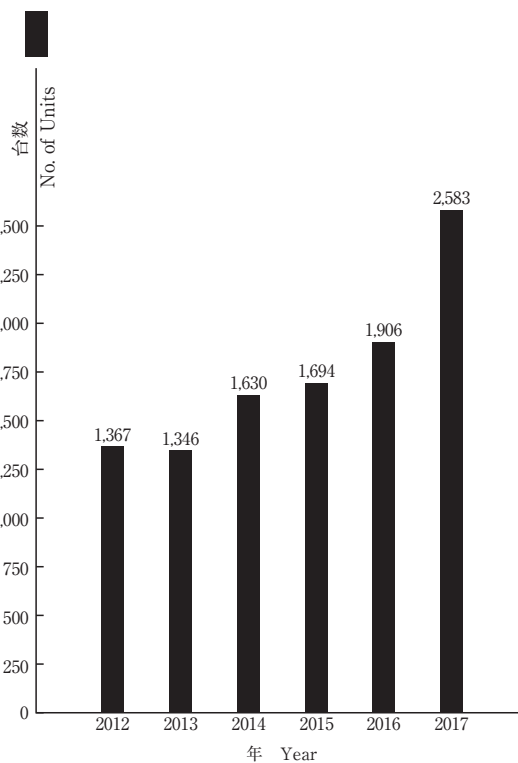


図10 民間航空エンジン用モジュール

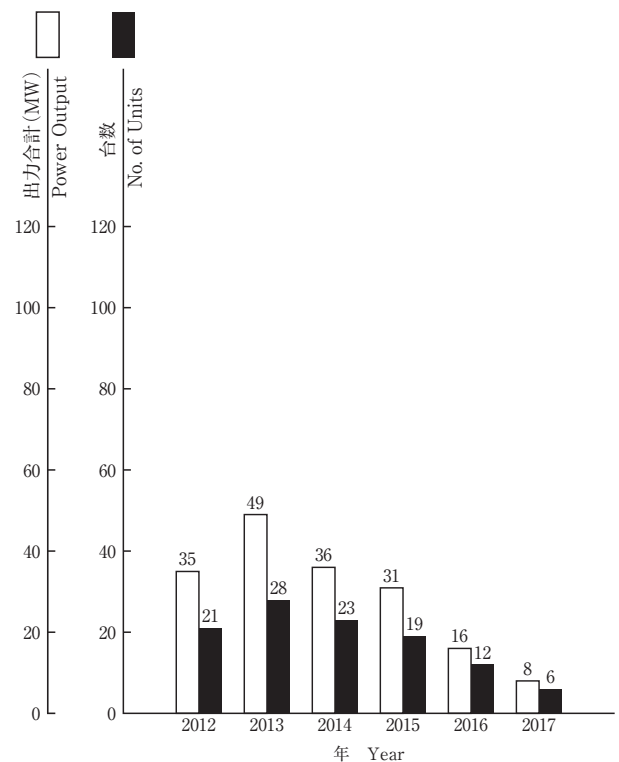


図9 ターボシャフトエンジン／ターボプロップエンジン

表7 2017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	20	スラスト合計*1 Thrust	1,148
-------------------------	----	--------------------	-------

※1 海面上静止最大スラスト
Maximum Thrust at Sea Level Static Condition

表8 2017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	
	台数 Units	出力*2 Output (kW)	台数 Units	出力*2 Output (kW)	台数 Units	出力*2 Output (kW)
固定翼機 Fixed Wing Aircraft	0	0	0	0	0	0
ヘリコプタ用 Helicopter	0	0	6	8,052	6	8,052
補助機関駆動用 Aux. Drive Units	0	0	0	0	0	0
合計 Total	0	0	6	8,052	6	8,052

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

3. 過給機

表9 クラス別の年間生産台数

区分 Class	Size 圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	年間生産台数					
		2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
Class 1	0～100	約365万	約395万	約413万	約441万	約441万	約462万
Class 2	101～200	32,774	29,930	35,294	35,810	34,041	39,008
Class 3	201～300	538	574	641	668	951	897
Class 4	301～400	265	260	310	183	196	164
Class 5	401～500	73	74	161	214	299	239
Class 6	501～600	221	195	255	241	233	173
Class 7	601～700	274	150	232	184	148	88
Class 8	701～800	58	33	46	35	22	38
Class 9	801～900	130	94	81	11	25	44
Class 10	901～1000	0	0	0	0	0	0
Class 11	1001～	0	0	0	0	0	0
合計 Total*		34,333	31,310	37,020	37,346	35,915	40,651

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

表10 クラス別の型式数*

区分 Class	Size 圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	型式数					
		2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
Class 1	0～100	64	64	55	55	50	48
Class 2	101～200	29	29	29	29	20	25
Class 3	201～300	18	18	18	18	15	16
Class 4	301～400	17	18	18	18	12	13
Class 5	401～500	16	14	16	16	13	13
Class 6	501～600	15	15	16	16	14	12
Class 7	601～700	18	15	17	17	7	8
Class 8	701～800	7	5	5	5	5	3
Class 9	801～900	10	10	9	9	4	5
Class 10	901～1000	0	0	0	0	0	0
Class 11	1001～	1	0	0	0	0	0
合計 Total*		131	124	128	128	90	95

※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。
The figure shows total number of superchargers over 100mm in impeller diameter.

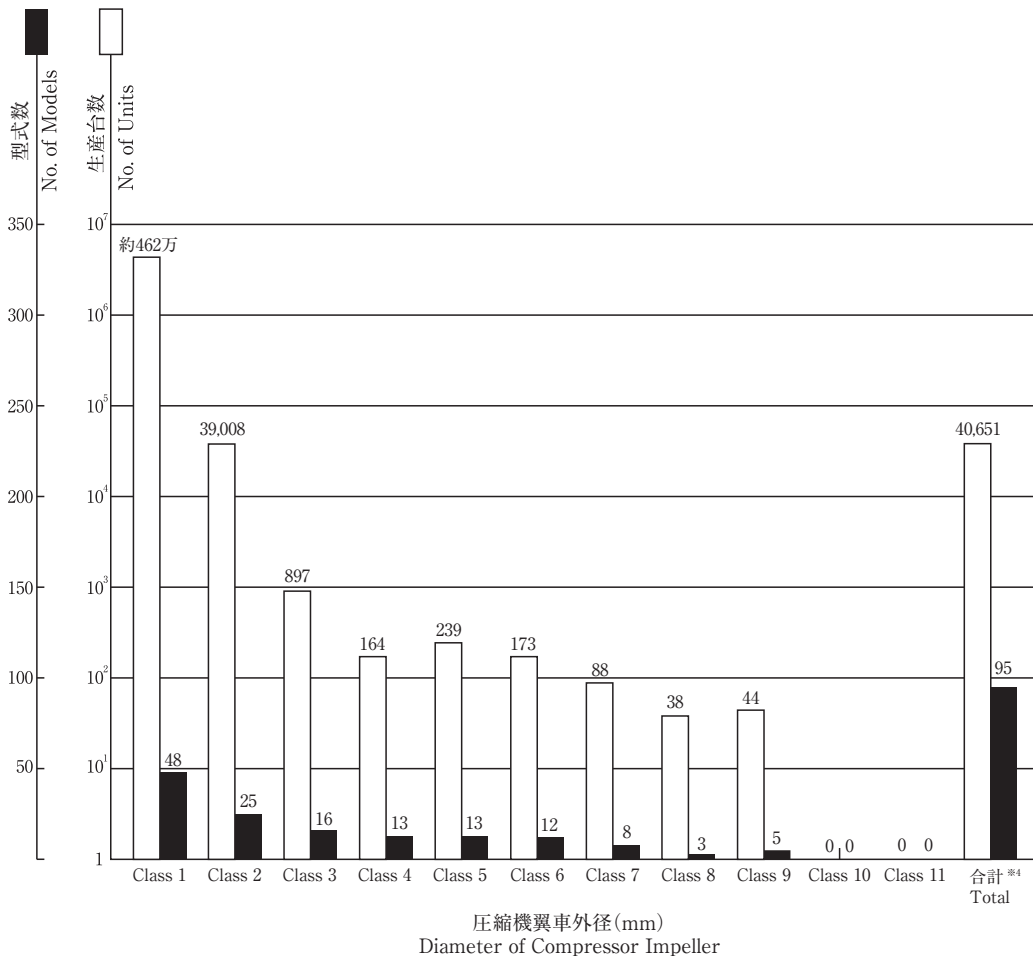


図11 2017年過給機生産台数及び型式数

ASME Turbo Expo 2018 GTSJ展示 実施報告

国際委員会

当学会では2014年からASME Turbo Expoの展示に出席し、IGTCをはじめとする学会の活動や日本におけるガスタービンの研究開発に関する情報を発信しています。今年もノルウェー・LillestromのTurbo Expoで展示期間の6月12日から14日まで3日間、事務局長の中村さんを含む国際委員会展示ワーキンググループが中心となって展示を行いました。ASME/IGTIと当学会とは国際会議に関する協力協定を締結しており、展示に関しては出展費用や参加登録料などについてIGTI事務局に大変お世話になっています。

ブースでは従来通りポスターの展示と各種資料の配布を行いました。ポスターはGTSJの紹介2018年度版と、日本のガスタービン開発史を紹介するものの2点です。今回は盛岡で8月に開催したAsian Congress on Gas Turbines (ACGT) 2018と、来年虎ノ門ヒルズで開催するIGTC2019の情報を掲載しました。また配布物は、(1)IGTC2019の1st Circular、(2)GTSJ英文パンフレット、(3)日本のガスタービン関連機関情報パンフレット、(4)学会ネーム入りクリアファイル（富士山と桜）、(5)ACGT2018のパンフレットの5点でした。これらを250部用意し、クリアファイルに入れて配布しました。これまでよりも速いペースで配布が順調に進み、最後は不足して日本人関係者の分を拠出してもらいました。

当日のブース要員はワーキンググループのメンバーだけでは足りず、国際委員や会員の方々にもご協力をいた

だいています。おかげさまで円滑な展示を行うことができ、ご協力いただいた皆さまに心よりお礼を申し上げます。

展示ブースは日本人のTurbo Expo参加者が集う場としても機能し、日本人同士の情報伝達にも便利な拠点となっています。初めて発表に来たという方々からも心強いというコメントをいただきました。外国人にも知られるようになり、IGTCなどの情報を効果的に伝える機会ができています。今後とも継続して行きたいと思っておりますので、ご協力をいただきますよう宜しくお願い致します。なお、ASME/IGTIでは前回のIGTCと同様に来年のIGTC2019の展示にも出展することが検討されており、協力関係増進の機会となるのではないかと期待しております。



GTSJブース

ASME Turbo Expo 2018 参加報告

日本ガスタービン学会事務局
中村優美

ノルウェー・Lillestrom で開催のASME Turbo Expoに参加してまいりました。展示ブース出展も5回目となり、ブース設営等もスムーズに準備することができました。ブースでは、国際委員会メンバーの方々と共に来訪者の対応にあたり、GTSJの紹介や、8月に開催のACGT（アジアガスタービン会議）、2019年開催のIGTCの紹介をいたしました。ブースに立ち寄ってくださった方の中には、IGTCやACGTに参加予定という方もいらっしゃり、毎年の広報活動が効果を上げていると感じました。講演会2日目には午後7時45分からWomen in Engineering Event が会場近くのホテルで開催され、多数の女性エンジニアが集まりました。北欧の6月なので、終了時間の午後11時でも外はまだ明るく、うっかりすると時間を忘れてしまいそうでした。また、今回もTurbo Expo会期中に開催したGTSJ International Advisory Committee Meeting は、講演時間の合間を利用し、ランチミーティングの形で開催しましたが、今年はランチタイムの時間が短いため、和食レストランで「Bentobox」を予約し、対応いたしました。

IAC memberの方からはIGTC2019に向けたご助言を多数いただき、たいへん有意義な会議でした。

Turbo Expoに参加された国際委員会委員やGTSJ会員のみなさまのご協力により、今年も無事に、そして充実した日々を送ることができました。この場をお借りして御礼申し上げます。



GTSJ IAC Meeting

日本溶射学会第107回全国講演大会オーガナイズドセッション 「ガスタービンにおける溶射・コーティングの最前線」

岡田 満利

OKADA Mitsutoshi

去る6月6日、日本溶射学会第107回（2018年度春季）全国講演大会において、日本溶射学会と日本ガスタービン学会の共同企画として、オーガナイズドセッション（OS）「ガスタービンにおける溶射・コーティングの最前線」が、ホテルアウリーナ大阪で開催された。本OSは、昨年松山で行われた日本ガスタービン学会第45回定期講演会で開催したOSに続く、日本溶射学会と当学会がコラボレーションした行事である。

今回のOSでは、日本ガスタービン学会の会員、賛助会員などの協力を得て、溶射およびコーティング技術に関わる研究者、技術者に講演をお願いした。以下に、本OSの概要を報告する。

まず、岡崎正和先生（長岡技術科学大学）と山崎泰広先生（千葉大学）に全体概論をお願いし（当日の講演は山崎先生が担当された）、「遮熱コーティング材の破損—高信頼性に向けた最近のニーズとシーズ—」と題して講演した。講演では、遮熱コーティング（TBC）の概要を説明するとともに、再生可能エネルギー大量導入時代の中で、発電用ガスタービンには、頻繁かつ急速な負荷変動が求められ、それに対応するTBCのシーズを示された。続いて、ジェットエンジンおよび産業用ガスタービンの開発・製造を担うメーカ側から1件ずつ講演が行われた。森信儀氏（IHI）は、「ジェットエンジン部品製造でのコーティングの課題」と題して、ジェットエンジン部品に用いられるコーティング技術の動向や課題について解説した。鳥越泰治氏（三菱重工業）は、「発電用ガスタービン用先進遮熱コーティングの開発と実用化状況」と題して、1700℃級ガスタービン開発プロジェクトで進めている先進TBCについて説明した。さらに、ユーザ側から2件の講演が行われた。中野剛氏（JALエンジニアリング）は、「航空用ガスタービンエンジン部品補修における溶射技術適用の現状」と題して、実運航後のコーティングの損傷例を解説するとともに、補修技術について説明した。本稿を執筆している岡田（電力中央研究所）も、「発電用ガスタービン遮熱コーティングの損傷劣化評価手法の開発」と題して、TBCの熱サイクル試験手法とはく離寿命予測手法開発の取り組み状況について説明した。各講演後には、ガスタービンの開発、製造、保守の現場における実情や課題について多くの質問が出された。

講演発表後には、講演者に会場の参加者を交えて、全

体討論が行われた。まず、各講演者が、溶射技術、コーティングにおける課題や、溶射技術に期待することについて述べた。ジェットエンジンについては、日本発の技術が実機に適用できる可能性が高まっていることや、ジェットエンジンの性能向上を考えると、安全性の維持のためにも、基材やコーティング技術の向上が望まれることが述べられた。また、発電用ガスタービンについては、コーティングの開発・評価においては、単独のメーカや研究機関だけではなく、他機関とのコラボレーションが重要であることが述べられた。さらに、大学など研究機関が、いかに産業側のニーズを把握し、シーズを発信するかという課題が示された。

次に、会場の参加者からは、ジェットエンジンおよびガスタービン用材料として開発が進められているセラミック複合材料（CMC）用の耐環境コーティング（EBC）の開発の方向性、遮熱コーティングのブレイクスルーについて、問題提起がなされ、講演者とともに活発な討論がなされた。さらに、シーズ側の溶射技術とアプリケーション側のガスタービン技術の研究者、技術者が連携するための課題についても議論された。

また、中野氏には、ジェットエンジンで使用されたタービン翼を会場に持参いただいた。OS後には、会場の多くの参加者が興味深く観察していた。

最後に、本OSに多大なご協力をいただいた講演者の皆様に感謝します。また、企画、準備、運営にご尽力いただいた桑嶋孝幸氏（岩手県工業技術センター）をはじめ、日本溶射学会の皆様にご挨拶申し上げます。



講演会場の様子

第30回ガスタービン教育シンポジウム報告

泰中 一樹

TAINAKA Kazuki

2018年7月5日(木)、6日(金)の2日間にわたり、第30回ガスタービン教育シンポジウムが、神奈川県横浜市の東芝エネルギーシステムズ(株)京浜事業所タービン工場にて開催された。今年度は関東地区、関西地区それぞれで開催される年にあたり、関西地区では11月に三菱日立パワーシステムズ高砂工場で開催を予定している。そのため、関西地区からの参加者は少なかったが、それでも最終的に70名(学生11名、社会人59名)の方に参加して頂いた。

この教育シンポジウムは学生や若手技術者などガスタービン初学者を対象に、ガスタービンの基礎知識を学んで頂く目的で、第一線で活躍されている各専門家による講義と、実際のガスタービンとその関連の製造及び研究開発施設等の見学を併せた企画である。今回も1日目に講義2テーマと特別講義及び東芝エネルギーシステムズ(株)京浜事業所の生産設備の見学を実施し、2日目に講義4テーマを実施した。

1日目は、本学会の渡辺紀徳副会長による開会挨拶の後、2テーマの講義と特別講義、(1)ガスタービン概論(渡辺紀徳氏)、(2)ガスタービンと伝熱工学(村田章氏)、(3)東芝におけるタービン関連技術紹介(前田秀幸氏)が行われた。その後、官学参加者は京浜事業所内のタービン工場、タービン羽根工場、ガスタービン補修工場といった生産設備の見学を行い、参加者は各工程の説明に聞き入っていた。また、企業参加者は業種に応じてタービン工場、タービン羽根工場を見学し、東芝ガスタービン保守技術の紹介を受講した。

設備見学終了後、京浜事業所内にある食堂で懇親会が開催された。懇親会にはシンポジウム参加者の7割以上が参加し、会場各所で参加者同士の官学及び企業間の枠

を超えた活発な議論と相互交流がなされ、参加者の方に有意義な時間を過ごして頂けたと思われる。2日目は、前日に引き続きガスタービン関連の4テーマの講義、(4)ガスタービンと流体力学(山本誠氏)、(5)ガスタービンと燃焼工学(岩井保憲氏)、(6)ガスタービンと材料工学(齊藤大蔵氏)、(7)ガスタービンと制御工学(中村恵子氏)が行われた。それぞれの講義はガスタービンの基礎から最新の技術動向までを専門家の立場から説明がなされ、受講者にとって今後の仕事・研究などを進める上で大いに役立つ内容の濃い講義となっており、熱心な聴講・質疑応答が行われた。

全講義終了後、2日間の講義に参加した参加者全員に修了の証として受講証が手渡された。また、参加者には、今後の教育シンポジウムの運営及び教材に関するアンケートにご協力頂いた。アンケート結果は次回以降の企画及び教材の改訂に反映する予定である。

本シンポジウムでは2013年に出版され昨年改訂された「ガスタービン工学」を教材として用いており、その執筆者の先生方を中心に講師をお願いしている。「ガスタービン工学」は学会ホームページから購入することができ、今回の参加者のうち事前に教材を購入して受講した方もいた。講義では時間の都合もあり、教材の一部しか扱うことができなかったが、参加された皆様にはこの教材を有効に活用し、ガスタービンの知識をさらに深めるのに役立てて頂ければ幸いである。

最後に、講義、資料等の作成・準備にご尽力して頂いた講師の先生方々に感謝すると共に、会場の提供、見学会及び懇親会についてご協力頂いた東芝エネルギーシステムズ株式会社の関係者各位に深く感謝いたします。

(集會行事委員会委員)



講義風景



懇親会風景

第46回日本ガスタービン学会定期講演会（鹿児島）・見学会のお知らせ

第46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 (<http://www.gtsj.org/>) をご覧ください。

開 催 日：

- ・講演会 2018年10月10日(水)、11日(木)
- ・見学会 2018年10月12日(金)

開催場所：

- ・かごしま県民交流センター
〒892-0816 鹿児島市山下町14-50
Tel：099-221-6600 <http://www.kagoshima-pac.jp/>

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：ガスタービン関連技術開発プロジェクトの最新状況と展望
- ・企画オーガナイズドセッション：設計利用に向けた産学連携による解析技術開発の最前線
- ・特別講演：目からウロコの焼酎の話 ～歴史・文化・飲み方・・・～ 鮫島 吉廣 氏 (鹿児島大学)

参加登録費（税込）：

- ・会員・協賛団体会員 14,040円（ただし、学生は論文集ありで4,320円、論文集なしで1,080円）
- ・会員外 19,440円（ただし、学生は論文集ありで7,560円、論文集なしで4,320円）

宿 泊：

会期中のご宿泊は、各自で手配してください。

懇 親 会：

- ・第1日目（10月10日）の講演会終了後、「ホテル・レクストン鹿児島」にて懇親会を開催します。
懇親会参加費（税込）：4,320円

見 学 会：

- ・日 時：10月12日(金) 8：00～17：00
*JR鹿児島中央駅（16：10着）、鹿児島空港（17：00着）にて解散予定
- ・見学先：九州電力(株)山川発電所、(株)IHIバイオマス関連施設などの見学を予定しています。
- ・定 員：45名程度、先着順、講演会への参加登録者に限ります。
- ・参加費（税込）：6,480円
- ・申込締切日：9月28日(金)

参加申込方法：

- ・学会ホームページ (<http://www.gtsj.org/>) 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、受付の混乱を避けるため、事前登録をお願いします。講演者も参加登録をお願いします。

市民フォーラム：

- ・講演会の前日に、鹿児島大学にて大学生・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2018」を開催します。参加は無料です。
- ・演題：MRJ用PW1200Gエンジンと関連技術
- ・講師：貴志 公博 氏（三菱重工航空エンジン株式会社）
- ・日時：10月9日(火) 16：15～17：45（15：45開場）
- ・会場：鹿児島大学 郡元キャンパス 稲盛会館 ホール

第46回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会 (2018年10月10～12日)

参加申込書

(公社) 日本ガスタービン学会 行 FAX: 03-3365-0387 TEL: 03-3365-0095

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/FAX	
E-MAIL	

参加者名

フリガナ 氏 名*1	所 属	TEL/FAX E-MAIL	所属学会 (GTSJ会員 番号)	会員 資格 (正/学)	懇親会 (10日) (4,320円)	見学会 (12日) (6,480円)
					出席 欠席	参加 不参加
					出席 欠席	参加 不参加
					出席 欠席	参加 不参加
					出席 欠席	参加 不参加

*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) 参加登録料・参加費入金予定日 月 日 (10月9日までにお払込みください。)

- 銀行 (みずほ銀行 新宿西口支店 普通 1812298)
- 郵便振替 (00170-9-179578)
- PayPal決済 (クレジットカード)

送金金額 円(内訳: 参加登録費 円 懇親会参加費 円 見学会参加費 円)

当日支払いは原則として受け付けません。(当日不参加の場合でも参加費はお支払いいただきます。)

*請求書の発行について

- 要 宛名 ()
- 不要

*領収書の発行について

- 要 宛名 ()
- 不要

第46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)

(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10日	A室	B室	C室
9:20	空力(性能/流動制御)	燃焼(1)	伝熱(フィルム冷却)
9:40	[A-1]DBDプラズマアクチュエータによる直線タービン翼列の漏れ流れ抑制における入力電圧の影響 *松沼孝幸, 瀬川武彦(産総研)	[B-1][学]ダブルスワールバーナによる高温高圧場におけるケロシン系燃料の燃焼挙動に関する研究 *石川裕睦, Patrick Salman, 安藤詩音(東大院), 中谷辰爾, 津江光洋(東大), 藤原仁志(JAXA)	[C-1]フィルム冷却の高効率化に関するV字流れ制御デバイス形状の最適化 *齋藤涼(岩手大院), 船崎健一(岩手大), 河村朋広(岩手大), 森崎哲郎(MHPS)
10:00	[A-2]プラズマアクチュエータによる圧縮機可変静翼クリアランス部漏れ流れの制御に関する基礎的検討 *保坂春樹, 大塩哲哉, 浅海典男, 佐藤大祐(IHI)	[B-2][学]多孔質体を用いた灯油燃料超小型燃焼器の燃焼特性及び予熱と着火方法の検討 *高山尚之, 大和田悠介(首都大院), 櫻井毅司(首都大)	[C-2]カットセルと最適合格子を用いたフィルム冷却解析 *青木一義, 小林一英, 高瀬秀樹, 石川正俊(IDAJ)
10:20	[A-3]選音速ファンにおける層流効果の実証試験 *林亮輔, 田中望, 榎友謙, 岡武加藤大(IHI), 正木大作, 賀澤順一, 榎本俊治, 西澤敏雄(JAXA)	[B-3][学]超小型ガスタービンのためのアニュウ型燃焼器の研究 *八幡和典, 前田義貴, 飯吉徹, 仲又良介(新潟大院), 松平雄策, 松原幸治(新潟大), 小沢澤広之, 阿部和幸(YSEC)	[C-3]タービン冷却翼チップ部のフィルム冷却効率に関する研究 *伊藤竜太, 飯田耕一郎, 山口佳昭, 牧ヶ野大志, 坂元康朗, 石坂浩一(三菱重工), 羽田哲, 桑原正光(MHPS)
10:40	[A-4]aFJR軽量吸音ライナの開発 *坂本まい, 大石勉(IHI), 北條正弘, 石井達哉, 西澤敏雄(JAXA)	[B-4][学]液体燃料直接噴射デュアルスワールバーナのNOx排出特性に及ぼす流路形状と空気配分比の影響 *岩倉正尚, 岩崎智行(法政大院), 黒崎孝介, 林茂(法政大)	[C-4]フィルム冷却流れのPIVによる可視化 *浅海典男, 出田武臣, 田中雄飛, 松野伸介, 久保世志(IHI)
11:00	[A-5]パイプディフューザつき遠心圧縮機の一次元性能解析手法 *北村英二郎, 小穴峰保, 玉田俊一郎, 巨誠之, 長野啓明(Honda R&D)	[B-5][学]燃料噴霧ジェットの変遷衝突による淀み点炎を1段目に用いた希薄・希薄2段燃焼におけるNOx排出特性 *酒井恒太(法政大院), 中島優, 伊藤慎吾, 横山貴一, 林茂(法政大)	[C-5]SST乱流モデルのペイジアンモデル較正に基づくフィルム冷却効率予測 *三坂孝志(産総研), 浅海典男, 出田武臣(IHI), 大林茂(東北大)
11:20	材料(合金・複合材)	燃焼(2)	タービン
11:40	[A-6]タービン翼用自己治癒セラミックスの開発 *長田俊郎, 三留正則, 原徹, 阿部太一(物材機構), 中尾航(横浜国大), 大村孝仁(物材機構)	[B-6]航空機エンジン用予混合2段燃焼器のマルチセクタ試験による性能評価 *吉田征二, 山本武, 下平一雄(JAXA)	[C-6][学]非軸対称Endwallによるタービン翼列内の二次流れの低減 - 一平面Endwall静圧分布に基づく凹凸分布の適用 - *板東翼(法政大院), 任憲鶴(IHI), 辻田星歩(法政大)
12:00	[A-7]超耐環境性高強度酸化物セラミック基複合材料の開発 *鉄井利光, 原田広史(物材機構)	[B-7]航空用同軸型希薄ステージバーナのバイロッドカップ内火炎可視化実験におけるガラス表面付着すす除去用レーザーワイプクリーニングの適用 *松浦一哲(JAXA), 上坂峻也, 篠原竜次(法政大), 加藤昂大, 山本武(JAXA)	[C-7][学]環状翼列実験と数値解析を用いたエンドウォールにおけるフィルム冷却に関する研究 *橋本光一郎(岩手大院), 船崎健一(岩手大), 森崎哲郎(MHPS)
12:20	[A-8]1500トン鍛造シミュレータによる鍛造プロセス開発 *黒田秀治, 本橋功会, 御手洗容子(物材機構)	[B-8]メタン/水素/空気予混合気の乱流燃焼速度の予測 *武藤昌也(名城大), 長井大頭, 黒瀬良一(京大), 赤松史光(阪大), 井上慶(三菱重工), 宮本健司(MHPS)	[C-8][学]超高負荷タービン直線翼列内の損失低減に関する研究 - 最適スキューラ深さと翼端間隙高さの関係 - *秋山浩二, 田澤敏之(法政大院), 脇田悠介(シチズン時計), 辻田星歩(法政大), 金子雅直(東京電機大)
12:40	[A-9]ジェットエンジン用Ti合金鍛造材の組織形成と引張特性 *御手洗容子, 黒田秀治, 本橋功会(物材機構), 松本洋明(香川大), 吉田佳典(岐阜大), 宮本吾郎(東北大), 逸見義男(神戸製鋼)	[B-9]アンモニア燃焼ガスタービンにおける低NOx Rich-lean燃焼器の研究開発 *豊岐典彦, 倉田修, 井上貴博, 松沼孝幸, 辻村拓, 古谷博秀(産総研), 河野雅人, 新井啓介(トヨタエナジー), Ekenechukwu Chijioke Okafor, 早川晃弘, 小林秀昭(東北大)	[C-9][学]低圧タービンにおける翼列フラッタの検知 - 力学系理論の導入 - *林俊人, 八條貴幸(東京理科大学), 後藤田浩(東京理科大学), 西澤敏雄, 賀澤順一(JAXA)
13:00	[A-10]高強度Ni基合金USC800のガスタービン部品への適用検討 *今野晋也, 佐藤順, 江口滋信(MHPS)	[B-10]サイクル計算によるアンモニア天然ガス混焼ガスタービンの性能予測 *伊藤慎太郎, 内田正宏, 大西正悟, 藤森俊郎(IHI), 小林秀昭(東北大)	[C-10][学]同期理論を用いた低圧タービン部に生じる翼列フラッタの検知 *八條貴幸, 林俊人(東京理科大学), 後藤田浩(東京理科大学), 西澤敏雄, 賀澤順一(JAXA)
13:20	[A-11]発電用ガスタービン部品の拡散ろう付け補修材の組織安定性評価 *齊藤大蔵, 坂本昭博, 北山和弘(東芝エネルギーシステムズ)		
(昼休憩)			
14:20	企画OS	材料(耐熱)	性能(1)
14:40	「設計利用に向けた産学連携による解析技術開発の最前線」 《講演》(75分)	[B-12]3ton溶解にてCaO脱硫したNi基単結晶超合金TMS-1700のクリープおよび酸化特性 *横川忠晴, 原田広史, 川岸京子, 大沢真人, 高田裕治, 湯山道也, 小林敏治(物材機構), 杉山拓弥(早大院), 鈴木進補(早大)	[C-12][学]パルスドレネーションによるガスタービンの自立運転に向けた検討 *四方茂人(首都大院), 櫻井毅司(首都大)
15:00	[A-12]将来航空推進システム技術創成社会連携講座における非常空力解析技術について 青塚瑞穂(IHI)	[B-13]Ni基単結晶超合金CMSX-4, CMSX-4 plus, CMSX-10N及びTMS-238のクリープ強度と耐環境特性 *小泉裕, 横川忠晴(物材機構), 杉山拓弥(早大院), 湯山道也, 原田広史, 川岸京子, 高田裕治, 小林敏治, 坂本正雄(物材機構), 鈴木進補(早大)	[C-13][学]翼型熱交換器で構築した軽量IGRエンジン搭載機のフェーエルバーンの評価 *二ノ宮竜成(東大院), 伊藤俊, 長崎孝夫(東工大)
15:20	[A-13]軸流圧縮機の大规模流れ解析と設計利用 松岡右典(川崎重工)	[B-14]Ni-Co基超耐熱合金の高温引張およびクリープ特性におけるBおよびZrの影響 *小林信一, 伊達正芳, 上野友典, 大野文博(日立金属), 川岸京子(物材機構)	[C-14][学]サイクル解析に基づく電動化航空機エンジンの性能評価 *岩崎祐介(東大院), 堀野武洋, 渡辺紀徳, 立石敦, 佐久間康典(東大)
15:40	[A-14]ガスタービン燃焼器開発におけるCFDの適用 齊藤圭司(三菱重工)	[B-15]選択的レーザー溶融法を用いて造形したNi基超合金Inconel718の後熱処理がクリープ特性に及ぼす影響 *長張俊希(首都大院), 郭妍伶, 寛幸次(首都大)	[C-15][学]ターボチャージャーの効率マップにおける補外域の予測精度の検証 *高橋優己, 窪山達也, 森吉泰生, 山田敏生(千葉大)
16:00	《パネル討論》(20分) 青塚瑞穂(IHI) 松岡右典(川崎重工) 齊藤圭司(三菱重工) 立石敦(東大) 古川雅人(九大) 黒瀬良一(京大)	[B-16]SLM法とHIP法により作製したNi基超合金CM247 LCの組織と機械的特性 *平井篤志(首都大院), 郭妍伶, 寛幸次(首都大)	[C-16][学]小型ガスタービン試作機の改良 *水野佑樹, 宮城喜一(高知工科大), 岩間輝佳, 野崎理, 筒井康賢(高知工科大)
16:20	特別講演	座長: 松沼 孝幸 (産総研)	
17:40	[S-1] 目からウロコの焼酎の話 ~ 歴史・文化・飲み方・・・ ~	飯島 吉廣 氏 (鹿児島大)	
19:00	懇親会	司会: 平野 孝典 (拓大)	
21:00	[市内] ホテル レクストン 鹿児島		

第46回日本ガスタービン学会定期講演会プログラム：第2日(暫定)

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

	A室	B室	C室
第2日 10月11日	空力(翼列流)	要素性能/材料	伝熱(試験法・性能評価)
9:20	【A-17】高負荷軸流圧縮機の段解析手法の評価 *立石敦, 渡辺紀徳, 姫野武洋(東大), 谷直樹, 青塚瑞穂, 加藤大(IHI)	【B-17】[学]SLM法におけるプロセスパラメータがNi基超合金IN718の欠陥および機械的特性に及ぼす影響 *近藤 研志(首都大院), 寛 幸次(首都大), An-Chou Yeh(National Tsing Hua Univ.)	【C-17】Polynomial Chaosとco-Kriging法を併用した平板フィルム冷却の不確かさ評価 *酒井英司(電中研), Meng Bai, Richard Ahlfeld (Imperial College), Kerry Klemmer (Princeton University), Francesco Montomoli (Imperial College)
9:40	【A-18】多段ハーモニックバランス法における上下流翼列の周波数の影響について *谷直樹, 青塚瑞穂(IHI)	【B-18】[学]Ni基一方凝固超合金のクリープ寿命に及ぼす硫黄の影響とCaOるつぼ溶解による回復効果 *佐々木英里(早大院), 川岸京子, 横川忠晴, 高田裕治, 小林敏治, 湯山道也(物材機構), 鈴木進補(早大), 原田広史(物材機構)	【C-18】デジタルモックアップによるガスタービン翼の温度解析モデル *高橋俊彦, 酒井英司, 藤井智晴(電中研)
10:00	【A-19】後縁の薄い翼, 翼列のポテンシャル解法(第2報) *筒井康賢(高知科大)	【B-19】[学]遠心圧縮機低流量域でのディフューザ旋回失速の挙動と内部流動調査 *渡邊紗貴, 乾哲也(早大院), 藤澤信道, 太田有(早大)	【C-19】耐熱材料のエロージョン試験法に関する研究 *鈴木正也, 山根敬(JAXA)
10:20	【A-20】吐出圧力変動を伴うターボチャージャ遠心圧縮機の非定常流動解析 *林良洋, 富田敷(三菱重工), Ricardo Martinez-Botas, ME Barrera-Medrano(Imperial College)	【B-20】[学]境界層吸い込み(BLI)を模擬した入口全圧ディストーションがファンの空力性能に与える影響 *大串尚太郎, 三谷佳宏(早大院), 佐藤哲也(早大), 岡井敬一, 賀澤順一, 正木大作, 原田正志(JAXA)	【C-20】ガスタービンTBC施工動翼の劣化評価 *岡田満利, 高橋俊彦(電中研), 藤岡照高(東洋大), 藤井智晴, 酒井英司, 尾関高行, 渡辺和徳(電中研)
10:40	【A-21】蒸気タービン最終段翼の低負荷流れにおける渦構造 *田沼唯士, 秋山久実(帝京大), 渋川直紀, 奥野研一, 佃知彦(東芝)	【B-21】[学]子午面流動解析に基づく逆解法を用いた超音速遠心圧縮機羽根車の二次流れ抑制 *伊藤流石, 岡田伸川, 山上祐輝(九大), 古川雅人(九大), 山田和豊(岩手大)	【C-21】高効率ガスタービン用塗熱コーティングの開発状況 *武野和馬, 鳥越泰治, 岡嶋芳史(三菱重工)

	A室	B室	C室
	構造・潤滑	性能(2)	空力(翼列流)
11:20	【A-22】遠心圧縮機の翼振動に関する研究—静翼配置変更による応答低減— *下原直人, 見上千尋, 服部博明(IHI)	【B-22】Modelicaを用いたガスタービンおよびコンパインドサイクル発電プラントの動的シミュレーション *西田怜美, 高鋭(モデロン)	【C-22】[学]ガスタービン用圧縮機翼流れへの湿りの影響に関する数値的研究—第2報: Rotor37の湿り空気流動解析— *森口昇太, 宮澤弘法(東北大院), 古澤卓, 山本悟(東北大)
11:40	【A-23】シュラウド翼の共振応答と安定性の変動解析—シュラウドコンタクト状態の変動の影響— *金子康智(龍谷大), 森一石(三菱重工), 古川達也(MHPS)	【B-23】戦闘機用エンジン要素(コアエンジン)の性能確認試験 *坂本敦貴, 高村倫太郎, 及部朋紀, 高原雄児(防衛装備庁)	【C-23】[学]航空機における防水ファン動翼に対する大気中水分含有量の影響 *和田拓也(東京理科大), 守裕也, 福留功二, 山本誠(東京理科大), 水野拓哉, 賀澤順一, 鈴木正也(JAXA)
12:00	【A-24】HF120エンジン開発におけるバードストライクの解析事例 *成田祐, 且誠之, 田中貴文(Honda R&D)	【B-24】航空機運航燃料消費量へのエンジン性能と重量の影響評価—エンジン回転数による推力制御の場合— *福山佳孝, 山根敬, 西澤敏雄(JAXA)	【C-24】[学]超音速多段軸流圧縮機における流動損失の発生メカニズムとその定量評価 *齋藤誠志朗(九大), 古川雅人(九大), 山田和豊(岩手大), 渡邊啓介(九大), 松岡右典, 丹羽直之(川崎重工)
12:20	【A-25】メンブランパッチ法によるガスタービン油の管理に関する研究 *伊藤岳史, 宮島誠(JXTGエネルギー)	【B-25】超高バイパス比ダクト・ターボファンのサイクル特性—No.2 高低圧両圧縮機間の可変静翼に関する考察— *根本勇	【C-25】[学]翼列LES解析に向けた高次精度ブロック境界条件の検証 *李允台(東大院), 寺本進, 岡本光司(東大)
12:40		【B-26】超高バイパス比ダクト・ターボファンのサイクル特性—No.3 巡航方式及び離陸定格温度に関する考察— *根本勇	

(昼休憩)

	A室
13:50	学生優秀講演賞 審査結果報告 座長: 松沼 孝幸 (産総研)
14:00	先端技術フォーラム: ガスタービン関連技術開発プロジェクトの最新状況と展望 座長: 渡辺 紀徳 (東大)
	《趣旨説明》(5分)
	《講演》(90分)
	【S-2】機動性に優れた広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の開発プロジェクト 渡辺和徳(電中研)
	【S-3】JAXAの研究開発プロジェクト: 高効率軽量ファン・タービン技術実証(aFJR) 西澤敏雄(JAXA)
	《全体討論》(25分)

16:10

第31回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

当学会では毎年、学生及びガスタービン開発に携わる新人技術者を対象とした標記シンポジウムを開催しております。第31回教育シンポジウムを下記の通り開催いたしますので、会員・非会員を問わず積極的にご参加ください。

- 日時：2018年11月1日(木)、2日(金)
- 場所：三菱日立パワーシステムズ株式会社 高砂工場 高砂クラブ（兵庫県高砂市荒井町新浜2-7-31）
山陽電車荒井駅 下車徒歩5分。
- プログラム：1日(木) 9:30- 受付（高砂工場 高砂クラブ2階 大集会議室）
10:00-10:10 開会の挨拶
10:10-11:40 「ガスタービン概論」 柴田 貴範（三菱重工業）
11:40-13:00 昼食
13:00-14:30 「ガスタービンと流体工学」 三戸 良介（三菱重工業）
14:40-16:10 「ガスタービンと材料工学」 上村 好古（三菱日立パワーシステムズ）
16:20-17:50 「ガスタービンと制御工学」 黒坂 聡（川崎重工業）
18:00-19:30 懇親会
2日(金) 8:50- 受付
9:20-10:50 「ガスタービンと伝熱工学」 都留 智子（川崎重工業）
11:00-12:30 「ガスタービンと燃焼工学」 小田 剛生（川崎重工業）
12:30-13:30 昼食
13:30-14:20 「三菱日立パワーシステムズにおけるガスタービンの開発」
(三菱日立パワーシステムズ)
14:30-16:25 見学会（官学/企業参加者）※同業企業の方は技術紹介の聴講となります。
三菱日立パワーシステムズ 生産設備、実証設備
三菱重工業 研究設備
三菱日立パワーシステムズのガスタービン技術の紹介（同業企業の方）
16:40-16:50 アンケート記入
16:50-17:00 閉会の挨拶

注：都合により講演順番が入れ替わる場合もございますので、最終プログラムはホームページにてご確認ください

- 定員：60名 ※申込み多数の場合お断りすることがございます。
- 対象者：大学、大学院、高等専門学校在籍者、ならびに技術者（ガスタービン初心者）
- 参加費（税込）：学生（会員：¥4,320、非会員：¥7,560）、社会人（会員：¥10,800、非会員：¥19,440）
参加費には、テキスト（ガスタービン工学）代金が含まれております。
- 懇親会：参加費 無料
- 受講証の発行：2日間の講義を受講された方には、「ガスタービン教育シンポジウム受講証」を発行します。
- 申込方法：下記の申込書に必要事項を明記し、学会事務局宛に、郵便、ファクシミリ、電子メールのいずれかにより2018年10月17日(木)（必着）までに、お申し込み下さい。学会ホームページからも申込ができます。
- 参加費の支払：当日支払いですが、事前の支払いも受け付けます。事前に支払う場合は、その旨を学会事務局にお知らせ下さい。

○昼食：当日、食堂は利用不可となるため、各自準備ください。なお、実費弁当申し込みを承ります（飲み物付きで1,000円/日程度です）。

○宿泊施設：斡旋はいたしませんので必要な方は各自手配してください。

注：開催場所案内図及び詳細については当学会ホームページをご覧ください。（<http://www.gtsj.org/>）

第31回ガスタービン教育シンポジウム参加申込書

(2018年11月1日,11月2日)

公益社団法人 日本ガスタービン学会 行

FAX : 03-3365-0387 TEL : 03-3365-0095 E-mail : gtsj-office@gtsj.org

氏名		国籍		性別	男・女
所属				学年、入社年度	
連絡先	〒			昼食申込	1日・2日
TEL				懇親会	参加・不参加
E-mail				GTSJ会員No. () / 非会員	

注）外国籍の参加者には、申込書に記載した情報の他に別途、パスポート番号などを伺うことがございます。詳しくは、申込受付後にご連絡いたします。

2018年度第2回見学会のお知らせ

2018年度第2回見学会を下記の通り開催致します。

1. 日時

2018年11月16日(金) 13:20～16:20(予定)

JR常磐線 相馬駅集合・解散

2. 場所および内容

場所：(株)IHIキャスティングス 相馬工場(福島県相馬市)

内容：ガスタービンエンジン部品の精密鑄造工場の見学

3. 参加要領

(1)参加資格：大学生以上(注1)

(2)定員：25名程度(お申し込み多数の場合、お断りすることがございます)

(3)参加費(税込)：当日お支払いください

正会員 2,160円

非会員 3,240円

学生(会員/非会員問わず) 1,080円

(注1) 同業他社や外国籍の方はお断りすることがございます。

4. スケジュール

13:20 JR常磐線 相馬駅集合(バスにて移動)(注2)

13:40 工場受付(注3)

13:50～14:20 工場の紹介

14:20～15:40 工場の見学

15:40～16:00 質疑応答

16:20 JR常磐線 相馬駅解散

(注2) 参加者には別途、集合場所・スケジュール等の詳細をお知らせする予定です。

(注3) 当日は顔写真付きの公的身分証明書(運転免許所、パスポート等)の提示が必要になります。

5. 申込方法

「2018年度 第2回見学会 参加申し込み」と明記のうえ、下記の情報を、E-MailまたはFAXにて学会事務局(E-mail: gtsj-office@gtsj.org, Fax: 03-3365-0387)までお送り下さい。学会ホームページからもお申し込みいただけます。

(1)氏名(ふりがな)

(2)性別

(3)会員種別(会員の場合は、会員番号)

(4)ご所属(名称、部署、役職)

(5)ご所属先の住所

(6)国籍

(7)連絡先(電話番号、E-Mail)

◆申込締切：2018年10月26日(金)

申込者全員に、参加可否を11月5日(月)までにお知らせいたします。学会からの連絡がない場合には、お問い合わせください。

2018年度第2回若手技術者交流会開催のお知らせ

個々の研究・技術レベルの向上と会員相互の情報交換の促進を図ることを目的とし、2018年度第2回若手技術者交流会を下記の通り開催いたします。今回は「振動」をテーマとしています。

1. 日時：2018年12月7日(金) 13:30～20:00
2. 場所：Honda Innovation Lab Tokyo (東京都港区赤坂5-3-1 赤坂Bizタワー 27F)
3. 内容：
 - 講義：「ロータダイナミクスの応用紹介：バランス・安定性・アクティブ制御」松下修己氏(防衛大学校 名誉教授)
ロータ高速化で問題となる弾性ロータバランス、およびホーワールなどの自励振動(安定性)については事例を
交え説明する。また、ロータ振動の磁気軸受制御についての展望を紹介する。
 - 講演：「HF120ターボファンエンジン開発における振動評価」國弘清隆氏(株式会社本田技術研究所)
GEとHondaで共同開発しHondaJetに搭載されているHF120ターボファンエンジンの軸振動を中心とした振動評
価について紹介する。
4. プログラム(予定)：
 - 13:30-14:20 参加者自己紹介
 - 14:30-17:00 講義, 講演
 - 17:00-17:45 質疑応答およびディスカッション
 - 18:00-20:00 懇親会

詳細および申込方法につきましては、10月中旬に日本ガスタービン学会HP (<http://www.gtsj.org/>) において公開いたします。



第47回ガスタービンセミナー開催のお知らせ

第47回ガスタービンセミナーを下記の通り開催いたします。

今回は「ガスタービンの最新技術および運転・保守技術の最新動向」(予定)をテーマとしています。最前線で活躍されている方々のご講演を通して、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を学ぶとともに、エネルギーに関する幅広い技術分野の知見を高める内容とします。

(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：2019年1月24日(木) 9:30～17:00 (予定)
25日(金) 9:30～17:00 (予定)
2. 場 所：帝京大学 板橋キャンパス
〒173-8605 東京都板橋区加賀2-11-1
JR埼京線「十条駅」下車、徒歩約10分
3. テ ー マ：「ガスタービンの最新技術および運転・保守技術の最新動向」(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。(http://www.gtsj.org/)

○ 本会協賛行事 ○

主催学協会	会合名	共催/協賛	開催日	会場	詳細問合せ先
日本機械学会	No.18-105講習会「『伝熱工学資料(改定第5版)』の内容を教材にした熱設計の基礎と応用」	協賛	2018/9/27-28	日本機械学会会議室	URL: https://www.jsme.or.jp/event/2018-31578/
日本機械学会 関西支部	第19回秋季技術交流フォーラム	協賛	2018/10/20	和歌山大学	URL: http://www.kansai.jsme.or.jp/
東京大学大学院 工学系研究科 ポスト「京」 重点課題⑥	ポスト「京」重点課題⑥ 第3回シンポジウム「世界最高水準のスーパーシミュレーションで革新的クリーンエネルギーシステムの実用化を加速する-最新の研究成果と産業界からの期待」	協賛	2018/10/23	東京大学弥生講堂一条ホール	URL: http://postk6.t.u-tokyo.ac.jp/event/symposium201810.html
日本エネルギー学会/日本液体微粒化学会	第14回微粒化セミナー	協賛	2018/11/1	東京都立産業技術研究センター	URL: http://www.jie.or.jp/publics/index/636
日本機械学会 関西支部	ステップアップセミナー 2018「再生可能エネルギーの今を考える」	協賛	2018/11/30	大阪科学技術センター 8階 中ホール	URL: http://www.kansai.jsme.or.jp/



▷ 入 会 者 名 簿 ◁

〔正会員〕

橋本 和真(IHI)

宮坂 真始(日産自動車)

〔学生会員〕

橋本 光一郎(岩手大学大学院)

中村 大樹(東京大学)

山添 有紗(東京大学)

吉田 弘祐(東京大学)

石川 裕睦(東京大学大学院)

秋山 浩二(法政大学大学院)

板東 翼(法政大学大学院)

〔賛助会員〕

岩谷産業(株)

(株)菱友システム技術

次号予告 日本ガスタービン学会誌2018年11月号 (Vol.46 No. 6)

特集 ガスタービンにおける伝熱・冷却技術の最新動向

論説・解説

総説 船崎健一(岩手大学)

航空エンジンにおける伝熱・冷却の技術動向 大北 洋治(IHI)

川崎重工における産業用ガスタービンの冷却翼開発 谷口 智紀(川崎重工業)

三菱日立パワーシステムズにおける最新の産業用ガスタービンのタービン翼冷技術 羽田 哲(三菱日立パワーシステムズ)

タービン動翼内部流路の熱流動特性に関する研究 武石 賢一郎(徳島文理大学), 都留 智子(川崎重工業)

フィルム冷却性能向上のための制御デバイス 船崎 健一(岩手大学)

ガスタービン翼後縁部カットバック面のフィルム冷却 村田 章(東京農工大学)

ガスタービンの伝熱問題における不確かさ評価 酒井 英司(電力中央研究所),

Ms.Kerry Klemmer (Princeton Univ.), Dr.Montomoli,Francesco (Imperial College London)

※タイトル, 執筆者は変更する可能性があります。

2018年度役員名簿

会長 油谷 好浩 (東芝)

副会長 渡辺 紀徳 (東大)

法人管理担当執行理事 大石 勉 (IHI), 寺本 進 (東大), 福泉 靖史 (三菱重工), 北山 和弘 (東芝エネルギーシステムズ) (兼務)

公益目的事業担当執行理事 黒瀬 良一 (京大), 高原 雄児 (防衛装備庁), 谷村 聡 (MHPS), 辻田 星歩 (法政大), 福山 佳孝 (JAXA), 松岡 右典 (川崎重工), 山本 悟 (東北大), 山本 誠 (東京理科大), 壹岐 典彦 (産総研) (兼務)

理事 大塚 裕也 (本田), 川岸 京子 (物材研), 高橋 俊彦 (電中研), 千葉 秀樹 (酒田共同火力発電), 菟川 宏樹 (JALエンジニアリング)

監事 田沼 唯士 (帝京大), 佃 嘉章 (三菱重工)

2018年度委員名簿 (順不同)

2018年7月26日現在

○は委員長

倫理規定委員会 ○福泉 靖史 (三菱重工), 壹岐 典彦 (産総研), 大石 勉 (IHI), 寺本 進 (東大), 山本 誠 (東京理科大)

自己点検委員会 ○福泉 靖史 (三菱重工), 壹岐 典彦 (産総研), 大石 勉 (IHI), 寺本 進 (東大), 山本 誠 (東京理科大)

運営委員会 ○寺本 進 (東大), 壹岐 典彦 (産総研), 大石 勉 (IHI), 北山 和弘 (東芝エネルギーシステムズ), 酒井 義明 (東芝エネルギーシステムズ), 塚原 章友 (MHPS), 辻田 星歩 (法政大), 松沼 孝幸 (産総研), 福泉 靖史 (三菱重工), 山本 誠 (東京理科大)

企画委員会 ○壹岐 典彦 (産総研), 太田 有 (早大), 北山 和弘 (東芝エネルギーシステムズ), 塚原 章友 (MHPS), 辻田 星歩 (法政大), 寺本 進 (東大), 福泉 靖史 (三菱重工), 安田 聡 (MHPS), 山本 誠 (東京理科大), 輪嶋 善彦 (本田)

国際委員会 ○船崎 健一 (岩手大), 井上 智博 (九大), 岡井 敬一 (JAXA), 北山 和弘 (東芝エネルギーシステムズ), 小森 豊明 (MHPS), 谷 直樹 (IHI), 都留 智子 (川崎重工), 福田 雅文 (高効率発電システム研究所), 山根 敬 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大), 渡辺 紀徳 (東大)

学術講演会委員会 ○松沼 孝幸 (産総研), 今野 晋也 (MHPS), 岡嶋 芳史 (三菱重工), 尾関 高行 (電中研), 糟谷 宏樹 (東芝エネルギーシステムズ), 北村 英二郎 (本田), 黒瀬 良一 (京大), 武田 淳一郎 (元 富士電機), 富永 純一 (JFEエンジニアリング), 中山 健太郎 (川崎重工), 浜辺 正昭 (IHI), 姫野 武洋 (東大), 平野 孝典 (拓殖大), 藤原 仁志 (JAXA), 渡邊 裕章 (九大)

集行事務委員会 ○山本 誠 (東京理科大), 小沢 寛二 (IHI), 金澤 直毅 (川崎重工), 佐久間 康典 (東大), 澤 徹 (東芝エネルギーシステムズ), 泰中 一樹 (電中研), 谷村 聡 (MHPS), 長野 啓明 (本田), 西江 俊介 (三井E&Sマシナリー), 西村 英彦 (MHPS), 菟川 宏樹 (JALエンジニアリング), 藤井 達 (日立製作所), 山形 通史 (富士電機), 山田 誠一 (防衛装備庁), 吉田 征二 (JAXA)

ガスタービン技術普及委員会 ○福山 佳孝 (JAXA), 石田 克彦

(川崎重工), 岡田 満利 (電中研), 垣内 大紀 (IHI), 賀澤 順一 (JAXA), 齊藤 大蔵 (東芝エネルギーシステムズ), 高橋 康雄 (MHPS), 谷岡 忠輝 (MHPS), 長谷川 晃 (JALエンジニアリング), 村田 章 (東京農工大), 山本 誠 (東京理科大), 渡辺 紀徳 (東大)

学術誌編集委員会 ○辻田 星歩 (法政大), 荒木 秀文 (MHPS), 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), 川岸 京子 (物材研), 阪井 直人 (川崎重工), 佐藤 哲也 (早大), 渋川 直紀 (東芝エネルギーシステムズ), 杉本 富男 (三井E&Sマシナリー), 高橋 俊彦 (電中研), 田尻 敬次 (荏原エリオット), 多田 暁 (JALエンジニアリング), 千葉 秀樹 (酒田共同火力発電), 寺澤 秀彰 (東京ガス), 寺本 進 (東大), 中野 賢治 (IHI回転機械), 新関 良樹 (徳島文理大), 野原 弘康 (ダイハツディーゼル), 馬場 勝 (IHI), 原 浩之 (MHPS), 北條 正弘 (JAXA), 松崎 裕之 (東北発電工業), 森澤 優一 (東芝エネルギーシステムズ), 山下 一憲 (荏原製作所), 山根 喜三郎 (防衛装備庁)

論文委員会 ○姫野 武洋 (東大), 青塚 瑞徳 (IHI), 壹岐 典彦 (産総研), 小田 剛生 (川崎重工), 柴田 貴範 (三菱重工), 田頭 剛 (JAXA), 寺本 進 (東大), 中谷 辰爾 (東大), 山根 敬 (JAXA), 山本 悟 (東北大), 山本 武 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大), 吉岡 洋明 (東北大)

ガスタービン統計作成委員会 ○松岡 右典 (川崎重工), 赤澤 弘毅 (川崎重工), 荒井 慎吾 (ターボシステムズユニテッド), 恵比寿 幹 (三菱重工), 後藤 裕一 (IHI), 澤 徹 (東芝エネルギーシステムズ), 山上 展由 (MHPS), 吉田 知彦 (MHPS), 米田 幸人 (ヤンマー)

産官学連携委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 壹岐 典彦 (産総研), 岡崎 正和 (長岡技科大), 金津 和徳 (IHI), 岸部 忠晴 (MHPS), 幸田 栄一 (電中研), 佐々木 隆 (東芝エネルギーシステムズ), 武 浩司 (川崎重工), 檀原 伸補 (防衛装備庁), 野崎 理 (高知工科大), 藤岡 順三 (物材研), 二村 尚夫 (JAXA), 松崎 裕之 (東北発電工業), 吉田 英生 (京大), 輪嶋 善彦 (本田)

広報委員会 ○高原 雄児 (防衛装備庁), 壹岐 典彦 (産総研), 酒井 義明 (東芝エネルギーシステムズ), 姫野 武洋 (東大), 村田 章 (東京農工大), 山根 敬 (JAXA), 吉田 征二 (JAXA)

表彰委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 壹岐 典彦 (産総研), 辻田 星歩 (法政大), 福泉 靖史 (三菱重工), 山本 誠 (東京理科大)

女性参画推進委員会 ○都留 智子 (川崎重工), 旭 睦 (IHI), 川岸 京子 (物材研), 川澄 郁絵 (本田), 森川 朋子 (MHPS)

ACGT2018実行 ○山根 敬 (JAXA), 井上 智博 (東大), 谷 直樹 (IHI), 谷口 英夫 (岩手大), 都留 智子 (川崎重工), 船崎 健一 (岩手大), 古澤 卓 (東北大), 三好 市朗 (MHPS), 山田 和豊 (岩手大)

IGTC2019実行委員会 ○西澤 敏雄 (JAXA), 太田 有 (早大), 北山 和弘 (東芝エネルギーシステムズ), 齊藤 大蔵 (東芝エネルギーシステムズ), 渋川 直紀 (東芝), 鈴木 正也 (JAXA), 塚原 章友 (MHPS), 寺本 進 (東大), 仲俣 千由紀 (IHI), 中村 恵子 (IHI), 牧田 光正 (JAXA), 安田 聡 (MHPS), 山根 敬 (JAXA), 吉田 征二 (JAXA)

日本ガスタービン学会入会のご案内

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

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

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

学会の概要（2018年3月現在）

会員数：2,057名（正会員 1,993名，学生会員 64名） 賛助会員：113社
 会員の出身母体数：企業・研究機関・官公庁等 約300，学校 約100

会員のメリット

個人会員（正・学生会員）：

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

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

入会金と会費

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

※当該年度3月1日現在

後期・・・9月1日～翌2月末まで

入会方法

学会ホームページにて入会手続きができます（<http://www.gtsj.org/index.html>）。

学会事務局にお電話いただいても結構です。申込書を送付致します。



公益社団法人 日本ガスタービン学会
 Gas Turbine Society of Japan

〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13 第3工新ビル402

電話番号：03-3365-0095

E-mail: gtsj-office@gtsj.org

編集 後記

昨年も9月号で編集後記をしたためましたが、私の住む仙台の今年の天候は36日連続で雨が降り続き、日中の最高気温も25℃に届かないという状況でしたが、今年は全く逆の状況。連日最高気温は30℃を超え、さらには観測史上最高となる37.3℃が観測され11年振りの記録更新となりました。

全国的にもまるで熱帯地方のような高温の日々が続く一方、西日本では記録的な豪雨に見舞われ大変な被害がありました。命を落とされた方々、被害を受けられた方々には衷心よりお悔やみを申し上げます。

また、例年にも増して高い海水温度の影響か、毎日のように台風が発生する状況に見舞われています。こうした日々が続いたため野菜や果物の生育にも大きな影響が出ており、まさに「異常気象」を実感する今夏の天候となっています。

さて、今月号では最近のガソリンエンジン用過給機の動向と題し、特集を組みました。

太田先生の巻頭言にもございましたが、我々世代ではターボチャージャやスーパーチャージャといった過給機は出力の向上を狙った補機として若者の心を捕えていたものでした。

しかしながら、最近のダウンサイジングターボチャージャに代表されるような新しいコンセプトに基づく過給機はCO₂削減による地球温暖化防止対策の一つとして大いに注目を集める技術となっています。

一方で乗り物の心地よい加速感を感じさせる補機としても重要であることも感じさせる特集になったのではないかと考えています。

編集作業に当たっては、毎度のことですが各企業、大学の夏休み期間と重なることから入稿の遅れも懸念され

ましたが、ご投稿をお願いした著者の皆様のご協力のおかげでは当初工程通り編集作業を完了することができました。この場をお借りしてご投稿いただいた著者の皆様に厚く感謝申し上げます。

なお、本号の特集にかかわる企画編集は荒木委員（三菱日立パワーシステムズ）、山根委員（防衛装備庁）、多田委員（JALエンジニアリング）、そして松崎（東北発電工業）が担当いたしました。（松崎 裕之）

- 9月号アソシエイトエディター
松崎 裕之（東北発電工業）
- 9月号担当委員
荒木 秀文（三菱日立パワーシステムズ）
多田 暁（JALエンジニアリング）
山根 喜三郎（防衛装備庁）
ASME見聞記：金子雅直（東京電機大学）

（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。

- ・「大型二輪車用過給機および過給エンジンの開発」
..... (P.343 ~ 350)
- ・「乗用車用ターボチャージャの将来技術と最新技術動向」
..... (P.351 ~ 356)
- ・「最新の乗用車用過給技術動向」 (P.357 ~ 361)
- ・「ガソリンエンジンの技術動向と過給機への要求性能」
..... (P.362 ~ 367)

だより

✠事務局 ✉ ✠

今年の夏は、猛暑と台風のせいで、「のんびり」とした夏休みとはならず、なんとなく毎日が落ち着かなかつたように思います。そんな中でアジアガスタービン会議（Asian Congress on Gas Turbines）が9年ぶりの日本開催となり、さらに忙しさ（というよりも、落ち着かなさ？）が倍増の夏となりました。毎年の定例行事である教育シンポジウム、定期講演会、セミナーのノウハウを生かしつつ準備を進めたのですが、国際会議ということで中国やインドからの参加者のVISA申請に関する書類の作成などにも対応し、毎日、「どうする？」「これでいこう」と右往左往しながらの作業となりました。中国の学生さんからのVISA申請では、多分ご本人が初めての海外ということでいろんな質問や要求のメールが毎日届

き、担当の田頭さんが忍耐強く（！）対応してくれました。事前参加登録は山本さんが一手に引き受けてくれて、当日の受付もトラブルなくスムーズに対応できました。ACGT全体も実行委員のみならず岩手大の学生アルバイトの方々の協力のもと、無事に終わり、ホッとしております。次は、10月の鹿児島での定期講演会です。台風が直撃しないことを祈りつつ、準備を進めております。みなさまもぜひご参加ください。お待ちしております。

（中村 優美）

学会誌編集および発行要領 (抜粋)

2018年7月13日改定

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

論説・解説、講義	6ページ以内
技術論文	「技術論文投稿要領」による
寄書、随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内
3. 原稿の執筆者は、本会誌の「学会誌原稿執筆要領」に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局（以下、編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記1に示す。
4. 依頼原稿は、編集委員会の担当委員が、原稿の構成、理解の容易さ等の観点および図表や参考文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて、執筆者への照会、修正依頼を行う。
5. 投稿原稿のうち技術論文以外のものは、編集委員会が審査し、本会誌への掲載可否を決定する。
6. 投稿原稿のうち技術論文の審査、掲載については、「技術論文投稿要領」に従う。
7. 依頼原稿の執筆者には、学会事務局から原則として「学会誌の執筆謝礼に関する内規」第2条に定めた謝礼を贈呈する。
8. 非会員の第一著者には掲載号学会誌1部を贈呈する。
9. 本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程」による。
10. 他者論文から引用を行う場合、本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記1 原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）
 ニッセイエブプロ(株) 企画制作部
 学会誌担当：高橋 邦和
 〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17 明産西新橋ビル 6F
 TEL：03-5157-1272
 FAX：03-5157-1273
 E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領 (抜粋)

2018年7月13日改定

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
 - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
 - 2) ガスタービン及びエネルギー関連技術に関連するものであること。
 - 3) 「学会誌原稿執筆要領」に従って執筆された、日本語原稿であること。
 - 4) 一般に公表されている刊行物に未投稿であること。ただし、以下に掲載されたものは未投稿と認め技術論文に投稿することができる。
 - 本学会主催の学術講演会・国際会議のプロシーディングス
 - 特許および実用新案の公報、科学研究費補助金等にかかわる成果報告書
 - 他学協会の講演要旨前刷、社内報・技報、官公庁の紀要等の要旨または抄録
2. 原則として刷り上がり8ページ以内とする。ただし、「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。
3. 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」に従って作成された印刷原稿または原稿電子データを、技術論文原稿表紙とともに学会誌編集事務局に提出する。
5. 投稿された論文は、論文委員会が「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. 本技術論文の著作権に関しては、「学会誌編集および発行要領 (抜粋)」9.および10.を適用する。

日本ガスタービン学会誌
Vol.46 No.5 2018.9

発行日 2018年9月20日
 発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会
 編集者 辻田 星歩
 発行者 油谷 好浩
 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
 第3工新ビル402
 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
 郵便振替 00170-9-179578
 銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
 (普) 1703707
 印刷所 ニッセイエブプロ(株)
 〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17
 明産西新橋ビル 6F
 Tel. 03-5157-1272 Fax. 03-5157-1273

©2018, 公益社団法人日本ガスタービン学会

複写をご希望の方へ

本学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

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

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

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