

特集：ガスタービンのMRO最新動向

「ガスタービンのMRO特集号」に寄せて

On the “MRO” of Gas Turbines



藤山 一成^{*1}
FUJIYAMA Kazunari

キーワード：ガスタービン，MRO，損傷，寿命，リスク，モニタリング

Key Words：Gas Turbine, MRO, Damage, Life, Risk, Monitoring

わが国の火力発電において、ガスタービンを用いたコンバインドサイクル発電設備が新設プラントの主流となってきており、また経年プラントも増加してきているため、その維持保全に関心が高まっている。ガスタービンは特に過酷な条件で使用されるため、その高温部の保全には高度な技術を駆使する必要がある。本誌の特集テーマであるMRO (Maintenance, Repair and Overhaul) はガスタービンにおいて、運用の最適化と診断・補修・交換などの必要性が高いことを示している。

保守管理あるいは保全においては、どのような損傷がいつどのような頻度で生じるかを把握し、必要な対策を講じることが求められる。補修の対象となる損傷は、き裂や過大変形、摩耗減肉などであるが、損傷の加速因子として材料の劣化にも注意する必要がある。

ガスタービンの保全時期の設定には、起動停止回数も考慮に入れた等価運転時間管理が行われているが、状態監視も常時行われている。設備の予定外の停止を防ぎかつ過剰な保全を行わないようにすることが重要であり、モニタリングを通して故障時期を精度よく予測し、必要な対策を講じるシステムが不可欠となっている。一方、経済的な得失を考慮して評価するためには損失の期待値を求める必要があり、確率論をもとにしたリスクベース保全の導入もそのための有効なツールとなりうる。ここで、故障確率の評価精度を向上させるためのフィールドデータベースの構築は極めて重要である。

ガスタービンに特徴的な損傷現象として熱機械疲労き裂損傷があげられるが、内部冷却部品における温度差は、ガスタービンの性能を向上させる過程で拡大していくため、必然的に熱応力・熱ひずみは上昇する傾向にあり、さらに多頻度起動化による損傷加速因子の増加を抑制する必要がある。その効果的な対策として冷却技術と遮熱コーティング技術があり、研究開発も活発に行われ

ている。コーティング施工技術においてもこれまでの溶射技術に対して、基材に熱影響を及ぼさないコールドスプレーなどの新技術が目されている。

ガスタービン設備には、世界規模の遠隔診断システムが構築されている例があり、事業としても大規模なものとなっている。このようなシステム機能を十分に発揮させるためには、振動診断を始めとした状態診断技術や寿命診断技術の一層の高度化・高精度化が必要である。診断技術におけるヘルスマニタリングの概念は、センシング・信号処理・健全性判定から構成され、それぞれの分野での多角的な技術開発とそれを総合するシステム技術の高度化が求められる。

診断技術の高度化に対応して、補修・再生技術も進歩してきている。補修箇所は補修前よりも弱点部位となることが普通に考えられるが、例えば補修後のHIP処理などによって製造時のものも含めて内部欠陥を除去する技術が進み、弱点の克服やさらなる材料特性の向上が期待される。オーバーホール時には最新の技術を導入し、部品のUpgradeをはかることも大切である。

ガスタービンの経済性と信頼性・安全性を高めることは、現代社会において必須の課題であり、保全と運用において高度なソリューションを提供することが求められる。モノのインターネット (Internet of Things: IoT) が急速に普及する中で、MROへのIoT導入が急速に進むことにより、保全品質の向上と時間短縮が可能となり、ガスタービンによる効率的なエネルギーの活用を支えていくものと思われる。

本特集の各論文は、実際の問題に対応されている第一線の方々の実務経験を踏まえた貴重な内容であり、ガスタービンのMRO技術開発やコンポーネントの設計に有用な情報を提供している。本特集をMROの向上に大いに活用していただきたい。

原稿受付 2019年1月29日

*1 名城大学理工学部機械工学科
〒468-0073 名古屋市中天白区塩釜口1-501

特集：ガスタービンのMRO最新動向

モニタリング技術を活用した航空機エンジンのメンテナンス

Maintenance for Aircraft Engines Based on The Monitoring

高橋 篤弘*1

TAKAHASHI Atsuhiko

キーワード：ガスタービン，ジェットエンジン，モニタリング，メンテナンス，航空機，エアライン

Key Words：Gas Turbine, Jet Engine, Monitoring, Maintenance, Airplane, Airline

1. はじめに

現代の航空機エンジンでは、エンジンの運転状態を常に監視し、不具合が顕在化する前にエンジンを取り卸して必要な整備を行うオン・コンディションによる管理が主流である。一部のディスクなどの回転部品はLLP (Life Limited Parts) として使用限界が定められているものの、これを超えない、かつエンジンの状態や性能がマニュアルのリミットを満足する限りは、取り卸しの限界時間は指定されない。また、モニタリングはオン・ウイング・エンジンの信頼性を維持するための重要な要素であるが、エンジンの取り卸し時期や取り卸し後の整備内容についても、エンジン使用中の整備履歴、またはトレンド・モニタリングの結果に基づいて検討されている。

ここでは、航空機エンジンのモニタリングの概要とそれを活用したエアラインにおけるメンテナンスについて紹介する。

2. 航空機エンジンのモニタリング

航空機エンジンのモニタリング方法については、以下の4つに大別される。

- ・操縦士により行われるモニタリング
- ・機上のモニタリング装置により行われるモニタリング
- ・整備士により地上で定期的に行われるモニタリング
- ・エンジン・パラメータ変化のモニタリング (トレンド・モニタリング)

当社では、これらのモニタリング手法をそれぞれのエンジンの整備方式に設定するとともに、得られた情報に基づいてエンジンに対する整備処置の決定や整備要目の設定・変更、エンジン改修の実施要否等を検討し、エンジンの信頼性維持・向上を図っている。このうち、エンジンの取り卸しに特に影響を及ぼす整備士によるモニタリングとトレンド・モニタリングについて以下に説明する。

3. 整備士による地上でのモニタリング

地上で定期的に行われるモニタリングの手法として、ボアスコープ (内視鏡) によるエンジン内部の検査、燃料系に対する検査、潤滑油系に対する検査がある。以下にそれらの概要について説明する。

3.1 ボアスコープ (内視鏡) によるエンジン内部の検査

ボアスコープを使用して、エンジン内部を目視で検査する手法である。定期的ボアスコープによる検査を実施している部位は、主にタービン静翼、タービン動翼、及び燃焼室等、高温環境下の部位である。

エンジンの内部検査には数種類のボアスコープが使用される。これにはフレキシブル型と固定型があり、写真撮影や動画撮影、また不具合箇所の計測が可能なのが一般的である。ボアスコープは圧縮機とタービン、燃焼器の検査に使用され、エンジン主要ケースのアクセス・ポートから挿入することが可能である。Fig. 1にタービン動翼のボアスコープ画像を示す。

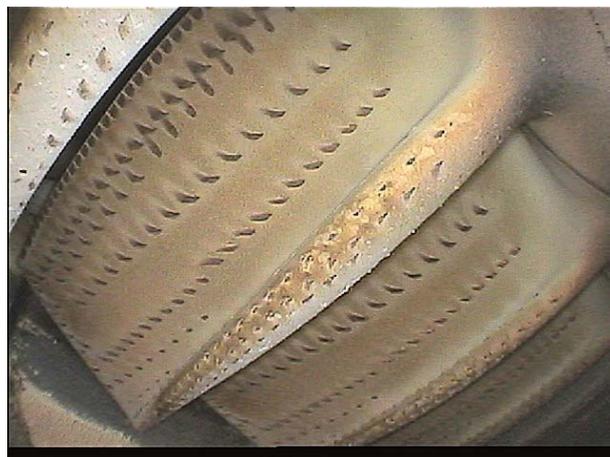


Fig. 1 Borescope Inspection for Turbine Blade

ボアスコープを使用した検査には、定例検査、特別検査、非定例検査の3種類がある。

定例検査は、整備計画の一部として実施され、その頻度はエンジンサイクルや飛行時間に基づくものである。とりわけ燃焼器とタービンは、このエリアの高い応力と温度のため特に注意を払うべき部位である。劣化が確認された場合は、検査の頻度を増やして次の定例点検まで

原稿受付 2019年1月31日

* 1 JALエンジニアリング エンジン整備センター
〒282-0011 成田市三里塚御料牧場 1-1

エンジンを継続使用するか、一定時間内、もしくは直ちにエンジンを取り卸すといった整備処置を検討する。

特別検査は、エンジン使用中に、これまでの使用経験や、取り卸された際、工場での検査で発見された欠陥の内、軽度なものをモニターするための検査である。

非定例検査は、異物吸入による損傷、エンジン・サージ、または排気ガス温度や軸回転数がリミットを超過するなどの不具合発生後に、エンジンの継続使用可否の判断をする際に実施される¹⁾。

3.2 燃料系統の検査

エンジンに取り付けられた燃料ポンプのフィルターを点検する。機体側の燃料タンクやフィルター上流部の装備品の不具合等により異物が混入した場合に適切な整備処置を実施する。また、フィルター前後の圧力差が規定値を超えた場合、ポップ・アウト・インディケータが作動し、整備士に不具合があることを知らせる。

3.3 潤滑油系統の検査

潤滑油システム内にある潤滑油フィルターにより潤滑油中の金属片等の有無を点検する。また、マグネティック・プラグの使用により、磁性体の金属片をプラグ先端に集着させ、エンジン回転軸を支持するメイン・ベアリングやギアボックス内のベアリングの不具合を検知できる。なお、プラグは各ベアリング、ギアボックス別に配備されているため、不具合発生部位を推定することが可能である。

4. トレンド・モニタリング

トレンド・モニタリングとは、機上で収集したデータを地上のシステムに蓄積し、ある一定期間のエンジン・パラメータの変化をモニターすることにより、不具合の兆候や性能の劣化を把握する手法である。トレンド・モニタリングには、潤滑油消費率モニタリング、潤滑油分光分析プログラムSOAP (Spectrometric Oil Analysis Program)、主パラメータのトレンド・モニタリングがある。ここではこれらの概要と、当社におけるそれぞれの実例を紹介する。

4.1 潤滑油消費率モニタリング

潤滑油システムに使用されているシール材の摩耗・摩耗や配管の破損等により潤滑油システムの外部に潤滑油が漏洩している事を早期に発見するためのモニタリング方法である。配管等の破損により潤滑油が急激に減少する様な場合はその発見が容易であるが、シール材等の摩耗が徐々に進行する場合は潤滑油の漏洩量も少なく、発見が困難であるため、本モニタリング方法が効果的である。潤滑油消費量の計算には、実際に各エンジンに供給された潤滑油量が用いられ、この供給量とエンジンの使用時間（飛行時間）より単位時間当たりの潤滑油消費率が算出される。最終的には、担当部門がFig. 2に示すようなグラフをアウトプットして、必要な処置を検討する。

ここでは、当社にて経験した事例を紹介する。Fig. 2

の事例では、潤滑油消費率の増加が確認された後、エンジンの外観を詳細に点検した結果、ギアボックスに取り付いているシール材付近で潤滑油漏洩の痕跡が確認されたため、当該シール材を交換したところ、通常の潤滑油消費率のレベルに戻ったことを示したものである。

本モニタリングを活用することで、エンジンの空中停止を未然に防ぎ、不具合を最小限に抑えることができた事例である。

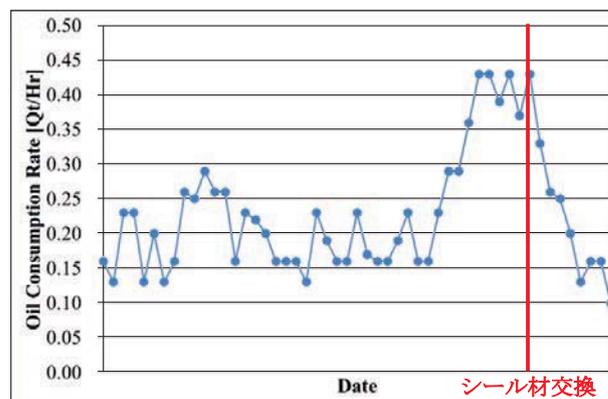


Fig. 2 Example of Oil Consumption Rate Monitoring

4.2 SOAP

エンジンの潤滑油の中に含まれている微量の金属元素を探知し、ベアリングやギア等に異常がないかを検査する方法であり、ジェット・エンジンのように潤滑油消費量の少ないエンジンには特に有効な方法である。エンジンから採取した潤滑油を分光分析装置により発光させ、その時のスペクトルと光量から金属元素を定量分析する。潤滑油システム内に発生しつつある不具合を早期に検出しようとするもので、下記の様な潤滑油システム内の異常を検出することが可能である。

- ・ベアリングの摩耗、損傷
- ・各種ギア・シャフト類の摩耗、損傷
- ・ベアリング・コンパートメント・シールの摩耗、損傷
- ・ベアリング・ハウジングの取付け不具合

SOAPによる検出可能元素については、当社の経験からFe, Cu, Al, Mg, Ti, Cr, Ni, Ag, Si, Coの10種類を設定している。分析の結果、あらかじめ定められた閾値を超えた元素がある場合には、短縮した潤滑油採取間隔にて検査が繰り返され、必要に応じてエンジンの分解検査等を実施する。

Fig. 3の事例は、エンジン内部部品の一部であるナットが緩んで押さえつけていたシール材が回転し、その影響で接触面であるTi製のシャフトが削り取られたことにより、微量のTi元素が潤滑油内に含まれていることを検知した事例である。

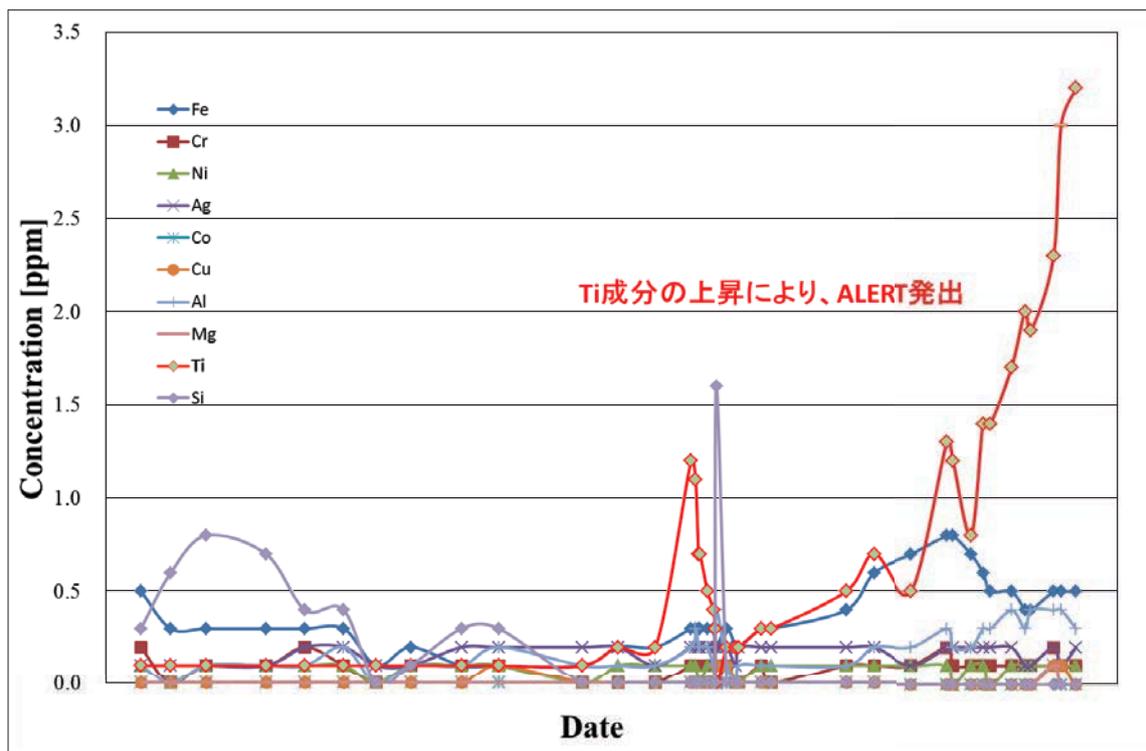


Fig. 3 Example of SOAP Monitoring

4.3 主パラメータのトレンド・モニタリング

エンジンの主パラメータについてフライトごとの変化をモニターすることにより、エンジンの異常を早期に検知することができる。これは巡航中の安定した状態、及び離陸時におけるエンジンの代表的なパラメータを測定し、基準となる状態に修正してその変化の傾向をモニターする手法がとられており、エンジン・コンディション・モニタリングと呼ばれている。計算及び修正されたこれらのパラメータは統計処理が行われた後、データ形式やグラフ形式で出力される。

データの採取方法としては、航空機の空地／衛星通信システムを利用して収集する手法が主流であり、飛行中の航空機から電波でエンジン・パラメータを地上の受信局に送り、受信局からプロバイダを通してエンジン・メーカーにデータが送付され、解析が行われる。航空会社はインターネットを通して、エンジン・メーカーで処理されたデータを閲覧することができ、早ければ航空機からデータが送付されて数時間後には、データを閲覧することが可能である。

空地／衛星通信システムを用いたエンジン・データ解析、及びモニタリングの概要をFig. 4に示す。この通信システムが使用されると、長距離の国際線のフライトでは、到着地に着く数時間前に航空機エンジンの異常を知ることができるため、出発地に引き返す、もしくは到着地で適切な整備処置を実施するかを選択できる。

また、エンジン・メーカーにおいても常に世界中のエンジンを監視しており、あらかじめ設定したプログラムを基に不具合の兆候を検知した場合には、オペレーター

に整備処置を推奨するレポートを送付する。さらに、得られたデータは、特別点検、寿命制限、及び修理方法等、問題を解決するための様々な検討に使用され、最終的に不具合の解決方法として整備マニュアルに反映される。

このモニタリング、及び整備処置の実例として、Fig. 5に排気ガス温度マージンのモニタリング例を示す。本モニターにより、適切なタイミングでエンジン内部の洗浄、もしくは抽気システムの調整を実施することが可能である。エンジンの内部洗浄は、エンジンを取り卸さずにエンジン性能を回復させるための重要な整備処置であり、適切な洗浄剤と器材により圧縮機を洗浄し、動翼・静翼の表面から汚れや異物を除去して、エンジンの圧縮効率を回復させる。これにより、排気ガス温度マージンの回復とともに、燃費の向上も可能となり、燃料費の節約にも繋がる。また、抽気システムを調整することでエンジン内部を流れる圧縮空気の損失を低減させ、燃料消費を抑制し、排気ガス温度マージンを回復させることが可能である。なお、整備処置後も排気ガス温度マージンが回復しない場合は、性能劣化によるエンジン取り卸しを検討する。

我々オペレーターは、トレンド・モニタリングから得られる情報、LLPの情報、エンジンの在庫状況などを考慮して、エンジンの取り卸しが平準化されるよう計画を策定している。したがって、ボアスコープにて予期せぬ不具合が発見されることで発生する計画外取り卸しをいかに減らしていくかが課題となっているため、トレンド・モニタリングによるエンジン性能の劣化の判断は非常に重要であり、より高い精度が求められる。

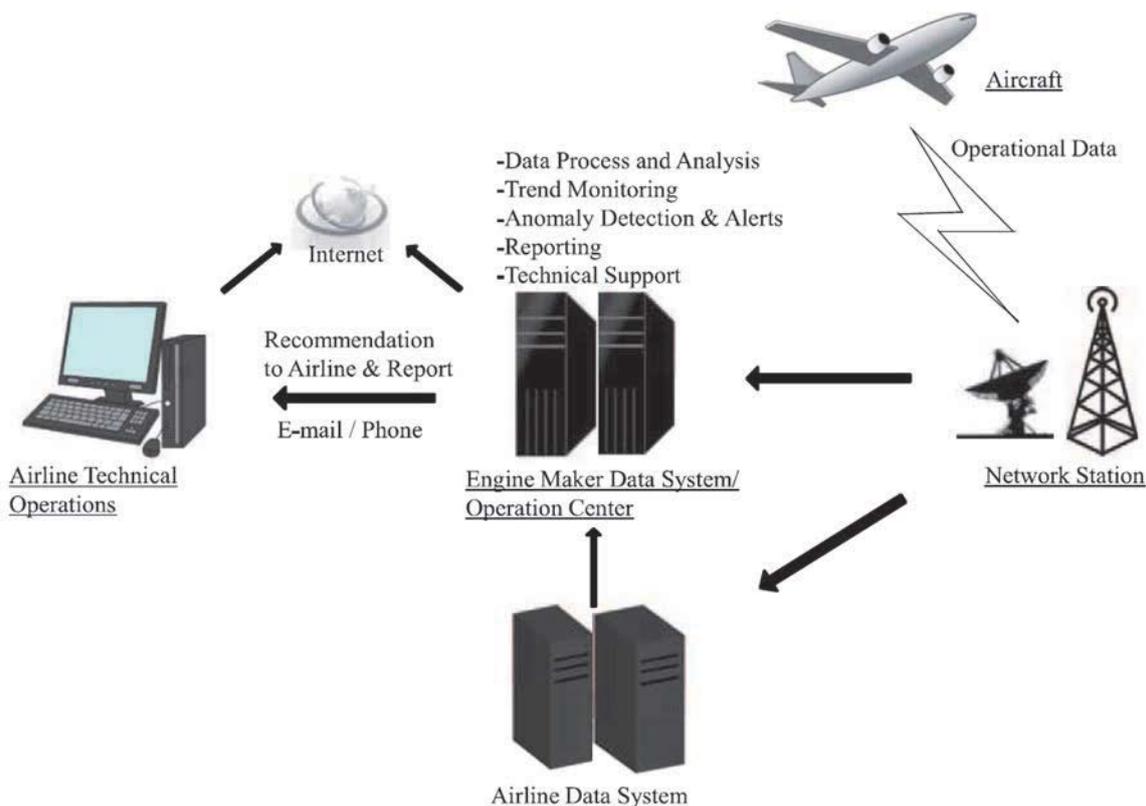


Fig. 4 Outline of Engine Data Analysis and Monitoring Process

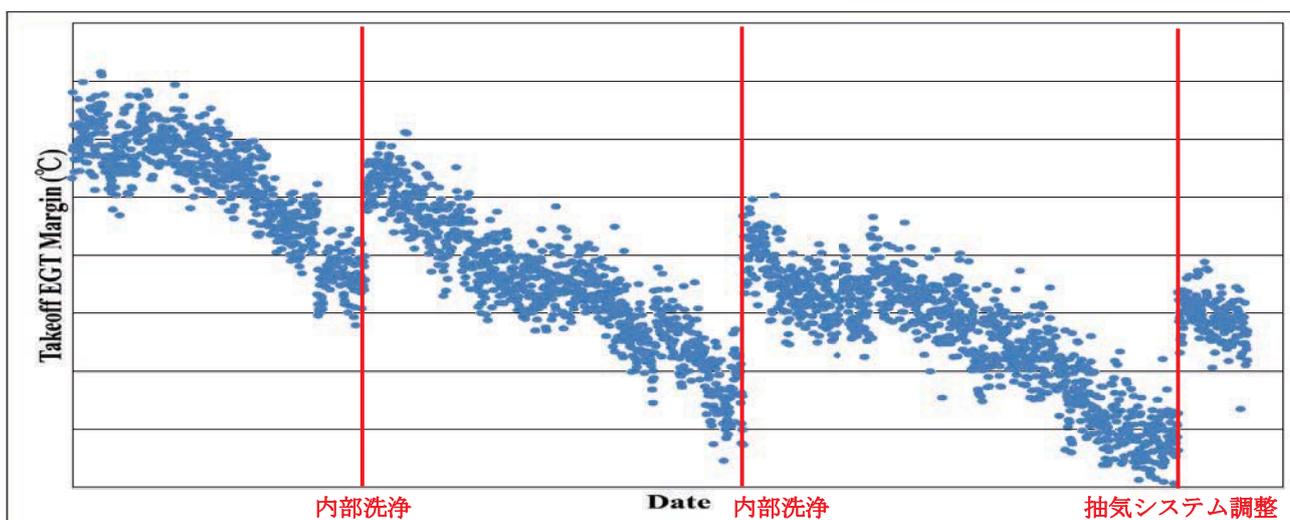


Fig. 5 Example of Takeoff EGT Margin Trend Monitoring

5. モジュール性能に対するモニタリング

オン・ウイングでのトレンド・モニタリングで得られたデータは、エンジン取り卸し後の整備処置の決定にも活用されている。エンジンは圧縮機やタービンといったいくつかのモジュールから構成されており、エンジンを機体から取り卸した場合、全てのモジュールに対して累積使用時間・サイクルに基づく適正なレベルの整備要目を実施するが、新しいエンジン型式ではエンジンの主パラメータのトレンド・モニタリングに加え、巡航中の安定したデータを基に各モジュールの性能の変化もモニ

ターすることができるようになってきているため、前回のエンジン分解組立から取り卸し時点までにどの程度エンジン性能が劣化しているかを把握することができる。これにより、全ての部品の状況を確認することなくモジュールの分解範囲を検討することが可能となり、費用の削減に大きく貢献している。

Fig. 6にモジュール性能データの出例を示す。この事例では、ファン・モジュールの効率低下は見られないものの、それ以外の低圧／高圧圧縮機、高圧／低圧タービンの効率低下が確認できるため、圧縮機やタービンの

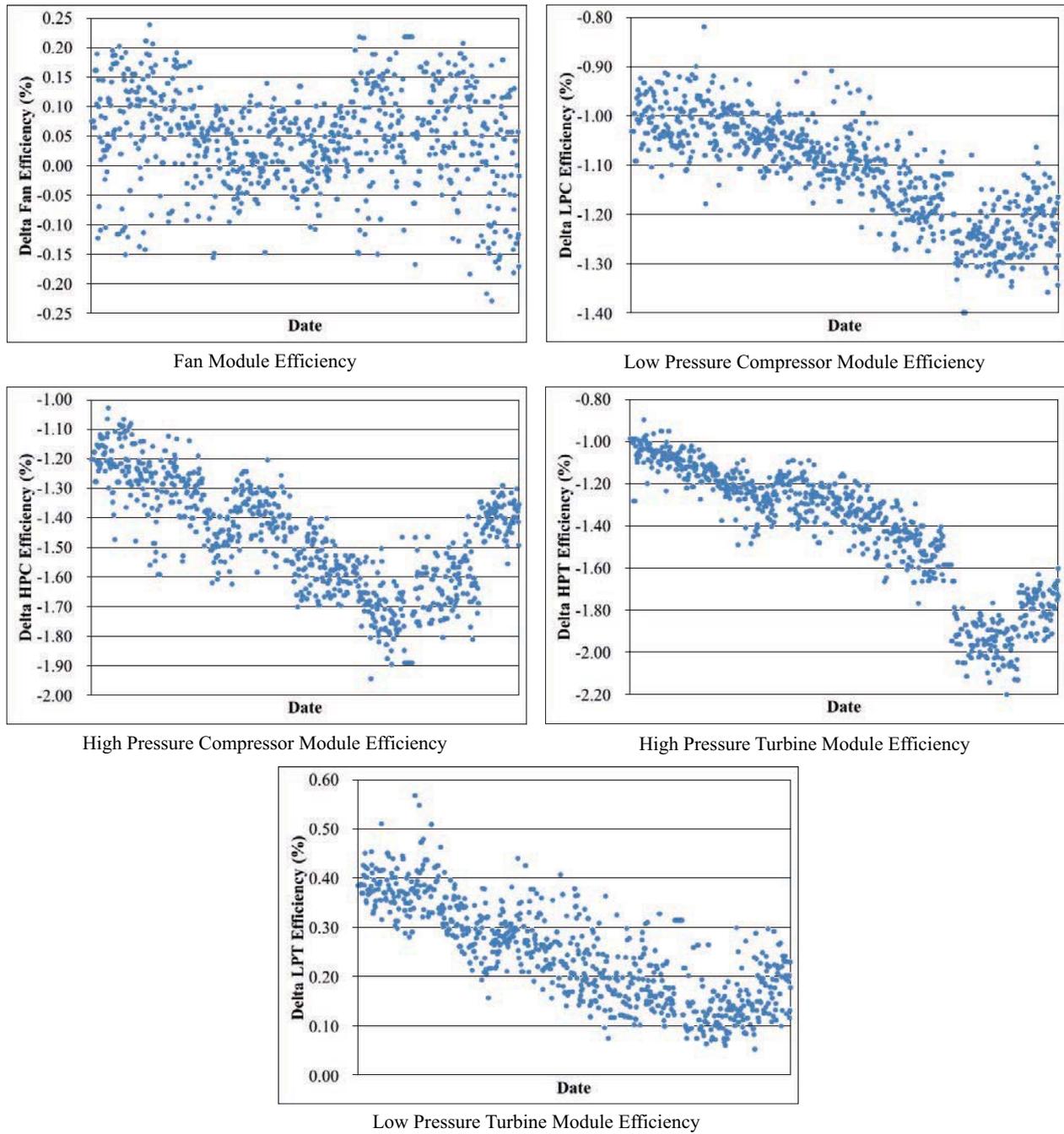


Fig. 6 Example for Engine Module Monitoring

モジュールに対して性能回復のための整備処置、もしくはオーバーホールを実施することになる。具体的には、動翼や静翼を交換する、もしくは動翼の相手方であるシュラウドの寸法を回復させることで、モジュールとしての性能の回復を図る。Fig. 7には、タービン部位に使用されているシュラウドの分解後の状況を示す。エンジンを運用することで表面のコーティング材が削り取られており、これにより動翼とシュラウドの隙間が大きくなって損失が増加する。よって、当該部品が単体になった際にはマニュアルに照らし合わせて修理の可否を検討し、交換または寸法回復のための修理を行う。



Fig. 7 Turbine Section Shroud

6. ビッグデータを使用した故障予測

ここまで様々なモニタリング手法について述べてきたが、ここでは当社におけるビッグデータを活用した故障予測について紹介する。

当社は、予防的な整備処置を行なうことで機材不具合による遅延欠航を防ぐことを目的とし、統計分析ソフトウェアを利用して集められたデータを解析し、将来発生する可能性の高い故障の予測技術の開発を進めている。

エンジンに取り付けられているセンサーからは、代表的なパラメータであるEPR（エンジン圧力比/Pratt & Whitney社製エンジン装備機のみ）、N1（低圧軸回転数）、EGT（排気ガス温度）、N2（高圧軸回転数）、Fuel Flow（燃料流量）、Oil Pressure（潤滑油圧）、Oil Temperature（潤滑油温度）、Oil Quantity（潤滑油量）、Engine Vibration（エンジン振動値）等のデータが得られるが、これらのパラメータはエンジン運転中に航空機に搭載されているOptical DiskやPC Cardへ記録される。このDiskやCardはフライト完了後に取り卸され、当社のサーバーへとコピーされる。このようにして集められた“ビッグデータ”を、ソフトウェアを利用して解析すると、これまで気が付かなかった傾向を読み取ることができたり、将来起こりうる事態を予測したりすることが可能になる。

部品の在庫が少ない地方空港でエンジンに不具合が発生した場合、迅速に修理ができないことから別の機材を運航したり、交換部品の送付が必要になるため、フライトの遅延欠航に繋がる可能性が高い。しかし、ビッグデータによる解析を活用して不具合の発生を予測できれば、事前にその部品を交換、または修理することで、遅延欠航に繋がる不具合を防止することができる。なお、利用されているデータについては、航空機やエンジンからのデータだけではなく、過去に当社が実施した整備データも加えており、さらにこのデータの分析には整備士の経験に基づく意見等も反映されている。

Fig. 8にて現在当社で実際に稼働させているモニタリング例を紹介する。これはエンジンの抽気システムに関連したある計測温度が最大値を迎えるまでに要した時間差をグラフ化したものである。遅延便が発生する前に通常より時間差の生じるフライトが確認できるが、部品交換後には元のレベルに戻っていることが読み取れる。よって、ある閾値を設定してこの挙動を事前に把握することができれば、遅延欠航を発生させることなく、計画的に整備処置を実施することが可能となる。

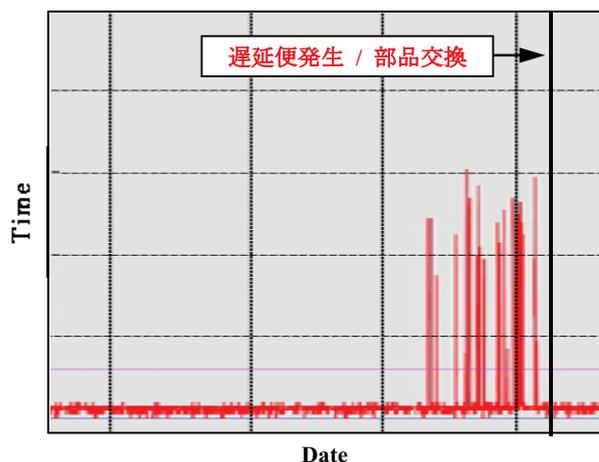


Fig. 8 Example of Defect Prediction by Big Data

しかし、寿命を迎える前の部品を交換することは整備費用の増加に繋がることから、予測精度を上げていくとともに、安全運航を堅持しつつ、全体最適を図るための部品改修、定期整備実施方法の最適化等、総合的な取り組みが求められる。

7. おわりに

航空機エンジンのモニタリングは年々進化しており、最近ではフライト中の一部のデータだけでなく、フライト全体のデータを提供することで、より精密な分析が可能になっている。また、エンジン・メーカーが世界中のオペレーターから膨大なデータを収集することにより、より正確な不具合予測が可能になってきた。しかしながら、新しい不具合モードが発生した場合には、既存のモニタリング方法や整備プログラムでは検知できないため、情報収集やモニタリング・プログラムの構築等の対策を策定するまでに時間を要する傾向にある。そのような際には、これまでの使用実績や他のエンジン型式での経験等を基に、エンジン・メーカーが積極的に故障の可能性を評価し、迅速なオペレーターへの提供が必要である。今後は、我々オペレーターとエンジン・メーカーがこれまで以上の関係を構築することで、不具合の兆候をより早期に、より正確に発見できるような新しいモニタリング方法や整備プログラムが開発されることを期待したい。

参考文献

- (1) Rolls-Royce, ザ・ジェット・エンジン, (2011), p. 248-262, 社団法人 日本航空技術協会

特集：ガスタービンのMRO最新動向

産業用ガスタービンにおける予兆診断・修理技術

Predictive Diagnosis and Repair Technology of Industrial Gas Turbine



細川 恭史*¹ 坂根 雄斗*²
HOSOKAWA Yasufumi SAKANE Yuto

キーワード：ガスタービン，予兆診断，部品修理，LMD

Key Words：Gas Turbine, Predictive Diagnosis, Parts Repair, LMD

1. 緒言

近年，ICT (Information and Communication Technology) やIoT (Internet of Things) 技術が高度化し，ICカードやスマートウォッチ等日常生活においてこれらの技術に触れないことがなく，日常生活以外の社会インフラ等でも活用が広がっている。発電分野においても例外なくICT，IoTの波が来ており，各社でこれらを用いた様々な取り組みがなされている。

当社は1976年に200kW級の非常用ガスタービン発電装置を販売開始し，その後1984年に分散型発電として使用できる1MW級の常用ガスタービン発電装置を販売開始した¹⁾。現在までで当社の常用ガスタービン発電装置は30MW級発電装置まで開発・販売しており，常用ガスタービン発電装置においては，ICT / IoT技術を活用し当社独自に開発した遠隔監視装置（テクノネット）にて常時運転状態を監視し，異常発生時の原因究明や通常メンテナンスのための運転状況把握に使用している。

また，オーバーホールでは一部の部品について，損傷部を再生し継続使用可能となるよう修理を実施している。

本稿では，遠隔監視装置による運転状態把握及び予兆診断への取り組み状況，また一般的な部品修理技術に合わせ，レーザ粉体肉盛（LMD：Laser Metal Deposition）技術を適用した部品修理について紹介する。

2. 遠隔監視による運転状態把握及び予兆診断

2.1 遠隔監視装置（テクノネット）

当社では独自に遠隔監視装置（テクノネット）を開発し運用している。最新のテクノネットでは，アナログ信号約700点，デジタル信号約2000点を計測することがで

き，通常運用時は1分毎のデータ収集が可能である。また異常（軽故障／重故障）発生時には0.1秒間隔でデータ収集可能なため，事象発生時の各信号の挙動を詳細に確認することが可能である。また，通信方式もハードワイヤによるインターネットに加え，3G/4Gモバイル通信を採用し，高速で大容量のデータ通信が可能であり，ビッグデータ処理に対応できるようになった。

当社では，明石工場内に遠隔監視室（Fig. 1）を設置し，24時間体制で各サイトの運転状態を監視し，異常発生時には即サービス技術員に情報が伝わり，迅速な対応が可能となっている。

2.2 遠隔監視

当社のガスタービン制御装置（PLC）では，各信号に軽故障・重故障の閾値を設定することができ，基本的に異常発生時（信号が閾値を超えた場合）はPLCからテクノネットへ情報が転送される。また，テクノネット自体に閾値を設定することも可能であり，PLCに設定される保護値とは異なる閾値を設定し，運用管理を行う場合もある。前述したように，テクノネットは異常発生時に速やかにサービス技術員に事象を報告することに用いられ，さらに収集されたデータはその異常の原因究明のために異常発生後に解析に用いられる。これにより，異常発生



Fig. 1 Monitoring Room

原稿受付 2019年1月31日

* 1 川崎重工業(株) エネルギー・環境プラントカンパニーエネルギーシステム総括部カスタマーサポート部

〒673-8666 明石市川崎町1-1

E-mail: hosokawa_yasu@khi.co.jp

* 2 川崎重工業(株) 技術研究所材料研究部

〒673-8666 明石市川崎町1-1

後の対応を迅速に行い、設備停止期間を可能な限り短くするよう対処している。

2.3 予兆診断

2.3.1 開発背景 2.2項で述べた通り、テクノネットは異常発生後の対応迅速化が主目的として利用されている。しかしながら、常用ガスタービン発電装置は工場等への設置が多く、発電装置に異常が発生し停止（突発停止）した場合は、工場にて製造している製品に多大な影響を与えてしまい、生産損が発生してしまうことがある。また、停止期間中は発電装置で発生していた電力分を購入する必要もあることから、ユーザーへのコスト負担が大きくなるため発電装置の突発停止は避けなければならない事象である。そのためには、状態監視している信号が制御装置に設定された保護値に到達する前に設備の異常を検知するシステム（予兆診断システム）が必要となる。これにより、異常を事前に検知し、設備を計画停止することが可能となり、生産損等の発生防止や事前に異常機器の特定が可能となるため、停止時の対応も迅速になり、設備停止時間を短縮することが可能となる。予兆診断システムの優位性を表した図をFig. 2に示す⁽²⁾。

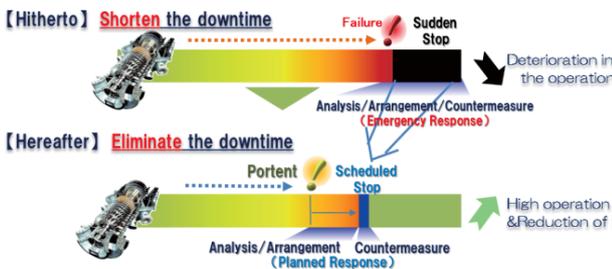


Fig. 2 Advantage of Predictive Diagnosis System

2.3.2 MT法 設備の突発停止防止には、ガスタービン本体及び補機類の幅広い機器の異常を事前に検知することが必要となる。当社ではMT法（Mahalanobis Taguchi Method）を用い、各サイトから送られてくる大量のデータを処理する予兆診断システムを開発している。MT法とは、統計的なアプローチによるビッグデータ分析手法であり、「正常」状態の分布からの逸脱距離を異常度として評価する。MT法のイメージ図をFig. 3に示す。

MT法で当社常用ガスタービン発電装置の状態を判断

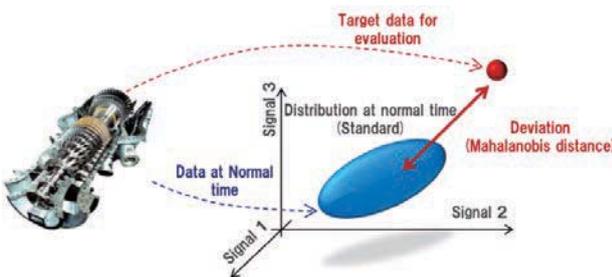


Fig. 3 Image of MT Method

するためには、まず正常時のデータを蓄積する必要があるため、既設案件についてはテクノネットで収集した過去のデータを正常時データとして記録し、現在の運転状態をそのデータと比較することで異常度を判断している。MT法は多数の信号の正常状態からの逸脱距離を一つの数値として表すことができるため、現在のPLCに設定している保護値のように各信号に対する閾値を設定する必要がない。すべての信号について状態を診断できるため、設備の運用に影響を与える可能性のある小さな変化も検知することが可能である。

2.3.3 予兆診断開発状況 過去に収集したテクノネットのデータから正常時のデータを蓄積し、開発中の予兆診断システムを用い異常の予兆を検知できるか、過去の異常発生時テクノネットデータを用いて検証を行っている。また、正常運転であるにも関わらず逸脱距離が大きくなりシステムが異常と判断してしまうこともあるため、細かく事例を検証し修正を進めている段階である。Fig. 4に予兆診断画面の例を示す。正常値からの逸脱距離が大きい物件が上位に表示され、監視員が容易に各物件の状態を判断できる。

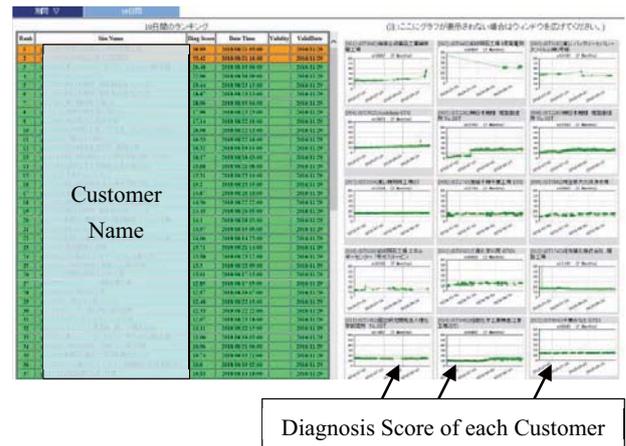


Fig. 4 Monitor of Predictive Diagnosis System

3. 修理技術

ガスタービンは、定期的にオーバーホールを実施する。その際、部品の損傷程度によって交換または修理を行い、ガスタービンを復旧する。本報ではその修理内容の一部を紹介する。

Fig. 5に当社のM1A-13型ガスタービン断面図を示す。M1A-13型ガスタービンは、1988年に販売開始されこれまで累計400台以上の納入実績を誇っている⁽³⁾。オーバーホールでは圧縮機、燃焼器、タービン等の静止部品にて修理を行っている。

3.1 圧縮機部品修理

圧縮機部品の修理は、主にベルマウス（1段インペラシュラウド）及び2段インペラシュラウドにて実施している。これらの部品は、回転体であるインペラに相對する部品であり、運転中インペラとのクリアランスが最小

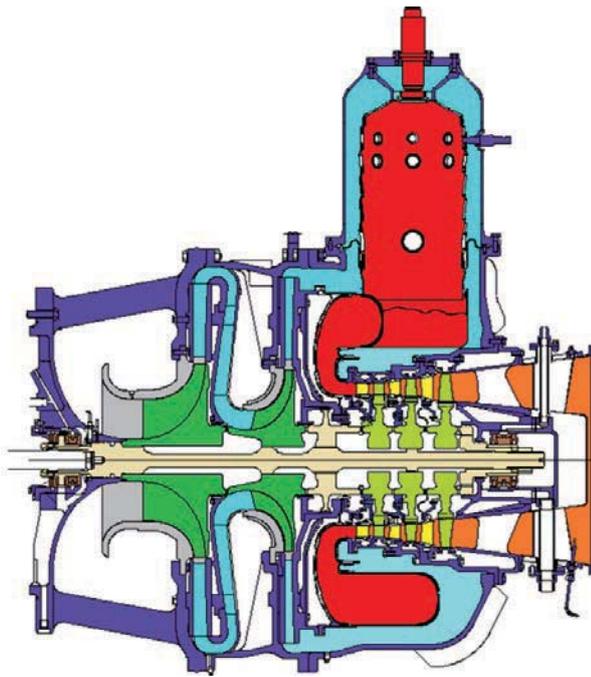
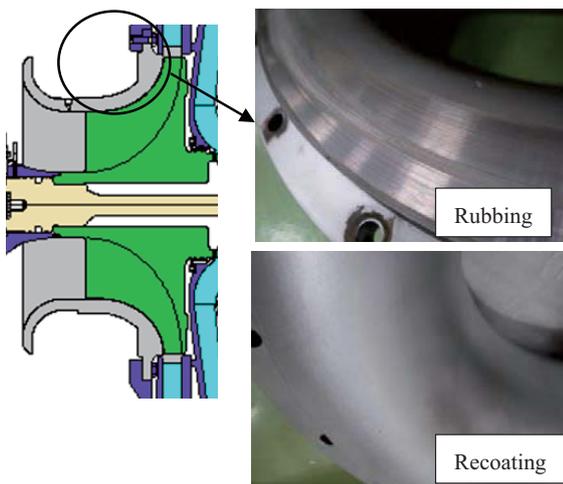


Fig. 5 Cross Section Diagram of M1A-13A

となるよう設計している。そのため、運転中にインペラと接触（ラビング）することがあり、シュラウド部分が金属母材そのままの場合ラビングした際にインペラを傷つけてしまう可能性がある。そのため当社ではラビング発生時にインペラが損傷しないよう、インペラシュラウドに溶射を施している（Fig. 6参照）。オーバーホールの際、ラビングにより溶射が過度に削れている場合、溶射部を加工し再溶射することで再利用している。

Fig. 6 1st Impeller Shroud (Coating)

3.2 燃焼器部品修理

燃焼器部品の修理は、主に燃焼器ライナーの修理を行っている。当社の燃焼器ライナーは、基本的には積層型になっており、運転により一部の層が損傷することがある。その場合、損傷した層を切り取り、新たな層を取り付け、修理を実施している（Fig. 7参照）。

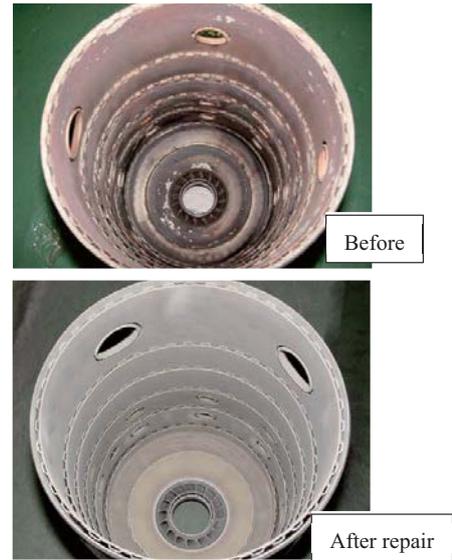
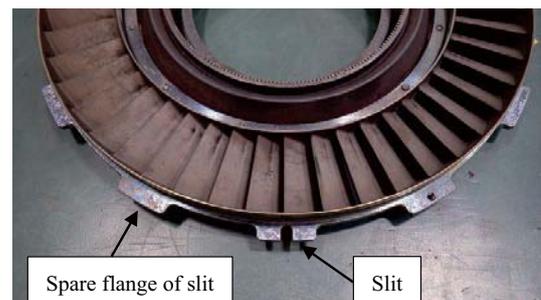


Fig. 7 Repair of Combustion Liner

3.3 タービン部品修理

M1A-13型ガスタービンの2段タービannoズル及び3段タービannoズルはリング構造であり、大型ガスタービンのように単翼やセグメント翼ではないため、ノズルに損傷が発見されるとノズル全体交換となる。このノズルは組立時の位置決めのため外径側にピン挿入用スリットを加工し、ピンにより組立位置を決定している。長期の運転により、このスリット寸法が許容値を超えてしまうことがあるため、部品加工状態から周上30度変更してスリット加工が可能ないように座を設けている（Fig. 8参照）。オーバーホールの寸法検査によりスリット寸法が許容値を満たさない場合は、その座に新たにスリットを再加工し、組立可能とし再使用している。

Fig. 8 Repair of 3rd Turbine Nozzle

4. 回転体修理について

前項では、再溶射等の一般的な修理について記述した。静止体への修理適用は大きな問題はなく、製造時の技術を用いれば多くの部品は修理が可能となる。しかしながら、回転体の修理は運転によるクリープ寿命が部品の寿命に大きな影響を与えるため、修理を行ったとしてもクリープ寿命を延長またはリセットできなければ、部品の使用時間を延ばすことは不可能である。そのため、タービンプレード等の高温回転部品について修理再生を行う

ためには、修理方法やその結果評価等、静止体の修理に比べ綿密な検討、時間が必要となる。そこで、当社ではまず回転体の部品修理としてクリーブ寿命の影響がほぼない小型ガスタービンのメインシャフトについて修理技術を開発し、適用に至った。以下にその修理技術について紹介する。

4.1 メインシャフト修理

M1A-13型ガスタービンのメインシャフトは、圧縮機側にラビリンスシールを配置し、当該部にガスタービン自身の圧縮空気を流すことで、No.1軸受部の潤滑油がエンジン側へ流入しないようシールしている（Fig. 9参照）。メインシャフトのラビリンスシールは、運用している間に相手側の静止体と擦れ、オーバーホール時にラビリンス径が許容値を下回ることがある。これまでその状態では部品は廃却となっていたが、当社ではこのラビリンスシールの補修にレーザ粉体肉盛（LMD：Laser Metal Deposition）技術を適用した。

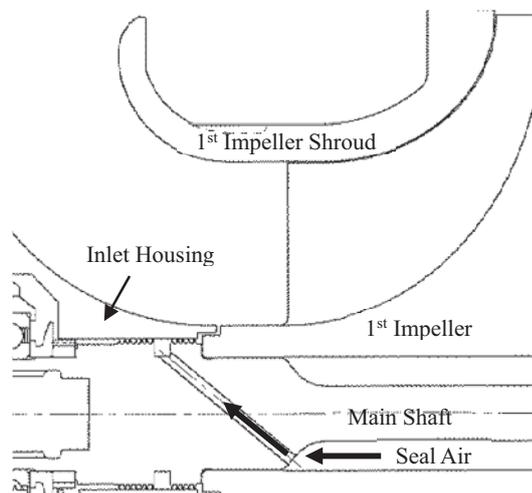


Fig. 9 Main Shaft (Labyrinth Seal)

4.2 レーザ粉体肉盛（LMD）

4.2.1 概要 LMDは、レーザを母材に照射することで母材表面を溶融し、その領域に金属粉末を供給することで肉盛を形成する技術（Fig. 10）である。レーザを熱源とするため、一般的な肉盛技術と比較して入熱制御が容易なプロセスであり、次のような特長を有する。

- ・ 母材による成分希釈の影響が小さく、少量の肉盛層でも高機能・高品質な特性を発揮する
- ・ 母材の熱影響が小さい
- ・ ひずみが小さく、形状精度が高い
- ・ レーザの集光サイズを調節することで、肉盛形状を制御することができる

以上のような特長から、近年では積層造形や、局所的な補修技術への適用事例が散見されるようになっていく^{(4), (5)}。

なお、今回の補修対象であるラビリンスシールは、形状が非常に微細なため、従来の溶接方法では入熱が大き

く施工が困難であり、LMDが最適なアプリケーションである。

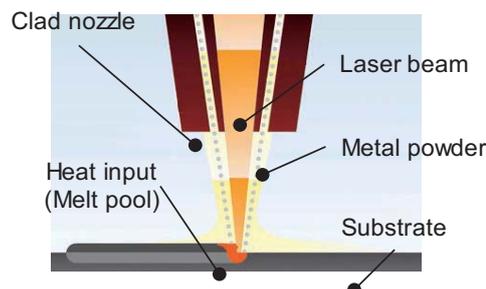


Fig. 10 Schematic image of LMD

4.2.2 ラビリンスシール補修 M1A-13型ガスタービンのメインシャフトの材質は、析出硬化型のニッケル基合金である。形状復元のみを目的とした補修の場合は、同材による肉盛を適用するのが一般的であるが、今回は新たな付加価値として耐摩耗性向上を付与するべく、異材による肉盛を検討した。具体的には、肉盛材としてコバルト基合金粉末を用いた。コバルト基合金は、耐摩耗性、耐酸化性、耐キャビテーションエロージョン性、耐熱性に優れることから、エンジン部品やタービン翼など様々な機械部品に適用されている。

4.2.3 肉盛形状および金属組織 メインシャフト実体へのLMD施工は、Fig. 11のように1軸ポジションでメインシャフトを保持し、シャフトを一定速度で回転させながら実施した。

肉盛後のラビリンスシール部の外観および肉盛部の断面様相をFig. 12に示す。幅0.5mm以下のラビリンスシール先端に球状の肉盛層が形成され、断面観察においても粗大な欠陥は認められなかった。

肉盛層の走査型電子顕微鏡（SEM）による観察像をFig. 13に示す。肉盛層はデンドライト組織を形成しており、デンドライトの間隙には炭化物を含む共晶組織が認められた。

LMDは、局所的な入熱による溶融・凝固プロセスであることから冷却速度が速く、そのため非常に微細な凝固組織を呈したものと考えられる。

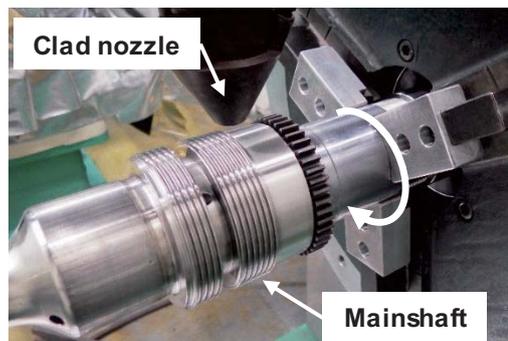


Fig. 11 Condition of cladding on mainshaft

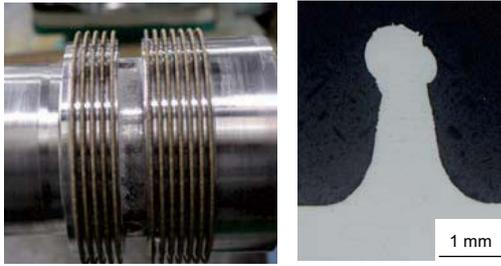
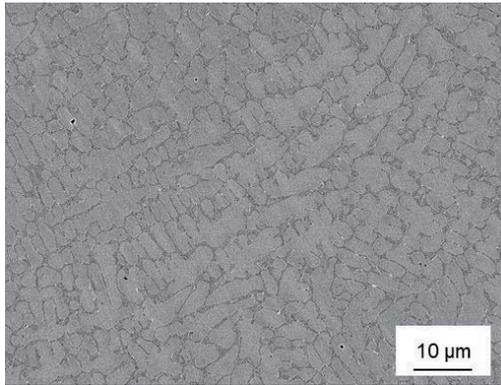
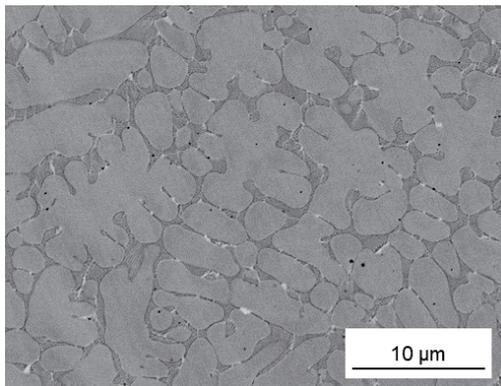


Fig. 12 Appearance and cross section of labyrinth seal after cladding



(a) Low magnification



(b) High magnification

Fig. 13 SEM images of clad layer

4.2.4 硬さ評価 Fig. 14に肉盛後のラビリンスシールの断面硬さ分布を示す。なお、肉盛層の先端を原点として、根本方向に硬度計測を実施した。コバルト基合金によって形成された肉盛部は、先端部で母材に比べ約1.4倍の高硬度化が認められた。肉盛層の母材界面近傍部では、希釈の影響を受けて硬度が低くなる領域が存在し、硬さは母材に比べ約1.1倍であった。また、肉盛層直下の母材は、熱影響 (HAZ) による硬度低下が認められ、HAZ深さは約0.5mmであった。

4.2.5 実機運転評価 肉盛補修品の耐摩耗性評価として、LMDにより補修されたメインシャフトの実機運転試験を実施した。なお、評価対象として、母材に近いニッケル基合金による肉盛補修が施されたラビリンスシールを一部作製し、試験に供した。

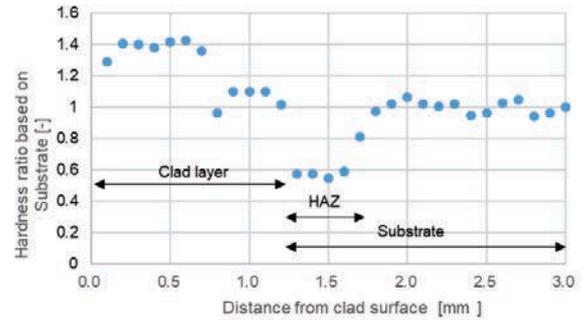


Fig. 14 Microhardness profile on the cross section of labyrinth seal after cladding

評価部は、通常のラビリンスシールより高さを高くし、強制的に相手材 (ハウジング; アルミニウム合金 casting 材) とラビングする環境とした。

実機運転試験後のラビリンスシールの外観をFig. 15に示す。コバルト基合金による補修が施されたラビリンスシールでは、運転前後でシール部の高さに変化はなく、摩耗は認められなかった。一方で、ニッケル基合金による補修が施されたラビリンスシールでは、凝着摩耗が生じてシール高さが減じるとともに、ラビリンス溝に凝着摩耗粉が付着した様相が確認された。

以上より、コバルト基合金による補修を適用することで、耐摩耗性が向上することが確認された。

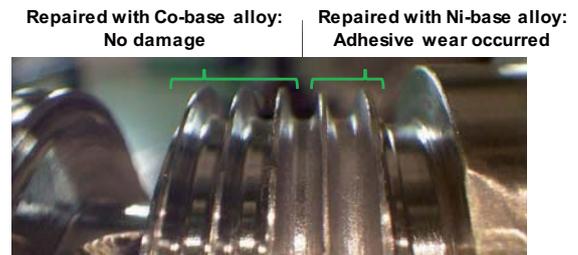


Fig. 15 Appearance of labyrinth seal after wear resistance evaluation

4.3 LMD補修の展開

現在、本技術の横展開として、チタン合金製インペラ (Fig. 16) の補修技術の開発を実施中である。インペラは前述のシュラウドとのラビングにより摩耗する部品である。チタン合金は、酸素親和性が高い材料であり、施工に際しては十分な不活性雰囲気確保が求められる。

また、補修部位は3次元的な局面形状を有することから、メインシャフトと比べて施工管理面でのハードルが高い。



Fig. 16 Impeller

5. 結言

川崎重工業では、遠隔監視装置テクノネットの使用により異常発生後に迅速な対応を行ってきたが、ICT / IoT技術を活用し、異常発生前に異常の予兆をつかめるようシステムを開発し試行を開始した。これにより設備の突発停止によるユーザー側設備、製品への影響を最小限とすることが可能となる。この予兆診断の信頼性を向上させ、プラント全体の診断が行えるよう今後開発を継続する。また、部品修理ではLMD技術の活用により、従来修理できなかった回転体の修理を手掛けられるようになった。今後、このような修理技術を他部品にも適用し、また新たな修理技術の開発を行い、メンテナンス技術向上・サービス向上につなげていく。

参考文献

- (1) 辻幸一郎, 山本富士夫, 高橋慶州, 石井知成, 合田真琴, KAWASAKIガスタービンの長期メンテナンス実績, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 4 (2013), pp. 277-282.
- (2) Yoshishige Sakai, Tomohiko Sugimoto, Takashi Horie, Hidekazu Iwasaki, Masayuki Enomoto, Kazutsugu Fujihara, Operation experience and new development for high performance of Kawasaki Green Gas Engine, CIMAC CONGRESS, June 6-10/2016
- (3) 合田真琴, 山崎義弘, 細川恭史, 高効率・低エミッション1.7 MW級ガスタービン M1A-17, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 39, No. 3 (2011), pp. 195-196.
- (4) S. Nowotny, S. Scharek, E. Beyer, et al., J Therm. Spray Tech., Vol. 16 (2007), pp. 344-348.
- (5) Additive Manufacturing in Turbo-Engine Applications <https://fabricationmecanique.files.wordpress.com/2012/10/eu_gasser_andres.pdf> (accessed on 28 May, 2018).

特集：ガスタービンのMRO最新動向

市場ニーズに合わせたメンテナンスコスト低減と信頼性向上の取り組み Activities for Maintenance Cost Reduction and Reliability Enhancement Based on Updated Market Needs



佐藤 洋一*1
SATO Yoichi

キーワード：コンバインドサイクル，ガスタービン，高温部品，メンテナンス，信頼性

Key Words：Combined cycle, Gas turbine, Hot gas path parts, Maintenance, Reliability

1. 緒言

ガスタービンを主機とするガスタービンコンバインドサイクル（GTCC）発電は他の発電方式と比較して、高い熱効率（最新機種では60%以上）、低い環境負荷（CO₂、NO_x、SO_x、煤塵）、起動・停止が容易で負荷追従性に優れるという優位性を持つため、新設火力発電プラントの主流となっている。

しかし、東日本大震災（2011年3月）以降の原子力発電プラントの長期停止、温室効果ガス排出抑制とエネルギー自給率向上を目的とした再生可能エネルギーの導入加速、電気料金引下げを目的とした電力自由化による電力産業の構造変化などを受けて、火力発電プラントへの市場ニーズは多様化・複雑化しており、GTCC発電プラントについても前述した優位性を保持したまま、新しい市場ニーズに対応することが喫緊の課題となっている。

本報では、三菱日立パワーシステムズ（以下、MHPS）が、新しい市場ニーズに合わせた施策として取り組んでいる、大型ガスタービンのメンテナンスコスト低減と信頼性向上について紹介する。

2. GTCC発電プラントに対する市場ニーズ

本項では、GTCC発電プラントに対する近年の市場ニーズ、ニーズを満足するための代表的施策、ならびに各施策により生じる影響についてまとめる。

2.1 熱効率向上

温室効果ガス排出抑制、ならびに原子力発電プラント代替運用での燃料コスト低減を目的として、プラント熱効率のさらなる向上が求められている。

GTCC発電プラントの場合、ガスタービンのタービン入口ガス温度（Turbine inlet temperature：TIT）の高温化が熱効率向上の一般的施策であるため、ガスタービ

ン構成部品、特に燃焼ガス中に曝露される燃焼器、タービン動静翼などの高温部品（Fig. 1）については母材温度上昇、熱応力増加などの運用環境過酷化への対策が必要となる。

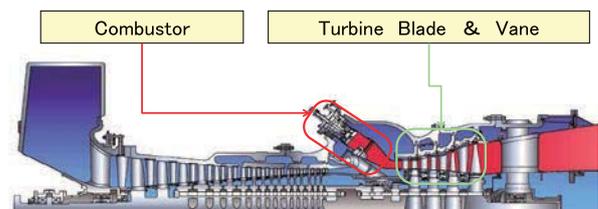


Fig. 1 Hot gas path parts (HGPP) of gas turbine

2.2 運用性改善

代表的な再生可能エネルギーである太陽光発電、風力発電は、季節・時間帯・気象条件による発電出力の変動が不可避である。これらの再生可能エネルギーの導入加速に伴い、火力発電プラントには需要側変動に加えて供給側変動にも対応可能な運用性改善（負荷調整能力の向上）が求められる。（尚、2.1項で述べた熱効率向上は、負荷調整運用時についても要求事項となる。）

GTCC発電プラントの場合、起動時間短縮（Fig. 2①）、

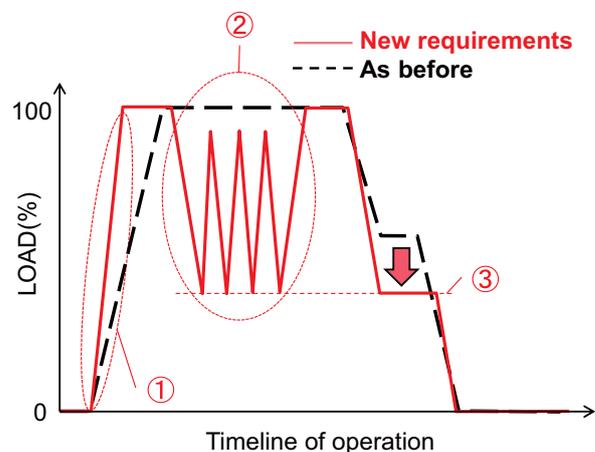


Fig. 2 New requirements for operational flexibility

原稿受付 2019年1月31日

*1 三菱日立パワーシステムズ(株) サービス本部 高砂サービス部
〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1
E-mail: yo1_sato@mhps.com

負荷変化速度向上 (Fig. 2②), 最低負荷引き下げ (Fig. 2③) が運用性改善のための代表的施策となる。

これらの改善施策を適用し、従来運用と比べて負荷変動回数、負荷変動幅の増加が予測される場合は、高温部品を含むガスタービン構成部品の疲労損傷について部品仕様面、ならびにメンテナンス面での対策が必要となる。

2.3 高温部品メンテナンスコスト低減と信頼性向上

商用運転開始後の発電コスト低減のために、燃料コストに次ぐコスト構成要素であるメンテナンス (点検・補修・交換) に要するコストの低減が求められている。

ガスタービンの主要構成部品である高温部品は、過酷な運用環境に耐えるための各種技術 (耐熱超合金、複雑な冷却構造、遮熱コーティング) の採用により、新品コスト、補修コストが共に高額となる。この結果、メンテナンスコストのうち、ガスタービン高温部品の新品・補修コストが占める比率が高くなるのが通常である。

さらに、前述した熱効率向上 (2.1項)、ならびに運用性改善 (2.2項) はガスタービン高温部品の劣化・損傷を加速する要因であるため、高強度材料への変更、補修工程増加などによる新品・補修コスト増大リスクが生じる。

このリスクへの対応も含めて高温部品のメンテナンスコスト低減を実現するためには、高温部品の信頼性向上が必須となる。

3. ガスタービン高温部品メンテナンスの概要

本項では、ガスタービンの定期点検の種別と内容、高温部品の代表的損傷形態、補修基準・廃却基準について説明する。

3.1 定期点検の種別と内容

ガスタービンの定期点検種別、点検種別ごとの点検部位と点検内容をTable 1とFig. 3に示す。

ガスタービンの定期点検は、使用環境の厳しさに応じて燃焼器点検 (CI)、タービン点検 (TI)、ならびに本格点検 (MI) に分類され、各定検の実施タイミングは等価運転時間 (Equivalent operating hour : EOH) などの劣化・損傷管理指標で規定されている。

定期点検においては、交換する高温部品 (新品、または補修品) をあらかじめ準備しておき、準備しておいた

Table 1 Contents of periodical inspection for gas turbine⁽¹⁾

点検分類	開放範囲	点検方法・項目概要
燃焼器点検 (CI)	燃焼器部のみ取外し	目視・非破壊検査 (燃焼器ノズル・内筒・尾筒・連結管) ボアスコープ検査 (タービン動静翼) 動作確認 (燃焼器点火装置)
タービン点検 (TI)	タービン車室上半開放	目視及び非破壊検査 (タービン動静翼) 燃焼器点検時の実施項目 (燃焼器設備)
本格点検 (MI)	全上半車室開放	目視及び非破壊検査 (全部品) 補機装置点検 制御装置点検

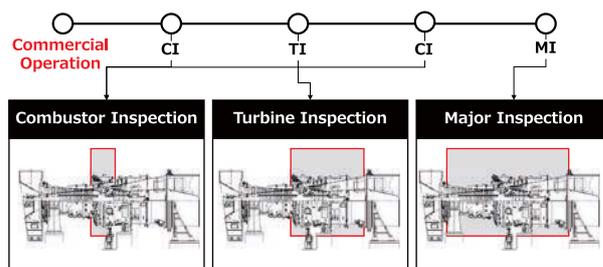


Fig. 3 Types of periodical inspection for gas turbine

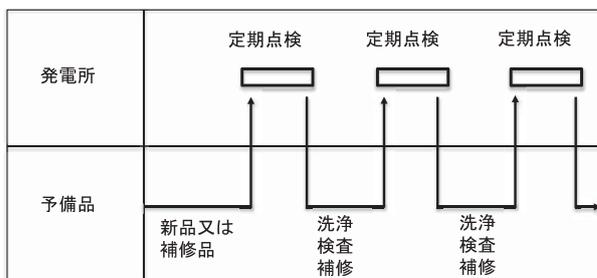


Fig. 4 Roll-in / roll-out scheme of HGPP⁽¹⁾

部品と定期点検中に取り外した部品とを、全数交換するロールイン/ロールアウトと呼ばれる整備方式 (Fig. 4) が一般的である。この方式の採用により、定期点検中にガスタービンから取外した部品を検査し、検査結果に基づいて必要な補修を加えた後に再度装着するという工程が省け、大幅な定期点検期間の短縮によるプラント稼働率向上に繋がっている。また、取外した高温部品は次回装着までの期間を利用して充実した検査・補修を実施することが可能となる。

3.2 高温部品の代表的損傷形態

高温部品の代表的な損傷形態は、クリープ (変形・破断)、熱疲労き裂、高温酸化の3種類である。

MHPS製大型ガスタービンの高温部品について、各損傷形態が定期点検インターバル、あるいは部品寿命に及ぼす影響 (支配度) を評価した結果をTable 2 ~ Table 4に示す。(支配度の強い因子から弱い因子の順に◎→△→×で表記している。)

Table 2 Critical damage mode for turbine blades

Stage	1st	2nd	3rd	4th
Creep (Rupture)	×	×	◎	◎
Thermal fatigue crack	◎	◎	◎	×
Oxidation	△	△	×	×

Table 3 Critical damage mode for turbine vanes

Stage	1st	2nd	3rd	4th
Creep (Deformation)	×	×	◎	◎
Thermal fatigue crack	◎	◎	◎	◎
Oxidation	◎	△	×	×

Table 4 Critical damage mode for combustor parts

Parts	Basket	Transition piece
Creep	×	×
Thermal fatigue crack	◎	◎
Oxidation	△	△

3.3 補修・廃却基準

高温部品のメンテナンスに適用される補修・廃却基準は以下の考え方に沿って規定されている。(Fig. 5)

- 1) 補修基準 (Repair criteria): 損傷がこの基準内であれば、次回運用においても損傷が補修基準内、または廃却基準内に留まる。次回点検までの運用に支障を来さないため、補修せずに継続使用が可能。
- 2) 廃却・交換基準 (Replacement criteria): 損傷がこの基準内であれば、補修を実施することにより継続使用可能。この基準を超えると、補修による部品の形状/機能の復元が困難であり、継続使用が困難となる。
- 3) 限界損傷基準 (Critical damage criteria): 損傷がこの基準を超えると、当該損傷が、短時間に進行して重大損傷に至る。補修基準、廃却・交換基準は、次回運用中に損傷が限界損傷基準に到達しないように規定される。

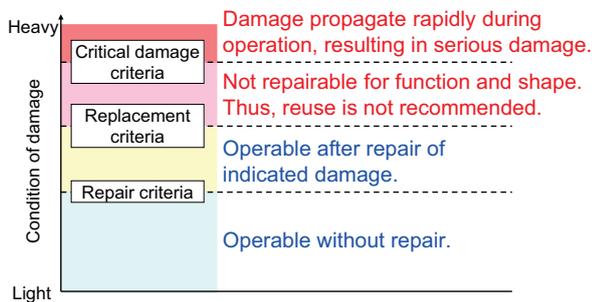


Fig. 5 Definition of repair and replacement criteria

4. 高温部品メンテナンスコスト低減のための施策

本項では、高温部品メンテナンスコスト低減のための主要な施策である定期点検インターバルと高温部品寿命の延伸について説明する。

4.1 定期点検インターバルの延伸

定期点検インターバルの延伸は、定期点検(補修)回数の削減による、定期点検工事コストと高温部品補修コストの低減を意図した施策である。(同時に、停止期間短縮による稼働率向上メリットも得られる。)

実例として、MHPS製F形ガスタービンに適用可能な定期点検インターバルの変遷をFig. 6に示す。

2000年代初頭は1年インターバル (CTCTCM / 6年等) が標準であったが、2005年以降は1.5年インターバル (CTCM / 6年)、2014年以降は3年インターバル (TM / 6年) を対象とした延伸可否判断 (4.3項) を

開始している。

例えば、TM / 6年が適用可能と判断された場合は、CTCTCM / 6年に対して燃焼器点検4回、タービン点検1回の削減が可能になる。

また、2019年からはさらなるメンテナンスコスト低減が期待できる4年インターバル (TM / 8年) の適用可否判断の開始を計画している。

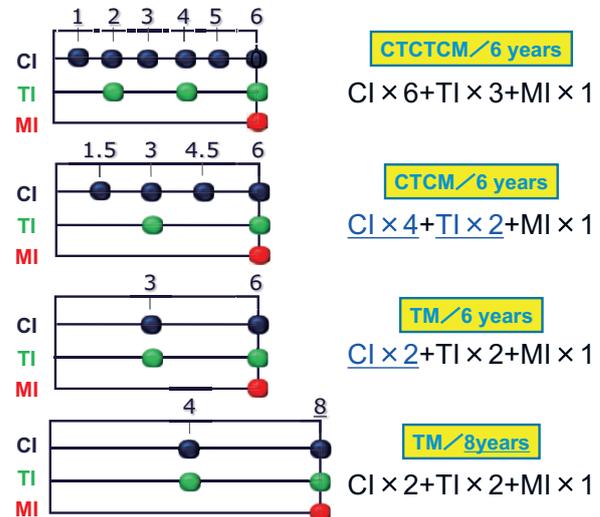


Fig. 6 Applicable inspection intervals for MHPS F-type gas turbine

4.2 高温部品寿命の延伸

高温部品寿命の延伸は、高温部品の新品投入コストの低減を意図した施策である。

一般的に、燃焼器、次いでタービン動静翼前方段の順に寿命延伸によるコスト削減効果が大きいため、これらの部品について優先的に検討・実機適用が推進される。

これは、初期設定寿命がタービン動静翼後方段 (10万時間レベル) に対して5万時間以下と相対的に短いため、一定運用期間 (例: 12年間、延べ運転時間9.6万時間) 内での寿命延伸による新品投入数量の削減、すなわちコスト低減への寄与が大きいためである。

また、部品寿命を定期点検インターバルの整数倍とすることで、使い残し寿命の無い効率的な部品運用ができるため、定期点検インターバルの変遷 (Fig. 6) に対応し、タービン前方段の場合には、5万時間 (約8千時間 / 年 × 2年 / インターバル × 3インターバル) から7.5万時間 (約8千時間 / 年 × 3年 / インターバル × 3インターバル)、10万時間 (約8千時間 / 年 × 4年 / インターバル × 3インターバル) への延伸が達成目標となっている。

4.3 延伸可否判断

定期点検インターバル・高温部品寿命の延伸可否は、対象プラントの劣化・損傷状況評価に基づき、以下の基準に対して判断される。

- 1) 材料劣化: 非破壊/破壊調査により材料データを取

得、この値が規定値を満足するか否かで判断される。

- 2) 限界損傷リスク：延伸により限界損傷基準（3.2項）を超える損傷が発生するリスクが十分に低いことを解析予測などで確認する。
- 3) 経済性：インターバル延伸の場合、延伸分の損傷蓄積による補修コストと廃却・新品投入コストの増分が定期点検（補修）回数削減によるコスト減少分よりも小さければ延伸との判断となる。寿命延伸の場合は、延伸のための補修コストが新品投入コストよりも小さければ延伸との判断となる。（通常、寿命延伸は1インターバル毎の判断となるため、新品コストも1インターバル分に補正して比較する。）

経済性による延伸判断イメージをFig. 7に示す。経済性評価の結果、オリジナル仕様（凡例○）の延伸が妥当と判断されない場合は、判断基準1）、2）に抵触した場合と同様、信頼性を向上させた改良仕様（凡例□）の適用が必要となる。

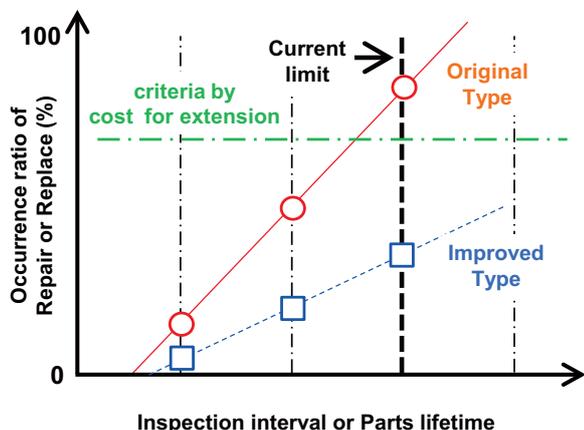


Fig. 7 Decision by economical aspects

4.4 実機適用計画

延伸判断後の実機適用には、運用面・商務面の前提条件・制約条件の下で、延伸判断時に抽出されたリスク（延伸目標未達時の点検追加、廃却・新品投入等）に対する低減策を盛り込んだ適用計画が必要である。例えば、定期点検インターバル延伸開始後も定期点検、ボアスコープ点検により損傷状況を継続評価、要すれば信頼性向上施策を追加適用しながら部品寿命延伸を図るのが典型的な適用計画となる。

ここで、対象プラントが長期保守契約（Long Term Service Agreement：LTSA）プラントの場合は、プラントオーナーと契約メーカー間の運用リスク分担と延伸メリット帰属が明確となるため、実機適用が容易となる。

5. 高温部品の信頼性向上

5.1 高温部品の信頼性評価プロセス

MHPSでは、各種目的（例：熱効率向上、信頼性向上）のための高温部品の開発・実用化に当たり、設計・解析、要素試験による評価に加え、当社高砂製作所構内

にあるGTCC実証発電プラントにおいて新規開発部品を実運用に供し、改善効果を検証している。

さらに、部品信頼性については、実機（商用運転機）で運用された高温部品の損傷データ（例：き裂長さ）から部品信頼性を長期検証し、設計・解析の予測精度向上や、さらなる信頼性向上のためのフィードバック（Fig. 8）を実施している。

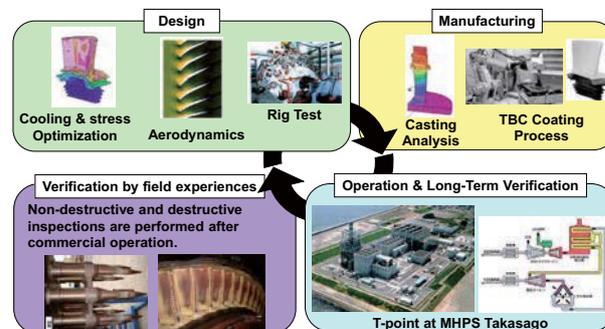


Fig. 8 Development and verification process of HGPP

5.2 損傷データに基づく信頼性評価^{(2), (3)}

損傷データに基づく信頼性評価では、運転時間、あるいは起動回数に対する、補修率（継続使用のために、補修が必要となる割合）、ならびに廃却率（廃却・新品投入が必要となる割合）の推移を評価している。

評価の源泉となる損傷データ（例：き裂長さ）の分布は、3つの特徴（①バラツキが大きい、②分布形状が非対称となる場合が多い、③本質的にマイナス側データが存在しない）を持ち、これらの特徴ゆえに最も一般的な確率分布である正規分布の適用が困難となる。（Fig. 12のき裂長さにもこれらの特徴が現れている。）このため、部品信頼性を近似する確率分布としてワイブル分布を採用し、このワイブル分布の分布母数を最尤法（Maximum likelihood estimation：MLE）などで推定することで部品信頼性の定量評価を行っている。

5.3 改良による信頼性向上事例⁽⁴⁾

本項では、F形タービン1段動翼について、改良による信頼性向上事例を紹介する。

本事例で着目した損傷は、オリジナル翼（Table 5左側列）で発生したプラットフォーム腹側端面から発生・進展する熱疲労き裂（Fig. 9）である。本事象に対して、信頼性向上施策を適用した改良翼（Table 5右側列）を開発、定期点検インターバル間起動回数900回以上での安定運用を目標とした検証を実施した。

Fig. 10に示すように、主要施策である翼母材変更により熱疲労き裂の発生寿命が2倍以上に改善されると判断しており、冷却構造改良と遮熱コーティング（Thermal barrier coating：TBC）適用による母材温度低減効果と併せて上記目標の達成を意図したものである。

改良翼実機検証後の外観検査・母材組織観察の結果をFig. 11に示す。プラットフォーム腹側のき裂発生は軽

微であり、母材温度推定結果は800℃未満であった。この結果から、冷却構造改良とTBC適用による母材温度低減効果が、オリジナル翼よりも過酷な熱環境条件(TIT+50℃)においても有効であることが確認された。

また、Fig. 9, Fig. 11に示した代表翼と同一履歴の翼群についてプラットフォーム腹側の最大き裂長さ分布を比較した結果、改良翼ではき裂の発生率が100%→25%に、最大き裂長さが16mm→3mmに改善されていることが確認された。(Fig. 12)

以上の結果から、改良翼は当初目標である定期点検間起動回数900回以上での安定運用が可能と判断している。

Table 5 Comparison of specifications and operational records

Type	Original	Improved
Base material	IN738LC (CC)	MGA1400 (DS)
Cooling structure	Original	Enhanced
TBC application	---	Full covered
Actual operating hour	18,483	16,496
No. of Starts	275	1,001

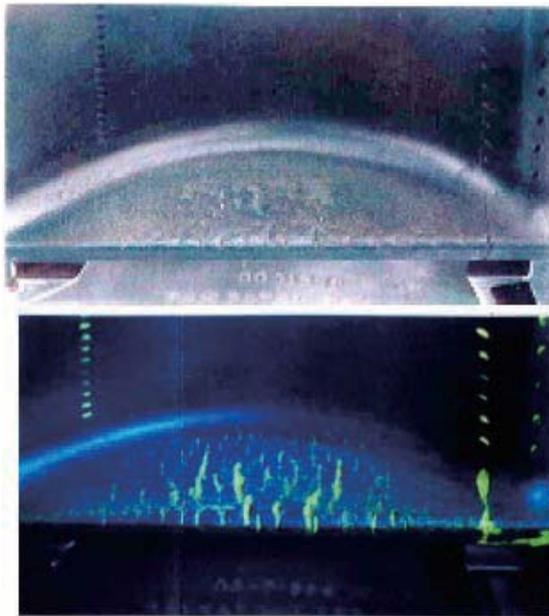


Fig. 9 Results of inspection for original type blade

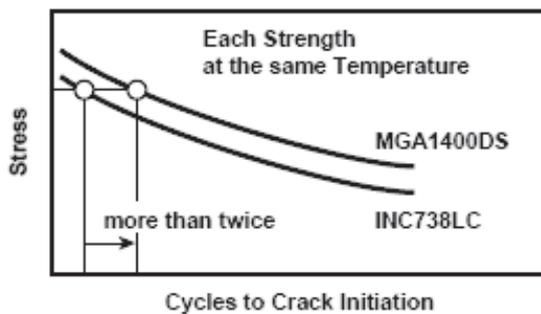


Fig. 10 Comparison of crack initiation timing by base material

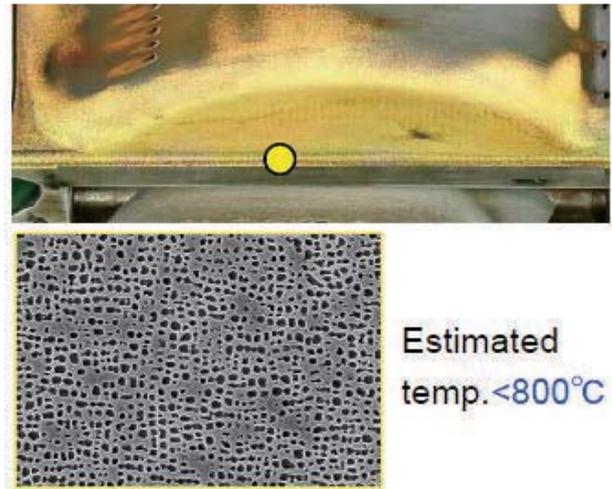


Fig. 11 Results of inspection for improved type blade

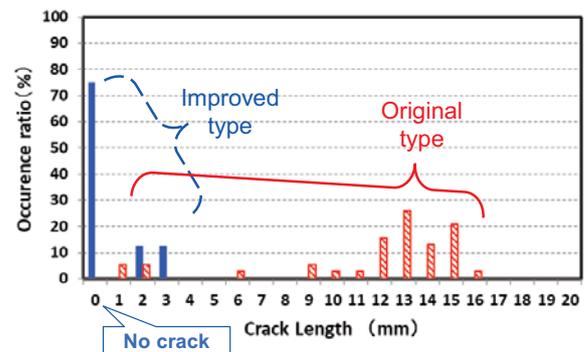


Fig. 12 Comparison of maximum crack length on platform

6. 状態基準メンテナンスによるメンテナンス最適化

近年の情報通信技術 (Information and communication technology : ICT) の進歩により、GTCC発電プラントに対する状態基準メンテナンス (Condition Based Maintenance : CBM) の適用が容易になりつつある。

そこで、本項ではCBM適用によるメンテナンス最適化 (コスト削減) の可能性について概説する。

等価運転時間 (EOH) をはじめとする従来の劣化・損傷管理指標は、運用負荷 (部分負荷運用) を考慮していないため、部品寿命・定期定検インターバルを過度に厳しく管理してしまう可能性が存在した。例えば、部分負荷運用により全負荷運用比率の低くなる運用 (Fig. 2 実線) では、クリープ (変形) が支配的なタービン後方段動静翼の劣化・損傷の実態は全負荷運用場合 (EOH式算定条件) に対して軽微になり、定期点検インターバルと部品寿命の延伸ポテンシャルが生じると推定される。

CBM基本構想 (Fig. 13) では、遠隔監視システム (Remote monitoring system : RMS) からリアルタイム取得する運転パラメータ (例：ガスタービン発電出力、排ガス温度、制御信号) と、材料データ、新製時・補修時データ (例：形状・寸法、補修内容)、損傷データ (例：寿命支配部位のき裂長さ) から劣化・損傷評価モデルを介して支配要因 (Table 2 ~ Table 4) 毎の劣化・

損傷状態をより高精度で評価することを計画している。

CBMの採用により、Fig. 14に示すような定期点検インターバルの延伸、部品運用可能期間の延伸（部品寿命延伸と等価）、あるいは一時的な出力増により部品寿命を使い切るなど、高温部品運用の最適化（使い切り運用）が可能となり、結果として高温部品メンテナンスコストの低減が可能となる。

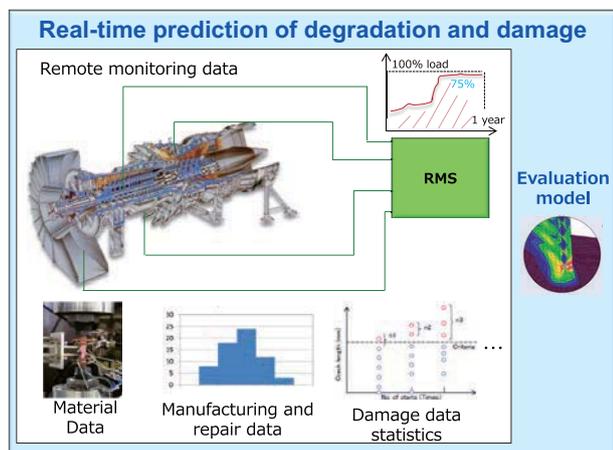


Fig. 13 Basic concept of CBM

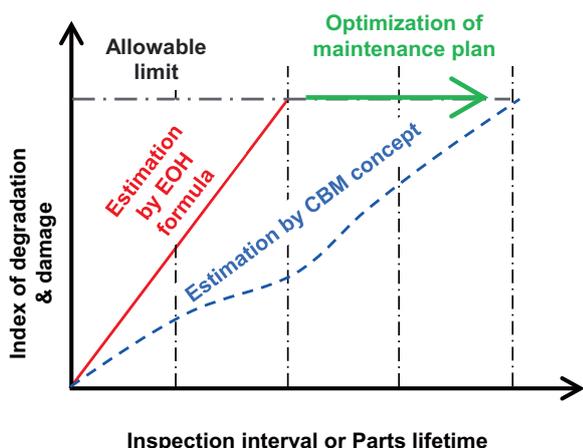


Fig. 14 Optimization of maintenance plan by CBM concept

7. 今後の課題

近年、メンテナンス最適化を推進した副次効果として、信頼性評価プロセスに新たな課題が生じている。

代表的な課題は、定期点検インターバル延伸による損傷データ取得機会の減少である。例えば、CTCM / 6年の場合は6年間の運用期間で燃焼器損傷データを4回取得できるが、TM / 6年の場合は取得機会が2回に減少する。（逆に、従来と同数の損傷データ取得を前提・必要とした場合は、データ取得期間が2倍必要となり、信頼性評価プロセスの長期化が生じる。）

信頼性評価精度の向上のためには、損傷（き裂、TBC剥離等）の発生と進展を分離・評価することが重要であるが、データ取得機会が減少するとFig. 15に示すように発生傾向評価が困難となる事例の発生が懸念される。

本課題を解決し、引き続き信頼性評価プロセスを有効に機能させるためには、部品装着状態での損傷データ取得の実現とデータ評価手法の改善が必要であり、下記の施策・技術開発が必要と判断している。

- 1) 耐熱性向上、検査精度向上などによるボアスコープ検査適用拡大
- 2) 損傷の発生・進展を運転中に検出できるセンサの開発
- 3) 従来よりも少数の損傷データから部品信頼性を推定する統計的手法（例：ベイズ推定）⁽⁵⁾

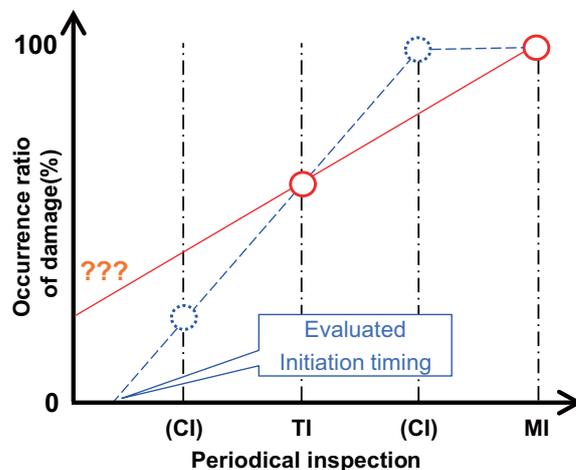


Fig. 15 New difficulty on reliability assessment

参考文献

- (1) 秋田栄司, 富田康意, 金箱篤彦, ガスタービン発電設備の性能・信頼性改善技術, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 4, (2013), pp. 288-293.
- (2) Soechting, F., Kallianpur, V., Koff, S., Lee, J-H., and Tomita, Y., ASME TURBO EXPO 2002, GT-2002-30296, (2002).
- (3) 有村久登, 赤城弘一, 佐藤洋一, 向上登志夫, 第9回動力・エネルギーシンポジウム, 大型ガスタービンの高温部品の統計的評価手法について, FP3-04, (2004)
- (4) Kaneko, H. and Sato, Y., High Temperature Gas Turbine Parts Operational Experience and Service, ASME TURBO EXPO 2016, GT2016-58327, (2016).
- (5) 佐藤洋一, 斎藤真由美, 杉本勝美, 竹中信幸, 第20回動力・エネルギーシンポジウム, 大型ガスタービンの高温部品の信頼性評価手法について, A222, (2015)

特集：ガスタービンのMRO最新動向

ガスタービン高温部品の寿命延伸技術

Life-Extension Technologies for Gas Turbine Hot Gas-Path Components



粕山 直城^{*1} 北山 和弘^{*2} 齊藤 大蔵^{*3}
 MOMIYAMA Naoki KITAYAMA Kazuhiro SAITO Daizo

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，高温部品，寿命延伸技術

Key Words：Gas Turbine, Combined Cycle, Hot Gas-path Component, Life-Extension Technology

1. 緒言

ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電設備は、二酸化炭素排出量の削減、エネルギー資源の高効率利用という市場要求に対応し、電力供給の主力となっている。また、近年では、再生可能エネルギーの増加による急速起動、負荷変動運用等ガスタービンに対する市場要求も変化しつつある。これらの主機であるガスタービンは、高温燃焼ガスを作動流体としていることより、燃焼器や動静翼などの構成部品は、高い熱応力や遠心力が作用する過酷な環境に晒され、運転時間の経過に伴い、劣化・損傷が進行し、寿命が消費される。これらの部品は高価であるため、定期的な補修と交換を繰り返しながら運用されていくが、できる限り長時間使用していくことが、メンテナンス費削減への効果が大きく、交換インターバル延長につながる補修技術や、寿命再生、長寿命化という寿命延伸技術の開発が求められている。本稿では、これらの技術について紹介する。

2. 高温部品の損傷状況

ガスタービンの高温部品は厳しい環境で使用される為、Fig. 1に示すように発生する劣化・損傷形態は様々である。⁽¹⁾

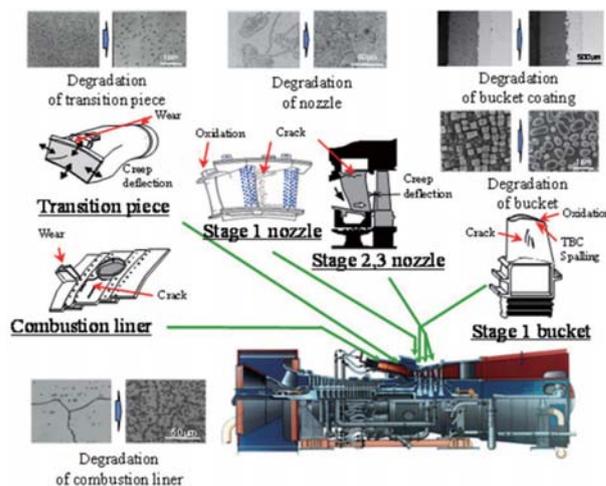


Fig. 1 Typical damage occurring in gas turbine hot gas-path components⁽¹⁾

2.1 燃焼器における損傷

燃焼火炎からの部品保護のため燃焼器には十分な冷却対策が施されているが、乾式低NO_x燃焼器には様々な燃焼モードがあり、短時間ではあるが火炎の偏りや部分的な冷却不足による局所的なホットスポットが生じることがある。このため、局所的な材料劣化や変形が現れる。

燃焼器ライナにおける典型的な損傷形態は、混合空気孔とライナ本体との接合部のような溶接部におけるき裂、スプリングシール部・ライナストップ部等の他部品との取合部における摩耗及び材料劣化・変形である。また、燃焼器ライナとタービン第1段階翼の間に取り付けられているトランジションピースでは、材料劣化とクリープ変形が発生し、前部サポート・ピクチャフレーム等の他部品との取合部では摩耗も発生する。燃焼器ライナ・トランジションピースには遮熱コーティング（以下TBC：Thermal Barrier Coating）が施工されているが、これらも劣化し、はく離が発生する。

原稿受付 2019年1月10日

- * 1 東芝エネルギーシステムズ(株) 火力・水力事業部
〒450-6630 名古屋市中村区名駅1-1-3
- * 2 東芝エネルギーシステムズ(株) 火力・水力事業部
〒212-8585 川崎市幸区堀川町72-34
- * 3 東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギーシステム技術開発センター
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4

2.2 タービン静翼における損傷

第1段静翼は、燃焼器と同様に厳しい温度条件で使用されるため、損傷が顕著に現れる部品である。起動/停止により熱疲労き裂が発生し、そのき裂は起動回数・運転時間の増加に伴い増大する。局所的な高温酸化減肉も側壁部で観察され、その程度・領域はタービン入口温度の上昇に伴い拡大する傾向にある。なお、1300℃級ガスタービンの第1段静翼にはフィルム冷却を多用しているが、その冷却孔には多数のき裂が発生する。

一方、下流段の第2段・第3段静翼においてもき裂が観察されるが、その発生頻度や程度は僅かである。主要な損傷は、経年的に発生するクリープ変形である。このクリープ変形は、場合によってはロータとの接触事故を引き起こす可能性があるため、定期的な傾向管理を行い、適正な時期に修正加工する必要がある。

2.3 タービン動翼における損傷

タービン動翼には運転中高い遠心力と熱応力が作用し、高温部品中で最も厳しい環境で使用される。そのため、動翼の主要な損傷は、クリープ損傷・熱疲労・高温酸化による減肉・腐食等である。第1段動翼は、短翼であり、冷却が施されることより、翼基材の劣化は比較的穏やかである。しかし、高い熱応力が発生するために、コーティングの劣化と共に熱疲労によりコーティングのき裂が発生する。また、1100℃級に比べ1300℃級ガスタービンにおける第1段動翼の高温酸化は厳しく、局所的に強度の酸化減肉が発生する例もある。Fig. 2にコーティングの劣化と動翼基材劣化の関係を示す。翼有効部表面に施工されるコーティングは高温酸化や高温腐食から基材を保護するのみでなく、遮熱により翼基材の劣化低減に大きく寄与している。

一方、長翼である下流段の動翼の主な損傷はクリープ損傷であり、経年的に翼材料の劣化が進行する。

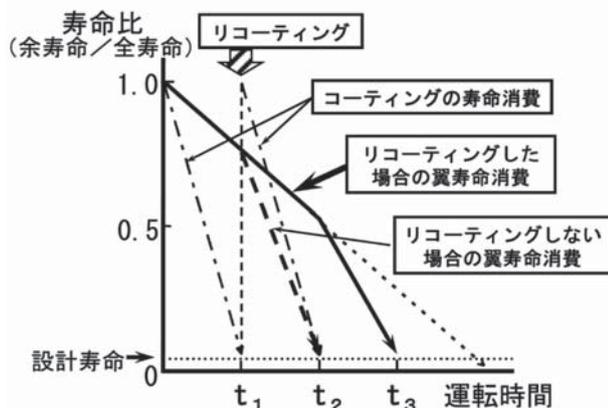


Fig. 2 Relationship between coating degradation and bucket material degradation⁽²⁾

3. 高温部品の寿命と補修/交換インターバル

Fig. 3に、高温部品の寿命と補修との関係を示す。図に示すように、点検時期と高温部品寿命はクリープ・高温酸化・磨耗等の運転時間要因や疲労等の起動回数要因により規定される。管理基準はメーカーにより異なり、実運転時間、実起動回数にて管理されるものと、起動回数を運転時間に置き換える等価運転時間にて管理されるものがある。実運転時間、実起動回数管理機では、ピーク運用の場合には起動回数基準が適用され、定格負荷運用の場合は運転時間基準が使用される。

一方、補修は各点検時期に補修基準に則り実施される。部品交換時期は、各点検時期に実施される補修費用と部品交換費用との経済性評価にて決定される。⁽³⁾

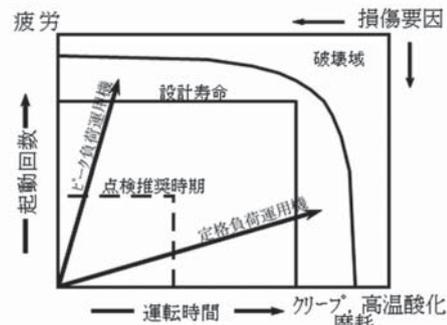


Fig. 3 Concept of Hot gas parts service life and repair/exchange interval⁽⁴⁾

4. ガスタービン高温部品の最新補修技術

上述のようにガスタービンの高温部品は非常に厳しい環境で使用されるため、その劣化損傷は避けられず、様々な損傷が発生する。そのため、静翼や燃焼器は一般的にTIG溶接等により補修を施し、再使用される。一方、動翼では経年的な材料劣化と共に高温酸化や外来飛来物による損傷が発生するが、動翼の使用材料は高温強度が高い反面、難溶接材であるため、従来は特別な補修技術はなく、単にブレンドによる手入れが施されていた。損傷に対する補修方法を、最新の補修技術を含めTable 1にまとめる。

Table 1 Damage of gas turbine hot gas-path components and repair technology

Parts	Damage type	Conventional Repair technology	Advanced Repair technology
Combustion	(1) crack (2) wear (3) oxidation (4) deforming (5) material degradation (6) TBC spalling	weld repair reforming deflection refurbishment heat treatment re-coating	(1) diffusion-braze repair (2) wear resistant coating (3) antioxidation re-coating — (6) advanced-TBC
Nozzle	(1) crack (2) oxidation (3) material degradation (4) TBC spalling	weld repair refurbishment heat treatment re-coating	(1)(2) diffusion-braze repair — —
Bucket	(1) crack (2) gouge (3) tip metal-loss (4) material degradation (5) coating degradation	blend — re-coating	(1) laser build-up welding (platform) — (3) weld repair (4) HIP technology (5) advanced re-coating

このような状況において、新しい補修技術が開発され、適用されつつある。さらに、高温部品の延命化・長寿命化に対する強い市場要求があり、新しい寿命延伸技術が開発され近年広く実用化されている。

以下に、現在ガスタービン高温部品に適用される当社の寿命延伸技術・再生技術の一例を紹介する。

4.1 燃焼器の寿命延伸技術・再生技術

4.1.1 高性能遮熱コーティング 燃焼器ライナおよびトランジションピースのメタル温度を低減することで、材料劣化の進行抑制や変形、き裂などの損傷を低減することができる。

よって、メタル温度を低減させるための修理方法として、当社では遮熱性能を向上させたTBCの開発を進めている。以下に代表としてトランジションピース向けに開発を行ったTBC技術を紹介する。このTBCを適用することにより、従来型のTBCよりもメタル温度を低減させることが可能であり、熱影響による機器の損傷を抑制することにより、中長期的な継続使用が期待できる。Fig. 4に従来型TBCと当社が開発した改良型TBCのメタル温度予測結果を示す。予測結果によると、従来型に対して改良型は約100℃のメタル温度低下が確認されている。また、改良型TBCを適用したトランジションピースを実機に組み込み、1年間運転した後に取り出したものの外観写真をFig. 5に示す。TBCの剥離や欠損は確認されず、機器は健全であり、改良型TBCの耐剥離性は良好であったことが確認された。

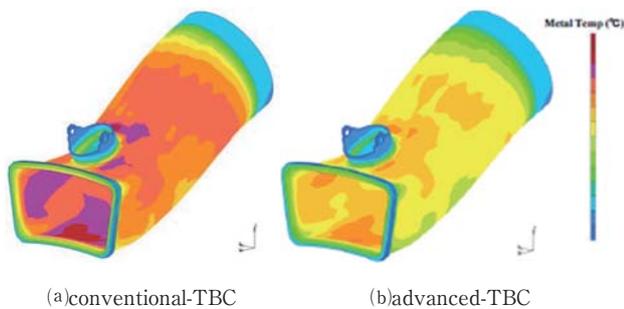


Fig. 4 Comparison transition-piece metal temperature evaluation applied conventional-TBC and applied advanced-TBC⁽⁵⁾

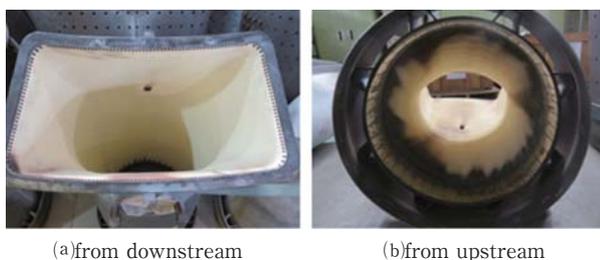


Fig. 5 Transition-piece applied advanced-TBC after 1 year unit operation

4.1.2 トランジションピースの拡散ろう付け補修 外面の密集き裂の修理は、これらを除去した後に溶接にて肉盛補修することが可能であるが、溶接範囲が広範囲になるため溶接変形を起こす可能性があり、実際に発生したケースがある。そのため代替修理方法として均一に加熱が可能な拡散ろう付けによる修理方法の開発を行った。Fig. 6は実機トランジションピースへの拡散ろう付け補修の適用事例である。拡散ろう付け補修前後の変形量の差を従来の溶接補修のものと比較した結果を示している。いずれも補修後に溶体化処理を施したものであり、溶接補修による変形量は最大で4.4mmであったが、拡散ろう付け補修による変形量は最大でも1.0mmであり、変形量の抑制が図られている⁽¹⁾。Fig. 7にシート状の補修材を基材に拡散接合した後の断面組織を示す。補修材の内部、補修材と基材との界面に欠陥等は認められず、健全な組織を呈している。

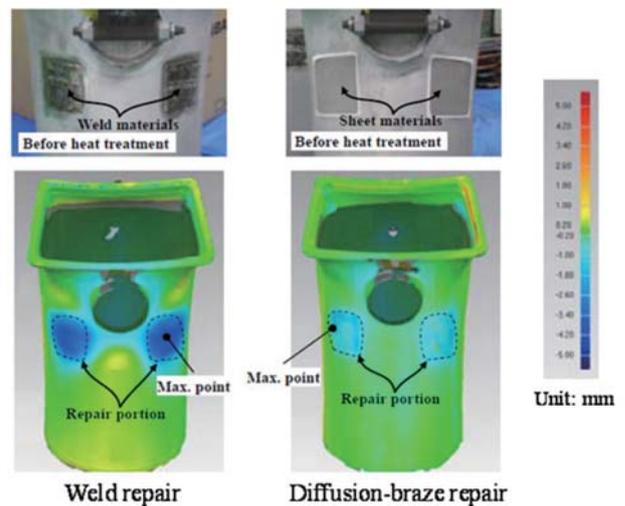


Fig. 6 Comparison of deflection for weld versus diffusion-braze repair⁽¹⁾

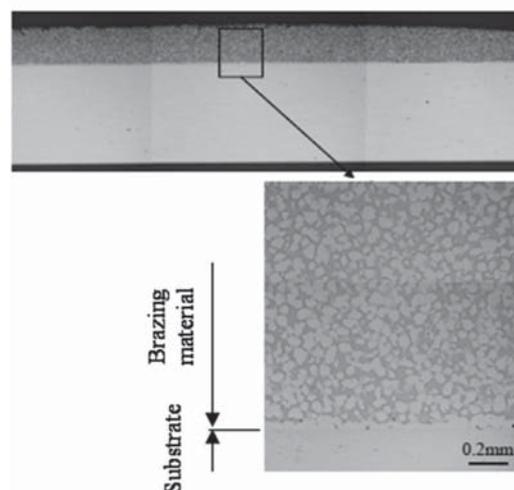


Fig. 7 Microstructure of repaired portion using brazing sheet material⁽¹⁾

4.1.3 クーポンリペア 高温部品の補修方法は各々の部品の損傷形態により選定されるが、燃焼器ライナやトランジションピースでは一部分のみ損傷が進み、その部位の劣化・損傷のために、大半の部位の損傷が軽微であるにも拘わらず交換を余儀なくされる場合がある。この問題に対し、損傷部分のみを切り取り、取替部品と交換して、部品寿命を全うさせる修理方法としてクーポンリペアがあり、実機に適用され、寿命延伸が図られている。燃焼器ライナ高耐力後部スリーブをはじめ適用例がある。

4.1.4 ピクチャーフレーム変形修正 トランジションピース出口の扇型フレーム部（ピクチャーフレーム）は、内輪側が下流側（第1段静翼側）に突き出る軸方向への変形が観察される。この変形は運転時間と共に増加の傾向にある。本変形は隣接するトランジションピース間の組立や第1段静翼との組立に影響し、過度の変形進行は組立不良に繋がる。

本変形の要因は、トランジションピース本体が外内差圧（冷却側－燃焼ガス側圧力差）により出口側が押しつぶされることによるクリープ変形と推定される。

既に損傷を受けたトランジションピースに対する修理技術として、ピクチャーフレームの軸方向変形修正技術を開発した。Fig. 8に示すようにピクチャーフレームの本体側に変形修正量に応じたスリット幅を内輪側に入れた後に、溶接にて再接続する構成としている。溶接部の表面を仕上げ加工、更に熱処理後に最終的な変形修正量が決定される。この技術を適用することにより、変形進行に起因する組立不良リスクを低減でき、機器の継続使用が期待できる。

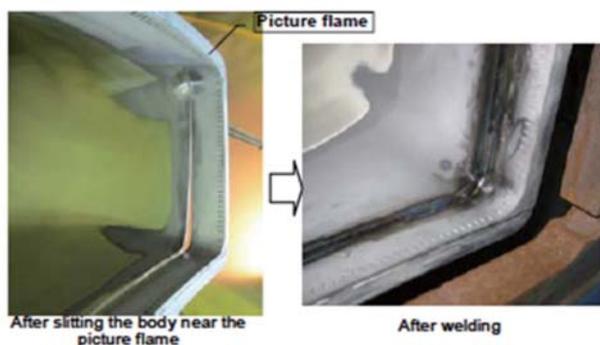


Fig. 8 Reforming the deflection of axial direction of transition-piece⁽⁵⁾

4.2 タービン静翼の寿命延伸技術・再生技術

4.2.1 拡散ろう付け補修

第1段静翼には、起動停止による熱応力が繰り返し作用するため、多くのき裂が発生し、また、局所的に高温酸化による減肉が生じることもある。従来の溶接による技術では修理前にき裂・酸化減肉部分の除去が必要であり、また、補修量の増加と共に入熱が大きくなるため、翼の変形も増大する。この問題に対し、広範囲な補修であっても変形なく、高品質な

補修を実現する補修方法として拡散ろう付け補修が開発され、広く実機に適用され寿命延伸に貢献している。

拡散ろう付け補修は液層拡散接合技術の応用例として位置付けられ、基材と同等の合金粉末とろう材粉末を混合させた補修材料を補修部に充填し、真空中で拡散熱処理を施すことで補修部を基材と同等レベルにする技術である⁽¹⁾。Fig. 9に静翼の拡散ろう付けのプロセスを、Fig. 10に拡散ろう付けにより補修した静翼をそれぞれ示す。

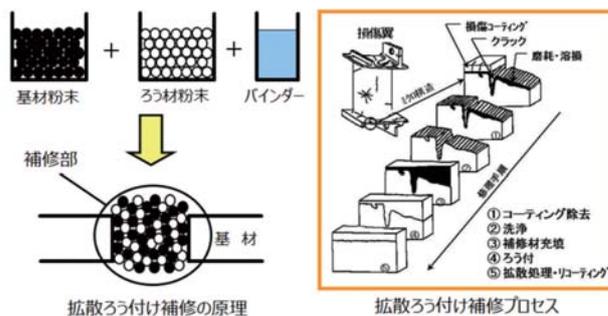


Fig. 9 The Process of diffusion-braze repair for Nozzle⁽⁴⁾



Fig. 10 Nozzle applied diffusion-braze repair⁽⁴⁾

4.3 タービン動翼の寿命延伸技術・再生技術

4.3.1 動翼寿命延伸技術BLE Process™

ガスタービン動翼は、運転経過と共にクリープ損傷が進行し、寿命を消費する。動翼の寿命延伸技術であるBLE Process™ (BLE: Blade Life Extension) は、修理基準を満たせば動翼を繰り返し再生することが可能な技術である。Fig. 11にBLE Process™の概念を示す。

当社では、経年劣化した動翼に対して1000℃・1000気圧以上の高温高圧下にて特殊熱処理を行うことにより、初期 casting 欠陥に加え、高温下の運転で経年的に材料劣化およびクリープボイドが生じても消滅させるとともに金属組織を再生させるHIP (Hot Isostatic Pressing) 再生処理技術を独自に開発しており、実機適用している⁽³⁾。

これまでの技術検証では、材料強度が新翼以上の状態まで回復することが確認されており、1100℃級、1300℃級ガスタービンの動翼にて実機適用され、良好に運転中である。

これまで、1100℃級及び1300℃級ガスタービン動翼に対し30セット以上適用された。実機では総計50万時間以上の運用実績を積んでいる。

更には、BLE Process™適用翼の実機運用後の調査も実施している。BLE Process™にて再生後、寿命まで使

用した翼に2回目のBLE Process™を適用した翼の金属組織およびクリープ試験結果をFig. 12に示す。金属組織が再生し、材料強度が新翼以上の状態に回復することを確認している。このように、BLE Process™は、繰り返し翼を再生して運用していくことを可能にしている。

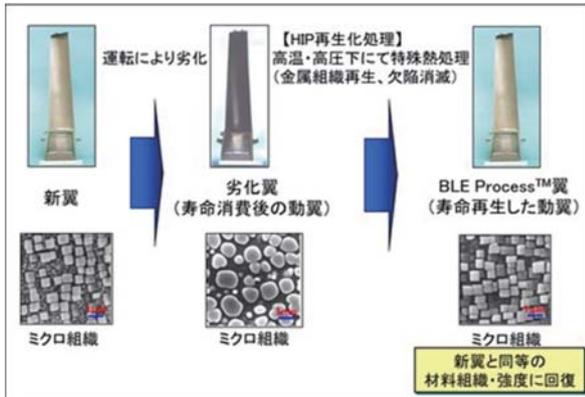


Fig. 11 Concept of BLE Process™ blade life extension technology⁽⁴⁾

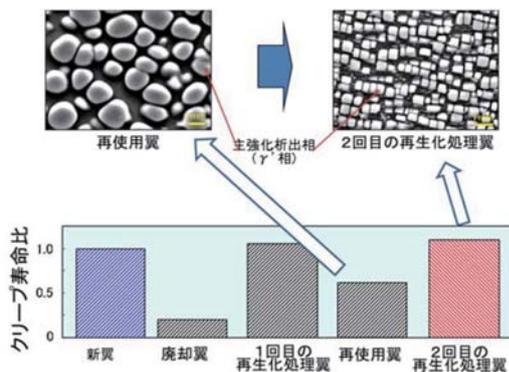


Fig. 12 Creep life and microstructure of second refurbished stage 2 bucket⁽⁴⁾

また、シュラウドを有する動翼先端部では、経年的なクリープ変形により、隣接翼との勘合部が変形し、必要な勘合代が確保できない場合がある。このことにより組立不良を招き、設備の中長期的な運用に支障をきたす恐れがある。この変形の修正技術も開発し、BLE Process™の中で適用しており、新翼並みの品質で再組み込みすることを可能にしている。Fig. 13にチップシュラウド部の変形修正写真を示す。

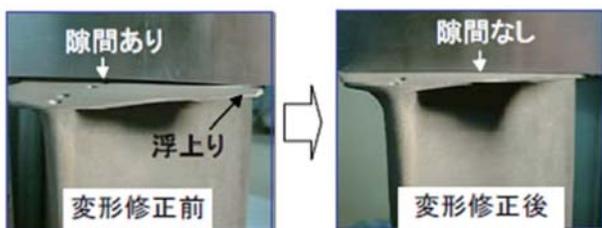


Fig. 13 Deforming repair for tip shroud⁽²⁾

4.3.2 高性能遮熱コーティング 高温酸化よりタービン動翼基材を保護するために、翼外表面及び冷却空気通路内面には金属系の耐酸化コーティングが施工されている。しかし、翼の長時間使用に伴いコーティングも劣化し、基材の保護機能が損なわれてしまう。これに対して、近年はセラミックス系の遮熱コーティングが用いられており、当社はコーティング層の気孔率を制御し、従来の遮熱コーティングより格段に遮熱性能が優れ、基材の劣化を抑えて延命化を図る高性能遮熱コーティングを開発した。トップコートの気孔率を高めるなど気孔率を制御することにより遮熱性能を向上させ、基材の劣化を抑えて延命化を図る高性能遮熱コーティングを開発した⁽¹⁾。Fig. 14に実機検証前に実施したメタル温度の数値解析結果を示す。この結果から、翼面において全体的にメタル温度の低減が図られていることが確認できる。

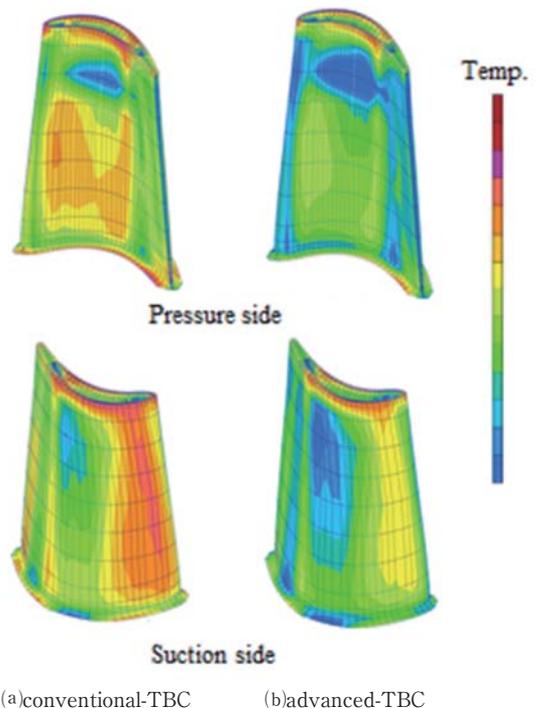


Fig. 14 Comparison stage 1 bucket metal temperature evaluation applied conventional-TBC and applied advanced-TBC

また、この開発したコーティングを第1段階動翼に適用した写真をFig. 15に、実機で約3年間使用された翼を取り出し、その外観およびコーティングの断面組織を観察した結果をFig. 16にそれぞれ示す⁽¹⁾。トップコートの剥離および、剥離に起因するき裂等の損傷も認められなかった。翼の各部位での組織をもとにメタル温度を推定し、オリジナルの翼と比較した結果によると、高性能遮熱コーティング翼における平均のメタル温度はオリジナルのコーティング翼の約15%低下しており、耐久性に併せて遮熱性能の向上も検証している⁽¹⁾。

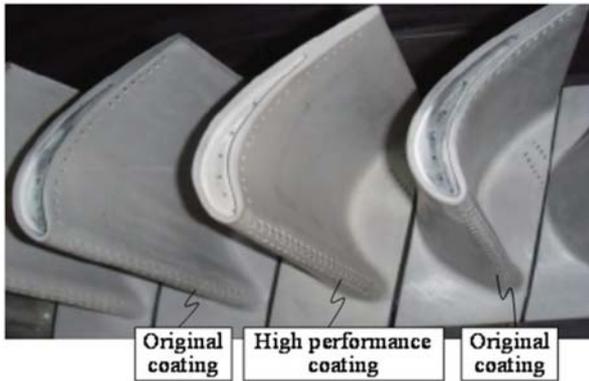


Fig. 15 Stage 1 bucket applied high performance thermal barrier coating⁽¹⁾

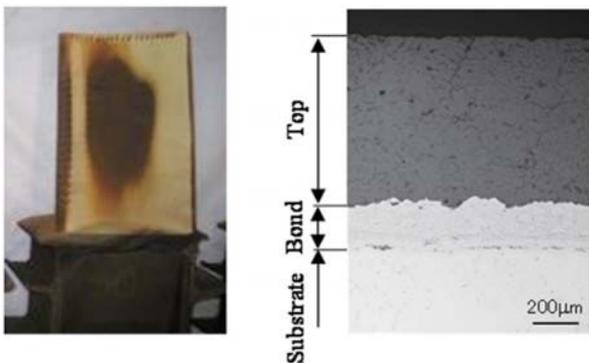


Fig. 16 Microstructure of serviced high performance thermal barrier coating⁽¹⁾

4.3.3 レーザ肉盛補修 第1段動翼の翼先端部では高温酸化による減肉，プラットホーム部の側面ではき裂などの損傷が生じる。また母材として用いられるAlやTiが添加されたNi基超合金は，溶接による入熱が大きいと，高温割れが発生し易い難溶接材である。この懸念に対し，当社は低入熱でかつ予熱なしの補修方法として，レーザを用いた肉盛補修技術を開発した。⁽⁴⁾従来の補修では，プラットホーム部で発生したき裂等の損傷により，動翼が再利用不可能になってしまうことが課題であったが，プラットホーム部の側面に発生したき裂に対しこの技術を採用することで，動翼の再利用率向上を図っている。Fig. 17に本技術を用いて補修した第1段動翼のプラットホーム部の写真を示す。

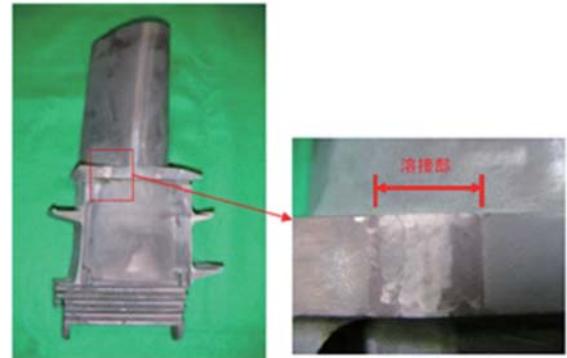


Fig. 17 Stage 1 bucket applied laser build-up welding⁽⁴⁾

5. おわりに

昨今の電力供給事情の変化において，火力発電の主力とも言えるコンバインドサイクル発電は増加しつつある。それらの主機であるガスタービンは，更なる効率向上を図るため高温化が進み，1,600℃級のプラントも運用されている。一方，1,100℃級や1,300℃級のプラントでは多くの運用実績が蓄積されており，その保守管理技術も向上しつつある。ガスタービンを保守管理していくうえで高温部品の補修技術や寿命延伸技術は，重要な技術要因であり，さらにはランニングコスト低減や資源の有効活用による環境負荷の低減にも大きく貢献する有用なものである。今後も，補修・寿命延伸技術の開発を推進し，市場要求に対応していく必要がある。

BLE ProcessTMは，株式会社東芝の商標です。

参考文献

- (1) 齊藤大蔵.ほか. 発電用ガスタービン高温部品における補修技術開発. 日本ガスタービン学会誌. Vol. 45, No. 6 (2017), pp. 38-43.
- (2) 澤 徹.ほか. ガスタービンの補修技術. 日本ガスタービン学会誌. Vol. 40, No. 4 (2012), pp. 13-18.
- (3) 石井潤治. ガスタービン高温部品の補修技術. 日本ガスタービン学会誌. Vol. 29, No. 5 (2001), pp. 18-23.
- (4) 澤 徹.最新のガスタービン保守と寿命延伸技術. 日本ガスタービン学会主催第42回ガスタービンセミナー講演集, (2014).
- (5) 伊藤勝康. ほか.ガスタービン高温部品の損傷評価と寿命延伸技術開発, 第40回ガスタービン学会定期講演会講演論文集 (2012).

特集：ガスタービンのMRO最新動向

東北電力におけるGTCCの導入歴史と運用性向上への取り組み

History of the GTCC Introduction & Action to Operability Improvement in TOHOKU EPCO



清野 幸典*¹
SEINO Yukinori



藤田 裕之*¹
FUJITA Hiroyuki



奈良 剛*¹
NARA Takeshi



菅原 智幸*¹
SUGAWARA Tomoyuki



金谷 政孝*¹
KANAYA Masataka

キーワード：ガスタービン，ガスコンバインドサイクル，熱効率，運用性，技術アセスメント

Key Words：Gas Turbine，Gas Turbine Combined Cycle，Thermal Efficiency，Operability，Technical Assessment

1. 緒言

東北電力(株)では、ガスタービンコンバインドサイクル(以下「GTCC」)発電設備の高い運用性と高効率に着目し、1984年に事業用大容量GTCC発電設備として国内初となる東新潟火力発電所3号系列の営業運転を開始以来、時代のニーズに併せた設備の高運用性に努めるとともに、高効率運用を可能とする設備の導入をメーカーと一体となって進めてきた。

その歩みは常に技術的に未知の領域への挑戦の歴史であり、様々なトラブルを粘り強く解決しながら、段階的に技術的知見を高めつつ、高効率・高運用性を兼ね備えた設備実現に向けた取り組みである。

本書では前述の位置づけの中での取り組みを概括的に紹介するとともに、今後より設備に柔軟性を要求される背景やその対応状況等について紹介する。

2. 当社におけるコンバインドサイクル発電所

まずは、当社におけるGTCC設備の導入の歴史について概略紹介する。

前述の東新潟火力発電所3号系列(出力1,090MW)については、タービン入口ガス温度(以下、TIT)1,100℃級ガスタービンを採用し、当時としては画期的な熱効率48%(LHV:低位発熱量基準)を達成すると同時に、GTCCの運転特性および環境特性の良さを実証することに成功している。

その後、3号系列の運用実績をもとに、ガスタービンのより一層の高効率化、大容量化を図るため、国内

重電メーカーと共同で「高効率ガスタービンの開発研究」(AGT共研)を1989年より6年間にわたり実施した。1999年にはAGT共研成果を反映し燃焼器に蒸気冷却方式を適用したTIT 1,450℃級ガスタービンを東新潟火力4-1号系列に導入し運転を開始した。東新潟火力4-1号系列(出力805MW)では、当時世界最高水準の熱効率55%(LHV)を達成している。

その後、CO₂の排出抑制や発電コスト低減による競争力強化を目的として、既設設備のリプレース計画に着手し、その皮切りとして1959年以来40年以上運転した仙台火力1~3号機をリプレースし、新たにGTCCとして仙台火力4号機(出力446MW)を2010年7月に運転開始した。仙台火力4号機では、従来機種を改良した燃焼器空気冷却方式によるTIT1,440℃級ガスタービンを導入しており、東新潟火力4号系列に比べTITは低いものの熱効率58%(LHV)を達成し、更なる高効率化を可能なものとしている。

リプレース計画の第2弾として、新仙台火力発電所においても、電力の安定供給とCO₂の排出抑制を目的に、経年化が進んだ新仙台火力1、2号機を新たにGTCCに置き換えるリプレース工事を進めた。導入したガスタービン設備には、仙台火力で導入した設備をさらにアップグレードしたTIT1,500℃級を採用し、2012年1月よりリプレース工事を開始、新仙台火力3号系列(出力980MW)として2016年7月に全量を運転開始した。なお、設備の熱効率については、60.9%(LHV)を達成している。

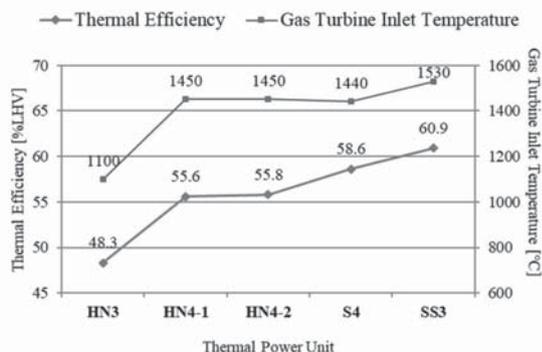
各設備における熱効率の変遷はFig. 1のとおりである。

なおGTCC設備については、GT設備の出力特性の年間特性を継続的に把握し、設備の設計裕度の範囲内且つ設備の改造を伴わない中で最適化することで、多くの場

原稿受付 2019年1月31日

*1 東北電力株式会社 発電・販売カンパニー 火力部
〒980-8550 仙台市青葉区本町一丁目7番1号
E-mail: seino.yukinori.wn@tohoku-epco.co.jp

合増出力が可能である。Table 1に各設備の出力増加内容を記載するが、増出力結果、高効率プラントであるGTCCの優位性をより拡張出来ることとなり、燃料費の削減による競争力強化や、CO₂削減により高い効果が実現されている。



HN3: Higashi-Niigata Unit No.3 (Multi-Shaft GTCC)
 HN4-1,4-2 : Higashi-Niigata Unit No.4-1, No.4-2 (Multi-shaft GTCC)
 S4: Sendai Unit No.4 (Single-shaft GTCC)
 SS3: Shin-Sendai Unit No.3 (Single-shaft GTCC)

Fig. 1 Historical trend of thermal efficiency

Table 1 Change output of thermal power station

Facility	Original	After
Higashi-Niigata No.3 train	1,090	1,210
Higashi-Niigata No.4 train	1,610	1,700
Sendai No.4 unit	446	462
Shin-Sendai No.3 train	980	1,046

(Unit : MW)

3. 当社における設備開発と技術検証の位置づけ

3.1 東新潟火力3号系列

東新潟火力3号系列が開発される1984年以前においては、TITはせいぜい900～1,000℃程度であり、出力規模も小さいものであった。こうした状況を打破し、設備の大型化と高効率化を実現する設備として位置づけられたのが当該設備である。TIT1,100℃級での運用に耐え得る高温部品を実現するとともに、従来の設備で弱点であった水もしくは蒸気噴射によるNO_x低減方式を改め、世界初の乾式予混合型低NO_x燃焼器を採用することにより設備の運用性向上を図っている。

こうした経緯を踏まえ運用を開始した当該設備であるが、開発初号機であり、燃焼温度を初め、未知の領域で運用されるプラントであったため、試運転段階から営業運転開始後の運用保守管理を行う中で燃焼器燃焼振動の発生や、高温部品における冷却不足に伴う高温酸化事象を初めとして数々のトラブルを経験した。こうしたトラブルについては、試行錯誤を繰り返しながら、メーカーと協調し迅速な解決と改善を行う中で、貴重な技術的示唆と知見を得ることとなり、その後の当社における設備開発や運用の礎となっている。

3.2 東新潟火力4号系列

東新潟火力3号系列の運用実績や、前述のメーカー共同研究成果も踏まえ、TITを1,450℃級まで高め、さらなる大容量化・高効率化を図り、1999年に半量、2006年に残りの半量を営業運転開始した設備である。その最大の特徴は、燃焼器冷却空気の燃焼ガスへの混入によるTIT低下を抑制することで、低NO_x化を実現する燃焼器蒸気冷却方式を採用している点である。

高温部品の設計に当たっては、当該運用温度での運用に耐えるべく、より高温での運用に適応した材料選択や冷却方式の最適化、最高温部位へのTBC (Thermal Barrier Coating) 施工が反映され、設備運用を開始した。

しかしながら、設備運用開始当初は、東新潟火力3号系列の燃焼温度域では確認されなかったより高次サイクル域での燃焼振動が確認され、そのファインチューニン



Fig. 2 Inspection equipment

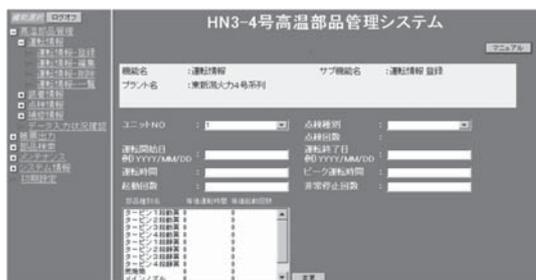


Fig. 3 Hot gas parts management system



Fig. 4 Hot gas parts stock system

グに試行錯誤の上対応し、耐力向上を図った。また本知見に基づき、燃焼振動監視装置を常設化するとともに、監視範囲をより広範囲な周波数帯域をカバーする形に強化し、より適正な燃焼状態の把握とその調整を可能にする体制を整えている。

また高温部品の管理についても、より綿密な検査の実現と管理体制を強化するため、

- ・軽微な欠陥（摩耗・亀裂・酸化・変形等）が使用条件の過酷さに相乗してリスクを高める可能性を念頭におき、よりシビアな管理を可能とすること。
- ・東新潟火力3号系列と併せ、相当数の高温部品の管理を可能とすること。

を念頭におき、設備の「検査」「データ管理」「保管」を一元管理する「高温部品管理システム」を設備メーカーである三菱重工(株)（現「三菱日立パワーシステムズ(株)」）と共同開発し、その強化を図っている。^{(1),(2)}

また空気圧縮機入口に設けている吸気フィルタについては、従来は50%捕集率程度の中性能フィルタを主に採用していたが、設備の大容量化に伴う高効率化に安定的に対応するためには、さらに捕集率の向上とメンテナンス周期に応じた高性能なフィルタの採用が必要であることが判った。そこで弊社では、空気中に含まれる汚れ分を効率的に捕集するため、主に粒径の大きい粗塵分を捕集するプレフィルタと、粒径の細かい汚れ分を捕集する高性能フィルタ（HEPAフィルタ）を組み合わせた2段式吸気フィルタシステムとすることで対応している。本システム採用の結果、従来の中性能フィルタの採用では、頻繁な空気圧縮機翼の洗浄が必要と予想された点を改善することに成功し、長期的な安定運用を可能としている。なお、プレフィルタについては、設備運転中においても取替可能な構造とし、設備稼働率の向上に大きく寄与している。

こうした燃焼振動監視技術や高温部品の自社管理システム、さらに2段式吸気フィルタシステムは、東新潟火力4号系列での運用実績を踏まえ、当社内で標準化し、



Fig. 5 High efficiency air filter

これ以降のGTCC設備の開発事情や設備状況に合せカスタマイズされ導入されている。

東新潟火力4号系列の開発にあたっては、4-1号系列と4-2号系列の開発に、約7年のインターバルがあったことから、後発となる4-2号系列においては先行の4-1号系列での知見を活かし、燃焼器の燃焼安定性をより高める等、様々な改良を行っている。さらに燃焼器蒸気冷却に関しても、起動特性や負荷運用特性をより最適化する意味から、蒸気供給系統容量の見直し等を行い、運用性を高めている。また今後の設備運用形態を考えた際に、高頻度発停止運用（以下「DSS運用」と略記）を考慮する必要があるとの認識から、その対応が必要な部位に対策を行っている。さらにDSS運用でのGT停止時のキャットバック^(※1)対策として、車室パージファンからの空気導入による高温の滞留雰囲気のパージを可能とし、冷却スピン対応^(※2)を行わずに済む様に対応している。

以上、東新潟火力4号系列の状況について紹介したが、当該設備についても東新潟火力3号系列同様開発初号機であり、運用当初の課題解決を図る中で、様々な知見と経験が蓄積された。こうした技術の蓄積は次項で紹介する仙台火力4号機や新仙台火力3号系列を初めとした設備開発や、設備運用改善に貴重な礎を与えることとなり、現在も貴重な技術的財産として当社の中に息づいている。

3.3 仙台火力4号機・新仙台火力3号系列

前述の東新潟火力3・4号系列におけるGTCC開発を振り返ると、熱効率向上に向けた未知の領域への技術的挑戦の歴史であり、熱効率向上は主にTIT上昇による効果が大きいですが、同時に新技術や新たな施策を採用した設備の導入を図っていくためには、設備使用環境や設備の運用条件を正しく認識し、その背景にある解決すべき問題点や課題を明確にした中で、徹底した技術検証のステージ（技術アセスメント）が必要であることを教示されるものであった。

仙台火力4号、新仙台火力3号の導入設備は、従来から運用されている機種をベースとして、先進技術をフィードバックし、当該機種にカスタマイズする中で高効率化と運用性向上を同時に実現するものであり、新規開発機種とは違った意味での数多くの技術的検証要素が存在していた。そこで採用するGTCC設備が、所期目標にマッチングしていることを確実に確認する必要性を考慮し、その技術アセスメントを進めた。その具体的方法としては、メーカーの協力も仰ぎ、専属の検証体制を構築し、メーカーとの共同検証の位置づけでその実施を図ってきた。その進捗にあたっては、設備の研究・設計段階から製作・試運転断面までの検証実施項目を明確に

※1. GTロータ中央部が、車室内の温度分布の影響を受け、弓反りに変形する現象。再起動時のラッピング要因となる。

※2. GT停止中に生じる車室内の温度分布を解消するため、700min⁻¹で冷却する対応

し、設備運用クライテリアの妥当性や、新技術の詳細評価、さらには過去に発生した類似課題への対応状況等を机上ならびに要素試験を併用して幅広く検証し、運用後の設備トラブル発生を最小化するプロセスとしている。

こうした検証の結果、当該設備については営業運転開始以来、運用性に優れた設備として、非常に安定した運用が継続されている。

4. 当社における設備保守の基本的考え方

当社におけるGTCCの保守点検については、概ね2年おきにガスタービンの開放点検、その中間年に燃焼器を中心とする簡易点検を組み合わせながら、高温部品を中心にその保守管理に万全を期してきた。各々の点検時の点検部位と点検内容については、それぞれ概ね下表のとおりである。各部位の形状や運転環境において、損傷形態は異なることから、各々の状況に応じ、非破壊検査の方法を設定し、目視点検・液体浸透探傷試験・蛍光浸透探傷試験の各方法を組み合わせている。

Table 2 Check part of GT

Equipment	Major Overhaul	Combustor Inspection
Casing	○	
Casing blade, Blade ring	○	
Rotor, Disc, Spindle blade	○	
Bearing	○	
Coupling	○	
Governor	○	
Combustor (Nozzle, Liner)	○	○

設備を停止しての各保守作業については、分解・検査・測定、組み立てを基本現地にて全て対応するものとし、独自の判定基準と照らし合わせて各部品個別に継続使用の可否、補修の可否等について評価している。補修が必要と判断された場合には、メーカー工場に送り修理を行うが、その期間が長期に及ぶ場合もあるため、必要な高温部品他については必要最小限の予備品を保有し、予備品の効果的な入替運用も考慮しながら、信頼性の向上と所定の定期点検期間での確実な点検を両立させるものとしている。

Table 3 Check contents of GT

	Deterioration damage	Inspection method
Casing Blade	・ Thermal fatigue ・ Oxidation ・ Corrosion	VT・PT
Spindle Blade	・ Creep ・ Oxidation ・ Corrosion	VT・PT・FPT
Combustor	・ Thermal fatigue ・ Creep ・ Oxidation ・ Corrosion	VT・PT

VT : Visual Test, PT : Penetrant Test
FPT : Fluorescence Penetrant Test

高温部品の寿命評価については実運転時間をベースに、起動回数等の影響を換算係数で時間に置き換える等価運転時間管理を基本として管理している。高温部品の長期運用に伴う実態強度については、随時破壊試験を実施し把握するとともに、再熱処理による寿命延伸や、TBCの打ち替えによる遮熱効果の維持施策も適切に組み合わせながら、高温部品寿命を出来るだけ使い切るための施策を展開している。また一部プラントにおいては、定期的実施している高温部品の破壊調査等による実態強度結果を踏まえ、換算係数をより最適な状態に見直す等、運用の高度化とノウハウの蓄積に取り組んでいる。

こうした中、仔細は各項目毎に詳述するが、設備保守に大きな影響を与える設備運用状況の変化（再生可能エネルギー導入拡大）や、法令変更に基づく設備点検インターバル変更が至近の対応課題として抽出されており、これまで蓄積したノウハウを最大限に活用しつつ、適切な対応を行っていく所存である。

4.1 再生可能エネルギー導入拡大に伴う影響

従来は高効率であるGTCCの特色を活かし、ベースロードでの運用を基本としていたものの、太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、その運用はミドル・ピーク的なものへ変化して来ている。

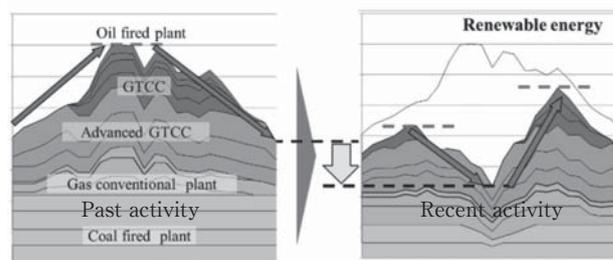


Fig. 6 Changes in the operation of the thermal power station

こうした運用形態の変化は、当然の事ながら設備の寿命管理にも影響を与え、DSS運用を行う設備については、より低サイクル寿命評価に重きをおいた適切な寿命管理が要求されるため、都度の点検の機会を通じ、より木目細かな点検・管理を行うことにより信頼性の維持に努めているところである。

4.2 安全管理審査周期変更に伴う点検周期見直し⁽³⁾

2017年4月より、安全管理検査制度が見直されており、事業者の保安力に応じた評価区分で点検周期の延伸が可能な形となっている。ここで事業者の保安力の評価は、
 ・ 日常の保守管理が適切な管理体制で実施されていること・・・①
 ・ 日常の運転管理が適切に実施されていること・・・②
 ・ 高度な運転管理体制が構築されていること・・・③
 の各項目の適合具合で評価され、その適用度合いにより3つに区分されている。最も保安力の高いシステムSの評定を受けることで、HRSGおよび蒸気タービンの定期

Tabel 4 Renewal safety management system

Classification		Adaptation			Period	
		①	②	③	HRSG	ST
System	S	○	○	○	6	
	A	○	○	-	4	4
	B	-	-	-	2	

(Unit : Year)

事業者検査時期が、従来の2年から最長6年に延伸することが可能となっている。(Table 4参照)

GTCCの場合、HRSGならびに蒸気タービンは、従来型のコンベンショナル発電設備に比較し、温度・圧力の条件が低いことから、新たな制度に適用しやすい設備である。GTは定期事業者検査の対象設備ではないものの、これまでは、HRSGの定期事業者検査時期が2年であったことを踏まえ、2年周期を軸とした点検を実施しており、高温部品の補修サイクルおよび寿命も2年周期に適したものとしていた。今後は、HRSGと蒸気タービンの定期事業者検査時期が最長6年間まで延伸可能であることから、これに合わせてGTの点検も最適化する方向で考えていくこととしている。その際、GT高温部品の補修サイクルおよび寿命管理について従来からの見直しも必要となることから、前述のGTCCの運用変化等も踏まえ、効率的な保守・運用に繋げることを念頭に検討を進めているところである。

5. 設備経年化ならびに需給変化への設備面の対応

当社におけるGTCCの運用は1984年に運転を開始した東新潟火力3号系列を皮切りに、約30年の歴史であるが、電力の需給状況の変化やGTCC設備以外の設備も含めたラインナップを踏まえ、運用性に優れるGTCCの運用を時代ニーズに柔軟に対応させる形としてきた。

特にGTCCの黎明期に導入された東新潟3号系列等については、基本的にベース運用を基本とした設備設計となっており、より柔軟な運用に適応していくためには適切な設備の耐力強化策の実施や、運用変化に伴う新たな課題への対応が必須であり、2000年代の初頭からその対応を進めてきた。

また前述のとおり、再生可能エネルギーの導入拡大により、至近においてはGTCC全体としてその運用状況により柔軟性と機動性を要求されており、これまで以上に喫緊の課題として対応していく必要性が生じている。

以下にこれまでの東新潟火力3号系列を中心とした設備耐力向上対策の一例を紹介するとともに、今後実施予定の東新潟火力4-1号系列のGT換装工事について紹介する。

5.1 東新潟火力3号系列GT耐力向上対策⁽⁴⁾

5.1.1 新型燃焼器の採用 東新潟火力3号系列導入時に開発・実用化した世界初の乾式予混合型燃焼器はアンユラ型であったが、先進技術を当該燃焼器条件にカス

タマイズして上で改良を行った。その結果、更なる環境負荷の低減は勿論のこと、高頻度発停止への対応力向上や、安定的に高メタン燃料への対応を可能とした新型燃焼器(マルチノズル型燃焼器)を開発し2003年に導入した。(Fig. 7参照)

その導入にあたっては、工場での要素試験や実圧燃焼試験を通じ、より安定的な運用が可能であることを確認した上で導入するものとし、その結果、現在においても安定した運用が継続されている。なお新型燃焼器導入によるメリットは以下のとおりである。

【新型燃焼器導入による主なメリット】

- ① GT出口排出NO_xの低減(約80ppm⇒40ppm)
- ② 脱硝用アンモニア使用量削減
- ③ 高メタン燃料が燃焼可能となったことによる3号系列プラントの運用性向上
- ④ 燃焼器寿命延伸・点検周期延長による修繕費削減

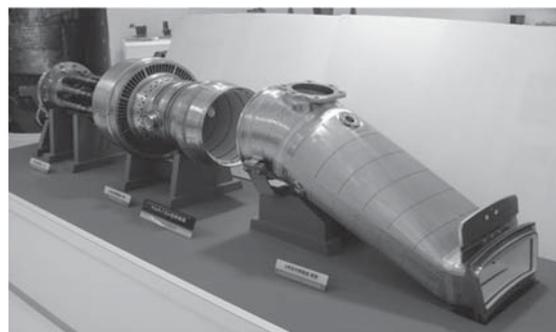


Fig. 7 Combustor (Multi nozzle type)

5.1.2 その他高頻度発停止対策の実施 3号系列は多軸型GTCCであるため蒸気タービンを停止せずGTだけの起動・停止が可能な点を活かし、起動・停止時間が早いGTのみをDSS運用とすることで、夜間の電力需給調整に貢献している。DSS運用導入にあたり事前に設備耐力強化策を検討・実施し、現在まで安定したDSS運用を継続している。

なお、3号系列は全6台のGTで構成されているが、各GTともに営業運転開始以来の起動回数は概ね1000回を超過している。

主な対応の事例は以下のとおり。

- ・圧縮機静翼に、静翼環テノン部の溶接部を起点とした損傷が懸念されたことから、テノン構造のない組立式および電子ビーム溶接式静翼環を採用。
- ・排気車室ならびに排気室に熱応力による亀裂・変形が懸念されたことから、厚肉化による剛性強化および構造変更による応力緩和策を実施。
- ・エアセパレータに摺動面のフレッシングを起点とした亀裂が懸念されたことから、摺動面のない分割型エアセパレータを採用。

5.2 GT以外の経年化対策の一例

3号系列は営業運転開始より長期間が経過しているこ

と、さらには、設備の運用が高頻度発停止を中心とした運用であることもあり、GT設備以外の部位でも経年的な劣化が確認され、対策を実施している。以下にHRSGに関して認められた事象を概略紹介する。

前述のとおり、3号系列の高頻度発停止対策を開始したことに伴い、起動停止に伴う熱ストレスを受ける部位に、熱疲労による損傷が認められた。具体的な部位例としては、非耐圧部としてはGT出口の高温排気ダクト（丸ダクト）とHRSGの各ダクトが接続されるコーナー部に亀裂が発生し、当該部を熱応力緩和構造に改造し対応している。また耐圧部としては、過熱器管寄せに接続されるドレン管に熱応力が集中し、亀裂が発生する事象を経験している。これは、起動停止中の、熱的変位状況が時間ずれを生じることにより発生したことから、ドレン管のフレキシブル対策を行い対応している。

また、至近明らかとなった事象としては、HRSGの脱気器や高圧一次節炭器において、流れ加速型腐食（以下、FAC：Flow Accelerated Corrosion）による減肉に起因した不具合が発生し、課題となった。FACの発生条件等については、流体の温度や水質（pH等）範囲の相乗により発生するものとされており、3号系列のHRSG等にはその発生可能性域が複数存在し、顕在化したものである。3号系列への対策としては、GTCCの特性上、温度域を遷移させることは難しいことから、水処理上でpHを調整するとともに、FAC発生に効果が高い材料（Cr鋼を採用）に変更し、その対応としている。

5.3 緊急電源の転用による運用性向上

2011年3月11日に発生した東日本大震災により、当社管内の発電所が多数被害を受けたことを受け、早期供給力の確保を実現するため、東新潟火力と秋田火力構内にシンプルサイクルGT設備を2012年夏までに設置し、以来需給逼迫時の供給力確保に努めてきた。本設備については、その後の需給状況の変化に伴い、2018年度末を持って廃止予定であるが、仙台火力4号に採用した設備と同様なGT機種を採用しており、前述のとおりの技術アセスメントと営業運転開始以降の長期的な信頼性や高い運用性を確認済であることも踏まえ、当該設備の有効活用策について検討を進めてきた。その結果、環境面性能でも優れること、さらにボトム側設備とのマッチ

ングについても大きな問題が無いことが確認されたことから、東新潟火力4-1号系列のGTを当該設備に換装することとした。その結果、各大気温度域での出力特性が改善されるとともに、熱効率でも1.5%程度の改善効果が見込まれ、併せて負荷運用性の向上を図ることが可能との判断に至ったことから、今後2020年度中の換装工事終了に向け工事を進めることとしている。

6. 上越火力発電所の建設工事計画

最後に今後のGTCC設備の開発計画を紹介する。

上越火力発電所は、当社9か所目の火力発電所として、新潟県上越市に高効率且つ運用性に優れた最新鋭GTCCとして建設するものであり、2023年の営業運転開始に向け現在詳細設計を進めている。主な諸元は下表のとおりである。

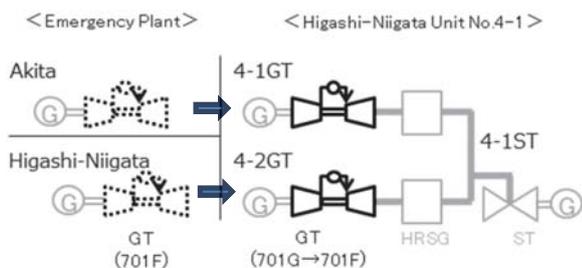
Table 5 Outline of Joetsu Thermal Power Station

	Item
Output (MW)	57.2
Thermal Efficiency (%)	< 63
Generation Method	Single Shaft GTCC × 1
Manufacturer	Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd

採用するガスタービンは三菱日立パワーシステムズ(株)製のM701JAC形であり、燃焼器には運用性に優れた空気冷却方式を採用している。特徴的な点としては、従来の空気冷却方式での弱点であった燃焼器冷却後の冷却空気と燃焼ガスの混合による燃焼ガス温度の低下を抑制するため、ガスタービン空気圧縮機出口の燃焼用空気の一部を、ガスタービン外部に設けた専用の空気圧縮機と冷却器により加圧・冷却し、本空気で燃焼器の冷却を行う「強制空気冷却システム」を新たにメーカーと共同で開発し、採用する点である。本システムにより、燃焼器の冷却に使用した空気は、燃焼用空気と合流させて燃焼用空気として熱回収を行うことから、結果としてガスタービン出力の増加と高効率化を同時に実現することが可能となっている。

さらに前述の強制空冷システムにおいては、システムで昇圧・冷却した空気を燃焼器に導く際に、タービン静翼環内部を通過する構造とすることで、定格運転時には冷却の効果により最適なクリアランスとし、起動過程や部分負荷運用においては従来よりもクリアランスに裕度を持たせることで、設備の起動時間の短縮や負荷変化率の向上を図ることとしている。

今後詳細設計を進めていく上で、当社がこれまでに培った分解点検や補修に関する知見を設備設計に反映すべく、メーカー設計者と当社補修担当者による技術アセスメントの場を適宜設け、運用性やメンテナンス性に優れたGTCC設備となるよう取り組むこととしている。



HRSG : Heat recovery steam generator
ST: Steam turbine

Fig. 8 Planning of the conversion construction



Fig. 9 Conceptual drawing of Joetsu thermal power station

7. 結言

本書では、当社におけるGTCC開発の歴史を紹介するとともに、建設ならびにその後の運用を通じた設備の最適化に向けた一連の取り組みを紹介した。大型GTCCの開発の歴史は、当社が東新潟火力3号系列でその実現を果たして以来、約35年と短く、まさに技術的な挑戦の歴史である。

特に黎明期を支えた先人達の功績は一言では表せない程深いですが、こうして一連の流れを振り返ってみると、目の前の課題に正面から取り組み、考え抜き、新たな施策を絞り出す努力の賜物である。

電力業界は、現在電力システム改革の真最中にあり、2020年春には新市場の導入や発電・送配電部門の組織分離等の施策が実行段階を迎える。さらに世界的な脱炭素化の動きを受け、太陽光・風力発電を中心とした再生可能エネルギーの大量導入も相乗し、火力発電の位置づけや運用は今後も大きく転換していくことは自明である。こうした時代だからこそ、今一度先人が作り上げたGTCC技術を礎に、その可能性を最大限に活かすためのアプローチが必要では無いだろうか。心新たに可能性への挑戦に向け邁進する所存である。

参考文献

- (1) 菅原道雄他3名, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 29, No. 1 (2001), pp.13-14.
- (2) 阿部雅宏他1名, 火力原子力発電技術協会誌, Vol. 50, No. 10 (2008), pp. 978-980.
- (3) 佐藤裕市他3名, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 42, No. 4 (2014), pp. 345-346.
- (4) 安藤均, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 46, No. 2 (2018), pp. 141.

特集：ガスタービンのMRO最新動向

ガスタービン自家発電設備の改善事例（続報）

（日本ガスタービンユーザー会）

Improvement Case Studies of Gas Turbine Power Generation Equipment for Industrial Users (Sequel)



萩原 一雄*1

HAGIWARA Kazuo



今井 将史*2

IMAI Masashi



松村 隆之*3

MATSUMURA Takayuki



吉田 長史*4

YOSHIDA Takefumi



佐藤 尊道*5

SATO Takamichi



坂井 雅也*6

SAKAI Masaya

キーワード：産業用ガスタービン，自家発電設備ユーザー，不具合改善，信頼性向上，保守管理

Key Words：Industrial Gas Turbine，Power Generation for Industrial Users，Failure Improvement，Reliability Improvement，Maintenance Management

1. はじめに

1990年ガスタービン動翼破断事故を契機に，ガスタービンを運用する自家発電設備ユーザーが集まり，情報交換を開始したことを起点として，日本ガスタービンユーザー会（以下ユーザー会）が1991年に発足した⁽¹⁾。現在では国内外メーカー11社のユーザーが参加する会に発展した。本会の目的を『ガスタービンユーザーが相互に技術情報交流をすることにより，自社のガスタービンの運用技術の向上と，会員の技術の向上を図る。』と宣言し，ガスタービン自家用発電設備の信頼性向上と経済性向上を両立させるべく，ユーザーおよびメーカーとの交流を進めることで我が国の自家発電設備の運用技術の向上に寄与してきたものと自負している。自家発電ユーザーが長年ガスタービン自家発電設備の維持管理，不具合改善，信頼性向上，経年対策，経済性向上などの使命に対して試行錯誤を繰返し確立した各種改善事例の一部について，ガスタービンのImprovement/Modification特集号に掲載した⁽²⁾。

ガスタービンのMRO最新動向特集号を発行するにあ

原稿受付 2019年1月16日

- * 1 川崎天然ガス発電(株) 設備管理部
〒210-0867 川崎市川崎区扇町12-1
- * 2 住友化学(株) 千葉工場 動力用役部
〒299-0295 袖ヶ浦市北袖9-1
- * 3 東京ガス(株) ソリューション技術部
〒105-8527 港区海岸1-5-20
- * 4 JXTGエネルギー(株) 川崎製油所 工務部門
〒210-8523 川崎市川崎区浮島町7-1
- * 5 富士フイルム(株) 材料生産本部 富士宮事業場 動力グループ
〒418-8666 富士宮市中大里200
- * 6 太陽石油(株) 四国事業所 工務部
〒799-2393 今治市菊間町種4070-2

たり，前回報告の続報として設備の老朽化対策の改善事例や保守メニューの多様化に関する事例なども含めて紹介する。

2. ユーザー会の活動概要

ユーザー会の幹事会社は会長：富士フイルム（本社），副会長：JXTGエネルギー（本社），事務局長：東京ガス，代表幹事：旭化成（守山），幹事：出光興産（千葉），JXTGエネルギー（千葉，川崎），住友化学（千葉），富士石油（袖ヶ浦），太陽石油の8社からなる。

幹事会社から毎年各ユーザーに配布されるアンケートは定型化されたフォーマットで，各社の設備仕様，運用状況，定期点検実績・修繕費実績，稼働率（不具合）実績，高温部品の寿命など多岐にわたる。これらのアンケートから各社別の推移，機種別動向を分析し，特定の機種，サイトに異変がないかなどの意見交換が行われ，技術交流会開催の可否を決める。その結果として，1991年の第1回技術交流会から今までに21回の技術交流会が開催された。

2018年の第21回技術交流会で集計したアンケート内容のうち，最近の計画外停止状況の概要をFig. 1に説明す

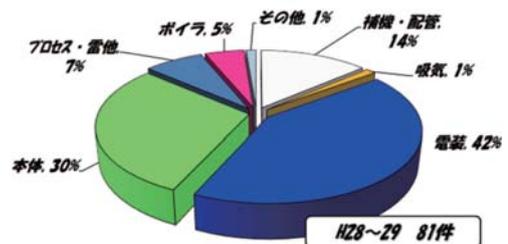


Fig. 1 Factor ratio for unscheduled stop (2017-2018 survey summary)

る。最近の傾向として再び電装品の不具合が多くなってきている。電装品の不具合頻度についてはバスタブカーブで論じられることが多いが、ユーザー会の調査でも初期稼働物件と20年を超える稼働物件の両方において電装品の不具合発生頻度が高い。計画外停止の回数について、要因別推移をFig. 2に示す。ユーザー会の活動によって計画外の停止回数は減少基調にあるものの、電装品の計画外停止回数頻度については増加傾向にある。

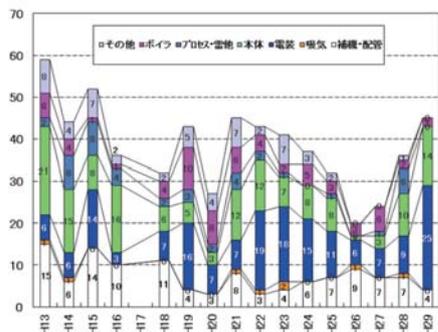


Fig. 2 Transition of unscheduled number of stop

3. 最近の運用・保守の動向

技術交流会ではアンケート結果に基づき、たとえば高温部品の損傷、補機や附帯設備の不具合、計装・制御系の信頼性向上などについて討議を行う。この中で解決していった内容が、人の入れ代わりや技術の伝承不足によって再発してしまうことがままあり、これらの事象をいわゆる古典的な不具合と呼んでいる。Table 1は過去の技術交流会で議論された古典的な不具合事例一覧を示す。これらの事象は各ユーザーの改善事例を参考に再発防止に至った。表中に記載した部位の箇所についてはFig. 3の標準的な発電設備レイアウト内に示す。

さらに、設備の長期運用に伴う老朽化は避けて通れない課題としてクローズアップされてきた。また、運用側のニーズに対応する形で、保守方法についても多様化してきた。これらの具体的な取り組みについて、以下に述べる。

3.1 古典的な不具合傾向と対策

3.1.1 過去の報告事例 過去、学会誌やセミナーにて、幾つか古典的な不具合と改善方法について報告を行った³⁾。代表的な事例としては①高温部品の損傷、②付帯設備の信頼性向上、③吸気フィルタ仕様改善による性能向上などである。①の高温部品の損傷例として、ガスタービンのアップレートに対して、期待寿命の評価が十分整備されていない90年代には高温酸化やクリーブ破断と言った翼損傷が発生した (Fig. 4参照)。これを改善するため、メーカーとユーザーが協力して仕様変更と耐久性の実証に取組み、現在では評価方法も確立したことを受けて、この種の不具合は解消された。

②の付帯設備の信頼性向上として取り上げたのが、オイルミストファンの仕様向上や冗長化、排気エキスパ

Table 1 List of typical failures in the past

系統	部位	番号	不具合事項		
吸気～圧縮機	吸気フィルタ	1	性能低下、サージ、圧縮機打痕		
	吸気冷却	2	夏季出力低下		
	雪害	3	ルーバー・フィルタ差圧上昇		
	バイパス扉	4	シール用ガスケット劣化		
	吸気室入口扉	5	シール不全		
	吸気サイレンサ	6	老朽化による錆		
	IGV	7	リンク機構老朽化変形、サージ		
	コンプレッサ翼	8	ピッチング腐食		
	ローター	9	冷却空気配管腐食		
	抽気弁	10	Oリング、グリース耐熱不良		
	シール	11	水分による錆閉塞		
	ターニングモーター	12	軸受損傷		
燃料系～燃焼器	ガス圧縮機	13	燃料ガスによる軸受損傷		
		14	スライド弁誤動作 (ボテンショメーター)		
		15	オイルミストによる燃料ノズル固着		
		16	鉱物油ではなく合成油を使い振動		
		17	油中のガス抜け込み		
		18	LO供給温度制御		
		19	インターロックの改善		
		20	不飽和炭化水素燃料による固着		
		21	連結管異常減肉		
		22	火災		
		23	ドレンによるトランスBOX損傷		
ガスタービン高温部品	燃料ノズル 燃焼器	24	高温酸化、クリーブ損傷		
		25	パターンファクターによる部分損傷		
		26	冷却不良		
		27	老朽化に伴うディスク熱歪み		
		28	ディスクキャビティ温度不良		
		29	カップリング連結ボルト部破損		
		30	運転中ボルト緩み (最悪飛散により翼破損)		
		31	フィルタ本体、ドレン配管穴あき		
		32	冷却空気穴閉塞		
		排気系	排気温度計 排気エキスパンション	33	シース破断
				34	バースト、エンクロ内計器類損傷
ガスタービン補機	減速機、トルクコンバーター	35	軸受損傷		
		36	軸受・油圧系		
軸受、油圧系	振動計 潤滑油配管 オイルミストファン	37	コネクタ不良による誤動作		
		38	断線		
		39	フレキ配管損傷		
		39	炭化による軸受損傷、シール圧上昇		
換気系	換気ファン	40	ヘアリング損傷		

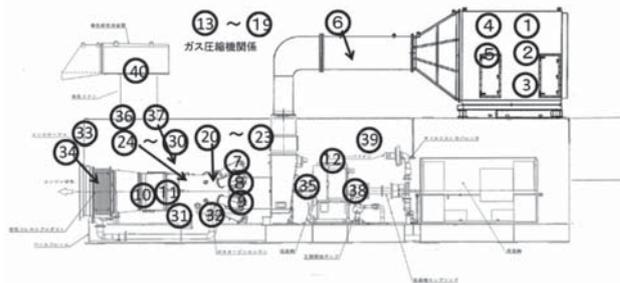


Fig. 3 Places of typical failures in the past



Fig. 4 Damage of high-temperature oxidation in vane

ションの劣化対策などのユーザーエンジニアリングの代表例である (Fig. 5参照)。

③の吸気フィルタ仕様改善はユーザーエンジニアリングの代表と言えるもので、サージマージンが少ないガスタービンユーザーを中心に90年代前半にメーカーが推奨していたナッツ、ライス洗浄やCold Washなどの水洗浄に替わってHEPAフィルタを最終段とする多段フィルタ方式へと進化した。この効果はサージリスクや洗浄後の閉塞などの不具合リスクを回避できることに留まらず、



Fig. 5 Break in exhaust expansion

コンプレッサの汚れ防止が可能なため、性能低下抑制や定期点検時のコンプレッサ清掃の簡略化、さらには高温部品の高温腐食の要因となる空気中のNa, Kの侵入防止など、多岐にわたる⁽⁴⁾。現在では国内メーカーの多くがHEPAフィルタを標準化しており、利用範囲は事業用発電設備にまで広がっている (Fig. 6, 7, 8参照)。

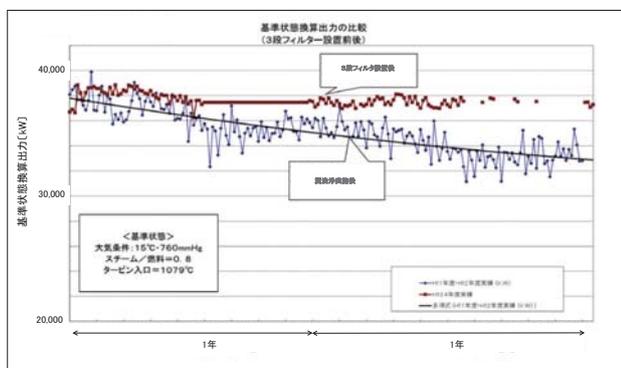


Fig. 6 Drop of the generation output due to presence / absence of HEPA filter



Fig. 7 Compressor appearance in inspection before the HEPA filter introduction



Fig. 8 Compressor appearance in inspection after the HEPA filter introduction

3.1.2 高温燃焼ガスの温度偏差 燃焼ガスの温度偏差は燃焼器の燃料ノズル部で部分閉塞を起こすことにより、燃焼温度の斑が発生し、タービン翼の高サイクル疲労を起こす原因と考えられている (Fig. 9参照)。初期の交流会では副生ガス中の不飽和炭化物がノズル部でゴム状またはコーキングする現象が温度偏差の主要な事象であったが、最近発生しているサイトでは長年の運用に伴って上流設備からのスラッジ堆積物の飛来や設備稼働率の変更によるドレン物の同伴など、新たな事象も発生している。対策はスラッジ物やドレンの確実な捕集強化である (Fig. 10参照)。

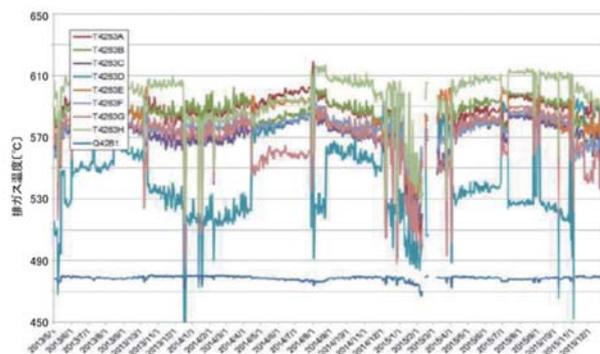


Fig. 9 Exhaust temperature spread



Fig. 10 Enhancement of drain collection

3.1.3 IGV動作不良 IGV (Inlet Guide Vane) の動作不良によって、サージを伴うガスタービン損傷に至る場合もある。IGV動作不良は初期の交流会ではグリスアップ不足や汚れによる摺動不良などが原因であったが、最近では老朽化による開度ブレやリンク機構の変形、緩み、外れなどに伴うサージ不具合も発生している (Fig. 11参照)。このため、IGVリンク機構の定期検査での確認が重要になってきている。

3.1.4 サージ サージマージンが少ないガスタービンについてユーザーが吸気フィルタの仕様強化を行うことで運用改善を達成した事例については前章で述べた。しかし、全てのユーザーがHEPAフィルタを最終段とする多段フィルタ方式へ移行したわけではなく、物理的な障害などの理由からHEPAフィルタを用いずに定期的な翼



Fig. 11 Damage to the compressor due to disconnection of the linkage

洗浄で運用を行っているサイトもある。このため、翼の汚れや老朽化による隙間の増加によりサージを引き起こす事例が見られる (Fig. 12参照)。改善方法としては吸気フィルタの限定的な仕様改善や翼の鏡面磨き (Fig. 13参照) などであるが、ユーザーはガスタービンの老朽化を評価 (サージマージンの定量化) し、改善によるマージンの回復や低負荷時のサージ可否などを検討し、運用上の制限を設けることが必要である。



Fig. 12 Changes in compressor efficiency due to vane polishing

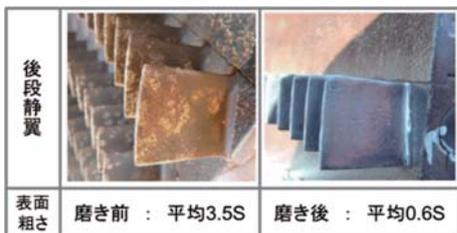


Fig. 13 Before and after mirror polishing

3.1.5 燃料分配器 (フローバイダー) の動作不良

灯油燃料を各燃焼バーナーへ均等配分させる燃料分配器 (フローバイダー) が固着による動作不良によって排ガス温度が上昇し、排ガス温度偏差でトリップした事例が報告されている (Fig. 14参照)。運用上の対策として固着防止のために定期的な分解整備を計画するとともに日常の定例作業としてハンドターニングを行うことで固

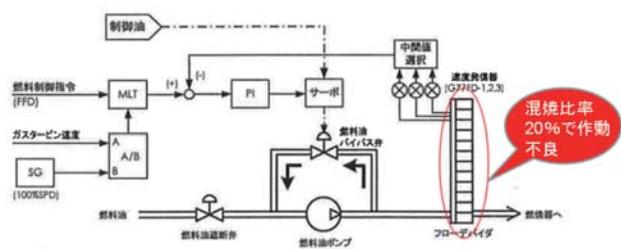


Fig. 14 Fault in fuel distributor

着防止を図っていくことが重要である。また、灯油燃料に潤滑性を向上させるための添加剤を注入している事例もある。

3.2 老朽化対策

各サイトの経年による計画外停止の推移をFig.15に示す。図より、20年運用前後からガスタービン本体、補機類、電装品などの老朽化によって、計画外停止の増加が見られる。ユーザー各社はそれぞれ老朽化対策を実施することで、その後の計画外停止の軽減に至っている。ユーザー会で顕在化している老朽化対策の事例を以下説明する。

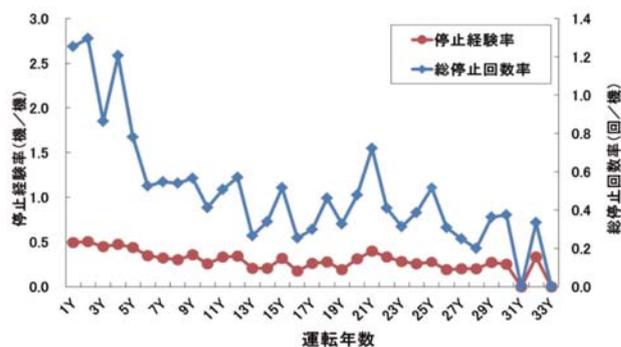


Fig. 15 Transition of unscheduled number of stop

3.2.1 ガスタービン本体精密点検 ユーザー会会員の

ガスタービンは、運転時間100,000hrを越えたものが大半を占め、ガスタービンローター分解による精密点検 (以下ローター精密点検) についても、技術交流会で精密点検セッションを設けるなどの議論を継続してきた。社団法人火力原子力発電技術協会発行 (平成17年4月) の火力発電所の定期点検指針によれば、「必要に応じてインターバルを定め、硬度計測、組織検査、その他非破壊検査などの精密点検を行う事が望ましい。」とされている。ガスタービンローターは、機械的な結合部や摺動部を有し複雑な構造となっているため、軸振動の増加や摺動に起因する摩耗およびクラックといった不具合をまねく可能性があるというのが理由である。ローター精密点検には工期や費用がネックとなるため、実施する事業所は少なかったが、ローター精密点検を実施した会員のうち、ボルトの折損 (Fig. 16参照) や、ディスク内部の汚れによるローターアンバランス (Fig. 17参照) など予想していなかった老朽化現象が認められた。これを受け、



Fig. 16 Breakage of bolt



Fig. 17 Dirt inside the turbine disk

ユーザー会はメーカーと協議を重ね、『老朽化対策としてローター精密点検は必須である』と結論づけた。

2012年度の技術交流会では、タービンディスク間のエアシールプレート溶接部クラックの事例が紹介された (Fig. 18, 19参照)。エアシールプレート溶接部は、ローターを分解しなければ点検できないため、この事例を機にローター精密点検の実施数が増加。実施結果数社で同様の事例が確認され、ローター精密点検によるトラブル未然防止に繋がっている。工期が確保できない事業所は、ローターを新製し交換するという対策も見られる。2018年10月末現在、ユーザー会員の同機種ローター精密点検実施率 (ローター新製含む) は約69%、実施予定も含めると約81%となっている。

直近ではローターディスクの材料劣化による硬度上昇や変形が見られ、本部品はローターを分解しなければ交換できないため、ローター精密点検に併せて交換を実施している。

ローター精密点検は前述の通り長期間の工期および多大なコストが必要となるが、トラブルが発生した場合はプラント長期停止や設備の大きな損害は免れない。未実施のユーザーは他社の精密点検におけるトラブル事例を確認し、リスクと実施効果を評価し判断する (Table 2参照)。また、ローター精密点検時のみ交換可能なディスクの扱いなど、中長期視点でメニューを検討し適切な投資を行うのが望ましい。

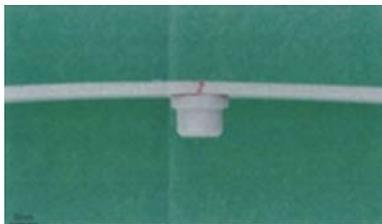


Fig.18 Weld crack of air seal plate



Fig.19 Incorporation state of air seal plate

Table 2 Effect of rotor disassembly inspection

項目	部位	処置内容	実施効果	トラブル事例
1	ローター	振れ計測	ローターアンバランス回復	
		バランス調整	→振動調整余裕度回復	
2	ローター内部	清掃	腐食進展防止 ローターアンバランス回復	汚れによるアンバランス
3	ディスク(劣化)	新製取替	ローターアンバランス回復	変形によるアンバランス
4	エアシールプレート	新製取替	割れによる損傷防止	割れによる破断
			割れによる損傷防止	クラック
5	ボルト類	新製取替	ローターアンバランス回復	縮付量 (伸び)
				アンバランス

3.2.2 付帯設備

1) 減速機 減速機の老朽化に伴う不具合として、ブルギヤとローターとのズレが定期点検で発見された事例がある。長年の運用で焼嵌め部分に緩みが発生するとギヤとローター間の微小な相対すべりが発生し、フレットイングによる摩耗が発生する場合もある (Fig. 20参照)。90年以前には焼嵌めとキー構造、90年以降は焼嵌めのみ構造を採用していたが、最近は一体型へ改善されてきた。恒久的な対策としては一体型の構造への更新であるが、経年劣化対策としては定期点検毎にマーキングのズレ有無を確認するようにユーザー会としては周知している。

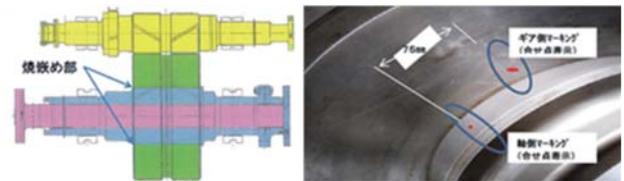


Fig. 20 Example of speed reducer structure and loose of shrink fitting

2) 発電機 発電機の冷却方式は小型ガスタービンでは開放型空冷方式の採用が多く、容量が大きくなるに従って密閉型の水冷空気冷却方式の採用が多くなる。開放型の場合は巻線の汚れによる絶縁劣化が懸念されるので定期的な絶縁劣化診断によって、定期的な洗浄を行う。これに対して、水冷方式では熱交換器の漏水、結露による錆などの不具合も報告されており、水冷冷却器の管理などが重要になる (Fig. 21参照)。そのほか、固定子楔の緩みなどが生じる可能性が高く、長期運用の中で開放点検を行うことが望ましい。

ユーザー会が行った調査結果では、ローター引き抜きによる固定子、回転子の目視点検を10年前後で行っているサイトが多い。



Fig. 21 Cleaning the generator stator

3) 排熱回収ボイラ及び蒸気配管

3-1) 排熱回収ボイラチューブ漏洩 FAC (Flow-Accelerated Corrosion) による腐食漏洩がユーザー会でも報告されている (Fig. 22参照)。FACは2004年の美浜原発3号機のトラブル後に広く知られるようになり、漏れの程度が大きければガスタービンを計画外停止させるだけでなく、場合によっては長期停止に発展する可能

性もある。FACは腐食条件が揃った局所的な部位で発生するため、経時的な定点肉厚測定を実施していたとしても見逃す可能性がある。特に、ガスタービン用排熱回収ボイラの場合はコンパクトに設計されているため、管寄せやエルボ部などの乱流域が多く存在し、また点検アクセスが困難なためにFACの発見を見逃すリスクもある。

近年ユーザーでは、ボイラ水のpHを高めにするなどの水質管理の見直しや点検口の追設による点検個所の見直しを行ったり、チューブ材質を変更したりするなどの恒久対策を講じている。



Fig. 22 Damaged tube and magnified photo of damaged area

3-2) NOx低減用蒸気ドレン配管損傷 NOx低減用として燃焼器に噴射している蒸気ドレン配管で割れが発見された事例がある。亀裂が発生したSUS配管の破面調査をしたところ、熱疲労割れであることが判明した。ガスタービンの運用パターンにより蒸気ドレン量が増減したこと、また蒸気ドレン配管の断熱が不足していたことが重なり、低サイクル疲労が発生した。(Fig. 23参照)。対策として蒸気ドレン配管の断熱を強化し、ユーザー会としては経年劣化の一例として周知を行っている。

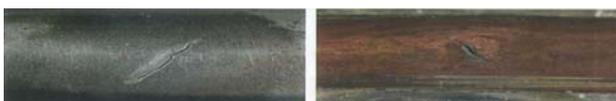


Fig. 23 Crack of tube (left: surface, right: inside)

3.2.3 電装品

1) 電装品の不具合全般 第1回技術交流会から平成25年までに報告された主な電装品の不具合項目をTable 3, その頻度をFig. 24にそれぞれ示す。個々の対策などについて、以下記載する。

Table 3 Troubles of past electrical equipment

部 位	不具合事例
CPU/ シーケンサ	制御装置のCPUカード故障
弁類	制御弁作動不良
ケーブル・端子台	ケーブル端子接触不良、熱・振動影響でケーブル断線
火災検出器、点火装置	火災検出器 受光部の汚れによる点滅
電気関係 (発電機)	発電機振動大、AVR誤作動によるガスタービントリップ
制御ソフト不良	コントローラ制御回路ソフトロジックの設計不良
温度計	熱電対の保護管折損、軸受け温度誤動作
その他	振動モニター異常、電源ユニット故障によるトリップ

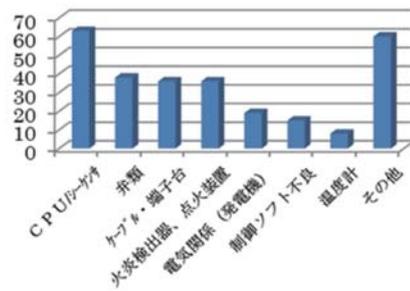


Fig. 24 Factor frequency of electrical equipment failures

2) 電装品の不具合事例 電装品不具合としてCPUやシーケンサの不良によるトラブルが多く報告されており、ガスタービンからの輻射熱による作動不良や振動に伴うケーブル断線などの古典的な事例も多い。また、最近の特徴として長期使用による老朽化によるトラブルのほか、計装機器のサポート期間後の対応や信頼性確保のため設備更新した物と既存機器とのシステム不整合や、内部ソフト不具合によるトラブルもある。

CPUやシーケンサの不良原因としては制御カードの故障が多く、特に有寿命品の電解コンデンサが含まれている制御カード類は周囲温度にもよるが10年周期での更新が必要である (Fig. 25参照)。定期点検時にはケーブルの端子台での緩みはないか、熱・振動による影響を受けてないか、など必ず調査して対応を図る。

また、制御弁の作動不良は油圧駆動の制御弁での不具合が多くみられ、特に制御油の汚れによる内部部品の作動不良が報告されている。その対策として制御油の油種変更 (鉱油⇒合成油) により酸化劣化物生成防止や防錆・防食や制御弁内部部品の交換周期の明確化などが挙げられる。



Fig. 25 Aged deterioration of condenser

3) 電装品の改善事例 スピードセンサーやCPU制御カードの不具合が発生するとガスタービンは突然停止するが、故障が継続せず電源入り切りで復旧する場合があります。原因特定が困難で経年使用による部品の不良化と推定され、メーカー持ち帰り調査するも、ほとんど不良部品の特定ができないのが現状である。制御盤内の制御カード類は塵や埃により汚れた環境に設置されていることが多く、汚れによる短絡や誤動作、接触不良などが原因に挙げられる。その改善事例として超絶縁仕様プリント基板洗浄剤での洗浄 (Fig. 26参照) や空調機器の設置、土足厳禁など (Fig. 27参照) による環境改善も重要である。



Fig. 26 Cleaning of control board



Fig. 31 Digital multi-relay



Fig. 27 Environment improvement around the control panel

また、冗長化によって信頼性を向上させた具体的な改善事例を二つほど紹介する。

振動検出器は軸受け毎にX、Y方向に各1個設置されているが、シングルShut Down (S/D) シーケンスの場合は1台の検出器の誤作動でもS/Dする。実際に振動が上昇する場合はX、Yともに上昇することが多く、メーカーとの協議を行い、XandYでのS/D回路や他のセンサーとの組み合わせで保護回路を冗長化した (Fig. 28, 29参照)。

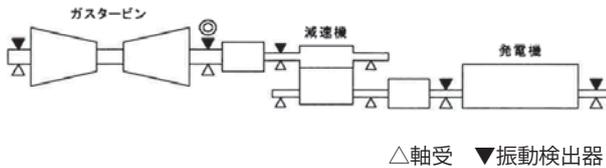


Fig. 28 Figure of bearing constitution

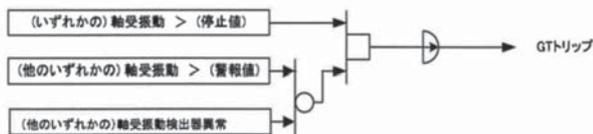


Fig. 29 Improvement example of the axis vibration abnormality detection logic

最近の発電機保護用継電器は保護、計測、制御を全て一台のリレーで行うことが出来る多機能なマルチリレーが採用されているが、リレー単品での誤作動により、ガスタービンが突然停止する事例が報告されている。発電機事故時には確実に作動し、誤作動による不要停止を防止するためマルチリレーの2 out of 3化を図って冗長化した (Fig. 30, 31参照)。

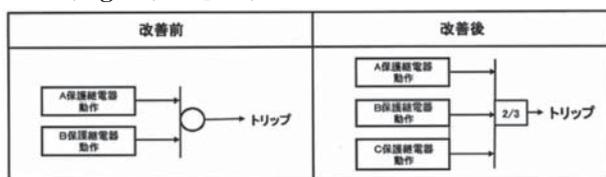


Fig. 30 Improvement example of interlock

3.2.4 吸気系設備 フィルタ室扉やバイパスドアのシール材劣化による未浄化空気の流れ、フィルタ室ドレン管からの未浄化空気逆流やドレン管錆詰りなど、いずれも定期的な点検補修が重要である。

また、経済性の追求から吸気冷却を増設するユーザーも多く、フィルタの上流に冷却装置を設ける場合には差圧管理が重要である。なお、ダクト内水噴霧方式の気化式冷却装置を使用すると結露水による圧縮機翼へのエロージョンなどにも配慮した設計が求められる。経年化による吸気系での錆発生事例をFig. 32, 33に示す。



Fig. 32 Rust around the intake air filter box



Fig. 33 Rust generated from inside the intake duct

3.3 保守方法の多様化

3.3.1 ユーザー会発足当初からの保守の考え方 ユーザー会では発足当初から高温部品の信頼性向上とコストダウンの観点から余寿命評価、履歴管理票、補機および計装品の保全周期などを整理し、情報の共有化を行うことで計画外停止と経済性の向上を両立させてきた (『3.4 点検周期の延長』参照)。

最近ではこれまでの方法に加えて、保守契約やガスタービン換装方式が導入されはじめた。以下にその特徴などを紹介する。

3.3.2 保守契約

1) 保守契約の長所 ユーザーとしては高温部品の管理をメーカーに任せることで余寿命評価などの専門知識の習得や部品毎の履歴管理、部品発注、資産管理などの管理・事務工数削減メリットが見込まれる。また、長期契約を結ぶことでメーカーも長期の生産計画を立てることが可能となり、高温部品の新製・補修コスト削減が期待できる。

2) 保守契約の短所 ユーザーにとって部品管理がブラックボックス化することで、技術の伝承が停滞するリスクがあり、そのため、自社での実績管理と定期的な教育プログラムを検討する必要がある。また、今までは改良品の投入などに対して、ユーザーもリスクを負ってメーカーに協力することを惜しまなかったが、保守契約となれば改良品を投入したことで現行よりも悪くなってしまうかもしれないリスクまで負うインセンティブがユーザーに働かなくなるため、メーカーも改良品の市場投入に対して慎重にならざるを得ない。

3) 経済性の考察 Fig. 34にガスタービンの負荷率と高温部品の使用率のユーザー分類を示す。ガスタービンを高負荷で運転し、なおかつ余寿命評価技術を導入し、高温部品を限界まで使用しているトップランナーユーザーは「AA」、その反対で負荷率も低く、メーカー推奨年数で高温部品を交換しているユーザーは「C」となる。「AA」に属するユーザーが保守契約へ変更する場合、これまでに比べて高温部品の保守費用の増加に対して、業務のアウトソーシングに伴う保守技術のブラックボックス化によるリスク評価の検討が必要になる。

ガスタービン保守の経済性を追求する手段として保守契約を紹介したが、部品の新製・補修単価を下げる方法として海外で一般的に普及している3rd Party(メーカー以外の供給者)の活用という手段もある。

時間管理されていない非高温部品で起きた事例としてメーカーとユーザーのコミュニケーション不足から定検時に資材が不足したケースがある。メーカーでは在庫を持たない部品もあるので、定検準備はメーカーと十分な打合せを行い、抜け漏れがないようにすることが大切である。

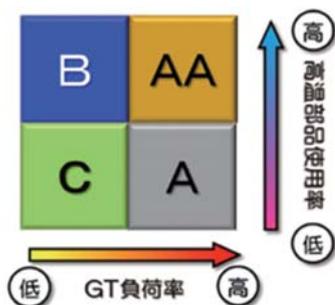


Fig.34 Image of user classification

3.3.3 ガスタービン換装方式 平成7年12月1日付の運用通達によって、小型ガスタービン(1万kW未満)については開放点検としてガスタービンの取替が認められるようになった。ガスタービンの取替方式は定期的実施する開放点検として、あらかじめ開放点検・修理を実施済みの同型ガスタービンと換装することで、点検期間の短縮と開放点検によって計画外の交換・修理が発生する場合の稼働遅れなどを回避することができる利点を有している。以下にガスタービン換装による長所、短所について概要を述べる。

1) ガスタービン換装における長所 前項の保守契約で記載された長所以外にガスタービン換装方式によるメーカー側の利点は①開放点検・修理が整備されたメーカー設備で行うことによる品質の維持、②取外したガスタービンの開放点検・修理の平準化による工場操業の改善、③部品の一元管理や改良品の水平展開などが容易なことなどが挙げられる。

ユーザー側の利点としては前項に記載されているように①コスト管理、②部品管理、③余寿命評価、交換・補修判断などの高度な保全技術を有することなく、安定的にガスタービンの運用を行うことができることと長年運用を行っているガスタービンの最大の課題である④ガスタービン老朽化対策をユーザーとして検討する必要がないことなどが挙げられよう。

これらの背景から小型ガスタービンの保守方法については、海外製ガスタービンの普及とともにガスタービン換装方式が急速に広まった。

2) ガスタービン換装における短所 従来、高温部品のダメージ状況については各ユーザーが履歴管理台帳に従って、部品管理や部品改良提案を行ってきた。そのため、ガスタービンの機関の特徴にカスタマイズした部品点検、補修、ローテーションなどを実施してきたが、メーカー主体の点検・修理では一定基準の合否判定の上で部品管理を行っている。そのため、余寿命とコストダウンのメリハリが働きにくい。

一般に点検・修理を済ませた換装ガスタービンの部品履歴についてはユーザーに開示されない。過去にはガスタービン取付フランジやワッシャの仕様ミスによって、運転後にホットエア漏れを起こす不具合なども見られた(Fig. 35参照)。不具合発生後には部品履歴の開示を求めているものの情報には限界があり、これらの改善はメーカーの品質管理に委ねざるを得ない。



Fig. 35 Example of gasket material installation mistake

3.4 点検周期の延長

1) ガスタービン高温部品の余寿命評価と履歴管理 ガスタービン高温部品の余寿命管理は定期点検周期を延ばし、保全費用の低減を行うために最も重要な管理と考えられる。ユーザー会では第1回技術交流会より動翼の余寿命評価が議論され、従来から余寿命評価手法として採用されていたクリープ試験片を使用した破壊試験に代わり、動翼材料の γ' 相の特性データで判断する方法をメーカーと共同で確立した。

具体的には γ' 相の形状と使用時間から平均的なメタル温度を推定し、材料別のLMP (ラーソンミラーパラメーター) から余寿命を推定する手法である⁽⁵⁾ (Fig. 36参照)。同じ型式のガスタービンであっても稼動状況 (TITや起動回数) によって動翼の寿命は異なるため、動翼交換周期の延長を検討する場合、自らの実績を考慮して自己責任での交換周期を決定するよう求めている。このため、各ユーザーは自社オリジナルの高温部品履歴管理票を作成して、最適な交換時期を判断している。

また、Fig. 37に示すように静翼については場所によって損傷度合が異なる場合がある。そこで、溶接補修を行いつつ翼環のローテーションを行うことで、部材の寿命延長を図った事例もある (Table 4参照)。

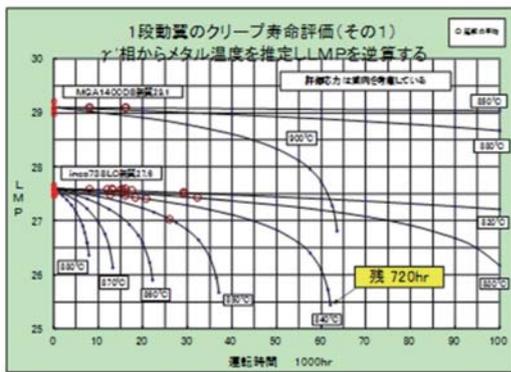


Fig. 36 Example of Larson-Miller parameter for 1st blade



Fig. 37 Vane appearance in inspection

Table 4 Example of history management sheet of combination change for vane

運転時間 (h)	建設時	第1回定期点検		第2回定期点検		第3回定期点検		第4回定期点検		第5回定期点検	
		0	6,975	14,480	22,184	29,912	37,707				
#2	#1	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20
#3	#1	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20
#4	#1	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20
#5	#1	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20
#6	#1	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20

2) 補機類仕様整備と保安全管理 ユーザー会では補機および計装品保全周期一覧表を作成し、機種別に全会員の点検周期と不具合による点検周期見直しなどのデータを定期的に収集・整理し、会員への情報提供を行なっている (Table 5参照)。この結果として、多くのユーザーが2年周期の定期点検へ移行することができた。各ユーザーは同型機種での他サイト実績などを見ながら、適切な点検内容と点検周期の修正を行うことで計画外停止を防いでいる。

Table 5 Maintenance interval list for auxiliaries' equipment and instruments (partial)

事業所名	運用	減速機	空冷ファン	補助油ポンプ	非常用油ポンプ	ターニング装置	トルコリン	点火装置	起動装置 (モーター他)	排気EXP交換
A	H1.8	8	8	>20	>20	8	8	2	5	>20
B	H1.8	8	8	>20	>20	8	8	2	5	>20
C	H1.12	>15	2	>15	>15	2	>15	1	6	*8
D	H3.6	9	2	>17	>17	15	15	2	>17	7
E	H3.6	9	2	>17	>17	15	15	2	>17	7
F	H4.6	4	4	>16	>16	2	8	4/2/2/2	>16	>16
G	H9.1	4	4	>11	>11	2	11	4/2/2/2	>11	>11
H	H10.5	9	4	6	6	4	4	1	4	>10

また、ガスタービン高温部品の管理や補機類などの適切な管理の活動の成果として、計画外停止回数の低減効果がユーザー会発足以降見られる (Fig. 38参照)。

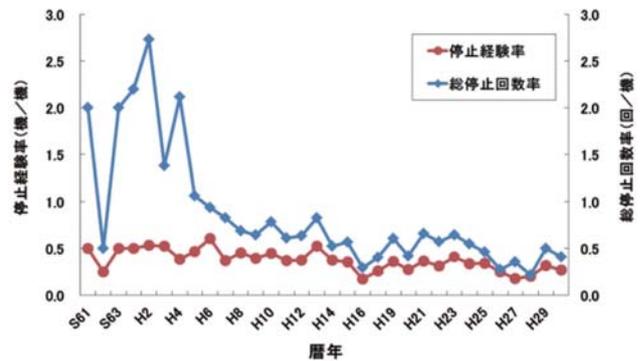


Fig. 38 Transition of unscheduled number of stop

3.5 点検期間の短縮

3.5.1 作業環境改善 多くのサイトでは、設備は屋外に設置されているため、点検工程は、季節・気象など作業環境に大きく影響を受ける。ガスタービンの点検は、極めて繊細なきめ細かい仕上げ作業が主体となるため、点検期間の短縮はここに焦点が当てられた。

雨天時にも作業影響が出ないために、簡易のテントの展張設備 (Fig. 39参照) やローター吊り出し後の作業床の天井設置、夜間でも手元が明るいように、直接光が目に入らない位置を工夫してのスポットライトの設置、さらに作業エリア近傍への電動工具用電源の設置により、作業環境の改善・日数短縮となる工夫がなされた。



Fig. 39 Portable tent for inspection in the rain

3.5.2 作業環境改善 開放点検及び組立時の作業を効率的に行うため、技術交流会では多数のアイデア事例が報告された⁽⁶⁾。例えば、ボルトの焼付を防止するための各種防止剤の実績紹介、手作りアイデア工具の紹介、取付ミスを防止するための手作りマニュアルなどである。参考までに手作りアイデア工具の幾つかをFig. 40に示す。また、車室水平部の磨きとして従来砥石を使用していたが、オービダルサンダーを使用することで作業効率の改善を行った事例をFig. 41に示す。



Fig. 40 Hand-made tool for assemble



Fig. 41 Improvement of assemble work by electrical operation

Fig. 42は、三菱重工製MF-111を使用しているユーザー会会員の2年周期の定期点検へ移行したユーザー数の推移と定期点検日数の年度別推移を示している。前述したとおり点検周期の延長や点検期間の短縮の取り組みを行った成果として、定検日数を1ヶ月以内に納めることが可能となり、コストダウンやガスタービン自家発電設備の有効活用に繋がっている。

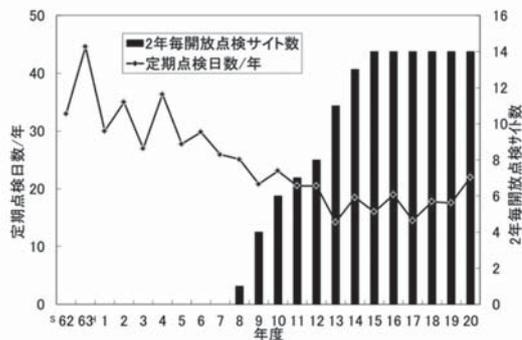


Fig. 42 Transition of the number of users about 2 year interval inspection

4. おわりに

日本ガスタービンユーザー会はユーザー会が主催する技術交流会などを通じて安定的な運用と日々の改善を使命にガスタービン自家発電設備を長年稼働させてきた。

そのためにはガスタービン本体の維持管理にとどまらず、発電設備の補機類、電装品など周辺機器を考えたトータルな保全管理が極めて重要である。今後もガスタービンメーカーなどとともに自家発電設備の技術向上のため、ユーザー会として情報発信を続けていく所存である。

最後に、技術交流会を通じてユーザー会への支援を賜っている国内外のガスタービンメーカーにこの場を借りて厚く御礼申し上げる。

参考文献

- (1) 池上作三, 金子清隆, 寺澤秀彰ほか, “自家発電設備用ガスタービンの進展と将来展望-日本ガスタービンユーザー会の20年”, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 1 (2013), pp. 72-77.
- (2) 岩間秀司, 金子清隆, 寺澤秀彰 “ガスタービン自家発電設備の改善事例 (日本ガスタービンユーザー会)”, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 43, No. 5 (2015), pp. 330-336.
- (3) 寺澤秀彰, “ガスタービン自家発電設備のユーザー運用技術の紹介”, 日本ガスタービン学会セミナー (2016).
- (4) 金子清隆, 岩間秀司, 寺澤秀彰 “自家発電設備用ガスタービンの吸気系改善事例 (日本ガスタービンユーザー会)”, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 42, No. 3 (2014), pp. 22-29.
- (5) 平山幸治, “産業用ガスタービンの高温部品の保守管理技術”, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 29, No. 5 (2001), pp. 371-376.
- (6) 日本ガスタービンユーザー会第14回技術交流会報告書, (2004).

フィルム冷却効率予測のためのベイジアンモデル較正

Bayesian Model Calibration for Prediction of Film Cooling Effectiveness

三坂 孝志*1*4
MISAKA Takashi

浅海 典男*2
ASAUMI Norio

出田 武臣*2
IDETA Takeomi

大林 茂*3
OBAYASHI Shigeru

ABSTRACT

Film-cooling effectiveness of a slanted round hole in a jet-in-crossflow configuration was predicted by Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) simulation with turbulence model parameters optimized based on measurement data. Computationally efficient approximate models based on Kriging and proper orthogonal decomposition (POD) were employed for estimating the posterior density distributions of the RANS model parameters using a Markov-chain Monte Carlo method, which forms a probabilistic parameter estimation framework based on measurement data. Maximum a posteriori estimation of the parameters realized better prediction compared to that with the original parameters. The effect of model parameters was investigated by correlating the change of the thermo-fluid field and POD bases along with estimated POD coefficients. In addition, the impact of measurement position and quantity for the estimation of model parameters were assessed by using the parameter estimation framework.

キーワード：ガスタービン、フィルム冷却、RANS乱流モデル、ベイズパラメータ推定

Key words : Gas Turbine, Film Cooling, RANS Turbulence Model, Bayesian Parameter Estimation

1. 緒言

ガスタービンエンジンの熱効率向上やCO₂削減を実現するためにはタービン入口温度の上昇が必要であり、より高温に耐えうる材料の開発に加えてタービン翼の冷却が重要となる。フィルム冷却は最も効果的なタービン翼冷却技術の一つであり、フィルム冷却流れの熱・流体数値解析によるフィルム冷却効率の予測は、冷却孔やその配列を設計するための重要な技術である。

フィルム冷却効率の予測精度は、一様流中に吹き出す冷却流とその壁面との干渉の解析精度に依存する。このような流れ場のレイノルズ平均ナビエ・ストークス (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) 方程式に基づく数値流体解析は、一般に用いられる2方程式のRANS乱流モデルでは難しいことが知られている⁽¹⁾。フィルム冷却流れはラージエディシミュレーション (Large Eddy Simulation, LES) などの非定常解析によって精度良く予測できることは確認されているが、このよ

うな高コストな非定常解析により冷却孔形状や冷却流条件の最適化を行うことが依然として難しいことから、フィルム冷却流れのRANS予測精度の向上が必要である。

近年、データ駆動型の乱流モデリング手法として、RANS乱流モデルのパラメータおよびモデル式の不確実性に対応するためのアプローチが提案されている。パラメータの不確実性に関しては、データ同化などのベイズ推定手法により、特定の流れ場に対して実験計測データに基づきパラメータを推定する方法が提案されている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。一方、モデル式の不確実性に関しては、レイノルズ応力のブジネスク近似からのずれを直接数値計算 (DNS) の結果を用いて時間平均速度場の関数として機械学習によりオフラインで求め、オンラインではRANS平均速度場を参照しつつ学習した上記関係式を用いて計算する方法が提案されている⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。

ベイズ推定手法は実験計測データを決定論的な数値解析と融合するための統計的枠組みとして期待できるものの、乱流モデルパラメータを半ば機械的に推定しただけでは、そのパラメータの有効性や適用可能範囲に関して解析条件毎に実験計測値による検証が必要となる。このような制限を緩和するアプローチの一つとして、パラメータの変化と流れ場への影響を関連づけることにより、推定されたパラメータによる解析結果の改善理由を把握する方法が考えられる。

本研究では、RANS乱流モデルのパラメータを冷却効率計測値により較正することでフィルム冷却流れの予測

原稿受付 2018年3月16日

査読完了 2019年1月16日

*1 東北大学 学際科学フロンティア研究所

〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3

*2 (株)IHI

〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1

*3 東北大学 流体科学研究所

〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1

*4 現在 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

E-mail: takashi.misaka@aist.go.jp

精度を向上させることを目的としている。冷却効率の計測値と計算値との差で定義される尤度に基づくサンプリング計算をマルコフ連鎖モンテカルロ (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 法により行い、パラメータの事後確率分布を得る。高コストなサンプリング計算の負荷を低減するために、Kriging応答曲面や固有直交分解 (Proper Orthogonal Decomposition, POD) に基づく次元縮約モデルを用いる。通常、MCMC法では数千から数万回の尤度評価を必要とするが、本研究では数百程度のサンプリング結果から構築された近似モデルにおいてパラメータ推定を行うことで、計算コストを百分の一程度に抑えることが期待できる。本研究では特にRANS乱流モデルのパラメータと流れ場を関連づけることを目的として、POD次元縮約モデルを用いた推定を検討する。最終的に、最尤推定パラメータ値 (最大事後確率推定値) を用いて再度数値解析を行い、実験結果やオリジナルのパラメータ値による解析結果を比較する。加えて、実験計測値に基づくベイズ推定の枠組みを利用して、計測方法のパラメータ推定精度への影響評価を行う。

2. RANS乱流モデルのベイジアンモデル較正

2.1 ベイジアンモデル較正の流れ

パラメータ推定の流れをFig. 1に示す。まず、修正するパラメータの選定と上下限値の設定を行う。モデルパラメータに理論的な制約条件が存在する場合にはそれに基づき決定する。平板境界層などの特定の流れ場に対して、乱流モデルの輸送方程式から決まるパラメータ値は理論的なパラメータ値の目安となるが、対象とする流れ場が大きく異なる場合には大胆な変更を許すというアプローチも可能である。本研究では実験計画法としてラテン超方格法¹⁰⁾を用い、設定した上下限値の範囲内に効率的にパラメータを生成する。

次に各パラメータに対して数値解析を行い、得られた流れ場から近似モデルを構築する。近似モデルを通してマルコフ連鎖モンテカルロ法によるパラメータ推定を行うことで計算コストの増加を抑制する。近似モデルを作成する前処理として、各ケースから得られる冷却効率とその実験値の二乗平均平方根誤差 (RMSE) を評価し、RMSEの小さなケースを利用して近似モデルを作成する。

本研究では近似モデル作成に関して二通りのアプローチを検討する。一つ目は計算された各流れ場において実験計測値に対応する位置での冷却効率を計算し、各流れ場の冷却効率とパラメータ値に関するKriging応答曲面を構築する方法である。このアプローチでは一つの冷却効率計測点に関して一つの応答曲面が必要であり、計測点数が増える毎に応答曲面構築のコストが増加する。

もう一方のアプローチは、パラメータを変化させたときの流れ場データセットに対してPODを適用することで次元縮約モデルを構築し、これを近似モデルとして用いる方法である。このアプローチではパラメータ

に対応した近似流れ場を再構築し、任意の位置での冷却効率を計算することができるため、そのコストが計測点数に依存しない。また、PODによって得られるPOD基底ベクトルがパラメータの変化に対する流れ場の変化の特徴 (主成分) を表すことから、パラメータ変化と流れ場への影響を把握するのに役立つ。加えて、数値解析結果から擬似的な計測値を作成することで、上記の枠組みを利用し、どのような計測がパラメータ推定に有効であるかを検討する。計測位置・計測量を変えた多数回の評価は、POD次元縮約モデルを用いることで効率的に行う。最終的に、最尤推定パラメータ値 (Maximum A Posteriori解, MAP解) を用いて再度数値解析を行い、実験結果やオリジナルのパラメータ値による解析結果と比較する。

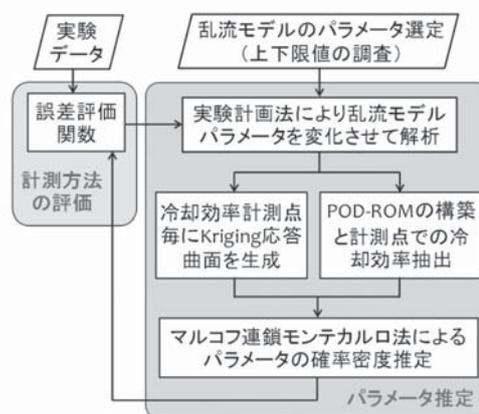


Fig. 1 A flow chart of the data-driven probabilistic parameter estimation procedure

2.2 Kriging応答曲面法

入力パラメータ (乱流モデルパラメータ) と評価値 (壁面の実験計測点で定義される冷却効率) の関係を得るための労力が大きな問題に対して、その応答を近似するために応答曲面法を利用することができる。応答曲面法は近年特に数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics, CFD) を用いた最適化に利用され、その有効性が確認されている¹⁰⁾。応答曲面として、多項式法や動径基底関数 (Radial Basis Function, RBF) 法が知られているが、実際の応答分布への適合性の良さや新たなサンプル点の追加指標が得られる利点から、Kriging法を用いる。Kriging法では、 n 個のパラメータからなるベクトル $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$ の関数 $y(\mathbf{p})$ を以下のように近似する。

$$\hat{y}(\mathbf{p}) = \mu(\mathbf{p}) + \varepsilon(\mathbf{p}). \quad (2)$$

ここで $\mu(\mathbf{p})$ 大域的定数モデルであり、与えられたすべてのサンプル点の平均値である。一方、 $\varepsilon(\mathbf{p})$ は局所的モデルであり、点 \mathbf{p} における μ からの変動に相当する。任意の二点間 p_i, p_j の相関行列の大きさと分散を最大化するような尤度関数を考えると、 $\mu(\mathbf{p})$ および $\varepsilon(\mathbf{p})$ は以下のよ

うに表される。

$$\mu(\mathbf{p}) = \frac{\mathbf{1}^T R^{-1} \mathbf{f}}{\mathbf{1}^T R^{-1} \mathbf{1}}, \quad \varepsilon(\mathbf{p}) = \mathbf{r}^T R^{-1} (\mathbf{f} - \mathbf{1}\mu). \quad (3)$$

ここで R は相関行列、 \mathbf{f} は応答ベクトル、 $\mathbf{1}$ は単位ベクトル、そして、 \mathbf{r} は相関から得られるベクトルである。

2.3 固有直交分解に基づく次元縮約モデル

PODはデータに含まれる変動を最も良く表現する基底ベクトル (POD基底ベクトル) を導出する手法であり、いわゆる主成分分析である。すなわち、

$$\arg \min_{\Psi} \|U - \Psi \Psi^T U\|. \quad (4)$$

ここで、 U はデータの含まれる行列、 Ψ は直交基底ベクトル (POD基底ベクトル) である。CFD結果に対してPODを適用する場合には、一定間隔で流れ場を保存し、その流れ変数ベクトルを並べることで以下のように行列 U を構成する (Snapshot POD)^[10]。本研究では乱流モデルパラメータを変更して得られる流れ場を以下のように行列 X にまとめる。

$$U = \begin{bmatrix} u_1^1 & \cdots & u_1^m \\ \vdots & & \vdots \\ u_n^1 & \cdots & u_n^m \end{bmatrix}. \quad (5)$$

ここで、添え字 n はCFDのデータ数 (流れ場変数×格子点数)、 m は乱流モデルパラメータセット数に対応する流れ場の数である。これを利用して行列 $U^T U$ の固有値問題

$$U^T U \boldsymbol{\varphi}_i = \lambda_i \boldsymbol{\varphi}_i, \quad (6)$$

を解くことで固有値 λ_i と固有ベクトル $\boldsymbol{\varphi}_i$ を得る。これからPOD基底ベクトルは

$$\boldsymbol{\Psi}_i = U \boldsymbol{\varphi}_i / \sqrt{\lambda_i}, \quad (7)$$

と定義される。このとき、流れ場の変動に対する各POD基底ベクトル (モード) の寄与率が、固有値 λ_i からわかる。すなわち、主要なPOD基底ベクトルは乱流モデルパラメータを変化させたときにCFDから得られる流れ場の変動をよく表すように構成されることから、パラメータの変化が流れ場に与える影響を把握するのに適していると考えられる。POD基底ベクトルを用いると元の流れ場は以下のように再構成することができる。

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \sum_{i=1}^P \alpha_i \boldsymbol{\Psi}_i. \quad (8)$$

ここで、 \mathbf{u} は分解される流れ場の変数、 $\bar{\mathbf{u}}$ は時間平均成分で空間の関数、 $\boldsymbol{\Psi}_i$ は式(7)で求めたPOD基底ベクトルであり、そして、 α_i は基底ベクトルの重ね合わせに用いる係数である。右辺第二項の和 P は流れ場の近似度に応じて設定する。パラメータを変化させたときの各流れ場に対応したPOD係数は以下のようにして求めることができる。

$$\alpha_i = \langle \mathbf{u} - \bar{\mathbf{u}}, \boldsymbol{\Psi}_i \rangle. \quad (9)$$

ここで $\langle \cdot \rangle$ は内積を表す。この係数 α_i を乱流モデルパラメータの関数として補間することにより、非計算条件での流れ場を再構築する (POD次元縮約モデル)。本研究では放射基底関数 (Radial Basis Function, RBF) 法によりPOD係数を補間する。すなわち、モード i のPOD係数は放射基底関数 ϕ の線形結合によって、

$$\alpha_i^{RBF} = f_i(\mathbf{p}) = \sum_{j=1}^P w_{i,j} \cdot \phi(r_j), \quad (10)$$

と表される。ここで $w_{i,j}$ は重み係数、 \mathbf{p} は乱流モデルパラメータをまとめたベクトル、 r_j は $r_j = \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_j\|$ で定義される距離、 \mathbf{p}_j はサンプルされたケースのパラメータベクトルである。また、基底関数 $\phi(r_j)$ は

$$\phi(r_j) = \sqrt{r_j^2 + r_0^2}, \quad (11)$$

と定義される。ここで r_0 はパラメータであり、補間誤差が小さくなるように交差判定等によって定義する。

2.4 マルコフ連鎖モンテカルロ法

マルコフ連鎖モンテカルロ (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 法では、あるパラメータ値における実験値と計算値の近さを表す尤度 P_l を評価し、ある割合 (遷移確率) でパラメータ値を更新することでパラメータの事後確率分布を得る方法である。

$$P_l(\mathbf{p}, \sigma^2) \propto \frac{1}{\sigma^N} \exp \left[-\frac{(\boldsymbol{\eta}_{exp} - \boldsymbol{\eta}_{cal})^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (12)$$

ここで $\boldsymbol{\eta}_{exp}$ および $\boldsymbol{\eta}_{cal}$ は冷却効率の実験値および計算値を N 個並べたベクトルである。標準偏差 σ は計測誤差など本推定で陽にパラメータ化されていない誤差を表現する。よく用いられるメトロポリス法の処理手順は以下のようになる。

- ① 初期位置 (パラメータ) を設定: \mathbf{p}_{now}
- ② 新しい位置の計算: $\mathbf{p}_{new} = \mathbf{p}_{now} + \sigma \text{rand}()$
- ③ 遷移確率の計算: $\gamma = \min \left[1, \frac{P_l(\mathbf{p}_{new}, \sigma_{new}^2)}{P_l(\mathbf{p}_{now}, \sigma_{now}^2)} \right]$
- ④ パラメータの更新: $\begin{cases} \mathbf{p}_{now} = \mathbf{p}_{new} & (\gamma > \text{rand}()) \\ \mathbf{p}_{now} = \mathbf{p}_{now} & (\text{otherwise}) \end{cases}$
- ⑤ ②に戻って繰り返す

ここで $\text{rand}()$ は[0,1]の乱数である。上記アルゴリズムでは尤度比 $P_l(\mathbf{p}_{new}, \sigma_{new}^2) / P_l(\mathbf{p}_{now}, \sigma_{now}^2)$ が1に近いほど \mathbf{p}_{now} が更新されやすくなる。

一般にMCMC法によるパラメータの推定では尤度の評価回数が非常に多くなることから計算コストが大きい。ここではKriging応答曲面およびPOD次元縮約モデルを通してMCMC法によるパラメータ探索を行うことでコストの問題を回避する。尤度の最大化によるパラメータの探索は、勾配法や遺伝的アルゴリズムによる

最適化計算と類似であるが、最適化計算においてはパラメータの最適値を求めているのに対して、MCMC法では最適値周辺を広く探索することにより、パラメータ値の確率分布を得ることができる。

2.5 サポートベクターマシン

近似モデルの構築においては、流れ場が振動するなど、実際の流れ場から大きく乖離しているような非物理的ケースを除くことで、近似モデルの精度を向上させると共にMCMCによるパラメータの推定範囲を適切に設定する。本研究ではRayらと同様にサポートベクターマシン (Support Vector Machine, SVM) を用いた^{(4), (12)}。まず、各ケースの冷却効率のRMSEを評価し、RMSEの小さなケースと大きなケースを分ける閾値を設定し、RMSEの小さなケースを1、大きなケースを0とラベル付けする。本研究ではCFD解析を行った100ケースのうちRMSEの小さな50ケースを近似モデル構築に利用した。各モデルパラメータと上記ラベルの組に対して、二値SVMを適用することにより任意のパラメータ値入力に対する0-1判定を行い、前述のMCMC推定において、0と判定されたケースを棄却する。これはMCMC推定において $P_i(\mathbf{p}, \sigma^2) \rightarrow P_i(\mathbf{p}, \sigma^2) P_p(\mathbf{p})$ と置き換えることで実現することができる。ここで $P_p(\mathbf{p})$ はSVMの判定により以下のように定義される。

$$P_p(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1 & (\text{small RMSE}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (13)$$

3. フィルム冷却流れの解析

3.1 流体計算手法

流体解析にはANSYS社の流体解析ソルバー Fluent 16.2を3次元・単精度で利用した。Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations (SIMPLE) アルゴリズムによる圧縮流体の定常解析を行った。ナビエ・ストークス方程式の運動量方程式、エネルギー式および乱流モデル方程式にはセルベース最小二乗法による勾配を使った3次精度MUSCL、密度には2次精度風上差分、圧力には2次精度のスキームを利用している。時間積分は2次精度の陰解法である。乱流モデルにはSST $k-\omega$ 乱流モデルを利用した。Fig. 2および3にそれぞれ計算領域と計算格子 (冷却孔付近) を示す。要素数は6,424,800、総節点数は6,586,780である。主流部の流入境界条件は流速20 m/s、温度298 K、流出部は圧力出口境界条件とした。冷却流は温度188 K (密度比1.6)、質量流量 2.98×10^{-3} kg/sの境界条件 (運動量比1.0) を与えた。主流部のスパン方向には周期境界条件を適用している。冷却効果を示す指標として本論文では式(14)で定義される冷却効率 η を用いる。

$$\eta = \frac{T_{main} - T_{wall}}{T_{main} - T_{jet}} \quad (14)$$

ここで T_{main} 、 T_{jet} および T_{wall} はそれぞれ主流温度、冷却流温度および冷却された壁面の温度である。

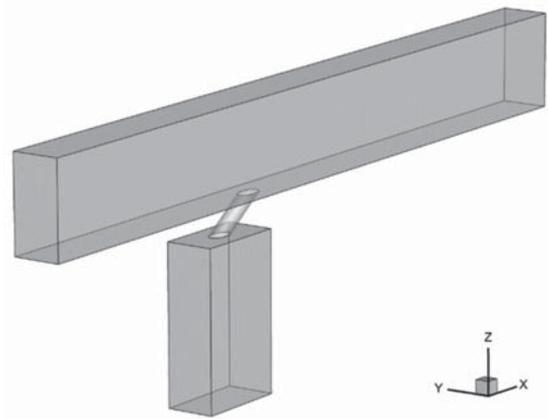


Fig. 2 A computational domain for a jet-in-crossflow configuration

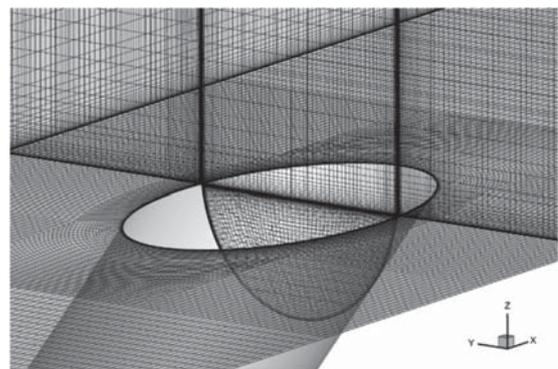


Fig. 3 A close-up view near a cooling hole exit of the computational mesh

3.2 SST乱流モデルと推定パラメータの設定

本研究ではMenterによって提案されたSST $k-\omega$ 乱流モデルのパラメータに関して検討を行った。SST $k-\omega$ 乱流モデルは内層と外層でモデル係数を変化させることによりモデルを切り替えているため、内層および外層にそれぞれモデルパラメータが存在する。ここではTable 1に示すパラメータを可変とし、計測データに基づき推定することとした。パラメータの定義はMenter⁽¹³⁾に従う。パラメータ変更後に流れ場の収束に必要な反復回数の事前検討を行い、本研究ではすべてのケースで2000回の反復を行った後に冷却効率を評価することとした。Bergmannらはパラメータの可動範囲として、SST $k-\omega$ 乱流モデルのモデルパラメータ値の半分および2倍の値を最小および最大値としている⁽⁴⁾。本研究ではより広範囲に設定し、解析結果の妥当性や計算可能性をもとにパラメータの範囲を絞っていくことにした。比散逸率 ω の輸送方程式の生成項に含まれる係数 γ_1 および γ_2 は以下の式(15)から決定されている。本研究では生成項が負にならないという制約条件を与え、 γ_1 または γ_2 が負になった場合にそのケースを除外した。また、本流れ場において、パラメータ a_1 が0.25より小さい場合に流れ場のはく離・非定常化が著しくなることが事前検討から明らかだったため、0.25以上に制限した。

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}, \quad \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}. \quad (15)$$

今回扱ったフィルム冷却流れの条件では、Table 1の上下限値の設定でも計算が発散することはなかったが、流れが非定常になり定常流れ場に収束しないケースは散見された。

Table 1 Parameter values considered in the estimation

	Original	Minimum	Maximum
β_1	0.075	0.01	0.5
β_2	0.0828	0.01	0.5
$\sigma_{\omega 1}$	0.5	0.2	10.0
$\sigma_{\omega 2}$	0.856	0.2	10.0
σ_{k1}	0.85	0.2	10.0
σ_{k2}	1.0	0.2	10.0
a_1	0.31	0.25	1.5
β^*	0.09	0.01	0.5
Pr_t	0.85	0.1	1.5

フィルム冷却流れでは主流の境界層厚さが冷却効率の評価結果に影響するため、実験条件⁽¹⁵⁾に境界層プロファイルを合わせるための流入条件の調整を行った。計算にはSST $k-\omega$ 乱流モデルのモデルパラメータ値を用いた。Table 2に境界層厚さの実験との比較を示す。この比較では冷却流流量をゼロとし、冷却孔中心軸上のいくつかの点で排除厚さ δ_1 、運動量厚さ δ_2 および形状係数 H の評価を行った。流入境界条件として、 $x/d=-2.0$ 位置での境界層厚さを実験値に合わせるために、流入境界条件として厚みは $0.21D$ の層流境界層プロファイルを設定した。 k および ω は主流乱れ度を実験条件に合わせて一様流入とした。Table 2から下流では境界層厚さの発達が実験値と比較して小さいことがわかる。また、形状係数から実験、計算共に発達した乱流境界層となっていることが確認できる。

Table 2 Boundary layer thickness for the case without cooling flow in comparison with the experiment

x/D	δ_1/D		δ_2/D		H	
	CFD	Exp ⁽¹⁵⁾	CFD	Exp ⁽¹⁵⁾	CFD	Exp ⁽¹⁵⁾
-2.0	0.088	0.089	0.057	0.059	1.55	1.50
6.5	0.124	0.120	0.080	0.083	1.56	1.47
15.0	0.139	0.143	0.094	0.098	1.49	1.46
23.0	0.154	0.167	0.106	0.115	1.46	1.44

4. パラメータのベイズ推定

4.1 実験値による絞り込み

Fig. 4 (a)に100ケースの解析から得られた冷却孔中心軸に沿った冷却効率の分布を示す。Table 1に示した範囲のパラメータ変化によって冷却効率が大きく変化することがわかる。特に流れに沿って振動している分布は流れ場自体が振動しているケースである。Fig. 4 (a)には同条件で得られた実験値を黒丸で示している^{(16),(17)}。 $x/d=5$ 以降では冷却効率が実験値よりも小さなケースが少ない

ことから、Table 1のパラメータ範囲では冷却効率の小さなケースを表現できていないことがわかる。SVMによって非物理的なケースを除いた結果をFig. 4 (b)に示す。ここではRMSEの小さな上位50ケースを残しており、冷却効率が実験値から特に逸脱したケースが除かれている。本研究ではFig. 4 (b)に示すケースを用いて近似モデルを構築する。

Fig. 5にパラメータの事前分布を示す。横軸がパラメータ値、縦軸が密度分布を示している。上記のように100ケースのうちRMSEの小さな50ケースとそれ以外の50ケースに分類して学習したSVMから得られた式(13)を用いて、MCMCによって推定したパラメータの確率分布を事前分布として示している。Fig. 5の破線はSST乱流モデルの標準パラメータ値を示している。 σ_{k1} および

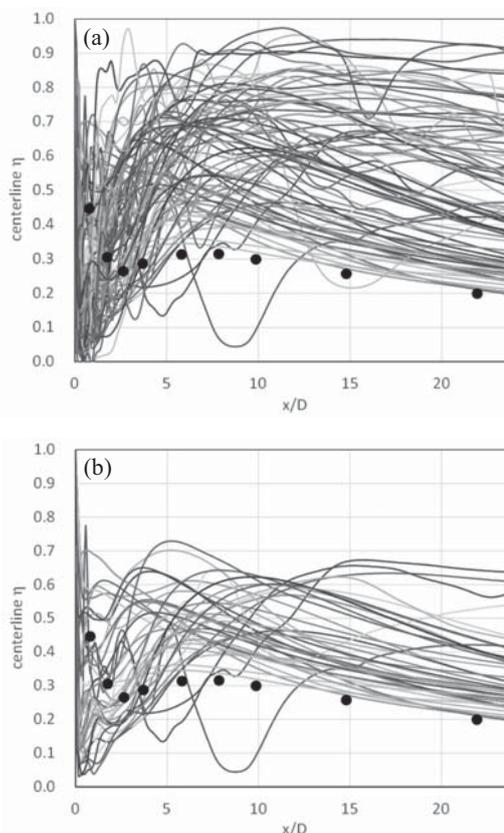


Fig. 4 Spreads of centerline film cooling effectiveness, (a) simulated cases and (b) those after excluding unphysical cases

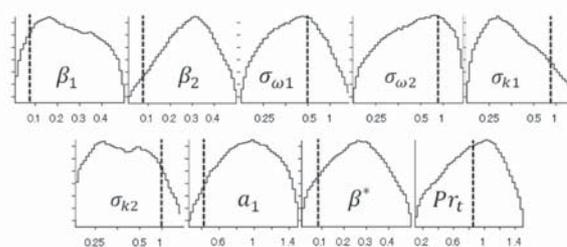


Fig. 5 Prior density distributions of model parameters

σ_{k2} を除くパラメータは標準値よりも大きな値にすることで冷却効率のRMSEが小さくなることがわかる。また、分布のピークがパラメータの上下限值に張り付くこともないため、設定したパラメータの上下限值が妥当であることが確かめられる。

4.2 Kriging応答曲面法によるパラメータ推定結果

Fig. 6に冷却効率の計測値を用いてMCMC法によって推定したモデルパラメータの事後分布を示す。尤度を評価するための実験値として、Fig. 4に丸印で示す中心軸上およびスパン平均された冷却効率を用いた。Fig. 5ではRMSEが比較的小さなケースを用いて事前分布としていたため緩やかな密度分布となっているが、Fig. 6の事後分布ではRMSEの特に小さくなるパラメータ値に対して尤度が高くなるため急峻な密度分布となっている。また、事前分布のピークが事後分布のピークと必ずしも一致していないことが確かめられる。Fig. 6には尤度関数で定義した標準偏差 σ の確率分布も示している。標準偏差の値は0.21であり、式(12)に示す尤度関数の定義ではモデル式の不確実性や計測値の不確実性がこの標準偏差として表現されていることになる。 $\sigma_{\omega 1}$ および a_1 は多峰分布となっており、このような分布はアンサンブルカルマンフィルターや粒子数の少ない粒子フィルターでは推定の困難な分布である。Table 3にパラメータの密度分布のピーク値から得た推定値を示す。ここで得られた推定値は一般的なモデル係数と大きく異なっており、特に乱流エネルギーの散逸率に関わるパラメータ β^* は3倍以上の値になっている。このパラメータセットが乱流場予測に及ぼす影響については、慎重な検討が必要である。

Fig. 7および8にSST $k-\omega$ 乱流モデルおよび推定されたパラメータで得られた主流速度および温度の分布を示

す。パラメータを機械的に振った結果では、流れ場の振動など非物理的なケースも含まれるが、冷却効率の実験値からの誤差が小さい推定ケースでは、SST $k-\omega$ 乱流モデルのパラメータで解析されたに近い流れ場が得られていることが確認できる。

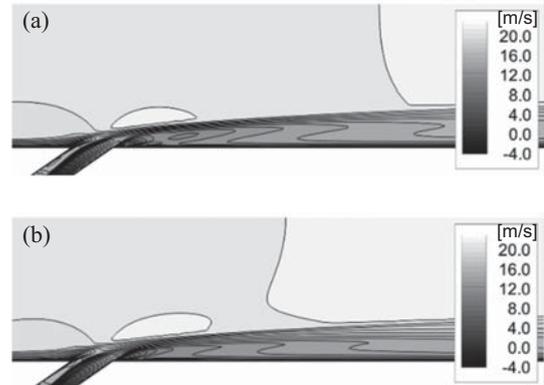


Fig. 7 Streamwise velocity distribution on a central slice, (a) SST original, (b) SST estimated



Fig. 8 Temperature distribution on a central slice, (a) SST original, (b) SST estimated

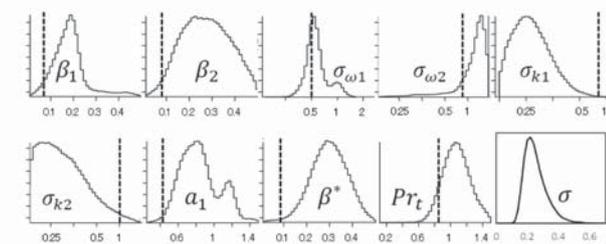


Fig. 6 Posterior density distribution inferred by the measured film-cooling effectiveness

Table 3 Estimated SST model parameters

	Original	Minimum
β_1	0.075	0.1939
β_2	0.0828	0.2788
$\sigma_{\omega 1}$	0.5	0.5276
$\sigma_{\omega 2}$	0.856	2.6344
σ_{k1}	0.85	0.2554
σ_{k2}	1.0	0.2282
a_1	0.31	0.8056
β^*	0.09	0.3023
Pr_t	0.85	1.0614

Fig. 9に冷却孔前後の主流方向速度分布の比較を示す。推定されたモデルパラメータを用いた結果においても、冷却孔直前の境界層速度分布は大きく変わらないことが確かめられる。一方で、冷却孔直後の速度分布では $x/D=1$ より小さい領域で減速されていることがわかる。この冷却流を含む流れの減速がSST $k-\omega$ 乱流モデルのパラメータに対する推定パラメータの冷却効率の低下に対応していると考えられる。

推定されたパラメータを用いて冷却効率を評価した結果をFig. 10に示す。中心線上の冷却効率はSSTモデルの標準パラメータ値を用いた結果と比較して、推定したモデルパラメータを用いることで大きく実験値に近づくことがわかる。スパン平均した冷却効率に関しては、 $x/d=5$ より小さい位置では推定パラメータの結果が実験値に近く、それ以降では実験値の冷却効率の上昇を追従できていないことがわかる。一方で中心線の冷却効率は下流側で計測値よりも大きくなっていることから、実験値

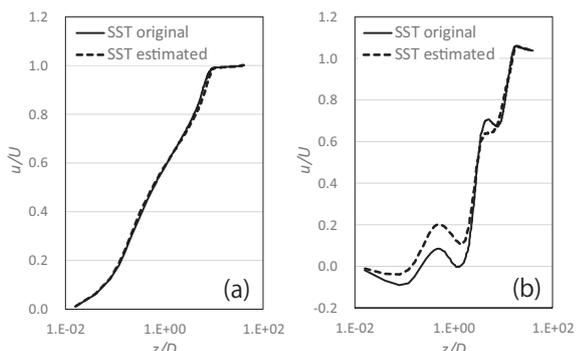


Fig. 9 Streamwise velocity profiles at (a) $x/D = -2.0$, (b) $x/D = 2.0$.

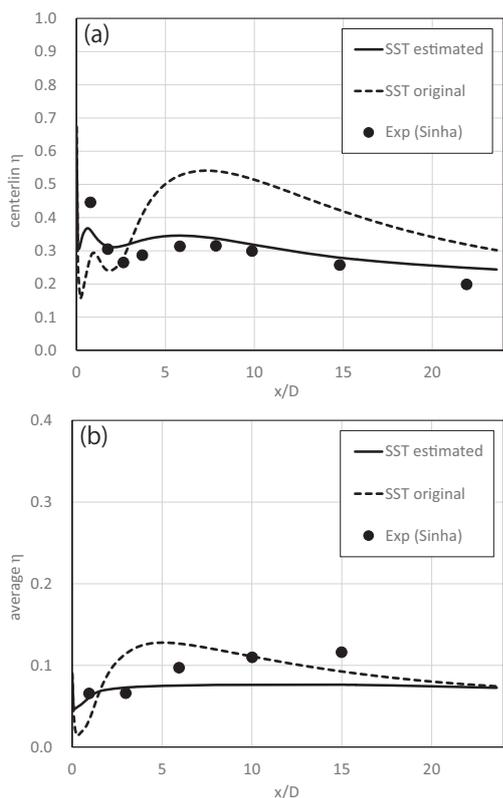


Fig. 10 Film-cooling effectiveness, (a) centerline, (b) span-average

によって最適化したパラメータを用いたとしても、SST $k-\omega$ 乱流モデルでは冷却流の広がりを表現するのが難しいことがわかる。これはレイノルズ応力の線形近似が影響していると考えられ、非線形の構造式やレイノルズ応力の輸送方程式を解くレイノルズ応力モデルを用いることで改善する可能性がある⁽⁶⁾。

これらのパラメータの妥当性の評価は一般には難しい問題であると考えられる。次節では、パラメータの変化が流れ場に与える影響を把握しつつパラメータ推定を行う手法として、POD次元縮約モデルの可能性を検討する。

4.3 POD次元縮約モデルによる推定結果の解釈

POD次元縮約モデルの作成には25次までのPOD基底を用いた ($P=25$)。これはパラメータ変更時の流れ場の変化の99%を近似するように選んだ。POD次元縮約モデルによる乱流モデルパラメータの推定結果は、Fig. 6に

示すKriging応答曲面の結果と同様であった。MAPパラメータに対応するモード1から4までのPOD係数の確率分布をFig. 11に示す。また、確率が最大となるPOD係数をTable 4に示す。これらはFig. 11の横軸の数値に対応している。この4モードで流れ場の変動の約75%を捉えている。

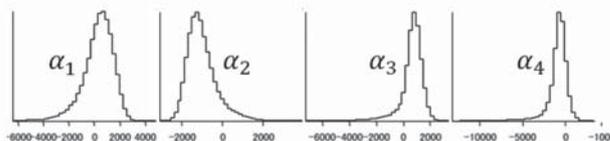


Fig. 11 Posterior density distribution of POD coefficients from 1st to 4th mode inferred by the experiment

Table 4 Maximum a posteriori estimates of POD coefficients from 1st to 4th mode

Mode #	Estimated value
α_1	507.507
α_2	-1333.959
α_3	793.065
α_4	-655.168

Fig. 12に壁面温度の平均、1次および2次モードを示す。ここで、これらの主要PODモードは壁面温度の主要な変化の仕方に対応している。これらの図では温度の高低を濃淡で示している。壁面温度は平均および各モードの重ね合わせとなるので、1次モードに関して冷却孔下流の中心軸上を考えると、冷却孔付近で壁面温度を下げ、下流側で温度を上げるようなモードになっていることがわかる（1次モードの係数はTable 4に示すように正の値）。平均にこの1次モードが加わることで、Fig. 10(a)に示すように冷却効率が実験値に近づく。また、Fig. 13では冷却流によって発生する縦渦をスパン方向速度で示しているが、上記のように平均と1次モードの足し合わせを考えることで、1次モードが渦対の高さを低くするように働いていることがわかる。渦対の高さが低くなることで、冷却域がスパン方向に広がると考えられ、温度モードの結果とも矛盾しない。

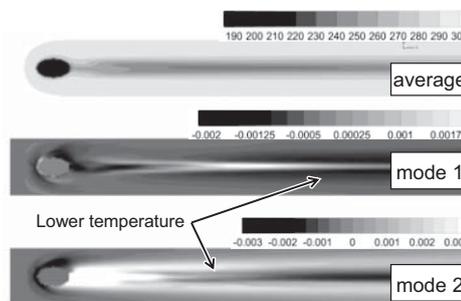


Fig. 12 Temperature average, 1st- and 2nd-modes on wall surface.

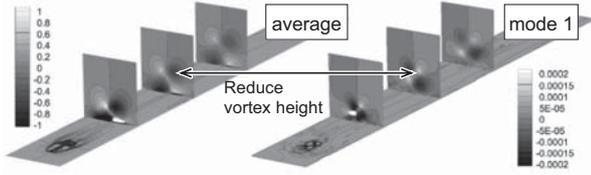


Fig. 13 Spanwise velocity average and 1st mode on several cross-sections

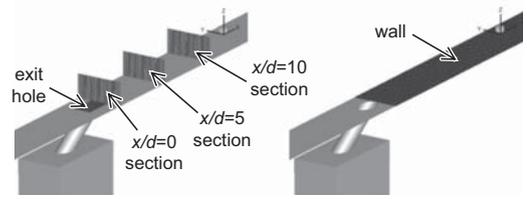


Fig. 14 The measurement positions considered in the numerical experiment

5. パラメータ推定における計測位置の影響

データ同化においては、一般にどの位置でどのような計測を行うかによって状態推定の精度が変わる。本研究で行うパラメータ推定にも同様のことが言えるため、計測位置・計測物理量の違いがパラメータ推定にどのような影響を与えるかを検討した。

任意の実験計測データを得るのは現実的ではないことから、ここでは基準となるパラメータ値の計算結果を擬似的な計測値として数値実験を行う。これにより、基準パラメータで得られた基準流れ場から任意の位置で物理量を抽出して、擬似的な計測値として扱うことができる。計測位置はFig. 14に示すように、冷却孔出口面、 $x/D=0, 5$ および10の断面、冷却孔下流の壁面、そして、Fig. 10で用いた実験値に相当する中心軸およびスパン平均の物理量である。加えて、 $x/D=5$ および20の位置における壁面温度のスパン方向分布を $x/d=5$ spanおよび $x/d=20$ spanとしてFig. 15に示している。これらの計測位置において温度、よどみ圧力および流速（それぞれ、Fig. 15横軸のtemp, ptotおよびvelcに対応）を抽出し、疑似的な計測値とした。

上記のようにして得られた基準流れ場、疑似計測値および基準パラメータを用いて、計測の評価は以下のように行われる。すなわち、式(12)で η_{exp} を疑似計測値 η_{ref} に置き換えた式(16)で表される尤度関数を最大化するパラメータ \mathbf{p} を推定する。

$$P_l(\mathbf{p}, \sigma^2) \propto \frac{1}{\sigma^N} \exp \left[-\frac{(\eta_{ref} - \eta_{cal})^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (16)$$

このとき、 η_{ref} は基準流れ場 $\mathbf{u}(\mathbf{p}_{ref})$ から得られた疑似計測値、 η_{cal} はサンプルされた流れ場 $\mathbf{u}(\mathbf{p}_{cal})$ から得られた疑似計測値に対応する。

$$\eta_{ref} = h[\mathbf{u}(\mathbf{p}_{ref})], \quad \eta_{cal} = h[\mathbf{u}(\mathbf{p})]. \quad (17)$$

ここで h は観測演算子である。このようにして推定されたモデルパラメータ \mathbf{p} と基準流れ場に対応する基準パラメータ \mathbf{p}_{ref} のRMSEを式(18)のように求めることで計測方法の善し悪しを評価する。

$$E_m = \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{ref}\|_2. \quad (18)$$

Fig. 15 (a)および(b)に計測位置を変えたときのパラメータ β_1 および β_2 の推定誤差 E_m を示す。相対的な比較を濃淡で示しており、色の濃い部分で推定誤差が小さいことになる。結果から流出孔で温度を計測した場合のバ

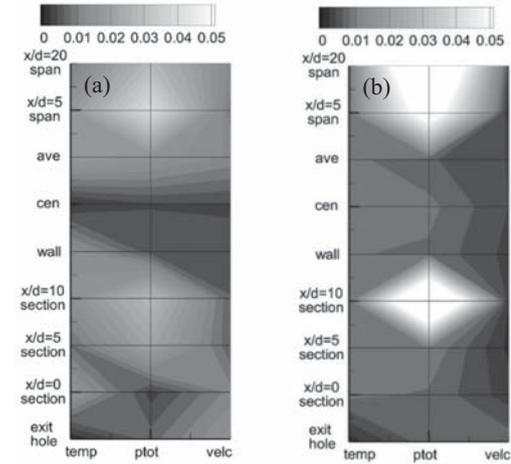


Fig. 15 The impact of the measurement positions on the reduction of estimation errors

ラメータ推定誤差が小さいことがわかる。一方で、下流断面での圧力の計測結果はパラメータ推定には向かないことが確認できる。

6. 結言

本研究では、RANS解析によるフィルム冷却効率の予測精度向上を実現するために、RANS乱流モデルパラメータを実験値に基づいて較正する手法を検討した。近似モデルとしてKriging応答曲面法およびPOD次元縮約モデルを利用することで尤度評価の計算コストを下げ、MCMC法によってパラメータの事後確率分布を得た。予測されたパラメータの最大事後確率推定値を用いた検証解析から、実験値に近いフィルム冷却効率を得られることを確認した。ただし、推定値は一般的なモデル係数と大きく異なっており妥当性についてはさらなる検討が必要である。また、POD次元縮約モデルによるパラメータ推定から、PODモードと温度場・流れ場の修正との関連づけを行った。そして、パラメータ推定の枠組みを利用して計測方法のパラメータ推定精度への影響評価を行った。一方で、近似モデルの精度はパラメータ推定の精度に直接影響するため、十分に精度検証を行う必要がある。

本研究はフィルム冷却流れにおける冷却効率の予測精度向上を目的としており、特にフィルム冷却流れの条件（密度比、運動量比など）や冷却孔形状の変化に対して汎用的な予測性能を持たせることを目指している。今後

の課題としては、推定されたパラメータセットの適用範囲を明確にすることが挙げられる。

参考文献

- (1) Harrison, K. L. and Bogard, D. G., "Comparison of RANS Turbulence Models for Prediction of Film Cooling Performance," Proceedings of ASME Turbo Expo 2008, GT2008-51423 (2008).
- (2) Kato, H., Ishiko, K. and Yoshizawa, A., "Optimization of Parameter Values in the Turbulence Model Aided by Data Assimilation," AIAA Journal, Vol. 54, No. 5 (2016), pp. 1512-1523.
- (3) Guillausa, S., Gloverb, N. and Malki-Epshteinb, L., "Bayesian Calibration of the Constants of the $k-\epsilon$ Turbulence Model for a CFD Model of Street Canyon Flow," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 279 (2014), pp. 536-553.
- (4) Ray, J., Lefantzi, S., Arunajatesan, S. and Dechant, L., "Bayesian Parameter Estimation of a $k-\epsilon$ Model for Accurate Jet-in-Crossflow Simulations," AIAA Journal, Vol. 54, No. 8 (2016), pp. 2432-2448.
- (5) Duraisamy, K., Zhang, Z. J. and Singh, A. P., "New Approaches in Turbulence and Transition Modeling Using Data-driven Techniques," AIAA Paper 2015-1284, 2015.
- (6) Ling, J. and Templeton, J., "Evaluation of Machine Learning Algorithms for Prediction of Regions of High Reynolds Averaged Navier Stokes Uncertainty," Physics of Fluids, Vol. 27 (2015), pp. 085103-1-22.
- (7) Ling, J., Ruiz, A., Lacaze, G. and Oefelein, J., "Uncertainty Analysis and Data-Driven Model Advances for a Jet-in-Crossflow," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 139 (2017), 021008-1.
- (8) Xiao, H., Wu, J. L., Wang, J. X., Sun, R. and Roy, C. J., "Quantifying and Reducing Model-Form Uncertainties in Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations: A Data-Driven, Physics-Informed Bayesian Approach," Journal of Computational Physics, Vol. 324 (2016), pp. 115-136.
- (9) Wang, J.-X., Wu, J.-L. and Xiao, H., "Physics-Informed Machine Learning for Predictive Turbulence Modeling: Using Data to Improve RANS Modeled Reynolds Stresses," arXiv:1606.07987, 2016.
- (10) Forrester, A., Sobester, A. and Keane, A., Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide, (2008), Wiley.
- (11) Sirovich, L., "Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures I - Coherent Structures," Vol. 45 (1987), pp. 561-571.
- (12) Suykens, J. A. K. and Vandewalle, J., "Least Squares Support Vector Machine Classifiers," Neural Processing Letters, Vol. 9 (1999), pp. 293-300.
- (13) Menter, F. R., "Two-Equation Eddy Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," AIAA Journal, Vol. 32 (1994), pp. 1598-1605.
- (14) Bergmann, C., Ormiston, S. and Chatoorgoon, V., "Sensitivity Studies of Shear Stress Transport Turbulence Model Parameters on the Prediction of Seven-Rod Bundle Benchmark Experiments," Transactions of ASME, Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, Vol.2 (2015), pp. 011012-1-10.
- (15) Pietrzyk, J. R., Bogard, D. G. and Crawford, M. E., "Effects of Density Ratio on the Hydrodynamics of Film Cooling," Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 112 (1990), pp. 437-443.
- (16) Kohli, A. and Bogard, D. G., "Adiabatic Film Effectiveness, Thermal Fields, and Velocity Fields for Film Cooling with Large Angle Injection," Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 119 (1997), pp. 352-358.
- (17) Sinha, A. K., Bogard, D. G. and Crawford, M. E., Film Cooling Effectiveness Downstream of a Single Row of Holes with Variable Density Ratio, Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 113 (1991), pp. 442-449.

長崎大学工学部機械工学コース坂口研究室における多目的最適化設計を用いたターボ機械の開発

Studies Related to Design of Turbomachinery Using Multi-objective Optimization at Sakaguchi Lab, Nagasaki University



坂口 大作*1
SAKAGUCHI Daisaku

キーワード：多目的最適化, 人工知能, 小弦節比翼列ディフューザ, 遠心圧縮機

Key Words : Optimization, Artificial Intelligence, Low Solidity Cascade Diffuser, Centrifugal Compressor

1. 緒言

本研究室では、遺伝的アルゴリズムと人工神経回路網を組み合わせた多目的最適化設計システムを用いて、さまざまなターボ機械の最適設計を試みている。近年、ターボ機械は、設計点における性能改善だけでなく、サージ近傍などの非設計点流量における性能改善が求められる、多目的最適化設計システムを用いることにより、設計点流量および非設計点流量の両方で良い性能を示す羽根形状を探索できる。非設計点流量では、どうしてもはく離が伴うので、最適化システムがはく離を性能改善に利用するような形状探索を行うようになり、従来の設計法とは異なる視点で設計提案ができるようになった。

本稿では、はく離を利用した非設計点流量での性能改善例として、小弦節比翼列ディフューザおよび循環流型ケーシングトリートメントの最適設計に関する研究を紹介する。

2. 最適化設計システム

CFDを用いた形状探索方法として、遺伝的アルゴリズム⁽¹⁾は全方位的な形状を探索できる有効な方法である。遺伝的アルゴリズムを用いる際に重要なことは、形状が進化するために数百から数千世代にわたる十分な世代を用意することであり、世代ごとに計算コストが高いCFDを用いている場合は、近年のスーパーコンピュータであっても、十分な進化が得られる世代を稼ぐことは難しい。

そこで、Fig. 1に示すような人工神経回路網（ニューラルネットワーク）をCFDの代替モデル（メタモデル）として利用する最適化設計システムが考案⁽²⁾された。メタモデルにより最適形状と提案された形状について、

CFDによる詳細計算を行うことで、信頼性の高いデータベースが構築でき、データベースの再構築を繰り返す度に、メタモデルの予測精度が高まり、効率良く最適形状を探索することができるようになる。遺伝的アルゴリズムと人工神経回路網の組み合わせにより、CFDの実計算量を減らすことができるので、最適化手法を実用的な設計ツールとして用いることができる。

本研究室では、格子生成プログラムとしてANSYS-TurboGrid（構造格子）およびANSYS-ICEMCFD（非構造格子）を用い、ANSYS-CFXにより境界条件の設定、RANS解析、ポスト処理を自動的に行うシステムを組み、最適化プログラムが探索する全ての形状について、全自動的に数値解析による評価が行えるように工夫している。

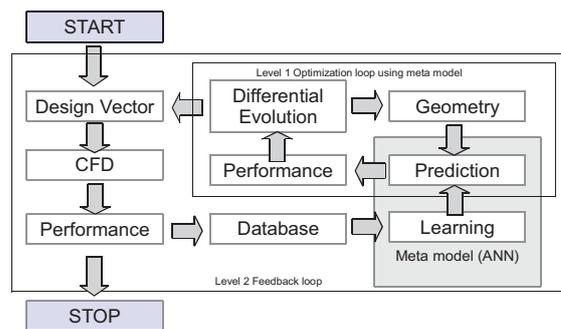


Fig. 1 Multi-objective optimization system ⁽²⁾

3. ターボ機械設計への応用

3.1 小弦節比円形翼列ディフューザの最適化

Fig. 2に示すような遠心型の圧縮機や送風機に用いられる小弦節比円形翼列ディフューザ（LSD : Low Solidity circular cascade Diffuser）は、ディフューザ側壁上の半径内向きにはく離した流体が二次流れとなって隣接翼へ流入し、低流量域でのディフューザ失速を抑制できるとして提案された。良い設計を行うには、二次流れを理想的な状態（境界層厚さ）で生じさせる必要があ

原稿受付 2019年1月24日

* 1 長崎大学大学院工学研究科システム科学部門
〒852-8521 長崎市文教町1-14
E-mail: daisaku@nagasaki-u.ac.jp

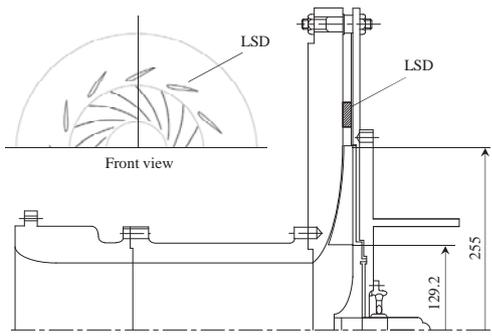


Fig. 2 Meridional section of tested blower

り、従来の設計法では困難を伴った。そこで、多目的最適化設計により、二次流れを考慮した形状探索³⁾を行った。

Fig. 3に示すように、設計流量（流量係数 $\phi=0.27$ ）および低流量域（流量係数 $\phi=0.10$ ）におけるディフューザの性能改善を目的関数として設定し、さらに、LSDが失速しないような形状を求めめるために、低流量域で揚力係数CLの吐出流量に対する勾配に着目した拘束条件を与えた。すなわち、目的関数として設計流量および低流量域でのディフューザ圧力回復を同時に改善することを目指し、拘束条件として耐失速特性を与えることで広い運転流量範囲を実現できるLSD形状を求めた。

数十回にわたる最適化プロセスを実行し、Fig. 4に示すようなパレート解を得た。本解析では目的関数であるディフューザ部静圧係数に -1 を掛けて最小化する方向で最適化しており、図の左下方向が2つの目的関数を最適化する方向となる。パレートフロント上にある最適形状は、ベースライン形状よりキャンバー角が大きい高負荷翼形状であった。

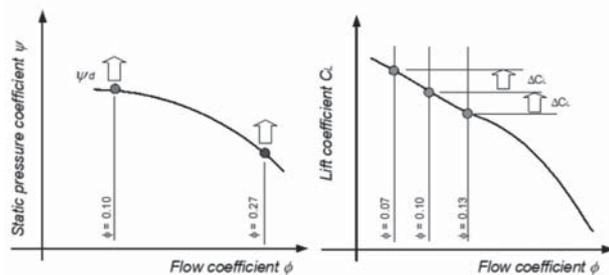


Fig. 3 Objectives and constraints for optimization

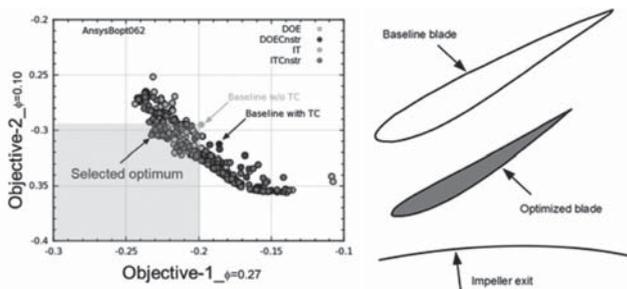


Fig. 4 Optimization result at two objectives space and comparison of the LSD shape between baseline and optimized

Fig. 5は絶対流れ角分布に速度ベクトルを同時に表示しており、濃い領域は半径内向き流れ、すなわち二次流れを示している。二次流れにより高負荷形状翼にもかかわらず失速せず、高い翼負荷を示しており、PIVによる検証においても、同様な二次流れ分布が確認された。すなわち、最適化設計システムにより、最適な二次流れを伴うことができる翼形状が見いだされ、高い翼負荷と高い失速特性を有するディフューザの設計が可能であることが確認された。

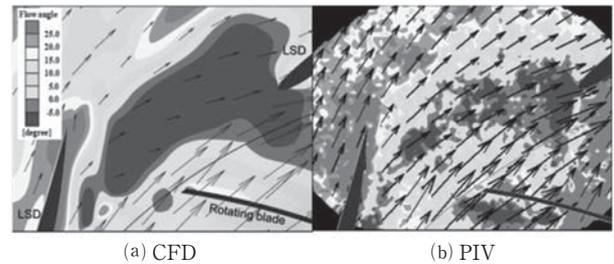


Fig. 5 Flow angle contour and velocity vector between LSD blades validated by PIV measurement ($\phi=0.13$, Span0.9)

3.2 ターボチャージャ用遠心圧縮機における循環流型ケーシングトリートメントの最適化

Fig. 6に循環流型ケーシングトリートメントを備えたターボチャージャ用遠心圧縮機を示す。羽根車上流吸込み管部および羽根車入口のシュラウド壁面に環状の溝を設け、両溝を環状のバイパス通路で連結した。低流量では両溝間の圧力差により下流溝から上流溝へ向かう循環流が、また高流量では逆向きのバイパス流れが形成される。Fig. 7には、循環流型ケーシングトリートメントの設計パラメータを示す。非常に多くの設計パラメータを考慮すべきであり、最適化設計により全方位的形状探索⁴⁾を行った。

設計流量および非設計点流量における羽根車出口断熱効率の両者を目的関数とした最適化を行い、Fig. 8に示すようなパレート解を得た。両軸には目的関数である設計流量および非設計点流量における羽根車出口断熱効率を示す。両変数に-1を掛けて最小化問題として解析しているため、図左下方向が両変数を改善する方向であり、

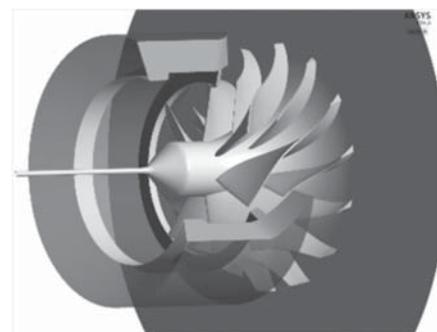


Fig. 6 Recirculation flow type casing treatment for centrifugal compressors

最適化システムは、低流量における断熱効率を改善する形状を数多く見出している。パレートフロント上において、非設計点流量での効率を改善した最適形状 (Opt2) を選び、非設計点流量 $G/G^*=0.259$ における3次元的に生じる逆流域を子午面断面に投影し Fig. 9 に示す。最適形状では、シュラウド壁面上のはく離流体が下流側溝より効果的に吸い出され、主流の有効通路面積が確保されている。

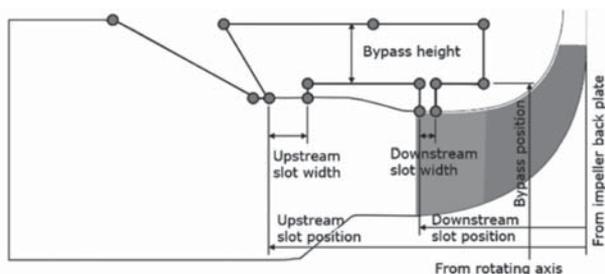


Fig. 7 Design parameter for recirculation flow type casing treatment on the meridional plane (Baseline)

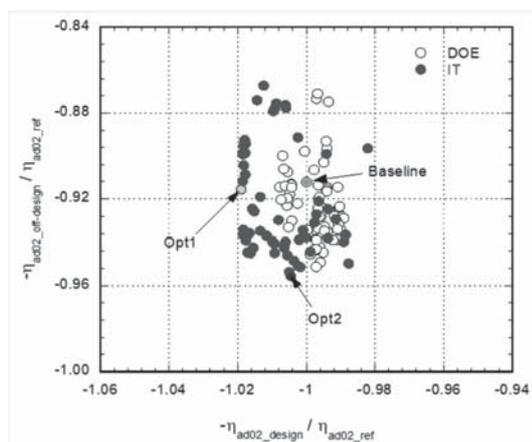


Fig. 8 Optimization result at two objectives space

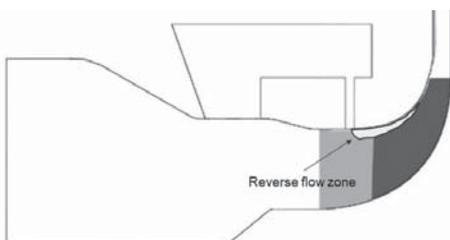


Fig. 9 Optimized design and 3D reverse flow zone projected on the meridional plane (Opt2)

最適化過程において探索した全ての形状はデータベースに保存されており、設計パラメータや流動特性が目的関数に対してどの程度感度を持っているかを整理することができる。Fig. 10は、循環流量が断熱効率に対する感度を調べたもので、循環流量比が0.3～0.4程度で最大効率を示している。すなわち、循環流量が少なすぎても、多すぎても効率は悪化し、最適循環流量比が存在するこ

とを示している。

以上のように、最適化過程で検討した個体について、設計パラメータの目的関数に対する感度を解析することで、流れ場の理解が進むとともに、設計ノウハウを蓄積することができる。

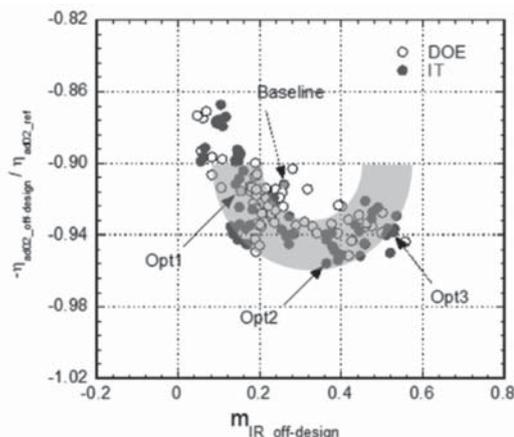


Fig. 10 Influence of the recirculation flow rate on the adiabatic efficiency (Off-design $G/G^* = 0.259$)

3. まとめ

人工神経回路網をメタモデルとし、遺伝的アルゴリズムにより全方位探索を実時間で実行できる多目的最適化システムを用いたターボ機械設計例を紹介した。ターボ機械設計は、従来の設計点流量のみで考えるだけでなく、非設計点における性能改善も強く求められている。非設計点流量では、翼の前縁やシュラウド壁面などでどうしてもはく離を伴う。多目的最適化設計は、非設計点流量での流れ場も同時に考慮でき、はく離流体をうまく利用しようと探索するところに新規性がある。設計者は人工知能が導こうとしている解を理解し、設計ノウハウや知見を高めることができるとともに、学生への教育的視点では、今後採用が進む人工知能との付き合い方を学ぶ良い機会を与えることができると考えている。

参考文献

- (1) 大林茂, 進化的計算法による空力設計の最適化, ターボ機械, Vol. 30, No. 5, (2002), 257.
- (2) Verstraete, T., Alsalihi, Z., Van den Braemvussche, R.A., 2010, Multidisciplinary Optimization of a Radial Compressor for Microgas Turbine Applications, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 132, 031004, pp. 1-7.
- (3) 坂口大作, 遠心送風機の二次流れ制御による運転流量範囲の拡大, ターボ機械, Vol. 40, No. 11, (2012), 10.
- (4) D. Sakaguchi, Min Thaw Tun, R. Numakura and B. T. Wang, Global Optimization of Recirculation Flow Type Casing Treatment in Centrifugal Compressors of Turbochargers, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 232 (24) 4461-4471 (2018).

自動車用マイクロガスタービン単体試験装置

Components and Assembly Test Bench for Automotive Micro Gas Turbine

江原 拓未*¹
EBARA Takumi

中川 正義*¹
NAKAGAWA Masayoshi

キーワード：マイクロガスタービン，自動制御，自動計測，コンポーネント試験，アセンブリ試験

Key Words：Micro Gas Turbine, Automatic Control, Automatic Measurements, Components Test, Assembly Test

1. はじめに

地球温暖化の大きな原因としてCO₂の排出が大きくクローズアップされており、指針となるパリ協定やSDGsへの対応が国をあげて行われている。自動車業界では、走行中のCO₂排出がない電気自動車の開発が進められてきているが、インフラ問題やバッテリー技術など課題も多い。そのため現在では、燃費効率が良いためCO₂削減への寄与も大きく、減税などの補助もあるハイブリット車の普及が加速している。ハイブリット車も各社様々な方式を出しており、日産自動車㈱のe-POWERに代表されるエンジン発電機で電気を作り電動モータを駆動する方式も注目をあびている。

従来のエンジン発電機より小型高出力化が期待でき、さらに、窒素酸化物や炭化水素などの排出の抑制面でも優位なガスタービンを、電動モータを駆動するエンジン発電機として採用する開発も進められており、丸和電機㈱（以下当社という）ではそのガスタービンを単体で評価する試験装置を供給している。

2. 概要および特徴

当社では航空機エンジンの技術を利用した小型カン型燃焼器の開発を長年行っており、この燃焼器によって自動車エンジンの排気条件を模擬したターボチャージャ性能・信頼性試験装置は当社の主力製品のひとつである。

ターボチャージャ試験装置の基本構成をFig. 1、外観図をFig. 2に示す。タービン上流側に配置した燃焼器に、流量調整弁により流量を制御した空気と燃料を供給する。燃料流量はタービン入口温度や空燃比をターゲットに制御される。空気、燃料や潤滑油などの各流路にはそれぞれ適切な流量計を設置している。圧縮機吐出側にはストールバルブが設けられ、圧縮機流量や圧縮比を変化させることでサージやチョーク特性を含む評価ができる。

原稿受付 2019年1月25日

* 1 丸和電機㈱
〒277-0814 柏市正連寺253
E-mail: sales@maruwa-denki.co.jp

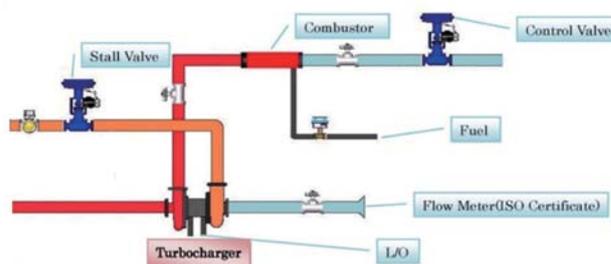


Fig. 1 Schematic Diagram of Turbocharger Test Rig

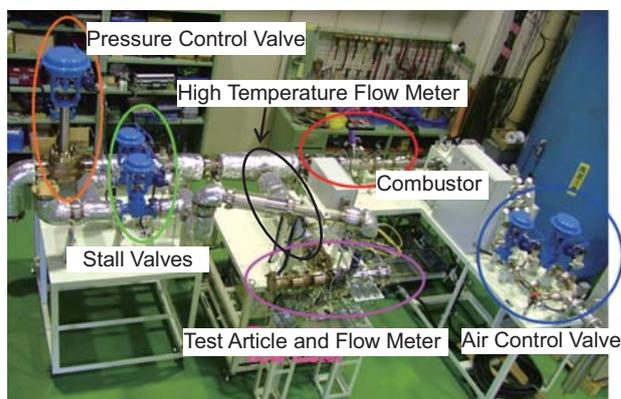


Fig. 2 Appearance of Test Rig

写真の装置は、燃焼ガスを抽気することでより広い作動範囲を実現することのできる仕様となっている。

ターボチャージャを取り付ける位置にガスタービンの回転コア部を置くことで、ガスタービンコア部の単体試験が可能になる。さらに、燃焼器を有したガスタービンも設置可能で、当社の燃焼器を用い、再生熱交換器を模擬した熱源として使うことも可能である。

ガスタービン単体試験装置は、当社のもう一方の主力製品である高速インバータを用いたモータ回転試験装置と組み合わせることで、タービン、圧縮機、燃焼器、軸受や発電機などのコンポーネント試験から、それらのアセンブリ試験まで行える装置として、当社の新たな主力製品となりつつある。

本装置のコアとなる燃焼器は複数の標準型式を用意しており、顧客の仕様に合わせた設計変更や調整を行い、必要に応じて複数の燃焼器を組み合わせることで様々な作動条件を実現することができる。Table 1に当社燃焼器の作動範囲の代表例を示す。

Table 1 Typical Specifications of Maruwa Combustor

タイプ	カン型	
型式	MEI-006 - 600 - 130	MEI-006 - 1100 - 350
容量	6.5 ~ 160 kW	75 ~ 450 kW
流量	10 ~ 130 g/s	100 ~ 350 g/s
圧力	100 ~ 400 kPaG	100 ~ 400 kPaG
温度	900 ~ 1300 K	1000 ~ 1400 K
燃料種	都市ガス	都市ガス

流量計については、JISB8330に基づいた吸い込みノズルやオリフィス式 (JISB8762) はもちろん、近年では渦式流量計 (JISZ8766) の採用も行っている。タービンや圧縮機周りは、温度と圧力を測定するためのプローブを設置し、センサを介して計測システムに接続される。温度、圧力共に全・静の両方またはどちらか一方を選択可能である。

3. 自動による高精度な制御と計測

当社では、タービンや圧縮機の空力性能評価および自動性能マッピングをはじめ、温度サイクルや低サイクルなどの疲労評価を自動的に高精度で実施可能なシステムを開発している。これらのソフトウェア開発は自社で行っており、装置の安全性も含めたトータル自動システムとして、顧客からの要望に合わせた様々なカスタマイズが可能となっている。

Fig. 3に運転画面を示す。タッチパネル方式になっており、直接運転パラメータを入力することができる。Fig. 4は自動運転パターンのスケジュールシートを示す。マイクロソフトエクセルベースで作成されており、本シートにて回転速度ごとの測定点数、定常状態での各種設定パラメータの変化率制限やサージ検出しきい値などを定義し、専用コントローラにアップロードすることで全自動制御および計測を可能とする。Fig. 5は、本機能によって自動計測された性能マッピングの一例である。



Fig. 3 Operating Screen

		タービン入口温度				タービン入口圧力			
No.	ステップ 上限時間[s]	静止時間 [s]	制御値 [°C]	変化率 [°C/s]	静止上下限 [°C]	詳細 パターン	制御対象	制御値	
10	1	300	5	400	5	5	1	タービン入口ガス流量[g/s]	40
11	2	300	5	400	5	5	1	タービン入口ガス流量[g/s]	60
12	3	300	60	400	5	5	1	マニュアル[°C]	15
13	4						1	マニュアル[°C]	
14	5						1	マニュアル[°C]	
15	6						1	マニュアル[°C]	

Fig. 4 Configuration Sheet of Test Mode

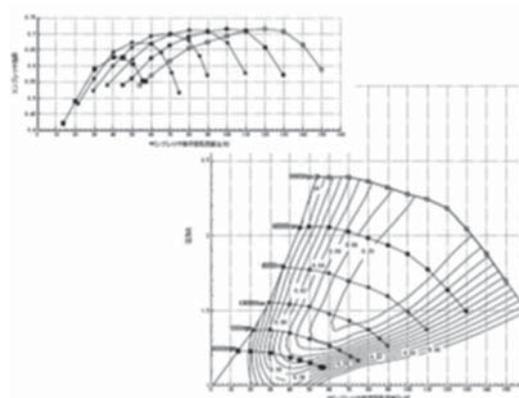


Fig. 5 Performance Map of Compressor

4. おわりに

1985年より製造、販売を行ってきた丸和電機ターボチャージャー性能・信頼性試験装置は多くの自動車関連会社様への納入実績と信頼性の面で高く評価いただいている。当社の持つ様々な独自技術により新たに実現したガスタービン単体試験装置がCO₂削減に貢献することを期待している。

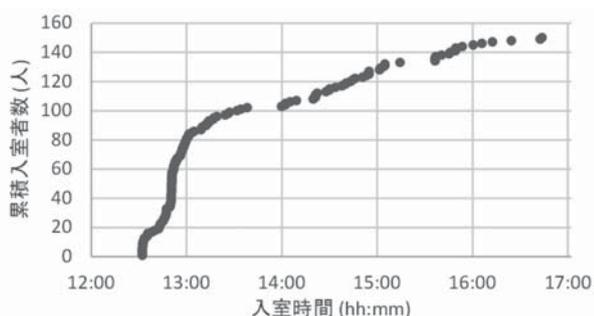
2018年度第3回ガスタービン市民フォーラム開催報告

福山 佳孝

FUKUYAMA Yoshitaka

東京ビッグサイトで開催された国際航空宇宙展2018東京 (JA2018TOKYO) [(一社) 日本航空宇宙工業会/ (株)東京ビッグサイト主催] で「ガスタービン市民フォーラム」を2018年11月30日、13:00～17:00に開催しました。JA2018 TOKYOは航空宇宙産業に関する大規模な展示会で、36か国と2つの地域から27,458名の参加者がありました。

JA2018 TOKYOでは展示会、商談会に加えて多数の講演会、セミナー等のイベントが開催され、「ガスタービン市民フォーラム」は100名着席可能な講義室を使用しました。下図は来室者の入室時間と累積入室者数の変化を示したものです(開場12:30、開演13:00)。講演開始前に既に80人以上、その後は聴講者の入替わりがあるものの、常時ほぼ満席で立ち見が出る状況でした。



下表のように業種では製造業関係者が半数、年代では20代～60歳以上の幅広い参加者に恵まれ、活発な質疑で盛り上がりました。

■業種	150	■年齢	133
1. 官公庁・公的団体・教育機関	21	1. 10代	0
2. 製造業	75	2. 20代	25
3. 航空輸送業	13	3. 30代	23
4. 商社・代理店	12	4. 40代	29
5. 学生	3	5. 50代	34
6. その他	19	6. 60歳以上	22
回答無し	7		

今回の「ガスタービン市民フォーラム」はBtoB (Business to business) 展示会での開催を考慮し以下のプログラムとしました。

- 1) (一財) 日本航空機エンジン協会, 陶山修二氏「日本の航空機エンジン産業と今後の展望」
- 2) (国研) 宇宙航空研究開発機構, 西澤敏雄氏「次世代

- 航空エンジンに向けた先進技術の研究と実証試験」
- 3) (国研) 物質・材料研究機構, 川岸京子氏「航空エンジン用Ni基超合金の開発」
- 4) (株)IHI, 谷光玄行氏「IHIの航空エンジン事業と技術開発, 将来展望」
- 5) YSECグループ 兼(株)山之内製作所, 山内慶次郎氏「新規参入のチャンスとゴールへの道のり (航空機産業の今後の展望)」
- 6) Aero-Edge(株), 次重彰人氏「タービンプレード量産事業における海外展開に関して」
- 7) (株)JALエンジニアリング, 萩川宏樹, 「JALにおける航空エンジン整備について」

陶山様からは日本のエンジン産業の誕生から将来までを俯瞰したお話を、西澤様、川岸様からは国研で推進されている次世代エンジン技術と高温部品に不可欠の超合金の開発状況を、谷光様からはIHIのエンジン開発の歴史と今後の事業展望を、山内様と次重様からは独自技術により航空エンジン事業の国際的な枠組に参入された経緯と今後を、萩川様からはエンジン整備事業をメーカーではなくユーザーの視点から見た、貴重な講演をしていただきました。

聴講者からの評価・関心は全ての講演に対して非常に高く、また、主催したガスタービン学会および学会活動のPRにもなったかと思えます。今後もこのような機会を有効に活用していきます。

最後に、講演をお引き受けいただき、内容が濃く、聴講者に有意義なお話をしていただきました講師の皆様、開催にご協力いただいたSJAC殿に深く感謝いたします。

(ガスタービン技術普及委員会 委員長)



講演会の様子 (JAEC陶山氏の御講演)

2018年度第2回若手技術者交流会報告

泰中 一樹

TAINAKA Kazuki

2018年12月7日(金)に、東京都港区赤坂の赤坂Bizタワー内HondaイノベーションラボTokyoにて、若手技術者交流会が開催された。この若手技術者交流会は、参加者個々の技術・研究レベルの向上と若手技術者・研究者の情報交換の促進を意図として、毎年2回開催されている。ガスタービン関連分野で今後中核的な存在として活躍が期待される若手技術者・研究者をメインターゲットにしており、第一線で活躍されている専門家による講義・講演と、参加者による自己紹介・ディスカッションを併せた企画内容となっている。今回は振動をテーマとして関東地区で開催した。メーカーの若手・中堅技術者や大学生、研究者26名(14団体)に参加いただき、幅広い交流が行われた。

初めに集会行事委員会の山本委員長より、本学会の行事を通じて様々な人と交流する機会を増やしていただきたいと開会の挨拶が行われ、参加者は業務の概要や関心のある話題、趣味等の話も交えながら自己紹介を行っていた。参加者の専門分野の知識を高め、同じ分野でのつながりも強めていきたいといったモチベーションが表れた自己紹介が多かった。

講義は、講師に松下修己氏(防衛大学校名誉教授)を招き、「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」をテーマとして講義いただいた。バランシングや振動試験の手法を具体例も交えながら紹介いただき、実務に役立つ知見の多い講義であった。また、磁気軸受ロータの振動制御に関する講義も行われ、安定性向上のための工夫について、説明があった。

講演は、メーカーからの実践的な技術開発の紹介として、國弘清隆氏(株式会社本田技術研究所)による「HF120ターボファンエンジン開発における振動評価」と題した講演をいただいた。米国連邦航空局から型式認証を得るまでのHF120ターボファンエンジンの技術開発について、振動問題に対する設計思想や取り組みをご紹介いただいた。若手技術者・研究者に対して、開発において人とのつながりが重要であったという話が印象的であった。

講義・講演の後に設けた質疑応答とディスカッションでは、技術・研究レベルの向上に対するモチベーションを基に、踏み込んだ質問や会場全体を巻き込んだ議論がなされていた。交流会終了後も参加者が集まり、議論したりしている様子から本交流会の意義を感じた。

交流会終了後は、会場にて懇親会が行われた。懇親会には、交流会出席者の多くが参加され、講師の方々にも出席いただいた。参加者相互の所属を越えた熱心な議論と情報交換が交流会に引き続き行われており、本会の開催趣旨のとおり、若手技術者間の有意義な場として活用いただけたと思う。

最後に、ご多忙中、講義、資料等の作成・準備にご尽力いただきました松下氏、國弘氏に感謝すると共に、先進的な研究開発拠点を会場として提供頂き、準備、運営に多大なご協力をいただきました株式会社本田技術研究所の関係各位に深く感謝致します。

(集会行事委員会委員)



講義風景



懇親会風景

第6回 日本ガスタービン学会女性参画推進イベント 開催報告

都留 智子
TSURU Tomoko

日本ガスタービン学会では、ガスタービンおよび関連技術に携わる女性技術者同士のネットワークと、共に成長していける場を提供することを主な目的として、2016年度から女性参画推進委員会の活動を続けています。

2018年度の2回目（通算で6回目）は、主に工学部で学ぶ女子学生にガスタービン業界への関心を高めてもらうため、ガスタービンに関わる仕事の内容や関わり方の多様性を紹介するイベントを企画しました。「ジェットエンジン/ガスタービンに関わる仕事とは」というテーマで、2018年12月10日(月)に東京理科大学葛飾キャンパスで開催しました。参加者は講師を含めて総勢22名で、学生だけでなく若手の社会人や男性の方にもご参加いただきました。

東京理科大学工学部では、10年程前から在籍する女子学生自身による工学分野の魅力を伝え理解を深めるための活動「cpeg」が行われており、先生方をはじめ大学側が積極的にサポートをされています。そこで、ガスタービン業界と学生の双方が情報共有できる場の一つとして、本イベントにご協力いただきました。

会は、冒頭にガスタービンについて全般的に紹介した後（写真1参照）、航空用や発電用といった製品の適用先業種、専門分野、キャリアの異なる7名の女性技術者がそれぞれの経歴や業務紹介を行い、グループディスカッション形式で参加者との意見交換が行われました（写真2）。業務内容に関わる技術的な話題だけでなく、仕事と家事・子育ての両立や、各自の所属組織におけるワークライフバランスへの取り組み方など、働き方に関しても活発な意見交換が行われました。

参加者からの感想として、「実際に活躍する女性技術者と具体的な話ができ、将来のイメージにつなげることができた」、「技術的な内容以外の話を聴いて良かった」、「育児等の制度（育休、短縮、在宅勤務など）を有効に活用している技術者が多く、却って女性が少ない職場の方が使える雰囲気があるのかもしれない」などの声をいただきました。生活・職場環境や年代は様々でしたが共感できる話題が多く、今回も盛会でした。短い時間でしたが、参加者の方々にとりまして有意義なイベントとなりましたら幸いです。

終了後は交流会の会場に移動し、忌憚のない意見を交わすとともに、参加者同士の交流を深めました。ガスタービン関連技術分野は女性が少数で、それぞれの所属する組織内ではネットワークが広がりにくい現状にありますが、ガスタービン学会を通じて所属組織の枠を超えたネットワークを広く提供するとともに、技術者を目指す学生の皆さんにもガスタービン業界への関心を上げられるような企画・検討を今後も進めて参ります。次回は、5月末頃に関西地区での開催を企画しております。皆様ふるってご参加ください。

最後に、本イベントの企画・準備、当日の案内まで親身に対応して下さいました東京理科大学の皆様へ厚く御礼申し上げます。（女性参画推進委員会委員長）



写真1 冒頭の様子



写真2 意見交換会の様子

第47回ガスタービンセミナー報告

吉田 征二
YOSHIDA Seiji

第47回ガスタービンセミナーが、「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」をテーマとして、2019年1月24日(木)、25日(金)の2日間にわたり、帝京大学 板橋キャンパスにおいて開催された。89名の方々に御参加いただき、活発な質疑応答が行われ、盛況の下に無事終了した。講師には、産業用ガスタービン、蒸気タービン、航空用ジェットエンジンに関わるメーカー、ユーザー、大学、研究機関の第一線でご活躍されている方々を迎え、12件のご講演をいただいた。以下に概略を報告する。

1日目は、「セッションⅠ：ユーザー運用技術」と「セッションⅡ：ガスタービン・蒸気タービンの最新技術」の二つのセッションが開催され、それぞれ3件の講演が行われた。1.「ガスタービン自家発電設備のユーザー運用技術の紹介」では、寺澤秀彰氏（東京ガス株式会社/日本ガスタービンユーザー会）が、日本ガスタービンユーザー会が蓄積してきた不具合事例の中から古典的不具合や老朽化対策などの事例を説明した。2.「航空機エンジンの整備作業深度の考え方について」では、三ヶ田一裕氏（株式会社JALエンジニアリング）が、エンジン整備の深度・間隔を決める要因や、近年用いられているモニタリング技術・予測解析技術を解説した。3.「発電用ガスタービン動翼の劣化評価」では、伊藤明洋氏（中部電力株式会社）が、実機使用後に取り出された第1段動翼の非破壊検査、クリーブ破断試験、メタル温度の推定について説明した。4.「Ni基耐熱合金の3D積層造形の現状と課題」では、筧幸次氏（首都大学東京）が、Ni基耐熱合金の積層造形材の高温強度の劣化の原因と特性改善のための対策を説明した。5.「地熱用蒸気タービンの最新動向」では、和泉栄氏（富士電機株式会社）が、日本や世界における地熱発電の現状と、耐食性向上やスケール対策などの最近の技術動向を説明した。6.「5MW級 M5Aガスタービンの開発」では、寺内晃司氏（川崎重工業株式会社）が、M5Aガスタービンの各コンポーネントに用いられている技術および開発の過程を説明した。

2日目は、「セッションⅢ：航空エンジンの最新技術」、「セッションⅣ：新燃料対応技術」、「セッションⅤ：新エネルギーシステム」の三つのセッションが開催され、それぞれ2件の講演が行われた。7.「将来の戦闘機用エンジンに向けた取り組みについて」では、及部朋紀氏（防衛装備庁航空装備研究所）が、将来の戦闘機用エ

ンジンの技術的成立性を地上実証するためのプロトタイプエンジンXF9-1の開発の経緯を説明した。8.「JAXAにおけるエンジン騒音低減技術の研究開発」では、石井達哉氏（(国研)宇宙航空研究開発機構）が、旧航空宇宙技術研究所の時代から行われているジェット騒音低減技術、吸音技術、音源探査技術を解説した。9.「アンモニア直接燃焼ガスタービンの研究開発」では、壹岐典彦氏（(国研)産業技術総合研究所）が、アンモニアを低NO_xで燃焼させるための燃焼器開発と、マイクロガスタービンを用いて行った実証試験について説明した。10.「水素焼きガスタービン開発の取り組み」では、柏原宏行氏（川崎重工業株式会社）が、水素を安定かつ低NO_xで燃焼させるための燃焼技術の開発およびガスタービン発電機を使用した実証試験について説明した。11.「超臨界CO₂流れのシミュレーション技術」では、山本悟氏（東北大学）が、臨界点近傍でのCO₂の特性と数値計算に必要な技術や問題点、数値計算例を説明した。12.「大崎クールジェンプロジェクト（酸素吹IGCC実証プロジェクト）の進捗状況」では、遠山克己氏（大崎クールジェン株式会社）が、石炭ガス化複合発電の実証試験の第1段階の実績と、CO₂分離回収設備を追加した第2段階の計画を説明した。

最後に、ご多忙中、貴重な内容をご発表いただきました講師の方々、会場の準備・運営に多大なご協力をいただきました帝京大学の関係者の方々、そしてご参加いただきました皆様に、厚く御礼を申し上げます。

(集会行事委員会委員)



講演風景

「公益社団法人日本ガスタービン学会 2018年度通常総会」 招集通知発送のお知らせ

正会員各位には当学会2018年度通常総会招集通知を3月末に発送いたします。
招集通知がお手元に届きましたら、内容をご確認のうえ、ご出席くださいますようお願い申し上げます。
なお、当日ご出席願えない場合は、書面またはインターネットによって議決権を行使することができますので、2019年4月14日(日)午後11時59分までに議決権を行使くださいますようお願い申し上げます。

(総会等の概要)

日 時： 2019年4月17日(水) 14:00～15:00

場 所： 東芝エネルギーシステムズ(株)本社 15階 1501会議室
神奈川県川崎市幸区堀川町72-34 ラゾーナ川崎東芝ビル

次 第： 公益社団法人日本ガスタービン学会 2018年度通常総会

総会終了後、名誉会員推薦状授与式、特別講演会、懇親会を開催いたします。



第32回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

学生および技術者（ガスタービン初心者）を対象とした標記シンポジウムを開催いたしますので、奮ってご参加ください。

1. 日時： 2019年7月18日(木)、19日(金)

2. 場所： (株)IHI 瑞穂工場（東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229）
昭島事務所（東京都昭島拜島町3975-18 IHI昭島ビル）

3. プログラム

- ・ガスタービン概論
- ・ガスタービンと流体力学／伝熱工学／燃焼工学／材料工学／制御工学
- ・特別講演（IHI）
- ・見学会： 瑞穂工場 航空エンジン生産設備（官学参加者）／IHIの航空機用ガスタービン技術の紹介・IHIそらの未来館（昭島事務所 1F）（メーカー参加者）

・懇親会

4. 募集概要

- ・対象者： 大学、大学院、高等専門学校在籍者、ならびにガスタービン初心者の社会人
- ・定員： 60名程度
- ・申し込み方法および詳細については本誌5月号およびホームページ（<http://www.gtsj.org/>）に掲載する予定です。

★今年度は、関西地区における教育シンポジウムは開催いたしません。

第47回日本ガスタービン学会定期講演会・講演募集

下記の日程で、第47回日本ガスタービン学会定期講演会を、北海道函館市で開催いたします。講演をご希望の方は、期日までに学会ホームページより講演の申し込みをお願いします。

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 2019年9月18日(水)、19日(木)
講演会場 函館アリーナ
 〒042-0932 北海道函館市湯川町1-32-2
<http://www.zaidan-hakodate.com/arena/>
 電話番号：0138-57-3141
見学会 2019年9月20日(金)

※ 会期中のご宿泊は各自で手配ください。

講演関連日程

講演申込締切 2019年5月17日(金)
 講演採否連絡 2019年6月21日(金)
 論文原稿締切 2019年7月29日(月)

募集講演

「研究報告」および「技術紹介」に関する講演を募集いたします。「研究報告」の対象は、ガスタービン及びエネルギー関連技術に関する未発表の研究とします。一部既発表部分を含む場合には未発表部分が主体となるものに限り、技術紹介は、既発表の研究のレビューや関連情報(例えば、試験設備、設備運転実績)の紹介などとなります。講演論文集では「研究報告」と「技術紹介」の別を明示いたします。

ガスタービン本体およびその構成要素、補機・付属品、補修技術、ガスタービンを含むシステムやユーザーの計画・運用および保守実績に関する講演、ターボチャージャー、蒸気タービンなどに関する講演に加え、ガスタービン関連の技術(材料、製造、溶射など)に関する講演も歓迎します。

講演時間

論文1件につき、講演15分、討論5分、合計20分です。

登壇者の資格

原則として、本会会員もしくは協賛団体会員に限り、(1人1題目の制限はありません。)

講演申込方法と採否の決定

学会ホームページ (<http://www.gtsj.org/>) で講演題目・著者・登壇者・概要(200文字以内)などを登録してください。講演申し込み後すぐに、受付完了をお知らせするEメールが自動返送されますので、申し込み内容

をご確認ください。学会ホームページからの申し込みができない場合には事務局にお知らせください。

締切後の申し込みは受け付けません。

講演採否は、6月21日(金)までにEメールで連絡します。

公益社団法人 日本ガスタービン学会事務局
 電話番号：03-3365-0095
 FAX番号：03-3365-0387
 Eメールアドレス：gtsj-office@gtsj.org

講演論文原稿の提出

講演会に先立ち、講演論文原稿をご提出いただきます。原稿は講演論文集原稿執筆要領(学会ホームページに掲載)に従って、A4用紙2~8ページで作成し、所定の講演論文原稿表紙を付して、期限までにEメールに添付した電子データ(PDF形式)として提出してください。原稿執筆要領および原稿表紙用紙は、講演採否の連絡時にお届けします。

技術論文としての学会誌への投稿

原稿執筆要領に記載の要件を満たす「研究報告」の講演原稿は、著者の希望により、講演会終了後に通常の技術論文として投稿されたものとして受理されます。技術論文としての投稿を希望される場合は、講演論文原稿提出時に原稿表紙の所定欄に希望ありと記入し、さらに技術論文原稿表紙、論文コピー2部を添付していただきます。詳細は原稿執筆要領をご覧ください。

日本ガスタービン学会学生優秀講演賞

学生による「研究報告」の内、特に優秀な発表に対して表彰を行います。表彰された発表に対しては表彰状および副賞が授与されます。エントリー希望者は、申込時に所定欄の「エントリーする」に印をつけてください。

学生講演会参加旅費支援

学生が登壇者として講演会に参加する際の旅費の一部を補助する予定です。申請方法や審査方法については、7月上旬までに学会ホームページなどでお知らせします。



函館奉行所(五稜郭)

2019年度第1回「ガスタービン市民フォーラム」開催のお知らせ

2019年度第1回ガスタービン市民フォーラムを下記の通り開催いたします。

ガスタービン市民フォーラムは、例年10,000人程度の参加者が訪れる宇宙航空研究開発機構（JAXA）調布航空宇宙センターの一般公開にて開催します。本講演では、ジェットエンジンの仕組みや活躍の場についてわかりやすくお話しします。お誘いあわせの上、多数ご来場いただければと存じます。

1. 日 時： 2019年4月21日(日) 10:15～10:45, 13:15～13:45の二回を予定。
JAXA一般公開は10:00開場16:00終了、入場無料です。
イベントの詳細はJAXAのホームページをご覧ください。
2. 場 所： 宇宙航空研究開発機構（JAXA）調布航空宇宙センター 講堂
3. 内 容： トークイベント：「ジェットエンジンのお話」
4. 講 師： 未定
5. 対 象： 一般の方（中学生以上が望ましい）
6. 参 加： 無料。直接講堂にお越しください。（定員200名／1回程度）



次号予告 日本ガスタービン学会誌2019年5月号 (Vol.47 No.3)

特集 さまざまな分野・製品で活用されている空力技術

論説・解説

巻頭言 加藤 千幸（東京大学）

圧縮機の巡回失速初生時およびサージ時における非定常流動現象のEFD/CFD解析 古川 雅人（九州大学）

航空機機体のストール・バフエット現象 浜本 滋, 郭 東潤, 中北 和之（JAXA）

遠心ブロワの高効率・広作動範囲化技術（仮題）塚本 和寛（日立製作所）

プラズマアクチュエータの風車応用と融雪技術への新たな試み 松田 寿（北海道科学大学）

感圧塗料を用いた振動翼面上の非定常圧力の計測（仮題）渡辺 紀徳（東京大学）

自動車空気力学 坪倉 誠（神戸大学）

自動車用ターボチャージャの高性能化 横山 隆雄（三菱重工業）

Super GT車両空力開発概要及び開発事例紹介 中井 祐輔（本田技術研究所）

東西南北地水火風

塩原 元哲（東京電力フュエル&パワー）

喫茶室

田沼 唯士（帝京大学）

※タイトル、執筆者は変更する可能性があります。

訂正

本誌前号（47巻1号）の記事におきまして、著者から以下の訂正依頼がありました。

47巻1号（2019年1月号）論説・解説

題目：我が国のエネルギー計画に基づくガスタービン開発と高負荷変動に対応するGTCCの課題

著者：渡辺和徳、高橋徹

訂正内容：9頁 左段13行目

（誤）西名古屋発電所において63.4% → （正）西名古屋火力発電所において63.08%

○ 本会協賛行事 ○

主催学協会	会合名	協賛	開催日	会場	詳細問合せ先
IMEchE (Institution of Mechanical Engineers)	International Conference on Turbochargers and Turbocharging Asia Pacific	協賛	2019/5/8-9	PARKROYAL on Beach Road, Singapore	URL:http://events.imeche.org/ ViewEvent?e=6810
日本鉄鋼協会	第237・238回西山記念技 術講座「先進エネルギー マネジメントの発展を 支える耐熱鋼開発」	協賛	2019/5/22, 5/29	5/22早稲田大学西早稲 田キャンパス63号館2 階会議室, 5/29(株)ラン ンテ3階会議室	URL:https://www.isij.or.jp/ mulq7ec0m
日本機械学会 関西支部	第361回講習会「構造・強 度設計における数値シミュ レーションの基礎と応用」	協賛	2019/5/28-29	大阪科学技術センター 8階 中ホール	URL:http://www.kansaijsme.or.jp/
日本エネルギー 学会	第28回日本エネルギー学 会大会	協賛	2019/8/7-8	関西大学千里山キャン パス	URL:http://www.jie.or.jp/publics/ index/673/



▷ 入会者名簿 ◁

〔正会員〕

小沢 寛二(IHI)

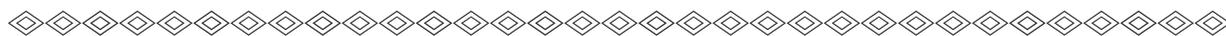
土屋 太郎(IHI)

南 希(東京大学)

吉田 真樹(本田技術研究所)

〔賛助会員〕

東洋炭素(株)



◇ 2019年度会費納入のお願い ◇

2019年度会費(2019年3月1日～2020年2月末日)の納入をお願いいたします。会費は、下記の通りとなっておりますので、2019年4月30日までにお納め下さいますようお願い申し上げます。

なお、口座自動振替をご利用の方は、2019年3月25日にご指定の口座よりお引き落としさせていただきます。

< 2019年度会費 (不課税) >

正会員	8,000円
正会員 (65歳以上*)	5,000円
学生会員	2,500円
賛助会員 1口	70,000円

(*2019年3月1日現在)

【納入先】

郵便振替： 00170-9-179578
銀行振込： みずほ銀行 新宿西口支店
普通預金口座 1703707

いずれも口座名は、
シャ) ニホンガスタービンガックイ です。
振込手数料は貴方にてご負担願います。

※会費の納入には、簡単・便利な口座自動振替をお勧め致します。自動振替をご利用されますと、振込手数料は学会負担となります。ご希望の方は巻末の「預金口座振替依頼書」にご記入の上、学会事務局までお送りください。

編集 後記

3月になっても寒い日が続く、暖かい日が待ち遠しく思うこの頃ですが、皆様はどのようにお過ごしでしょうか。私事になりますが、息子が大学受験をむかえやきもきとした日々を送っています。この号が出るころは、暖かい日差しの中、満開な桜を眺めつつ家族で喜びを分かち合っていることを期待しています。この時期同じような思いをされている会員の皆様も少なからずいることと思います。皆様におかれましても喜びの春であることを願っております。

さて、本3月号が平成最後の学会誌発行になります。振り返りますと、この30年余りの平成時代、140号余りを発行し、常に質の高い技術論文と最新技術の動向・情報を世に送り出しており、日本のガスタービンの発展に大きな貢献をしてきたと思っています。今回、節目の平成最後の発行に関わることができ、編集担当委員一同、大変光栄に思います。

今回はガスタービンのMRO (Maintenance, Repair, and Overhaul) ということで、特集号を組ませていただきました。巻頭言の藤山先生がご指摘されているように、ガスタービンを中心としたターボ機械を構成する各コンポーネント技術が成熟していく中、ターボ機械のライフサイクルでの信頼性向上、性能の最適化、またコスト低減に関して、MRO技術がますます重要になってきています。昨年6月に行われたASME TURBO EXPO 2018においても、MROに関する演題が基調講演として取り上げられ、多くの論文も発表されており注目されてきています。当学会誌においても国内OEM、ユーザー、サプライヤー、および研究者から広く募り、最新MRO技術動向を紹介したいと考えました。幸い、ユーザーお

よび国内OEMの研究者・技術者の方々から幅広い技術のご紹介があり、特集号としてまとめることができました。お忙しい中ご執筆いただいた方々およびご推薦していただいた関係各位には、大変感謝申し上げます。一方、研究機関から最先端の技術研究に関する記事を集められなかったことは、アソシエイトエディターとしての力量不足を痛感し、反省したいと思います。

新しい元号となりましても、引き続きガスタービンとその関連技術の革新と業界のますますの発展のために会員の皆様のさらなるご支援、ご協力をよろしくお願い申し上げます。

(田尻 敬次)

- 3月号アソシエイトエディター
田尻 敬次 (荏原エリオット)
- 3月号担当編集委員
阪井 直人 (川崎重工業)
馬場 勝 (IHI)
原 浩之 (三菱日立パワーシステムズ)

(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。

- ・「モニタリング技術を活用した航空機エンジンのメンテナンス」…………… (P.72 ~ 77)
- ・「産業用ガスタービンにおける予兆診断・修理技術」…………… (P.78 ~ 83)
- ・「ガスタービン高温部品の寿命延伸技術」…………… (P.90 ~ 95)

だより

事務局

今冬は例年よりも早い9月ごろにはインフルエンザの流行が聞こえてきましたが、花粉の飛散も暖冬の影響で例年より早いようです。PM2.5濃度上昇の影響もあり、振り返れば私自身一年の半分近い期間、使い捨てマスクが離せない生活をしているように思います。マスクの用途はそれらにとどまらず冬はちょっとした防寒対策にもなりますし、ものぐさゆえ「すっぴん」で近所のコンビニ等に出かけるときにも便利です。前の日にモリモリのニンニク料理を食べても電車で大きな口を開けて寝ても気付かれません(笑)。眼鏡が曇らないものや口元が汚れたら一枚めくれるマスクなど日本のものづくりにかける情熱や努力はさすがです。ただし清潔好きな我が国ならではの話、エコの観点からも使いすぎ捨てすぎにはご注意ください。

さておき平成最後の春は目の前、ご卒業、ご就職、人事異動の季節ですね。当学会は3月より新年度がスタートいたします。4月の通常総会に向けて事務局内も慌ただしく準備に追われております。正会員の皆様には毎年のごことご承知おきかと存じますが、通常総会招集通知が届きましたら議決権を行使していただきたく、期限までのご返信をよろしくお願いいたします。またお引越しや異動にともない学会にご登録いただいているご連絡先変更の際大変お忙しいなか恐縮ではございますがご一報お待ちしております。新年度は11月にIGTC2019TOKYOが開催されるため、今年の定期講演会(函館)は9月開催となります。講演募集の締め切りも例年より早めになりますのでよろしくお願いいたします。

(細川 真子)

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：03-5157-1277
 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.47 No.2 2019.3

発行日 2019年3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. 03-5157-1277 Fax. 03-5157-1273

©2019, 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製権センター（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2F
 TEL：03-3475-5618 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。