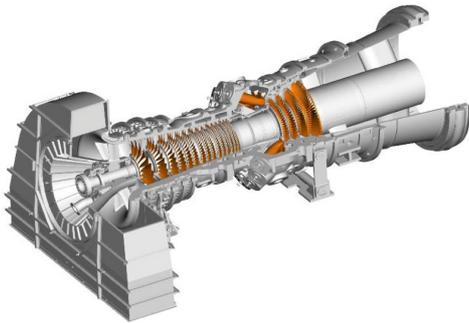


超高温ガスタービンの要素技術の開発

Key Technologies for Ultra High Temperature Gas Turbine



伊藤 栄作*1
Eisaku Ito

塚越 敬三*2
Keizo Tsukagoshi

正田 淳一郎*3
Junichiro Masada

石坂 浩一*4
Kouichi Ishizaka

斉藤 圭司郎*5
Keijiro Saitoh

鳥越 泰治*6
Taiji Torigoe

ガスタービン複合発電は、再生可能エネルギーや原子力発電と共存する最もクリーンで経済的な火力発電設備として、長期的な市場拡大が予想されている。現在、更なる高性能化を図るために 1700℃級ガスタービンの技術開発を国家プロジェクトとして実施しており、開発した最新技術の一部は、世界初の 1600℃級J形ガスタービンの開発にいち早く適用した。本稿では、次世代ガスタービンへの適用を目指した技術の事例も含めた開発状況について述べる。

1. はじめに

温室効果ガスの排出を抑制するために革新的な技術開発が重要となっており、天然ガス利用の高度化として超高温ガスタービンを用いた高効率火力発電技術の実用化を目指し、1700℃級ガスタービンの実用化に必要な要素技術開発を国家プロジェクトとして実施している。

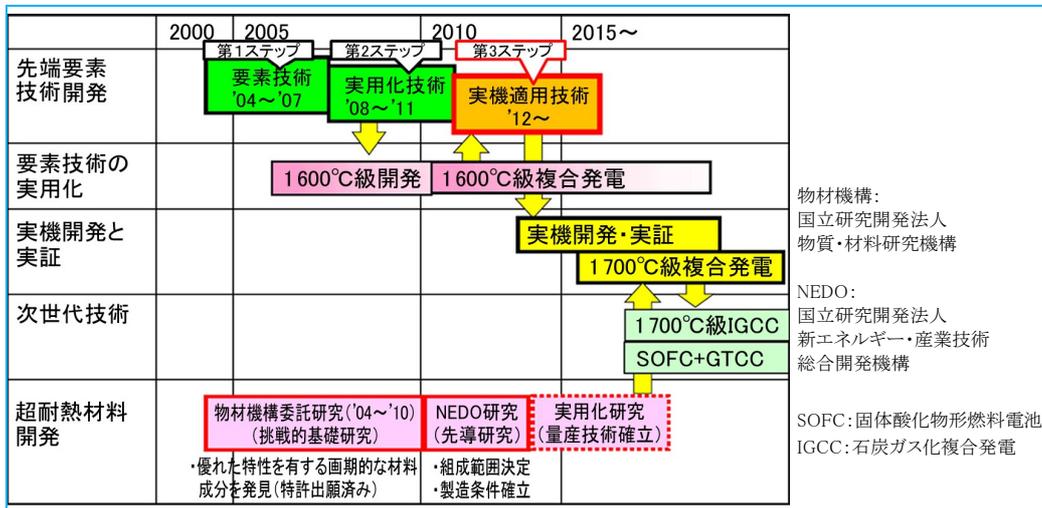


図1 超高温ガスタービンの技術開発ロードマップ

超高温ガスタービン実現のための技術開発ロードマップを図1に示す。これまで、1700℃級ガスタービンの6要素(遮蔽コーティング, 冷却技術, 燃焼器, タービン, 圧縮機, 耐熱材料)の技術開発を目指した第1ステップ(2004~2007年)と、実用化を目指した第2ステップ(2008~2011年)

*1 技術統括本部総合研究所流体研究部 部長 工博
 *2 三菱日立パワーシステムズ(株) ガスタービン技術本部 技監・技師長
 *3 三菱日立パワーシステムズ(株) ガスタービン技術本部 副本部長
 *4 技術統括本部総合研究所 主席プロジェクト統括 工博
 *5 技術統括本部総合研究所燃焼研究部 室長 技術士(機械部門)
 *6 技術統括本部総合研究所材料研究部 主席研究員 工博, 技術士(金属部門)

で技術開発を行ってきた。本プロジェクトで得られた成果は、1600℃級J形ガスタービンの開発に反映している。現在も第3ステップとして、**図2**に示すように、実機開発と製造・試運転に向け開発要素を10項目以上に増やし、技術開発を継続して実施中である。本稿ではこのうち、幾つかの事例(図2で示す8項目)について、開発の状況とこれまでに得られた成果を紹介する。

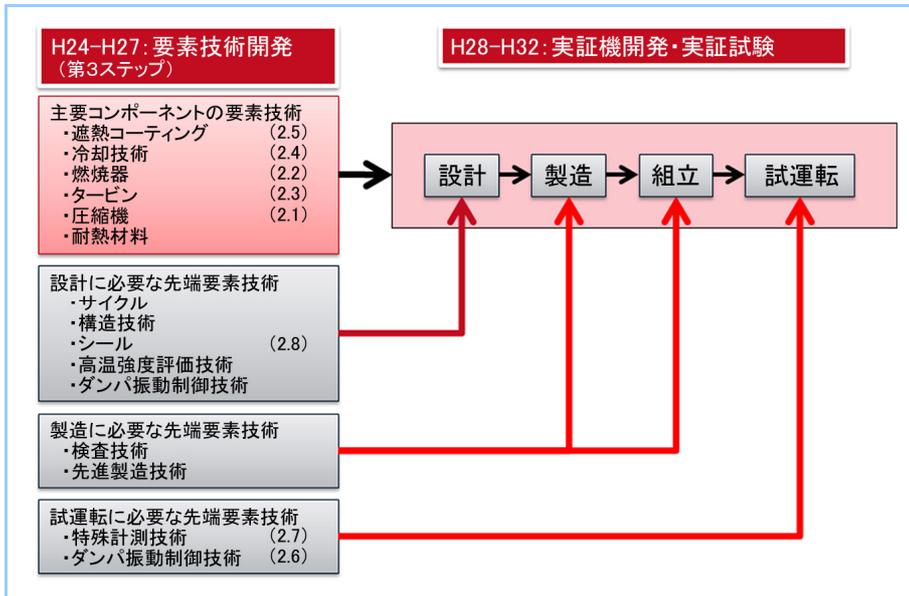


図2 超高温ガスタービンの開発要素

2. 超高温ガスタービンの要素技術

2.1 境界層制御高性能圧縮機の開発

1700℃級ガスタービン圧縮機では、タービン入口温度の上昇に伴うサイクル効率最適化のため、高圧力比化が必要となる。この高圧力比化を従来機並みの段数、軸長で実現するためには圧縮機翼列の高負荷化が必要となり、境界層の発達による損失の増加、サージマージンの低下、起動安定性の低下に繋がる懸念がある。従って、高圧力比化と高性能・高信頼性を両立するため、細部までを模擬した全段の数値流動解析による三次元翼形状の最適化や運用方法の最適化を検討後、スケールモデル圧縮機による検証により改善効果を確認する必要がある。

従来の検証試験は3段又は4段の圧縮機にて実施していたが、多段圧縮機中のエンドウォール境界層の発達を考慮した翼形状変更による改善効果の検証のため、前方8段を模擬したスケールモデル圧縮機を製作中である(図3)。本試験設備は可変静翼機構や抽気室を有しており、性能改善効果の確認に加え、起動時の旋回失速等の不安定現象の抑制検証も実施する計画である。



図3 前方8段圧縮機試験装置概要

2.2 燃焼器の非定常性評価技術

サイクル効率の向上のためにはタービン入口温度の上昇が有効な手法の一つであるが、NO_x 排出量増加という相反する事象が存在する。低 NO_x 化に対しては希薄予混合燃焼方式が有効であるが、予混合燃焼では火炎位置が安定せず、発熱変動等に起因した燃焼振動が発生する傾向がある。そのため、予混合燃焼器の開発では、予混合ガスの希薄化、均一化による低 NO_x 化に加え、燃焼振動の抑制も大きな設計課題となっており、実燃焼器の燃焼振動評価技術として、非接触光学計測手法の一つである OH-PLIF 法(OH 平面レーザ誘起蛍光法)による火炎可視化とそれを用いた評価手法の技術開発を進めている。実機スケールの燃焼器を用いた大気圧燃焼試験にて火炎の可視化計測を実施し、同時に計測した圧力変動の位相に対する火炎変動を評価した。

図4に試験装置概略と計測例を、図5に計測により得られた火炎画像を示す。図中に示したレイリーインデックス(図中 R)は燃焼振動による圧力変動と火炎変動の相関を示しており、赤色の領域は燃焼振動を駆動する領域に対応する。本結果により、燃焼振動が大きな条件で燃焼振動を駆動する不安定燃焼領域を特定することができた⁽¹⁾。本評価技術を活用し、燃焼振動の発生原因の解明を進めている。

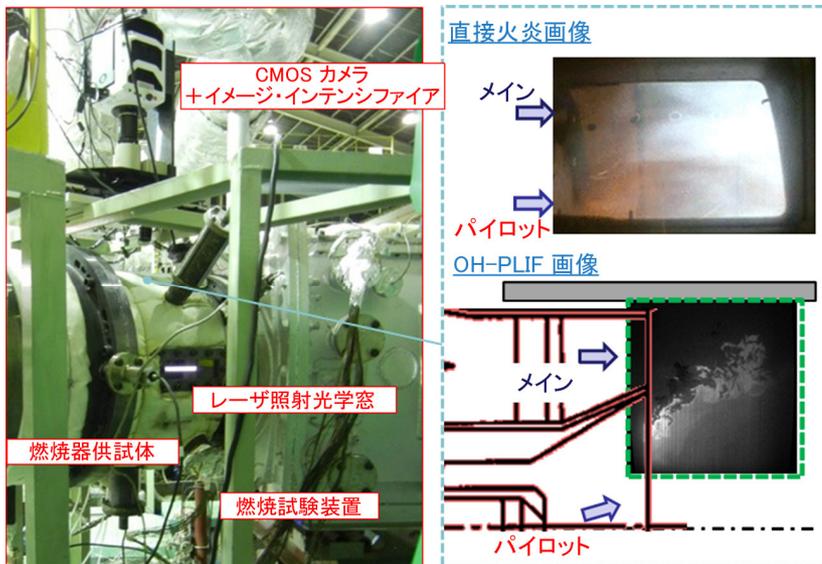


図4 試験装置と計測例

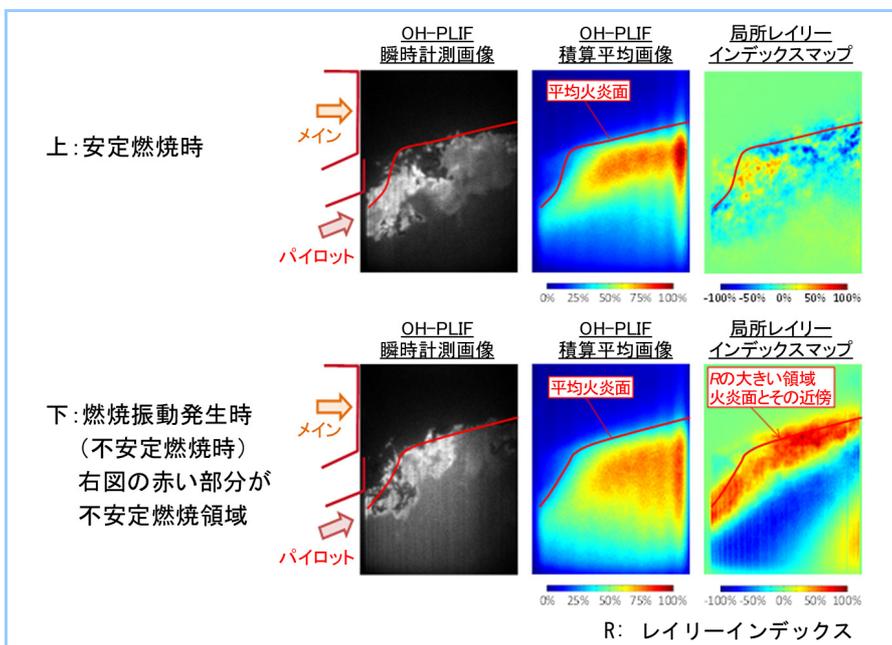


図5 実燃焼器におけるレーザによる火炎計測結果

2.3 タービン排気ディフューザの性能向上

排気ディフューザは、下流方向へ流路面積が拡大し、これにより流れが減速し、静圧が回復する。その結果、最終段動翼出口の静圧は大気圧より低い状態となり、実質的なタービン部での圧力比(膨張比)、及び出力が増加することで、タービン効率を向上させる効果がある。しかし、排気ディフューザ部は減速流れであるため流れの剥離等が生じやすく、高性能なディフューザの形状設計のためには、ディフューザ内流れを正確に予測する技術が必要である。そこで三菱重工業(株)総合研究所では、先進の大規模流動解析(図6)を排気ディフューザの流路形状設計に適用し、タービン・ディフューザの内部流動を一体最適化した。これにより、排気ディフューザ内部流れの剥離を抑制しつつ、従来以上の排気流速低減(静圧回復)を可能とし、大幅な性能向上を実現した。本技術は、ディフューザ試験(図7)の詳細な流動計測により有効性を確認し、J形ガスタービンのタービン翼及び排気ディフューザの設計に適用している。

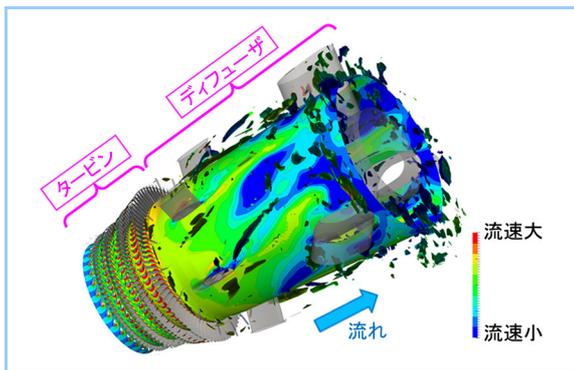


図6 排気ディフューザ内部流れの大規模流動解析

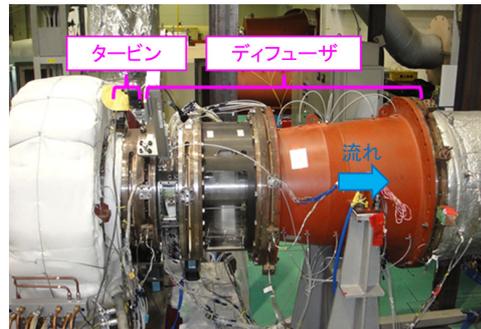


図7 排気ディフューザ試験装置

2.4 タービン熱伝達率計測の最新手法

タービン翼の冷却設計には、熱伝達率の正確な面分布データが必要である。従来は、薄膜ヒータと熱電対を用いて熱伝達率を計測(定常法)してきた。定常法は、点計測、高コストである他、計測準備に長い期間を要するというデメリットがあった。そこで、主流加熱ヒータと赤外線カメラを組み合わせることで、熱伝達率の面分布を、低コストかつ短い準備期間で計測できる技術(非定常法)を開発した。非定常法では、主流をステップ的に加熱し、加熱に伴う供試体部の表面温度変化を赤外線カメラで計測することで、熱伝達率の面分布を取得できる(図8)。

図9に、定常法と非定常法による熱伝達率計測結果の比較を示す。定常法と比較して同等の計測結果が得られており、非定常法の有効性が確認できた⁽²⁾。本計測技術を用いた熱伝達率の面分布取得により、局所的な熱負荷に応じた冷却設計が可能となり、冷却空気削減による性能向上に貢献する。

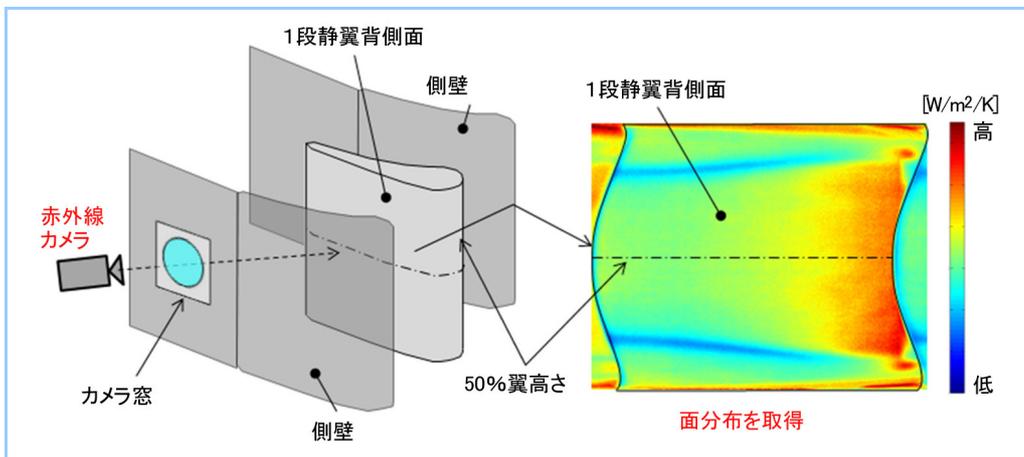


図8 非定常法による熱伝達率計測例(タービン静翼背側面)

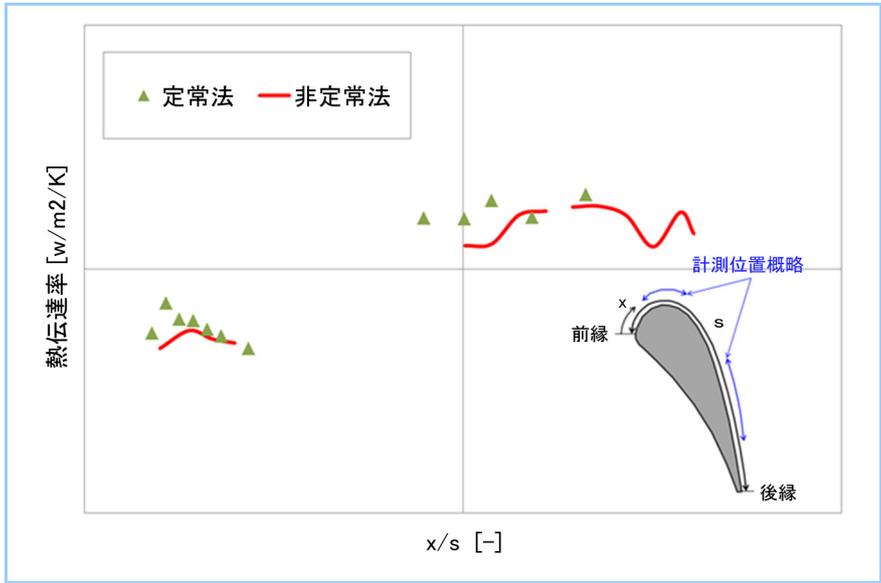


図9 定常法と非定常法の熱伝達率計測結果比較
(タービン静翼背側面, 50%翼高さ位置)

2.5 先進遮熱コーティングの開発

先進遮熱コーティング(TBC:Thermal Barrier Coating)では、三菱重工業(株)総合研究所で開発した電子構造に基づく材料計算システムを適用することにより、従来の試行錯誤的な開発手法と異なり、理論的・解析的に、低熱伝導で、高温安定性に優れる候補材を探索・選定した。抽出したセラミック材料は、溶射粉末の製造技術を開発の上、溶射施工技術の開発を実施した。溶射中の粒子の速度分布や温度分布は TBC のマイクロ組織に影響を及ぼすことから、これらを計測し、遮熱効果、耐久性に加え、高温エロージョン特性の評価試験装置を開発・活用⁽³⁾し、これら各種特性のバランスのとれた先進 TBC 用の成膜条件を選定した(図 10)。さらに、ロボットシミュレーションを活用することで、複雑形状である実翼形状でも、均質で、かつ良好な膜厚分布となる溶射施工プログラムを開発した。これら一連の研究開発により得られた遮熱性、耐久性、耐エロージョン性を有する先進 TBC は、2011 年から三菱日立パワーシステムズ(株)(MHPS)高砂工場内に設置されている実証発電設備(T地点)の 1600℃級 M501J形ガスタービンに適用された。10000 時間を超える長期運転後、各部の健全性を確認すべく2013年3月に大規模な検査が行われ、実機運転環境でも先進 TBC は良好な遮熱性と信頼性を有することが確認⁽³⁾された(図 11)。

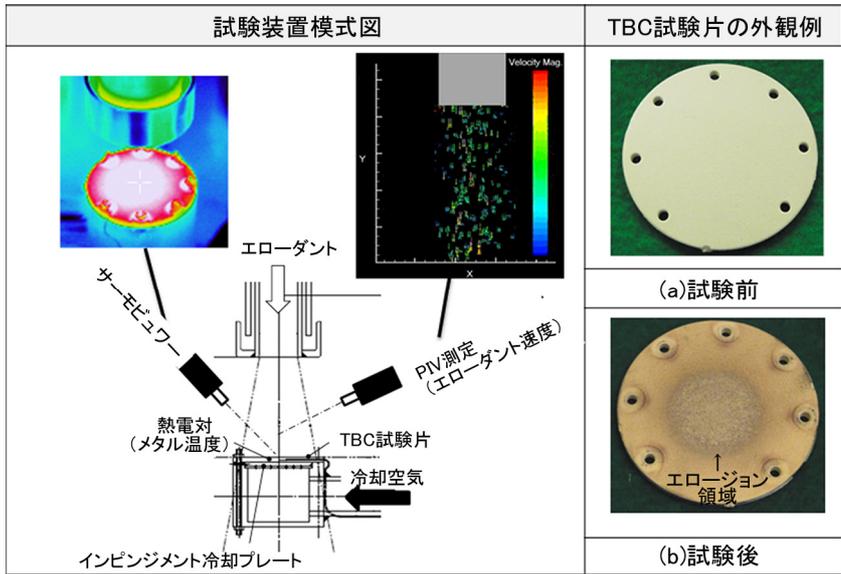


図 10 TBC の高温エロージョン試験装置



図 11 T地点 M501J形点検結果(2013年3月)

2.6 タービン動翼の振動特性予測解析技術

1700℃級超高温ガスタービンにおいては、タービン翼が高温ガスから受ける流体力が増大し、振動強度的に一層厳しい条件となるため、翼振動特性評価技術はこれまで以上に重要となる。タービン動翼は、翼とシールピン間の摩擦により減衰を得るシールピンダンパ構造翼を採用しており、この振動特性を精度良く予測することが信頼性向上の鍵となる。このため、マイクロ接触とマクロ接触を組み合わせた接触長さ率という考え方を導入し、ミンドリン理論、ヘルツ接触理論と合わせてシールピンの剛性を推定することで、翼とシールピン間の摩擦による接触状態を考慮した予測解析技術の開発、検証を進めている(図 12)。

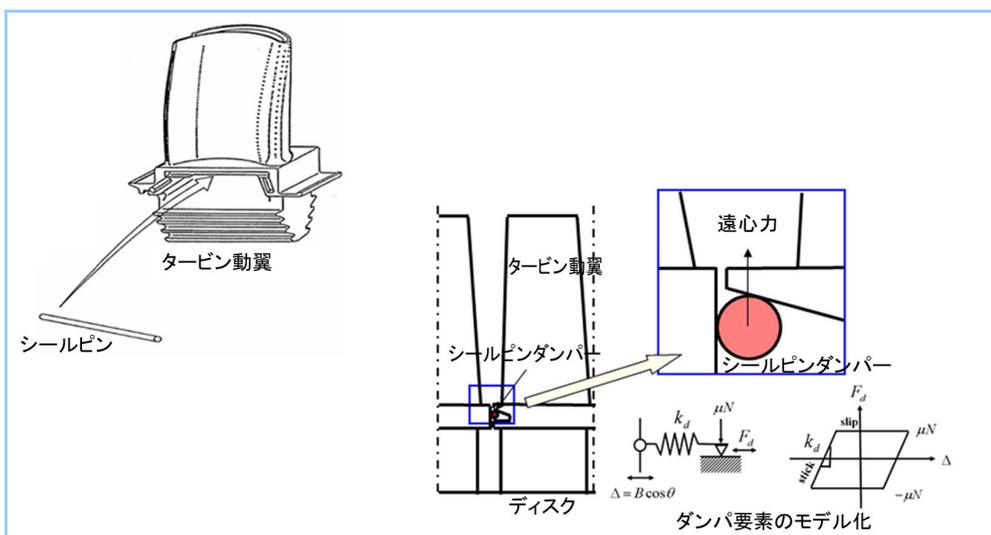


図 12 シールピンダンパ翼の振動特性予測

また、回転している動翼の翼面上の圧力変動を詳細計測し、動翼-静翼間の翼列干渉効果により生じる動翼の励振力(動翼に加わる加振力)の発生メカニズムを考察・評価することで、CFDによる翼列干渉応答の予測精度向上に取り組んでいる。最新の CFD コードにより、動翼翼面の圧力変動による励振力の振幅と位相を精度良く予測できるようになっている(図 13)。

2.7 ガスタービン開発を支える特殊計測技術

T地点における実機検証試験では開発要素の設計の妥当性や信頼性の確認を行っており、最も過酷な運転環境下にさらされるタービン1段動翼には高温特殊計測技術を適用し、貴重な実機データの取得を行っている。その代表例が、パイロメータ、チップクリアランス計測、非接触翼振動計測である。高温用パイロメータはタービン1段動翼の表面温度を計測することでフィルム冷却効果の確認を可能としており、また、高温用クリアランス計測技術は、タービン1段動翼とケーシング間の非定常過渡期のクリアランス挙動を把握し、ガスタービンの性能向上に役立っている。また近年では高温用非接触翼振動計測技術を開発し、実機環境下におけるタービン1段動翼全翼の振動特性のばらつき評価が可能となりつつあり、タービン1段動翼の振動強度評価の一助となっている(図 14)。

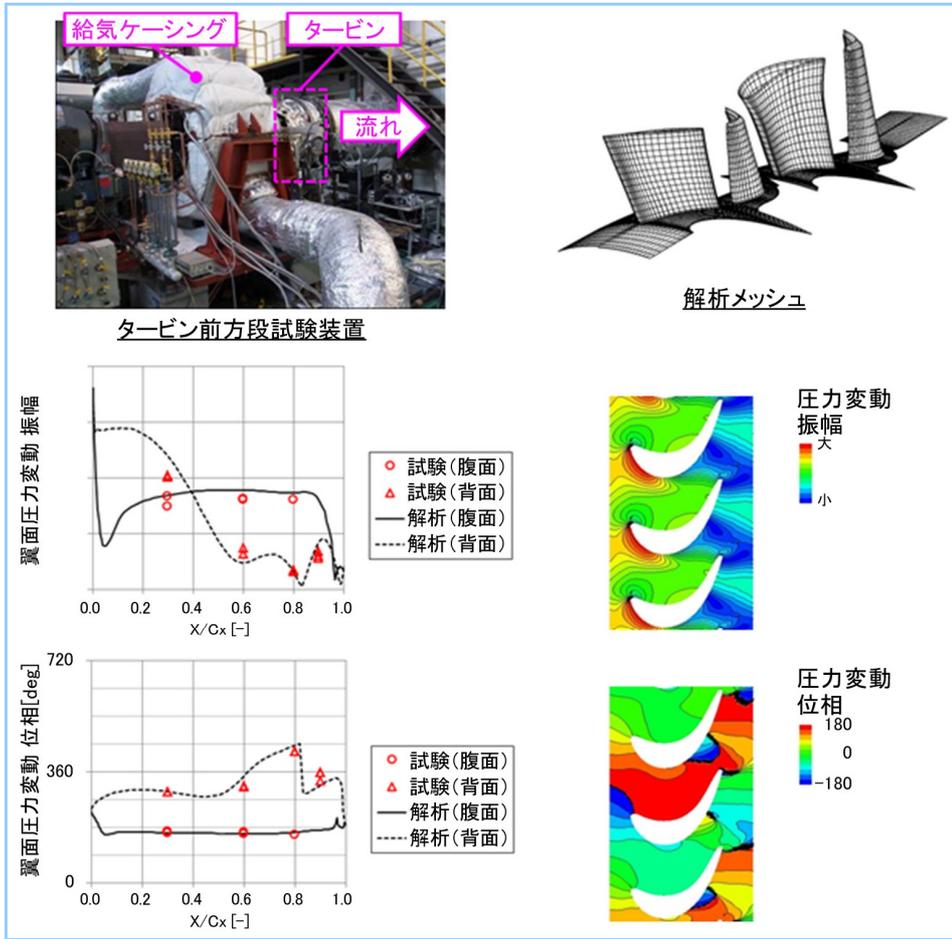


図 13 翼列干渉励振力の予測精度向上

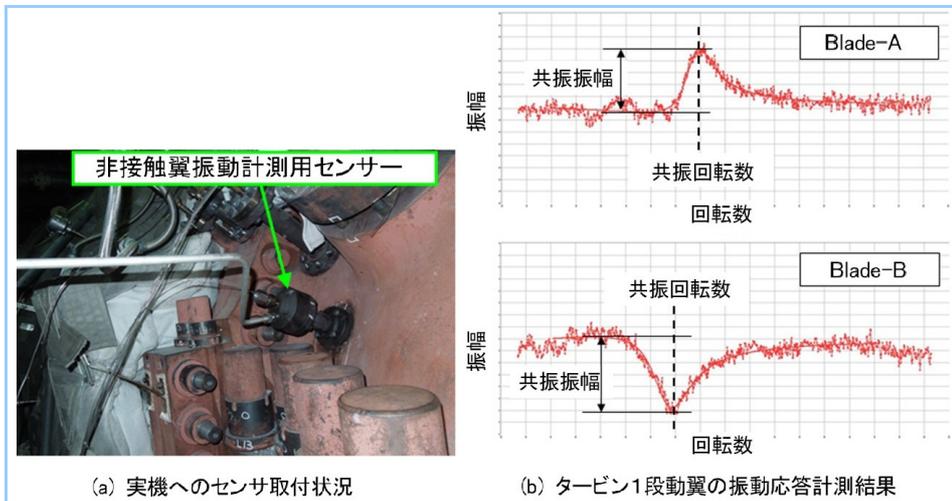


図 14 高温用非接触翼振動計測技術の実機適用例

2.8 高性能シールの開発

1700℃級ガスタービンでは高温化に伴って構成部品の熱変形は大きくなる。特に高温化でその重要度が高まる冷却空気系統の各部で用いられるシールには、熱変形に伴う過渡的なクリアランス変化への追従性が求められる。高性能シールの開発では、このようなクリアランス変化への追従性とシール性能及び耐久性を有するシールとして、リーフシールの適用性評価を進めている。リーフシールは薄板を周方向に多層配置した柔な構造によりクリアランス変形に追従し、動圧及び差圧による浮上力を利用してロータと非接触化することで長期のシール性能を確保する。本開発では、高性能シール特性試験装置を用いてクリアランス変化に対するシール特性データを取得し、従来より広範囲なクリアランス変化に対して高い追従性とシール性能を有するリーフシールの設計指針が得られている(図 15, 図 16)。

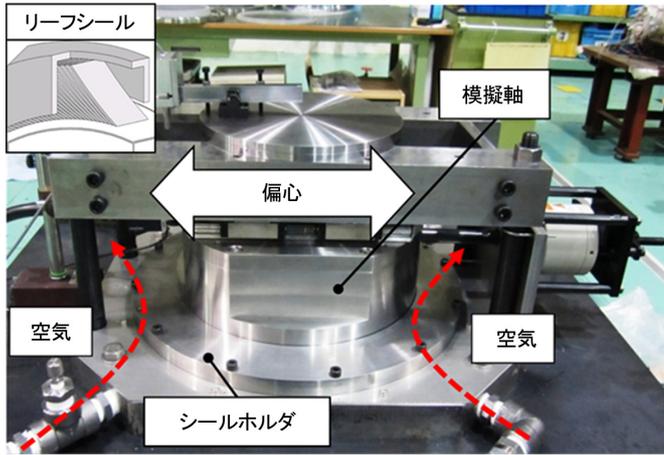


図 15 高性能シール特性試験装置

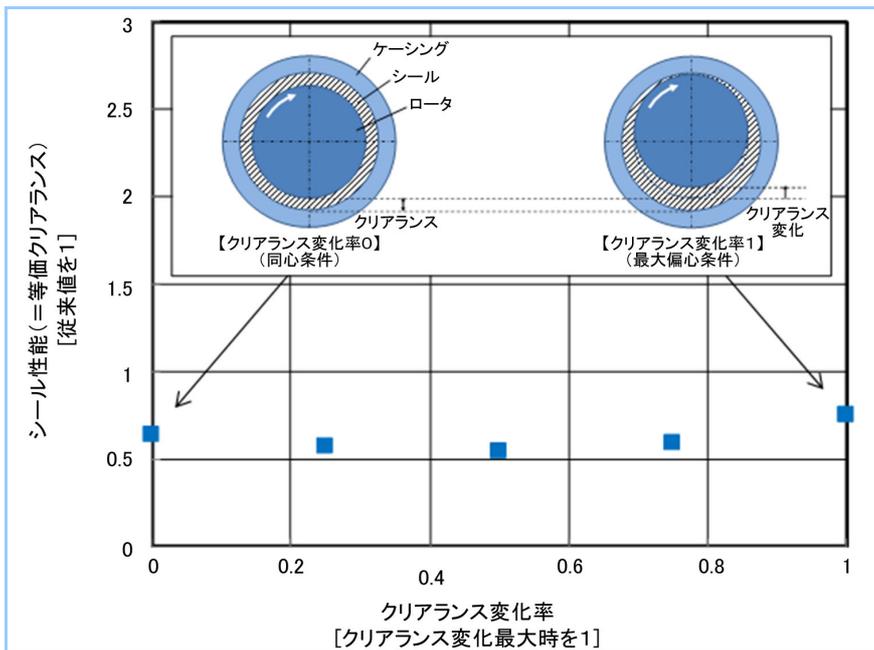


図 16 高性能シール特性試験データ(例)

3. まとめ

本稿に記載した内容は、経済産業省の“1700℃級ガスタービン技術実証事業”として実施中の研究開発の一部である。1700℃級ガスタービンの技術開発では、実用化に必要な要素技術の開発と実証を目指した実機適用技術の開発を実施中であり、技術検討や検証を経て、性能向上や信頼性向上に対して有効性が確認された最新技術の一部は1600℃級J形ガスタービンに随時適用している。同時に、得られた長期運用データを研究内容に反映することにより、開発した技術の信頼性向上を図っている。これらの最新の複合発電技術の普及を通じて、火力発電所のCO₂削減に大きく貢献する所存である。

参考文献

- (1) 木村勇一朗ほか, ガスタービン燃焼器内の火炎変動可視化技術の開発, ガスタービン定期講演会講演論文集(41), (2013), p.313-318
- (2) Satoshi Mizukami et al., Practical Use of the Heat Transfer Coefficient Measurement Technique Using a Heater Mesh and the Infrared Camera, ACGT(2014-098), p.1-p.4,
- (3) 由里雅則ほか, 1600℃級J形技術を適用した発電用高効率ガスタービンの開発, 三菱重工技報 Vol.50 No.3 (2013)
- (4) H. KITAGAWA et. al., "Evaluation of Pressure Fluctuation on Turbine Blades with Upstream Vanes Interaction", ACGT2014-090