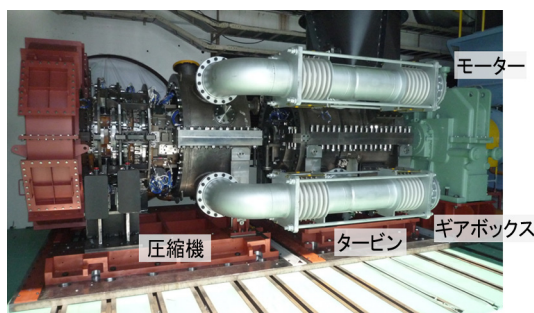


多段軸流圧縮機性能向上検証のための 実験計測技術の開発

Development of Measurement Method for Verification of
Improved Performance Multi Stage Axial Compressor



山下 知志*¹
Satoshi Yamashita

三戸 良介*²
Ryosuke Mito

奥 菌 昌光*³
Masamitsu Okuzono

上野 真次*¹
Shinji Ueno

ガスタービン発電はクリーンで経済的な発電設備であり、近年の自然エネルギーの利用拡大に伴い、ベースロードのみならず電力需要の変動に追従する発電設備として、その重要性が増している。当社では、ガスタービン効率の更なる向上を目指し、1700℃級ガスタービンの要素技術の開発を(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業として実施している。1700℃級ガスタービン用軸流圧縮機では、ガスタービンサイクル効率向上のために圧力比の上昇と性能向上、ならびに運用範囲拡大のための安定作動範囲の確保が必要である。これらの圧縮機性能の検証のため、8段の段数を有するモデル圧縮機試験装置を開発した。本稿では、当該補助事業にて開発した試験設備と、金属3Dプリンタを適用した計測技術の開発状況について述べる。

1. はじめに

ガスタービンは、温室効果ガス排出量の低減のために更なる効率向上が求められている。また近年の自然エネルギーの利用拡大に伴い、電力需要の変動に追従した運用性拡大が必要である⁽¹⁾。ガスタービン圧縮機においても、圧縮機効率の向上、圧力比の増加、運用範囲の拡大が必要であり、研究開発を進めている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

当社では1700℃級ガスタービンの要素技術の開発を、経済産業省の補助事業として2004年度から2015年度まで実施し、2016年度からはNEDOの事業として継続して実施しており、新技術の開発を行っている⁽⁵⁾。開発した新技術の効果を実機適用前に検証し、1700℃級ガスタービン設計へと反映するため、8段の段数を有する軸流圧縮機試験設備を開発した。圧縮機性能向上の為には内部流動の詳細把握が重要であり、これまでも試験機を用いた内部流動詳細計測を行っている。従来の計測手法では、計測器自身の影響で流れ場を乱す懸念があったため、内部流動への影響を最小限とするために金属3Dプリンタを用いた計測手法を開発した。近年、3Dプリンタ技術が急速に発展しており、産業用ガスタービンの分野においても適用が進んでいる。樹脂製3Dプリンタについては、開発リードタイムの削減のため、主に製造分野において、設計段階での加工性、及び組立性の確認や、加工用の治具としての適用がある⁽⁶⁾⁽⁷⁾。金属3Dプリンタについても、ガスタービン部品としての適用に向けた研究開発を進めており、金属3Dプリンタと機械加工を併用し、翼内部に計測用の通路を配置した圧縮機計測翼を開発した。3Dプリンタ計測翼を圧縮機試験に適用し、実機と同等の温度、圧力条件下で圧縮機内部流れ場の詳細計測を行った。

実機を忠実に模擬した8段の圧縮機を用いて、実機の運転前にサージ試験を実施し、運用範

*1 総合研究所流体研究部

*2 総合研究所流体研究部 主席研究員

*3 三菱日立パワーシステムズ(株) タービン開発統括本部 ガスタービン開発部

囲の検証による健全性確認を行った。また、実機では実施不可能な圧縮機内部流動の詳細計測を行い、コンピュータによるシミュレーション(CFD: Computational Fluid Dynamics)の予測精度検証を行った。本稿にて、その内容を紹介する。

2. 多段軸流圧縮機試験設備の開発

2.1 背景

ガスタービンの主要コンポーネントである軸流圧縮機は、内部で複数の翼が高速回転しながら空気を圧縮するターボ機械であり、内部では複雑かつ非定常的な流れ場が発生している。1700℃級ガスタービン用圧縮機には、サイクル効率の向上のために圧力比の上昇が求められている。圧力比の上昇により、境界層の発達に伴う損失拡大、逆流、剥離等の発生による安定作動範囲の減少、起動特性の悪化が懸念される。境界層の発達や逆流、剥離等の発生を抑制し、圧力比の増加と効率向上、安定作動範囲の拡大、起動特性の改善を両立するため、圧縮機の新技術の開発が必要である。新技術を実機適用前に事前に検証し、さらには実機設計へと反映するため、8段の段数を有する軸流圧縮機試験装置を開発した。

2.2 多段軸流圧縮機試験設備

軸流圧縮機内部では、下流段では端壁部の境界層が発達しブロッキングとなる。また圧縮機内部では、翼列干渉、クロッキング(各段の静翼取付位置の周方向差)など多段の影響で、複雑な流れ場を呈している。従来、圧縮機の検証試験には、ある範囲の段数を抽出してスケール倍した小型の試験装置が用いられる。当社においても、これまで3段、及び、4段の圧縮機試験装置を製作し検証試験を実施してきたが、上流段の影響が特に大きくなると考えられる中後方段の検証を行うためには、より多段の試験機での検証試験が必要である。多段の条件での内部流動の詳細把握と効率向上量の検証を実施するため、8段の段数を有する試験設備を製作した(図1、表1)。



図1 8段圧縮機ローター

表1 圧縮機仕様

段数	IGV+8段 (IGV, 1~3段静翼は可変)
圧力比	7.14
回転数	14400 [rpm]
必要動力	9100 [kW]

実機の空力性能検証試験を実施するに当たり、動翼チップクリアランス等の隙間は実機のスケール倍とする必要があるため、組立性を考慮しスケール比は極力大きくした。また計測を容易にするためにも、スケール比は大きくすることが望ましい。組立性、計測の容易性からスケール比を決定すると、圧縮機の動力は約9MWとなった。既存モーターの出力上限が4MWであるため、圧縮機下流に空気タービンを直結し、不足分の5MWの動力を回収することでモーターパワーをアシストした(図2、表2)。タービンの1段静翼は可変機構を有しており、電動アクチュエータで駆動し静翼の角度を変更する。タービンの1段静翼のスロート面積を変更することで圧縮機吐出圧を調整し、圧縮機の試験条件を設定することができる。

圧縮機の入口案内翼(IGV)と1~3段静翼は可変静翼とし、各々独立したアクチュエータで角度を変更する。圧縮機のフローパス途中には抽気を有しており、可変静翼と合わせて起動特性を検証し、起動スケジュールの最適化を行うことが可能である。また圧縮機吐出側のチャンバーには緊急用の放風弁を配置しており、圧縮機に取り付けた圧力センサーによりサージ発生を検知

すると、自動的に瞬時に放風弁を開くことで圧縮機をサージ状態から解放する。これにより、圧縮機のサージ裕度検証試験を、設備の損傷なく安全に実施することができる。

これらのバルブ、可変静翼、及び回転数の制御には、当社の実機プラントの制御に用いられるものと同様の制御装置を適用し、コンピュータ制御を行う。事前にプログラミングした運転スケジュールに従って自動運転制御することで、容易に試験条件の設定を行うことができ、1700℃級ガスタービン圧縮機の運転条件を忠実に模擬した試験を実施することが可能である。更に制御装置では、試験機の各部位の空気温度、空気圧力、軸振動等の運転状態や、潤滑油の油圧、冷却空気、冷却水等の補機類の運転状況を常時監視しており、試験設備に異常が発生した場合はアラームを発し、更に制限値に達した場合は自動的にトリップ停止する。これにより、試験設備の保護と試験時の運転監視の省力化を図っている。



表2 動力回収タービン仕様

段数	3段(1段静翼は可変)
膨張比	6.72
回転数	14 400 [rpm]
出力	6 600 [kW]

図2 動力回収タービン

2.3 3D プリンタ計測翼

圧縮機の内部流動を詳細把握するため、圧縮機内部に多数の計測点を有している。従来、内部流動計測には圧力導管やセンサーを翼表面に貼り付けてワイヤリングを行ったり、フローパス内部にプローブを挿入したりすることが一般的であった。翼表面にワイヤリングする場合、翼形状が変形し内部流動に乱れが発生する。またプローブを挿入する場合は、プローブ自身の影響で流れ場が乱れ、計測の誤差が大きくなる。内部流れ場への影響を極力小さくし、かつ、詳細な内部流動データを取得するために、金属3D プリンタを適用した計測翼を配置した。厚さ 1.5mm 程度の極薄い圧縮機静翼の内部に、計測用の $\phi 0.4\text{mm}$ の圧力計測穴を貫通させ、圧力を計測する。また、 $\phi 0.5\text{mm}$ の温度計測用の熱電対を貫通させるために、 $\phi 0.7\text{mm}$ の通路を翼内部に配置した。圧縮機翼は、性能向上を図るために3次元形状を有している。3D CAD (Computer Aided Design) により、3次元的に翼形状に沿うように計測孔を配置したモデルを作成し、金属 3D プリンタで造形することで、翼内部への圧力導管、温度計測用の通路の配置が可能となる(図3)。

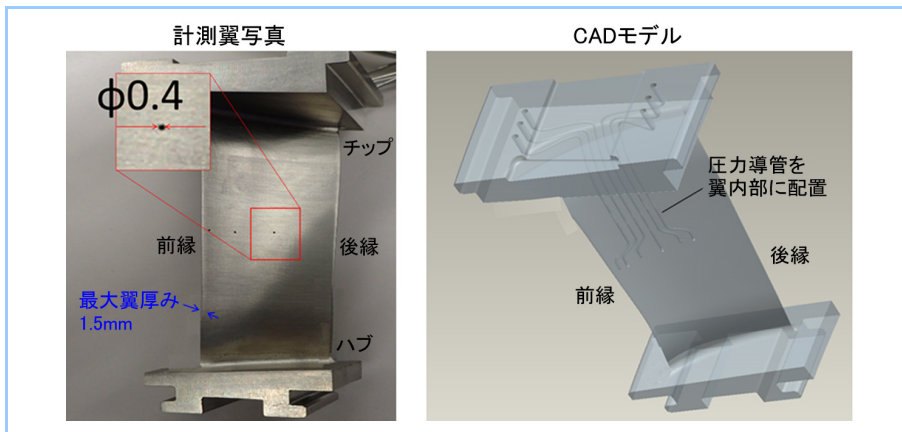


図3 3D プリンタ 翼面静圧計測翼(計測点:腹側3点、背側3点 2枚 1セットで使用)

圧縮機試験機の静翼には、実機と同等レベルの応力が発生する。試験機への適用に際し、強度試験を行って従来の翼素材並みの強度が得られることを確認した後、計測翼として使用した。

2.4 試験結果

圧縮機試験を実施し、8段での全体性能を取得した(図4)。また、部分負荷運転を模擬したサージ裕度検証試験を実施し、サージ裕度が十分であることを確認した。ガスタービンの運用範囲内における圧縮機の健全性を検証し、信頼性を確認した。

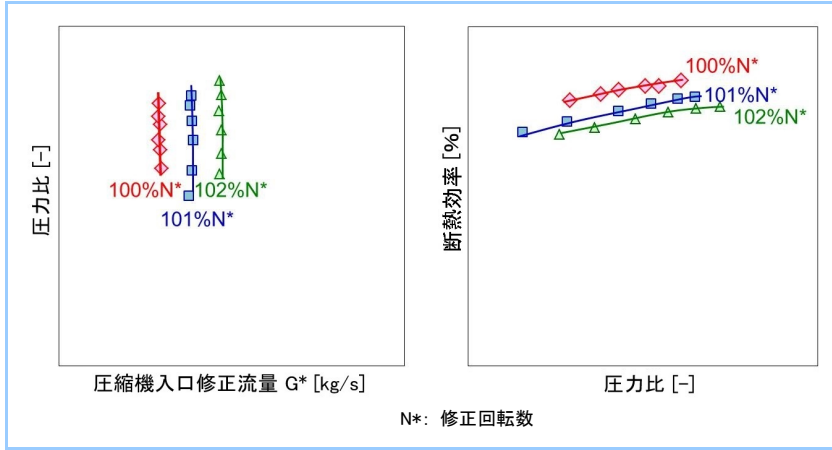


図4 圧縮機全体マップ

3D プリント計測翼を用いて、各翼位置での圧力、温度を計測した。圧縮機各段の負荷分布、及び、ハイト方向の分布は、予想通りであることを確認した。(図5、図6)

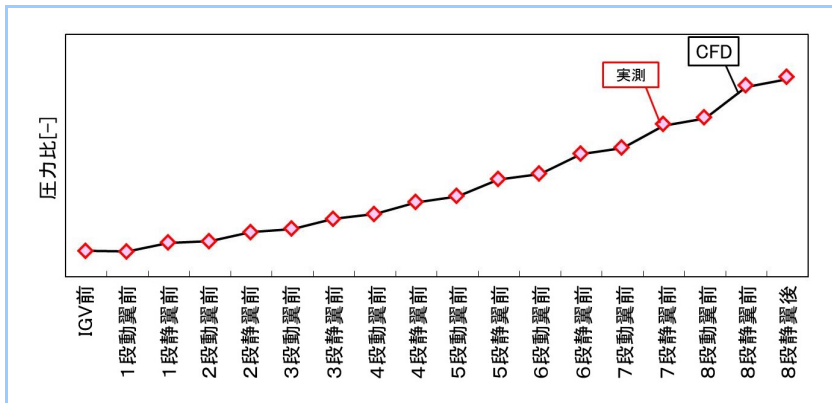


図5 圧縮機負荷分布

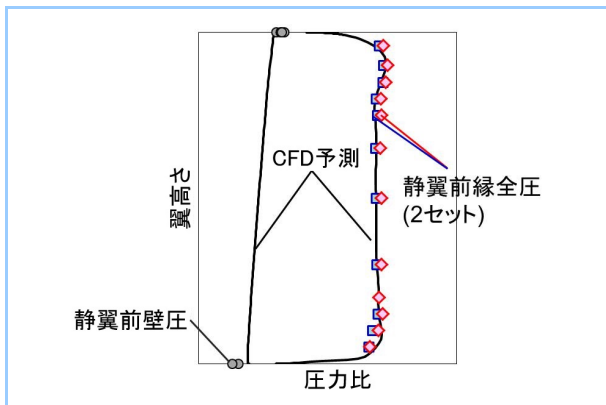


図6 3D プリント計測翼の前縁全圧、壁圧

翼面に圧力計測孔を配置した 3D プリント計測翼を用いて翼表面の圧力分布を詳細に把握した。部分負荷運転時の圧縮機翼面の圧力分布を計測し、サージ発生前の翼面の剥離を計測により確認した(図7)。翼表面からの剥離有無は、圧縮機の安定作動範囲を決定する重要な要因

であるが、予測が非常に難しい。翼面の剥離のタイミングは CFD 予測と概ね一致しており、予測精度が確認できた。

今回の検証データは、CFD 解析コードの改良にフィードバックし、CFD 予測精度の更なる向上を図り、1700℃級圧縮機の開発に適用する。

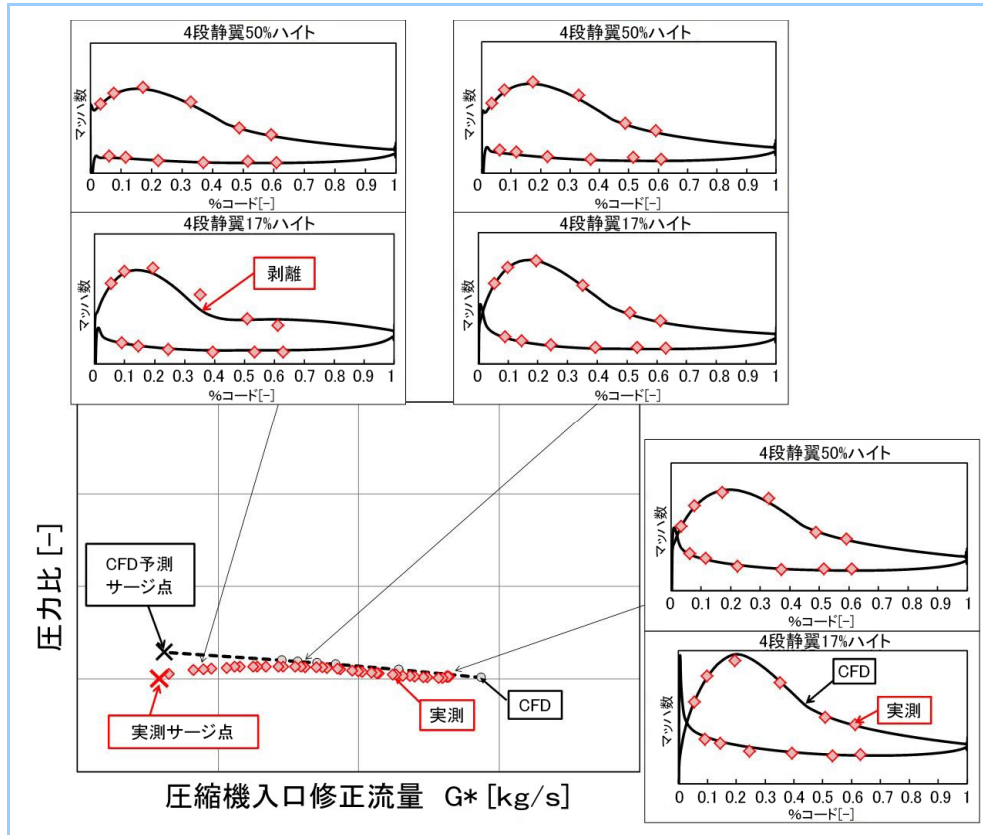


図7 サージ試験 翼面静圧データ

3. まとめ

8 段の段数を有する試験装置を開発し、実機検証試験を実施した。また計測翼に 3D プリントを適用し、詳細な内部流動データを取得した。得られたデータは、次世代圧縮機的设计に反映する。本稿に記載した内容は、1700℃級ガスタービン用圧縮機開発の一部である。この他にも、実用化に向けて性能向上のための技術開発を行っており、今後も8段軸流圧縮機試験装置にて検証試験を実施する予定である。得られた成果は 1700℃級ガスタービンの設計に反映し、実機への適用を図る。最新のガスタービン複合発電技術の普及を通じて、エネルギー問題と地球環境問題の解決に大きく貢献する所存である。

参考文献

- (1) 正田淳一郎, 発電用ガスタービン技術の変遷と将来展望, 日本機械学会誌, vol.119 No1173 (2016) p2-5
- (2) 大田英輔ほか, 発電用ガスタービンと圧縮機の変遷と将来展望, 日本機械学会誌, vol.119 No1173 (2016) p6-9
- (3) 三戸良介ほか, 発電用ガスタービン圧縮機の高性能化・信頼性向上を支える流動解析技術, 三菱重工技報, Vol.52 No.1 (2015), p2-8
- (4) Gao X. et al, Numerical and Experimental Investigation on the Effect of Tip Clearance Multi-Stage Axial Compressor, IGTC, 2015, Tokyo, Japan
- (5) 伊藤栄作ほか, 超高温ガスタービンの要素技術の開発, 三菱重工技報 Vol.52 No.2 (2015) p.15~22
- (6) 小牧孝直ほか, 産業用ガスタービンにおける 3D プリントの活用, 日本ガスタービン学会誌, Vol 42 (2016) P439-442
- (7) 原口英剛, 三菱重工業における 3D プリント活用, 日本機械学会誌, vol.118 No1154 (2015) p40-41