

# ガスタービン動翼の実機信頼性検証技術 (高温用非接触翼振動計測技術)の開発

Development of Blade Tip Timing Measurement of Gas Turbine Blade



田村 和浩\*<sup>1</sup>  
Kazuhiro Tamura

小野 正樹\*<sup>2</sup>  
Masaki Ono

鳥井 俊介\*<sup>3</sup>  
Shunsuke Torii

新名 哲也\*<sup>4</sup>  
Tetsuya Shimmyo

近藤 明生\*<sup>5</sup>  
Akio Kondou

ガスタービンコンバインドサイクル発電は経済的かつクリーンな火力発電設備として注目されており、長期的な世界市場の拡大が予想されている。三菱日立パワーシステムズ(株)(以下、当社)では世界初の1600℃級J形ガスタービンを開発するなど更なる性能向上に取り組むと共に、新規開発要素の技術検証データを取得し設計へフィードバックするために、実機環境下でも適用可能な高温用特殊計測技術の開発を進めてきた。本稿ではガスタービン実機高温環境下(最高1600℃)に適用可能なタービン1段動翼の振動検証技術(高温用非接触翼振動計測技術)について紹介する。

## 1. はじめに

ガスタービンの高性能、高効率化にはガスタービンの高温化が重要である。当社では1980年代に1150℃級大容量ガスタービンM701D形、1989年にタービン入口温度1350℃のM501F形、1997年にはタービン入口温度が1500℃のM501G形を開発し、ガスタービンの高効率化を実現してきた。さらに、近年開発した最新型ガスタービン(M501J形、M701J形)ではタービン入口温度は最高1600℃にも及ぶ。一方、タービン入口温度の高温化はタービン1段動翼の熱応力の増大および疲労強度の低下に繋がるため、振動強度はより一層厳しくなる。更に、近年ではタービン性能を向上するため、タービン動翼はより高アスペクトな翼形状となり低剛性となる傾向にあり、その分振動強度も厳しくなる。そのため、当社では実証発電設備を用いた検証試験などにより、実機運転環境下(高温、高圧)におけるタービン動翼の振動特殊計測を行い、その信頼性を確認している。

従来、ガスタービン動翼の振動計測には翼にひずみゲージを直接貼り付けし、テレメータシステムを利用した計測(テレメータ計測)が主流であった。しかし、テレメータ計測は非常に計測精度が高い利点を持つが、計測コストが高価であり、また、ひずみゲージを貼り付けた翼の振動データしか計測できないため、タービン翼個々のバラツキを評価し設計に反映することが出来ないため、振動強度にある程度の余裕が盛り込まれた設計となっていた。そこで、より高効率なタービン翼の設計を可能とするため、テレメータ計測に比べて計測コストが安価であり、かつ実機運転環境下におけるタービン翼全翼の振動特性を計測しバラツキ評価を行える計測技術(高温用非接触翼振動計測技術)を開発し、タービン入口温度1600℃環境下における計測を実現した。

本稿では開発した非接触翼振動計測技術の概要と、実機計測に適用した結果を紹介する。

\*1 技術統括本部総合研究所振動研究部

\*2 技術統括本部総合研究所振動研究部 主席研究員

\*3 三菱日立パワーシステムズ(株)ガスタービン技術本部高砂ガスタービン技術部 主席チーム統括

\*4 三菱日立パワーシステムズ(株)ガスタービン技術本部高砂ガスタービン技術部

\*5 ICTソリューション本部システム技術開発部

## 2. 実機環境下におけるガスタービン動翼の振動計測技術

タービン1段動翼は流体エネルギーを機械エネルギーへ変換する重要な要素部品であり、熱効率を向上するため高負荷かつ高温の非常に厳しい運転環境下で使用される。また、タービン動翼の損傷原因は高サイクル疲労や腐食疲労など振動に起因するものが最も多い。そこで、当社ではタービン動翼の新規開発時には検証試験を行い、タービン動翼の振動データを取得してタービン翼の健全性および設計の妥当性を検証している。

### 2.1 非接触翼振動計測技術の計測原理

非接触翼振動計測技術は、タービン動翼と対向する車室(ケーシング)にタービン動翼の通過を検知するセンサ(光学式、静電容量式、渦電流式など)を設置し、タービン動翼がセンサを通過する時の時間を計測することでタービン動翼の振動を分析する技術である。タービン動翼がセンサの先端を通過する際には図1に示すような翼通過パルス信号が発生する。タービン動翼が振動していない時はある基準信号から翼通過パルス信号が発生するまでの時間は一定である。しかし、タービン動翼が振動すると、この基準信号から翼通過パルス信号が発生するまでの時間に変動が生じる。そのため、タービン動翼が振動している時と振動していない時の上記の時間差を求めれば、タービン動翼の振動を求めることができる。非接触翼振動計測技術は、①非接触で計測するため余計な加工をロータに施す必要がない、②全翼の振動応答を計測することが可能である、といった特徴があり、当社タービン動翼の品質確認試験や実機運転時の信頼性検証試験に適用されている。

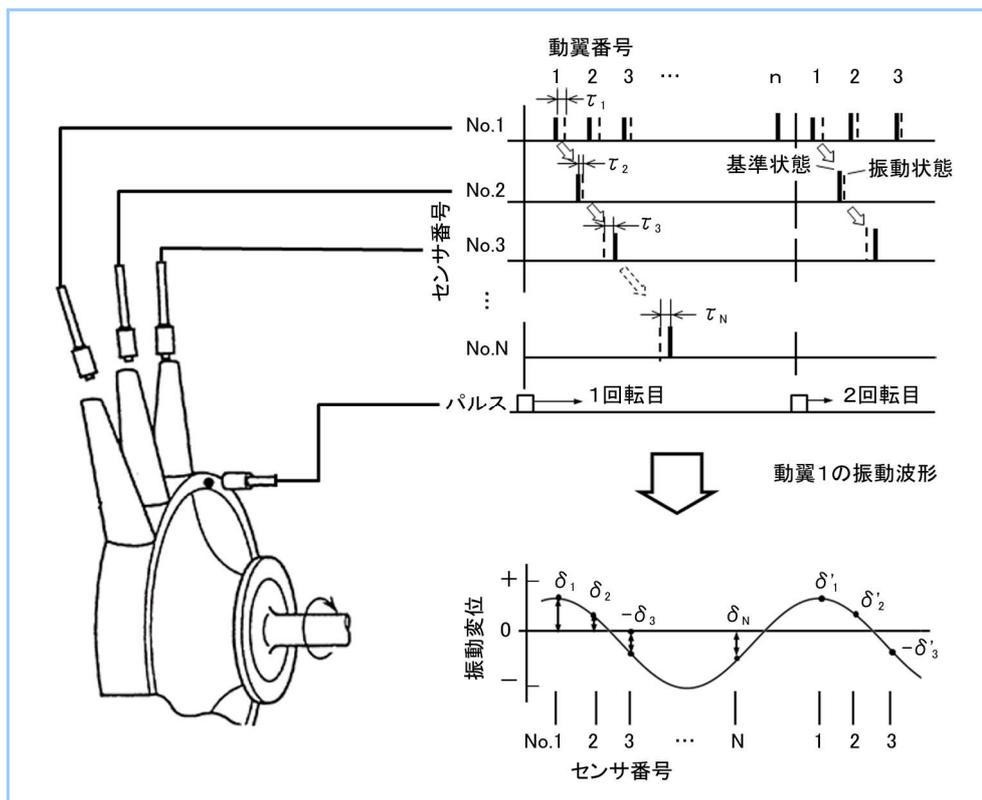


図1 非接触翼振動計測技術の原理

### 2.2 ガスタービン動翼振動計測に使用するセンサプローブ

非接触翼振動計測に使用されるセンサは光学式、静電容量式、渦電流式など様々であるが、静電容量式、渦電流式のセンサはガスタービン起動時などタービン翼先端とケーシング間のクリアランスが大きい場合にはSNの良い信号を取得することが難しく、このような場合には翼振動計測に支障が出る。そこで、当社では光学式センサを採用することにした。しかし、光学式センサは燃焼ガスなどの影響によりセンサ先端部が汚れたりファイバーが劣化することでセンサ信号が低

下するリスクを有する。そこで、当社では冷却空気をセンサへ送気するなどの対策を行い信号低下のリスク低減を図っている。図2にガスタービン実機にセンサプローブを設置した事例を示す。

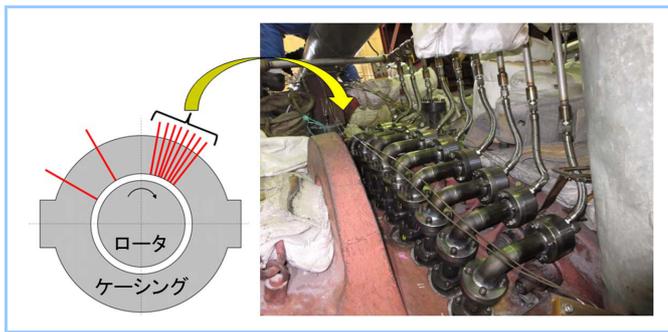


図2 ガスタービンケーシングへのセンサプローブ設置状況

### 2.3 非接触翼振動計測のデータ処理方法

非接触翼振動計測技術をデータ処理の観点から分類すると、少数のセンサを静止側に配置してセンサ間を通過する時間差を計測して振動振幅を再現する方法(以下、少数点法)と、前述したように多数のセンサを静止側に配置して、翼が個々のセンサを通過する時の時間を計測して翼の振動波形を再現する多点法とに分けられる。

少数点法は少ないセンサ(最少1点)でタービン翼の振幅を分析することが可能であり、設計データが十分に取得され、検証が完了しているタービン翼の振動監視(異常検知)には適している。しかし、回転上昇時など、回転数が変化する条件では共振通過応答を計測・評価することが可能であるが、一定回転数では共振応答などの同期振動の応答を正しく計測することが出来ず、また、非同期振動であっても振動数の推定に制約がある。従って、あらゆる振動事象が想定される新規開発翼の検証試験における振動計測・監視などに適用するには十分な計測手段とは言い難い。

一方、多点法はタービン翼の振動波形を再現する手法であり、同期振動、非同期振動のどちらも振幅を正確に計測することができ、タービン翼の振動数の評価も比較的容易である。従って、新規開発翼を採用したガスタービンの検証試験などにおいては、多点法を用いるのが望ましい。図3に非接触翼振動計測(多点法)計測の一例を示す。

既報<sup>(6)</sup>ではセンサプローブ1点を使って計測した結果について報告したが、本報では計測精度を向上するため複数のセンサプローブを用いて計測した多点法計測の事例について紹介する。

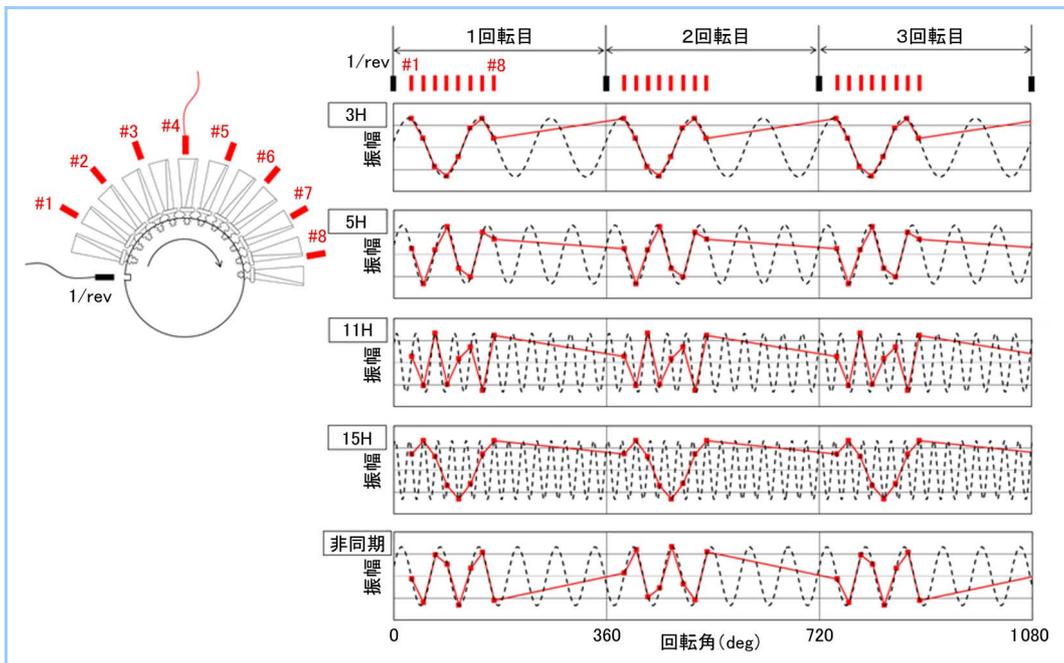


図3 非接触翼振動計測(多点法)計測の例

### 3. ガスタービン実機における非接触翼振動計測結果

本章では当社高砂工場の実証発電設備(T地点)のM501J形ガスタービン試運転に非接触翼振動計測技術を適用し、タービン1段動翼の振動計測を実施した結果について紹介する。当社ではガスタービンのタービン動翼の振動計測に光学式センサを適用している。前述したとおり、光学式センサはガスタービン負荷運転時の計測ではセンサ先端に汚れが付着するため信号が低下し、翼振動を計測することが出来なくなる可能性がある。そこで、その対策としてレーザーセンサの空気冷却を行っている。

図4にはガスタービン高負荷運転条件(タービン入口温度 1500℃~1600℃)における翼振動計測を連日にわたって計測した際のセンサ信号の低下について整理したものであるが、センサ信号はタービン翼とケーシング間のクリアランスの変化により変動はするものの、顕著な信号低下は認められず一定のレベルを維持しており、ガスタービン1段動翼の連続計測が可能であることを確認した。

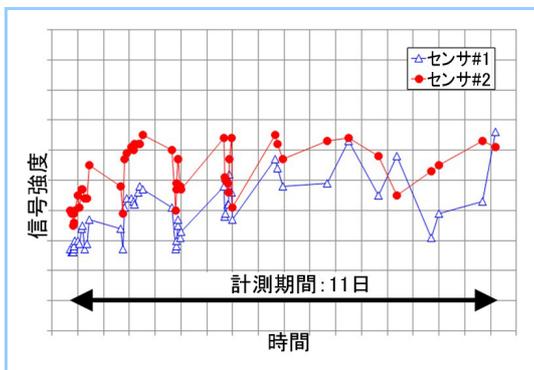


図4 センサ信号出力時系列変化

図5には非接触翼振動計測技術(多点法)を適用し、タービン回転上昇時におけるタービン1段動翼の共振応答を計測した結果を示す。図のとおり、共振通過応答を明確に計測することが出来ている。更に、共振応答時の翼振動の振動数分析も可能であることを確認している。

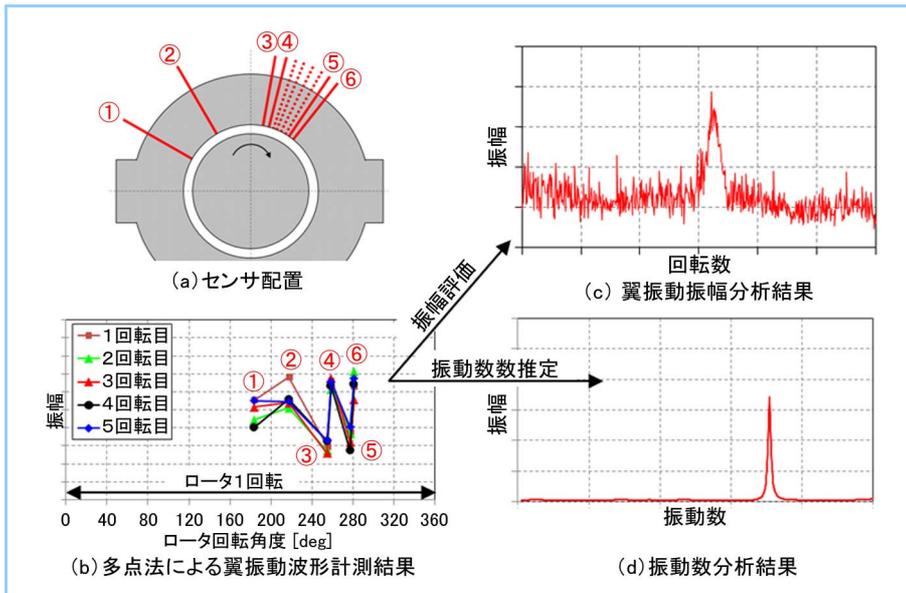


図5 タービン1段動翼における非接触翼振動計測結果(多点法)

図6に各負荷運転条件におけるタービン1段動翼の振動応答を非接触翼振動計測技術(多点法)にて計測した結果を示す。参考として、異なる日時に試験を行ったひずみゲージ(テレメータ計測)による計測結果と比較をした。この結果、非接触翼振動計測では全翼の振動応答を計測し

ているため計測値のばらつきが大きいですが、ひずみゲージによる計測値は非接触翼振動計測のばらつき範囲内にほぼ入っている。このように非接触翼振動計測技術の負荷運転時振動計測に対する計測精度についても問題ないことを確認している。

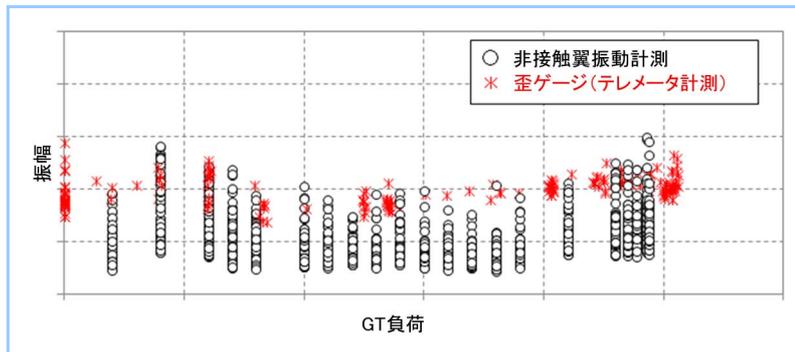


図6 負荷運転時の翼振動計測精度妥当性確認結果

#### 4. まとめ

ガスタービンの高性能、高出力化に伴い、タービン動翼の振動強度はより厳しく、難しい設計が要求される。そのため実機高温環境下におけるタービン動翼の振動データを正しく評価し設計に反映していくことがタービン動翼の信頼性を向上していく上で非常に重要となっている。そこで当社では、タービン入口温度 1600℃条件でも適用可能な高温用非接触翼振動計測技術を開発した。本計測技術は当社の最新型 M701J ガスタービンのタービン翼振動計測にも適用され、当社新製品の信頼性検証に寄与している。

#### 参考文献

- (1) Hohenberg,R, Detection and Study of Compressor-blade Vibration, Experimental Mechanics, Vol.7 Issue6 (1967) p.19-24
- (2) Endoh. Mほか, Noncontact Measurement of Rotating Blade Vibration, (1983), 1, Tokyo, IGTC
- (3) Umemura, Sほか, Vibration Monitoring by Optical Method for the High Pressure Compressor of GT, 18th Int. Congress on Combustion Engines, (1989), 199
- (4) Kaneko, Y. et al., Measurement and analysis of random vibration of steam turbine low pressure end blade, IFToMM (2002)
- (5) 金子ほか, ターボ機械の非接触翼振動計測法の開発(改良少数点法), 日本機械学会論文集(C編)67巻658号(2001-6) p.1846-1852
- (6) 田村和浩ほか, ガスタービンの信頼性を支える動翼の非接触翼振動計測, 三菱重工技報, Vol.51 No.1 (2014) p.11-15
- (7) 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
- (8) M.Greitans, Multiband signal processing by using nonuniform sampling and iterative updating of autocorrelation matrix, International Conference on Sampling Theory and Application(2001),p.85-89
- (9) C.Stephan, et al., Tip-timing data analysis for mistuned bladed discs assemblies, Proc. of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land,Sea and Air GT2008
- (10) Vercoutter A, et al., Improvement of compressor blade vibrations spectral analysis from tip timing data:aliasing reduction, Proc. of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition GT2013