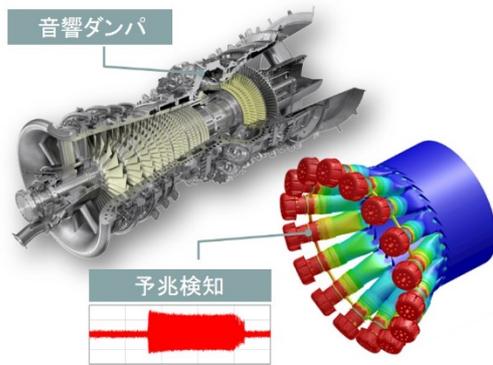


高効率ガスタービンの安定運転を実現する 振動抑制技術・予兆検知技術の開発

Development of Acoustic Damper and Short-Term Prediction Technology
for Stable Operation of High Efficiency Gas Turbine



甲田 貴也*¹
Takaya Koda

中森 友仁*¹
Tomohito Nakamori

松山 敬介*²
Keisuke Matsuyama

小山 敦史*³
Atsushi Koyama

松村 嘉和*⁴
Yoshikazu Matsumura

中村 聡介*⁵
Sosuke Nakamura

ガスタービンの高効率化・高出力化のためタービン入口温度を上昇させるとともに、低排出化を達成するため希薄予混合燃焼を採用している。これにより、燃焼が不安定化し燃焼器の圧力変動(燃焼振動)が増大するリスクがある。安定運転実現のため、音響減衰付与により燃焼振動を安定化させるデバイス(音響ダンパ)、ならびに短時間で急激に振幅が増大する燃焼振動の予兆検知技術の開発を行った。三菱パワー株式会社高砂工場ガスタービン・コンバインドサイクル(以下、GTCC)実証発電設備(以下、実証発電設備)においてこれらの検証を行い、安定運転の実現に貢献した。

1. はじめに

燃焼に関する製品の共通の課題として、燃焼の不安定により発生する圧力変動(燃焼振動)が挙げられる。燃焼振動は火炎の非定常な発熱変動と燃焼器の音響場の連成により生じる自励振動である。燃焼振動の大きな圧力変動による構造の疲労破壊もしくは逆火が生じ、短期間の間に最悪、燃焼器の破損を招いてしまう。

ガスタービン燃焼器においては、タービン入口温度の高温化ならびに希薄予混合燃焼化により燃焼不安定性が増加し、燃焼振動レベルの上昇や、極めて短時間で振動が成長するような変傾向のある燃焼振動の発生といった課題が生じている。

本報ではこれらの燃焼振動低減技術及び予兆検知技術について報告する。

2. NO_x 排出と燃焼振動低減を両立した新型音響ダンパ

2.1 従来型音響ダンパ

ガスタービンの安定運用を実現するため、音響減衰付与により燃焼振動を安定化させるデバイス(音響ダンパ)を適用している⁽¹⁾。音響ダンパは、入口の多孔板と共鳴箱で構成される共鳴器である。共鳴現象を利用して燃焼器の圧力変動をダンパ内に導き、多孔板を流体が出入りすることで渦を発生させ、圧力変動エネルギーを散逸させることができる(図1)。

従来の音響ダンパは、燃焼部へ設置することから冷却空気が必要となる。燃焼用空気の一部を冷却に用いるため、火炎温度が上昇し NO_x 排出の増大につながる。吸音能力を向上させるためには開口面積を大きくすることが有効であるが、より多くの冷却空気が必要となるため、NO_x 性

*1 三菱重工業株式会社総合研究所振動研究部

*2 三菱重工業株式会社総合研究所振動研究部 室長 工博

*3 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部大型ガスタービン技術部

*4 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部大型ガスタービン技術部 主席チーム統括

*5 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部大型ガスタービン技術部 グループ長

能とのトレードオフが生じることになる。また、開口面積を増やす場合、背後の共鳴箱の体積も増加させる必要があるが、設置スペースの制約からこれ以上の大型化は難しい。以上より、従来の音響ダンパは吸音性能を向上させにくいことが課題である。

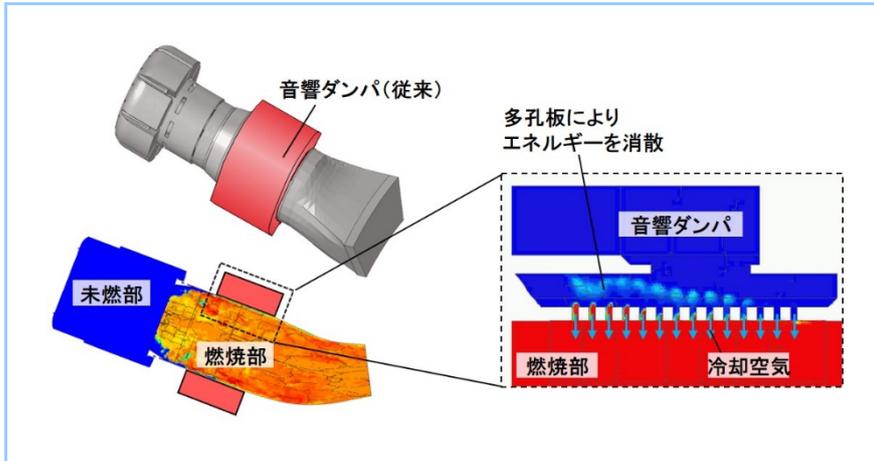


図1 音響ダンパの原理

2.2 新型音響ダンパの開発

従来の音響ダンパは、音響モードの腹であり火炎の発熱変動発生位置でもある燃烧部に設置しているが、実機の音響モードを分析した結果、未燃の上流側でもモード振幅があることが分かった。そこで、燃烧器入口の未燃部に設置することで冷却空気を不要とし、NOx 排出を増加させることなく燃烧振動を低減する新型音響ダンパを開発した(図2)。

燃烧部と未燃部では音圧や流れといった境界条件が異なっていることから、音響孔における減衰が低下し、ダンパ共鳴倍率が増加すると予想された。これらの条件の変化による音響減衰の変化を、要素実験や大規模非定常 CFD (Computational Fluid Dynamics) により明らかにした。多孔板の音響減衰を未燃部に最適化することで、音響ダンパの減衰を最大化した。

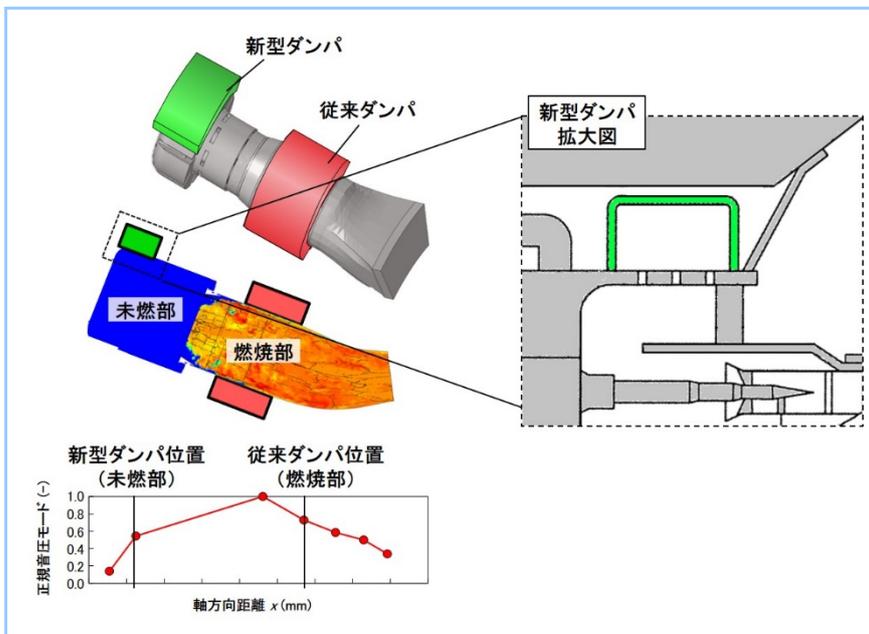


図2 新型音響ダンパの構造

2.3 実機検証

実証発電設備において、新型音響ダンパの実機検証を行った。ダンパ単体の音響性能の確認として、ダンパ入口と端部の伝達特性を計測した。その結果、伝達ゲイン・位相ともに解析と実測で良く一致することを確認した(図3)。

新型音響ダンパ有・無のそれぞれで試運転を行った結果、燃焼振動を 25% 低減したことで定格の運転条件における運転裕度を拡大し、安定運用が可能となった(図4)。また、NO_x 増加の副作用がないことも確認した。現在、長期給電運用にも適用中であり、音響性能や構造信頼性の長期的な検証も継続して実施中である。

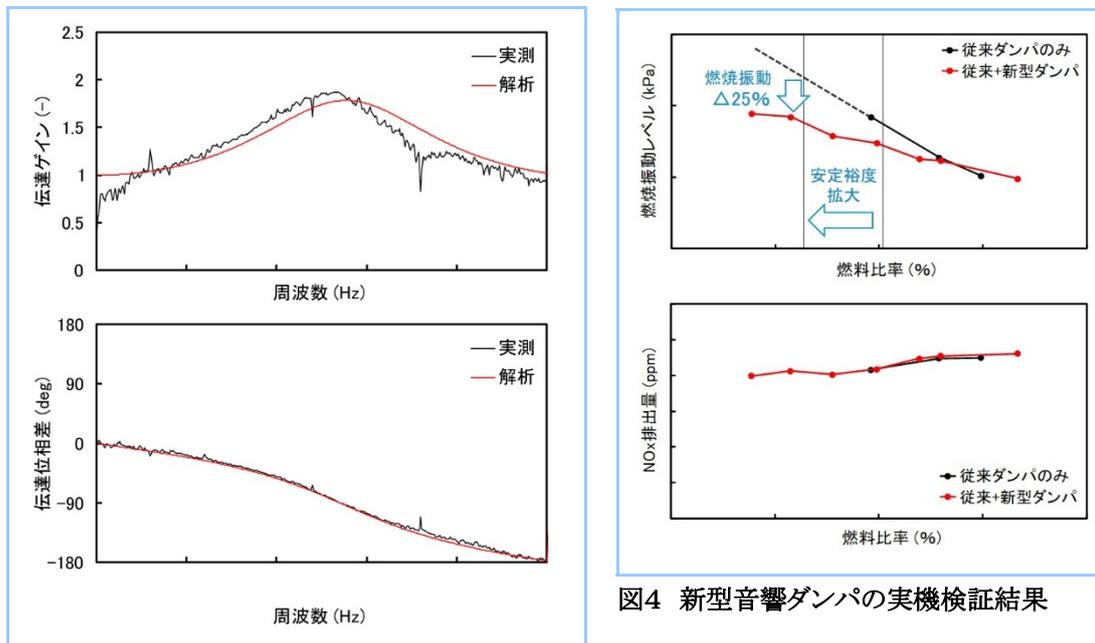


図3 音響ダンパ要素試験装置及び結果

図4 新型音響ダンパの実機検証結果

3. 状態急変する燃焼振動の予兆検知技術

3.1 状態が急変する燃焼振動

高効率・高出力化に伴い運転条件が厳しくなっており、運転状態が急変・不安定化しやすくなっている。実証発電設備にてタービン入口温度 1650℃で燃焼振動の安定裕度を把握するため、意図的に不安定領域で運転した際の圧力変動時刻歴波形とソナーグラム及び燃焼器の周方向音響モードを図5に示す。0s 付近で圧力変動振幅が急激に増大し通常時の 10 倍近い圧力変動が発生していることが分かる。通常時の 100Hz-300Hz 帯域のランダム性が強い変動から、状態急変後は 100Hz の基調周波数と高調波からなる正弦振動が卓越する変動に変化している。状態が急変する過程で圧力変動モード形状は、燃焼器間の位相が揃っていないいびつなモード形状から同相同振幅のモード形状に変化している。異常状態に一度入ると、たとえ短時間でも燃焼器の損傷につながるため、即座にガスタービン出力を急降下させるか停止しなければ正常状態に戻すことができない。安定運転には、音響ダンパなどの減衰付与によるハードのロバスト設計と合わせて、運転中の高リスクな異常状態を検知し回避するため状態急変を予兆検知できる技術が必要である。

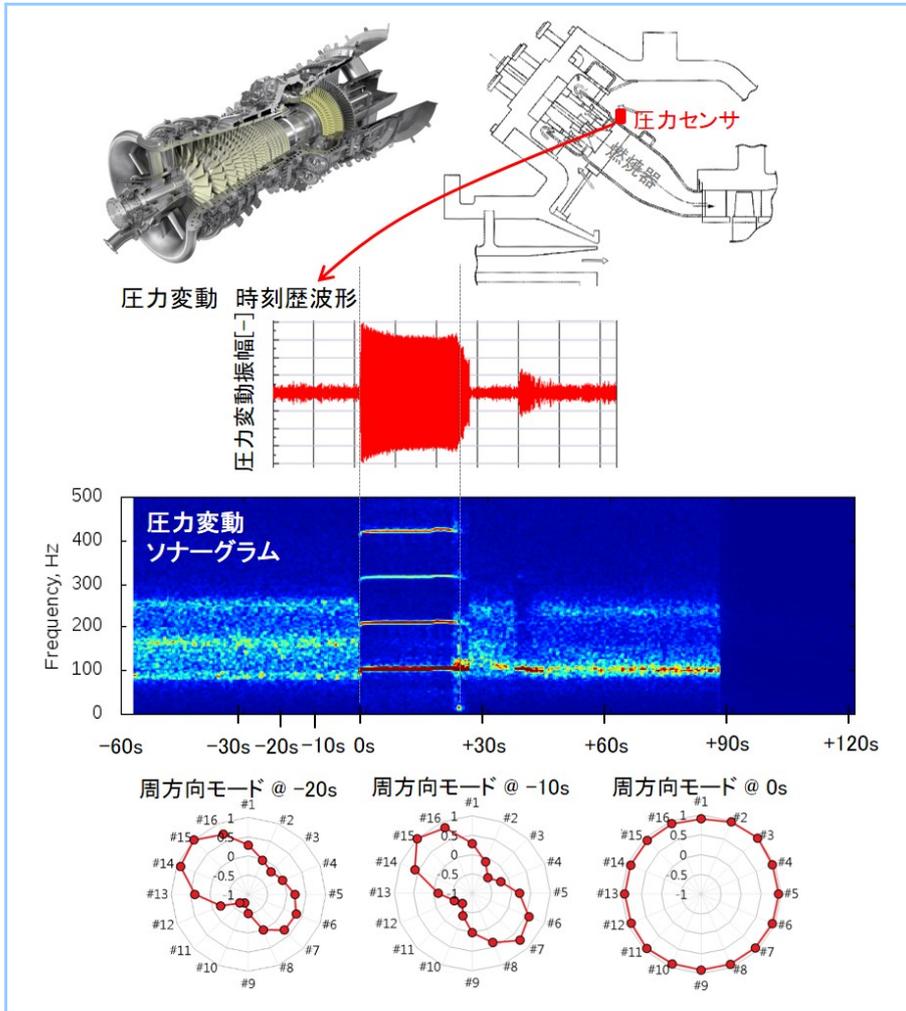


図5 状態急変する燃焼振動の例(ガスタービン燃焼器)

3.2 複雑系理論を応用した異常振動の予兆検知技術の開発

複雑な非線形現象を数理方程式で表現し解の構造を解き明かす複雑系理論は、近年燃焼分野における非線形問題への応用が進んでいる。例えば、ガスタービン燃焼器の燃焼不安定(吹き消え)の事前検知に取り入れられた研究例が複数報告されている⁽²⁾。

図5に示す状態急変したガスタービン燃焼器の燃焼振動は、全 16 缶の燃焼器が周方向に連成する音響モードと燃焼とのカップリングによる自励振動現象であり、複雑系理論の観点からは多数の振動子からなる集団の集団同期現象として捉えるができる。そこで、R. Gutiérrez⁽³⁾らによって提案された2点間の瞬時の位相同期状態を示すパラメータである位相同期パラメータの概念を拡張し、燃焼器 16 缶が単位時間あたりで同期する頻度を同期確率として定義し、同期確率の時間変化から通常状態から異常状態への推移を検知する技術を開発した(図6)。

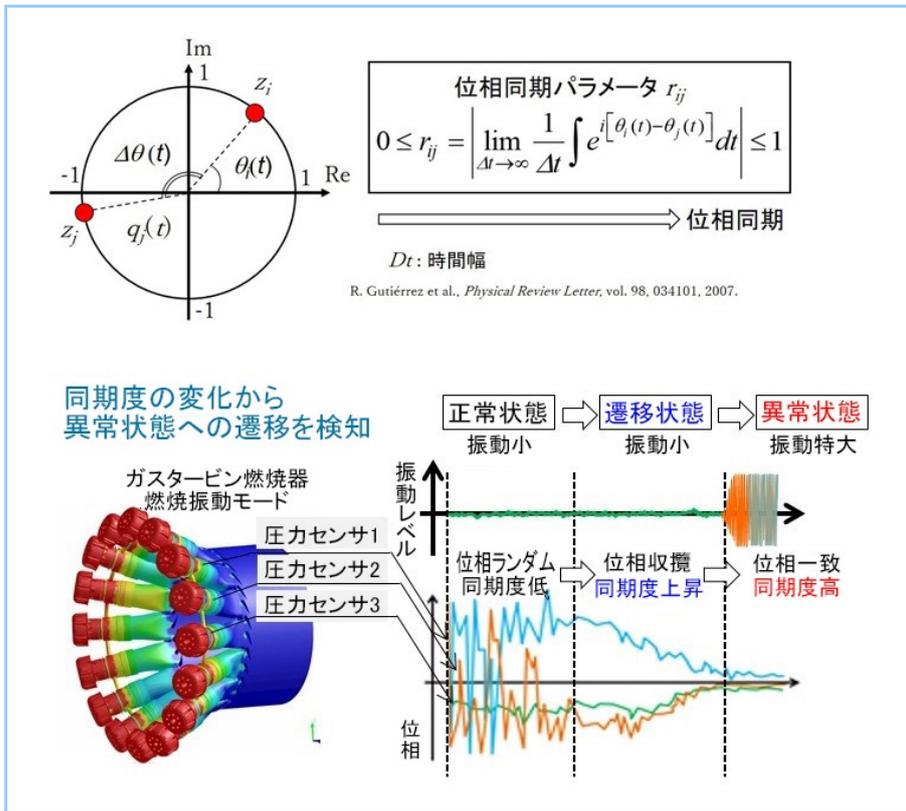


図6 複雑系理論を応用した異常振動の予兆検知技術

3.3 実機検証

予兆検知技術を、実証発電設備において実機検証データに適用した結果を図7に示す。従来の燃焼振動の圧力変動を監視では状態急変を回避できなかったが、開発した手法により、複数センサの圧力変動から算出した同期確率を監視することで状態急変の40秒前に異常状態への遷移を検知し、異常状態を運転回避することが可能となった。本技術の有用性は今後も長期的に継続して検証していく。

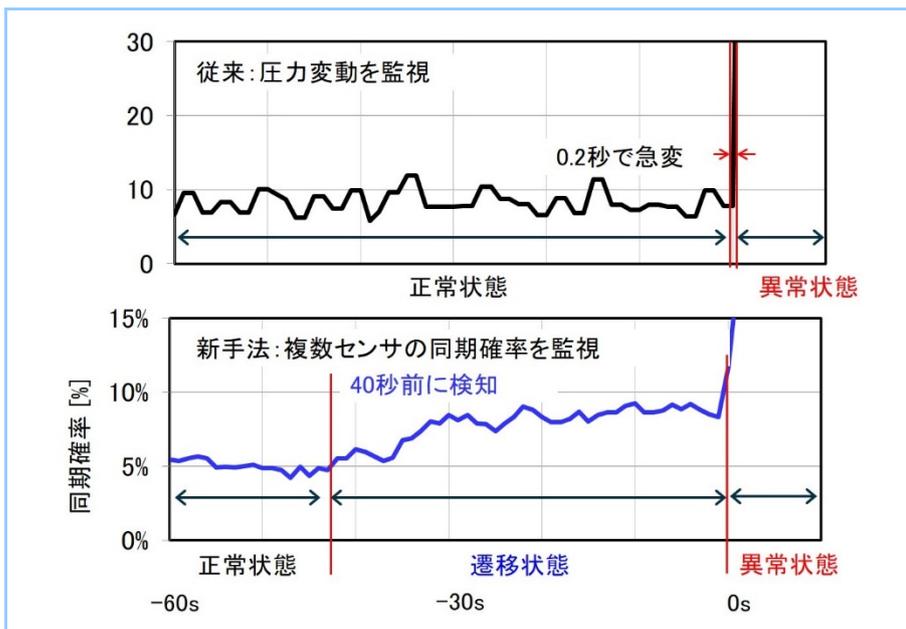


図7 予兆検知技術の実機検証結果

4. まとめ

高効率ガスタービンの安定運転を実現するため、燃焼振動を安定化させるデバイスの開発と、状態急変を事前検知し振動リスクを回避するための予兆検知技術を開発した。実証発電設備においてこれらの技術の検証を行い、安定運転の実現に貢献した。

なお、本報に記載した内容のうち新型音響ダンパの開発は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業として実施中の“高効率ガスタービン技術実証事業 (1700℃級ガスタービンの超高効率化)”の一部として実施したものである。

参考文献

- (1) Ikeda, K. et al., Robust Gas Turbine Combustor with Acoustic Liner, Journal of Thermal Science and Technology, Vol.7 No.1 (2012) p.199-210
- (2) S. Murayama. Et. Al, Characterization of dynamic behavior of combustion noise and detection of blowout in a laboratory-scale gas-turbine model combustor, Proceedings of the Combustion Institute Volume 37, Issue 4, 2019, Pages 5271-5278
- (3) R. Gutiérrez et al., Paths to Synchronization on Complex Networks, Physical Review Letter, vol. 98, 034101, 2007