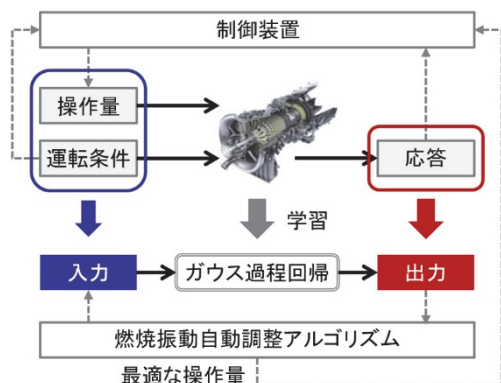


ガスタービンの安定燃焼運転を実現： AI による燃焼振動自動調整

Achieving Stable Combustion Operation of Gas Turbines:
AI-Based Automatic Adjustment of Combustion Pressure Fluctuation



筈井 祐介^{*1}
Yusuke Hazui

阿野 繁^{*2}
Shigeru Ano

羽賀 僚一^{*3}
Ryoichi Haga

和田 健太^{*4}
Kenta Wada

福本 皓士郎^{*5}
Koshiro Fukumoto

野村 真澄^{*6}
Masumi Nomura

発電用ガスタービンでは、高効率運用のための高温燃焼下において、燃焼振動の発生による重大な機器損傷を引き起こす危険性がある。本技術は、燃焼振動特性を AI がリアルタイムで学習し、AI の予測信頼度を含めた振動予測を行うことで、低信頼度の領域では慎重に、高信頼度の領域では積極的に運転状態の自動調整を行う。本技術により、誤った調整を行うリスクを低減した上で、迅速に燃焼振動を抑制することに成功した。本報では、本技術の概要と当社実証発電設備での検証結果について説明する。

1. はじめに

発電用ガスタービンでは、高効率化・高出力化を達成するべく、高温燃焼下での運転が求められている。その一方で高温燃焼下においては、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が発生するが、この燃焼振動レベルが過大となった場合、燃焼器やタービン部品の損傷を引き起こす恐れがあるため、事前に定めた許容値以下に燃焼振動レベルを抑える必要がある。

この課題に対して三菱重工業株式会社(以下、当社)では、機械学習技術を応用した燃焼振動自動調整システム⁽¹⁾を開発し、製品化・実機適用してきた。しかし、ガスタービンの更なる高効率化・フレキシブル運用への対応に伴い、燃焼振動特性の急変が発生しており、より短時間での燃焼振動調整が求められている。そこで、燃焼振動を予測する機械学習手法としてガウス過程回帰を採用した、新たな燃焼振動自動調整技術を開発した⁽²⁾。

以降、2章にて燃焼振動自動調整技術の概要を、3章にて実証発電設備での検証結果について示し、4章でまとめを述べる。

2. 燃焼振動自動調整技術

発電用ガスタービンは、図 1 に示す圧縮機・燃焼器・タービンの 3 つの要素からなる。圧縮機で高圧圧縮した空気に対し、燃焼器で燃料を噴射し燃焼させることで得られる高温高压のガスを用い、タービンを回転させ発電用の動力を得る。ガスタービンから得られる 600℃超の高温排ガスをを用い蒸気タービンを駆動させるガスタービン・コンバインドサイクル発電(GTCC)では、発電効率 64%以上と高効率な運転が可能である。

*1 総合研究所 制御システム研究部

*2 エナジードメイン GTCC 事業部 ガスタービン技術部

*3 エナジードメイン GTCC 事業部 プラント技術部 主席技師

*4 エナジードメイン GTCC 事業部 プラント技術部

*5 エナジードメイン GTCC 事業部 事業企画戦略部

*6 デジタルイノベーション本部 EPI 部

発電用ガスタービンにおいては、数十年間に及ぶライフサイクルを通して高い稼働率と信頼性、高効率な運転の実現を目的とした自動制御が適用されるが、燃焼振動においても自動で振動レベルを低減することが求められる。通常、燃焼器には複数の燃料系統から燃料が供給され、例えば図2の燃焼器はメイン系統とパイロット系統等が設けられている。燃焼振動に対しては、各燃料系統への燃料の配分等の運転パラメータを適切に制御することで、燃焼状態を変化させ振動を低減することが可能である。しかし、燃焼振動は供給される空気条件や燃料組成、負荷条件に対して非線形な応答特性を有している上、ガスタービンごとの個体差が存在しており、事前に正確に特性を把握することが困難であるため、適切な制御系設計が難しい。燃焼振動自動調整技術ではこれらの状況に対応するために、自動的に運転パラメータを調整して、燃焼振動の発生を抑え、常に安定燃焼状態での運転を可能とする。

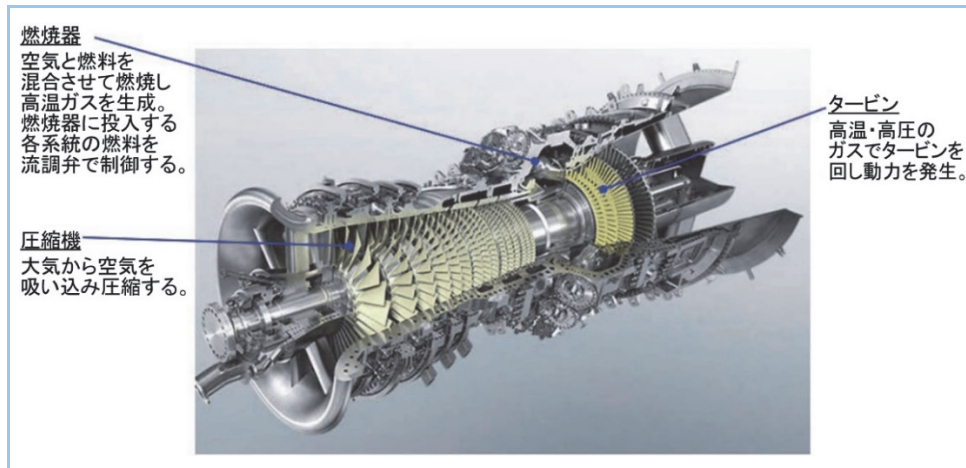


図1 ガスタービンの構成

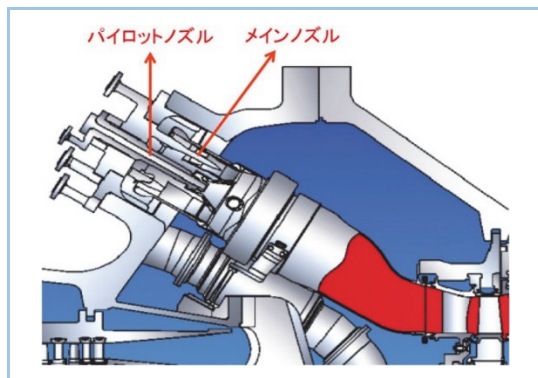


図2 燃焼器概略図

2.1 従来の燃焼振動自動調整技術

当社では、燃焼振動低減のため、機械学習技術を応用した燃焼振動自動調整システムを2004年に商用化し商用プラントに搭載してきた。図3に同システムの構成を示す。本システムは、運転中に収集したデータを基に、燃焼振動に影響を与える空気流量や燃料配分等のプロセス値と燃焼振動の関係を、機械学習によってオンラインでモデル化し、燃焼振動発生時には推定モデルに基づき燃焼振動を低減する運転領域を算出、その領域内で運転するよう燃料配分の自動調整を行う。

当初、本システムにおける燃焼振動予測モデルには比較的簡単な非線形回帰モデルを採用していた。この非線形回帰モデルは、燃焼振動に影響を与える空気流量や燃料配分等のプロセス値を基に、燃焼振動レベルを予測するモデルである。同モデルは運転点近傍での特性を局所的に非線形モデルに近似し、同近傍付近に限定して調整を行うことを前提としている。

一方で近年のガスタービンに対するニーズ高まりを受けた高効率化・フレキシブル運用への対

応に伴い、燃焼振動特性の急変が発生しており、より短時間での燃焼振動調整が求められている。しかし前述の非線形回帰モデルに基づく調整の場合、局所的な近似範囲でしか燃焼振動特性を予測できないため、1回の調整量が少なく最適な調整に時間を要する。また、燃焼振動低減のため積極的に調整した場合、運転実績のない領域に入り、逆に振動増大のリスクを伴う問題がある。

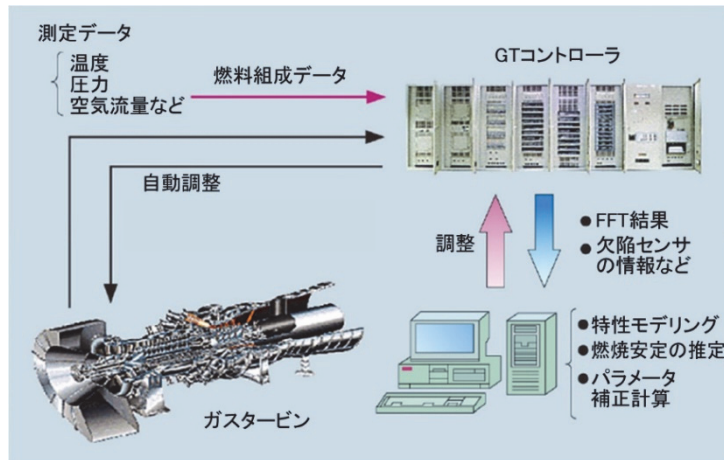


図3 燃焼振動自動調整システム構成

2.2 ガウス過程回帰を応用した新たな燃焼振動自動調整技術

この課題を解決するため、燃焼振動特性を表現する機械学習モデルとして、図4に示すガウス過程回帰⁽³⁾と呼ばれる回帰手法を用いる。ガウス過程回帰は推定値の不確かさを算出することが可能な手法であり、未学習の領域において不確かさが大きくなる特徴がある。図5にガウス過程回帰を適用した燃焼振動自動調整技術のフレームワークを示す。燃焼振動自動調整アルゴリズムでは、燃焼振動が推定不確かさを考慮した最悪値となる場合を想定し、同最悪値が運転許容値を満たす範囲まで操作量を導出することで、振動増大のリスクを伴う運転実績のない領域への調整を防止しつつ、燃焼振動低減のための積極的な調整を実現する。

図6に燃焼振動自動調整の様子を示す。図6中の波線は取り得る2つの燃焼振動パターン（Case1, Case2）を示しており、(a)及び(b)はいずれも学習に用いる運転データが十分に収集できている条件に相当する。学習データが存在する既知の運転領域において、ガウス過程回帰が小さな推定不確かさで、それぞれの燃焼振動特性（図6中破線）を良く表現できており、燃焼振動発生時に短時間で適切な燃料配分に自動調整できることが分かる。一方、(c)では学習データが不足するため、未知の運転領域にてどのような燃焼振動特性を取るか分からず、推定不確かさが増大していることが分かる。これにより、未学習領域にて燃焼振動レベルが上昇する可能性（Case1に相当）を考慮し、調整量に制限がかかることになる。(c)の例において、Case1, Case2いずれの燃焼振動特性を取るかは予見困難であり、この調整判断は妥当と言える。

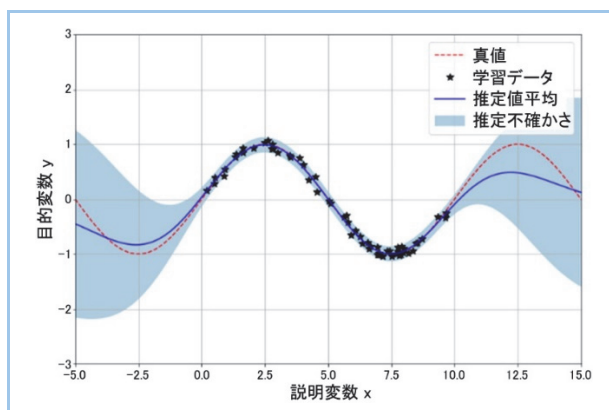


図4 ガウス過程回帰による推定

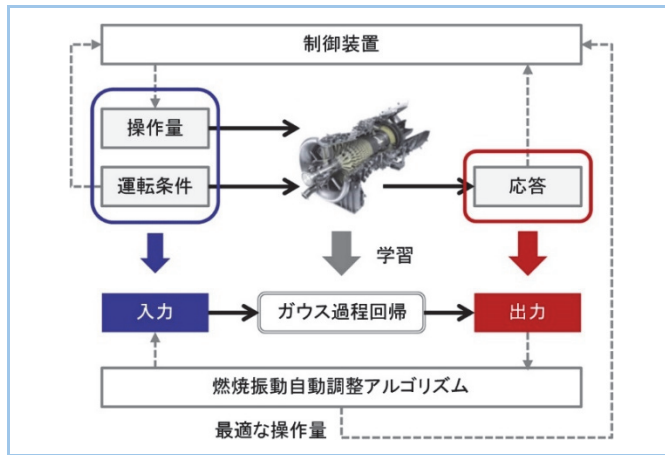


図5 ガウス過程回帰を適用した燃焼振動自動調整技術のフレームワーク

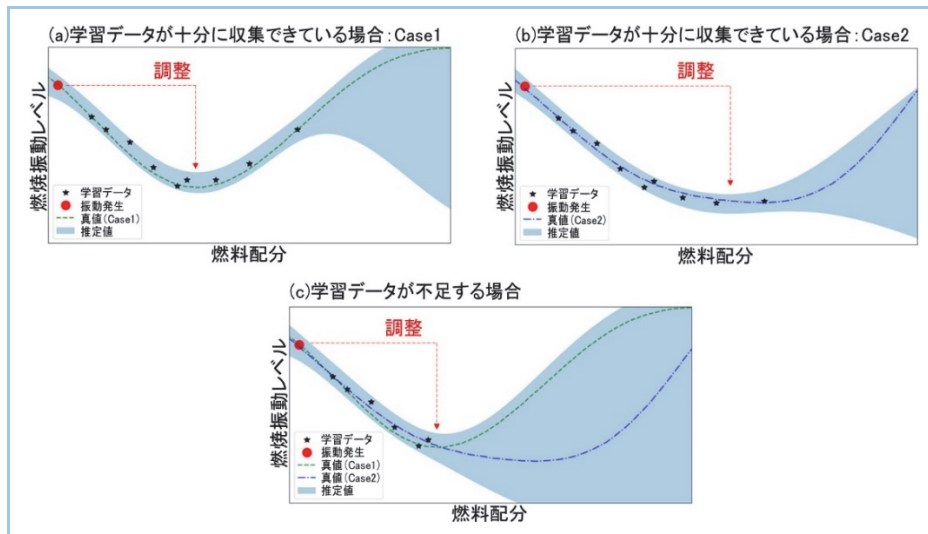


図6 ガウス過程回帰を用いた燃焼振動自動調整の様子

2.3 ガウス過程回帰を応用した運転データの自動探索技術

2.2 節に示す手法において、運転実績のない領域を減らすことで、積極的な調整が可能な領域が増えることになる。そこで、図7に示すようにガウス過程回帰による推定不確かさが大きい領域に対して、自動で運転状態を遷移させ、同領域のデータを探索・収集することを考える。本探索では、燃焼振動が許容値内に安定するように、自動的に少量ずつ燃料配分を増減させることにより周囲の運転点を探索し、これらの運転点における燃焼状態に関する特性データを収集することで、より多くの運転データを蓄積し、信頼性の向上を図る。

なお、自動探索時は、探索前にガウス過程回帰による探索候補点の評価を行っており、燃焼振動が許容値を超えるリスクがある場合には、当該候補点を探索対象から除外することで、安全に運転データの探索・収集を行っている。

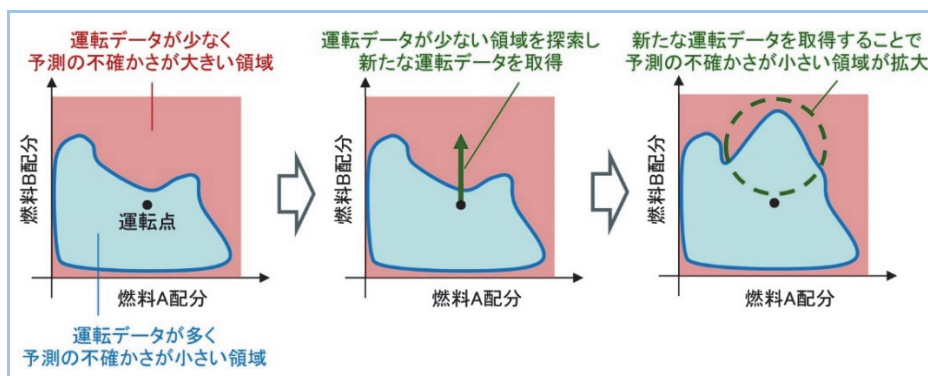


図7 ガウス過程回帰を用いた自動探索のイメージ図

3. 実証発電設備での検証結果

本システムは、兵庫県高砂市にある実証設備複合サイクル発電所(第二 T 地点)(図 8)にて実機検証を行った。手動で燃料配分を調整することで意図的に燃焼振動を発生させ、本技術によって燃焼振動を低減できるか否かを検証した。検証の結果、図 9 に示すとおり、燃焼振動発生時に適切に燃料配分を調整し、機器を損傷することなく燃焼振動を迅速に低減できることを確認した。



図8 実証発電設備

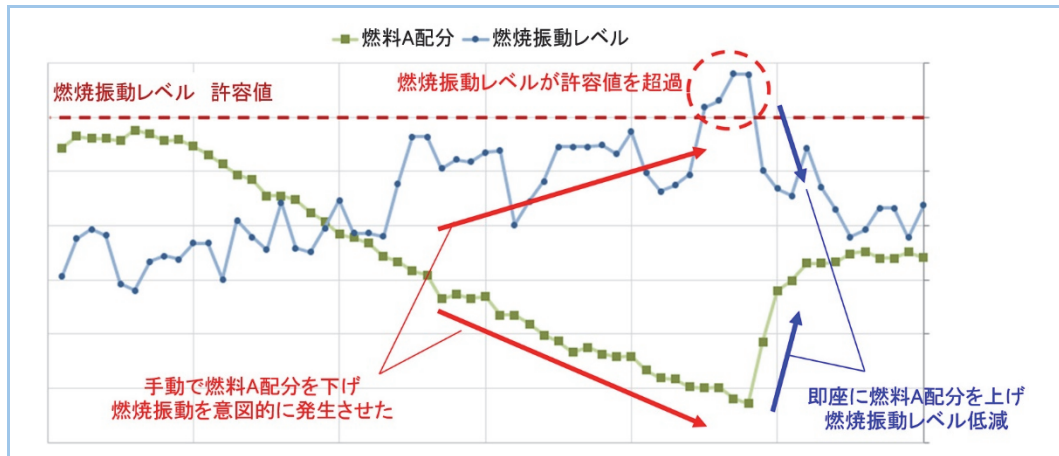


図9 実証発電設備での試験結果

4. まとめ

本報では、燃焼振動特性を AI がリアルタイムで学習し、AI の予測信頼度を含めた振動予測を行うことで、誤った調整を行うリスクを低減した上で、迅速な燃焼振動抑制を実現する自動調整技術について、その概要と当社実証発電設備での検証結果を紹介した。

本技術は 2022 年度に製品化、第二 T 地点及び商用プラントでの長期検証を完了しており、他商用プラントにも順次展開している。今後開発予定の新型ガスタービンにも対応できるよう、引き続き技術開発を推進していく。

参考文献

- (1) H. Iba, Advanced Monitoring System for Combustor Pressure Fluctuation, International Gas Turbine Congress, 2003.
- (2) 立石, 発電用ガスタービンにおける機械学習技術の制御応用, 航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集, 2022.
- (3) C. E. Rasmussen, Gaussian Processes for Machine Learning, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2006.