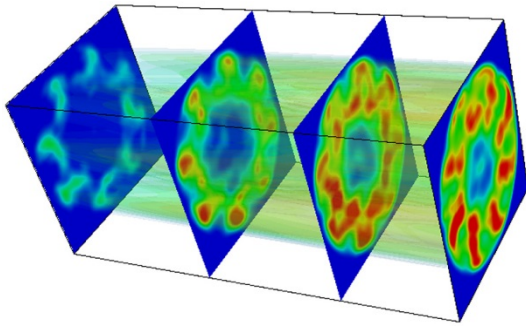


ガスタービン燃焼器内火炎の3次元形状可視化技術

Three-dimensional Visualization of Flame in Gas Turbine Combustor



藤尾 一祐*¹
Ichiyu Fujio

田尻 慎介*²
Shinsuke Tajiri

森脇 敦*³
Atsushi Moriwaki

岡 裕貴*⁴
Hiroataka Oka

池田 拓朗*⁵
Takuro Ikeda

西宮 立享*⁶
Tatsuyuki Nishimiya

三菱重工業株式会社(以下、当社)では、従来火力と比べ高効率かつ運用性に優れるGTCC(Gas Turbine Combined Cycle)の開発を進めている。大型ガスタービンの燃焼器の技術課題として、燃焼振動や低 NO_x 化などがあげられるが、当該課題の解決のためには燃焼器内の火炎の状態の把握が重要である。本報では、燃焼器内の火炎の分布を把握するために開発した計測技術の一つの“ガスタービン燃焼器内火炎の3次元形状可視化技術”について紹介する。

1. はじめに

大型ガスタービンは高効率化を目的とした燃焼温度上昇に伴う NO_x 排出量増加に対応するため、希薄予混合燃焼方式を採用している。しかし、当該方式は拡散燃焼方式と比較して燃焼状態が不安定であり、燃焼振動やフラッシュバック(逆火)の発生リスクが高いことが技術課題としてあげられる。燃焼振動は圧力変動と発熱変動との相互作用によって引き起こされるものであり、燃焼器内の発熱率分布と密接な関係があると考えられる。また、NO_x は局所的な燃焼ガス温度に大きく影響を受けるため、やはり発熱率分布と密接な関係があると考えられる。したがって、安定燃焼と低 NO_x 化を両立するためには、燃焼器内の発熱率分布を把握することが重要である。

燃焼器内の発熱率分布を評価するための簡便な計測手法として、OH ラジカル自発光計測法があげられる。この手法は、燃焼に伴い励起された OH ラジカル(OH*)の化学発光強度分布が発熱率分布と相関があることを利用して、火炎内の発熱率の相対分布を取得する手法である。例えばガスコンロの火炎で形成される青い炎は、同じく励起された CH ラジカル(CH*)などの化学発光に由来するものであり、この発光強度分布を可視化することは火炎の形状を可視化することに相当する。

当社では、これまでこの OH ラジカル自発光計測手法や OH 平面レーザー誘起蛍光法(OH-Planar Laser-Induced Fluorescence, 以下 OH-PLIF 法)を用いて発熱率変動と燃焼振動の関係を評価してきた^{(1)~(3)}。しかし、従来の OH ラジカル自発光計測手法で計測できるのは光路方向の積算値であり、3次元的な発熱率分布を評価することはできなかった。また、OH-PLIF 法は平面分布計測であり、やはり3次元的な発熱率分布を評価することはできない。そこで、当社では、OH ラジカル自発光計測法を3次元分布再構成手法である CT(Computed Tomography)法と組み合わせることにより、燃焼器内の3次元的な相対発熱率分布を可視化する計測技術を開発した。本報では、当該技術の概要と実際の燃焼器内火炎の3次元可視化結果について紹介する。

*1 総合研究所 燃焼研究部

*2 総合研究所 燃焼研究部 主席チーム統括 工博 技術士(機械部門)

*3 総合研究所 主席プロジェクト統括

*4 デジタルイノベーション本部 EPI 部

*5 総合研究所 サービス技術部

*6 総合研究所 燃焼研究部 主席研究員

2. 自発光 CT 解析プログラム構築と検証

実燃焼器に対して自発光 CT 計測を適用するにあたり、計測対象である燃焼器の火炎に対して適切な CT 処理手法を導入する必要がある。本章では CT 処理の解析プログラム構築とその検証結果について述べる。

まず、解析処理プログラムの基本アルゴリズムとして逐次近似手法のうちの1つである Ordered Subset Expectation Maximization (OS-EM) 法⁽⁴⁾を用いた。OS-EM 法はアーチファクト(像を再構成する際に生じる処理上のエラー)が少ない解析結果を得られる再構成手法であり、医療用 CT の解析などでも用いられる Maximum Likelihood Expectation Maximization (ML-EM) 法の解析処理を高速化した手法である。燃焼器内火炎の自発光分布 CT 処理の概要を図1に示す。

CT 解析処理を行うためには、多方向からの画像が必要である。医療分野で用いられる X 線 CT は X 線管と検出器が回転することで多方向の画像を取得する。しかし、この方式は対象物が時間的に変化しないことを前提とした方式であり、時間経過で変化する可能性のある燃焼器内の火炎への適用は難しい。したがって、本報で紹介する計測システムにおいては、時間変化の影響を排除するために12台のカメラを用いた同時撮影を行った。OHラジカル自発光は紫外光であるため、紫外光を計測するための特殊なフィルタ及びカメラを用いて撮影した。得られた12枚の自発光画像を前述した OS-EM 法により再構成し、火炎の3次元分布を得た。

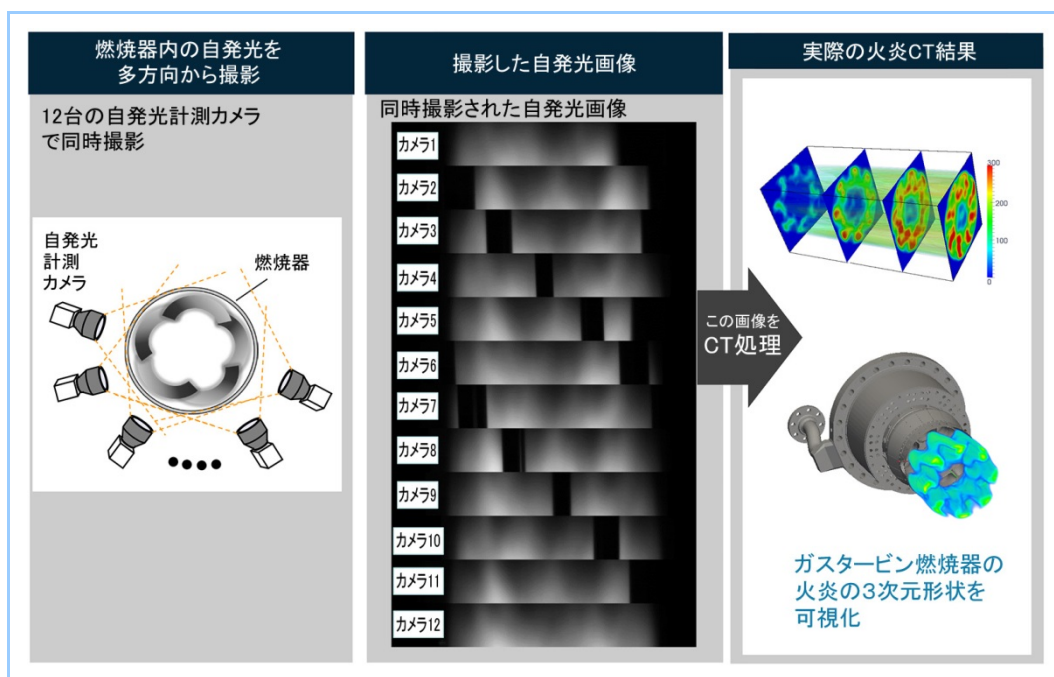


図1 燃焼器内火炎自発光の CT 処理概要

本計測技術の開発にあたり CT 処理プログラムの妥当性確認を複数の単純火炎(円筒バーナー)を用いて行った。CT 計測を目的とした多方向撮影を適用する場合は、視野に火炎の死角となる構造物がないことが好ましいが、ガスタービン燃焼器等実際の燃焼器に適用する際には光学窓を保持するための柱などが構造上必要となり、これらが視野範囲に死角を形成する。そこで、この構造体の死角領域の影響を除外して再構成する手法を開発した。通常 CT 処理対象の画像で死角によって発光強度が実際よりも低い、あるいは0と検出された場合、CT 処理の過程ではその領域に火炎がないものとして扱われ、再構成した画像では死角に入った火炎の発光強度は低く評価されてしまう。そこで、本処理プログラムでは死角領域を事前に特定し、画像内の死角領域のデータは再構成時に無効化して処理できるようにした。例えば、12 方向から撮影した画像のうち、3方向の画像である特定の領域の火炎が死角に入ったとき、残りの9方向の画像から取得したデータによる拘束条件でその領域の発光分布を再構成するイメージである。

死角を考慮した CT 処理プログラムの妥当性を確認するためにその検証試験を行った。図2に死角領域を模擬した試験の概要を示す。計測対象は4本の円筒バーナーで構成されており、周囲に死角領域を形成する構造体を配置した。当該試験においては、カメラ1台をバーナーの周囲で回転させることで多方向からの画像を撮影した。撮影した画像をもとに、CT 処理プログラムを用いて3次元分布を再構成した。

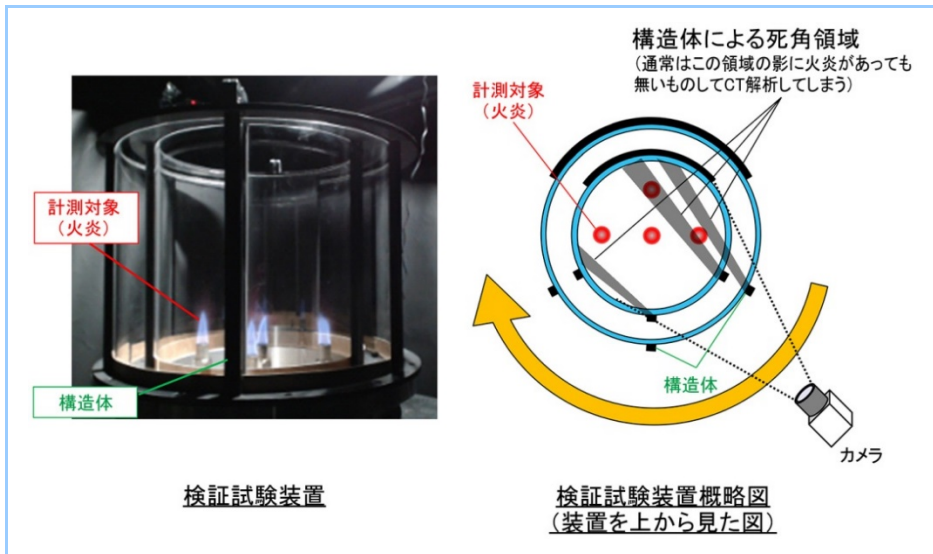


図2 構造体の死角領域を模擬した検証試験の概要

図3に検証試験の結果を示す。いずれも4本の円筒バーナーを撮影し、再構成しているが、構造体のない石英管のみの場合は問題無く再構成できた。構造体による死角がある場合、上述した死角を考慮しない場合は、当量比や流量が他とほぼ同じであるにも関わらず、一部の火炎の発光強度が小さく再構成され、火炎形状も崩れた結果となり、正しく再構成されていない。一方で、死角を考慮した処理を適用した場合は、4本のバーナーの発光強度がほぼ等しく、妥当な結果が得られた。

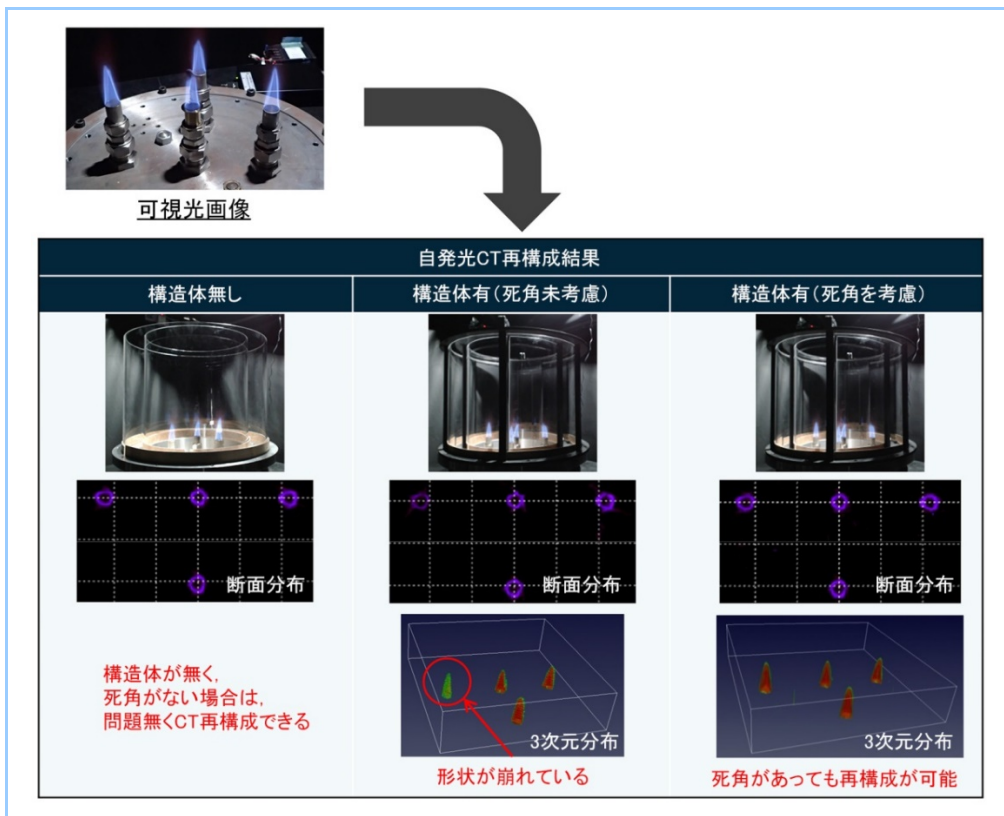


図3 単純火炎を用いた CT 処理プログラムの妥当性確認結果

3. 実機スケール自発光 CT 計測装置の構築

CT 処理に必要な画像を取得するために、実燃焼器の火炎を多方向から撮影できる大型の画像取得システムを構築した。図4に当社で開発した自発光 CT 計測システムを示す。計測システムはアルミフレーム製で燃焼器を取り囲むように燃焼器軸を中心として周方向にカメラ12台を取り付けている。本計測フレームは自立式であり、燃焼器軸方向にトラバースが可能である。図5に計測システムの構成図を示す。カメラ制御用 PC1 台につき2台のカメラを制御し、各々の制御 PC は Ethernet ハブを経由して解析用 PC を用いて制御する。

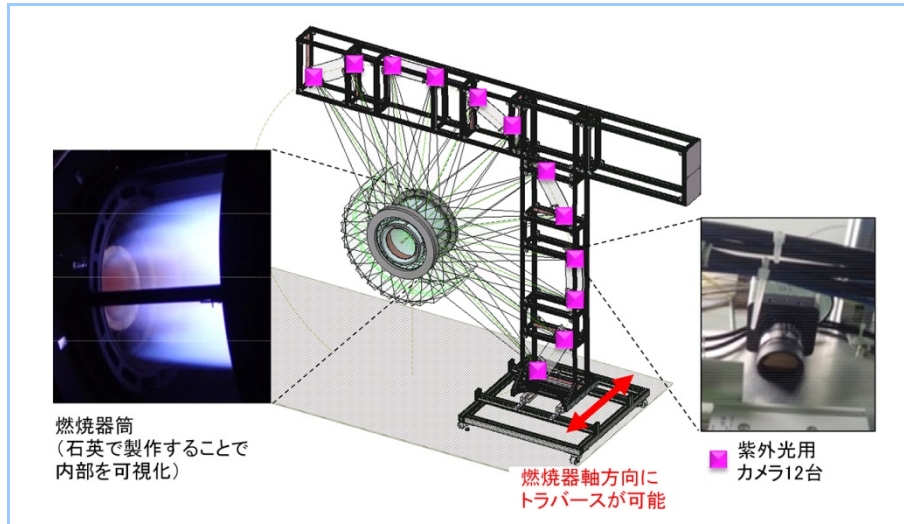


図4 自発光 CT 計測システムの概要

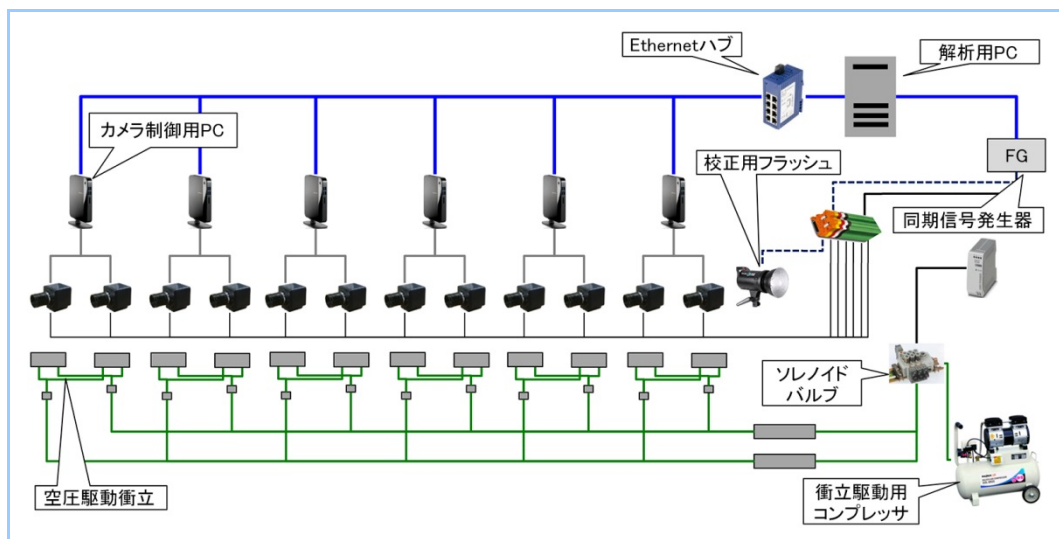


図5 自発光 CT 計測システムの構成図

4. 大気圧燃焼試験への適用

開発した自発光 CT 計測システムを用いて、当社ガスタービン燃焼器内の火炎を可視化した。検証試験には当社ガスタービン燃焼器大気圧燃焼試験装置を使用し、計測対象として当社開発の実燃焼器供試体⁽⁵⁾を用いた。通常の燃焼試験においては燃焼筒内の火炎は見えない状態であるが、本検証試験においては燃焼器内部の自発光を計測するため、燃焼筒を石英で製作することにより可視化した。当該燃焼筒の模式図及び写真を図6に示す。石英製の燃焼筒は二重管となっており、内側の石英管と外側の石英管の間に空気を流すことで内側の石英管を冷却している。

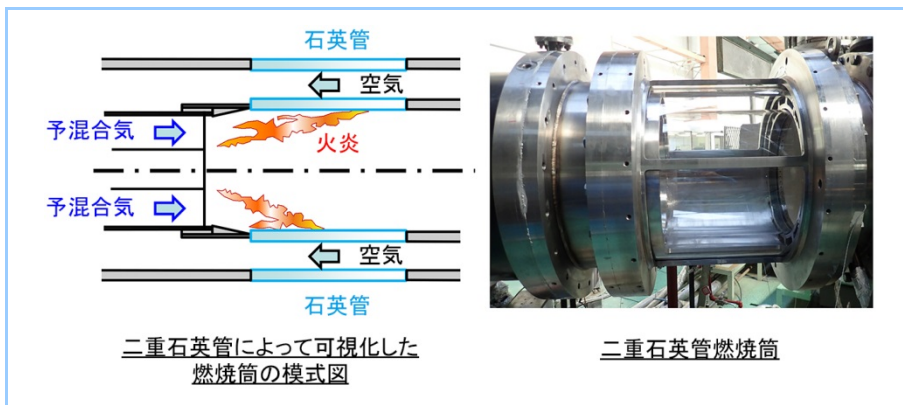


図6 二重石英管燃焼筒

図7に自発光 CT 計測システムを組み込んだ当社の大気圧燃焼試験装置を示す。自発光 CT 計測システムは上述した燃焼筒を囲むように配置している。



図7 自発光 CT 計測システムを組み込んだ当社の大気圧燃焼試験装置

予混合火炎条件における自発光 CT 計測結果を図8に示す。予混合火炎においては、旋回流による花卉状の火炎が形成されており、周方向に細かに分布が変わる3次元的な火炎構造が確認できる。このような3次元的で複雑な火炎の構造は燃焼 CFD 解析においても確認されており、当該計測手法がガスタービン燃焼器内の火炎のような複雑な火炎形状を取得できることが確認できた。

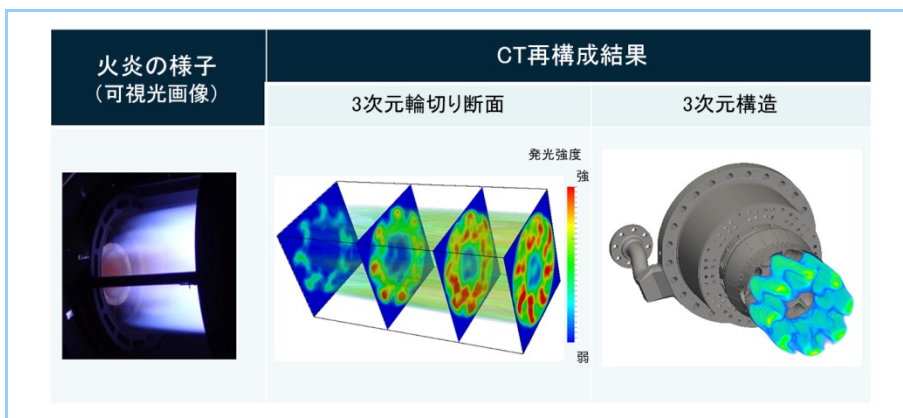


図8 燃焼器内火炎の可視化結果

得られた相対的な発熱率の3次元分布が妥当な分布であることを確認するため、燃焼CFD解析結果との比較を行った。図9に発熱率の断面内積算値の流れ方向分布と自発光輝度の断面内積算値の流れ方向分布の比較を示す。位相の異なるいずれの断面においても発熱率のピー

ク位置が一致している。このことから、本自発光 CT 計測を用いることで燃焼器内の高発熱率の領域を適切に把握できることが確認できた。

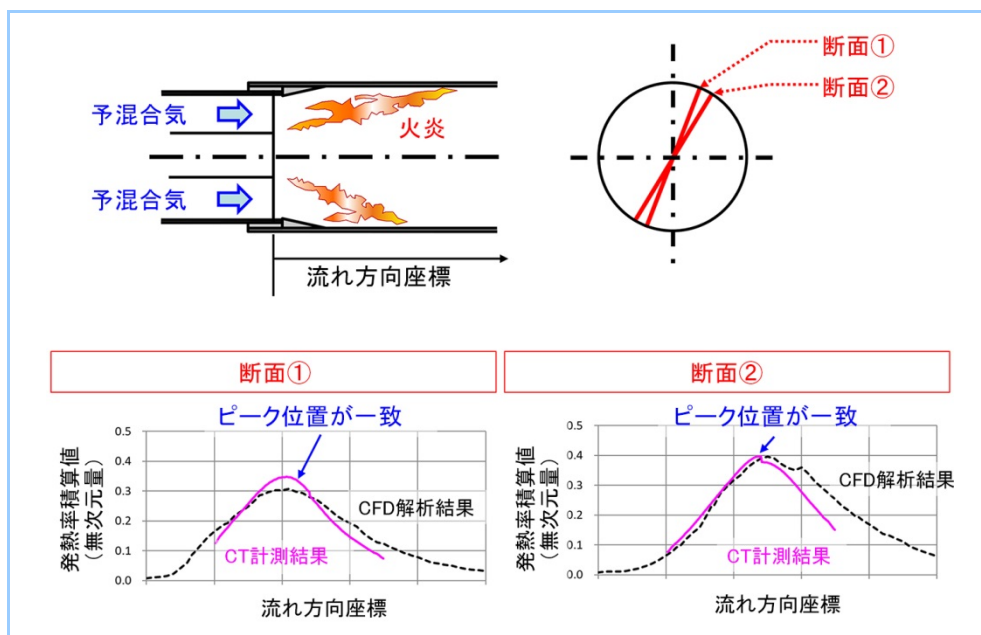


図9 燃焼 CFD 解析の発熱率分布と自発光 CT 計測による自発光輝度分布の比較
(断面内積算値の流れ方向分布)

5. まとめ

本報では、ガスタービン燃焼器内火炎を対象とした自発光 CT 計測による燃焼器内火炎の3次元可視化技術について紹介した。本技術の適用により、当社の実燃焼器の3次元的な火炎形状を初めて可視化することができた。また、今後燃焼器開発を進めていく上で、設計した燃焼器の発熱率分布を実際に可視化・評価できる技術を確立した。さらに、本計測技術により取得したデータを燃焼 CFD 解析の妥当性検証データとして用いることにより、燃焼 CFD 解析技術の高精度化にも役立てることができると考えられる。今後は水素・アンモニア焚き燃焼器開発における燃焼評価等において適用を検討していく。

(謝辞)

本成果の一部は、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した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, JPNP16002) の結果得られたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) Saito, T. et al., Measurement of Flame Dynamics of a Gas Turbine Combustor by Using Optical Method, Proc. of ACGT2014, ACGT2014-0093.
- (2) Isono, M. et al., Numerical and Experimental Investigation of the Flame Transfer Function in the Full-Scale Gas Turbine Combustor, Proc. of IGTC 2015, pp. 1438-1447.
- (3) Fukuba, S. et al., Experimental and Numerical Investigation of DLN combustor for A Heavy-Duty Gas Turbine, Proc. of GPPF 2017, GPPF-2017-165.
- (4) Hudson, H. et al., Accelerated Image Reconstruction Using Ordered Subsets of Projection Data, IEEE Trans Med Imaging vol.13 (1994) pp. 601-609.
- (5) Tanimura, S. et al., Advanced Dry Low NO_x Combustor for Mitsubishi G Class Gas Turbines, Proc. of ASME Turbo Expo 2008, GT2008-50819.