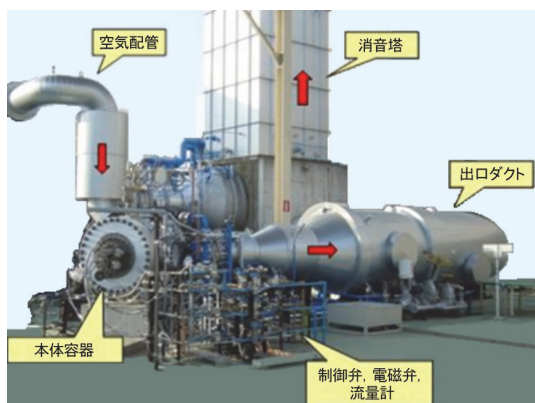


デュアル焚きガスタービン向け 油焚き燃焼器の開発を支える実験解析技術

Combustion Technology Supporting the Development of Oil-Fired Combustors for Dual Fuel-fired Gas Turbines



野田 純司^{*1}
Junji Noda

宮崎 洸治^{*2}
Koji Miyazaki

青木 虹造^{*1}
Kozo Aoki

橋口 和明^{*3}
Kazuaki Hashiguchi

環境保全、CO₂ 排出削減を背景に、ガスタービン燃焼器における高性能・高効率のニーズが高まっており、特にデュアル焚きガスタービン燃焼器(以下、GT 燃焼器)には油焚き時にガス焚き時と同等の性能が求められる。当社では、油燃料ノズルの開発に CFD 解析を利用すべく取り組んでいる。また新たな要素試験手法としてブローダウン燃焼試験装置を開発し、短時間ながらも実機相当の油焚き燃焼試験でのスクリーニングを可能とした。さらに、小型自発光プローブを開発し、油焚き燃焼器内の発熱分布計測を実現した。

1. はじめに

GT 燃焼器には、ガス焚き燃料を代替する油焚きのニーズがある。ガス焚きに併せて油焚きにも対応するデュアル焚き燃焼器には、油焚き時においてもガス焚き時と同等の性能が求められる。

GT 燃焼器の課題として、燃焼器メタル温度の低減、燃焼安定性、窒素酸化物(NO_x)などの排出抑制が挙げられる。これらの性能を向上させるためには、噴射燃料が燃焼するまでの間にたどる微粒化・蒸発や空気との混合・燃焼といった複雑な現象を把握する必要がある。さらに、燃焼器開発では、短期間・低コストでの燃焼器供試体スクリーニングが求められる。

そこで本報では、上記課題解決に向けた以下の実験解析技術について概説する。

- ① 液体燃料の気液界面追跡解析
- ② ブローダウン燃焼試験装置によるスクリーニング
- ③ 火炎発熱率分布計測プローブの小型化

2. GT 燃焼器検証手法の開発

(1) 液体燃料の気液界面追跡解析

燃料ノズルは燃焼器性能を決定づけるうえでのキーデバイスであり、燃料ノズル開発時に CFD の気液界面追跡解析を利用すべく取り組んでいる。本解析モデルは、噴射孔直下の液柱・液膜部から液滴へ分裂するまでの自由表面流れには VOF (Volume of Fluid) 法を適用し、その後の液滴飛散を DPM (Discrete Phase Modeling) 法で解く手法であり、計算コストと精度の両立を図るものである。液体燃料の微粒化と噴霧分布を評価するため、商用汎用コードである ANSYS Fluent (2019 R3) の VOF to DPM モデルを用いて、横風中へ斜め方向から液体燃料噴射をした解析例を図1に示す。この結果は、Fuller らによるモデル式⁽¹⁾の軌跡外縁とよく一致していること

*1 総合研究所燃焼研究部 工博

*2 総合研究所燃焼研究部 理博, 工博

*3 総合研究所燃焼研究部 主席研究員 工博

が分かった。また VOF to DPM 解析では噴霧外縁の他に空気流とのせん断による微粒化や、液柱分裂長さの情報も得ることができる。このように、CFD 解析技術をより複雑なノズル形状・気流条件に適用し下流噴霧分布を予測することができれば、ノズル開発に有用なツールとなる。

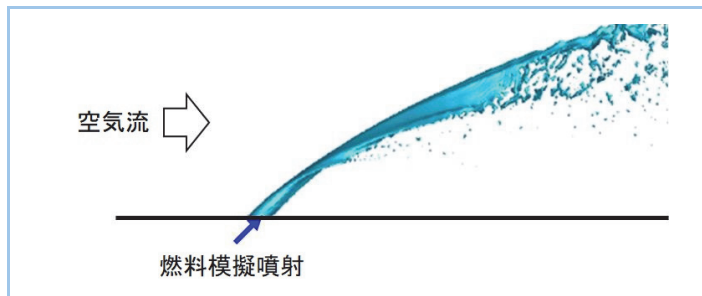


図1 CFD (VOF to DPM モデル) 解析例

(2) ブローダウン燃焼試験装置によるスクリーニング

上記 CFD 解析や要素試験で開発・選定したノズルに対し、燃焼試験にて性能検証している。燃焼試験には、対象とする現象の代表スケールを合わせることを求められる。例えば流動場を合わせる場合はレイノルズ数やマッハ数が、更に燃焼場においては温度や燃料滞留時間も合わせる必要がある。特に油焚き燃焼器においては、噴射された燃料は燃焼するまでの間に微粒化・蒸発や空気との混合といった複雑な過程をたどる。GT 燃焼器開発において、これら現象を再現できるように要素試験を実施し、性能評価することが重要である。このため、スケールダウンされた要素試験装置ではなく、実スケール・実機条件の試験装置が必要となる。

実機スケール GT 燃焼器の油焚き試験を可能にするため、ブローダウン式の燃焼試験装置を開発した。これは、圧縮機で蓄圧された空気タンクから主流空気を供給する方式で、バッチ方式の試験を想定したものである。本装置は、空気タンク容量による試験時間の制限があるが、実機と同等の圧力・温度の空気条件での運転が可能である。併せて燃料・添加水も実機相当条件で運転できるため、GT 燃焼器の燃焼流動場を再現した試験・計測が可能である。空気の圧力・温度条件や、燃料油・添加水系統の自由度が高く、GT 燃焼器の据え付けが容易であることから、短期間・低コストでの供試体スクリーニングが可能となる。本装置の外観を図2に、概要を図3に示す。

燃焼用空気は高圧空気タンクから供給・流調された後、空気ヒータを通すことで、GT 燃焼器の入口空気条件が再現される。燃焼器出口には実機ガスタービンの第一段静翼を模擬した第一段オリフィスが設置されており、その下流に背圧制御用の第二段オリフィスが設置されている。油燃料及び添加水は高圧ポンプを通じて燃焼器内へ供給される。空気・燃料・水の各流調弁は最適化された PID 制御下で作動し、燃焼器着火・保炎条件からわずか数十秒の短時間で GT 燃焼器の定格負荷に到達する。

一例として、図4に本ブローダウン燃焼試験装置を用いた燃焼試験の時系列計測データを示す。本例では縦軸に空気流量、燃空比 (F/A)、燃焼器入口圧の各測定値を示し、横軸の時間は負荷上げ開始時刻を原点としている。本グラフから、短時間の負荷上げであっても安定した空気供給や燃焼器圧力上昇が達成されていることが分かる。負荷上げの後、3条件分の F/A において計測を実施し、F/A 変化時においても各値は十分早く追従していることを確認した。その後にパージ操作を行い、試験装置や出口配管内の排ガスが十分に掃気された後に空気を停止した。

本試験では予め、図4に示されるような負荷上げからパージまでの一連のシーケンスを実機制御装置にも使われている DIASYS Netmation®へ入力しておき、試験時はシーケンスの STOP/GO の判定をするのみである。このため試験実施者は試験設備や燃焼器の状態量監視に注力でき、少人数で安全に実機相当条件下での GT 燃焼器の燃焼試験を遂行できる。

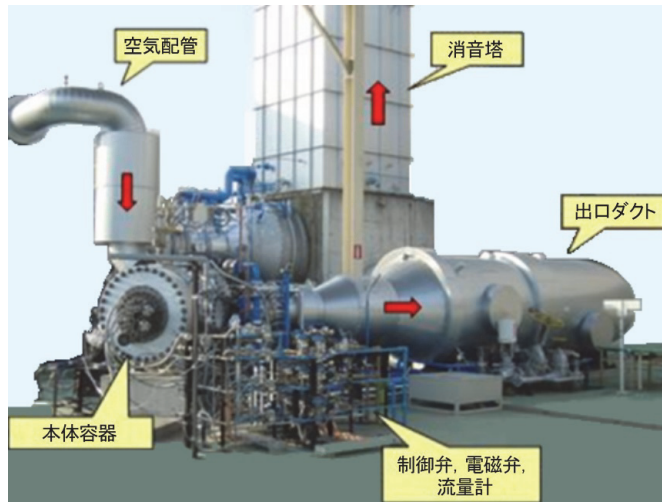


図2 ブロードダウン燃焼試験装置外観

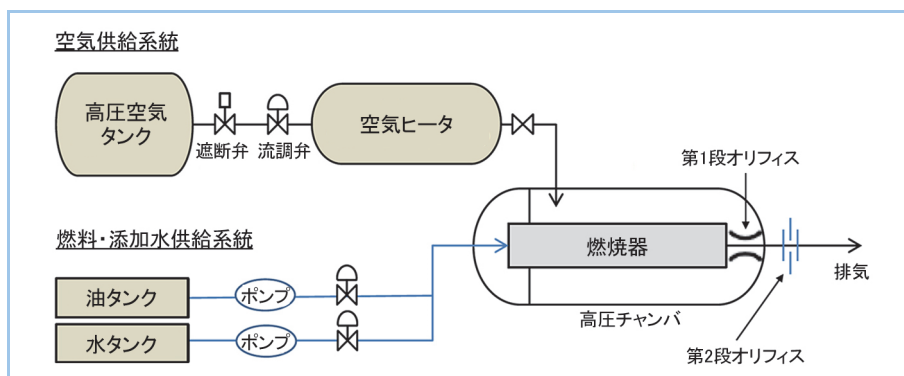
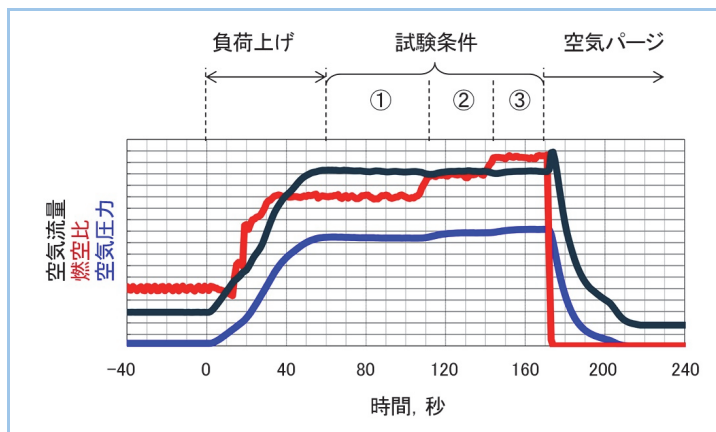
図3 ブロードダウン燃焼試験装置概要⁽⁶⁾

図4 ブロードダウン試験時の時系列データ例

(3) 火炎発熱率分布計測プローブの小型化

上述のブロードダウン燃焼試験装置は、燃焼器内部の現象を評価検証するため、種々計測を行えるよう設計されている。本報では、光学計測によるGT燃焼器内部の発熱率分布計測について紹介する。

燃焼器内部の発熱率分布は、新規開発した小型無冷却タイプのファイバ融着レンズプローブを使用し、火炎の発する紫外光(OH 自発光)計測から評価した。無冷却のため冷却配管が不要となり、冷却材リーク防止やプローブ設置自由度が向上する。本計測システムは、①小型無冷却タイプのファイバ融着レンズプローブ、②超高感度紫外光検出器から構成される。小型光学プローブの燃焼器への設置概略と超高感度紫外光検出器の構成概略を図5に示す。小型光学プローブを燃焼器壁面に設置し、火炎からの紫外光発光を先端レンズにより光ファイバへ集光し、光ファイバを通じて燃焼器外部に伝送する。光ファイバを紫外光検出器に接続し、火

炎の紫外発光強度を測定した。300～340nm の燃焼器火炎発光は主に OH と CO_2 の発光に由来することが知られており、両発光強度は燃焼火炎中の発熱率と正の相関を持つ^{(2)～(5)}。

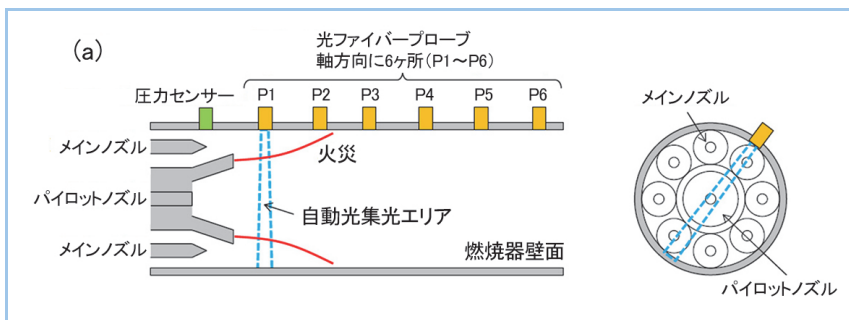


図5(a) 油焚き燃焼器への小型自発光プローブ設置概略図⁽⁶⁾

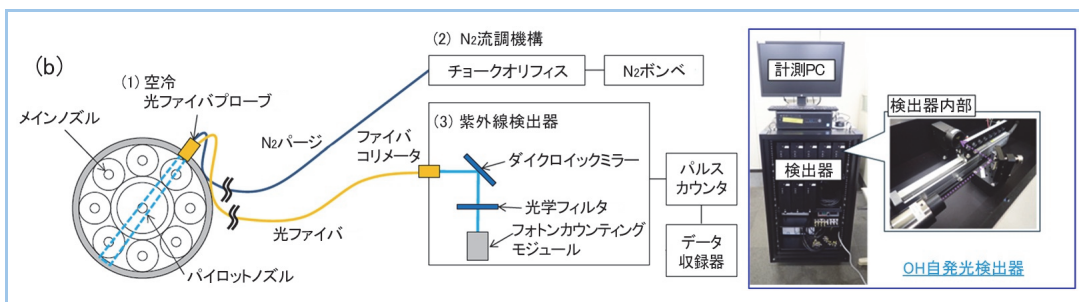


図5(b) 超高感度紫外検出器及び接続概略⁽⁶⁾

図6に新規開発した小型無冷却タイプのファイバ融着レンズプローブ外観を示す。火炎から発せられる紫外光は石英集光レンズ(直径 $\phi 2\text{mm}$)により光ファイバへ集光し、光ファイバ伝送により燃焼器外部に導いた。プローブの無冷却化に向け、光ファイバの耐熱温度を高める必要があり、光ファイバ表面を Au コートしている。また、集光レンズ直径を $\phi 2\text{mm}$ へ小型化することで、燃焼ガス中ダスト(燃料油噴霧や煤など)のプローブ表面付着による受光光量低下を最小限に抑えた。

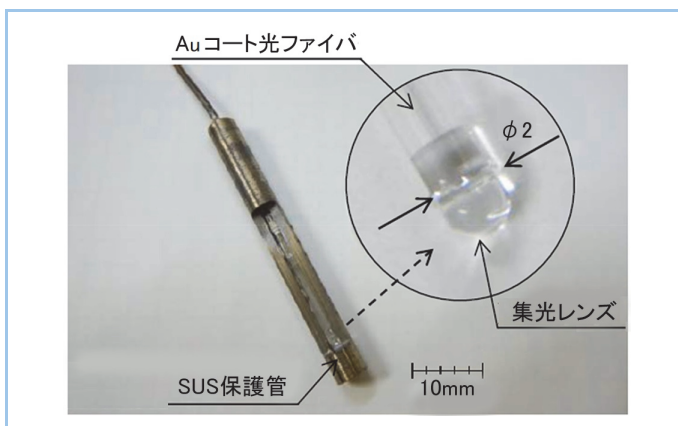


図6 小型無冷却タイプのファイバ融着レンズプローブ外観⁽⁶⁾

ファイバ融着レンズプローブの直径は $\phi 2\text{mm}$ であり、従来プローブに比べ受光面積が小さく、受光光量が弱いため、超高感度な紫外光検出が必要となる。そこで超高感度な紫外光検出方法として、本研究ではフotonカウンティング法(光子計数法)を採用した。光子1つずつ計数する光子計数法は、光由来信号と検出器熱雑音を効果的に分離する方法であり、極微弱光検出に有効である。図5(b)の、超高感度紫外検出器及び接続概略に示したように、GT 燃焼器内部から引き出した光ファイバを光検出器に接続し、ファイバ出口からの光はレンズを用いて平行光とした。300～340nm 以外の光を遮断するバンドパスフィルタを通じて、光検出器へ照射し、火炎中の紫外発光強度を計測した。

3. 燃焼試験検証結果

本章では油焚き GT 燃焼器の燃焼特性及び燃焼器内発熱率分布について、ブローダウン燃焼試験装置及び小型自発光プローブを用いて計測した結果を以下に示す。また発熱率については、他試験装置で計測したガス焚き結果と比較を行うと共に、油焚きでは燃焼安定/不安定時の比較を行った。

(1) ガス焚き・油焚きの発熱率分布

図7に、本報で述べたブローダウン燃焼試験装置を用いた油焚き⁽⁶⁾（赤い円）と、福場らが報告したガス焚き⁽⁷⁾（青の正方形）の軸方向発熱率分布の比較を示す。発熱率の値は、各条件の最大値で正規化している。ガス焚きと比較して油焚きの方が、より広い発熱率分布を測定した。

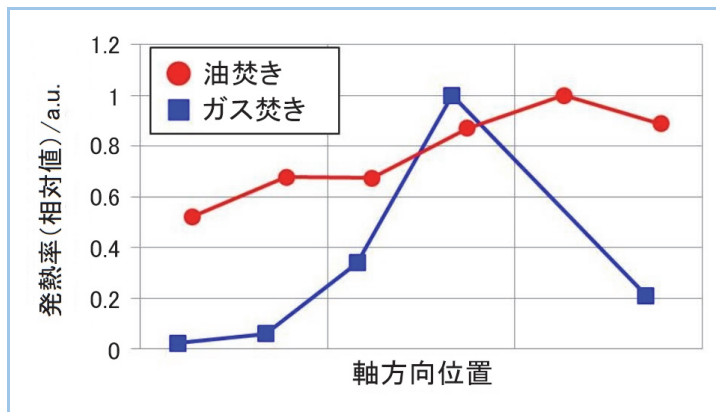


図7 油焚き及びガス焚き時の GT 燃焼器内発熱率分布比較⁽⁶⁾

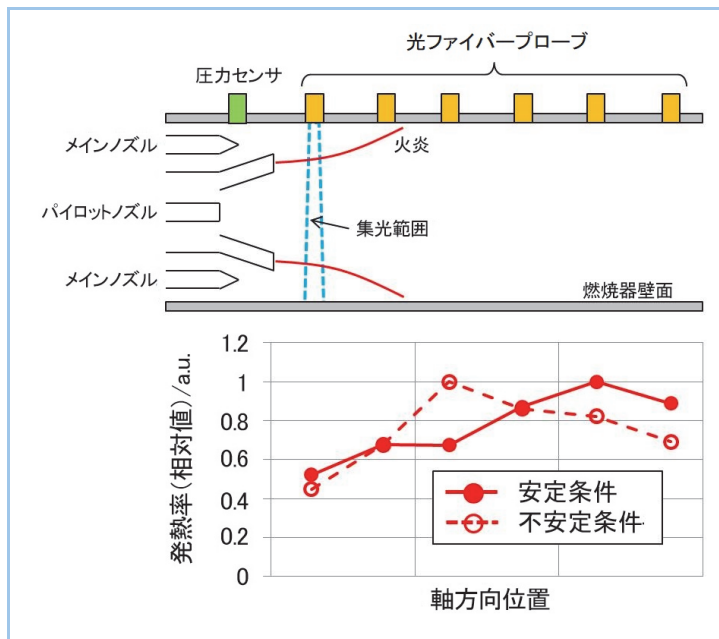


図8 油焚き安定/不安定時の発熱率分布⁽⁶⁾

(2) 安定/不安定時の発熱率分布

油焚き GT 燃焼器の安定/不安定時の発熱率分布を図8に示す。発熱率の値は、各条件の最大値で正規化している。空気と燃料流量を変化させて発熱領域を上流側へ移動し、安定燃焼させることができた。空気と燃料流量を変化させて発熱領域を上流側へ移動し、安定燃焼させることができた。今後は、本手法で得られる発熱率計測結果から CFD 解析の精度向上を行うとともに、燃焼器の改良により油焚き時の高性能・高効率化を進める。

4. まとめ

油焼きガスタービン燃焼器開発に向けて、CFD 解析活用への取組状況及び、新たな要素試験手法としてブローダウン燃焼試験装置と小型自発光プローブについて紹介した。今後は、本手法で得られる発熱率計測結果からCFD解析の精度向上を行うとともに、燃焼器の改良により油焼き時の高性能・高効率化を進める。

参考文献

- (1) Fuller, R. et al., Effects of Injection Angle on the Breakup Processes of Liquid Jet in Subsonic Crossflows, AIAA paper, 97-2966
- (2) Tachibana, S., An Experimental Study of Combustion Instability in a Staging Fuel Combustor, Proc. AJCPP (2012), 043
- (3) Venkataraman, K. K., Mechanism of Combustion Instability in a Lean Premixed Dump Combustor J. Prop. Power, Vol. 15 No. 6, (1999) p.909-918
- (4) Güthe, F., Chemiluminescence as diagnostic tool in the development of gas turbines, Applied Physics B, Vol. 107, Issue 3, (2012) p.619-636
- (5) Thomas, F., Radiation from High Pressure Hydro-gen-Oxygen Flames and its Use in Assessing Rocket Combustion Instability, (2015) Ph.D. Thesis
- (6) Miyazaki, K. et al., Flame Diagnostics Method for Oil Fired Industrial Gas Turbine Combustors under High Pressure Conditions, IGTC, (2019)
- (7) Fukuba, S. et al., EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF DLN COMBUSTOR FOR A HEAVY-DUTY GAS TURBINE, Proc. GPPF, (2017) p.1438-1447