

ブリルアン光相関領域解析法を用いた光ファイバ温度測定技術による逆火検知への適用に関する実験的検証

Experimental Verification of Applying Optical Fiber Temperature Measurement Technology based on the Brillouin Optical Correlation Domain Analysis to Flashback Detection

野中 正潤*¹
NONAKA Masahiro

勝山 純*¹
KATSUYAMA Jun

熊谷 芳宏*¹
KUMAGAI Yoshihiro

谷 遼太郎*¹
TANI Ryotaro

竹中 一馬*¹
TAKENAKA Kazuma

小宮山 正治*²
KOMIYAMA Masaharu

三戸 慎也*¹
MITO Shinya

ABSTRACT

One of the critical challenges in realizing hydrogen-fired gas turbines is addressing the issue of flashback. This study aims to prevent critical damage to the gas turbine by detecting the occurrence of flashback and controlling the position of flames. We present experimental results validating the effectiveness of flashback detection technology. Using an optical fiber temperature measurement technology based on the Brillouin Optical Correlation Domain Analysis, flashback flames traveling at speeds up to 1.20 m/s inside the combustor were measured in 0.07 sec. These findings confirm the reliability and performance of the proposed detection method, demonstrating its potential applicability in advancing hydrogen-fired gas turbine technology. This experiment serves as a proof of concept using methane as the fuel.

キーワード：ガスタービン，燃焼器，逆火，検知，光ファイバ，温度測定，ブリルアン光相関領域解析法

Key words : Gas Turbine, Combustor, Flash Back, Detection, Optical Fiber, Temperature Measurement, Brillouin Optical Correlation Domain Analysis; BOCDA

1. はじめに

水素社会の実現は、2050年のカーボンニュートラル達成に向けた重要な政策目標である。資源エネルギー庁による2024年9月の試算では、世界の水素需要量は2022年の9500万tonから2050年には約4億3000万tonへと約5倍に拡大することが予測されている⁽¹⁾。その中でも、発電分野の水素需要量は約7400万tonに達し、全体の17%を占める重要な水素利用分野となる。発電分野では、エネルギー変換効率の観点から、大型水素ガスタービンが主要な技術として注目されている。また、2025年2月に公表された第7次エネルギー計画では、水素およびアンモニアを活用した火力発電の脱炭素化が推進方針として明示されており⁽²⁾、水素ガスタービン技術の研究開発が政策の重点項目として位置づけられている。水素ガスター

ビンの確立に貢献するために、我々も水素ガスタービン関連技術の研究開発に取り組んでいる。

水素ガスタービンを実現する上での技術的課題には、燃焼振動の抑制、NO_x排出量の低減、燃焼効率の維持・向上、逆火の低減の4つが挙げられる。逆火に関しては、これまでに主として燃焼器の構造的改良や供給ガスの流速調整といった手法により、その発生の低減が図られてきた。しかし、予混合燃焼方式の採用時に、その発生リスクを完全には抑制できていない。大型ガスタービンでは想定外の運転停止は許容されておらず、逆火により燃焼器やタービン翼の損傷などの重大事故につながる危険性が依然として残っている。このため、水素ガスタービン技術における最重要課題は逆火の低減であると考えられる。本研究では、逆火の検知と遡上した火炎位置の制御を通じて、逆火の問題を解決することを目指している。逆火の検知には、温度測定により火炎位置を特定することを検討しており、ブリルアン光相関領域解析法 (Brillouin Optical Correlation Domain Analysis; BOCDA) に基づいた光ファイバ温度測定技術を採用する⁽³⁾。光ファイバは熱電対と比較して機械的強度と熱時定数が優れており、細線形状によるガスタービン燃焼器

原稿受付 2025年8月29日

査読完了 2026年3月17日

*1 横河電機(株)

〒180-8750 武蔵野市中町2-9-32

E-mail: Masahiro.Nonaka@yokogawa.com

*2 国立大学法人東海国立大学機構 岐阜大学

〒501-1193 岐阜市柳戸1-1

E-mail: komiyama.masaharu.j2@f.gifu-u.ac.jp

に沿うような敷設と1本での分布測定が実現可能である。

本稿では、燃料にメタンを使用し、BOCDA光ファイバ温度測定技術を用いた逆火検知への適用可能性について実験的検証を行った結果を報告する。

2. 実験系および実験条件

2.1 実験設備

Fig. 1に本実験系の概略図を示す。本実験では、原理実証のため燃料としてメタンを使用する。メタンおよび空気の流量をマスフローコントローラで調整した後、燃焼器に供給する。メタン、空気で使用するマスフローコントローラの型番はそれぞれ、MC-20SLPM-D/5M, MCR-500SLPM-D/5Mである。ガラス管上端から20 mm離れた位置に取り付けられた保炎棒近傍で点火棒を用いて着火し、火炎が保炎棒で保持される。BOCDA測定器の測定開始に合わせて、マスフローコントローラによりメタンの流量を調整し、メタン濃度を高くすることで、逆火を誘発させる。逆火発生から火炎が燃焼器に到達し、手動で消火するまでの温度は、ガラス管に取り付けた光ファイバを用いて測定する。加えて、温度測定開始時にBOCDA測定器から高速カメラにトリガ信号を送信し、火炎の撮影を測定と同期させ、火炎の挙動を可視化する。高速カメラにはPhotoron製FASTCAM SA-3 model 120K-M2を使用する。

Fig. 2に当社で試作したBOCDA測定器を示す。BOCDA測定器の測定原理については、参考文献⁽⁴⁾を参照されたい。本測定器は、任意の測定点に対し、光ファイバの延伸方向 ± 15 mmの範囲の周波数シフト量を平均化して測定しているため、空間分解能は30 mmである。周波数測定精度が ± 1 MHzであるため、温度換算後の測定精度は約 $\pm 1^\circ\text{C}$ となっている。1点測定における測定周期は10 msである。周波数の測定レンジにより、測定可能な最大温度は 1247°C であり、これを超える場合、記録される数値は最大温度に固定される。

光ファイバにはMolex社の金コートファイバ

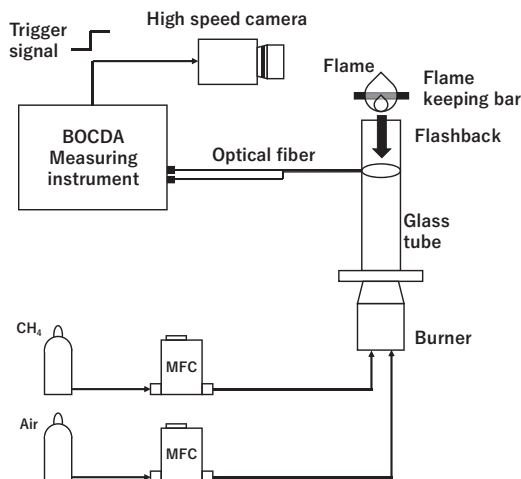


Fig. 1 Experimental system

ASI9.0/125/155Gを使用し、その外観はFig. 3に示す。金コートファイバの仕様は、コア径 $9.0\ \mu\text{m}$ 、クラッド径 $125\ \mu\text{m}$ 、外径 $155\ \mu\text{m}$ 、長さ500 mmである。BOCDA測定器との接続のために、金コートファイバの両端に外径0.9 mm、長さ1.5 mの片端光コネクタ付きナイロン樹脂被覆ファイバを融着接続している。融着箇所は外径2.3 mm、長さ34 mmの補強スリーブを使用し、機械的破損を防止している。

逆火を発生させるために、Fig. 4に示す可変式旋回羽



Fig. 2 BOCDA measuring instrument ⁽⁴⁾

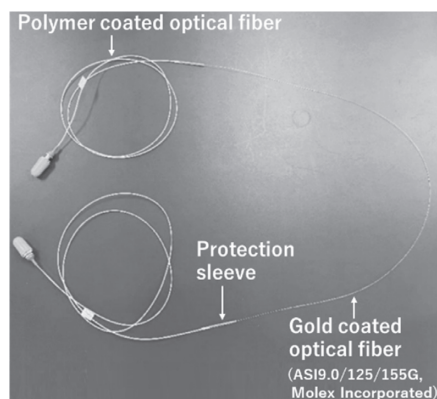


Fig. 3 Optical fiber

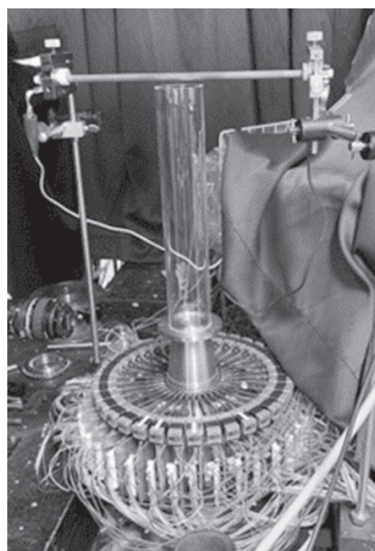


Fig. 4 Combustor

根付燃焼器⁵⁾を使用した。メタンと空気の混合流を燃焼器上流から供給し、流路内に取り付けられた角度変更が可能な羽根で旋回流を生成し、ガラス管内に供給することができる。燃料濃度および羽根の角度を変更することで、逆火発生条件を調整することができる。

ガラス管の材質はSiO₂であり、その寸法は外径65 mm、内径60 mm、長さ350 mmである。光ファイバをガラス管内壁に容易に敷設できるように、管側面に直径11 mmの穴を2か所設けている。

2.2 実験条件

実験条件をTable 1に示す。本実験では、温度測定点を1点とし、その位置はFig. 5のとおりである。Lは壁面から光ファイバの温度測定点までの距離と定義している。また、旋回羽根の角度を40度に固定した。逆火を誘発するために、メタン流量を調整し、Table 1には逆火が確認された際のメタン流量を記載している。保炎棒に

Table 1 Experimental conditions

No.	1	2	3	4
Air flow rate, NL/min	50	50	50	50
CH ₄ flow rate, NL/min	3.25	3.50	6.00	2.88
Air ratio, -	1.61	1.50	0.88	1.82
Gas flow velocity, m/s	0.31	0.32	0.33	0.31
Blade angle, degree	40	40	40	40
Distance from tube inner wall L, mm	0	0	0	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 30

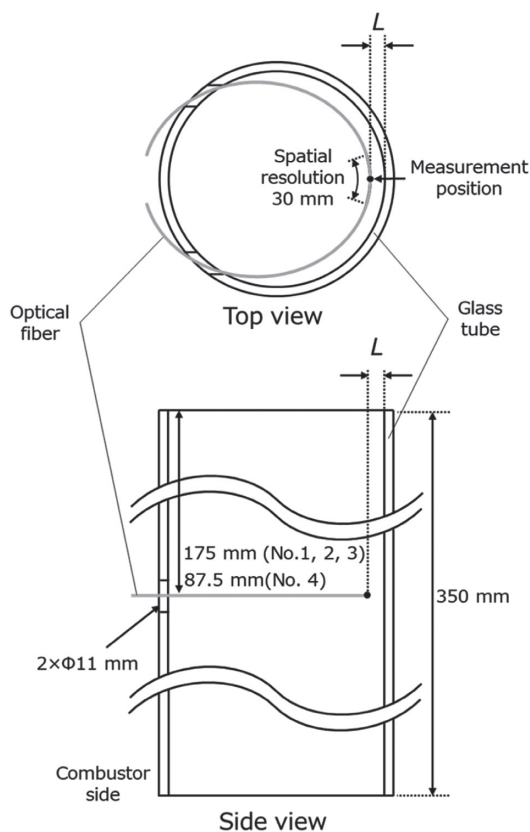


Fig. 5 Setting of optical fiber

火炎が保持される既定のメタン流量に設定した状態で測定を開始し、その後メタンの流量を表1に示す数値まで瞬時に変更し、逆火を発生させた。

条件1から条件3では、異なる伝播速度の逆火火炎による温度変化を測定検証するため、メタン流量を変更した。光ファイバの温度測定点はガラス管上端から175 mm離れた燃焼器出口側の位置に設置し、距離Lを0 mmとして、ガラス管内壁面に固定した。条件4では、火炎の径方向温度分布を評価するため、Lを0 ~ 30 mmの範囲で変化させ、温度を測定した。測定位置の詳細はTable 1に記載のとおりである。この場合の光ファイバの温度測定点は、ガラス管上端から87.5 mm離れた燃焼器出口側の位置に光ファイバを設置した。条件1から条件3と条件4では、ガラス管に対する光ファイバの設置位置が異なっているが、ガラス管径方向に対する光ファイバの測定位置を決定する治具の製造可能長さの限界による。

3. 結果および考察

3.1 異なる伝播速度の逆火火炎に対する測定検証

Fig. 6およびFig. 7それぞれに、条件1と条件3における光ファイバの測定温度履歴を示す。光ファイバセンサの測定開始時刻を0.00 sとして、測定時間の基準とした。また、Fig. 8にFig. 7の時間軸2.60 sから2.85 sに対応するグラフ(a)と0.05 s間隔で取得した火炎位置の連続画像(b)を示す。火炎先端位置が逆火開始時点から燃焼器上面に到達するまでの移動距離を移動に要した時間で除した速度として、伝播速度を算出した。逆火火炎の伝播速度は、条件1、条件2、条件3でそれぞれ0.61 m/s, 0.65 m/s, 1.20 m/sであり、条件3が最も速い伝播速度を有していた。Fig. 8から、火炎が光ファイバの測定点付近を通過する際に、測定温度が上昇することを確認した。2.71 sから2.78 sまでの0.07sの間に41.3°Cの温度上昇が測定され、温度の時間変化率として590°C/sが得られた。

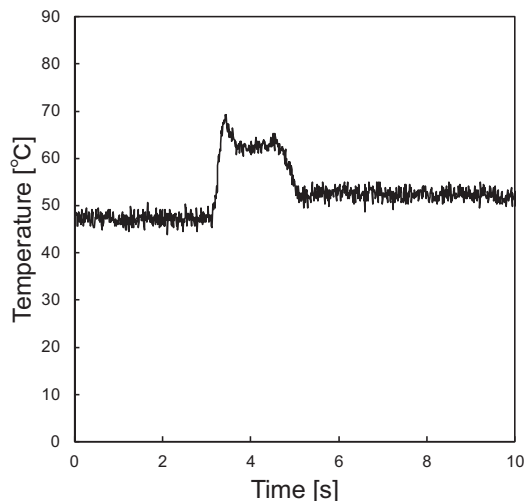


Fig. 6 Temperature time relation of No.1

Fig. 8 (b)では、2.65 sにおいて逆火火炎の下端が光ファイバ位置に到達していることが確認される。しかし、グラフ(a)では同時刻に測定温度の上昇は確認されず、2.72 sから遅れて温度が上昇し始めている。この遅れは、火炎先端がガラス管の径方向に広がらず、光ファイバの測定点から離れており、直接的に加熱されなかったことが原因である。画像(b)の時刻2.70 sでは火炎側面が光ファイバに接しており、この時刻とグラフ(a)における温度上昇開始時刻2.72 sとの差は、BOCDA測定器の測定周期10 msから、最大で0.02 sであり、光ファイバの熱容量による応答遅れを示唆している。

条件3で得られた最大測定温度は約80℃であり、火炎の平衡断熱燃焼温度1913℃より2桁低い。この要因として、本実験系が大气開放のガラス管出口を有し、燃焼管の壁面がガラスのみで構成された非断熱系であることが挙げられる。光ファイバがガラス管壁面に接触する配置であることで熱損失が生じ、その結果消炎が促進された。また、旋回流により火炎が管軸中心へ偏位し、壁面近傍に火炎が存在しなかった。これらの熱損失および発熱量低下の要因が重なったことで、光ファイバで測定された温度は平衡断熱燃焼温度より大幅に低くなった。

3.2 逆火火炎の径方向温度分布測定

Fig. 9に条件4における、(c) $L = 0$ mm, (d) $L = 5$ mm, (e) $L = 20$ mmの場合の光ファイバの測定温度履歴を示す。測定時間の基準については、3.1と同様である。Fig. 9において、0 sから5 sの間の黒線は、逆火が光ファイバ測定点を通過する前の平均温度を示し、黒の破線は逆火が測定点を通過した後の平均温度を示し、時間軸方向の長さは平均温度を算出する際に使用した時間と一致している。ガラス管内壁面から光ファイバ測定点までの距離 L の増加に伴い、最大温度が上昇することが確認された。(d)においては火炎通過後の5.80 sから8.23 sの間に、(e)においては火炎通過後の4.90 sから11.8 sの間に、測定温度が800℃以上の高い状態に維持されてい

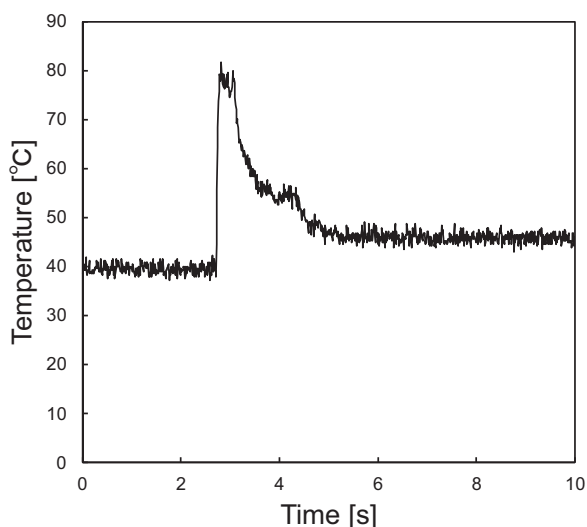


Fig. 7 Temperature time relation of No.3

る。この状態は、逆火発生後に手で消炎を行うまでの間、火炎がガラス管下部に残留し、火炎後流の燃焼ガスによる入熱と光ファイバの放熱が平衡状態に達していたためであると示唆される。消炎後、燃焼ガスからの入熱が無くなるため、測定温度が低下していく挙動が確認された。Fig. 10に、ガラス管内壁面から光ファイバの温度測定点までの距離と測定温度の最大値をプロットしたグラフを示す。 $L = 0$ mmでは最大温度約90℃、 $L = 1$ mmでは最大温度は約550℃まで上昇した。 $L = 6$ mmまでは管内壁からの距離の増加に伴い温度が大きく上昇するが、それ以降では1000℃付近で飽和し、温度変化が緩やかになる傾向が確認された。管中心の $L = 30$ mmでは、測定中に光ファイバが破断した。Fig. 3に示すとおり、本実験で使用した光ファイバは金で被覆されている。火炎の中心付近の温度が金の融点1064℃を超えたため、金の被

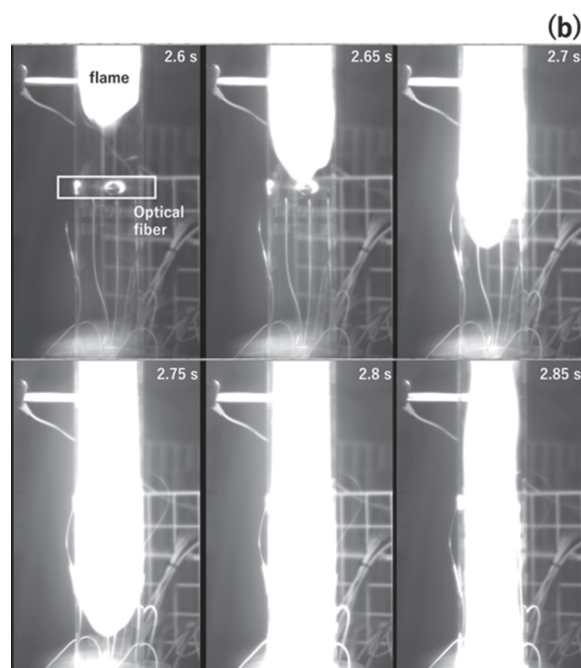
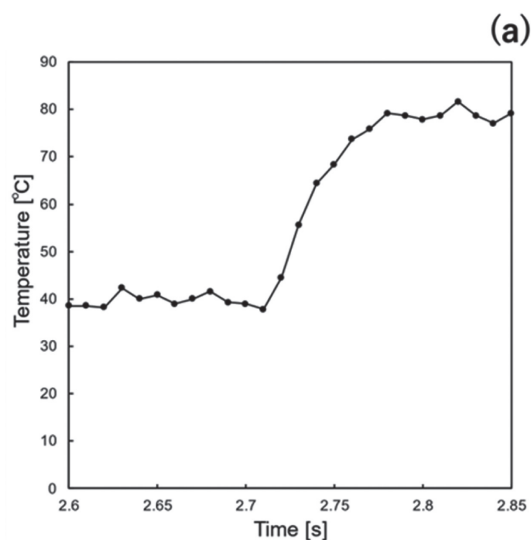


Fig. 8 Flashback flame images of No.3

覆が溶融した。光ファイバ本体である石英ガラスが露出し、加熱による劣化を経て破断したと考えられる。

本条件で得られた測定温度は、位置に依らず平衡断熱

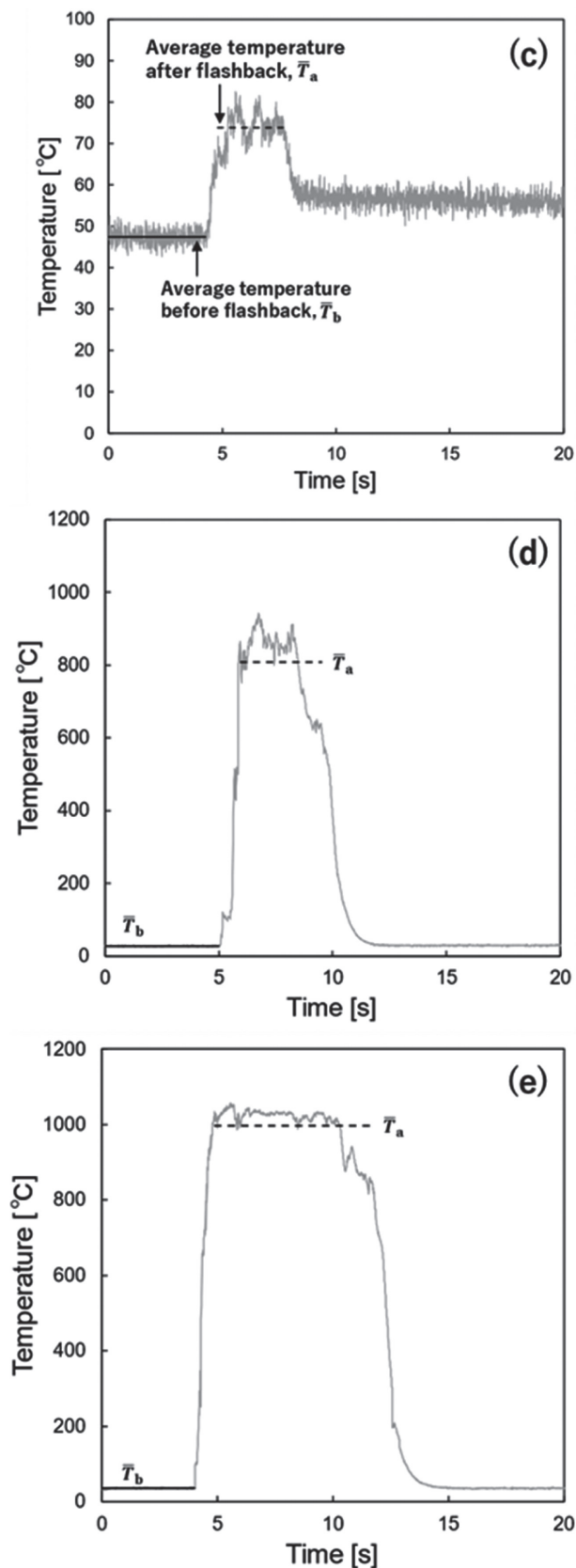


Fig. 9 Temperature time relations of (c) $L = 0$ mm, (d) $L = 5$ mm, (e) $L = 20$ mm

燃焼温度 1913°C を下回った。 $L = 0$ mmのガラス管内壁面上での測定温度と平衡断熱燃焼温度との差は、3.1と同様の熱損失および燃焼領域の偏位に起因する。Fig. 10から、 $L = 0$ mmから6 mmまでに壁面温度から主流温度 1000°C まで上昇しており、この区間に温度境界層が形成されている。境界層内では主流から壁面への熱伝達によって熱が拡散し、測定温度が平衡断熱燃焼温度を下回る。 $L = 6$ mmから30mmの管軸中心付近では、境界層の影響は小さいものの、実験系が大气開放で非断熱なガラス壁構造であるため、外部への熱損失が生じる。この結果、測定温度は平衡断熱燃焼温度より低くなる。

次に、S/N比を評価した結果を示す。火炎が光ファイバ測定点を通過する前の平均温度を T_b とし、火炎が測定点を通過した後の平均温度 T_a とする。温度変化によって逆火の発生を検知するため、光ファイバセンサの信号は、火炎が測定点を通過する前後の平均温度変化量 $\Delta T = T_a - T_b$ とする。また、ノイズは火炎が測定点を通過する前の温度の標準偏差 σ である。逆火を検知する上での光ファイバセンサのS/N比を $20 \log_{10}(\Delta T/\sigma)$ と定める。 $L = 0$ mmでのS/N比は24dBであり、 $L = 0$ mmから5 mmの間では、管中央に近づくにつれてS/N比が増加する。一方で、 $L = 5$ mmから20 mmの間のS/N比は57 dBで一定となった。このため、光ファイバの敷設位置が管壁付近でS/N比が悪く、管軸中心に近づくとも大幅に改善する。

以上の結果から、光ファイバの温度測定点を逆火火炎の中心付近に配置することで、測定温度の上昇に伴いS/N比が向上することが示された。ただし、この配置では、光ファイバが流路を遮ることで、流れに擾乱を与える。一方、温度測定点を逆火火炎から遠ざけて壁面付近に配置することで、S/N比は低下するものの、流れに与える擾乱が軽減される他、光ファイバが受ける熱負荷も低減することが確認された。

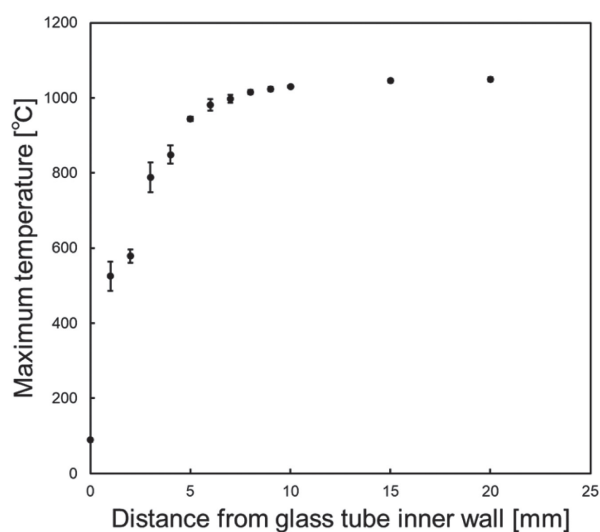


Fig. 10 Maximum temperature - distance from glass tube inner wall relation

4. 結論

燃料にメタンを使用し、BOCDA光ファイバ温度測定技術を用いた逆火検知への適用可能性を実験的に検証した。伝播速度1.20 m/sの逆火火炎に対し、応答遅れ時間0.02 sで火炎位置変化に伴う温度上昇41.3°Cを0.07 sで測定可能であることを確認した。BOCDA測定器の測定周期0.01 sに基づき、測定点数は7点であるため、逆火による温度変化を十分に捉えることが可能であった。加えて、伝播速度が1.20 m/s未満の場合についても、逆火に伴う温度上昇を測定できることを実証し、BOCDA光ファイバ温度測定技術の逆火検知への適用可能性を示した。

逆火火炎の径方向温度分布に関しては、ガラス管内壁面から火炎の中心に向かうにつれて最大温度が上昇する傾向が確認された。光ファイバの温度測定点を逆火火炎の中心に配置することで、測定温度の上昇によりS/N比が向上するが、流れに擾乱を与える。一方、光ファイバの温度測定点を火炎から遠ざけることで、S/N比が低下するものの、流れに与える擾乱が軽減され、光ファイバへの熱負荷も小さくなる。光ファイバの設置位置については今後さらなる検討が必要である。

本実験で設定した逆火火炎の最大伝播速度1.20 m/sは、水素ガスタービン燃焼器を想定し、ガスタービンメーカーへのヒアリング結果に基づいて決定した。この条件では、燃料を水素に変更した場合においても、逆火検知に必要な光ファイバセンサの温度測定点数は十分であると考えられる。しかし、水素とメタンの熱物性の差異により、光ファイバセンサへの伝熱特性が変化する可能性がある。今後は、燃料を水素に変更した実験を実施し、水素燃焼時の逆火に対しても本技術が適用可能であることを検証する。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁, 水素を取り巻く国内外情勢と水素政策の現状について, (2024), pp. 1-34
< https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/024_04_00.pdf > (参照日2025年7月25日).
- (2) 資源エネルギー庁, 第7次エネルギー基本計画の概要, (2025), pp. 1-10
< <https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001-2.pdf> > (参照日2025年7月25日).
- (3) 熊谷 芳宏, 手塚 信一郎, 松浦 聡, ブリルアン散乱光を用いた分布型光ファイバセンサによる高温度測定技術, 横河技報, Vol. 65, No. 2 (2022), pp. 65-68.
< <https://web-material3.yokogawa.com/19/34365/files/rd-tr-r06502-003.pdf> > (参照日2025年8月20日).
- (4) HOTATE, K., HASEGAWA, T., Measurement of Brillouin Gain Spectrum Distribution along an Optical Fiber Using a Correlation-Based Technique – Proposal, Experiment and Simulation –, IEICE TRANS. ELECTRON., Vol. E83-C, No. 3 (2000), pp. 405-412.
- (5) 小宮山 正治, 水野 友輔, 西田 哲, 時間可変旋回羽根による予混合火炎挙動の安定化, 日本機械学会論文集, Vol. 89, No. 926 (2023), DOI: <https://doi.org/10.1299/transjsme.23-00172>, pp. 1-11.