

## 感温性燐光粒子を用いたエンジンシリンダ内温度速度同時計測

染矢聡

産業技術総合研究所

近年、カメラや光源の著しい発達に伴い、あらゆる時間・空間スケールで流れの可視化が行われている。速度分布についてはPIV(particle image velocimetry)が商品化されて定着しているが、特に気体の二次元温度分布計測に関しては、計測手法がほとんど存在しない。

一方、エネルギー環境問題の観点から、ガスエンジンの高効率化、高温動作のヒートポンプ、固体酸化物型燃料電池など高温のガス流れと深い関係を持つ技術の開発が進んでいる。例えば高効率かつ低 $\text{NO}_x$ な内燃機関を実現する燃焼方式として開発されている予混合圧縮自己着火燃焼方式では、空気と燃料の予混合気を燃焼室内に導入し、ピストンの圧縮によって高温・高圧とすることで多点同時に自己着火させる。この方式では、低負荷側は失火、高負荷側はノックにより運転範囲が限定されており、その運転範囲の狭さにより未だ実用化に至っていない。そこで、高負荷時に発生するノッキングを抑制するため、燃焼前の筒内ガスを温度成層化させて、ガスの自着火のタイミングを空間的にずらすことでガス圧力上昇率を緩和させることが検討されている。つまり、この方法の開発では、着火直前の筒内ガス温度分布をいかに適切にコントロールするかが鍵となっており、これを実証・実現するために、温度分布を把握することが重要である。また、このような温度分布を作る際にEGR(Exhaust Gas Recirculation)を利用しており、筒内流動によりEGR分布のコントロールが可能である。このような背景を元に筒内事象解析を行うため、温度分布と速度分布の同時計測が望まれる。しかし、筒内ガスの二次元断面温度・速度の同時計測はこれまで困難であった。

既存の二次元温度計測技術には様々なものがある。例えばレーザー誘起蛍光法(LIF)は研究例が多く、マイクロ・マクロスケールの温度・pH・物質濃度の二次元計測に多用されている。気体中の多次元温度分布計測については、近年、レーリ―散乱を利用する方法の提案が見られるが、未だ開発段階の技術であり、LIFの場合は多くは水溶液を対象とした手法である。蛍光染料は乾燥した状態では発光しないものがほとんどであり、主に水溶液の温度測定に利用されている。

また、蛍光体の燐光発光強度や燐光寿命が温度に依存することが古くから知られている。無機蛍光体の平均粒子径はいずれの種類においても $2\sim 10\mu\text{m}$ 程度である。無機蛍光体は耐熱性が高く、数百度以上の高温条件でも発光強度・寿命が温度依存性を示す。これらを用いた既往の研究では固体壁面温度を測定対象としている。蛍光体の発する燐光強度が比較的弱いことからイメージインテンシファイア付きのカメラを用いて強度法による温度測定をした例が多いが、LIF同様に二色法を適用する必要があるため、複雑な撮影システムを用いていた。

近年、筆者らは、まずオイルの流れを対象として、燐光染料をPIV粒子に焼結させた感温粒子を作成し、比較的シンプルな測定系で撮影した画像から温度速度分布を求める方法を提案してきた。そこで本研究では、温度依存性を持った燐光を発する無機質蛍光体に着目し、高温環境でも利用できる感温性無機質蛍光体をPIVのトレーサ粒子として適用することで、任意の二次元断面における高温ガスの温度・速度分布同時計測を可能とする手法の開発を行う。

今回適用する手法は燐光の寿命を利用することで、1台の高速度カメラを利用したシンプルな計測系により、任意の二次元断面の温度場・速度場を同時に、長時間・空間分解能で計測できる。また、原理的には極低温から約 $1300^\circ\text{C}$ まであらゆる作動流体に適用できるといった特徴を持っており、エンジン筒内ガスの温度・速度同時計測に限らず、蒸気タービン内の流動など従来手法では困難であった高温環境場での温度・速度可視化計測を実現できる可能性がある。

一方で、オイル流れなど簡易的な流れを対象とした測定と異なり、エンジン筒内の高温ガス流れを測定することは必ずしも容易ではない。本報ではまず、無機蛍光体を可視化エンジン内壁に塗布し、高速度カメラを用いて寿命法で

壁面温度分布を測定する。更に、無機蛍光体を可視化エンジン内にシーディングし、PIV と燐光寿命法による温度計測法を組み合わせた温度場・速度場の同時計測法を用いて、エンジン筒内ガスの二次元温度・速度情報を可視化したので報告する。

従来の温度速度同時計測法は二種類の異なる計測システムを同時に動作させるものが多く、光学パスやスペースと行った実験環境、多くのハードウェアといった問題を抱えていた。また、壁面温度を測定可能な手法はいくつかあるが、ガスの温度分布を計測可能な手法はほとんどない。本研究では図 1 の様に、少ないハードウェアで、任意の作動流体の温度速度分布を同時計測することを目的としている。

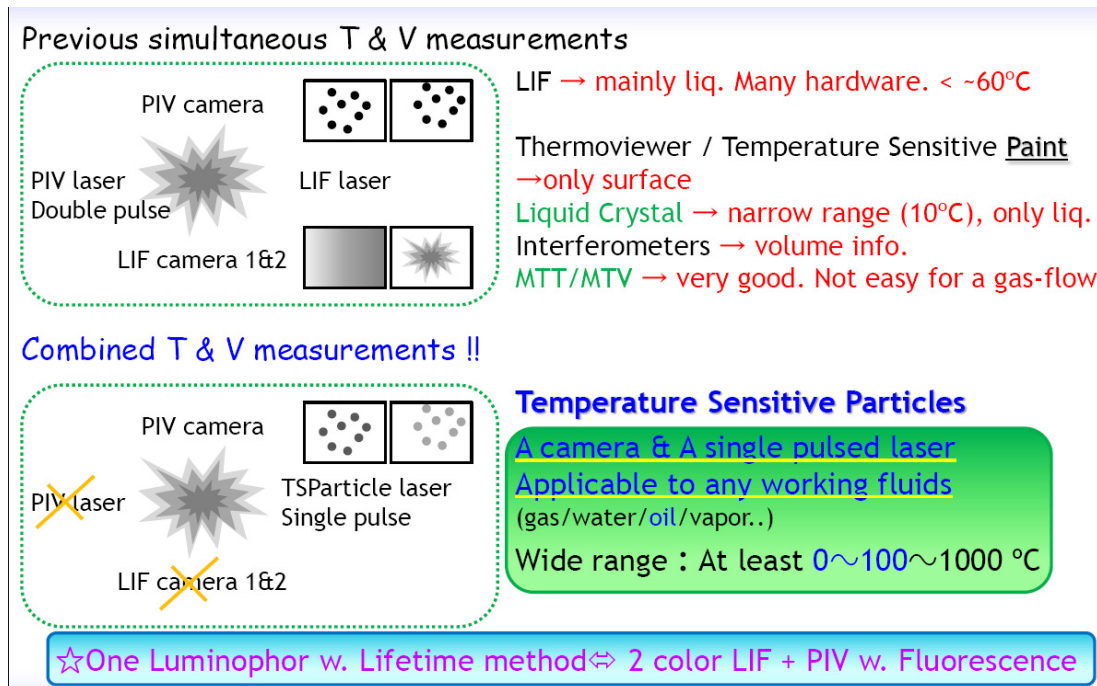
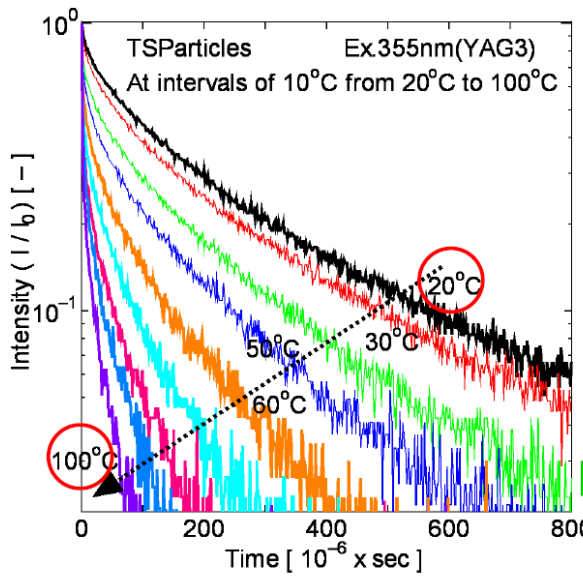


図 1. 計測法開発の背景

本研究では図 2 に例示した、燐光寿命の温度依存性を利用する。燐光粒子を作成し、あるいは蛍光体粒子を利用して、PIV による速度計測と燐光寿命温度計測法をあわせた複合計測法を開発する。

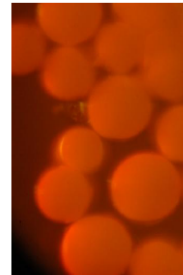
Eu complex : Temperature effect on luminescent lifetime ( sprayed on TLC plate , in Air ,  $\lambda_{ex}=355nm$ )



Wide temperature range (~100 °C)  
1ms @ 20°C / 100µs @ 100°C

High sensitivity(6~7%/°C)

Luminescent dye + PIV particle



TSParticle

(Average diameter 4~15µm)

図 2. 燐光寿命の温度依存性(EuTTA)

測定法の概念を図3に示した. 今回開発する温度速度計測法では, 高速度カメラ1台を用いて, 励起後の燐光粒子画像を複数撮影する. 画像中の粒子パターンの移動を追跡して速度を評価し, また粒子輝度の減衰を評価して温度を求める.

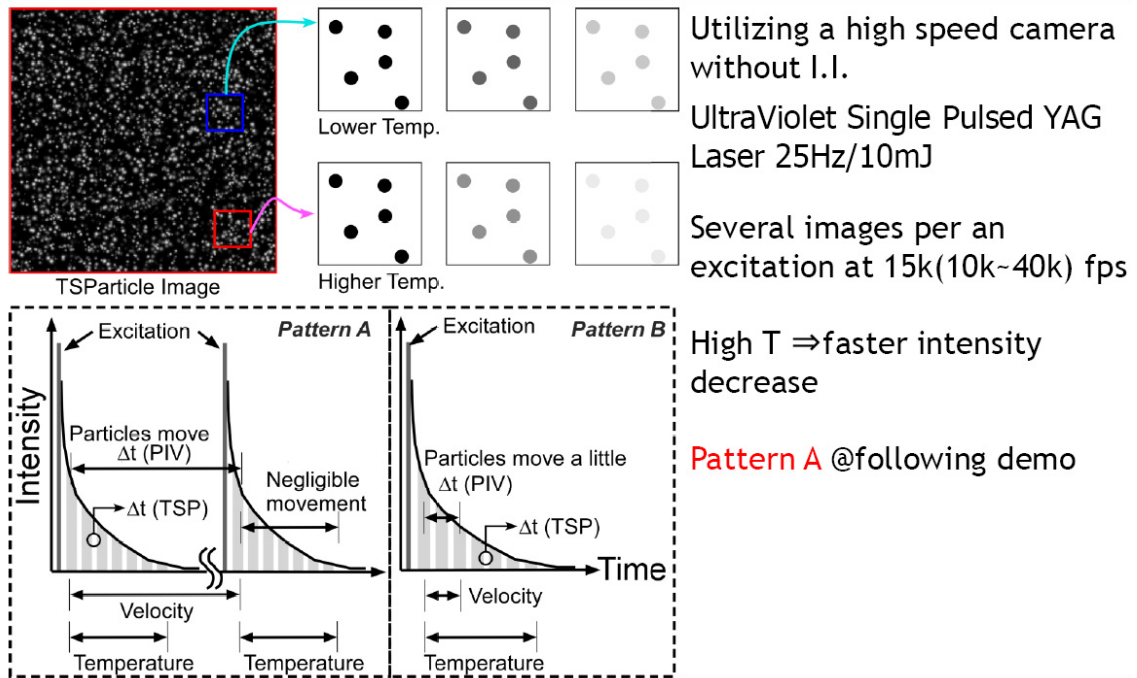


図 3. 燐光寿命温度速度計測法の概念

実験では高温場を対象とした計測のため, 蛍光体を利用した. まず, ガス温度計測の前段階として, エンジン内筒内の壁面温度分布計測を行う. これにより, 蛍光体の適用可能性を見極めるためである.

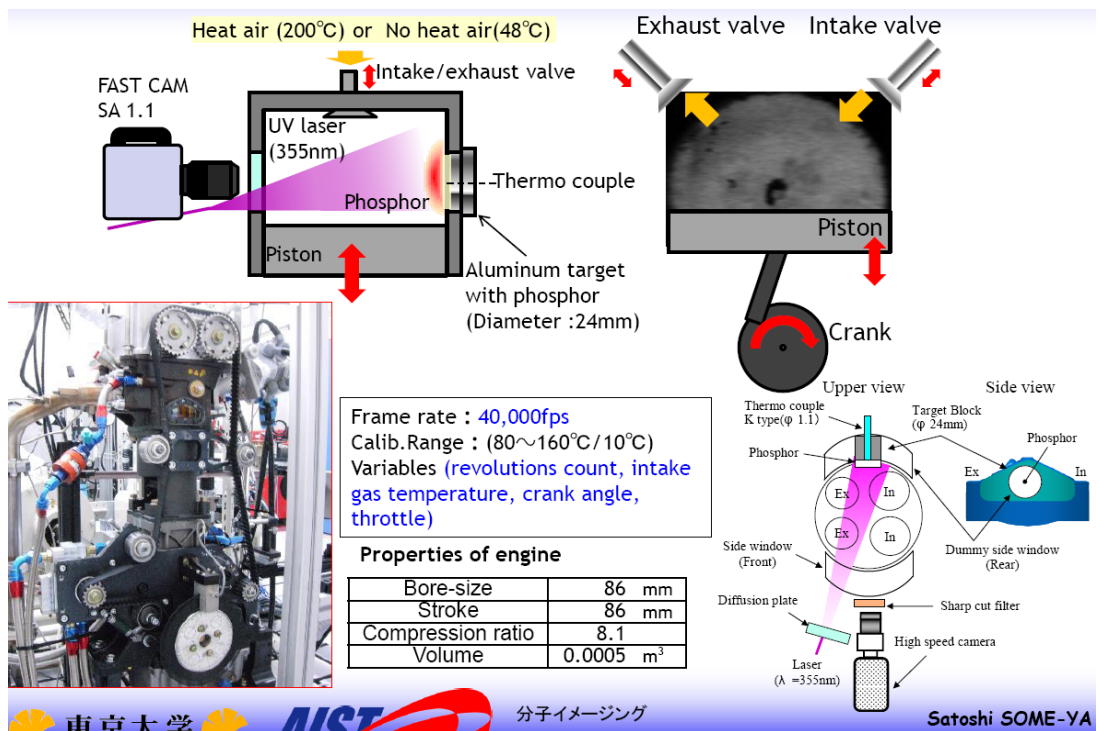


図 4. エンジン内筒内壁面温度分布計測のための実験装置

図 5 に測定結果の一例を示した。燃焼条件、非燃焼条件ともに薄膜熱電対で定点計測した温度と良く一致しており、また、壁温の時間変化にもよく追従している。図 5 右の等高線については、吸気ガスを 200 度まで加熱した場合の壁面温度分布を示している。吸気口側で温度が高くなっている。

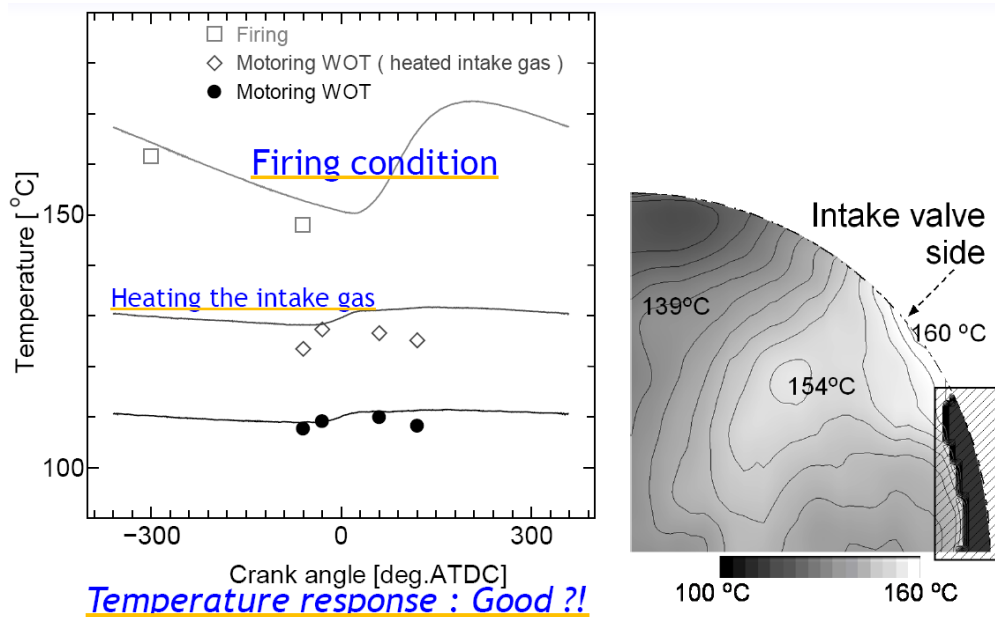


図 5. 壁面温度測定例

壁面温度をよく測定できたため、次のステップとして、エンジン筒内のガス温度速度分布計測を試みた。図 6 は光源及びカメラの配置を示している。図 6 に示す様に、測定はエンジン筒内の水平断面及び垂直断面の 2 種類の断面について実施した。

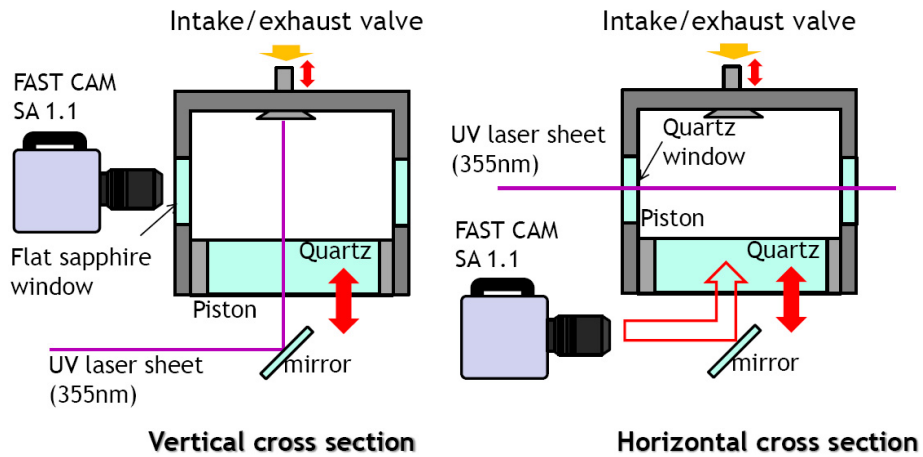


図 6. エンジン筒内ガス温度速度分布計測時の実験装置概要

ガス温度速度計測では、蛍光体の一種である MFG をトレーサーとして利用した。MFG の蛍光寿命が幅広い温度範囲で温度依存性を示すことがわかる。また、MFG の蛍光寿命と温度の関係を図 7 に例示した。500 度を超えると MFG 蛍光寿命の温度依存性が高くなることがわかる。なお、壁面温度分布計測の場合と比べ、画面内、視野内にはいる蛍光体の絶対的な量が少ないため、画像が暗くなるが、MFG は発光輝度も大きいことから比較的使いやすい蛍光体である。また、壁面温度計測では、実験前の「その場校正」が可能であるが、ガス温度分布計測ではガス温度を一様に保つことが困難であるため、事前に取得した図 7 のデータを用いて、つまり実験の直前には特に校正実験を行うことなく、ガス温度計測実験を行った。

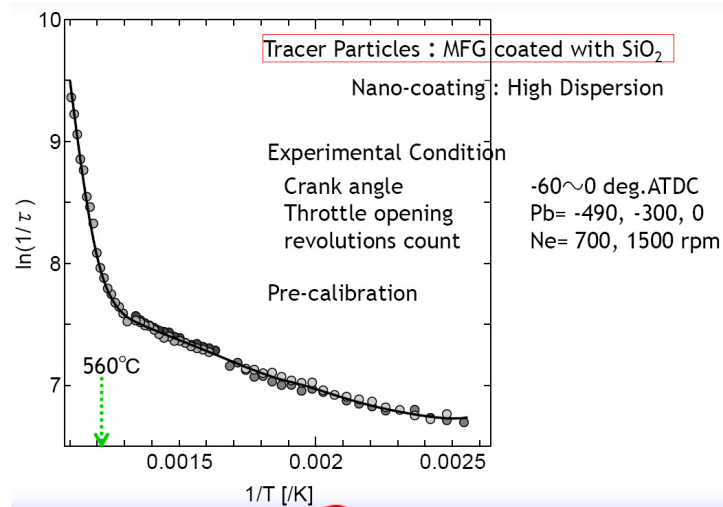


図 7. MFG 蛍光寿命の温度依存性

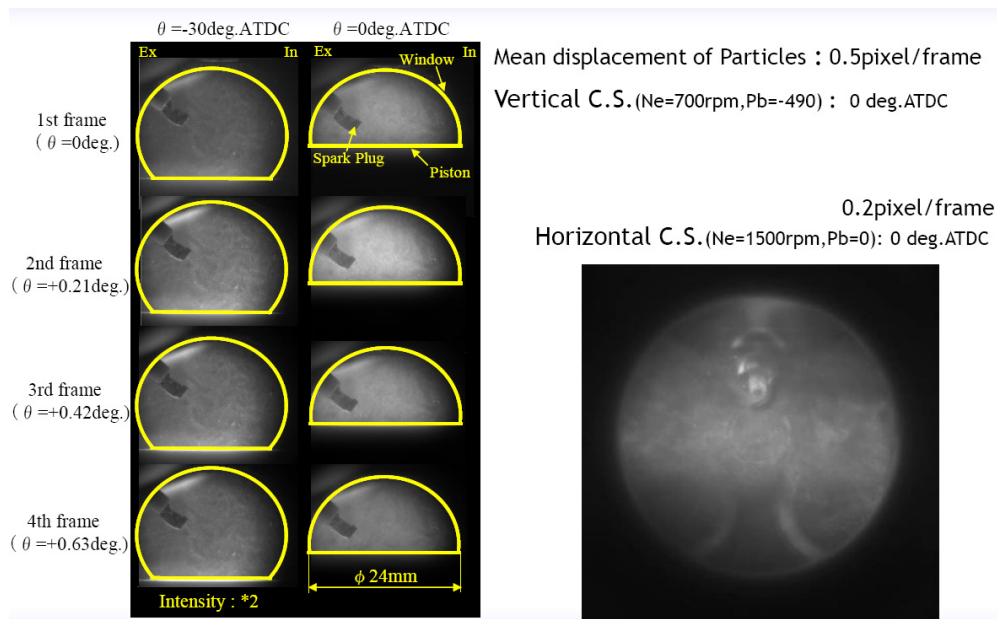
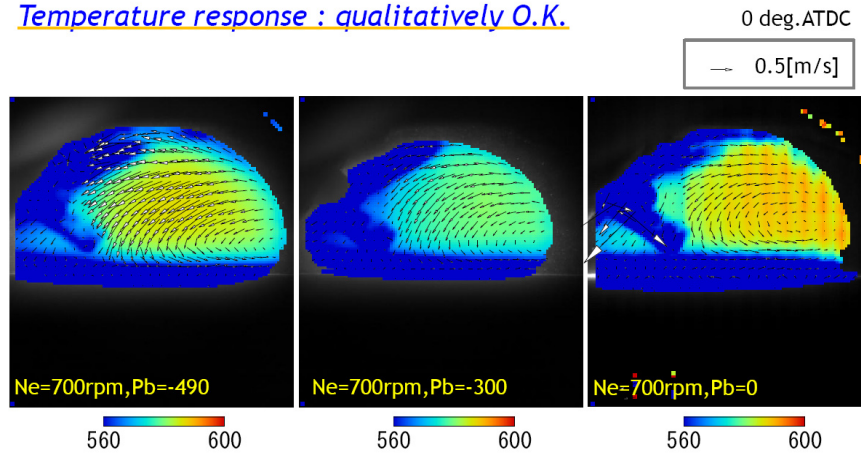


図 8. 撮影した画像の例(左は垂直断面, 右は水平断面)

Temperature response : qualitatively O.K.



Agree qualitatively well to the estimated T by the equ. of the state

図 9. 測定した温度速度分布の例

図 8 は撮影した燐光粒子画像の例を示している。図 8 の左側はエンジン筒内の垂直断面を、右側は筒内の水平断面を測定した際の画像である。また、垂直断面における温度速度分布の測定例を図 9 にしめた。測定して得た温度を検証する手段がないが、少なくとも定性的には測定値が実験条件に伴い、適切に変化している。今後、精度検証法の検討や精度検討、手法の適用可能範囲などを詳細に議論する必要があるものの、本研究で提案した手法により、高温のエンジン筒内であっても温度速度を同時計測可能である可能性が高い。また、先に述べたように、これまでガス温度分布の測定手法が確立されていなかったため、今後はより多くの事象に対して本手法を適用する予定である。