

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月17日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22760147

研究課題名（和文）ふく射二色法による高温ガス温度の”その場”測定技術の開発

研究課題名（英文）Development of in situ temperature measurement of high temperature gas by two-band infrared emission method

研究代表者

高橋 周平（SHUHEI TAKAHASHI）

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：40293542

研究成果の概要（和文）：高温ガス中に存在する CO₂ からのふく射強度を，赤外線カメラで測定することにより，非接触で高分解能の2次元温度分布測定を高精度で行うことができるアルゴリズムと計測装置の構築を行った．本計測法を，超音速高温流れ場に適用した結果，衝撃波構造に伴う流れ場の温度分布を高精度で計測することができた．また，自動車用エンジン筒内を模擬した急速圧縮機内での予混合気圧縮自着火過程に適用した結果，冷炎反応による低温酸化反応および熱炎による高温酸化反応から生じた温度分布変化を，それぞれ捉えることに成功した．

研究成果の概要（英文）：The temperature measurement method was developed to capture the temperature distribution with the emitted energy from carbon dioxide in hot gas by an infrared camera. The measurement is non-intrusive and two-dimensional temperature distribution can be obtained. Applying this method to supersonic hot gas jet, we were able to capture the shock train structure and its temperature profile. Applying the method to the premixed gas in the rapid compression machine (RCM), we succeeded in capturing the self-ignition phenomena, including the propagations of cool flame and hot flame respectively.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：ふく射，赤外線，温度計測

1. 研究開始当初の背景

自動車用エンジンのシリンダ内温度の測

定や航空機用ガスタービンの排気温度の測定など，熱機関やバーナーの高効率化・省エネ化を目指すために，高温ガス温度を精度よ

く、また高い応答性で測定する技術が近年ますます求められている。しかしながら、産業界で多く用いられている熱電対による測定法は、接触法であるため応答性が十分でなく、また利用温度範囲も限られることから、この要求をほとんど満たすことができない。本研究では、通常高温ガスに多く含まれる水蒸気や二酸化炭素を媒質として、これらからのふく射エネルギーを波長の異なる2つの波長帯で非接触で測定することにより、高温ガスの温度を精度良く、また高時間分解能で測定する技術を開発する。ふく射エネルギーを用いる測定法の特徴は、光源が不要であることと、設置する光学窓が1つでよいこと、レーザーなどの光源を用いる他の光学測定と比べて比較的簡便安価に非接触測定が行えることが挙げられる。

これまでの研究成果から、2つの波長帯のふく射強度と測定対象の透過率により、測定される温度の精度がどのような影響を受けるかが明らかになっている。しかしながら、測定対象の温度域や光学厚さが異なる場合には、まだ十分な精度が確保されていない。この原因は、各条件における適切な選択波長帯のマッピングが調査されていないことと、測定ライン上における温度分布による自己吸収の影響があげられる。

2色法による温度計測の研究は、決して新しいものではないが、反応場も含む高温ガス温度を比較の実用レベルで測定している成果は、あまり多くない。本提案では、本計測法が適用可能な条件範囲のマッピングを行うことによって2色法および赤外ふく射を利用した温度計測の信頼性を高め、“その場”計測に利用できるレベルまでの装置を開発することを目的とする。

2. 研究の目的

実験装置およびデータベース作成に必要なプログラムやアルゴリズムは、これまでの研究で既に存在しており、また精度良く測定されている測定対象がすでに見出されているため、これを出発点として測定範囲を広げ、計測する波長帯を指定したときに、測定対象とその測定精度の関係を示すマップを系統的に作成する。この結果をもとに測定波長を選択し、超音速流れ場における衝撃波を伴う高温排気ガスジェットの状態分布測定、および、急速圧縮されるシリンダ内において、自着火する予混合気の冷炎反応および熱炎反応による温度分布の時間履歴の把握という、従来の温度測定法では測定困難な対象に対して温度測定を行い、本手法の有用性を議論する。

3. 研究の方法

(1) 超音速高温流れ場への適用

現在JAXAで開発中の予冷ターボジェットエンジンの排気ジェットを想定した高エンタルピ流れ場の温度を測定するために、東京大学柏キャンパスに設置された高エンタルピ燃焼風洞(以下、柏風洞)を利用した。本風洞は、約1000Kの高温気流を供給することが可能である。本実験で用いたアフターバーナ要素試験部は、水素インジェクタを有した燃焼器とそれに接続する2次元ノズル、およびその下流に接続された大気解放部にあるランプ部からなっている。本実験での燃焼器およびノズル詳細図を図1に示す。燃焼器は長さ340mm、48mm×32mmの矩形断面であり、上流から35mmの位置にインジェクタが取り付けられている。また、上流から95mmの位置に圧力計、300mmの位置にB種熱電対がそれぞれ燃焼圧力と燃焼温度履歴を測定するために取り付けられている。燃焼器内壁面には断熱性の高い耐熱セメントを塗布し、2000Kの燃焼温度に晒されても熱が急速に金属部に伝達しないようになっている。ノズルはフルスケール予冷ターボジェットエンジンの2.4%のスケールのサイズで設計されており、ノズル開口比は2.1、燃焼前の燃焼器内よどみ点温度は950K、よどみ点圧力は300kPaである。

燃料には水素を使用し、ボンベから調圧弁および流量調節弁を経てインジェクタから噴射する。燃焼器で着火し高温となった主流は、2次元ラバルノズルで超音速まで加速される。本実験では当量比を変化させ、燃焼温度が異なる気流を測定する。計測を行うにあたり、ノズルから排出された気流には赤外線ふく射を測定するターゲットが存在しない。よって、実験ではふく射媒質として少量のCO₂を添加する。添加するCO₂量は0.5~1%程度とし、空気流量と当量比により決定される。CO₂は流量調整弁とレギュレータによりあらかじめ流量を調整し、燃料である水素ガスと混合してインジェクタから一緒に投入する。

媒質として用いるCO₂は4.4μm付近に強い吸収帯を持つことが知られている。本研究

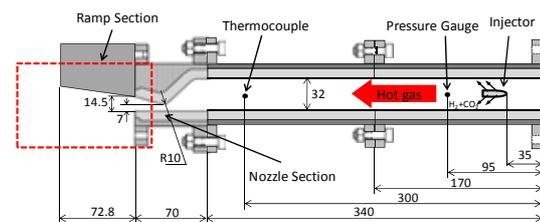


図1 アフターバーナ部およびノズル・ランプ部詳細

では、表 1 に示すバンドパスフィルタを組み合わせることで、媒質からの 2 波長のふく射強度を測定する。ふく射強度は、媒質の温度と分圧の関数となるため、あらかじめ測定部分の温度・圧力範囲においてふく射強度計算コード RADCAL を用いてデータベースを作成し、このデータベースから各波長での実験値に合致する温度・分圧を内挿により求める。

本研究においては、ふく射の検出装置として赤外線カメラ（検出波長 3~5 μm 、有効画素数 610 \times 442、書き出し速度 1/60sec）を使用し、図 1 の赤線枠内を測定対象とした。

(2) 急速圧縮機への適用

測定対象とする実験装置に、急速圧縮機 (RCM: Rapid Compression Machine) を使用する。ポア \times ストロークは 65 \times 142[mm] であり、圧縮比が可変である。シリンダヘッド前面に直径 82[mm] のサファイアガラス製光学窓を、側面に指圧計を設置する。光学窓の直線上に、バンドパスフィルタ f4 を取り付けた高速度赤外線カメラ（撮影速度: 3598 fps）を設置する。装置の概要図を図 2 に示す。

本計測では、カメラの高速度を生かすため、2 色法でなく、1 つの狭帯域でのふく射強度から温度を算出する 1 色法を用いた。ただし、2 色法と異なり広い温度域に対応することが困難であり、温度計測域は 600K~1100K 程度の狭い範囲となる。このため、シリンダ内の圧縮直後から熱炎発生までの冷炎反応に測定温度域を絞り、シリンダ内に濃度勾配が存在する場合に、どのような温度場が達成されているかを測定した。濃度勾配 ϕ は燃焼器上部（中心から 28mm 上）と下部（中心から 28mm 下）の当量比の差と定義した。また、ふく射媒質となる CO₂ は 2~4% 程度の量であらかじめシリンダ内に投入している。

本計測においても、測定部分の温度・圧力

表 1 バンドパスフィルタの仕様

フィルタ	中心波長	半値幅
f2	4.373 μm	48.7nm
f4	4.425 μm	47.8nm
f5	4.506 μm	78.9nm
f6	4.570 μm	74.0nm

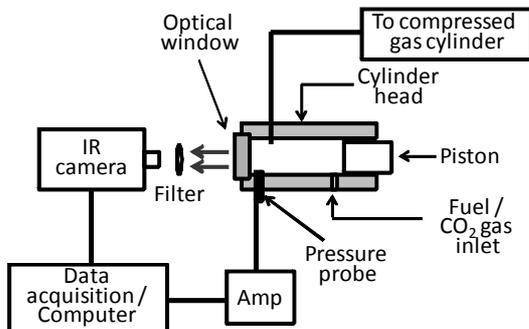


図 2 急速圧縮機概要

範囲にわたって、CO₂ からのふく射強度を計算コード RADCAL を用いてあらかじめデータベースを作成し、このデータベースから実験値に合致する温度を内挿により求める。

4. 研究成果

(1) 超音速高温流れ場への適用結果

図 3 にランプを取り付けた状態での温度分布を示す。温度分布は図に示す点で、上流から 1543K, 1645K, 1472K となっており、ランプ部入口に強い衝撃波があり、ここで温度が急激上昇していることが分かるが、ランプ中部では温度分布には明確な変化があらわれなかった。このことから、ランプを付けた場合は、取付け部で大きな衝撃波が発生し、その下流では顕著なショックトレインは現れていないことが分かる。

次にランプ部を取り外して実験を行った時の温度分布を図 4 に示す。この試験では総温が図 3 と同じになるように設定している。図 4 では図 3 と異なり、ノズル出口から下流に向かって 1374K, 1877K, 1371K, 1666K と温度が交互に上昇・下降を繰り返している様子がはっきり見てとれる。また、気流がノズル内壁面上部の傾きとほぼ平行に噴出されていることから、ノズル内で流れが剥離し、壁面上部に張り付くように流れ出ている様子が分かる。このように、ランプ部を取り付けた場合と取り付けなかった場合での、超音速高温排気の挙動とその時の温度分布の違いがはっきりとらえられていることが分かる。

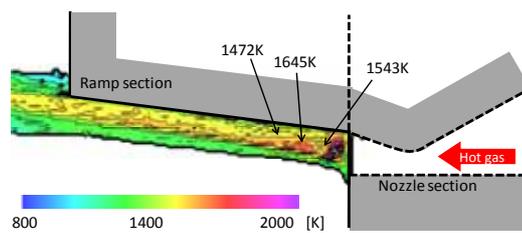


図 3 ランプ取付時の排気ジェット内温度分布
(主流総温: 1791 K, フィルタ: f2-f4)

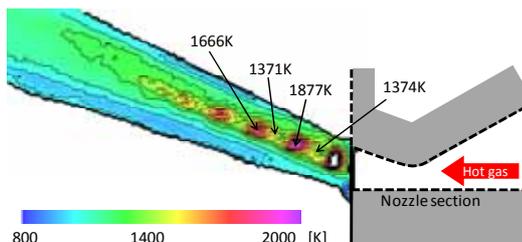


図 4 ランプ無しでの排気ジェット内温度分布
(主流総温: 1782 K, フィルタ: f2-f4)

(2) 急速圧縮機への適用結果

図5に圧縮比14.66,総当量比0.5,濃度勾配無し($\phi=0.0$),および濃度勾配を $\phi=1.0$ 付けた時の圧力線図を示す.縦軸HPFはハイパスフィルタに通したもので,LPFはローパスフィルタに通したものである.横軸は圧縮完了からの時刻である. $\phi=0.0$ は $\phi=1.0$ に比べ,最大圧力が高く,高周波振動が見られ,ノッキングが発生していると考えられる.

$\phi=1.0$ は,最大圧力が低く高周波振動が見られことから,ノッキングが発生していないと判断できる.この時の温度分布図を,図6に示す.図中の等高線は10K毎に表示している.どちらの温度分布図でも渦輪状の低温部分が確認できる.これは,壁面の温度境界層がロールアップボルテックスによって剥かれ,低温部分が輸送された事によるリング状の温度分布であると考えられる.1度目の圧力上昇(2.00ms付近)の温度分布は,

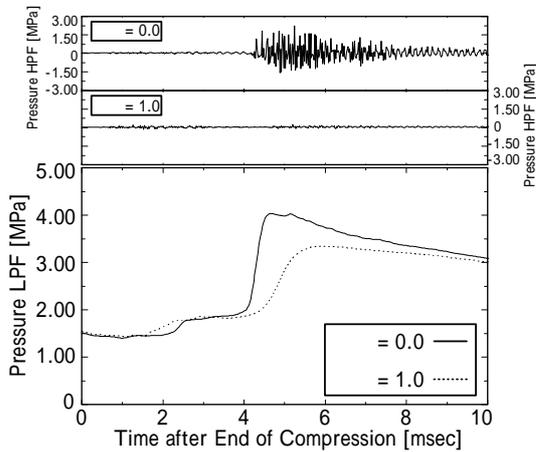


図5 濃度勾配がある場合とない場合での圧力履歴 (圧縮比14.46,初期温度290K,初期圧力0.5atm)

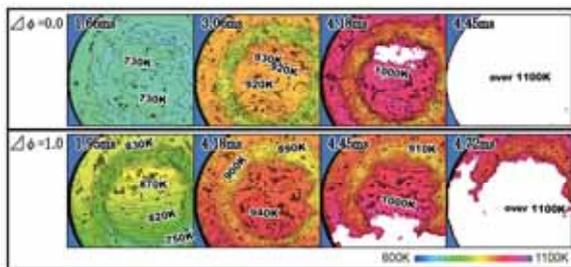


図6 濃度勾配がある場合とない場合での温度履歴 上:温度勾配なし,下:温度勾配あり (圧縮比14.46,初期温度290K,初期圧力0.5atm)

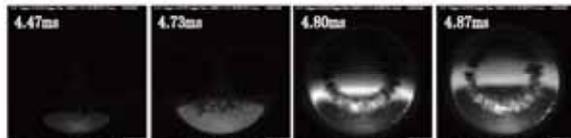


図7 高速度可視カメラによる熱炎の挙動 (濃度勾配あり)

$\phi=0.0$ では全体がまんべんなく温度上昇しているのに比べ, $\phi=1.0$ ではシリンダ上部から下部に向かい温度上昇している.

これは,低温炎によるものであると考えられる.その後,2度目の急激な圧力上昇と共に,温度も急激に上昇している.これは,熱炎によるものであると考えられる.

$\phi=0.0$ では,1度目の温度上昇と同じように全体がまんべんなく上昇しているのに比べ, $\phi=1.0$ では,1度目の温度上昇とは反対に下部から激しく温度上昇している.つまり,濃度勾配を付けると,低温炎と熱炎の発生個所が異なるようである.この様子を高速カメラ(撮影速度:15000fps)で撮影し,可視光域ではどのように映るのかを確認する.

図7に $\phi=1.0$ の条件で撮影した画像を示す.白色で発光している所が熱炎と考えられ,下部から上部へ向かい強く発光している.これは,図6下の様子と同じである.冷炎や熱炎による発光と,温度上昇の履歴が対応していることが分かる.

次に,総当量比を1.0の条件で ϕ を細か

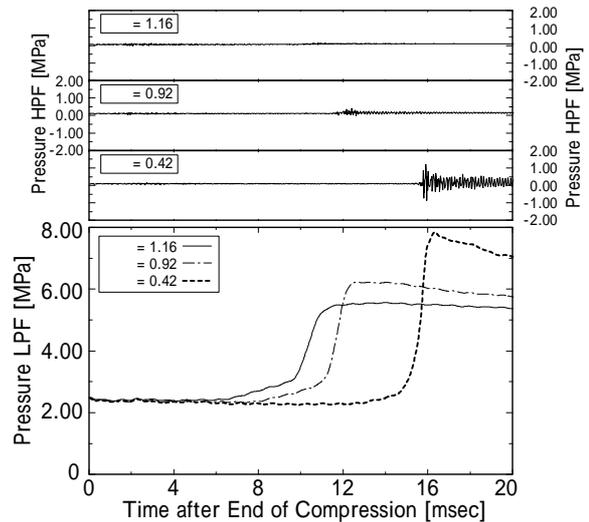


図8 濃度勾配を変化させたときの圧力履歴

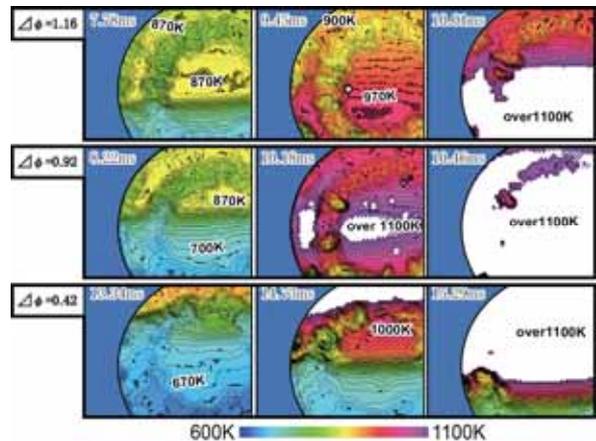


図9 濃度勾配を変化させたときの温度履歴

く変化させ実験するこの時のそれぞれの、圧力履歴を図 8 に示す。 $\phi=0.42$ では、ノッキングが発生している事が確認できる。その他の条件は最大圧力も低く、ノッキングも発生していない。この時の温度分布を図 9 に示す。 $\phi=1.16$ は図 6 下の $\phi=1.0$ と同じように冷炎は温度の高い上から、熱炎は逆に下から伝播していることを示している。 $\phi=0.42$ は、低温度炎、熱炎共に上部から発生し、熱炎が後を追うようにほぼ同時に発生している。 $\phi=0.92$ は、低温度炎は上部から広がるものの、熱炎は燃焼器中央部から発生している。今回の条件では、 $\phi=0.92$ 付近を境に、熱炎発生位置が燃料過濃側から希薄側へ移動する現象が捉えられていることが分かる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

[1] Nur Saifullah Kamarrudin, Shogo Tanaka, Shuhei Takahashi, Tadayoshi Ihara, Measurement of Temperature Profile during Ignition Delay in the Cylinder with Fuel Concentration Gradient, 査読有, Proc. 9th ASPACC, 2013, CD-ROM.

[2] 高橋周平, 吉田英史, 井原禎貴, 若井和憲, 西田俊介, 津江光洋, 今村幸, 田口秀之, 小島孝之, ふく射 2 色法による超音速ジェット of 2 次元温度分布測定, 第 49 回伝熱シンポジウム講演論文集, 1+2 巻, 査読無, 2012, 455-456.

[3] 田中翔吾, Nur Saifullah Kamarrudin, 高橋周平, 井原 禎貴, 炭化水素燃料の低温度炎発生とシリンダ内温度分布の相関, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, 査読無, 2012, 366-367.

[4] 吉田英史, 高橋周平, 若井和憲, 井原禎貴, ふく射二色法を用いた超音速排気ジェットの非接触温度測定, 熱工学コンファレンス 2011 講演論文集, 査読無, 2011, 257-258.

〔学会発表〕(計 4 件)

[1] Nur Saifullah Kamarrudin, Shogo Tanaka, Shuhei Takahashi, Tadayoshi Ihara, Measurement of Temperature Profile during Ignition Delay in the Cylinder with Fuel Concentration Gradient, 9th ASPACC, 5.20.2013, Gyeongju, Korea.

[2] 高橋周平, 吉田英史, 井原禎貴, 若井和憲, 西田俊介, 津江光洋, 今村幸, 田口秀之, 小島孝之, ふく射 2 色法による超音速ジェットの 2 次元温度分布測定, 第 49 回伝熱シンポジウム, 5.31.2012, 富山.

[3] 田中翔吾, Nur Saifullah Kamarrudin, 高橋周平, 井原 禎貴, 炭化水素燃料の低温度炎

発生とシリンダ内温度分布の相関, 第 50 回燃焼シンポジウム, 12.4.2012, 名古屋.

[4] 吉田英史, 高橋周平, 若井和憲, 井原禎貴, ふく射二色法を用いた超音速排気ジェットの非接触温度測定, 熱工学コンファレンス 2011, 10.30.2011, 浜松.

6. 研究組織

(1)研究代表者

高橋 周平 (SHUHEI TAKAHASHI)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号: 40293542