

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 9 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630407

研究課題名(和文) レーザ干渉法によるエンジン排気ガス温度の高応答計測

研究課題名(英文) High response measurement of exhaust temperature in an engine by using laser interferometry

研究代表者

富田 栄二 (TOMITA, Eiji)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：80155556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：コンパクトな干渉光学系を設計、試作した。エアドライアによって測定部の温度を変化させ、室温状態から急に高温状態に変化させた。干渉縞の移動をラインセンサカメラによって捉え、解析することにより、熱電対よりも応答よく温度を計測することができた。同光学系を試験用単気筒機関のシリンダブロックと排気管の間に取り付けて、1サイクル中の干渉縞変化を計測した。低負荷で燃焼が遅れる場合、排気弁が開いたのち、一旦温度が低下し、その後、温度上昇が見られるなどの結果を得た。

研究成果の概要(英文)：A compact housing with optical arrangement for interferometry was designed and made. When hot air was flowed in the measurement region suddenly with an air dryer, the temperature obtained from this interferometry system with a line-sensor camera increased faster than that with a thermocouple. The higher response of the interferometry was confirmed. Next, this housing was set between cylinder block and exhaust pipe and history of exhaust gas temperature was measured in one cycle. As a result, when the combustion delayed in a low load, at first the temperature is decreased and thereafter the temperature is increased.

研究分野：機械工学，熱工学

キーワード：温度 温度計測 干渉 レーザ 排気ガス 高応答

1. 研究開始当初の背景

(1) 液体や気体などの流体の温度を、非常に応答良く、高精度に計測することは、現在、困難とされている。例えば、工業的によく利用されている熱電対やサーミスタ、あるいは最近開発された光ファイバグレーティングをセンサとして利用する方法などは接触型であり、応答性が必然的に悪くなる。一方、研究用としては、レーザー誘起蛍光法やCARS法などの大規模なレーザー装置を用いると非接触で、また、2次元での温度計測が可能であるが、比較的精度が悪く、また時系列データが得られない場合も多い。特に、高温燃焼装置や化学反応制御装置では、より高性能な装置の開発のために、高精度、高応答な温度変動の計測が求められている。

(2) 申請者らは、今までに干渉法を利用し、測定部をセンサ化して光ファイバによって光を伝送することにより、手軽に持ち運びが可能な温度センサについて研究してきた。

(3) 一方、エンジンの熱効率向上のためには、排熱回収が効果的であると考えられているが、平均的な排気ガス温度は比較的低く、高温のガスのみを有効利用することができれば熱効率向上に寄与することができるが、1サイクル中の排気ガス温度履歴は計測された例がない。

2. 研究の目的

(1) 実際のエンジンの排気ガス温度を、時系列的に高精度で測定する方法は、今までになかった。排気弁が開いた直後の排気ガスは高い温度になっていると推測されるので、例えばそのようなガスのみ分離すれば触媒活性化や熱発電など、熱を有効に利用することが可能となる。

(2) 本研究では、レーザー干渉法によってエンジンからの非定常な排気ガス温度を高応答で測定することのできるセンサを試作し、1サイクル中の時系列な温度変化を計測することを目的とする。光計測であるので、応答性はマイクロ秒程度を確保することができる。

(3) 将来、本研究で開発するセンサが、さらに小型化、汎用化できるようになれば、応用用途はさらに広がると期待される。

3. 研究の方法

(1) エンジンの排気部に設置可能なコンパクトな光学系を設計および製作した。DPSS レーザから出力される光は、偏波面保存型ファイバによって光学系まで導かれる。ビームスプリッタによって、光を2つに分ける。一方はそのまま光強度がフィルタにより減衰されてもう一方のビームスプリッタに到達する。もう一方の光は測定部を通過後、コーナーキューブを用いることによって、光を戻して、もう一方のビームスプリッタに入り、両方の光が干渉する。測定部を通過するときは、ガラス窓を設置して、熱い排気ガスから光学系

を保護する。

干渉した光をシリンドリカルレンズによって拡大して、2方向から2台の1次元センサを用いて干渉縞の動きを捉える。

図1に光学系の概略を示す。レーザーから出た光は、偏波面保存型光ファイバによって光学系を構成するハウジングに導かれる。本研究では2波長(515nm および 532nm)を用いた。出力はそれぞれ25mWである。

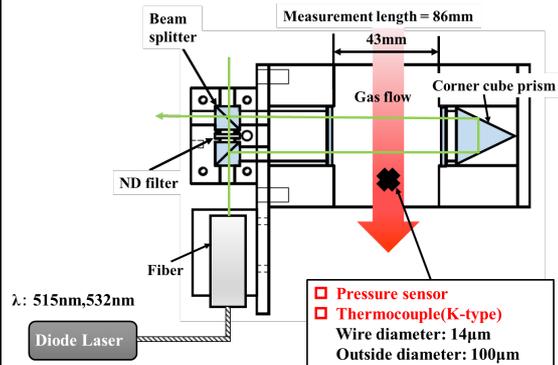


図1 光学系の概略

(2) 次に測定原理を示す。以下のような方法で、温度を求めることができる。

密度 ρ は圧力を P 、分子量を M 、一般ガス定数を R_0 、温度を T として、

$$\rho = PM / (R_0 T) \quad (1)$$

にて表される。また、密度変化に伴い、屈折率が変化する。 n を屈折率、 R_0 を Gladstone-Dale 定数とすると、

$$n = 1 + R_0 / M \quad (2)$$

屈折率変化 Δn に伴う空間の光路長の変化量 L は、測定部長さを d として

$$\Delta n = L / d \quad (3)$$

ここで、添え字 0 は初期状態を表す。また、干渉縞の移動量 N と光路長変化は、レーザーの波長を λ として

$$L / \lambda = N \quad (4)$$

となる。これらの式(1)から(4)より、温度 T は以下の式で表されることになる。

$$T = (d R_0 T_0 P) / (d R_0 P_0 - N \lambda T_0 R_0) \quad (5)$$

つまり、初期状態の圧力、温度が既知で、圧力を測定しておけば、干渉縞の移動量から温度が計算できることになる。 $d = 86\text{mm}$ である。(3) エアドライアを用いて、光学系のハウジング測定部の空気温度を急激に上昇させた。図2に得られた干渉縞のデータを時系列で示す。

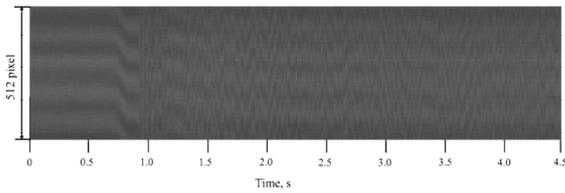


図 2 干渉縞の時系列データ（縦軸は 512 ピクセル，横軸は時間，10000 データ/秒）

以下に干渉縞の解析方法について説明する。

まず，ある時刻における干渉縞の強度分布に対して，適切に移動平均処理をして，スムージングする．その一例を図 3 に示す．このデータをもとにして，

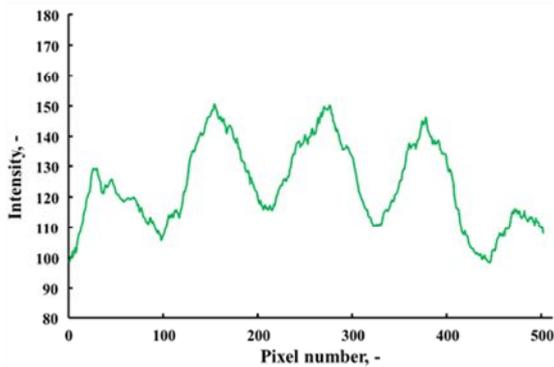


図 3 干渉縞強度分布（512 ピクセル，移動平均後）

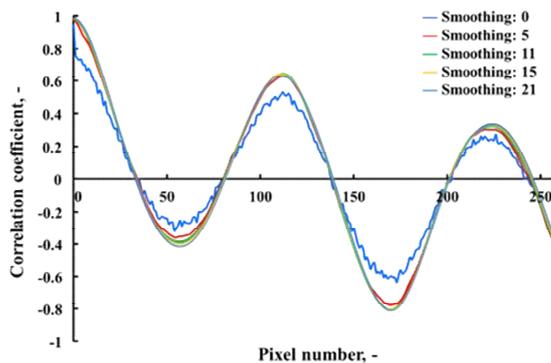


図 4 自己相関係数

図 4 に自己相関係数を示す．この例では，スムージング点数 5～21 が適切な結果となる．スムージング処理をしない場合は，ホワイトノイズによって，自己相関係数が不適切な形になる．図 4 より，ピクセル数が最初のピークとなる値，すなわち，115 程度のときが最も相関が強くなる．よって，これが，干渉縞の 1 波長 となる．

次に，ある時刻とその次の時刻の干渉縞を比較するために，その相互相関係数を求めた．これは，その時刻間で干渉縞がどれだけ移動したかを示すことになる．

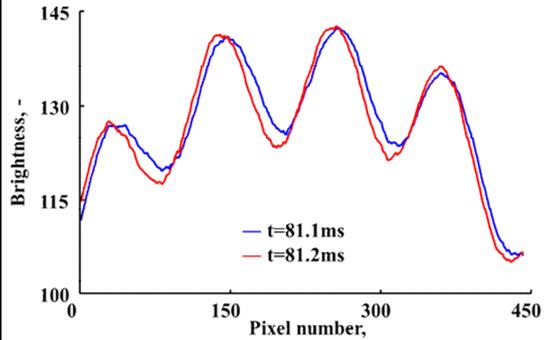


図 5 2 時刻間での干渉縞画像の移動

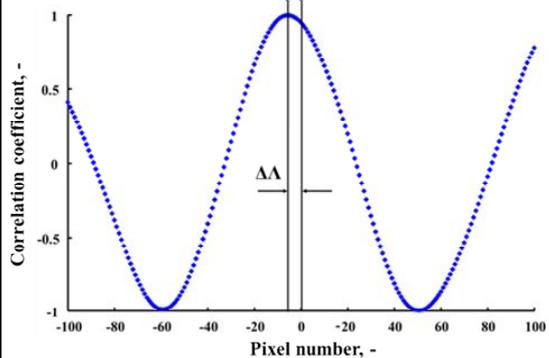


図 6 相互相関係数

図 5 に，時刻 $t = 81.1\text{ms}$ と $t = 81.2\text{ms}$ のとき（これは，図 2 のデータとは対応しない）の干渉縞強度を示す．これから相互相関係数を求めると，図 6 のようになる．この場合，が移動ピクセルになる．よって， / が干渉縞移動数 N に相当することになる．図 7 に干渉法で得られた温度変化と熱電対で得られた結果を比較して示す．干渉法の場合，約 1 秒程度の時点で温度が急激に上昇しているが，熱電対の場合，立ち上がりやや遅れている．これは，干渉法による温度測定が応答良くないことを示している．

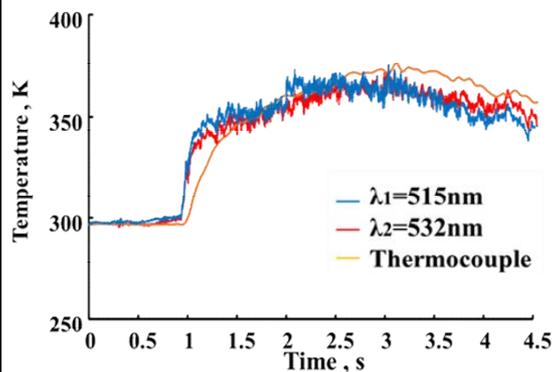


図 7 温度変化（干渉法と熱電対法による比較）

(3) その後、同光学系を試験用単気筒機関のシリンダブロックと排気管の間に取り付けて、1サイクル中の干渉縞変化を計測した。

エンジンは、4 サイクル単気筒火花点火機関であり、運転条件は機関回転速度 1000rpm、点火時期 10° BTDC とし、当量比 1.0 のメタン～空気予混合気を使用した。負荷は低い状態で、また、点火時期は遅角された状態であり、燃焼室内圧力結果からも、燃焼がかなり遅れていることがわかる。排気ガスの成分は、メタンと空気が完全燃焼したとして窒素、二酸化炭素、水蒸気で構成されると仮定して、Gladstone Dale 定数を計算した。

吸気バルブの開弁 (IVO) 時期は 8° BTDC、閉弁 (IVC) 時期は 38° ABDC、排気バルブの開弁 (EVO) 時期は 38° BBDC、閉弁時期は (EVC) 4° ATDC となっている。

干渉縞の撮影結果を図 8 に示す。毎秒 200,000 データを取得した。縦軸は 512 ピクセル分で、横軸は 720 度 (1 サイクル分) である。干渉縞の移動量を前述の方法で求めると、図 9 に示すようになった。図 9 には同時に排気管内圧力履歴も示す。

測定部に取り付けられた排気管圧力も同時に計測し、密度変化を示す干渉縞移動量から、温度変化に換算した。また、熱電対による温度の 1 サイクル中の平均値が、干渉法で得られた温度の平均値と一致するようにした。

その結果、低負荷で燃焼が遅れる場合、排気弁が開いたのち、一旦温度が低下し、その後、温度上昇が見られるなどの結果を得た。

今後、再現性や運転条件の差異による排気ガス温度履歴の相違に関して、研究を引き続き実施していく予定である。

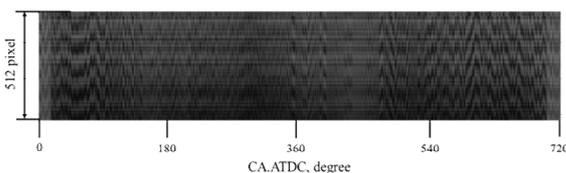


図 8 干渉縞のクランク角に対する移動の様子

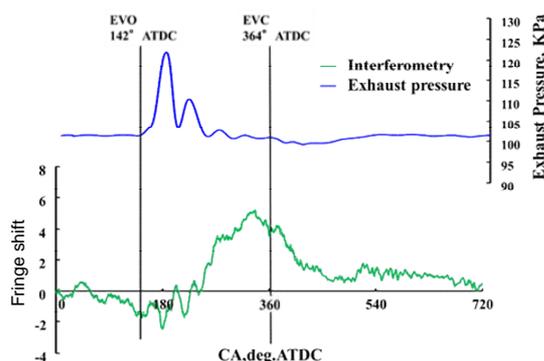


図 9 排気管内圧力履歴および干渉縞移動量

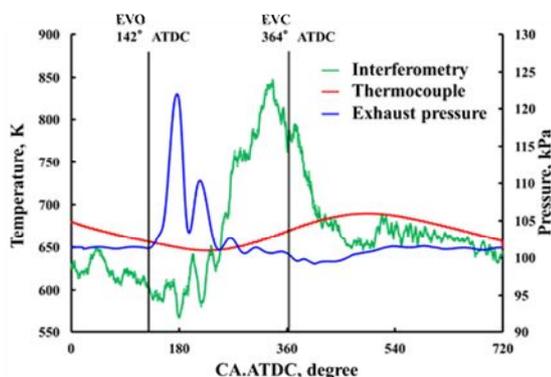


図 10 排気管内圧力、熱電対出力および干渉法による温度計測結果 (1 サイクル)

4. 研究成果

(1) コンパクトな光学系を設計するとともに、試作することができた。ラインセンサカメラを用いることで最大 200000 駒/秒で干渉縞を記録することができる。

(2) エアドライアによって測定部の温度を変化させて室温状態から急に高温状態に変化する様子を解析することにより、熱電対よりも応用よく温度が計測することができることを確認した。

(3) 同光学系を試験用単気筒機関のシリンダブロックと排気管の間に取り付けて、1 サイクル中の干渉縞変化を計測した。その結果、低負荷で燃焼が遅れる場合、排気弁が開いたのち、一旦温度が低下し、その後、温度上昇が見られるなどの結果を得た。

(4) 今後、このセンサシステムの測定精度に及ぼす諸因子の影響についても検討する。将来、本研究で開発するセンサが、さらに小型化、汎用化できるようになれば、応用用途はさらに広がると期待される。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 1 件)

西村友孝, 富田栄二, 河原伸幸, レーザ干渉法を用いた非定常ガス温度計測, 日本機械学会中国四国支部第 53 期総会講演会, (2015.3.6), pp.1-2, 近畿大学工学部 (東広島)

〔その他〕

ホームページ等

<https://powerlab.mech.okayama-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富田 栄二 (TOMITA, Eiji)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号: 80155556