

平成 30 年 5 月 26 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14513

研究課題名(和文) 2波長を利用したレーザー干渉法による熱機関排気ガス温度の高応答計測

研究課題名(英文) High response measurement of exhaust gas temperature from an engine by using laser interferometry with two wavelength

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：エンジンの熱効率向上のためには、排気ガスの有効利用も必要である。本研究では、1サイクル中の排気ガス温度変化をレーザー干渉法によって高応答で計測することのできるシステムを開発した。本光学系をエンジンからわずかに離れた状態で排気ガス温度を計測した結果、排気弁開直後に一度少し低下した後急上昇し、ピストンが上昇するに従って徐々に低下するもの、再度上昇し、上死点前90度付近で最大値を示し、その後は低下するという結果が得られた。しかし、得られたデータの信頼性に欠けたので、詳細に解析方法を見直し、ヒートガンによって急激な温度変化を与えて実験した結果、2波長で得られた温度結果はほぼ等しくなった。

研究成果の概要(英文)：It is necessary to utilize exhaust gas effectively for achieving higher thermal efficiency in internal combustion engines. In this study, a system that can measure transient temperature was developed during one cycle by using laser interferometry with high response. The exhaust gas temperature was measured with this optical system separated from the engine slightly. The temperature showed a small decrease followed by rapid increase. Thereafter, it decreased gradually with piston rising and showed its maximum value near 90 degrees before top dead center followed by gradual decrease. However, analysis method was considered in detail due to lack of reliability of data accuracy. When the experiment of rapid temperature change was performed with a heater, the temperatures obtained with two wavelengths agreed with each other.

研究分野：船舶海洋工学，熱機関，熱工学，燃焼，レーザー計測

キーワード：燃焼 非定常温度計測 排気ガス レーザー干渉法

1. 研究開始当初の背景

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ー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。熱電対の2線式法による検討もなされているが非定常な温度変化の場合、時定数を決定しづらい。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。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、触媒暖気時間が短縮できたり、高温の熱を利用することで熱効率向上に寄与することができる。ところが、1サイクル中の排気ガス温度履歴が正確に計測された例がほとんどない。

2. 研究の目的

実際のエンジンの排気ガス温度を、時系列的に応答良く測定する方法は、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電発電など、熱を有効に利用することが可能となる。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ーを試作し、1サイクル中の温度変化を時系列に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。また、このセンサー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ーが、さらに小型化、汎用化できるようになれば、応用の用途はさらに広がると期待される。

3. 研究の方法

(1) 光学系の設計および試作

光学系は2年前に試作済みであり、予備試験も実施済みであるが、種々の課題が発生した。そのときの課題を詳細設計に盛り込むようにした。図1は、光学系の概略である。以前は単波長のレーザーを利用した。ここでは、波長の少し異なる2本のレーザー(515nmおよび561nm)を用いる。2つの光は重ね合わせて、1本の偏波面保存型ファイバを通り、出口からはほぼ直進光となって出る。この光を、ビームスプリッターによって2本に分けて、1本は試験部を通過させ、コーナーキューブに入る。そこで反射された光は、もう一つの

ビームスプリッターによって、もう一つの光と重ね合わせる。ビームスプリッターから出る2本の光は、それぞれシリンドリカルレンズで拡大され、レーザー波長に応じた干渉フィルタを通して2台のラインセンサカメラに導かれる。試験部に密度変化が生じると干渉縞が移動する。理想気体の状態式、屈折率と密度の関係を表す Gladstone-Dale の式 (Gladstone-Dale 定数が気体の種類およびレーザー波長によって異なる)、屈折率と位相変化の関係式(レーザー波長および測定部長さに依存)をもとに密度変化を計算する。すなわち、干渉縞の位相変化(移動量)と圧力を計測すれば、測定部のガス温度変化を見積もることができる。ただし、初期温度が必要となる。

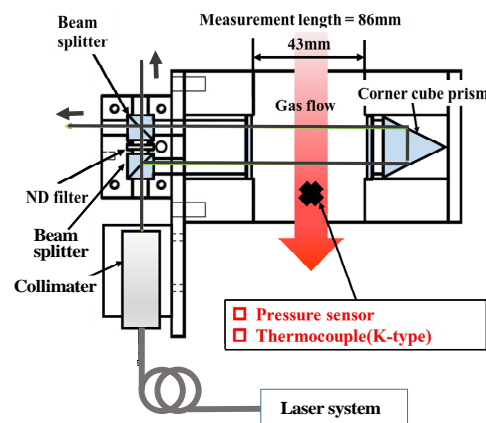


図1 排気管取付け用センサーシステム

(2) 測定原理

以下のような方法で、温度変化を求めることができる。密度は圧力を 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_G を Gladstone-Dale 定数とすると、

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

屈折率変化 n 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

$$n - n_0 = L / d \quad (3)$$

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。

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

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。なお、測定部長さは片道で43mmであるので、往復で $d = 86\text{mm}$ となる。

(3) エンジンの排気ガス温度変化の時系列計測

試作したセンサー部のハウジングを排気管出口に取り付けて、エンジンを運転して、データを取得する。エンジンのシリンダヘッドと排気管の間に、上記で製作した光学系を設置する。運転条件としては、まず、比較的低速回転において、点火時期を変えて燃焼状態を変化させた条件で、排気ガス温度変化を計測する。本手法は密度変化を計測するので、排気管内圧力履歴も同時に計測する。

振動の影響を少なくするためには、光学系をコンパクトに固めるようにする必要があり、光学部品の取り付け方法等に関しては試行錯誤が必要になるであろう。ここでは、エンジン本体から、光学系および排気管をわずかに離れた状態で計測を実施した。

Gladstone-Dale 定数に及ぼす排気ガス組成の影響に関しては、理論混合比で運転するので、燃料と空気が過不足なく反応して、排気ガス中には、窒素、水蒸気、二酸化炭素があるものと仮定した。

排気管内を通過するすすによる光の減衰による干渉縞の乱れの影響、エンジン始動時の光学系への水蒸気の付着の影響等の外乱の影響などが考えられるが、本エンジンでは予混合で燃焼させるのですすの排出は少なく問題はなかった。水蒸気の影響に関しては暖機運転後に計測をすることによって、問題を回避することができた。

(4) ヒートガンによる2波長測定の利点に関する検証

2波長で計測することの意義に関して、基本に立ち返って検証した。すなわち、図1の光学系を使用し、ヒートガンをONにして熱風を送るようにしておく。ただし、光学系の前に邪魔板を設置しておき、熱風が流入しないようにセットしておく。ある瞬間、邪魔板を外して、急に測定部に熱風が流れ込んでくるようにする。

2波長を使用する利点を以下に示す。(i) 図2(左)に示すように、1波長 λ_1 の場合、もし、温度変化が大きく、時刻 t と $t+\Delta t$ で干渉縞の位相が 2π の倍数分、移動しても判別することができない。2波長を使用すると、もう一つのレーザー波長 λ_2 の干渉縞との位相差 $\phi_1 - \phi_2$ を考えると、干渉縞が1波長以上移動してもこの位相差が 2π を超えなければ、波長 ϕ_1 の位相を知ることができること、(ii) 位相差 $\phi_1 - \phi_2$ が 2π を越えなければ、その差より密

度が増加しているのか減少しているのか判別できること、() 実験開始前の温度が分かっているならば、試験中の絶対温度が分かることなどが挙げられる。ラインセンサカメラにより最大 $5\mu\text{s}$ 毎(20万駒/秒)で取り込むとき、この時間内に位相差 $\phi_1 - \phi_2$ が 2π を超えないように設定する。

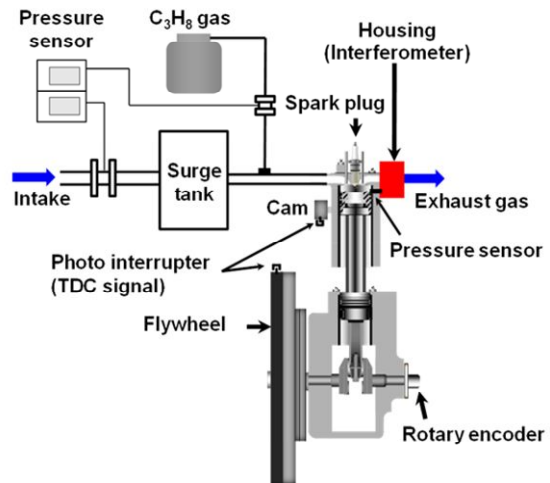


図2 光学系取り付け位置(エンジンの排気側に少し離して光学系および排気管を取付けている)

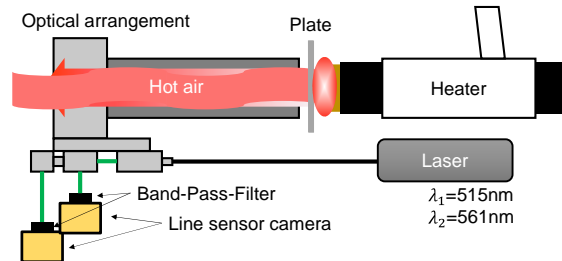


図3 ヒートガンによる温度変化(2波長利用)

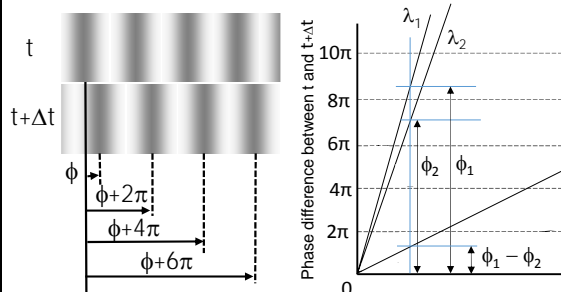


図4 1波長のみを用いたときの位相判別誤認の可能性と2波長の位相差を用いたときの位相変化(位相差が ϕ か、 $\phi+2\pi$ か、 $\phi+4\pi$ か、不明でも、位相差 $\phi_1 - \phi_2$ を調べることによって、いずれかを判別することができる)

4. 研究成果

(1) 干渉縞移動量に関する解析方法

図 5~9 に示すように、ヒートガンで熱風を急激に通過させたときに得られた干渉縞の変化から温度変化を求める方法を以下に述べる。

干渉縞移動量 N は、干渉縞移動量 $\Delta\lambda$ (ピクセル) を干渉縞波長 λ (ピクセル) で除した値となる。ここで、 λ は自己相関から求める。

例えば、 $t=1.5\text{ms}$ のときの干渉縞の強度分布は図 6 に示すようになる。ここで移動平均処理をして移動平均によってノイズを軽減してから自己相関を求めると、図 7 に示すようになり、この場合には約 120pixel が波長 λ となる。また、 $t=3.5\text{ms}$ と $t=4.5\text{ms}$ の場合の干渉縞強度分布は図 8 のようになる。移動平均処理のあと、相互相関は図 9 のようになり、ピークまでのピクセル数は約 10 となる。

(2) 実機による検討

熱機関は、4 サイクル、水冷、単気筒試験用機関である。ボアは 76mm、行程は 82.6mm、圧縮比は 10 である。燃料はメタンとし、当量比は 1.0 とした。

図 10 に、エンジンシリンダ内の 1 サイクル分の圧力履歴を示す。最高圧力は約 2MPa

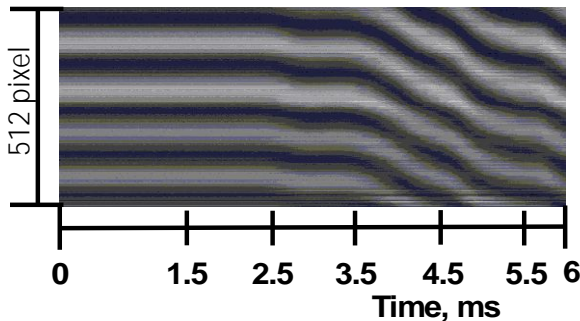


図 5 干渉縞の動きの例 (ヒートガン)

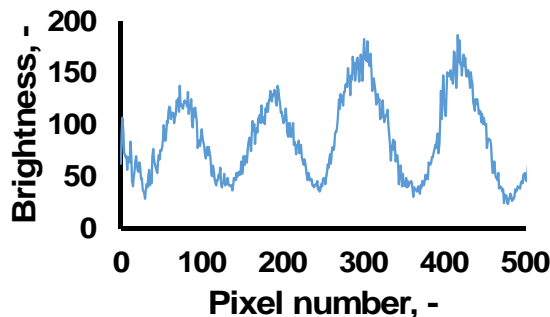


図 6 干渉縞の強度分布 ($t=1.5\text{ms}$)

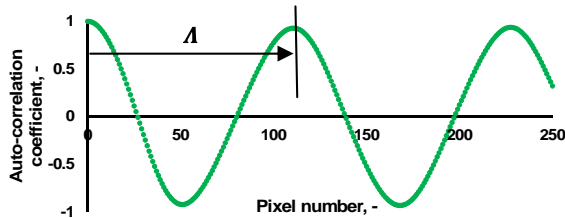


図 7 自己相関係数

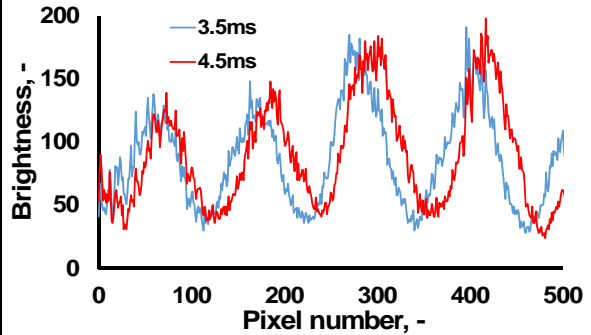


図 8 干渉縞の強度分布 ($t=3.5, 4.5\text{ms}$)

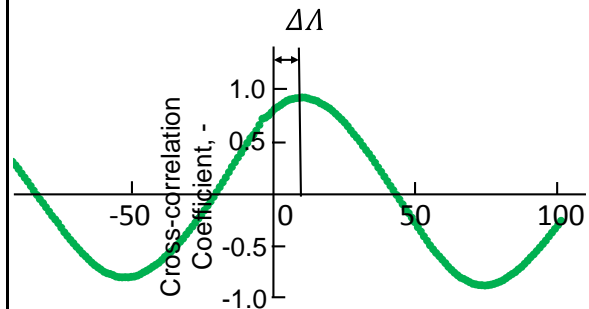


図 9 相互相関係数 ($t=3.5, 4.5\text{ms}$)

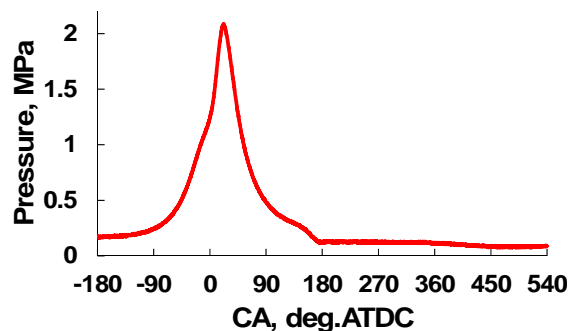
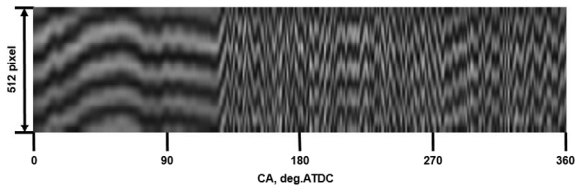


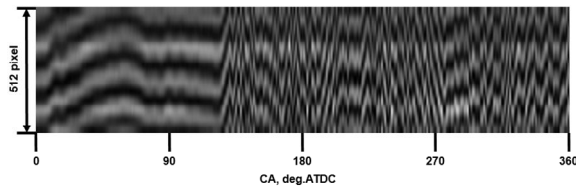
図 10 シリンダ内圧力履歴

程度まで上昇しており、シリンダ内で燃焼が行われていることがわかる。

ある 1 サイクル中の干渉縞の動きを、クランク角度で $0 \sim 360^\circ$ と $360^\circ \sim 720^\circ$ までの 2 つに分けて図 11 に示す。ただし、クランク角度 0° は、図 10 の圧力履歴と同じく、圧縮上死点としている。干渉縞の上側がレーザー波長 515nm、下側が 561nm の結果である。図 12 に、排気管内圧力および得られたガス温度変化を熱電対で得られた温度とともに示す。排気弁が開く時期に干渉縞が大きく移動していることが分かる。最初、ガス温度が少し下がった後、 180° くらいまでガス温度が上昇している。その後、 240° くらいまで一度、ガス温度が下がった後、 280° くらいまで再び上昇している。そのあとは緩やかに温度が下がっている。



(a) クランク角度 0° から 360° までの結果



(b) クランク角度 360° から 720° までの結果

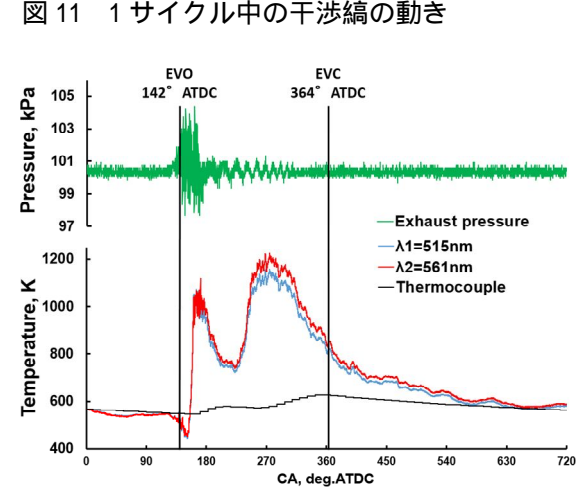


図 12 排気管内圧力変化および得られた温度履歴

(3) 二波長式による信号処理の再検討

図 12 の結果では、二波長で得られた結果が少しずれている。これは信号処理の方法に問題があると考えられる。よって、再度、ヒートガンを用いて信号処理の検討を行った。そのとき、相互相関による方法で $\Delta\lambda$ を求めると信号状態によっては誤差が生じることが分かった。そこで、強度分布を -1 から 1 までに正規化して、ピークとピークを考慮して求める方法に変更した。また、2 波長の位相差を考慮して、いわゆる山飛び（位相が 2 以上の動き）が生じていないことも確認した。

図 13 にヒートガンによって得られた干渉

縞の様子、また、図 14 に得られた温度を熱電対から得られた温度とともに示す。約 0.2s から徐々に変化し、0.3s くらいから急激に変化している。いずれの波長で得られた温度もほぼ一致する結果となった。なお、熱電対で得られる温度よりも急激な変化を捉えることができている。

今後、本手法で得られた方法を用いて、エンジン排気管内温度変化の計測を実施する。

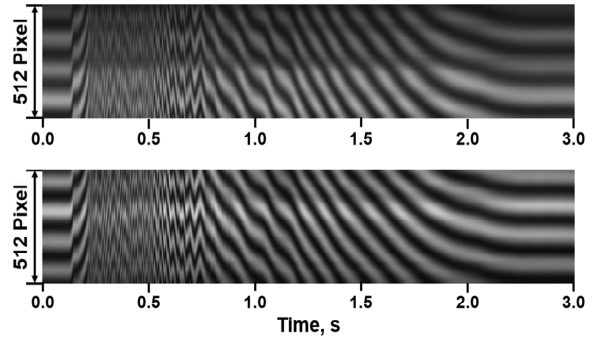


図 13 干渉縞の動き(上が 515nm, 下が 561nm における結果)

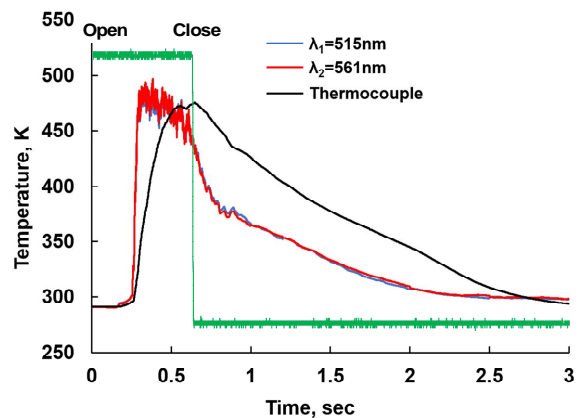


図 14 レーザ干渉法による温度計測結果と熱電対で得られた温度の比較（ヒートガンによる実験）

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 1 件)

中谷俊介, Yungjin KIM, 河原伸幸, 冨田 栄二, 二波長型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 56 期総会・講演会(2018.3.7 徳島大学(徳島))

6. 研究組織

(1) 研究代表者

冨田 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