



技術論文

レーザ干渉法を利用した小型温度センサによる エンジンシリンダ内未燃ガス温度計測

Transient Temperature Measurement of Unburned Gas in an Engine Cylinder Using Laser Interferometry with a Fiber-Optic Sensor

河原 伸幸 Nobuyuki Kawahara 富田 栄二 Eiji Tomita 一宮 充 Mitsuru Ichimiya
高須 康嗣 Kouji Takasu 後藤 一廣 Kazuhiro Goto 都竹 広幸 Hiroyuki Tsuzuku
●岡山大学 / 岡大院 / コア技術研究室 / 応用プロジェクト開発室

Abstract

Various global environmental issues are related to the use of internal combustion engines, including air pollution and energy concerns. It is therefore desirable to improve the efficiency of spark-ignition engines. In order to develop lower fuel consumption, higher power output engines, it is necessary to know the fuel concentration, temperature and turbulence in an engine cylinder. Therefore new measurement systems with high accuracy and highly temporal resolution need to be developed. The purpose of this present study is to develop a fiber-optic sensor probe using a polarization-preserving fiber and a metal mirror for use in a fiber-optic heterodyne interferometry system. A fiber-optic heterodyne interferometry system offers high potential resolution and provides a non-intrusive temperature measurement technique. The accuracy of the measurements and the applicability of this system for an engine cylinder were discussed. The measurement accuracy of the developed fiber-optic sensor and heterodyne interferometry system was sufficient to be applied to temperature history measurement of unburned gas compressed by flame propagation in an engine cylinder. The resolution of the temperature measurement is approximately 0.7K, and is dependent on both the sampling clock speed of the A/D converter and the length of the measurement region.

要旨

省資源・地球環境保全のため、低燃費かつ高出力のエンジンを開発するには、燃焼状態に大きく影響する燃料濃度、温度、乱れ強さ等を高精度、高応答で測定可能な計測システムが必要である。そのうち温度計測に関しては比較的安価で高分解能なレーザ干渉法があるが、その1つであるヘテロダイン干渉法に光ファイバを用い、今回新たに小型温度センサを製作した。開発した温度計測システムにより、圧縮膨張機関におけるガス温度変化を測定した結果、モータリング時は圧力値から求めたシリンダ平均温度と比較的良く一致した。また、火花点火を行った場合に火炎伝播により圧縮される未燃焼ガスの温度変化を測定した結果でもシリンダ内平均温度とほぼ一致した。以上の結果から、今回開発したシステムで、火花点火機関における未燃焼ガスの温度変化が測定できることを確認できた。今後は実機エンジンへの適用に向け、開発を進める予定である。

1 はじめに

省資源・地球環境保全のために、内燃機関において熱効率向上および有害排出ガス低減の同時達成が必要とされている¹⁾。低燃費かつ高出力のエンジン開発を行うには、サイクル単位の制御や気筒

毎の制御が求められており、燃焼状態をより正確に把握しておく必要がある。そこで燃焼状態に大きく影響する燃料濃度、温度、乱れ強さなどを高精度、高応答で測定でき、実機エンジンに適用可能な計測システムが求められる。このうち温度計測は熱電対、レーザ誘起蛍光法（LIF法）、コヒーレントハ反ストークスラマン分光法（CARS法）、レーザ干渉法といった計測法がある。熱電対で急激に変化するエンジンシリンダ内の温度を測定するためには応答性に問題が生じる。LIF法では、2次元的な温度分布の測定が可能であるが定量性に問題がある。また光学窓を必要とするために実機エンジンへの適用は困難である。CARS法は光学窓が必要であること、精度も数十Kであると言われていること²⁾から実機エンジンを改良することなく適用することは困難である。また、装置としても非常に高価である。一方、レーザ干渉法は比較的安価に、数Kの分解能で温度履歴を測定できるが、機械的振動に非常に弱い実機エンジンへの適用は通常困難である。そこで富田、河原ら^{3,4)}はレーザ干渉法の1つであるヘテロダイン干渉法⁵⁾に光ファイバ等を組み合わせることにより振動に強い温度計測システムを開発した。光学系に偏波面保存型光ファイバを利用し、測定部の小型化およびセンサ化の可能性を示した。

そこで今回新たに光ファイバと金属ミラーからなる小型温度センサを用いた温度計測システムを開発し、圧縮膨張機関のモータリング時および火花点火時でのガス温度変化の測定を行った。また、温度計測システムの持つ温度分解能について検討した。

2 ガス温度測定原理

図1にレーザ干渉を用いたガス温度の測定原理を示す。レーザ干渉法はガスの密度変化を対象にした計測手法の一つであり、密度による屈折率の変化を計測することができる。密閉容器内で火炎伝播により未燃焼ガスは断熱圧縮され、未燃焼ガスの密度は屈折率とともに変化する。屈折率と密度の関係は Gladstone-Dale の式⁶⁾により表すことができる。未燃焼ガスの屈折率は温度だけではなく化学種の濃度変化にも影響を受けるため、ガス温度を見積もる際にはガス組成の情報が必要となる。屈折率変化、圧力履歴、ガス組成よりガス温度を時系列で計測することができる。

図2に典型的なヘテロダイン干渉光学系を示す。レーザからの光はハーフミラーにて2本に分けられ、1本は参照光として、もう1本は試験光として周波数シフタにて周波数シフトされた後、試験気体が入った容器内部を通過する。検出器では、参照光

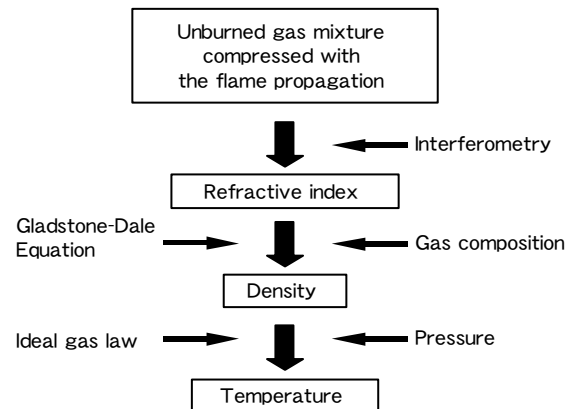


図1 Principle of temperature measurement using laser interferometry

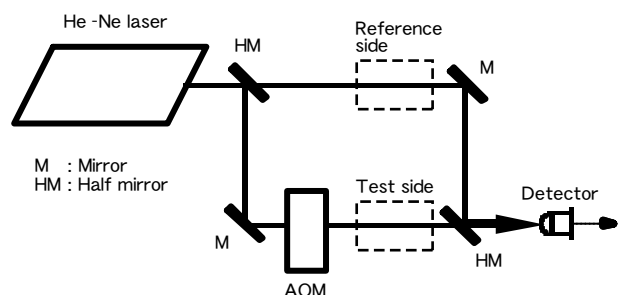


図2 A typical optical heterodyne interferometry

と試験光の周波数の差がビート周波数として表れる。ヘテロダイン法では、ある周波数のビート信号を検出するので、周波数が異なるノイズ光の影響を受けにくい。参照光と試験光のビーム強度を I_0 とすると、干渉信号 I は次式で表される。

$$I = |E|^2 = 2 \cdot I_0 [1 + \cos(2\pi f_b t + \psi_i)] \quad (1)$$

ただし、 f_b はビート周波数であり、 ψ_i は測定部の位相変化である。

測定開始から、ある時刻 t まで測定したヘテロダイン信号の位相変化を ψ_H とすれば、測定部気体の位相が変化することによって、測定信号の位相変化量 ψ_H が変わる。 ψ_H は測定部の位相変化 ψ_i と次の関係を持つ。

$$\psi_H = \int_0^t 2\pi f_b dt + \psi_i \quad (2)$$

測定部の位相変化 ψ_i は、

$$\psi_i = 2\pi\phi_i / \lambda_s = 2\pi n_i L_i / \lambda_s \quad (3)$$

となる。ここで、 ϕ_i は測定部での光路長変化である。

ガスの屈折率変化はビート周波数を変化させるため、ビート周波数は時間 t の関数となる。

$$f_b \rightarrow f_b(t) \quad (4)$$

式(4)を式(2)に代入すると、測定部の位相変化 ψ_i は、

$$\psi_i = \psi_H - \int_0^t 2\pi f_b(t) dt \quad (5)$$

となる。

気体温度 T_i は計測した光学位相変化より求められる。気体の屈折率 n_i と密度 ρ の関係は近似的に Gladstone-Dale の式で表される。

$$n_i = 1 + \frac{\rho_i R_{Gi}}{M_i} = 1 + \frac{P_i R_{Gi}}{R_0 T_i} \quad (6)$$

ここで、 R_{Gi} は Gladstone-Dale 定数⁶⁾であり、使用するレーザの波長と気体種類により決まる。 M は気体の分子量、 R_0 はガス定数、 P_i は測定部の圧力、 T_i は測定部の絶対温度である。なお、 s 種の混合気体の Gladstone-Dale 定数⁶⁾ R_{Gi} は、次式に示すように i 成分気体のモル分率 X_i から求めることができる⁶⁾。

$$R_{Gi} = \sum_{i=1}^s R_{Gi} X_i \quad (7)$$

ここで、 R_{Gi} は i 成分気体の Gladstone-Dale 定数⁶⁾である。

未燃焼混合気温度 T_i は次式で求まる。

$$T_t = \frac{2\pi P_t R_{G_t} T_{t0} L_t}{2\pi P_{t0} R_{G_t} L_t + \psi_t T_{t0} R_0 \lambda} \quad (8)$$

すなわち、初期状態の圧力 P_{t0} 、温度 T_{t0} が既知であり、混合気組成が不変であれば、圧力 P_t および干渉光の位相変化量 ψ_t を測定することにより測定部の気体温度 T_t を求めることができる。

3 温度計測システム

3.1 小型温度センサを用いたヘテロダイン干渉光学系

本研究にて開発した温度計測システムの概略を図3に示す。安定化 He-Ne レーザ（出力 1mW、波長 632.8nm）からの光は、ヘテロダイン用音響光学素子（ブラッグセル式）により周波数を 80.0MHz と 79.9875MHz や、80.0MHz と 79.975MHz など異なる周波数に周波数シフトされ、2本のビームはそれぞれ P 偏光、S 偏光に分離される。本研究では、P 偏光の光を 80.125MHz、S 偏光の光を 80.1MHz に設定した。2本の光は偏光ビームスプリッタ (PBS) により一本のビームとなる。

ハーフミラーにより反射されたビームは偏光板により干渉し、フォトランジスタにより参照信号として 25kHz のビート周波数が検出される。一方、ハーフミラーを透過したビームは PBS により、再び2本のビーム（それぞれ P 偏光と S 偏光の偏光面を持つ）に分けられ、マイケルソン型干渉計を構成する。試験光の1本 (P 偏光の偏光面を持つビーム) は、 $\lambda/4$ 板を通過し円偏光となる。円偏光となったビームはミラーにより反射され再び $\lambda/4$ 板を通過後、S 偏光となり PBS に戻る。試験光の他方 (S 偏光を持つビーム) は $\lambda/2$ 板を通過後、レンズによって絞られ偏波面保存型光ファイバへと入射される。ファイバから出た光はセルフフォーカスマイクロレンズ (SML) によってコリメート化される。測定部を通過した後ミラーにより反射され再び測定部を通過する。反射されたビームは再び $\lambda/2$ 板を通過し PBS に戻ってくる。試験側の両者の光は再び一本となり偏光板を通過後干渉し、フォトランジスタ (PT) で試験信号として検出される。500kHz のサンプリング周波数でこの干渉信号をデジタルメモリに記録する。参照信号と試験信号のビート周波数の違いから、位相差を算出することができる。

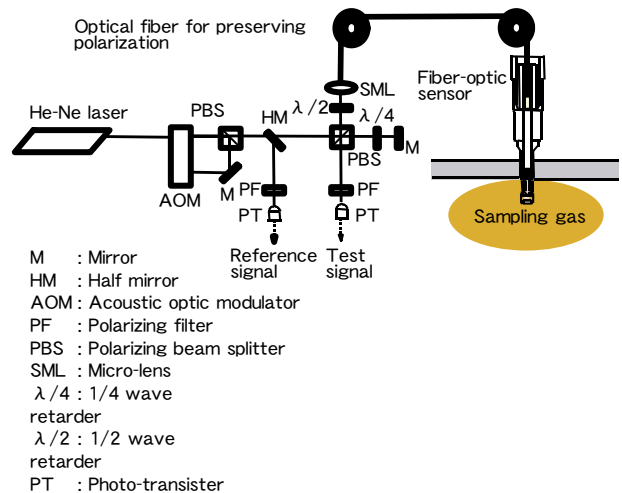


図3 Heterodyne interferometry with fiber-optic sensor

3.2 小型温度センサの開発

試作した小型温度センサの写真および概略を図4に示す。温度センサを開発するにあたり、主に (1) 耐熱性、(2) 大きさ、(3) 測定部長さを考慮した。

(1) 耐熱性

センサが高温に耐えられるようにウィンドウ部にサファイア、ミラー部には金属ミラーを使用した。

また、SMLと光ファイバは熱に弱く、光ファイバに熱が加わると位相変化が生じる。それゆえ、光ファイバに熱が伝わりにくくように測定部と光ファイバを切り離した構造にした。実用機関への設置に関してはセンサが非常に高温にさらされると予想される。そこで、レーザ光が通過する測定部以外の温度変化を知る必要がある。よって、SMLとウィンドウ部の間の温度測定を熱電対で行う。

(2) 大きさ

実用機関を改良することなくセンサが設置できることが望ましい。よって、一般的なエンジン筒内圧力センサの取り付け方法と同様の方法にて設置できるように、センサにはM5のネジを切っている。

(3) 測定部長さ

本測定法では測定部が長いほど位相変化量は大きくなるためS/N比が向上し、温度計測分解能も向上する。しかし、測定される値は測定部の平均温度になるため、より局所的な温度変化を知りたい場合には好ましくない。また実用機関への設置を考えた場合、筒内への突き出し量が増加するため設置できる場所が限られてしまう。一方、測定部を短くするとS/N比は低下するが、局所的な温度変化の測定が可能となる。よって最適な測定部長さと温度計測分解能の関係を知る必要がある。そこで、以前著者ら⁴⁾が行った火花点火における未燃焼ガスの温度履歴の結果を基に位相変化量を見積もり、測定部長さと温度計測分解能の関係を求めた。温度、圧力条件は3.2MPa、660Kである。図5に測定部長さと温度計測分解能の関係を示す。図の横軸は測定部長さを示し、縦軸は温度の最小読み取り値を示す。これによると測定部が長くなるにつれて、温度の最小読み取り値が小さくなり温度計測分解能が向上しているのがわかる。この結果から測定部長さはダブルパス方式で13mmとした。

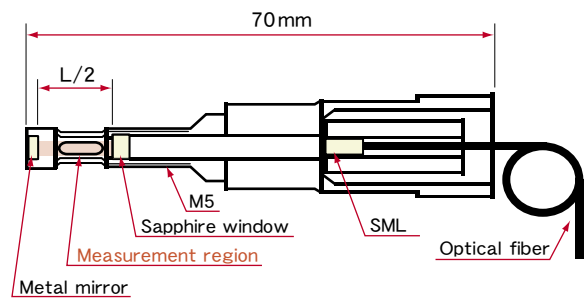
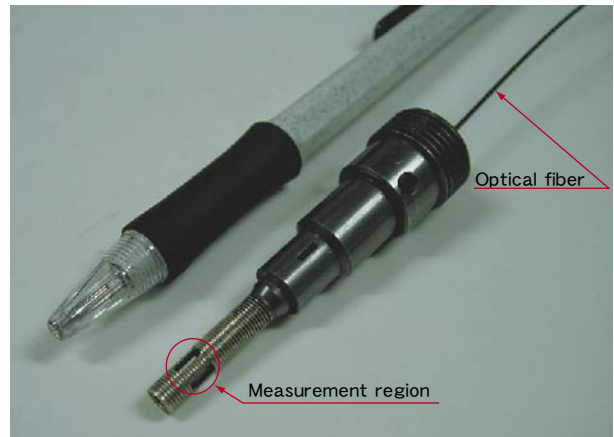


図4 Schematic diagram and photograph of fiber-optic sensor

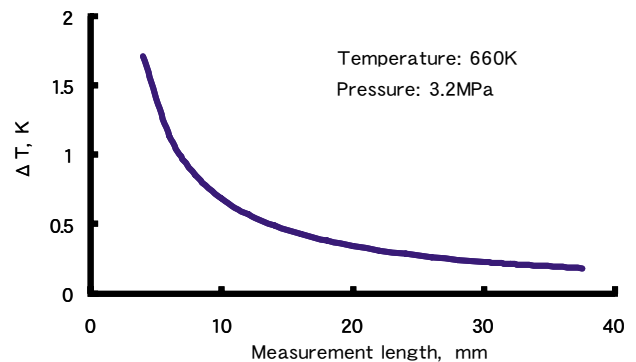


図5 Relationship between measurement length and resolution of temperature

4 実験結果

4.1 実験装置と方法

図3に示した温度計測システムを一度だけ燃焼が可能な圧縮膨張機関に適用した。図6に機関の概略を示す。この機関は燃焼が行われるシリンダ部と混合気が充填される混合気タンクで構成されている。燃焼室内はパンケーキ型である。また、石英製のピストンヘッドを使用することで、ボトムビュー方式で可視化ができる。ボア×ストロークは78mm×85mmであり、圧縮比はスペーサを変えることにより可変できる。本研究では圧縮比は9.7および11.2である。実験手順を以下に示す。

- (1) シリンダヘッドに取り付けられたきのこ弁を開け、燃焼室内を真空状態にして、ピストンを上死点(TDC)に設置する。
- (2) あらかじめ作成しておいた均一予混合気を混合気タンクからシリンダ内に所定の圧力まで充填する。
- (3) 弁を開けた状態でモータにより機関を駆動し、一定の時間後に下死点(BDC)で弁を閉じ、上死点前(BTDC)20°で点火した。弁が閉じた時のシリンダ内のガス温度は混合気タンクに取り付けられた熱電対により知る事ができる⁷⁾。以上の手順で行い、計測は弁が閉じた後の最初の圧縮膨張行程で行った。

図7にセンサが取り付けられた状態での機関の写真を示す。センサは電極の反対側に壁面から14mmの位置に取り付けられ、筒内への突き出し量は8.8mmである。

4.2 モータリング時のガス温度計測

初めに機械的振動などの影響を調べるために、モータリング時でのガス温度変化の測定を行った。図6に示した圧縮膨張機関に空気を室温で大気圧まで充填し、図3に示す温度計測システムおよび圧力変換素子により、測定部における位相変化および圧力を測定した。圧縮比は9.7である。図8に測定した位相変化量と圧力値の関係をクランク角に対して示す。圧縮行程においてクランク角300°まで

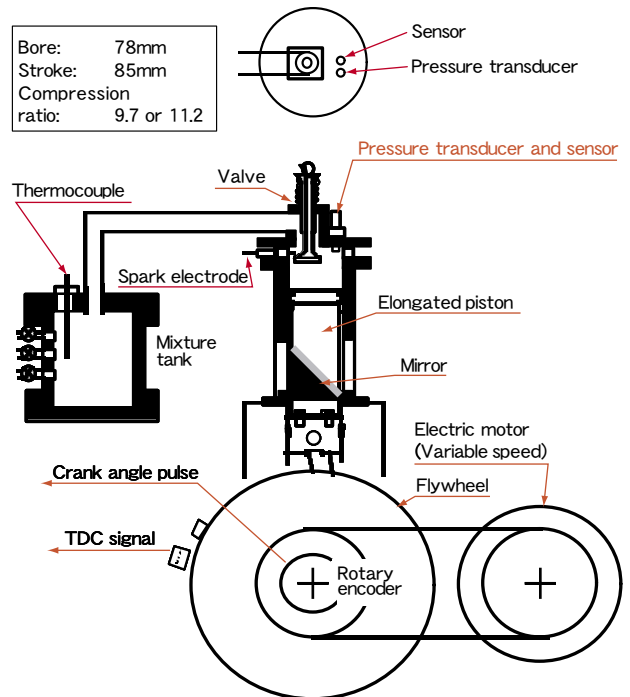


図6 Schematic diagram of compression-expansion engine

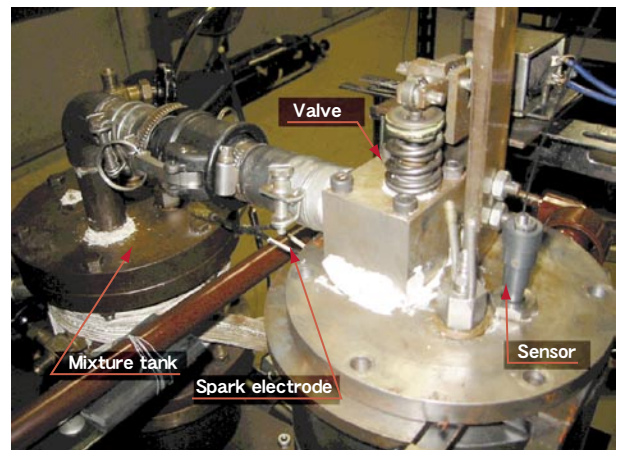


図7 Photograph of test engine with fiber-optic sensor

の緩やかな圧力上昇に対して位相変化量も同じように緩やかに増加している。300° から 360° までの急激な圧力上昇に対しては位相変化量も急激に増加しているのがわかる。この位相変化量と圧力履歴より測定部のガス温度変化を式 (8) より見積もった。図 9 にガス温度変化をクランク角に対して示す。青丸 (●) がヘテロダイン干渉法で求めた値である。一方、実線は圧力値からポリトロプ変化を仮定して計算したシリンダ内平均温度である。この結果を見るとクランク角 240° では両者の値に違いが見られる。これは、圧力値が低いと位相変化量も少ないため位相の読み取り誤差が影響していると考えられる。また、弁が閉じた時の振動の影響があげられる。一方、TDC 付近になると位相変化量も増大し、弁の振動の影響もなくなるために両者の値は比較的良好に一致している。

4.3 火花点火による未燃焼ガス温度計測

前節まででモータリング時におけるガス温度計測は測定可能であることがわかった。本節では圧縮膨張機関において火花点火を行い、未燃焼ガスの温度変化測定を試みた。ガスには当量比 1.0 のメタン-空気混合気を用いた。圧縮比は 11.2 であり、点火時期は BTDC20° である。また、機関回転速度は 600rpm である。図 10 に測定した位相変化量と圧力値との関係をクランク角に対して示す。モータリング時と同じようにクランク角 340° までは緩やかな圧力上昇に伴って位相変化量も緩やかに増加している。そして、340° から火炎が測定部を通過するまでの急激な圧力上昇に伴って位相変化量も急激に増加し、モータリング時と比較しても位相変化量も大きいことがわかる。また、試験信号が急激に減少したときを火炎が測定部を通過したと判断した。この位相変化量と圧力履歴から式 (8) を利用して未燃焼ガスの温度履歴を算出した。図 11 に

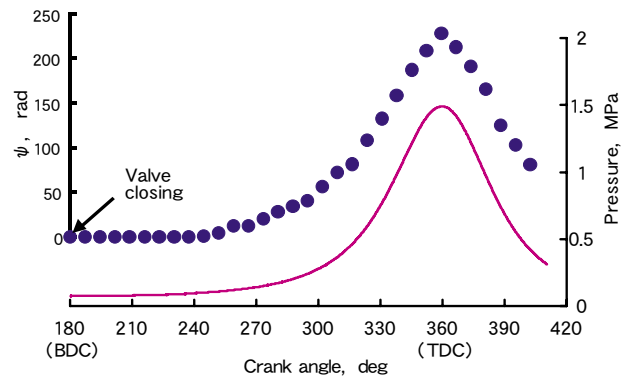


図 8 Measurement phase shift and pressure under motoring condition

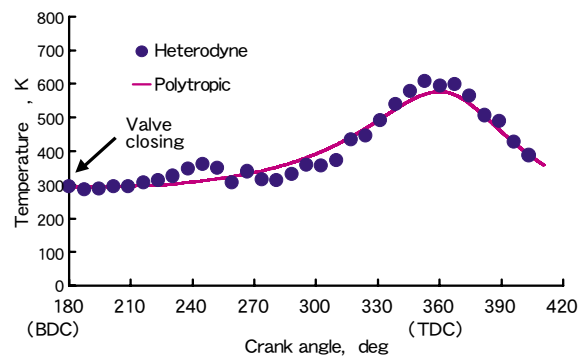


図 9 Temperature change of air under motoring condition

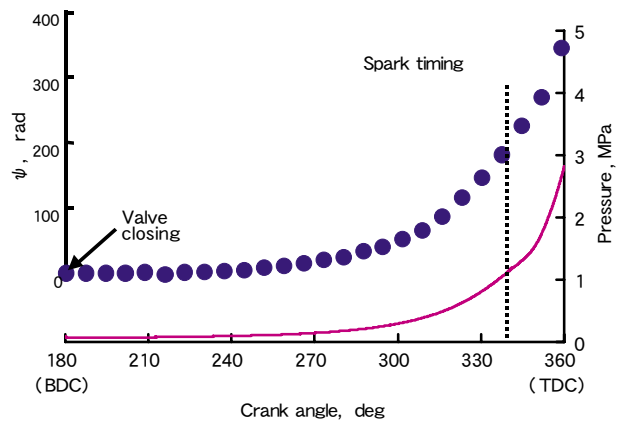


図 10 Measurement phase shift and pressure under firing condition

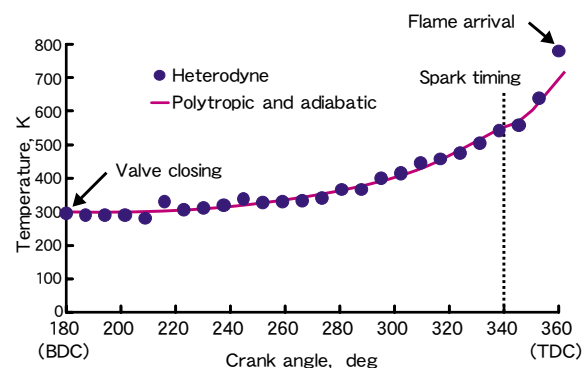


図 11 Temperature change of unburned gas under firing condition

測定部のガス温度変化を示す。横軸はクランク角で縦軸は温度を示している。青丸 (●) は実験値である。実線は式 (9) より圧力値を用いて算出したシリンダ内平均温度である。

$$T_m = T_{ig} (P_t / P_{ig})^{\frac{k-1}{k}} \quad (9)$$

ここで k は未燃焼混合気の比熱比であり温度 300K ~ 600K 圧力 0.1 ~ 3MPa の範囲における平均値を 1.380 として用いた。両者の値を比較すると下死点から点火時期まで混合気が圧縮されるにしたがって、緩やかに温度上昇しており両者の値は比較的良く一致しているのがわかる。点火後の急激な温度上昇に対しては、実験値 T_t の方がシリンダ内平均温度 T_m よりも若干高い値となっているが、両者の値はほぼ一致していることがわかる。

以上の結果から今回開発した小型温度センサを用いた温度計測システムでエンジン内の未燃焼ガス部の温度変化を局所的に計測できることを示すことができた。

5 測定精度の検討

本節では小型温度計測センサを用いた温度計測システムの持つ温度計測分解能の検討を行った。今回は 25kHz のビート周波数信号をアナログ / デジタル (A/D) ボードを用いて 500kHz のサンプリング周波数で記録した。このとき、20 点で一周期を記録することになる。ここで 1/20 周期分の光路長変化を位相の最小読み取り値とすると、圧力の増加に伴いビート周波数が変化するために最小読み取り値は変化する。図 12 に圧力履歴と温度の最小読み取り値との関係を示す。圧力の増加に従い温度分解能が上昇しているのがわかる。火炎が測定部を通過する直前の温度分解能は 0.7K 程度である。温度分解能は、A/D 変換ボードのサンプリング周波数、ヘテロダイン干渉法のビート周波数、測定部の長さにより決定されるため、これらの最適化を行うことで改善することが可能である。

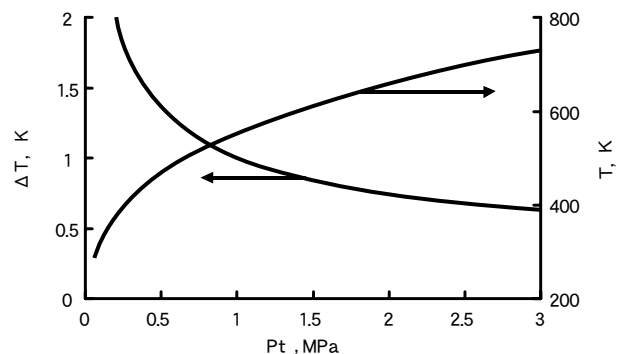


図 12 Resolution for temperature measurement of unburned gas

6 おわりに

小型温度センサとヘテロダイン干渉光学系を利用した温度計測システムを開発した。このシステムを使って圧縮膨張機関におけるガス温度変化を測定した。その結果、モータリング時は圧力値から求めたシリンダ平均温度と本システムで計測した値とは比較的良い一致を示した。また、火花点火を行った場合に火炎伝播により圧縮される未燃焼ガスの温度変化を測定した結果でもシリンダ内平均温度とほぼ一致した値となった。以上の結果から今回開発した温度計測システムを用いて火花点火機関における未燃焼ガスの温度変化が測定できることが確認できた。今後は、実機エンジンへの適用に向け開発を進める予定である。

■参考文献

- 1) Heywood, J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, Inc., (1988).
- 2) Akihama, K., Asai, T., JSME International Journal, B 36-2: 364 (1993).
- 3) 河原, 富田, 鎌倉, 光ファイバを用いたヘテロダイン干渉法によるガス温度変化計測, 第16回内燃機関シンポジウム・講演論文集, (2002), pp.349-354.
- 4) Kawahara, N., Tomita, E., and Kamakura, H., Unburned Gas Temperature Measurement in a Spark-ignition Engine Using Fiber-Optic Heterodyne Interferometry, Meas. Sci. Technol. 13-1, (2002), pp.125-131.
- 5) 吉澤, 瀬田編, 光ヘテロダイン技術, OE シリーズ 2, 新技術コミュニケーションズ, (1994).
- 6) Gardiner, W. C. Jr, Hidaka, Y., and Tanzawa, T., Refractivity of Combustion Gases, Combust. And Flame, 40, (1980), pp.213-219.
- 7) Tomita, E., Hamamoto, Y., and Jiang, D., Measurement of Temperature History of Unburned Gas Before Knocking in a Spark-Ignition Engine Using Laser Interferometry, Meas. Sci. Technol. 11-6, (2000), pp.587-593.