



技術論文

レーザー干渉法によるSIエンジンシリンダー内の未燃焼ガス温度計測

Unburned Gas Temperature Measurement in an SI Engine Using Fiber-Optic Laser Interferometry

河原 伸幸 富田 栄二 大西 健二 後藤 一廣

Abstract

A heterodyne interferometry system with a fiber-optic sensor was developed to measure the temperature history of unburned gas in a spark-ignition(SI) engine. A polarization-preserving fiber and metal mirror were used as the fiber-optic sensor to deliver the test beam to and from the measurement region. This fiber-optic sensor can be assembled in an engine cylinder head without a lot of improvements of an actual engine. Adjustment system in the sensor was revised to face the distributed index lens with metal mirror. Before the flame arrived at the developed fiber-optic sensor, measured temperature was almost same with the temperature history after the spark, assuming that the process that changes the unburned gas is adiabatic. In situ unburned gas temperature measurements before knocking in a commercially produced SI engine can be carried out using developed fiber-optic heterodyne interferometry system. Although the heterodyne interferometry with the developed fiber-optic sensor provides the mean temperature along the line of sight, the feasibility of our system was sufficient to be applied to temperature history measurement of an unburned gas compressed by flame propagation in an engine cylinder. The developed heterodyne interferometry with fiber-optic sensor has a good feasibility to measure the unburned gas temperature history in the commercially produced SI engine.

要旨

光ファイバーを組み合わせたヘテロダイン干渉光学系により、SIエンジン(実用火花点火機関)でのシリンダー内エンドガス温度の時系列計測を行った。偏波面保存型光ファイバーと金属ミラーを用いることで計測センサー部を作成した。この光ファイバー計測センサー部は計測部径を $\phi 5\text{mm}$ としており、圧力センサーのようにシリンダーヘッドなどに組み込むことができる。まず、圧縮・膨張機関におけるエンドガス温度測定を行い、火炎が計測センサー部に到達するまでのエンドガス温度履歴を、火炎可視化結果と比較して、示した。これは、シリンダー圧力履歴から求めたシリンダー内平均温度と良い一致がみられた。さらに、実用火花点火機関に、本計測システムを適用した。燃料として気体ガス、液体ガソリン、n-ヘプタンなどを用いて、エンドガス温度履歴計測を行った。ガソリンを用いた場合、3,000rpm程度の機関回転速度でのエンドガス温度計測が可能になった。また、n-ヘプタンを用い、ノッキング時におけるエンドガス温度計測を行い、本計測システムのSIエンジンへの適用性を示した。

1 はじめに

火花点火機関においては、熱効率向上、排出ガスのクリーン化が重要な課題である。熱効率を向上するためには圧縮比の増加が近道であるが、高い圧縮比はエンドガスの高温・高圧化を引き起こし、エンドガスの自着火、つまりノッキングの主要因となる^{1~2)}。このエンドガスの自着火は、低温酸化反応に起因していると考えられている³⁾。この問題を解決するためには、エンドガス温度の時系列計測が有効であるが、実用火花点火機関においては簡単なことではない。

エンジンシリンダー内でのエンドガス温度計測には、高精度で高応答な新しい計測手法が必要である。一般的な温度計測に用いられる熱電対は時間分解能が不足しているため、レーザー等を用いた光学計測の必要がある^{4~5)}。

例えば、LIF(Laser Induced Fluorescence : レーザー誘起蛍光)計測手法では、Orthらが、OHラジカルのLIFとレーリー散乱光を2次元同時計測し、2次元での温度計測結果を示している⁶⁾。また彼らは、燃料混合気組成と温度との関連性も計測している。Schulzらは、KrFエキシマレーザーをLIFに用いて定量的なNO濃度分布を得ており、同時にレーリー散乱法により温度分布を得ている⁷⁾。KaminskiらはTLAF(2波長原子蛍光法)を内燃機関に適用しており⁸⁾、高温・高圧条件下で温度計測精度14%であることを説明している。このように、LIF計測手法は定量的な2次元計測が可能になっている。しかし、LIFを用いた場合、レーザーの繰り返し周波数の問題で、時系列計測することは困難である。

LIF以外の光学計測では、Sandersらが、波長可変の赤外吸収法を用いてHCCI(Homogeneous compression-ignition : 予混合圧縮着火)機関のガス温度計測を行っている⁹⁾。他にも、多くのエンジン研究者がCARS法(coherent anti-Stokes Raman spectroscopy)を用いている。CARS法は、信号強度が強いためエンジンなどにも適用でき、局所での温度計測が可能になるためである^{10~14)}。例えば、Bradleyらは、高温・高圧容器およびテストエンジンを用いてCARS法での計測精度を評価している¹¹⁾。彼らの報告によると、エンジンシリンダー内でのCARS計測手法の計測精度は±25 Kとなっている。

しかしながら、LIF計測手法、赤外吸収法、CARS法などを実機エンジンに適用するには、観測窓が必要になるため非常に困難である。実機エンジンでの温度履歴計測となると、さらに厳しい条件となる。

一方、レーザー干渉法はライン計測ではあるが、比較的安価に、数Kの分解能で時系列にて温度履歴を測定できる¹⁵⁾。数名の研究者らがレーザー干渉法をガス温度計測に適用している^{16~17)}。しかし、今まではレーザー干渉法は機械的振動に弱いことや、その光学系レイアウトから、実用機器への適用は困難といわれてきた。Hamamotoら¹⁷⁾やTomitaら¹⁸⁾は、光ファイバーとケスタプリズムを用いることでマッハツェンダー干渉系をエンジンのスペーサーに組み込み、ノッキングまでの未燃焼ガス温度計測に成功している。しかし、このシステムは装置が複雑なため、一般的な温度センサーとして利用することは困難であった。そこで、我々は光ファイバーを組み込んだヘテロダイン干渉光学系を構築した^{20~21)}。光ファイバーと金属ミラーを用いることで計測センサー部を構築し、テストエンジンにより適用性、計測精度を評価した。この手法を用いることで、計測精度±10 K程度により、テストエンジンでの未燃焼ガス温度計測が可能になってきた。

本研究では、開発した温度計測システムを実機エンジンに適用するため、光ファイバーと金属ミラーを用いた計測センサー部を改良した。まず、テストエンジンにより適用性を評価し、実機エンジンに適用した。ここでは、我々が開発した温度計測システムの実機エンジンへの適用性について報告する。

2 ガス温度計測原理

2.1 光ファイバー光学系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1に示す。安定化He-Neレーザー(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本のビームとなる。そのビームは、それぞれP偏光(入射面に平行な偏光)とS偏光(入射面に垂直な偏光)に分離される。本研究では、P偏光の光を80.125MHz、S偏光の光

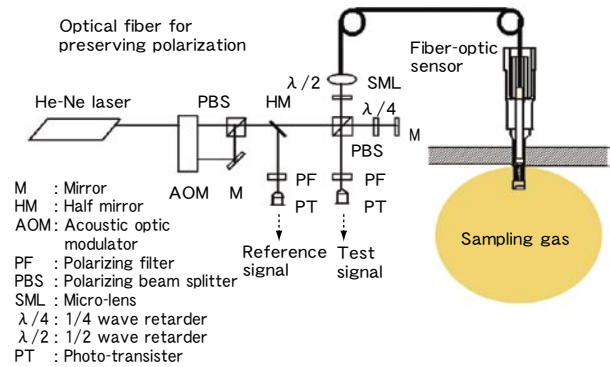


図1 Heterodyne interferometry with fiber-optic sensor

を80.1MHzに設定した。2本の光は偏光ビームスプリッター(PBS)により1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、フォトランジスター(PT)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ーへと入射される。ファイバーから出た光はセルフフォーカマイクロレンズ(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1本となり偏光板を通過後干渉し、フォトランジスター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ーに記録する。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。

2.2 温度計測原理

周波数のわずかに異なる2つの光を重ね合わせると、差の周波数のうなりを生じる。情報をもったある周波数の信号光に、それとは周波数がわずかに異なる参照光を重ね合わせて差の周波数のうなり信号(ビート周波数)を光電検出器で検出することを光ヘテロダイン検出と呼び、ヘテロダイン検出した信号から信号が持っているさまざまな情報を取り出す手法をヘテロダイン干渉法という。このようにヘテロダイン干渉法では、ほぼ一定のビート周波数を検出することになるので、周波数の異なる外乱光の影響を受けにくいという特徴を持つ。

レーザー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、光による気体の屈折率変化を知ることができる。気体の密度変化と屈折率の関係は近似的にGladstone-Daleの式²³⁾で表され、ヘテロダイン干渉法では試験信号と参照信号の周波数から位相変化量を求め、位相変化量と屈折率の関係式とGladstone-Daleの式から密度変化を算出している。算出した密度変化と、エンジンシリンダー内に取り付けられた圧力変換素子により計測した圧力を理想気体の状態式に代入することにより、ガスの温度変化を算出することができる。位相変化量と圧力から温度を算出する式は以下で示される²²⁾。

$$T_t = \frac{2\pi P_t R_G L_t}{2\pi P_{t_0} R_G L_t + \Delta\psi T_{t_0} R_0 \lambda} \quad (1)$$

ここで、 R_G は測定気体のGladstone-Dale定数であり、使用するレーザーの波長と気体の種類により決まる。すなわち、初期状態の圧力 P_{t_0} と温度 T_{t_0} 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 $\Delta\psi$ 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。

2.3 開発した計測センサー部

本研究で試作した小型温度計測センサーの写真、および概略を図2に示す。センサーは光ファイバー、ウィンドウ部、ミラー部によって構成されている。温度測定部にはガス取り入れ口が設けてあり、この中のガス温度を測定できる。ウィンドウと金属ミラーの間の距離は6.5mmで、測定部長さはダブルパスで13.0mmとなる。センサー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と光ファイバーは熱に弱く、光ファイバーに熱が加わると位相変化が生じる。それゆえ光ファイバーに熱が伝わりにくいように、測定部と光ファイバーを切り離した構造にした。エンジンへの取り付け方法は、はめ込み式で、2本のボルトで固定する。測定部の直径は5.0mmであり、取り付けもはめ込み式としていることで、エンジンに穴開け加工程度の簡単な改造でセンサーを取り付けることができる。

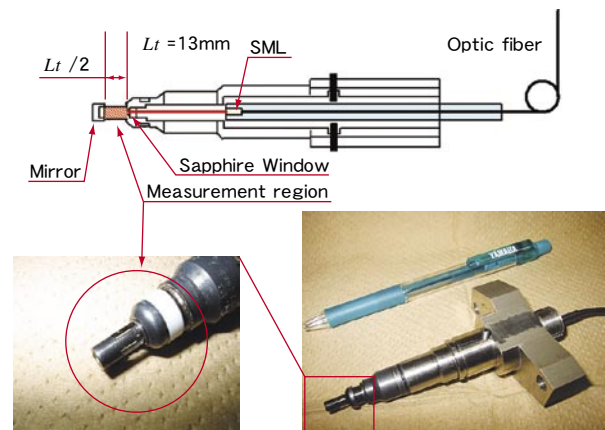


図2 Photographs of developed fiber-optic sensor

3 テストエンジンにおけるエンドガス温度計測

まず、テストエンジン(圧縮・膨張機関)^{21~22)}により、開発した計測センサー部の評価を行った。この機関は燃焼が行われるシリンダー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8.9である。エンジン回転数は600rpmであり、点火時期はTDC(上死点)前20度である。センサーは点火電極より64mm離れたところに設置している。シリンダーおよび混合気タンクは、あらかじめ予混合し、メタン~空気混合気(当量比1.0)を初期圧力 $P_0 = 100$ kPaにて充填している。この圧縮・膨張機関は、延長ピストンと石英窓によりボトムビュー方式による可視

化が可能である。シリンダー内の火炎の様子をイメージインテンシファイア付き高速度ビデオカメラ(毎秒4,500コマ)により、温度計測と同時に計測を行った。

開発した計測センサー部を使用した温度計測システムにより、シリンダー内でのエンドガス温度をシリンダー内圧力とともに計測した。クランク角度210度から火炎がセンサーに到達するまでのエンドガス温度履歴を図3に実線にて示す。計測結果の妥当性評価のために、クランク角度210度から火花点火時までをポリトロプ変化を仮定し、火花点火時から火炎がセンサーに到達するまでを断熱圧縮を仮定して圧力履歴から求めたシリンダー内平均温度を破線にて示す。開発した計測センサー部により計測したシリンダー内エンドガス温度履歴は、圧力履歴から求めたシリンダー内平均温度とほぼ一致することが分かる。図4に高速度ビデオカメラにより撮影した火炎伝ばの様子を示す。写真中に赤丸で表している点が計測センサーの設置部分である。火花点火電極は写真右側に設置している。図中アルファベットで記しているクランク角度を図3に示している。火炎が計測センサー部に到達すると、レーザービームが曲げられ干渉信号が得られなくなり、火炎到達時期を判断することができる。これより、火花点火時から火炎が計測センサー部に到達するまでの間は、開発した計測センサーにより測定した温度は断熱圧縮を仮定して求めたエンドガス温度とよく一致していることが分かる。

以上のように、テストエンジン(圧縮・膨張機関)により、開発した計測センサー部を用いて従来と同様の結果を得られることが分かった。

4 実機火花点火機関での計測

4.1 供試機関

本研究で使用したエンジンシステムの概略を図5に示す。使用したエンジンは、ボア×ストロークが70×58mm、排気量223cm³、圧縮比9.5の空冷4サイクルSOHC単気筒2バルブの自動二輪車用のものである。燃料に気体を用いる場合、スタティックミキサーにより吸入空気と予混合された後にシリンダー内に供給する。ガス流量、吸入空気流量ともに層流流量計により計測している。燃料にガソリンを使用

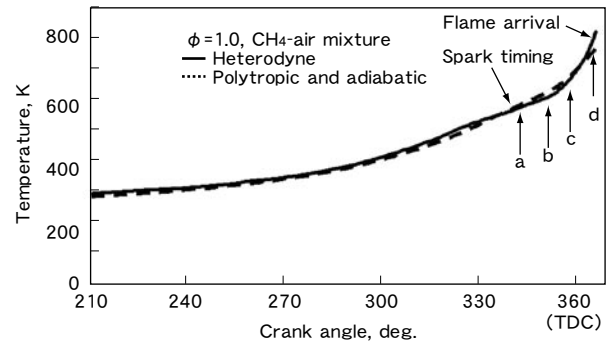


図3 Temperature change of unburned gas in a compression-expansion engine

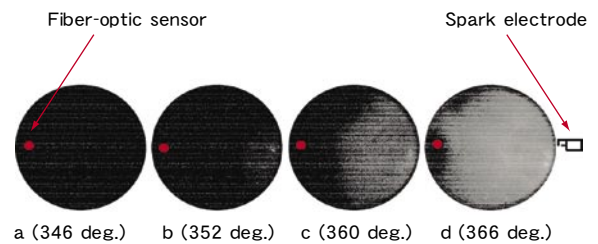


図4 Flame propagation in a compression-expansion engine

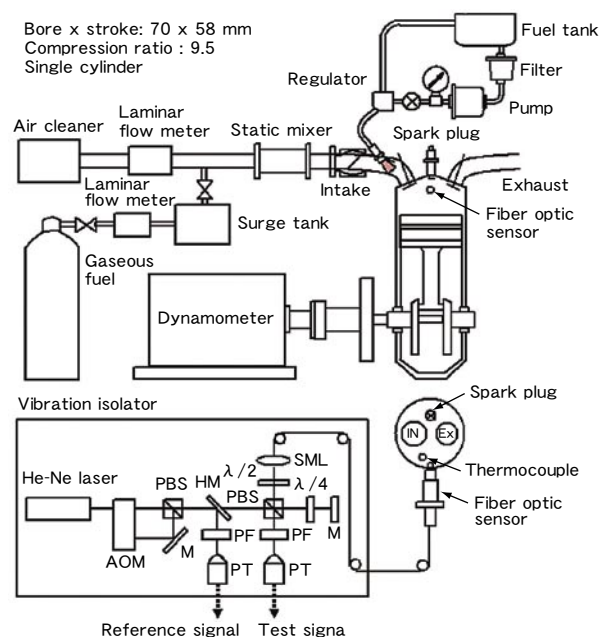


図5 Experimental set-up

する場合、吸気管のスロットルバルブ直後に噴射弁を取り付け、ポート噴射にしている。また、クランクシャフトに取り付けられたロータリーエンコーダーによりクランク角を検出している。これらの信号はパソコンに接続したECU(Engine Control Unit)に送られ、点火時期や噴射時期を制御できるようになっている。また、**図6**の写真に示すように、センサーは点火栓のちょうど対極に位置する形でエンジンシリンダー内に挿入されるため、エンドガス部の未燃焼ガス温度を測定できる。

4.2 n-ブタンを使用したときの測定結果

図7に、燃料にn-ブタンを使用したときの結果を示す。吸入混合気温度を電気ヒーターを用いて上昇させ、駆動運転状態(機関回転速度1,560rpm)で一度だけ燃焼させて、そのときの温度測定を行った。実験条件は当量比 $\phi=0.7$ 、点火時期30deg.BTDC、吸気温度を室温、100℃、130℃とした。圧力の測定結果より、点火後、圧力履歴は吸気温度が高いほど急激に上昇し、その最大値も高いことが確認できる。測定結果は圧力差が大きくなる点火(330deg.)後から火炎の伝ばにより信号が途絶える直前までを示している。温度履歴は吸気温度が高いほど、その傾きが急になっているのが確認できる。

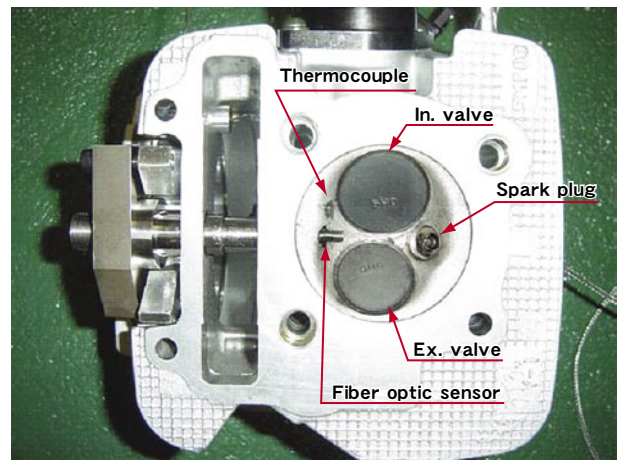
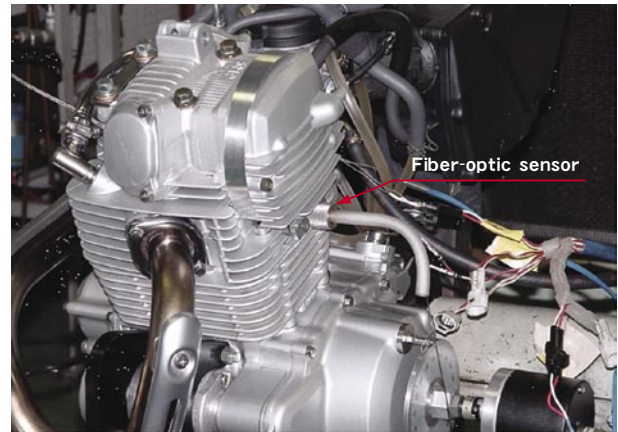


図6 Photographs of spark-ignition engine with fiber-optic sensor

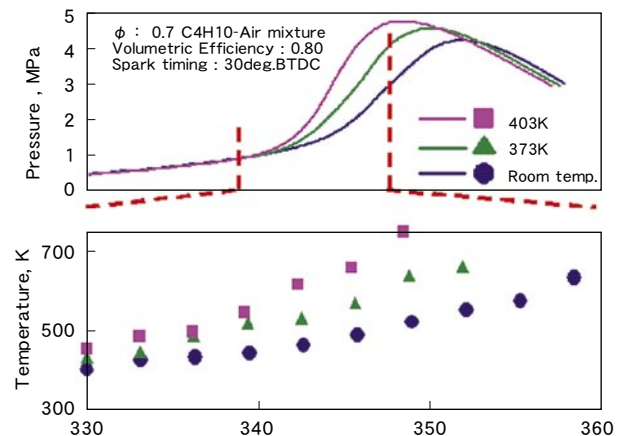


図7 Unburned temperature history (n-butane)

4.3 ガソリン使用時のGladstone-Dale定数

ガソリンのような多成分の燃料を使う場合、n-ブタンと違い、そのGladstone-Dale定数の情報が文献にはない。表1に各ガスのGladstone-Dale定数²³⁾を示す。

このため、解析する際に燃料のGladstone-Dale定数を既知であるプロパン、n-ブタン、n-オクタンの値を用い、それぞれ実験時における当量比条件での混合気であるとしてGladstone-Dale定数を算出し、その結果から温度の算出を行った。実験条件は機関回転速度 $n=2,000\text{rpm}$ で空燃比12.0、自走状態である。その結果を図8に示す。破線は燃焼室内を点火まではポリトロープ変化、点火後は可逆断熱変化であるとして算出したシリンダー内未燃焼ガス温度である。プロパン、n-ブタンの結果はプロット点付きの破線で、プロット点(▲)付きの実線はn-オクタンとしたときの結果である。プロット点はそれぞれ1msごとの測定結果を示している。n-オクタンとして算出した結果はシリンダー内未燃焼ガス温度に近い値を示していることから、ガソリンのGladstone-Dale定数もこれに近い値であると考えられる。このため、以下の解析ではGladstone-Dale定数をn-オクタンの値として解析を行っている。

次に、連続燃焼時において機関回転速度を変化させたときの測定を行った。実験条件は点火時期を30deg.BTDCとし、自走状態、 $n=2,000\text{rpm}$ 、 $3,000\text{rpm}$ の連続燃焼において測定を行った。図9の測定結果は機関回転速度の差による温度履歴変化を見るために、IMEP(図示平均有効圧力)=0.19MPa付近の測定結果について整理を行ったものである。ここに示す温度履歴は3サイクルの平均値となっている。また、プロット点は1msごとの測定結果である。破線は上記同様に求めたシリンダー内未燃焼ガス温度である。測定結果を比べると、温度変化の傾きが $2,000\text{rpm}$ に比べ $3,000\text{rpm}$ の方が急になっていることが確認できる。これは、機関回転速度が高いほど圧力が高くなり、初期温度も高くなるためである。

表1 Gladstone-Dale constant

Species	Ar	N ₂	H ₂	O ₂	CO ₂	Air
R _G , cm ³ /mol	6.298	6.689	2.583	6.053	9.968	6.552
Species	CH ₄	C ₃ H ₈	n-C ₄ H ₁₀	n-C ₆ H ₁₄	n-C ₈ H ₁₈	
R _G , cm ³ /mol	9.864	24.069	30.942	44.773	58.611	

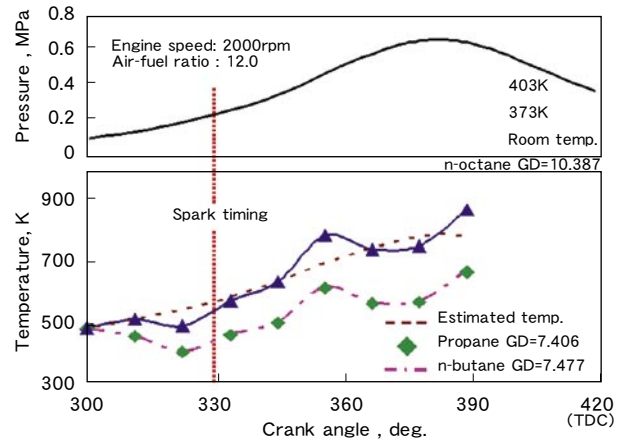


図8 Effect of Gladstone-Dale constant on temperature of gasoline-air mixture

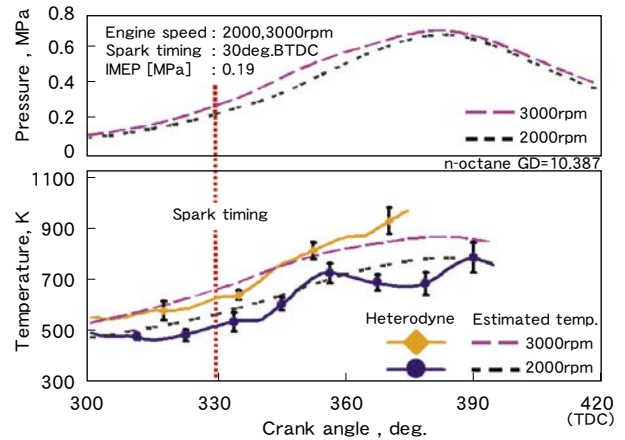


図9 Effect of engine speed on temperature of gasoline-air mixture

4.4 ノッキング時の温度測定結果

液体燃料にn-ヘプタンを用いることで、エンジンシリンダー内にノッキング状態を形成することができる。火花点火機関においては、自着火に起因するノッキング直前までのエンドガス温度を計測することは、非常に重要である。そのため、ノッキング状態でのエンドガス温度の時系列計測を行った。

図10にシリンダー内圧力履歴、および、開発した計測センサーにより測定したエンドガス温度履歴を示す。エンジン回転数は1,560rpm、空燃比21.0、点火時期はTDC前60度により行った。圧力履歴より、TDC付近に弱いノッキングを示す波形を見ることが

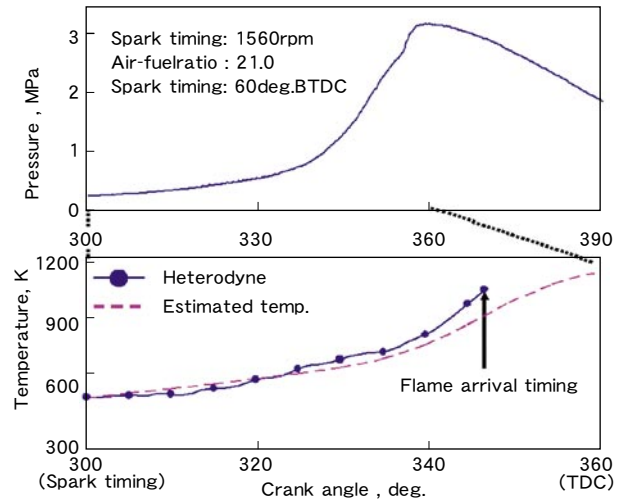


図10 Unburned temperature history under knocking condition

できる。計測したエンドガス温度は丸印および実線により示している。圧力履歴から求めたシリンダー内平均温度は破線により示している。計測した温度履歴は、シリンダー内平均温度より若干高い値を示している。これは、開発した計測センサー部により測定した温度は局所温度であるが、圧力履歴から求めた温度はシリンダー内平均温度であること、エンドガスが火炎により圧縮されることで化学反応を起こしていることなどが原因であると考えられる。また、ノッキング直前までのエンドガス温度は、シリンダー内でノッキング箇所を特定することが困難であること、計測センサー部がある程度の大きさを持つことなどにより計測することは困難であった。しかしながら、本研究で開発した計測センサー部およびヘテロダイン干渉光学系を用いることで、実機エンジンにおいてノッキング現象が見られる条件下での計測が可能になっている。

以上のように開発した温度計測システムは、実機エンジンにおいてエンドガス温度履歴を計測できる適用性を示している。

5 おわりに

今回、開発した温度センサーを実用エンジンに適用した。燃料にn-ブタンを使用し、吸気温度を変化させて実験を行い、吸気温度の差により温度履歴に違いが出ることが確認できた。ガソリンのGladstone-Dale定数はn-オクタンとして見積ると妥当であると分かった。機関回転速度を3,000rpmまで上げて計測を行うことができた。さらに、燃料にn-ヘプタンを用いることでエンジンシリンダー内にノッキング現象を生じさせ、このような条件下においても、エンドガス温度履歴が計測可能であることを示した。以上の結果より、本研究で使用したセンサーは、ガソリンを使用するような実用エンジンにおいて適用可能であると考えており、より精度良い計測ができるように計測システムの開発を続けている。

■参考文献

- 1) Heywood, J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, Inc., (1988).
- 2) Pilling, M.J., Low-Temperature Combustion and Autoignition, Elsevier Science., (1997).
- 3) Bäuerle, B., Hoffmann, F., Behrendt, F., and Warnatz, J., Detection of Hot Spots in the End Gas of an Internal Combustion Engine Using Two-dimensional LIF of Formaldehyde, Proc. Combust. Inst., 25 (1994) 135-141.
- 4) Zhao, H, and Ladommatos, N., Engine Combustion Instrumentation and Diagnostics, Society of Automotive Engineers, Inc., (2001).
- 5) Eckbreth, A.C., Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species, 2nd Ed., Gordon and Breach Publishers, (1996).
- 6) Orth, A., Sick, V., Wolfrum, J., Maly, R.R., Zahn, M., Simultaneous 2D Single-Shot Imaging of OH Concentrations and Temperature Fields in an SI Engine Simulator, Proc. Combust. Inst., 25 (1994) 143-150.
- 7) Schulz, C., Sick, V., Wolfrum, J., Drewes, V., Zahn, M., and Maly, R., Quantitative 2D Single-Shot Imaging of NO Concentrations and Temperatures in a Transparent SI Engine, Proc. Comb. Inst. 26:2597 (1996).
- 8) Kaminski, C. F., Engstroem, J. and Alden, M., Spark ignition of Turbulent Methane/Air Mixtures Revealed by Time-Resolved Planar Laser-Induced Fluorescence and Direct Numerical Simulations, Proc. Comb. Inst. 27:85 (1998).
- 9) Sanders, S.T., Kim, T., and Ghandhi, J.B., Gas Temperature Measurements During Ignition in an HCCI Engine, SAE Paper No. 2003-01-0744, (2003).
- 10) Lucht, R.P., Teets, R.E., Green, R.M., Palmer, R.E., and Ferguson, C.R., Unburned Gas Temperature in an Internal Combustion Engine. I: CARS Temperature Measurements, Combust. Sci. and Technol., 55, 41, (1987)
- 11) Bradley, D., Kalghatgi, G.T., Morley, C., Snowdon, P., and Yeo, J., CARS Temperature Measurements and the Cyclic Dispersion of Knock in Spark Ignition Engines, Proc. Combust. Inst. 25 (1994) 125-133.
- 12) Brackmann, C., Bood, J., Afzelius, M., and Bengtsson, P-E., Thermometry in Internal Combustion Engines via Dual-broadband Rotational Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy, Meas. Sci. Technol. 15 (2004), pp.R13-R25.
- 13) Nakada, T, Ito, T., and Takagi, Y., Unburnt Gas Temperature Measurements Using Single Shot CARS in a Spark Ignition Engine, Proc. of Int. Symp. on COMODIA 90, pp. 393-399, (1990)
- 14) Akihama, K., Asai, T., Improvement in Temperature Measurement Accuracy of Q-Branch CARS Thermometry (Effects of Spectral Resolution of Detection System), JSME International Journal, B 36-2: 364 (1993).
- 15) Garforth, A.M., Unburnt Gas Density Measurements in a Spherical Combustion Bomb by Infinite-fringe Laser Interferometry, Combust. and Flame, 26, pp. 343-352, (1976).

- 16) Achasov, O., Fomin, N., Penyazkov, O., Oznobishin, A., and Fisson, F., Interferometric study of combustion in a spark ignition engine, Proc. of the Int. Symp. on Internal Comb. Engines, KONES' 93, pp. 553-562, (1993).
- 17) Hamamoto, Y., Tomita, E., and Jiang, D., Temperature Measurement of End Gas under Knocking Condition in a Spark-Ignition Engine by Laser Interferometry, JSAE Review, 15-2, pp. 117-122, (1994).
- 18) Tomita, E., Hamamoto, Y., and Jiang, D., Temperature and Pressure Histories of End Gas under Knocking Condition in a S.I. Engine, Proc. of Int. Symp. on COMODIA 94, pp. 183-188, (1994).
- 19) 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, pp. 587-593, (2000).
- 20) Kawahara, N., Tomita, E., Kamakura, H., Transient Temperature Measurement of Gas Using Fiber Optic Heterodyne Interferometry, SAE Transactions - Journal of Fuel & Lubricants, SAE Paper No.2001-01-1922, (2002).
- 21) 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.
- 22) Kawahara, N., Tomita, E., Ichimiya, M., Takasu, K., Tsuchida, N., Goto, K, Transient Temperature Measurement of Unburned Gas in an Engine Cylinder Using Laser Interferometry with a Fiber-Optic Sensor, SAE Transactions - Journal of Fuel & Lubricants, SAE Paper No.2003-01-1799, pp. 1044-1051, (2004).
- 23) Gardiner, W.C.Jr, Hidaka, Y., and Tanzawa, T., Refractivity of Combustion Gases, Combust. and Flame, 40, pp. 213-219, (1980).

■著者

河原 伸幸 Nobuyuki Kawahara
岡山大学

富田 栄二 Eiji Tomita
岡山大学

大西 健二 Kenji Ohnishi
岡山大学

後藤 一廣 Kazuhiro Goto
コーポレートR&D本部 コア技術研究チーム