レーザ干渉法によるノッキング発生時の
未燃焼混合気温度の計測*浜本嘉輔^{*1}, 冨田栄二^{*1}, 姜東民^{*2}Temperature Measurement of End Gas under Knocking Condition
in a S. I. Engine by Laser Interferometry

Yoshisuke HAMAMOTO, Eiji TOMITA and Dong-min JIANG

Knock is one of the most significant problems that limit the efficiency of an internal combustion engine. It is caused by autoignition of the unburned gas ahead of the flame. In order to understand the knock phenomenon, it is important to measure the temperature of unburned gas. In this study, with polarization maintaining optical fibers, the laser interference measurement of unburned gas temperature was performed in a constant volume vessel and a specially designed engine which could be ignited only once. The engine fueled with *n*-butane, oxygen and argon, was operated under knocking conditions. When the density of the gas changes, the change of the optical path length of test beam corresponds to the change of refractive index. The temperature history of the unburned gas was determined by measuring the pressure and the change of interference signal. The optical fiber interference system had the advantage of resisting mechanical vibration because test and reference beams were transmitted in the same optical fiber and were separated only in the test section.

Key Words: Internal Combustion Engine, Spark Ignition Engine, Premixed Combustion, Ignition, Laser-Aided Diagnostics, Gasoline Engine, Laser Interferometry, Knock, Temperature Measurement, End Gas Temperature

1. まえがき

密閉燃焼室内予混合気の燃焼では、火炎伝播にしたがって未燃焼混合気の圧力および温度が上昇する。このような場で、燃焼速度とか着火などに関する研究を実施するにあたり、火炎伝播中の未燃焼混合気の温度を知ることは重要なことである。また、火花点火機関の高効率化を妨げる障害の1つであるノッキングは未燃部の自発火が原因であることから、エンドガス部の未燃焼混合気の温度履歴を知ることが自発火の条件を調べる上で重要なこととなる。

ノッキング時の未燃焼部温度測定の方法としては古くは音速法、赤外線放射や吸収を利用する方法が、また、最近ではCARS法が多く用いられている。Livengoodら⁽¹⁾は気体中の音速が気体温度の平方根に比例することを利用して機関燃焼室内部の温度を測定し、GlucksteinとWalcutt⁽²⁾はオクタン価の異なる種々の燃料を用いてノッキング限界圧縮比における未燃焼部温度履歴測定を行っている。山家と柴田⁽³⁾は周波数法と

言われる音速法を利用してガス温度を測定している。また、Chenら⁽⁴⁾は吸収法にて、Agnew⁽⁵⁾は2色法にて、Burrowsら⁽⁶⁾は零位法を用いた赤外線法にて、エンドガス部の温度測定を行っている。Luchtら⁽⁷⁾は、*n*-ブタン～空気の混合気を燃焼させ、ノッキングがある場合とノッキングがない場合の二つの状態で、CARS法でシリンダ内未燃焼混合気の温度を測定している。また、秋浜ら⁽⁸⁾や中田ら⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾により、機関シリンダ内未燃焼混合気温度測定へのCARS法の適用に関して詳細な検討がなされている。

ここでは、ノッキング発生直前までのエンドガス部の未燃焼混合気の温度履歴を、レーザ光干渉を利用して測定する方法について検討した。燃焼室内で火炎伝播により圧縮される未燃焼混合気の温度変化を、レーザ干渉法により測定する試みは、Garforth⁽¹²⁾や著者ら⁽¹³⁾によっても実施されているが、この方法は機械的振動に対して非常に敏感である。本研究では、偏波面保存光ファイバとケスタブリズムを用いて、マッハツエンダ光学系を構成し、機械的振動の影響を抑制することにより、ノッキング発生直前までの混合気温度履歴の測定を可能にした。

* 平成5年7月14日 第11回内燃機関シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成5年8月19日。

^{*1} 正員、岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

^{*2} 岡山大学大学院。

2. 測定原理

燃焼室と光学系の概要を図1に示す。光源 He-Neレーザ(波長 $\lambda=0.6328\mu\text{m}$, 直線偏光, 出力15mW)からの光はマイクロレンズ, 偏波面保存光ファイバを経て, ケスタプリズムにて, 2本のビームに分けられる。1本は参照光として燃焼室の外側を, もう1本は試験光として燃焼室のエンドガス部を通過する。2本のビームはもう一つのケスタプリズムで合わせて干渉させ, その干渉光を光ファイバにてフォトランジスタに導き, 干渉光強度変化を検出する。

ピストンによる圧縮や火炎伝播による圧縮によって, 燃焼室内未燃焼混合気の密度が変化すると, 屈折率が変わる。試験部の気体の屈折率が変わると, 試験光と参照光の位相差が変わり, 干渉光強度が変化する。干渉光の明暗変化数 N と光学位相変化 $\Delta\Phi$ には次のような関係がある。

$$\Delta\Phi = 2\pi N \quad (1)$$

また, 厚さ L の気体層の屈折率が n_0 から n に変化するとき, 光学位相変化 $\Delta\Phi$ は

$$\Delta\Phi = 2\pi (n - n_0) L / \lambda \quad (2)$$

ここで λ は使用した He-Neレーザの波長である。屈折率 n と密度 ρ の関係は近似的にGladstone-Daleの式で表される。

$$n \approx 1 + \rho \frac{R_0}{M} = 1 + \frac{P R_0}{M R T} \quad (3)$$

ここで, R_0 はGladstone-Dale定数であり, 使用するレーザの波長と気体の種類により定まる。 M は気体の分子量, R はガス定数, P は圧力, T は絶対温度である。なお, 混合気体の Gladstone-Dale定数 $R_0[\text{m}^3/\text{mol}]$ は次のように求められる⁽¹⁴⁾。

$$R_0 = \sum_{i=1}^s R_{0i} x_i \quad (4)$$

ここで x_i , R_{0i} は i 成分気体のモル分率および Gladstone-Dale定数である。

未燃焼混合気温度は, 式(1), (2), (3)より

$$T = \frac{L R_0 T_0 P}{N \lambda M R T_0 + L R_0 P} \quad (5)$$

として求めることができる。すなわち, 初期状態の圧力 P_0 , 温度 T_0 が既知であり, 混合気組成が不変であれば, 圧力 P および干渉光の明暗変化数 N を測定することにより混合気温度 T を求めることができる。

図1. 燃焼室および光ファイバ干渉光学系

なお、本実験の場合、温度測定部の気体層の厚さ L は 18.74mm である。

3. 定積燃焼室内火炎伝播中の末端部未燃焼混合気温度の測定

燃焼室は図1のような形状で、点火電極と対向する側の凹部内の混合気温度を測定した。燃焼室の厚さが 11.2mm であり、温度測定部のレーザビーム中心は、上壁より 4.3mm 、側壁より 2.7mm の位置である。燃料としては n -ブタンを用い、

の均一混合気(当量比 $\phi = 0.9$) を燃焼室に、室温で、所定の圧力に充填し、電気火花により点火、燃焼させ、末端部混合気の屈折率変化および圧力を測定し、温度履歴を求めた。

干渉光信号と圧力 P を同時に測定した例を図2に示す。混合気の初期圧力 $P_0 = 100\text{kPa}$ 、初期温度 $T_0 = 298\text{K}$ である。図の横軸は、点火のための火花放電開始時からの経過時間である。レーザビームに火炎が達すると、ビームが屈折して、干渉光信号が乱れ、その時期を知ることができる。火炎が到達する直前までの干渉光信号の強弱の変化と圧力の値から、式(5)により温度 T を求めた結果を図3に示す。

末端部の未燃焼混合気が断熱圧縮されたと仮定して求めた温度を比較のために同図に示しているが、両者はほぼ一致している。未燃焼混合気の比熱比としては、温度 $300 \sim 550\text{K}$ 、圧力 $100 \sim 700\text{kPa}$ の範囲における平均値を 1.498 として用いた。すなわち、末端部の混合気の温度は、ほぼ断熱圧縮を仮定して求めることができることが分かる。

4. エンジンシリンダ内火炎伝播中の末端部未燃焼混合気温度の測定

実験には、一回だけ燃焼を行わせることのできる圧縮～膨張機関⁽¹⁵⁾を用いた。図4に実験機関の概要を示す。シリンダ直径は 78mm 、行程は 85mm 、圧縮比は 10.1 である。燃焼室形状は、図1に示すような薄い円板状であり、点火位置、圧力測定位置および温度測定位置は、同図に示す通りである。

本実験機関ではシリンダと混合気タンクがパイプで接続されており、弁を開けた状態で電動機により機関を駆動し、一定の時間後に下死点で弁を閉じ、混合気を圧縮し、所定の時期に電気火花により点火、燃焼させる。弁はシリンダ中心軸上に取り付けてあり、吸入スワールは生じない。燃料は n -ブタンであり、

図2. 燃焼室内圧力および干渉光強度信号(定積燃焼室, 初期圧力 $P_0 = 100\text{kPa}$)

図3. 定積燃焼室内未燃焼混合気の温度変化

図4. 実験用火花点火機関

の均一混合気(当量比 $\phi=1.0$)を用い、機関回転速度 $n=600\text{rpm}$ 、点火時期 $\theta_{ig}=10^\circ\text{BTDC}$ で実験を行った。

本温度計測法は、ある基準の状態からの変化量を測定するものであるので、ここでは圧縮開始時のシリンダ内状態を基準として、その後の変化を測定した。

今回の実験では、電動機による機関駆動開始から56回目の下死点で弁を閉じるようにしているので、その時点の温度を抵抗線温度計(直径 $5\mu\text{m}$ 、長さ 1.2mm のタングステン線)にて測定した結果、混合気タンクの初期温度より約 3.8K 低くなっていることが分かった。圧縮初めの温度は、このように混合気タンクの初期温度から推定した。

シリンダ内圧力と干渉光強度の測定例を図5に示す。横軸のクランク角は 180° が下死点、 360° が上死点である。また、上死点付近を拡大して図6に示す。点火時期 θ_{ig} は 10°BTDC であり、上死点后 3.5° 付近でエンドガスが自発火し、ノックが生じている。

図5. シリンダ内圧力および干渉光強度信号(機関回転速度 $n=600\text{rpm}$ 、点火時期 $\theta_{ig}=10^\circ\text{BTDC}$)

図6. シリンダ内圧力および干渉光強度信号(機関回転速度 $n=600\text{rpm}$ 、点火時期 $\theta_{ig}=10^\circ\text{BTDC}$)

下死点で弁が閉じたときの機械的振動が干渉光信号に入っているが、計測上許容される程度に抑えられている。このように弁閉時の衝撃や駆動運転時の機関振動の影響は、図1に示した光学系を用いることにより、十分に抑制されていることが分かる。このような干渉信号、圧力および初期状態の測定値を用いて、下死点からノック開始直前までのエンドガスの温度変化を求めた例を図7および図8に示す。この実験でのシリンダ内圧力と容積の測定値から、下死点から点火時期までのポリトロブ指数を求めると、下死点(180°)から 270° まで 1.445 、 270° から点火時期(350°)までが 1.357 であった。このポリトロブ指数を用いて求めたシリンダ内混合気温度を図7に破線で示すが、干渉法で求めた温度(実線)とほぼ一致している。なお、図7および図8で、 $\theta_{ig}=350^\circ$ 以後の破線で示した温度は、

図7. シリンダ内未燃焼混合気温度(機関回転速度 $n=600\text{rpm}$ 、点火時期 $\theta_{ig}=10^\circ\text{BTDC}$)

図8. シリンダ内未燃焼混合気温度(機関回転速度 $n=600\text{rpm}$ 、点火時期 $\theta_{ig}=10^\circ\text{BTDC}$)

圧力測定値を用いて断熱変化を仮定して求めた値である。比熱比は温度650~1100K, 圧力1.0~4.0MPaの範囲の平均値1.442を用いた。干渉法で求めた点火後のエンドガス温度(実線)は, 断熱変化を仮定して求めた温度(破線)とほぼ一致している。

なお, 干渉光信号の山と谷は容易に読み取ることができる。このように1/2周期の変化を最小読み取り値とすると, 本実験の光学系(図1)の場合, ノック発生直前の温度の最小読み取り値は5K程度である。圧力が低いと最小読み取り温度値は大きくなる。

5. あとがき

光干渉法による気体温度計測法は, 非常に高感度であるが, 機械的振動に対しても敏感である。本研究では, 偏波面保存光ファイバとケスタブリズムを用いて, 機械的振動の影響の少ないマッハツエンダ干渉光学系を作製し, 圧縮開始時からノック発生直前までのエンジンシリンダ内の未燃焼混合気の温度履歴の測定を可能にした。今後, ノック等のエンジン燃焼研究に有効に活用されることを期待している。

文 献

- (1) Livengood, J.C., Taylor, C.F. and Wu, P.C., Measurement of Gas Temperature in an Engine by the Velocity of sound Method, SAE Trans., 66(1958), 683.
- (2) Gluckstein, M.E. and Walcutt, C., End-gas Temperature-Pressure Histories and Their Relation to Knock, SAE Trans., 69, (1961), 529.
- (3) 山家, 柴田, 超音波による気体温度測定法(第4報, 内燃機関燃焼ガスの温度測定), 機論(第2部), 36-286(1970), 1000.
- (4) Chen, S.K., Beck, N.J., Uyehara, O.A. and Myers, P.S., Compression and End-gas Temperature from Iodine Absorption Spectra, SAE Trans., 62(1954), 503.
- (5) Agnew, W.G., End Gas Temperature Measurement by a Two-Wavelength Infrared Radiation Method, SAE Trans., 68(1960), 495.
- (6) Burrows, M.C., Shimizu, S., Myers, P.S. and Uyehara, O.A., The Measurement of Unburned Gas Temperature in an Engine by an Infrared Radiation Pyrometer, SAE Trans., 66(1961), 514.
- (7) 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 Tech., 55(1987), 41.
- (8) 秋浜, 浅井, 久保, 中野, 山崎, 井口, CARSによるエンジン筒内未燃ガス温度測定, 第10回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (1992), 283.
- (9) 中田, 伊東, 高木, CARS法によるノッキング発生時の未燃部混合気温度分布の計測, 自技論, 24-2(1993), 10.
- (10) 中田, 伊東, 高木, CARS法の燃焼室内未燃焼ガス温度測定への適用 - 圧縮比が未燃焼ガス温度に与える影響 -, 自技論, 23-1, (1992), 15.
- (11) 中田, 伊東, 高木, 未燃ガス温度と混合気性状のノッキング発生への影響, 第10回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (1992), 289.
- (12) Garforth, A.M., Unburnt Gas Density Measurement in a Spherical Combustion Bomb by Infinite-fringe Laser Interferometry, Combust. Flame, 26(1976), 343.
- (13) 浜本, 富田, 岡田, レーザ干渉法によるガス温度変化の測定, 機論, 53-496, B(1987), 3798.
- (14) Gardiner, W.C., Jr., Hidaka, Y., and Tanzawa, T., Refractivity of Combustion Gases, Combust. Flame, 40, (1981), 213.
- (15) 浜本, 富田, 田中, 片山, 火花点火機関の燃焼に及ぼすスワールの影響, 機論, 52-480, B(1986), 3059.