レーザ干渉法によるガス温度変化の測定*

浜本 嘉輔^{*1}, 富田 栄二^{*1}, 岡田 忠義^{*2}The Measurement of the Transient Temperature of Gas
by Laser Interferometry

Yoshisuke HAMAMOTO, Eiji TOMITA and Tadayoshi OKADA

In order to measure the transient temperature of gas, a laser interferometry was applied. When the density of the gas changes, the effective optical path length of the test beam changes with a corresponding change of the refractive index. So the change of temperature of gas can be determined by measuring the pressure and the shift of interference fringes with a pair of photo-transistors. In this study, examples of the temperature change measurement of the gas due to only the expansion, to the compression and expansion with a piston motion, and to the compression with flame propagation were described. It is recognized that interferometry is a useful method for the measurement of the transient temperature of the gas in the field of combustion research.

Key Words: Combustion, Measurement, Internal Combustion Engine, Laser Interferometry, Temperature Measurement, Unburned Gas Temperature

1. ま え が き

密閉燃焼室内では、火炎伝ばにしたがって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、火炎伝ば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。このような速い温度変化の非接触測定には、レーザ干渉法が適している。Garforth⁽¹⁾は、球形燃焼室で層流燃焼速度を測定する際の未燃焼混合気の温度変化の測定に、マイケルソン干渉計を改良した光学系を用いている。気体の密度変化による屈折率変化を、干渉縞の移動量によって測定し、圧力測定結果と合わせて、ガス温度変化を求めるものである。

本研究では、干渉縞の移動を、明暗の強度の位相が $\pi/2$ だけずれた2個所で測定することにより、定積燃焼室内で火炎伝ばにより圧縮される未燃焼混合気とか、膨張する気体の温度のように、上昇するか降下するか、どちらか一方に変化する場合だけでなく、シリンダ

内ガスをピストンで圧縮、膨張させる場合のように、温度変化の方向が途中で反転するような場合にも使えるようにした。

2. 測 定 原 理

2本のレーザビームの交点に生じる干渉縞は、両ビームが通過する気体の屈折率の差が変化すると、光路長差が変化することによって移動する。すなわち、一方のビーム(参照ビーム)が通過する気体の状態を一定に保っておき、他方(テストビーム)の気体の屈折率が変化するとき、干渉縞の移動を測定することによってテストビーム側の気体の屈折率変化を求めることができる。そして、屈折率と密度の関係、および状態方程式から気体の温度変化を求めることができる。

図1に光学系の概略を示す。光源はHe-Neレーザ(波長 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 出力15 mW, ビーム径1.2 mm)である。ビームスプリッタによって2本に分けられたビームの一方(Beam 1)は大気中を、そして、他方テストビーム(Beam 2)は気体を充填した容器内を通過させて後に干渉させる。2枚のレンズによって2本のビームを一度絞った後にビーム径を拡大し、かつ交差角を小

* 昭和61年3月14日 中国四国支部第24期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和62年4月30日。

^{*1} 正員, 岡山大学工学部(〒700 岡山市津島中3-1-1)。

^{*2} 准員, 岡山大学大学院(現在 本田技研工業(株))。

さくすることによって干渉縞の間隔が約1 mmになるまで拡大した。このようにして、図2に示すような干渉縞が得られる。干渉縞の動きをピンホール後方のフォトトランジスタによって検出したが、干渉縞の移動方向の判別のため、ピンホールおよびフォトトランジスタの位置は図2に示すように明暗の位相が約 $\pi/2$ ずれるように調整した。

幅 d の容器内の気体の屈折率が初期値 n_i から n まで変化するとき、両ビームの光路長差の変化 ΔL は、

$$\Delta L = (n - n_i) d \quad \dots\dots\dots (1)$$

である。光路長差がレーザの1波長分(=632.8 nm)変化すると干渉縞が一つ移動するので、干渉縞の移動数 N と ΔL の関係は、

$$N = \Delta L / \lambda = (n - n_i) d / \lambda \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。屈折率が減少する場合には N は負となる。屈折率 n と密度 ρ の関係は、Lorentz-Lorenzの式⁽²⁾により、

$$n^2 = \frac{1 + 2 \rho R_L / M}{1 - \rho R_L / M} \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表される。ここで、 M は分子量、 R_L は分子屈折である。気体の場合、 n が1に非常に近いため、近似的にGradstone-Daleの式が用いられる⁽³⁾。

$$n \cong 1 + \frac{3 \rho R_L}{2 M} \cong 1 + \frac{\rho R_G}{M} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 R_G はGradstone-Dale定数である。 R_L, R_G は使用するレーザの波長と測定する気体の種類によって決定される定数であり、それらの値は文献(3)に詳しく掲載されている。本研究で扱った密度変化の範囲では、式(3)および(4)で求めた屈折率 n の差はほとんどなかった。また、混合気体の場合はそれぞれの化学種のモル分率を x_i とすると、

$$R_L = \sum_i (R_{L_i} x_i) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$R_G = \sum_i (R_{G_i} x_i) \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる⁽³⁾。

状態変化が理想気体の状態方程式に従うものと仮定すると、

$$n = 1 + \frac{P R_G}{R_o T} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となり、式(2)、(7)より、気体の温度 T は次のようになる。

$$T = \frac{P R_G T_i d}{N \lambda R_o T_i + R_G P_i d} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 R_o は一般ガス定数、 P は圧力であり、添字 i は初期値を示す。すなわち、初期状態における温度、圧力を既知として、干渉縞の移動数 N と圧力 P の変化を測定することにより温度 T を求めることができる。

3. 測定例

3.1 膨張による容器内気体の温度変化 図1に示したような球形容器内(測定気体層厚さ150 mm)に充填した気体(窒素、 $P_i=450$ kPa、 $T_i=282$ K)を容器外に放出することにより気体を膨張させ、容器内気体の温度変化を測定した。なお、初期温度は銅-コンスタンタン熱電対にて測定した。

測定例を図3に示す。フォトトランジスタの出力信号の1周期が干渉縞1つの移動に相当する。式(8)にしたがって窒素の温度変化を求めると、図4のようになる。断熱変化を仮定して圧力測定値から計算した温

図1. 光学系

図2. 干渉縞とフォトトランジスタの位置
(●がフォトトランジスタ)

度と比較すると、膨張過程の初期にはほぼ断熱的に気体温度が低下するが、その後、容器壁からの熱伝達によって気体温度が上昇していくことがわかる。また、気体としてメタン、アルゴンを使用しても同様の結果が得られた。

壁面近くの厚さ δ の気体層は加熱されるが、中央部は断熱状態であるとする、干渉縞の移動数 N は、式(2)の関係から、次のように表される。

$$\frac{\lambda N}{2} = (n_s - n_i) r_0 - n_s \delta + \int_{r_0 - \delta}^{r_0} n dr \quad (9)$$

ここで、 r_0 は容器半径、 r は半径方向距離、 n_s は断熱部分の屈折率である。厚さ δ の境界層内で次のような直線的な温度分布を仮定する。

$$T = \frac{T_s - T_w}{\delta} (r_0 - r) + T_w \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 T_s は断熱変化を仮定した場合の気体温度である。 T_w は壁面温度であるが、気体の初期温度 T_i と等しいとする。以上の式(8)~(10)から、 δ を求めると次

図3. 圧力および干渉縞の移動の測定例

図4. 容器内温度変化

のようになる。

$$\delta = \frac{N \lambda / 2 - (n_s - n_i) r_0}{\frac{P R_G \ln(T_w / T_s)}{R_G (T_w - T_s)} - (n_s - 1)} \quad (11)$$

以上の検討から、図4の場合について、容器内でのレーザビーム通過領域の温度分布の時間的変化を推定してみると図5のようになる。この温度分布には、壁面からの熱伝達のほかに、浮力により密度の高い中央部気体が下方に移動することの影響も入っていると考えられる。

3・2 圧縮および膨張によるシリンダ内気体の温度変化 内径50 mmのシリンダ内に、ピストン下死点で気体（窒素、 $P_i = 100$ kPa、 $T_i = 292$ K）を充填し、ピストンを往復させることによって圧縮、膨張を行い、

図5. レーザビーム通過領域の温度分布

図6. ピストン変位、圧力および干渉縞の測定例

その際の気体の温度変化を測定した。シリンダヘッド下面より 7mm の位置のシリンダ直径上にレーザビームを通した(測定気体層厚さ 49.1mm)。ピストンの駆動は接続棒で連結されたエアシリンダによって行い、その変位 x_p をポテンショメータにて測定した。

図 6 に測定例を示す。圧縮行程から膨張行程に移る際に干渉縞の移動方向が反転しているのが 2 つのフォトトランジスタの出力信号からわかる。レーザ干渉法による温度測定結果 T_L を、シリンダの体積変化から計算した断熱状態での温度 T_a および圧力、体積の測定値と理想気体の状態式から求めた平均温度 T_m と比較して図 7 に示す。膨張行程の終りにおける T_m が初期値よりも低くなっているのは壁面への熱損失のためであると考えられる。測定値 T_L は、最初、断熱温度 T_a に近く、時間の経過とともに T_a から離れ、平均温度 T_m に近づいていく。熱損失の影響はシリンダ内気体に一樣に及ぶのではなく、最初は、壁面近傍の気体に限定され、中央部気体は断熱的に変化するが、時間経過にしたがって、熱損失の影響が中央部気体にまで及んでくるものと考えられる。

3.3 火炎伝ばにより圧縮される未燃焼混合気の温度変化 内径 125mm、幅 35mm の円筒燃焼室内の中心でメタン～空気均一混合気(当量比 $\phi=1.0$) に点火し、火炎伝ばによって圧縮される未燃焼混合気の温度変化を測定した。レーザビームは燃焼室の幅方向に通過させたので、測定気体層厚さは 35mm である。図 8 に測定例を示す。燃焼途中でフォトトランジスタの出力信号が途切れているのは、レーザビームが火炎先端と接して大きく屈折し、一時的に干渉縞が消失してしまうためである。したがって、レーザビームの位置を変えて測定することにより、火炎伝ばの様子を知るこ

ともできる。燃焼室内初期状態 $P_i=100\text{kPa}$ 、 $T_i=307\text{K}$ のメタン～空気均一混合気 ($\phi=1.0$) を燃焼させ、円筒壁面からの距離 δ_w を、1.5～15.0mm の範囲で変えて、未燃焼混合気の温度変化を求めた結果を図 9 に示す。横軸には圧力比 (P/P_i) を取っている。温度変化の様子は測定位置によってほとんど変わっておらず、実線で示す断熱変化にほぼ等しい。壁面から 1.5mm の位置に火炎先端が到達するのは点火後約 35ms であり、

図 8. 火炎伝ば中の未燃焼混合気の密度変化による干渉縞の移動および圧力変化の測定例
(CH_4 -air, $\phi=1.0$, $P_i=100\text{kPa}$, $T_i=307\text{K}$, 測定点 $\delta_w=2\text{mm}$)

図 7. シリンダ内ガスの温度変化

図 9. 定積燃焼における未燃焼混合気の温度変化
(CH_4 -air, $\phi=1.0$, $P_i=100\text{kPa}$, $T_i=307\text{K}$)

図10. 温度変化の最小読み取り値 ΔT
(3・3節の場合)

このような短時間であれば未燃焼ガスはほぼ断熱圧縮されたと考えてもよいことを示している。

3・4 ガス温度変化の最小読み取り値 式(2)および(4)より、密度 ρ は

$$\rho = \frac{M}{R_c} \left(\frac{N\lambda}{d} + n_i - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。フォトランジスタの出力信号は少なくとも山と谷(1/2周期)は確実に読み取ることができる。いま、干渉縞が 1/2周期だけ移動するときの ρ の変化 $\Delta\rho$ を最小読み取り値とすると、式(12)より、

$$\Delta\rho = \lambda M / (2R_c d) \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。 $\Delta\rho$ は、使用するレーザの波長、気体の種類(分子量、Gradstone-Dale定数)および測定気体層厚さに依存する。例えば、He-Neレーザを使用すると、測定気体層厚さ150 mm、圧力100 kPa一定の窒素の場合、温度の最小読み取り値は2.4 K程度となる。

図10に、3・3節の火炎伝ばにより圧縮される未燃焼

混合気の温度測定における最小読み取り値 ΔT を圧力 P に対して示す。ただし、この ΔT は、断熱変化を仮定して計算したものである。なお、図中の T' は断熱変化を仮定して求めた未燃焼混合気温度である。圧力および温度すなわち密度によって異なるが、この場合の未燃焼混合気の ΔT は約1.7~4 K程度となり、干渉縞の移動を1/2周期までしか読み取らなかったとしても、レーザ干渉法が密閉容器内燃焼実験における未燃焼混合気の温度変化の測定に十分に適用できることがわかる。

また、時間分解能は $N/2$ に相当する密度変化の時間である。すなわち、密度変化の速さによって時間分解能が変わってくる。 N の何分の1まで読み取るかによって密度分解能および時間分解能をさらに向上させることが可能であろう⁽⁴⁾。

4. あとがき

レーザ干渉法により、ガス温度変化を非接触にて簡単に測定できることを示した。定積燃焼室内にてメタン~空気混合気 ($\phi = 1.0$, $P_i = 100 \text{ kPa}$, $T_i = 307 \text{ K}$, 気体層厚さ35 mm, He-Neレーザ使用) に点火した場合、フォトランジスタの出力信号を 1/2周期までしか読み取らなかったとしても、未燃焼混合気の温度分解能は1.7~4 K程度であり、本測定法は定積容器内燃焼研究における未燃焼混合気の温度変化の測定には十分使用できる。しかし、内燃機関における燃焼研究に適用するためには、機関の振動の影響を除去する光学系を作る必要がある。

文 献

- (1) Garforth, A. M., Combust. Flame, 26(1976), 343.
- (2) Born, M. and Wolf, E. (草川・横田 共訳), 光学の原理 I, (昭49), 125, 東海大学出版会.
- (3) Gardiner, W. C., ほか2名, Combust. Flame, 40(1981), 213.
- (4) 小林・ほか2名, 航空宇宙学会誌, 32-368, (昭59), 533.