レイリー散乱法による火花点火機関燃焼室内
混合気濃度の測定*角 田 敏 一^{*1}, 佐 藤 豊 水^{*2}
M. A. Memon^{*3}, 角 田 長三多^{*1}Mixture Strength Measurements in the Combustion Chamber
of SI Engine via Rayleigh ScatteringToshikazu KADOTA, Toyomi SATOH,
M. A. MEMON, and Osata SUMIDA

The laser Rayleigh scattering technique was applied for the space resolved measurements of vapor concentration in the combustion chamber of a multipoint injection spark ignition engine for automotive use. The mixture formation during the intake stroke was simulated by the timed or continuous injection of freon 113 (liquid) or freon 12 (gas) into the steady flow of dust-free dry air through an intake port. The vapor concentration in the transparent combustion cylinder was determined from the intensity of scattered light which had been calibrated beforehand. The results showed that the present optical system was found to be successful in determining the local vapor concentrations for both liquid and gaseous fuel injections. It was also evident that the highly heterogeneous field of vapor concentration was established in the combustion cylinder. The vapor concentration profile was largely affected by the place for fuel injection and the intake valve lift.

Key Words: Internal Combustion Engine, Rayleigh Scattering, Vapor Concentration, Intake Stroke, Fuel Injection

1. 緒 言

火花点火機関の燃焼室内に供給された混合気は一般に不均質でその形態および濃度は時間的、空間的に大きく変動している。このような混合気の物理的特性を明らかにすることはその後続く燃焼ならびに有害排出物生成過程を把握しさらにそれらを制御するうえできわめて重要である⁽¹⁾。たとえば、混合気の成層化により希薄燃焼時の燃焼特性を改善しようとする試み⁽²⁾がなされているが、このような問題においても混合気の最適条件を見いだすことが重要となる。

混合気形成過程に関する従来の研究としては、低温始動時の燃焼室内における空間平均当量比の時間変化を測定した結果⁽³⁾⁽⁴⁾、直接採取法により燃焼室内の当量比を測定した例⁽⁵⁾、光学的方法を用いて液滴径およびその量を測定した例⁽⁶⁾⁽⁷⁾、液滴蒸発の解析例⁽⁸⁾が報告されているが、前記目的を達成するには十分明らかにされたとはいえないのが現状である。

そこで、本研究では測定対象にじょう乱を与えるこ

となく時間的ならびに空間的分解能の高い測定が可能である光学的手法を適用することにより、多点噴射式火花点火機関燃焼室における気相中の燃料蒸気濃度を測定することを試みた。まず、第1段階として定常実験を行い、測定法の確立および吸入行程時の状況は把握することに力点をおいた。濃度測定には各種光学的手法が適用可能であるが、ここでは系が比較的簡単であり散乱光強度が高いレイリー散乱法を適用した。レイリー散乱法による濃度測定例はこれまでいくつか報告されている^{(9)~(15)}が、比較的単純な系に限られており実機に適用された例はない。レイリー散乱が弾性散乱であることから燃焼室内壁面による迷光除去が重要となるが、この点も含め実機における測定の際に生じる種々の問題点について検討を行った。

2. 測定装置ならびに方法

気体分子をレーザ光で照射するとレイリー散乱が生じるが、散乱断面積が気体の種類により異なるので、これを利用して混合気体の濃度測定を行う。混合気体に強度 I_0 のレーザ光が入射した場合、レイリー散乱光強度 I_r は次式で与えられる。

$$I_r = CI_0N \sum_i x_i \sigma_{ri} \dots \dots \dots (1)$$

* 昭和62年1月21日 第6回内燃機関合同シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和62年2月9日。

^{*1} 正員、広島大学工学部 (〒724 広島市西条町)。

^{*2} 学生員、広島大学工学部。

^{*3} 学生員、広島大学大学院。

ここで、 C ：光学系から決まる定数、 N ：分子数密度、 x_i ： i 成分モル分率、 σ_{ri} ： i 成分のレイリー散乱断面積である。理想気体を仮定すると、式(1)は次式となる。

$$I_r = \frac{C I_0 A P}{RT} \sum_i x_i \sigma_{ri} \quad (2)$$

ここで、 A ：アボガドロ数、 R ：ガス定数、 P ：圧力、 T ：温度である。入射光強度、圧力ならびに温度が一定の場合には式(2)は次式のように表される。

$$I_r = K \sum_i x_i \sigma_{ri} \quad (3)$$

ここで、 K は定数である。成分 a および b からなる2成分系の場合には式(3)は次式となる。

$$x_a = \frac{\frac{I_r}{K} - \sigma_{rb}}{\sigma_{ra} - \sigma_{rb}} \quad (4)$$

$x_a = 0$ で、 $I_r = I_{rb}$ 、 $x_a = x_{as}$ で $I_r = I_{rs}$ とすると、式(4)より次式が導かれる。

$$\frac{x_a}{x_{as}} = \frac{I_r - I_{rb}}{I_{rs} - I_{rb}} \quad (5)$$

すなわち、 x_{as} 、 I_{rs} および I_{rb} をあらかじめ求めておくと、 I_r を測定することにより x_a を知ることができる。

図1に測定装置概略を示す。自動車用水冷四気筒四サイクル火花点火機関($B \times S$ ：83×66 mm)のシリンダヘッドから1気筒分だけを切り離し、(12)の下部に内径94 mm、厚さ2.1 mm、長さ140 mmの亚克力円筒(30)を取付けた。亚克力円筒下端には整流と防じんを兼ねてステンレス鋼網(29)を取付けこの内部で

表 1 試料噴射条件

Fluid	R12	R113
injector	pipe(φ2mm)	pintle type
injection pressure	0.03 MPa	0.25 MPa
Flow rate	0.053~0.16 g/s	0.36 g/s
injection position	I_1, I_2	I_1
duration	continuous	22 ms

図 1 測定装置概略

図 2 R113 噴射系

図 3 測定部詳細

測定を行った。さらに、レーザ光の通過する円筒側面2箇所1.5 mm×35 mmのスリットを作り、壁面における散乱光を極力減少させるようにした。スリットの大きさを1×1 mmまで変えて測定を行ったところ

図4 座標系

図6 濃度分布 ($l=6$ mm) 図5 濃度分布 ($l=6$ mm) 図7 濃度分布 ($l=3$ mm)

測定結果に差が見られなかったため、スリットにより流れ場が変化し濃度分布にその影響が現れる可能性が否定されたものと考えて、できるだけ迷光を押さえるためスリットの大きさを前述の値にした。シリンダヘッドをステージに固定し、固定光学系に対し移動させながら燃焼室内の濃度測定を行った。なお、測定場所の特定は読取り望遠鏡によった。

コンプレッサ(1)から送られた空気はサージタンク(3)、流量調節用バルブ(4)、シリカゲルを充てんした乾燥容器(5)、メンブランフィルタ(0.3 μm)(6)、ガスメータ(7)を通過し、吸気管(8)内に固定したステンレス鋼網で整流された後、吸気バルブ(11)周辺部からシリンダ内へ流出する。流出空気中からのミー散乱光は観測されず、この吸気系により空気中のじんあいは除去されたことがわかった。総合出力 2 W のアルゴンレーザー(17)から出る 488 nm の単色光を光源とし

て用い、焦点距離 250 mm の凸レンズ(18)によりレーザー光を測定部に集光する。迷光をできるだけ押さえるため、ピンホール(19)、(20)およびビームトラップ(21)を取付けた。散乱光はレンズ(22)、ピンホール(23)を通過した後フォトマル(浜松フォトニクス R 928)(24)へ達する。この受光系の視野は直径 250 μm の円であり、これとレーザーウエストビーム径から散乱体積が定まる。なお、散乱角度は 90° である。フォトマル(24)からの信号はアンプ(25)およびローパスフィルタ(26)を通過した後ストレージオシロスコープ(27)に記録され、XY レコーダ(28)に出力される。

空気流中に噴射する流体として、レイリー散乱断面積が $130.18 \times 10^{-27} \text{ cm}^2 (\lambda = 488 \text{ nm})^{(18)}$ と大きく沸点の低いフロン 12 (R 12: $T_b = 243.5 \text{ K}$)、および常温で液体のフロン 113 (R 113: $T_b = 320.7 \text{ K}$) を供試した。高圧ポンプ(16)から供給された R 12 は減圧弁

図 8 濃度分布 ($l = 1 \text{ mm}$)

図 9 濃度分布 ($G_r = 0.16 \text{ g/s}$)

$G_a=0.72 \text{ g/s}$ $G_f=0.053 \text{ g/s}$ $l=6 \text{ mm}$ I_2 R12

図 10 濃度分布 (I_2)

(15), 流量計(14)を通過した後内径 2 mm のステンレスパイプ(10)から吸気管内に連続的に噴出する。R 113 を用いた場合の噴射系を図 2 に示す。高压ポンベ(31)から減圧弁(32)を通して送られた窒素ガスにより加圧された蓄圧室(36)内の R 113 を噴射弁に導き、制御回路(34)からのシングルパルスにより燃料を間欠的に供給する。なお、供試した噴射弁は自動車用火花点火機関に用いられているピントル形であり、噴射圧を一定に保ちながらパルス幅を変えることにより噴射量を変えた。以上の試料噴射方法および条件をまとめたのが表 1 である。表中の I_1 , I_2 は供給位置を示したものであり、図 3 に示すとおりである。いずれも吸気管中心を通る断面内にあり、 I_1 は吸気弁軸および対向壁、 I_2 は I_1 より上流側の吸気管壁に試料を供給するものである。

図 11 濃度の時間変化 (R 113)

図 12 濃度分布 (R 113)

3. 測定結果

図 4 は濃度の測定結果を表示するに必要な座標系を示したものである。図 4 (a) はシリンダヘッドを上部から見た場合の略図でありバルブ中心および端部を通る垂直断面がそれぞれ A, D および B, C である。また、図 4 (b) は A の垂直断面図であり、シリンダヘッド下部からの垂直下方距離を h とおいた。以下すべてこの座標系により測定データを表示する。図 5 に空気流量 $G_a=0.72 \text{ g/s}$, R 12 流量 $G_f=0.053 \text{ g/s}$, バルブリフト $l=6 \text{ mm}$, 噴射位置 I_1 の場合の等濃度線を示す。 $h=3 \text{ mm}$ においては点火プラグ側および燃焼室外周部に高濃度領域が存在し吸気管側の濃度が低くなっているが、下方 (h 大) に移るに従って不均質度が下がっているのがわかる。このことから、燃焼室内に流入した R 12 はシリンダ壁に衝突し高濃度領域を形成した後拡散しながら燃焼室外周部を時計方向に旋回すると同時に下方に流出しているものと考えられる。ここに示す結果をよりわかりやすく三次元的に表示したのが図 6 である。

図 7 および図 8 は、空気流量, R 12 流量, 噴射位置を図 5 の場合と同一条件とし、バルブリフト l をそれぞれ 3, 1 mm, と変えて測定した結果である。 $l=3 \text{ mm}$ における結果は、図 5 に示す $l=6 \text{ mm}$ の場合と

ほぼ同じ傾向となっている。これに対し、図8に示すように $l=1\text{ mm}$ になると、これらとは大きく異なり $h=3\text{ mm}$ ですでに濃度分布の均質化がかなり進んでいることがわかる。

図9は、 $G_a=0.72\text{ g/s}$, $G_f=0.16\text{ g/s}$, $l=6\text{ mm}$, I_1 , すなわち図5の場合に比べR12流量を3倍に増やした場合の結果である。図9から明らかなように、吸気管側も含め燃焼室外周部に高濃度領域が存在している。また、 $G_f=0.053\text{ g/s}$ の場合 $h=30\text{ mm}$ に達するとほぼ均一な濃度分布となっていたが、この場合にはまだかなりの不均質性が残っている。

図10は G_a , G_f , l を一定に保ち噴射位置を I_1 から I_2 へ変えた場合の結果である。噴射方向つまり点火プラグ側の濃度がやや高くなっているが、吸気管側にも高濃度領域が存在している。また、 I_1 の場合に比べて濃度の不均質度が低下していることがわかる。この結果から、濃度分布に及ぼす噴射位置の影響はかなり大きいといえる。

R113を間欠的に噴射した場合、図11に示すように濃度は時間とともに上昇し極大値に達した後減少し零に漸近している。なお、液滴によると思われるミー散乱光も同時に観察される。このような極大値の空間分布を示したのが図12であり、図5の結果と比較してみると両者に類似性があることがわかる。このことから、液体燃料の間欠噴射時の濃度分布を推定するのに気体燃料連続噴射時のデータが使える可能性が出てきたが、この点は今後検討を重ねていく予定である。

4. 結 言

自動車用多点噴射式火花点火機関を用いて定常流試験を行い、混合気形成過程の基礎的研究を行った。吸気管内にフレオン12およびフレオン113を間欠的あるいは連続的に噴射し、レイリー散乱法により燃焼室

内の濃度分布を測定したところ、以下のことが明らかとなった。

(1) 噴射流体が気体、液体いずれの場合でも、燃焼室内における濃度分布測定を行うにレイリー散乱法は有用である。

(2) 蒸気濃度は場所により大きく異なる。

(3) $G_a=0.72\text{ g/s}$, $C_f=0.053\text{ g/s}$, $l=6\text{ mm}$ では、点火プラグ付近および吸気管側を除く燃焼室外周部に高濃度領域が現れるが、 $h=30\text{ mm}$ でほぼ均一化する。

(4) バルブリフトが小さくなるにつれ濃度の均質化が進む。

(5) R12流量が増加するにつれ、燃焼室外周部高濃度領域が広がる。

(6) 噴射位置が、 I_1 から I_2 に変わると濃度分布が均質化する。

文 献

- (1) *Auto. Eng.*, 92-3 (1984), 53.
- (2) Quader, A. A., *SAE paper*, 820131 (1982).
- (3) Nakajima, Y., ほか4名, *SAE paper*, 780612 (1978).
- (4) 寶諸・ほか3名, 自技論, No. 26 (昭58), 41.
- (5) Ayusawa, T., ほか3名, *SAE paper*, 780147 (1978).
- (6) Peters, B. D., *SAE paper*, 820132 (1982).
- (7) Peters, B. D., *IME C81/83* (1983), 23.
- (8) Liu, X. Q., ほか2名, *Trans. ASME, Ser. A*, 106-3 (1984), 849.
- (9) Graham, S. C., ほか2名, *AIAA J.*, 12-8 (1974), 1140.
- (10) Dyer, T. M., *AIAA J.*, 17-8 (1979), 912.
- (11) Escoda, M. C. and Long, M. B., *AIAA J.*, 21-1 (1983), 81.
- (12) Arcoumanis, C., ほか2名, *SAE paper*, 840376 (1984).
- (13) Arcoumanis, C., *Exp. Fluids*, 3 (1985), 103.
- (14) 高城・ほか2名, 機論, 52-474, B, (昭61), 785.
- (15) 角田・ほか2名, 機論, 53-489, B, (昭62), 1585.
- (16) Shardanand and Rao, A. D. P., *NASA Tech. Note*, D-8442 (1977).

討 論

〔質問〕 五味 努〔上智大学理工学部〕

(1) リフトによって濃度分布がかなり異なり、リフトの小さいほうが均一になっているが、噴射位置が弁から遠いときもかなり均一になっており、単純に弁から流入する混合気の流れ分布を反映しているとは思えない。リフトの小さいときに混合が促進される理由は何かお教え願いたい。

(2) 図1のステンレス鋼網での速度分布はどのよ

うになっているのか。実機ではピストンがあるために軸方向速度分布は一様であり、またピストンに衝突して内向きの流れができるなどの影響で h の大きいところはより均一になるように思う。このような効果を考慮しないと吸気行程での混合過程などについての正確な知見は得られないと思うが、ピストンの効果を加味した定常実験の可能性、あるいは本測定法の実機への適応の可能性についてご意見をお聞かせ下されば幸

いである。

〔回答〕 (1) 弁から離れた吸気ポート入口部にフロン 12 を噴射する I_2 の場合のほうが噴射位置 I_1 よりも濃度分布が均一化するの、噴射から燃焼室に流入するまでの距離が長かつ噴流の壁面衝突時の形状が異なるため空気との混合が促進される結果だと考えられる。これに対して、噴射位置が同一でリフトが異なる場合、上記パラメータはいずれもほとんど変化せず、混合気流速変化を主要因子とするのが妥当かと思われる。

(2) 本実験条件では燃焼室下部での流速が低く正確な測定値はいまだ得られていないが、鋼網の存在によりかなり均一な流速分布になっているものと推察される。混合気形成過程が吸気ポートおよび吸気バルブ付近の現象に大きく支配されることを考慮に入れると、本実験で得られた濃度分布は実機吸気行程時における値と大略合致するのではないかと考えられる。たとえば、実機における濃度分布に及ぼす運転条件および構造の影響を予測する場合などには、本実験の手法および結果が大いに利用できるものと考えられる。今後、当実験室で進行中の実機による測定結果と本論文の結果とを比較することにより、ご指摘の点をさらに検討してみたいと考えている。

〔質問〕 河野通方・氏家康成
(東京大学工学部)

(1) 例えば図 5 の濃度分布を得るために、どのような方法を採られたのか具体的にお教え願いたい。また、測定間隔はどの程度か。

(2) シリンダにスリットを設けることにより、迷光はかなり低減可能と思われるが、どの程度か。また、その校正方法(例えば He ガスを流す)をお教え願いたい。

(3) 壁近傍の測定は、迷光の影響、アクリル材による吸収、屈折などの影響などで困難と思われるが、どのようにそれを克服されたか、また測定点の壁からの最小距離はどの程度か。

〔回答〕 (1) 燃焼室内空間を直交三次元座標で構成されるメッシュに区切り、約 180 の格子点における濃度を測定する。つぎに、測定点をもとに各座標軸にそった一次元濃度分布曲線を描く。その曲線から所定の濃度になる座標を決定し、それを垂直および水平の二次元平面内にプロットする。これらの点を通るなめらかな曲線をひいたのが図 5 に示すような等濃度分布曲線である。測定間隔は 3~15 mm である。

(2) He ガスを流す方法^(付1)により迷光を測定したところ、空気の信号の 0.4~0.5 倍程度だった。なお、スリットを設けない場合の迷光はこれの 100 倍程度となった。

(3) ご指摘の問題をさけるため、内筒内面でフォトマルの視野に入らない部分を黒色画用紙でおおった。このほか、入射レーザ光に起因する迷光が円筒外部から入射するのを防ぐ工夫もした。壁から測定点までの距離は 9 mm である。

(付1) Fourguette, D. C., ほか 2 名, *Combust. Sci. Tech.*, 44 (1986), 307.