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*
(第2報, 液体燃料噴射時の結果)角田 敏一^{*1}, 趙 福全^{*2}, 津崎 英男^{*2}Mixture Strength Measurements in the Combustion Chamber of SI Engine
via Rayleigh Scattering
(2nd Report, Results at Liquid Fuel Injection)

Toshikazu KADOTA, Fu-Quan ZHAO, and Hideo TSUZAKI

An experimental study was made of the fundamental aspect of the mixture formation in the combustion chamber of an automotive spark ignition engine with multipoint fuel injection. The mixture formation during the intake stroke of an engine was simulated by the intermittent injection of gasoline or Freon-113 into the steady flow of dust-free dry air through an intake port. The time histories of the vapor concentration at several locations in the transparent combustion cylinder were determined with the application of the laser Rayleigh scattering. The measured results were expressed in terms of the peak vapor concentration at a location in interest, the period of time between the initiation of the liquid fuel injection and vapor arrival, and the duration for the vapor to be observed over a wide range of injection pressures, injection durations, intake valve temperatures, intake valve lifts and intake air flow rates.

Key Words: Internal Combustion Engine, Mixture Formation, Rayleigh Scattering, Vapor Concentration, Intake Stroke, Multipoint 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あり, その物理的特性は時間的, 空間的に大きく変動している。このような混合気の状態を把握し燃焼室形状ならびに機関運転条件との関連性を明らかにすることは, 機関の始動性のもとよりその後に続いて起こる火炎伝ば過程ならびに有害排出物生成過程を解明しさらにそれらを制御するうえで極めて重要である。しかしながら, 燃焼室の混合気性状に関する空間的ならびに時間的分解能の高い測定結果は少なく, 混合気形成過程の解明が十分なされたとはいいがたい。これは, 現象の複雑さに加えて適切な測定法が開発されていなかったことによるものである。

そこで, 最近著者らの一部はレーザレイリー散乱法を適用した自動車用火花点火機関の燃焼室内における混合気濃度測定に関する研究に着手した^{(1)~(3)}。まず, 第1段階として機関の定常流試験を行い, 上記測定法適用の可能性について検討を行った。その結果, 機関燃焼室のように複雑な形状をした容器内においても,

レイリー散乱法を用いれば時間的ならびに空間的分解能の高い濃度測定が可能であることがわかった。ついで, 主として気体試料を連続的に供給した場合の燃焼室内濃度分布測定結果ならびに観測用ガラス窓の改良結果などについて報告した。

ひきつづいて本研究では, 無鉛レギュラガソリン(以後ガソリンと略記)およびフレオン113(R 113: $T_b=320.7\text{ K}$)の2種類の液体試料を吸気管内へ間欠的に供給した場合の燃焼室内各位置における蒸気濃度の時間変化を測定し, それに及ぼす噴射圧力, 噴射期間, 吸気弁揚程および吸入空気流量の影響について調べた。吸気管内へ液体燃料を噴射した場合, 燃焼室内には空気および燃料蒸気のほかにかなり多量の燃料液滴が浮遊することが知られている⁽⁴⁾。このような条件下では, 燃料液滴に起因する強いミー散乱光が存在するためレイリー散乱法の適用が困難視されていた。ちなみに, レイリー散乱法を用いた濃度測定に関する研究はこれまでにいくつか行われている^{(5)~(9)}が, それらはすべて気体単相流を対象としたものであり, 本研究のように気液二相流における蒸気濃度測定を行った例は報告されていない。また, レイリー散乱法を適用してガソリン蒸気濃度を測定した結果は報告されておらず, 本研究が初めての試みとなる。

* 昭和63年7月14日 第7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63年8月26日。

^{*1} 正員, 広島大学工学部 (〒724 東広島市西条町下見)。

^{*2} 学生員, 広島大学大学院。

2. 測定装置

前報^{(1)~(3)}において示したように、測定の原理は、気体分子をレーザー光で照射するとき生じるレイリー散乱光の強度が気体の種類により異なることを利用して混合気濃度を測定するものである。図1に測定装置の概略を示す。自動車用水冷四気筒四サイクル火花点火機関のシリンダヘッドから1気筒ぶんだけを切り離し供試した。そのシリンダヘッド(12)下部に内径94 mm、厚さ2.1 mm、長さ140 mmの亚克力円筒(35)を取付けモデル燃焼室とし、その内部で測定を行った。亚克力円筒側壁のレーザー通過箇所にはガラス窓(24)、(25)を設置した。吸気弁温度を変えて測定を行うため、シリンダヘッド周囲にテープヒータ(20)を取付けた。吸気弁表面上の噴流衝突位置における温度を熱電対で測定し、これを吸気弁温度とした。燃焼室全体を三次元移動装置に取付け、固定光学系に対し移動させながら濃度測定を行った。

圧縮機(1)から送られた空気はサージタンク(3)、流量調節弁(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メッシュ(9)で整流された後、吸気弁(11)周辺部から燃焼室内へ流入する。流入空気中からのミー散乱光は観測されず、この空気供給系により空気中のじんあいは測定に支障を来さない程度まで除去されているこ

とがわかった。

空気流中に噴射する試料液体としては、ガソリンおよびフレオン113を採用した。前者は実用性、後者は物性値の明確さおよび安全性を考慮に入れて選択したものである。高圧ポンプ(14)から減圧弁(15)を通して送られた窒素ガスにより加圧された蓄圧室(17)内の試料液体を噴射弁(10)に導き、制御回路(19)からのシングルパルス信号により液体を間欠的に供給する。なお、供試した噴射弁は自動車用火点機関に用いられているピントル形である。

総合出力2 Wのアルゴンレーザー(21)から発する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(22)によりレーザー光を測定部に集光する。入射レーザー光に起因する迷光をできるだけ低減するため、ピンホール(23)、(26)およびビームトラップ(27)を設置した。レイリー散乱光は凸レンズ(28)、ピンホール(29)を通過した後フォトマル(浜松フォトニクス R 928)(30)へ達する。この受光系の視野は直径250 μm の円であり、これとレーザーウェストビーム径から被測定体積が定まる。なお、入射レーザーと受光系のなす角は90°である。受光系全体を円筒形暗箱に入れ、減光下で測定を行った。フォトマルからの電気信号はローパスフィルタ(31)およびアンプ(32)を通過した後ストレーオシロスコープ(33)に記録され、X-Yレコーダ(34)に出力される。

図2に燃焼室の概略ならびに測定点を示す。矢印で示されるように、試料噴射軸は吸気ポート中心軸を通る断面内にあり、噴流は吸気弁に衝突する。吸気弁、排気弁、点火プラグおよび燃焼室中心軸上でシリンダヘッド下端より下方10 mmならびに20 mmの位置を

図1 測定装置

図2 燃焼室

測定点とした。

本測定法により濃度測定を行う場合、既知濃度におけるレイリー散乱光強度をあらかじめ測定しておく必要がある。そこで、ガソリンに対して図3に示すような校正装置を製作した。メンブランフィルタ(F_1)を通過した清浄な空気はガラス容器内に流入しガソリン中を上昇しながらその蒸気を含む混合気となる。生じた混合気はミスト除去用メンブランフィルタ(F_2)を通過した後内径4mmのノズルから流出し、レーザ光の照射を受ける。このときのガソリン液面の低下速度と空気質量から混合気中のガソリン蒸気質量分率を求め、散乱光強度との関係を求めた。フロン113の場合は、標準混合ガスを用いて蒸気濃度と散乱光強度との関係を求めた。

以上のようにして、試料噴射圧力、噴射期間、吸気弁温度、吸気弁揚程、空気流量を変えながら燃焼室内各測定点における蒸気濃度の時間変化を測定した。

3. 結 果

図4はフォトマルならびに噴射弁制御回路からの出力信号を概略的に示したものである。図4中上側のなめらかな曲線が混合気からのレイリー散乱光強度に相当し、これに重畳したパルス状の波形が液滴によるミー散乱光である。実験条件の範囲内では常にミー散乱

図3 校正装置

図4 信号

光が検出され、これより燃焼室内に燃料液滴が存在していることがわかった。ただし、その個数は条件により大きく異なった。このように、液滴からのミー散乱信号は観測されるものの、レイリー散乱信号がそれに埋もれることはなく、本実験の範囲内では常に濃度測定が可能であった。図4の下側に示すのは噴射弁制御回路からの出力信号であり、 t_i が噴射期間に相当する。レイリー散乱光強度は噴射開始からの経過時間とともに上昇し、極大値に達した後減少しながら最初のレベルに漸近する傾向がある。このような信号から極大値 I_{rp} を測定した後、それに対応する極大蒸気濃度(モル分率) X_{rp} を求め、これを蒸気濃度の代表値とした。また、噴射開始からレイリー散乱光検出開始までの期間 t_0 を蒸気到達時間、散乱光が検出される期間 t_i を蒸気存在時間とした。これらの値により、混合気の挙動ならびに蒸気量に関する情報を得ることができる。

図5は、試料液体としてガソリンを噴射した場合の極大蒸気濃度(質量分率) ω_{rp} 、蒸気到達時間および蒸気存在時間に及ぼす噴射圧力の影響を示したものである。なお、図5の横軸に示す噴射圧力は蓄圧室における圧力と大気圧の差である。これらの測定値は点Bにおいて得られたものであり、図5中の記号はそれぞれ、 G_a : 空気流量、 l : 吸気弁揚程、 T_v : 吸気弁温度、 t_i : 噴射期間である。図5から明らかなように、噴射圧力の上昇とともに極大蒸気濃度および蒸気存在時間がほぼ直線的に増加している。噴射圧力が上昇すると、ガソリン噴射量の増加に加えて噴流速度の上昇による微粒化促進と蒸発速度上昇が生じるため蒸気量が増加

図5 噴射圧力の影響(ガソリン)

し、このような結果になったものと考えられる。蒸気到達時間は噴射圧力の上昇とともに急激に減少するが、0.25 MPa 以上になるとその変化は小さくなっている。この原因として、まず、噴射圧力の上昇による蒸気量の増加のため吸気弁周囲の混合気流速が上昇することが考えられる。つぎに、噴射圧力の上昇とともに燃焼室内へ流入するガソリン液滴ならびに蒸気の速度が増すため、測定部への蒸気到達時間が減少したことが考えられる。混合気中に占めるガソリン蒸気の体積割合が小さいことから後者の影響が強いと考えられる。図6は、フロン113について噴射圧力の影響を示したものであり、図5と同様の結果が得られている。このことから、噴射圧力の影響に関してガソリンとフロン113はほぼ同様の傾向にあることがわか

図6 噴射圧力の影響(R113)

図7 噴射期間の影響(極大蒸気濃度)

る。

図7～図9はそれぞれ極大蒸気濃度、蒸気到達時間および蒸気存在時間と噴射期間の関係を示したものである。これらの図から明らかなように、A', C', D'いずれの点においても噴射期間の増大とともに極大蒸気濃度および蒸気存在時間は長くなっている。これは、噴射期間の増加とともに噴射量が増加し、それに伴って蒸気量が増加したためと考えられる。図8に見られるように、蒸気到達時間は噴射期間によらずほぼ一定値となっている。測定点による差異を見るとつぎのよう

図8 噴射期間の影響(蒸気到達時間)

図9 噴射期間の影響(蒸気存在時間)

である。すなわち、点 A' では他の測定点に比べて極大蒸気濃度が低く (図 7), 蒸気到達時間が長い (図 8) 傾向が現れている。吸気弁周囲より燃焼室内へ流入する混合気噴流の主流方向から点 A' が離れているためこのような結果になったものと考えられる。

図 10～図 12 に吸気弁温度の影響を示す。図 10 および図 12 に見られるように、極大蒸気濃度および蒸気存在時間は吸気弁温度とともに上昇し、飽和温度 (320.7 K) 付近より高温においてはかなり急激な増大傾向となっている。これは、吸気弁温度の上昇とともに蒸発が促進されることによるものと思われる。また、図 11 より明らかなように、蒸気到達時間は吸気弁温度の上昇に伴い増大傾向となっている。吸気弁温度が上昇すると蒸気量の増加に伴い燃焼室内へ流入する気相速度は上昇するはずであるが、それにもかかわらず図 11 のような結果になったのは液滴の効果による可能性が高い。すなわち、吸気弁温度の上昇は燃焼室内へ流入する液滴直径および数の減少をもたらす、そのため燃焼室内において混合気が減速されやすくなり、測定点への蒸気到達時間が長くなったものと考えられる。

図 13～図 15 は空気流量の影響を示したものである。図 13 に見られるように、空気流量の変化とともに極大蒸気濃度は極小値を示す傾向にあることがわかる。空気流量が増加すると、蒸気促進による蒸気量の増加と生成蒸気の希釈が同時に起こり、このような結果が得られたものと考えられる。図 14 では空気流量の変化に伴う蒸気到達時間の極大傾向が示されている。空気流量の増加とともに液滴の量が減少し、これに伴

って混合気が低流量域では減速され、高流量域では加速されるため蒸気到達時間が極大値を示すことが考えられる。図 15 に示すように蒸気存在時間は空気流量の増加とともに減少しているが、これは各測定点における混合気流速の上昇によるものと思われる。

図 16～図 18 に吸気弁揚程の影響を示す。図 16 および図 18 に見られるように、吸気弁揚程の減少とともに極大蒸気濃度ならびに蒸気存在時間の測定点による差が小さくなっていることがわかる。これは、吸気弁揚程の減少に伴う蒸気と空気との混合促進効果によるものと考えられる。図 17 では蒸気到達時間が吸気弁揚

図 11 吸気弁温度の影響 (蒸気到達時間)

図 10 吸気弁温度の影響 (極大蒸気濃度)

図 12 吸気弁温度の影響 (蒸気存在時間)

程の減少に伴って増大する傾向が示されている。吸気弁揚程の減少は燃焼室内へ流入する混合気流速の上昇をもたらすにもかかわらずこのような結果が得られたことに対し、つぎのことが考えられる。すなわち、吸気弁揚程が減少すると蒸発が促進されること、および吸気弁あるいは吸気管壁に衝突する液滴が増加し燃焼室内へ流入する液滴の量が減少する⁽⁴⁾結果燃焼室内において混合気が減速されやすくなることによると考えられる。

以上の結果から混合気形成に及ぼす各因子の影響について理解を深めることができた。また、蒸気濃度場形成について燃焼室内へ流入する液滴の挙動がかなり

重要な役割を果たしていることが推察されたので、以後この点をさらに究明していく予定である。

4. 結 言

自動車用火花点火機関の燃焼室における混合気形成過程解明のための基礎的研究として、吸気管内に無鉛レギュラガソリンおよび常温で液体のフロン 113 を間欠的に噴射し、レーザレイリー散乱法を用いて燃焼室内における蒸気濃度を測定した。燃焼室内各位置における蒸気濃度の時間履歴曲線から、極大蒸気濃度、噴射開始後その位置に蒸気が到達するまでの蒸気到達時間および蒸気が存在する蒸気存在期間を求め、それ

図 13 吸入空気流量の影響(極大蒸気濃度)

図 15 吸入空気流量の影響(蒸気存在時間)

図 14 吸入空気流量の影響(蒸気到達時間)

図 16 吸気弁揚程の影響(極大蒸気濃度)

図 17 吸気弁揚程の影響(蒸気到達時間)

らに及ぼす各因子の影響を調べた結果、つぎのことが明らかになった。

(1) 噴射圧力の上昇とともに極大蒸気濃度ならびに蒸気存在時間はほぼ直線的に増大し、蒸気到達時間は減少する。

(2) 噴射圧力の影響に関して、ガソリンとフロン 113 はほぼ同様の傾向を示す。

(3) 噴射期間の増大とともに極大蒸気濃度ならびに蒸気存在時間が長くなるが、蒸気到達時間はほぼ一定である。

(4) 吸気弁温度の上昇とともに極大蒸気濃度、蒸気到達時間および蒸気存在時間が増大する。なお、これらの値は試料の飽和温度以上においてかなり急激な変化を示す。

(5) 空気流量の増加とともに蒸気存在時間は減少するが、極大蒸気濃度は極小値、蒸気到達時間は極大

図 18 吸気弁揚程の影響(蒸気存在時間)

値を示す。

(6) 吸気弁揚程が減少すると極大蒸気濃度および蒸気存在時間の場所による差が小さくなり、蒸気到達時間は増加傾向を示す。

おわりに、本研究費の一部はマツダ財団の援助により、実験装置の一部は日本電装(株)からご提供いただいた。記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) Kadota, T., SAE Paper, No. 872151(1987).
- (2) 角田・ほか3名, 機論, 54-498, B(1988), 492.
- (3) 角田・ほか2名, 機論, 54-502, B(1988), 1535.
- (4) 角田・ほか2名, 機論, 55-510, B(1988), 552.
- (5) Graham, S. C., ほか2名, AIAA J., 12-8(1974), 1140.
- (6) Dyer, T. M., AIAA J., 17-8(1979), 912.
- (7) Escoda, M. C. and Long, M. B., AIAA J., 21-1(1983), 103.
- (8) Arcoumanis, C., Exp. Fluids, 3(1985), 103.
- (9) 角田・ほか2名, 機論, 53-489, B(1987), 1585.

討 論

〔質問〕 野村 浩司・河野 通方

(東京大学工学部)

実験結果の範囲内では常に燃焼室に燃料液滴が存在していたということだが、被測定体積以外の燃料液滴が入射レーザ光を減衰させ、さらに、混合気からのレイリー散乱光を減衰させるため、校正装置による混合気のレイリー散乱強度の測定結果との比較を行うためには何らかの補正が必要と思われるが、その点について

でのお考えをお聞かせ願いたい。

〔回答〕 ご指摘のように、被測定体積以外の燃料液滴が入射レーザ光とレイリー散乱光を減衰させることが考えられる。しかし、本実験では液滴数密度が低く、その差は小さいものと考えられるのでとくに補正を行っていない。なお、同様の条件下でミー散乱による燃料液滴直径の測定を行った際⁽⁴⁾(付1)にはこの影響は無視できた。上記補正が必要な場合には、図3に示

す校正装置において光路中に液滴が浮遊するときとそうでないときの散乱光強度を測定することによりその値を求めることが可能だと思われる。

〔質問〕 小野 信 輔〔九州大学工学部〕

大変興味ある測定によって、吸気直後の燃料挙動を詳細に調べられ、その後の混合挙動予測の初期条件を与えることになると思うが、点火・燃焼過程の不均一問題を考える場合には、そこに対応した時期の燃料分布がわかれば、燃焼室形状その他の影響を直接知るうえで好都合と思う。この方法の測定分解能はどの程度なのか、今後のご計画ではこの時期の測定も予定されているのか。

〔回答〕 本研究の主目的は気液二相流中の蒸気濃度測定にレイリー散乱法が適用可能であることを確認すると同時に機関吸気行程時の混合気形成過程に関する基礎的知見を得ることである。ご指摘のように、点火時の混合気濃度を知ることが重要であり、最近機関モータリング時の測定を行った^(付2)。その結果、点火時の蒸気濃度と吸気行程時の値との間には強い相関が

見られることがわかった。このことから本実験の結果は機関運転時の混合気形成の初期条件だけでなく点火時の状況を理解するのに有用だと考えられる。なお、長さ 250 μm 、直径約 110 μm の円筒部が本測定法の測定体積である。

〔質問〕 大竹 一 友〔豊橋技術科学大学〕

この種の機関では、噴射された燃料のうち、どの程度の割合が気化し、それが火花点火により着火へと導くのに寄与しているかに興味がある。貴研究により、噴射燃料の気化割合が見積もれると考えるが、それはどれくらいか。

〔回答〕 本研究では、点火および燃焼過程を支配する蒸気濃度の測定に力点を置いた。噴射燃料の気化割合を見積もることも重要だと思うが、本研究の結果だけからこの値を求めることは困難である。ご指摘の点に留意し今後研究を進めたいと思う。なお、気化割合の概略値については前報^(付3)をご参照いただきたい。

(付1) 角田・ほか3名, 機論, 55-513, B(1989), 1485.

(付2) 角田・ほか2名, 論文講演抜刷, 第67期全国大会講演会(1989), 論文 No. 89-0030 A.

(付3) 寶諸・ほか3名, 自技論, No. 26(1983), 41.