点火栓位置での混合気濃度計測法の開発* (直噴ガソリンエンジンへの適用)

河村 清美^{*1}, 鈴置 哲典^{*2}, 斎藤 昭則^{*1}
友田 晃利^{*3}, 神田 睦美^{*4}

Development of Instrument for Measurement of Fuel-Air Ratio in the Vicinity of Spark Plug (Application to DI Gasoline Engines)

Kiyomi KAWAMURA, Tetsunori SUZUOKI, Akinori SAITO,
Terutoshi TOMODA and Mutsumi KANDA

An instrument to measure time-resolved fuel-air ratios in the vicinity of a spark plug was developed. Absorption and scattering at the wavelengths of visible and infrared rays were utilized to determine the fuel-air ratios in the mixture including liquid and vaporized fuel. The measurement error of the instrument was estimated within 10% from comparison between the overall and the measured fuel-air ratios at the vicinity of the spark plug with inlet port injection which forms homogeneous mixture. The instrument was applied to direct injection gasoline engines and the mixture formation process was discussed.

Key Words: Gasoline Engine, Fuel Injection, Measurement, Optical Measurement, Fuel-Air Ratio, Infrared Absorption Stratified Charge Engine

1. ま え が き

火花点火エンジンの燃費向上, 排気浄化を図るために, リーンバーンエンジンや直噴ガソリンエンジンが開発されている。このような形態のエンジンでは, 混合気が希薄, あるいは成層化されており, 点火時期に可燃混合気が点火栓近傍に存在することが重要である。このようなことから点火栓近傍の混合気濃度を把握する必要がある。混合気濃度の計測には機械的プローブを用いる方法や, LIF 法, 赤外吸収法のような光学的方法があるが, 場を乱さない光学的方法が望ましい。光学的方法のうち LIF 法は混合気濃度の空間分布を計測できる反面, 燃料に蛍光剤を添加する必要があること, 可視化エンジンを使う必要があることなどの問題がある。一方, 赤外吸収法は燃料への添加剤が不要であり, 燃料蒸気の吸光係数が既知であれば, 比較的簡単な装置で混合気濃度を測定でき, 実機への適用も可能である。赤外吸収法をエンジン筒内へ適用し

た例はいくつか報告されている。吉山ら⁽¹⁾はプロパンを燃料とする火花点火ガスエンジンを対象にした。また井藤ら⁽²⁾はディーゼルエンジンを対象にして, 軽油が噴射直後に低級燃料に分解するという報告を基に, 軽油の吸光係数がプロパンと等しいものとして混合気濃度を求めた。さらに Winklhofer ら⁽³⁾もディーゼルエンジンを対象にしたが, 軽油の吸光係数が未知であるために定性的な評価にとどまっている。このように二, 三の測定例が報告されているが, 液体燃料を用いたエンジンの筒内における混合気濃度の定量測定は, 必ずしも十分ではない。またこれらの報告は, 赤外光をエンジン筒内に導入するために, エンジンの改造を行っている。これによって燃焼室形状が実エンジンとは異なって, 混合気形成状態が変化することも考えられる。

本研究では, エンジンを改造することなく, 実際のガソリンエンジンの点火栓位置における混合気濃度を時系列で定量測定することを目的として, 点火栓の赤外吸収式混合気濃度計測装置を開発した。さらに本装置を直噴ガソリンエンジンに適用して点火栓位置での混合気形成過程を調べた。

* 原稿受付 1998 年 3 月 16 日。

^{*1} 正員, (株)豊田中央研究所 (〒480-1192 愛知県愛知郡長久手町横道 41-1)。

^{*2} (株)豊田中央研究所。

^{*3} 正員, トヨタ自動車(株) (〒410-1193 裾野市御宿 1200)。

^{*4} トヨタ自動車(株)。

2. 開発した点火栓形の赤外吸収式

混合気濃度計測装置

2・1 測定原理 燃料蒸気と燃料粒子が混在するガソリン混合気に波長が $3.39\ \mu\text{m}$ の赤外光を照射すると、赤外光は(1)燃料蒸気による吸収、(2)燃料粒子による散乱と吸収、によって光強度が減衰する。このときの入射強度 I_0 と透過光強度 I_t との関係は式(1)のように表される。式(1)右辺の第1項は燃料蒸気による光吸収、第2項は燃料粒子による光散乱と光吸収を表す。一方、可視光(例えば $0.63\ \mu\text{m}$ の波長)を混合気に照射する場合には、式(2)に示すように、燃料粒子による散乱によってのみ光強度が減衰する。

$$\log_e(I_t/I_0)_{ir} = -L \cdot c \cdot \mu - L \cdot K_{ext} \cdot A_f \quad \dots\dots (1)$$

$$= -L \cdot c \cdot \mu - L \cdot (K_{scat} + K_{abs}) \cdot A_f$$

$$\log_e(I_t/I_0)_{vis} = -L \cdot K_{ext} \cdot A_f \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$= -L \cdot K_{scat} \cdot A_f$$

I_0 : 入射光強度

I_t : 透過光強度

K_{ext} : 燃料粒子の減衰係数

K_{scat} : 燃料粒子の散乱係数

K_{abs} : 燃料粒子の吸収係数

L : 光路長

A_f : 燃料粒子の投影面積

c : 燃料蒸気濃度

μ : 燃料蒸気の吸光係数

ir : 赤外光を表す

vis : 可視光を表す

式(1)右辺の第2項が式(2)に等しいとすることができれば、赤外光と可視光の透過光強度を計測することによって燃料蒸気濃度を求めることが可能になる。この可能性を確かめるために、おのおのの波長における燃料粒子の減衰係数を試算した。燃料粒子の減衰係数は波長と粒径の関数であり、屈折率が既知であれば Mie の散乱理論によって求めることができる。ガソリンの屈折率は不明であるため、性状がガソリンに比較的近いイソオクタンを対象にして減衰係数の波長依存性を計算した。またノズルから噴射された燃料は筒内の空気との熱交換によって温度変化する。この温度変化によって燃料の屈折率が変化し、それに伴って減衰係数も変化することから、減衰係数の温度依存性についても計算した。なお計算には Wiscombe⁽⁴⁾ の提案した計算コードを用いた。

図1に、減衰係数に対する波長依存性を計算した結果を示す。計算では、波長を $3.39\ \mu\text{m}$ と $0.63\ \mu\text{m}$ に設定した。屈折率は、 $3.39\ \mu\text{m}$ の波長に対して 1.44 -

(a) Monodisperse

(b) Rosin-Rammler width parameter: $N=2$

Fig. 1 Effect of wavelength on extinction coefficient of drop

$0.065i$ (吸収があるので複素数で表される)、 $0.63\ \mu\text{m}$ の波長に対して 1.39 を用いた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図1には単分散噴霧と粒度分布を有する噴霧に対して計算した結果を示す。粒度分布は Rosin-Rammler の粒度分布関数で与えた。粒度分布の広がりを表す指数 N は、通常の噴霧の場合の値である 2 に設定した。この結果から単分散噴霧の場合には粒径に対して減衰係数が振動し、粒径が $10\ \mu\text{m}$ 以下では波長の違いによる減衰係数の差が大きいことがわかる。一方、粒度分布をもつ噴霧では、減衰係数が滑らかに変化し、ザウタ平均粒径が $5\ \mu\text{m}$ 以上であれば、波長の違いによる減衰係数の差は 5% 程度である。またザウタ平均粒径が $10\sim 40\ \mu\text{m}$ の範囲内では、 $0.63\ \mu\text{m}$ の波長における減衰係数は、 $3.39\ \mu\text{m}$ の場合のほぼ 0.95 倍になる。次に、減衰係数に対する波長依存性の影響が大きいザウタ平均粒径 $5\ \mu\text{m}$ 以下の場合について考える。直噴ガソリンエンジンに用いられるノズルの非蒸発場におけるザウタ平均粒径は、 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 程度である。この噴霧が蒸発してザウタ平均粒径が $5\ \mu\text{m}$ 以下になるとときには、燃料粒子質量は燃料蒸気質量と比較してかなり小さくなる。このような場合には、燃料蒸気による赤外吸収量に対して燃料粒子による赤外減衰量の比率が小さくな

る。そのために燃料蒸気量が多いほど燃料粒子による赤外減衰量の見積もり誤差が、燃料蒸気濃度の測定結果に与える影響は小さくなる。したがって燃料粒子による赤外光の散乱・吸収量を可視光の減衰量で見積もることに起因する混合気濃度の計測誤差はそれほど大きくないと考えられる。なおノルマルヘプタンに対しても同様な計算を行ったが、同様な傾向が得られた。

図2に、減衰係数に対する温度依存性を計算した結果を示す。計算では、波長を $3.39\ \mu\text{m}$ に設定し、燃料粒子温度が 20°C と 80°C の場合を比較した。おのおのの温度における屈折率は、Drallmeier ら⁽⁵⁾ の測定結果を用い、 20°C の場合は $1.44-0.065i$ 、 80°C の場合は $1.405-0.082i$ とした。この結果から燃料粒子温度に対して減衰係数にそれほど大きな変化がみられず、この影響は無視できるほど小さいことがわかる。

以上の結果から、赤外光(波長: $3.39\ \mu\text{m}$)における減衰係数が可視光(波長: $0.63\ \mu\text{m}$)の減衰係数の $1/0.95$ 倍に等しいものとして、燃料粒子による赤外光の減衰量を見積もった。これによってガソリン蒸気の吸光係数 μ が既知であれば、可視光と赤外光の透過率を計測することによって燃料蒸気濃度 c を求めることが可能になる。

2.2 ガソリン蒸気の吸光係数 図3に示す装置を用いてガソリンの吸光係数を計測した。蒸発容器(内容積: $393.5\ \text{cm}^3$)には、温度調節器で制御されるヒータ、混合気濃度を均質にするためのかくはん用羽根、容器内を加圧するための空気ポンプが装着されている。マイクロシリンジを用いて所定量のガソリンを蒸発容器内に注入して蒸発させた。容器内をかくはん用羽根でかくはんすることによって混合気濃度を均質にした。蒸発容器を挟んでHe-Neレーザ(波長:

$3.39\ \mu\text{m}$)と $3.39\ \mu\text{m}$ の波長のみを透過するバンドパスフィルタを装着した赤外線検出器(PbSe 光導電形素子)を対向配置して、透過光強度を計測した。この場合には燃料粒子が光路内に存在しないので、吸光係数は式(1)の燃料粒子による減衰を表す右辺第2項を省略した式で求めた。使用した燃料はレギュラガソリンである。

図4に、混合気温度を $473\ \text{K}$ に設定して、混合気濃度を $0.296 \times 10^{-5} \sim 9.47 \times 10^{-5}\ \text{mg}/\text{mm}^3$ (当量比: $0.05 \sim 1.68$) に変えた場合の混合気濃度に対する透過率の変化を示す。測定結果は片対数座標上で同一直線上にプロットされ、Lambert-Beer の法則に則した現象であることがわかる。この傾きから使用したガソリンの吸光係数を求めると、 $270\ \text{mm}^2/\text{mg}$ であった。

図5に、容器内の混合気濃度を $9.47 \times 10^{-5}\ \text{mg}/\text{mm}^3$ に調整し、充てん圧力を $0.1 \sim 0.8\ \text{MPa}$ に変えた場合の吸光係数の変化を示す。この結果から容器内圧力が変化しても吸光係数はほぼ一定であり、圧力依存性のないことがわかる。

図6に、混合気温度を $423 \sim 573\ \text{K}$ に変えた場合の吸光係数の変化を示す。混合気温度は $423\ \text{K}$ から $573\ \text{K}$ まで $25\ \text{K}$ ずつ上昇させた後に、再び $423\ \text{K}$ まで下降させた。混合気温度を $423\ \text{K}$ から $523\ \text{K}$ まで上昇

Fig. 3 Apparatus for measurement of absorption coefficient of fuel vapor

Fig. 2 Effect of fuel liquid temperature on extinction coefficient of drop

Fig. 4 Relation between transmittance and fuel vapor concentration

Fig. 5 Effect of pressure on absorption coefficient of fuel vapor

Fig. 6 Effect of temperature on absorption coefficient of fuel vapor

させた範囲内では、ほぼ一定の吸光係数である。しかし 548 K まで混合気温度を上昇させると、吸光係数(光減衰量)が時々刻々と減少した後に、初期の吸光係数の約 1/3 になったところで一定値になった。この後、さらに混合気温度を 578 K まで上昇させ、再び 423 K まで下降させても、吸光係数は減少した値のままであった。このことから 548 K における吸光係数の変化は、温度上昇に伴ってガソリンの組成が変化し、物性値が変化したものと考えられる。なお 548 K における吸光係数の変化に要した時間は 500 ms 程度であった。これに対してエンジン筒内で 548 K 以上の混合気温度になる期間は約 20 ms 以下である。したがってこの変化はエンジン筒内現象に比してかなり緩やかである。さらに Tsuboi らのショックチューブを用いて 292~1100 K の混度範囲内で 3.39 μm の波長における種々の hidrocarbon 分子の吸光係数を測定した結果⁷⁾では、ガソリンを構成する主要な分子の吸光係数に温度依存性がみられないことが示されている。これらのことから、エンジン筒内での測定に対しては、図 6 に示した急減する前の吸光係数の値を用いることにした。

以上の結果から、使用したガソリンの吸光係数を

(a) Optical Alignment

(b) Measuring Probe

Fig. 7 Schematic of developed instrument for measurement of fuel-air ratio

270 mm^2/mg の一定値とした。この他にプレミアムガソリンに対しても同様な測定を行ったが、同様な傾向を示した。ただし吸光係数は 211 mm^2/mg であり、前述のレギュラガソリンの値より 20% 程度小さい。

2.3 点火栓形混合気濃度計測装置の構成 図 7 に開発した点火栓混合気濃度計測装置の構成を示す。光源として波長 3.39 μm の He-Ne レーザ、赤外線検出器として PbSe 光導電形素子を用いた。He-Ne レーザ、混合気濃度計測部、赤外線検出器間を AS-S カルコゲナイドガラス製の赤外ファイバで接続した。赤外ファイバは片側を二つに分岐したものを使用した。レーザ光はチョッパで断続光にした後、二またに分かれた赤外ファイバの一方に入射した。赤外ファイバによって混合気濃度計測部に導かれた赤外光は、石英窓を透過した後に反射鏡で反射される。石英窓と反射光の間が測定領域であり、その間隔は 6 mm である。したがって光路長は 12 mm になる。反射鏡で反射された赤外光は二またに分かれた赤外ファイバのもう一方を介して赤外線検出器に導かれる。赤外線検出器の前面には光学フィルタを装着して、特定の波長の光のみを透過させた。赤外線検出器の出力はデータ処理装置に入力し、そのデータを基にして混合気濃度を計算した。

2.4 妥当性の確認 本手法の妥当性を確認するために、均質な混合気形成される吸気管内に燃料を噴射した場合の点火栓位置における混合気濃度の計測結果を図 8 に示す。当量比は 0.24, 0.47, 0.71 に設定した。これらの設定に対して約 10% の誤差内で当量比が計測された。この結果から 2.2 節で述べたよう

Fig. 8 Comparison between overall and measured equivalence ratio under inlet port injection of fuel

Fig. 9 Arrangement of DI gasoline engine

に、吸光係数を一定値としても妥当な結果が得られることが確認できた。

3. 直噴ガソリンエンジンへの適用

図9に示すようなスワールノズルと深皿燃焼室を備えた直噴ガソリンエンジン⁽⁸⁾⁽⁹⁾の点火栓位置における混合気濃度を計測した。対象としたエンジンはすべての運転域にわたって良好な燃焼状態が得られるように、噴射時期をエンジン負荷に応じて(1)吸気行程、(2)吸気行程と圧縮行程の2回、(3)圧縮行程に切換えるようになっている。これによって均質混合気、弱成層混合気、成層混合気をそれぞれ形成させている。このような噴射時期の切換えに伴う点火栓位置における混合気形成過程の変化を調べた。なおエンジン回転数は1200 rpm一定に設定した。

図10に、吸気行程噴射時の点火栓位置における当量比の計測結果を示す。図10中に示す適正燃焼範囲は、下限が失火限界を表し、上限が経験的にスモークを発生することなく運転できる限界を示したものである。燃料噴射量は12 mm³(圧縮行程噴射条件)、24 mm³(2回噴射条件)、34 mm³(吸気行程噴射条件)に設定した。実エンジンでは34 mm³の場合にのみ吸気行程噴射になるが、比較のためにそれより少ない噴射量の場合に対しても当量比を測定した。燃料噴射量が

Fig. 10 Histories of equivalence ratio under injection at suction stroke (Injection Timing: -323° CA)

Fig. 11 History of equivalence ratio under injection at suction and compression stroke (1st Injection Timing: -323° CA)

34 mm³の場合には、約-50° ATDC以降は適正燃焼範囲内の混合気が形成され、約-40° ATDC以降はほぼ一定の当量比の混合気が点火栓位置に形成されることがわかる。一方、燃料噴射量が24 mm³の場合には、適正燃焼範囲下限ぎりぎりの当量比であり、この状態では安定した点火運転が困難であることがわかる。さらに燃料噴射量の少ない12 mm³の場合には、適正燃焼範囲の下限にまったく達しない。

一方、図11に燃料噴射量が24 mm³の条件で吸気行程と圧縮行程の2回噴射を行った場合の点火栓位置における当量比の計測結果を示す。実験では圧縮行程と吸気行程にそれぞれ12 mm³ずつ噴射した。圧縮行程噴射時には、吸気行程に噴射された燃料によって約0.28の当量比の混合気がすでに点火栓位置に形成されている。これに続いて圧縮行程で噴射された燃料は、約20° CA後に点火栓に到達し、当量比が急増する。その後、混合気の拡散によって当量比が減少し、図11中に丸印で示した点火時期には適正燃焼範囲内の混合気が形成されることがわかる。また、図12に圧縮行程に12 mm³の燃料を噴射した場合の点火栓位置における当量比の計測結果を示す。この場合にも燃料噴射開始後約20° CAに混合気が点火栓に到達して

Fig. 12 History of equivalence ratio under injection at compression stroke

当量比が急増した後に、混合気の拡散によって当量比が減少することがわかる。そして点火時期には適正燃焼範囲内の混合気が形成されることがわかる。

なお、いずれの条件においても可視光の減衰はみられなかった。これは点火栓位置に燃料粒子が存在しなかったことを意味する。

図 13 に、ホールノズルを用いた別形式の直噴ガソリンエンジン⁽⁹⁾ に対して、点火栓位置における混合気濃度を計測した結果を示す。この結果は圧縮行程噴射時における燃料蒸気のみ当量比と燃料粒子面積密度(測定体積中に占める燃料粒子の総投影面積/空気質量)を示す。噴射開始後 10° CA に燃料蒸気と燃料粒子が同時に点火栓に到達する。この期間は前述のケースの約 1/2 であり、かなり短いことがわかる。時間経過とともに燃料蒸気濃度と燃料粒子面積密度が増加し、その後減少する。この変化の中で特徴的なことは、燃料粒子面積密度のピークが -6° ATDC であるのに対して、燃料蒸気濃度のピークが TDC になることである。このピーク時期のずれは、燃料粒子の蒸発によって燃料粒子量が減少して燃料蒸気量が増加することと、燃料粒子のほうが慣性力が大きいために点火栓近傍を速く通り抜けることによると考えられる。

4. ま と め

エンジンを改造することなく、実際のガソリンエンジンの点火栓位置における混合気濃度を時系列で定量

Fig. 13 History of fuel vapor and fuel liquid concentration

測定できる点火栓形の赤外吸収式混合気濃度計測装置を開発した。開発にあたり、燃料粒子の減衰係数や燃料蒸気の吸光係数を評価した。その結果、燃料粒子の赤外吸収量を可視光の減衰量で見積もることによる測定誤差は小さいこと、ガソリン蒸気の吸光係数の温度・圧力依存性は無視できるほど小さいことがわかった。また均質な混合気が形成される吸気管内噴射時の混合気濃度を計測することによって、本計測装置は 10% 以内の誤差で混合気濃度が計測可能なことがわかった。さらに本装置を直噴ガソリンエンジンに適用して、点火栓位置における混合気形成過程を明らかにした。

文 献

- (1) 吉山定見・ほか 3 名, 機論, **62**-595, B (1996), 368-373.
- (2) 井藤良温・ほか 2 名, 自技会講演会前刷集, No. 872121 (1987), 637-642.
- (3) Winklhofer, E. and Plimon, A., *Opt. Eng.*, **30**-9 (1991), 1262-1268.
- (4) Wiscombe, W. J., *NCAR Tech. Note*, Nat. Tech. Inform. Service, No. PB-301388 (1979).
- (5) Drallmeier, J. A. and Peters, J. E., *Appl. Opt.*, **29**-7 (1990), 1040-1045.
- (6) 日本機械学会編, 技術資料流体の熱物性値集, (1983), 22-23.
- (7) Tsuboi, T., ほか 4 名, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24**-1 (1985), 8-13.
- (8) Harada, J., ほか 4 名, *SAE Paper*, No. 970540 (1997).
- (9) Tomoda, T., ほか 4 名, *SAE Paper*, No. 970539 (1997).