3.392 μm 赤外吸収法を用いたエンジンシリンダ内 点火栓近傍炭化水素系燃料濃度計測* (メタン～空気均一予混合気による検討)

富田 栄二^{*1}, 河原 伸幸^{*1}
重永 真宏^{*2}, 西山 淳^{*2}

In situ Measurement of Fuel Concentration of Hydrocarbon near Spark Plug in an Engine Cylinder by 3.392 μm Infrared Laser Absorption Method (Discussion of Applicability with Homogeneous Methane-Air Mixture)

Eiji TOMITA^{*3}, Nobuyuki KAWAHARA,
Masahiro SHIGENAGA and Atsushi NISHIYAMA

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Okayama University,
3 Tsushima Naka, Okayama shi, Okayama, 700-8530 Japan

A fiber optic system linked to the optical sensor installed in the spark plug, in which light can pass through the combustion chamber, was developed to determine the fuel concentration near the spark-plug successively using an infrared absorption method. A He-Ne laser with a wavelength of 3.392 μm that coincides with the absorption line of hydrocarbons was used as a light source. By exchanging an ordinary spark plug into this spark plug with the optical sensor, successive measurement of fuel concentration before the spark timing near the spark-plug was performed in a spark-ignition engine inducted with homogeneously mixed methane-air. The fuel concentration was determined from law of Lambert-Beer in consideration for the effects of pressure and temperature on molar absorption coefficient of methane.

Key Words: Internal Combustion Engine, Laser Diagnostics, Infrared Absorption Method, Air Fuel Ratio, Fiber-Optic Sensor, Molar Absorption Coefficient

1. はじめに

赤外吸収法を用いて燃焼室内燃料濃度を時系列にて計測する手法が注目を集めている。波長 3.392 μm を持つ赤外 He-Ne レーザがメタンなどの炭化水素系燃料の伸縮バンドである IR- ν_3 バンドの吸収線に一致していることを利用したものである。Edwards と Burch により紹介されたこの手法により燃焼室内炭化水素系燃料濃度計測の可能性が深められてきた⁽¹⁾。Tsuboi らは、衝撃波管を用いて、メタンおよびメタン以外の炭化水素系燃料についてその吸収係数を詳細に調べている⁽²⁾。Heffington らは、メタンの酸化反応を把握するために、メタン濃度の時系列計測を行っている⁽³⁾。Chraplyvy は、この手法を燃料噴霧に適用し、燃料蒸気濃度計測を行

っている⁽⁴⁾。

近年、希薄予混合燃焼方式が多く燃焼装置に採用されている。これらの燃焼装置では燃料と空気の混合度合いが NO_x や CO 生成に非常に影響を与えるため、この赤外吸収法を用いて燃料の不均一性を調べられてきた。郡と長谷は、ガスノズルでの都市ガスと空気との混合度合いを調査している⁽⁵⁾。Mongia らは、予混合バーナにおける燃料の混合度合いと NO_x 生成量との関係を調べている⁽⁶⁾。Lee らは、ガスタービン模擬した装置に赤外吸収法を適用し、熱発生率の変動と燃料の不均一性との関係を報告している⁽⁷⁾。

希薄予混合燃焼方式は内燃機関においても用いられている。その場合火花点火機関では、混合気が均一に希薄、あるいは成層化されており、特に成層化されているときには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。また、火花点火機関の場合、初期燃焼の変動がその後の燃焼に影響を及ぼす。

* 原稿受付 2002 年 12 月 19 日。

^{*1} 正員、岡山大学工学部(〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)。

^{*2} 学生員、岡山大学大学院自然科学研究科。

E-mail: tomita@mech.okayama-u.ac.jp

初期燃焼の変動の原因としては、濃度変動、ガス流動の影響などいろいろ考えられるが、最も強く影響を与えるのが濃度変動であろう。よって、点火栓近傍の燃料濃度を、実機で正確に、しかも時系列で測定することができれば、実用上、非常に有用になると思われる。そのため、赤外吸収法を用いて点火栓近傍燃料濃度を計測することが行われている。吉山らは、3.392 μm He-Ne レーザを用いて、試験機関点火栓近傍燃料（プロパン）濃度の計測を行い、このような計測方法の可能性を示した⁹⁾。Koenig, Hall らは、赤外吸収法を利用して実用機関点火栓近傍の燃料濃度を計測した^{9), 10)}。ただし、光源には赤外ランプを利用し、赤外受光部前にバンドパスフィルタで 3.4 μm 近傍の光を受光している。点火栓に組み込まれた光学系はダブルパス方式であり、反射面は蒸着されている。河村らは、同様の光学系で、光源に赤外 He-Ne レーザを使用して、ガソリンのモル吸光係数を測定し、直接噴射式機関において非燃焼状態で点火栓近傍燃料濃度を計測した¹¹⁾。光学系はダブルパス方式である。角井らは、端面が 45 度にカットされた 2 本の突き出しサファイアロッドを持つフォーク型の光学系を使用して、直接噴射式機関における点火時期付近の点火栓近傍燃料濃度を計測した¹²⁾。しかし、測定部長さが 3mm と短く、得られた空燃比の計測誤差は必ずしも小さいものではなかった。角方らは、測定部長さを 5mm とした光学系で直噴機関内燃料濃度を計測している¹³⁾。

本研究では、角方らと同一のものを用いて計測精度の検討を行うために、燃料にはメタンを使用し、完全に予混合させた状態にて測定した。まず、メタンの吸光係数を定容容器にて計測し、圧力・温度依存性を調べた。この際、HITRAN データベース¹⁴⁾との比較を行い、計測結果の妥当性を検討した。さらに、実用機関において点火栓近傍での燃料濃度計測を時系列にて行い、得られた計測結果に関して報告する。

2. 赤外吸収法の原理

ある波長の光（強度 I_0 ）は、測定部長さ L でモル濃度 c のガス帯中を通過するとき、Lambert-Beer の法則に従って、その光強度が I に減衰することが知られている。

$$\log(I/I_0) = -\epsilon c L \quad (1)$$

ここで、 I/I_0 は透過率、 ϵ はモル吸光係数である。すなわち、測定部長さが一定であるとき、透過率を測定

すればモル濃度 c を求めることができる。ただし、モル吸光係数 ϵ は雰囲気圧力および温度の関数となる。

HITRAN データベースでメタンの吸収帯を調べた結果を図 1 に示す。吸収帯は大きく分けて 1.6, 2.3, 3.4, 7.6 μm 帯の 4 帯域があるが、このうち最も強い吸収特性を示すのは 3.4 μm 帯である。エンジンシリンダ内で局所的な濃度を測定するためには測定部長さを数 mm 程度に短くする必要がある。できるだけ強い吸収特性を持つ波長帯を選ぶ必要がある。そこで、本研究では 3.392 μm の発振波長を有し、出力が安定しているガスレーザ（He-Ne）を用いた。

図 2 には HITRAN データベースを用いて計算した 3.392 μm 付近における理論混合比のメタン-空気混合気の吸収率 $(1-I/I_0)$ を示す。ここで、測定部長さは 5mm とした。図 2(a) は雰囲気圧力 $P=100\text{kPa}$ 、温度 $T=300\text{K}$ の場合、(b) は $P=2000\text{kPa}$ 、 $T=600\text{K}$ の場合である。(b) の条件は、実用エンジンシリンダ内での点火時期での雰囲気圧力、温度を想定している。図 2(a) より、大気圧、室温では、波長 3.392 μm においてメタンにより吸収され、その波長範囲はあまり広くない。雰囲気圧力が上がると、衝突効果により吸収波長範囲は広がっており、モル濃度が増加するため吸光度も大きくなっている。このように雰囲気圧力、温度によりメタンの吸収状態は変化することが分かる。

3. 燃料モル吸光係数の圧力・温度依存性

3.1 定容容器を用いた燃料のモル吸光係数測定 燃料モル吸光係数は、雰囲気圧力および温度によって変化する。燃料としてメタンを用いる場合には、HITRAN データベースを用いて、吸光係数を見積もることが可能である。本研究では、定容容器を用いて測定したメタンのモル吸光係数に対して、HITRAN

Fig.1 Absorption lines of methane calculated with HITRAN database

(a) $P=100\text{kPa}$, $T=300\text{K}$ (b) $P=2000\text{kPa}$, $T=600\text{K}$

Fig.2 Effects of surrounding pressure and temperature on absorbance of methane

データベースと比較することにより計測精度の検証を行った。また、点火栓埋込型光学系を用いてエンジンシリンダ内燃料濃度の計測を行う場合に、モル吸光係数の与え方に関して、検討を行った。

ここでは、定容容器を用いて、圧力および温度をそれぞれ独立に変化させ実験を行った。実験装置の概略を図3に示す。波長 $3.392\mu\text{m}$ の He-Ne レーザから出た赤外光は、チョッパ (約 250Hz) を通過後、凸レンズでビーム径が絞られて容器内を通過する。容器はステンレス製で、薄板羽根の付いた金属製丸棒を入れており、マグネットスターラによって容器内気体を攪拌することができるようにしている。光を通過させるための窓は石英製であり、測定部長さは 64mm とした。赤外レーザ光は、容器を通過後、バンドパスフィルタを通り、受光部である PbSe 光導電素子で検出される。このとき、PbSe 赤外光導電素子は温度コントローラで電子冷却し、 10°C 一定にコントロールしている。容器側面および底面のヒータにより加熱し、容器内

Fig.3 Schematic diagram of the experimental apparatus for determining molar absorption coefficient

温度を熱電対によってモニターした。

まず、容器内を真空にした後、窒素を大気圧まで充填した。ガスタイトシリンジを用いてメタンを容器内に注入した。その後、所定の圧力になるまで窒素で加圧した。羽根付金属製スターラを回転させ、容器内のメタンと窒素を均一に混合させた。雰囲気ガスとして窒素を用いた理由は、雰囲気温度を 600K 程度まで上げた際における燃料の酸化反応を防止するためであり、Ar, O_2 , N_2 など雰囲気ガスを変えた場合でも、モル吸光係数には大きな違いは表れないことを示されている⁽²⁾。

3・2 モル吸光係数の圧力・温度依存性 Lambert-Beer の式(1)により、メタンのモル吸光係数 ϵ を求め、圧力・温度依存性について調べた結果を図4に示す。条件は、雰囲気圧力 $30\sim 2000\text{kPa}$ 、雰囲気温度 $300\sim 600\text{K}$ である。

圧力が上昇するに従い、モル吸光係数の値は減少している。また、雰囲気圧力 $30\sim 100\text{kPa}$ の場合は、温度が上昇するに伴い、 400K でピークの値を示し、それよりも温度が高くなるとモル吸光係数の値は減少している。雰囲気圧力 $500\sim 2000\text{kPa}$ では、温度が高くなるに従い、モル吸光係数が減少していることが分かる。これらの実験の計測精度を検証するために HITRAN データベースより求めた値との比較を行った。図4に HITRAN データベースにより得られた値を破線にて示す。この図より、本実験により得られたメタンのモル吸光係数は精度良く計測できていることが分かる。

このようにメタン-空気混合気におけるモル吸光係数の雰囲気圧力・温度の影響を調べた結果、モル吸光

Fig. 4 Molar absorption coefficient of methane

係数は圧力・温度の影響を強く受け、雰囲気圧力・温度が異なると、値が大幅に変化することが分かる。特に実用機関のシリンダ内圧力・温度はピストンの動きとともに時々刻々と変化しており、特に圧縮上死点付近では急速に圧力・温度が変化する。本計測法でシリンダ内燃料濃度計測を時系列にて行うためには、その雰囲気圧力・温度に対応したモル吸光係数を与えることが重要となる。そのため、得られた実験値より雰囲気圧力・温度を考慮し、燃料にメタンを用いた実用機関においてシリンダ内燃料濃度（空燃比）計測を行った。

4. 実用機関における点火栓近傍燃料濃度の時系列計測

4・1 点火栓埋込型光学系 点火栓埋込型センサ部の概略を図5に示す。点火電極がやや偏心して取り付けられており、先端部を45度カットした一対のサファイアロッドが埋め込まれている。これらのサファイアロッド間の距離を5mmとしている。それぞれに赤外透過型光ファイバが取り付けられている。一方のサファイアロッドを通過した光は、45度カットされた先端部で反射して5mmだけ燃焼室内を通過後、もう一方のサファイアロッドに入射される。また、測定部はスパークギャップから約5mm側方に位置している。

4・2 実験方法 光学系全体の概略を図6に示す。出力8mW、波長3.392 μm を有する赤外He-Neレーザから出た赤外光は、コリメータレンズにより赤外透過型光ファイバに入射され、ファイバ中を伝送され、センサ部内のサファイアロッドへ導かれる。サファイアロッド先端部で反射され90度曲げられた赤外光は、

Fig. 5 Optical sensor in spark plug

Fig. 6 Optical arrangement and experimental apparatus

燃焼室内を通過後、もう一方のサファイアロッドを経由してもう一方の赤外透過型光ファイバへと導かれる。赤外光はバンドパスフィルタを通過後、液体窒素冷却された赤外受光素子（InSb 光起電力素子）へと導かれる。赤外受光素子で光電変換が行われ、この信号を解析することにより、サファイアロッド間の燃料モル濃度（空燃比）測定を行う。コリメータ、赤外He-Neレーザを含む発光部およびバンドパスフィルタ、赤外受光素子を含む受光部は、除振台上に設置されている。

供試機関としては、4サイクル4気筒水冷式吸気管燃料噴射型火花点火機関を用いた。ボアおよびストロークは89および96mm、圧縮比は9.2:1である。絞

り弁はほぼ全閉状態である。今回の実験では、均一予混合気を作成するため吸気ポートよりも約 1m 上流からメタンを吸入した。水温が 80℃になるまで暖機運転をした後、3 番気筒の点火栓を点火栓埋込型センサに取り替え、実験を行った。クランク角 1 度ごとにサンプリングを行い、燃焼室内圧力、吸気管内圧力、上死点信号とともに赤外受光部からのデータをデジタルデータレコーダに取り込んだ。空気流量は層流型気体流量計で求めた。設定した空燃比はメタン流量を別の層流型気体流量計により測定し、気筒平均空気量との比によって求めた。

実験は、モータリング下および火花点火運転下において行った。

4・3 実験結果と考察 まず、モータリングでのエンジンシリンダ内燃料濃度の時系列計測を行った。機関回転速度は、800rpm であり、直流動力計で制御している。吸気管内圧は 49kPa であり、設定した空燃比は 17.5 であった。図 7 に得られた透過率およびシリンダ内圧を示す。実線は 50 サイクルの平均値を示し、点線は標準偏差を表している。

図より、透過率 I/I_0 は圧縮上死点 TDC 付近で減少している。これは、ピストンが圧縮上死点に近づくに従い、密度上昇のためモル濃度 c が上がっていることによる。また、モータリングの場合、シリンダ内にメタン-空気混合気が燃焼されずに残っているため、透過率 I/I_0 は 1 にはならない。この結果より算出したシリンダ内空燃比 A/F を図 8 に示す。この際、空気流量は層流流量計で求めた気筒平均空気量として算出した。空燃比は、クランク角に対してほぼ 17.5 の値を示し、設定した値に一致している。空燃比の平均値および標準偏差の変動は空燃比では 1.0 以下の値である。

このようにモータリングにおいて、本センサならびに定容容器により得られたモル吸光係数を用いることにより、シリンダ内空燃比を計測できることが分かる。

次に火花点火時のシリンダ内燃料濃度の時系列計測を行った。機関回転速度は 1000rpm、吸気管内圧は 33kPa、設定空燃比は 17.5 である。安定な燃焼を行うために、点火時期は圧縮上死点前 28 度に設定している。図 9 にシリンダ内圧力とともに、透過率を示す。圧縮上死点以降の排気行程において、測定部では、燃料がほぼ完全に消費され、燃焼ガスのみが存在するため、透過率 I/I_0 はほとんど 1.0 の値を示している。点火後のモル濃度は標準偏差の値が大きく、これは、初期火炎形成がサイクルごとに異なっていることを示し

Fig.7 Transmissivity and in-cylinder pressure under motoring condition

Fig.8 Air fuel ratio under motoring condition

ている。また、燃料にメタンを用いているため、1 回の実験期間中にサファイアロード部はほとんど汚れていないため、透過率に与える影響はなかった。

図 10 に図 9 より得られた空燃比 A/F を示す。空燃比算出の際には、空気流量は気筒平均値を用いている。また、シリンダ内ガスの平均温度は圧力値から見積もった。図 4 より、点火時期付近における圧力条件

においては、モル吸光係数は温度の影響をほとんど受けていないため、厳密なシリンダ内ガス温度の算出を行っていない。

空燃比をみると、火花点火時においては、設定した値と計測値はほぼ一致している。火花点火時に見られる空燃比の変動は、点火ノイズの影響と考えられる。しかし、クランク角度が圧縮上死点前 60 度よりも前になると、標準偏差の値も大きく、設定空燃比と計測値の間にも差異が生じる。この原因としては次の 2 点が考えられる。1 つは、燃焼状態においては残留ガス

が存在しており、吸入された新気と徐々に混合するため、点火栓近傍で空燃比 A/F が大きくなっていることが考えられる。また、もう 1 つは、シリンダ内圧力・温度が低い状態では密度も低く、そのためにモル濃度が小さくなり、相対的に S/N 比が低下する。機関の振動などの影響もあり、誤差が大きくなることが考えられる。

以上よりこのセンサを用いることにより、点火時期近傍におけるシリンダ内燃料濃度および空燃比を計測でき、センサの適用性を確認することができた。

5. あとがき

3.392 μm 赤外吸収法により点火栓近傍燃料濃度の計測を行い、モル吸光係数の圧力・温度依存性が計測結果に与える影響などの検討を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) メタンのモル吸光係数を圧力・温度条件を変化させ計測することにより、モル吸光係数の値を圧力・温度の関数とした。この値は、HITRAN データベースから求めた値とほぼ一致している。
- (2) 時間的に変化するシリンダ内圧力および温度の条件をモル吸光係数を算出する際に考慮することにより、時系列的な燃料濃度の算出を行うことが可能である。本計測法にモル吸光係数の圧力・温度依存性を考慮することの有用性が確認できた。
- (3) 開発した点火栓埋込型センサを用いることにより、点火栓近傍のメタン・空気混合気の濃度を時系列で測定することができた。計測した空燃比の値は、供給した平均的な混合気濃度とほぼ一致した。

謝 辞

本研究の一部は、平成 12 年度岩谷科学技術研究助成金を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Edwards, B.N., Burch, D.E., J. Opt. Soc. Am., 55-2, pp.174-177, (1965).
- (2) Tsuboi, T., Inomata, K., Tsumoda, Y., Isobe, A., and Nagaya, K., Japanese J., Appl. Phys., 24-1, pp. 8-13, (1985).
- (3) Heffington, W.M., Parks, G.E., Sulzmann, K.G.P., and Penner, S.S., Proc. of the Combustion Institute, 16, pp.997-1011, (1976).

Fig.9 Transmissivity and in-cylinder pressure under firing condition

Fig.10 Air fuel ratio under firing condition

- (4) Chraplyvy, A.R., *Appl. Opt.*, 20, pp.2620-2624, (1981).
- (5) 郡, 長谷, *機論 B 編*, 61-583, pp.961-966, (1995).
- (6) Mongia, R., Tomita, E., Hsu, F., Talbot, L. and Dibble, R., *Proc. of the Combustion Institute*, 26, (1996), pp.2749-2755.
- (7) Lee, J.G., Kim, K., and Santavica, D.A., *Proc. of the Combustion Institute*, 28, pp.415-421, (2000).
- (8) 吉山, 浜本, 富田, 南, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 62 巻 595 号, (1996), pp.368~373
- (9) Hall, M.J. and Koenig, M., *Proc. of the Combustion institute*, 26, (1996), pp.2613-2618.
- (10) Koenig, M. and Hall, M.J., *SAE Paper*, (1997), No.971644.
- (11) 河村, 鈴置, 斎藤, 友田, 神田, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 64 巻 627 号, (1998), pp.389~394
- (12) 角井, 伊東, 角方, 松浦, 菊池, *自動車技術会講演会前刷集*, (1998), No.982, 982130
- (13) 角方, 伊東, 角井, *日本機械学会熱工学講演会講演論文集*, (1999), pp.177~178
- (14) Rothman, L. S., Rinsland, C. P., Goldman, A., Massie, S. T., Edwards, D. P., Flaud, J.-M., Perrin, A., Carny-Peyret, C., Dana, V., Mandin, J.-Y., Schroeder, J., McCann, A., Gamache, R. R., Watson, R. B., Yoshino, K., Chance, K. V., Jucks, K.W., Brown, L. R., Nemtchinov, V., and Varanasi, P., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 60, 5, (1998), pp.665-710.