

Feature Article

特集論文

点火プラグ実装型燃料・残留ガス濃度計測センサシステムの開発

河原 伸幸

本研究では、自動車用ガソリン機関の点火プラグ近傍の燃料濃度及び残留CO₂濃度をエンジンに特別な改造を加えずに計測できる、点火プラグ実装型光学センサシステムを開発した。このセンサシステムをロータリーエンジン、高過給ディーゼルエンジンなどの実用機関に適用し、点火プラグ近傍の燃料・空気の混合気形成過程、点火時期での燃料濃度と初期燃焼期間などを明らかにした。本手法では、エンジンを改造することなく、燃焼に大きく影響するプラグ近傍の燃料濃度・CO₂濃度を計測できる。エンジンの熱効率を飛躍的に向上させるための研究開発への応用が期待できる。

はじめに

近年、地球温暖化と環境汚染防止の観点から、自動車用エンジンの熱効率及び排気性能の向上は急務となっている。火花点火エンジンの燃費向上、排気浄化を図るために、希薄燃焼式機関や筒内直接噴射式機関が開発され、熱効率が飛躍的に向上できると期待されている^[1]。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プラグ近傍に存在することが重要である。安定して運転するためには、特に各サイクルごとの点火プラグ近傍の混合気濃度を把握する必要がある。ただ、シリンダ内には前のサイクルの残留ガス(CO₂及びH₂O)が存在し、点火時期での点火プラグ近傍燃料濃度に影響を与えている。そこで、本研究では、エンジンを改造することなく、点火プラグ近傍における燃料濃度/残留ガス(CO₂)濃度を赤外吸収法を用いて、時系列で同時に定量測定することができるセンサシステムの開発を行っている^[2-8]。

開発したシステムでは、ガソリンエンジンのシリンダに挿入される点火プラグに赤外吸収法を利用したセンサを組み込み、点火プラグ近傍の炭化水素系燃料濃度及びCO₂濃度を計測する。燃料濃度計測には波長3.392 μmの赤外He-Neレーザ、CO₂濃度計測には波長4.3 μm付近に発

光ピークを持つ赤外ランプを用い、点火プラグに埋め込んだ光学系まで光ファイバでこれらの赤外光を導いた。このシステムは、点火プラグ近傍の局所的な濃度を測定することに重点をおいており、点火プラグに組み込んだ光学系は短光路であるが、ミラーによるダブルパス方式により精度を確保した。シリンダ内の温度・圧力による影響への対応としては、赤外吸収の温度・圧力依存性を調査し、計測精度を向上させた。現在までに、モータサイクルエンジン^[6,8]、ロータリーエンジン^[7]などに本システムを適用し、点火プラグ近傍の燃料・空気の混合気形成過程、点火時期での空燃比と初期燃焼期間の関係、及び燃焼のサイクルごとの変動の要因などについての知見を得た。また、エタノール混合ガソリンにおいても濃度計測が可能で、その蒸発特性が混合気形成過程に与える影響の調査を実施している^[9]。

ここでは、まず計測原理並びに計測システムに関して説明を行う。その際、点火プラグセンサ開発において苦心した点などをまとめる。また、実機エンジンでの計測結果を示し、点火プラグ近傍での空燃比と初期燃焼期間との関係、並びに残留ガス濃度計測結果を紹介する。

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時、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。

$$\log(I/I_0) = -\epsilon cL \quad \dots\dots\dots (1)$$

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時、透過率を測定すればモル濃度 c を求めることができる。但し、モル吸光係数 ϵ は雰囲気圧力及び温度の関数となる。

HITRANデータベース^[10]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り、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5 mmとした。図2(a)は雰囲気圧力 $P=100$ kPa, 温度 $T=300$ Kの場合、図2(b)は $P=2000$ kPa, $T=600$ Kの場合である。図2(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収率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わかる。

残留ガスを計測対象とする場合は、 CO_2 の赤外吸収線に着目した。図3にHITRANデータベースより得られた2~5 μm の CO_2 の吸収線強度(300 K)を示す。大きく分けて2.0, 2.7, 4.3 μm と3つの吸収帯がある。この中で最も吸収

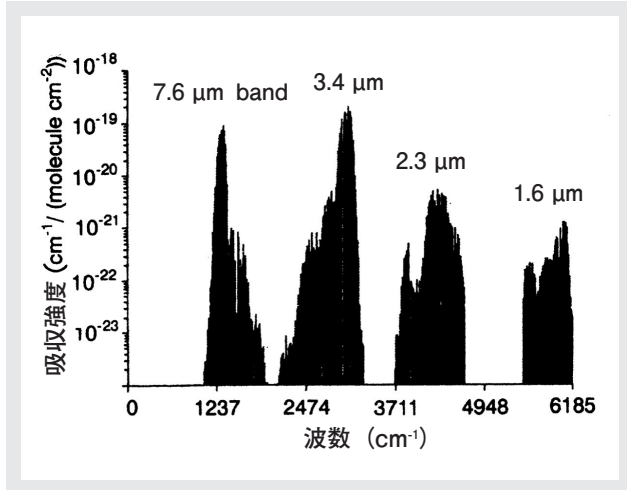


図1 HITRANデータベースによるメタン吸収線

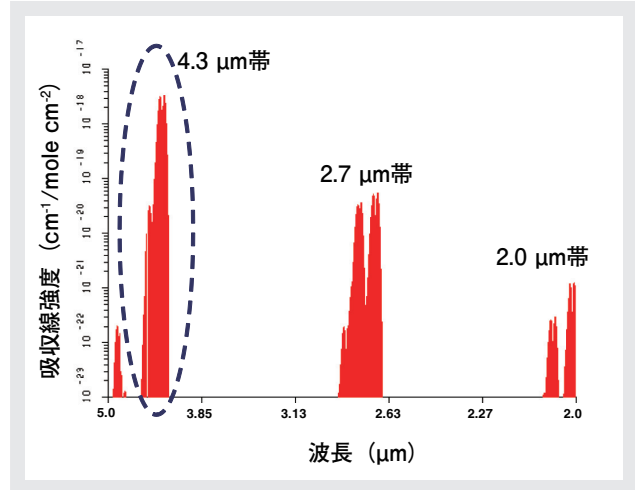


図3 CO_2 の吸収線(2-5 μm , 300 K)

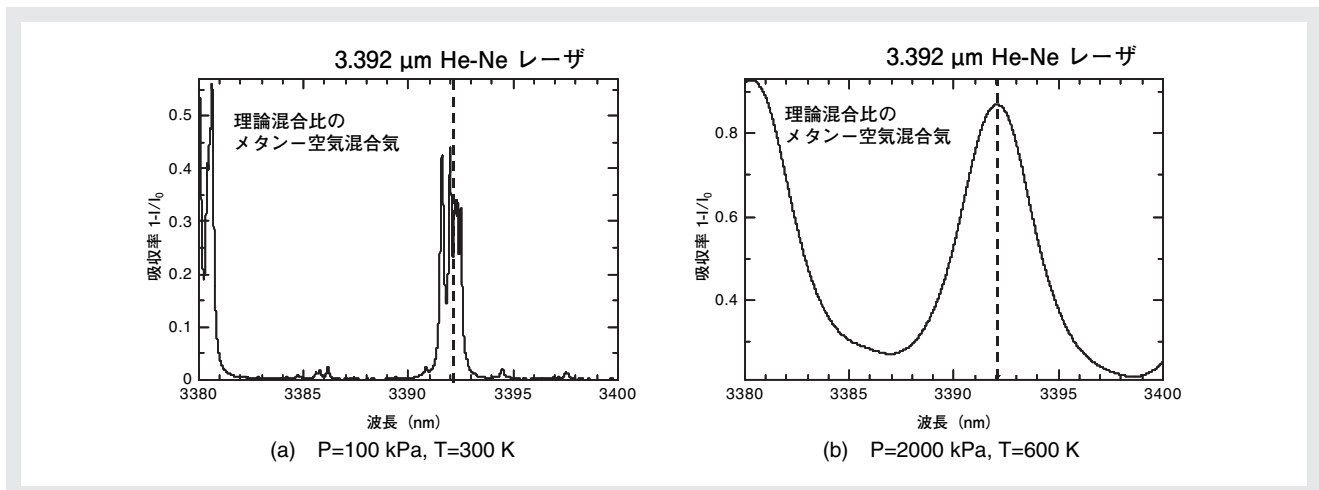


図2 雰囲気温度・圧力のメタン吸収線に与える影響

線強度が大きいのは4.3 μm 帯である。燃焼ガスの主成分は CO_2 と H_2O であるため、 H_2O の吸収帯を考慮する必要がある。4.3 μm 帯では H_2O の吸収線強度は CO_2 に比べ、無視できるが、2.7 μm 帯及び2.0 μm 帯では CO_2 に比べ、 H_2O の吸収線強度が強いため、 CO_2 濃度のみの計測には不適である。本研究では、4.3 μm 帯を用いた赤外吸収法により、 CO_2 濃度を計測する。

点火プラグ近傍燃料/ CO_2 濃度計測システム

点火プラグセンサ

本実験で用いたセンサプラグの概略を図4に示す。本センサプラグは、自動車用ガソリンエンジンの点火プラグに光学系を埋め込んだ形状になっており、燃料濃度測定を行うと同時にエンジンを通常運転することが可能である。光学系は送光用、受光用の2本の光ファイバ、光ファイバを燃焼ガスより保護すると同時にレーザー光受光効率を高めるために最適設計したサファイアレンズ、及びレーザー光反射用の金属ミラーにより構成されている。波長3.392 μm のHe-Neレーザーにより出射した光は、送光用のファイバにより測定部へと導かれ、金属ミラーで反射した光は、もう一方の受光用ファイバにより受光器の方へと導かれ、バンドパスフィルタを介して受光器にて受光する仕組みとなっている。サファイアレンズ-金属ミラー間をレーザー光が往復する際、測定領域に燃料が存在すれば、式(1)に従い透過率が減衰する。

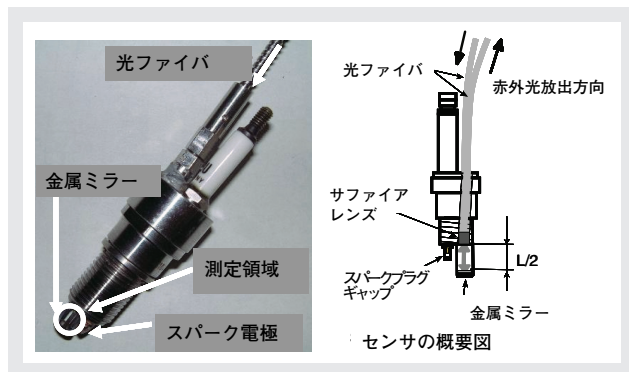


図4 点火プラグセンサの概要

点火プラグセンサを開発する際に、苦心した点としては、①光ファイバの選定、②計測精度の向上、③耐久性の評価などが挙げられる。

①光ファイバの選定に関しては、波長3~5 μm 帯に使用可能なファイバの種類が少なく、熱に弱いものが多いため選定が困難であった。購入できるすべてのファイバを入手し、それぞれのファイバの特性を把握することで、最適なファイバを選定することができた。

②計測精度向上に関しては、測定部長さの最適化が挙げられる。図5に測定部長さと透過率の関係を示す。条件は、点火時期付近の圧力が400 kPa、温度が600 Kと仮定し、燃料にメタン、イソオクタン及びハイオクガソリンの均一混合気(理論混合比)を用いた時のものである。一般に測定部長さが長くなるにつれ、測定領域に存在する燃料の量が増加し、吸収が大きくなるため透過率が小さくなる。本実験では測定部長さ $L=10.0$ mmに設定した。

最後に、③耐久性に関しては、測定部先端の金属ミラーは燃焼室内に挿入されているため、耐熱性、耐酸化性を考慮する必要があった。当初はステンレスで製作していたが、長時間の計測が困難であったため、航空機エンジン等に使用される特殊素材であるニッケル系金属を用いることで、高負荷条件下においても数時間以上の連続計測が可能となった。

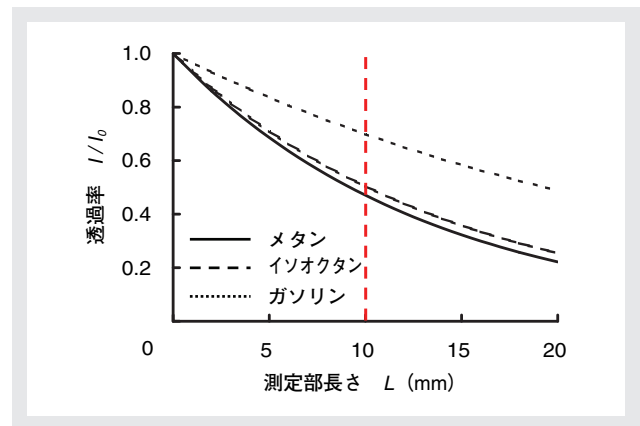


図5 測定部長さと透過率の関係

実験装置と方法

今回紹介する実験結果に使用したエンジンは、ボア×ストロークが70×58 mm、排気量223 cc、圧縮比9.5の空冷4サイクルSOHC単気筒2バルブの自動二輪車用のものである。図6では実験装置の概要とエンジンの写真を合わせて示している。この際は、計測システムとしては、燃料濃度計測システムのを記述している。吸気管のスロットルバルブ直後に噴射弁を取り付け、ガソリンをポー

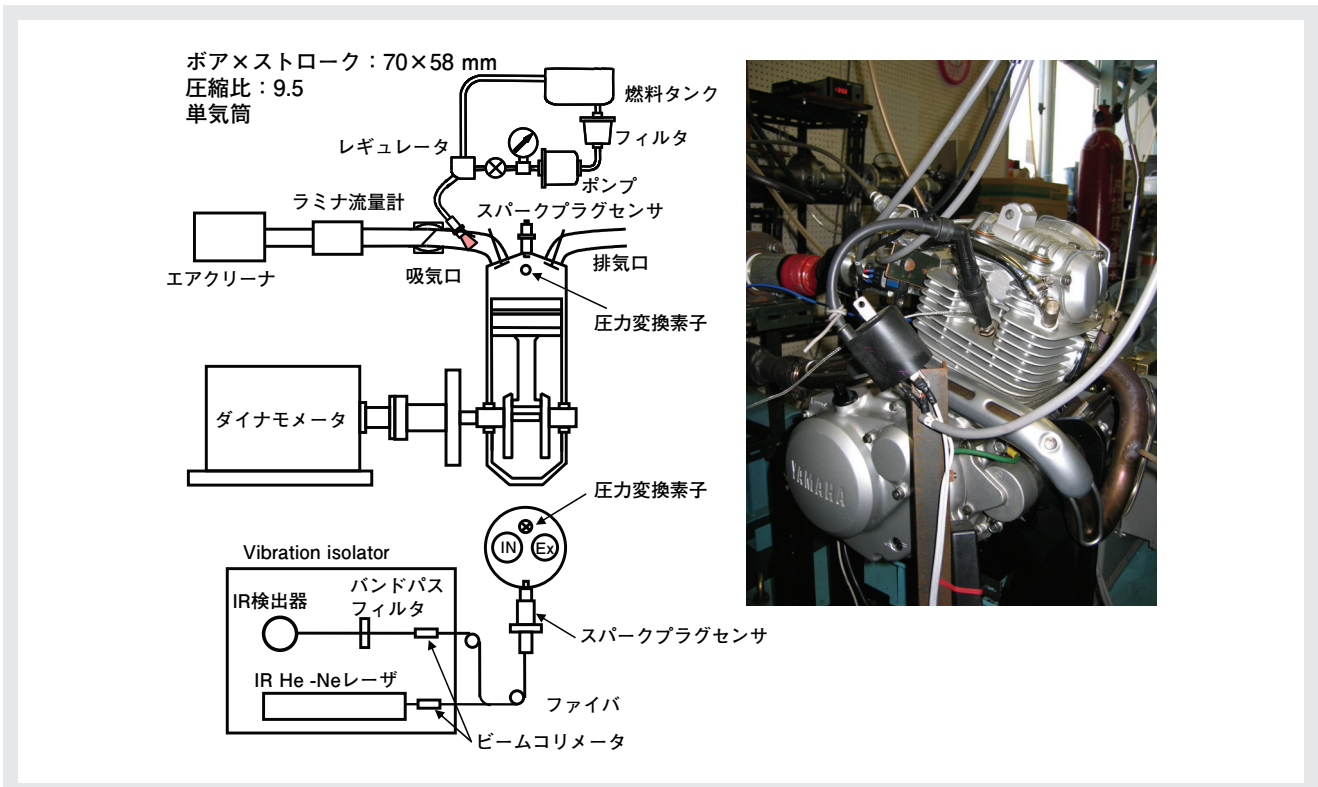


図6 実験装置の概要

ト噴射している。シリンダには圧力変換素子を取り付けている。

実験結果

点火プラグ近傍燃料濃度計測

燃料にハイオクガソリンを用いた場合のシリンダ内圧力、透過率及び点火プラグセンサにより得られた点火時期直前の空燃比を示す(図7)。設定空燃比は16.0であり、エンジン回転数は2000 rpm, 吸気管圧力-23kPaである。それぞれ実線は100サイクルの平均値を表し、点線は標準偏差の範囲を示している。

吸気行程中においては、シリンダ内に流入した燃料が点火プラグ近傍を通過するためにクランク角度-60度付近で透過率が減少する。圧縮行程後半にシリンダ内圧力上昇に伴い、透過率は減衰していく。点火後は火炎が測定部を通過して未燃ガスがなくなるために透過率が急激に増加する。クランク角度-60度ATDCより-20度ATDCまで透過率及び層流流量計により求めた点火プラグ近傍空燃比を同時に示している。ここで、点線は設定した空燃比(16.0)を示している(図7(b))。点火時期でみると計

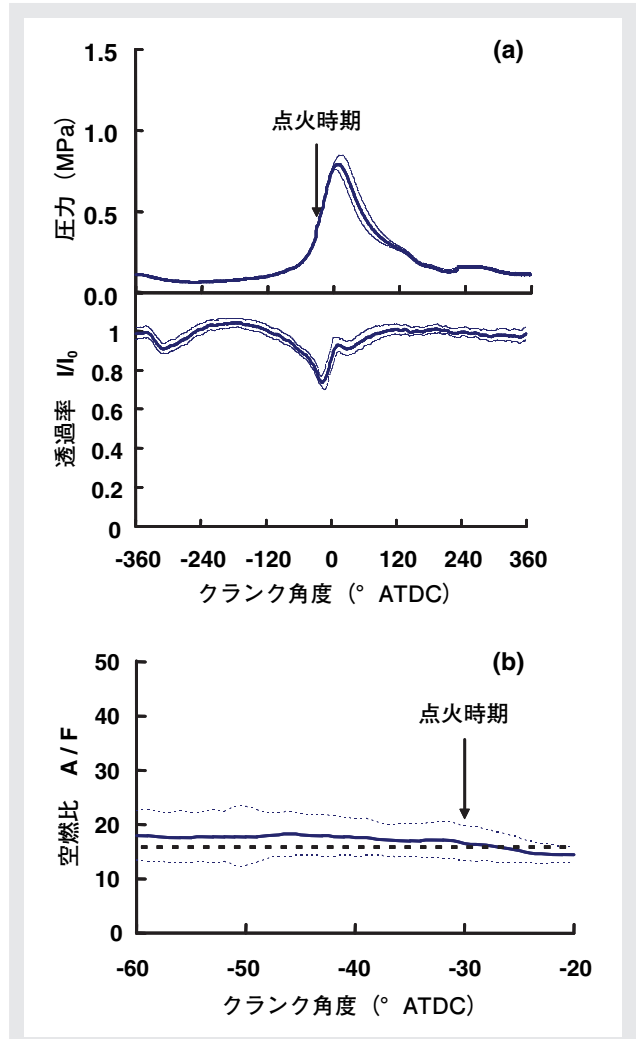
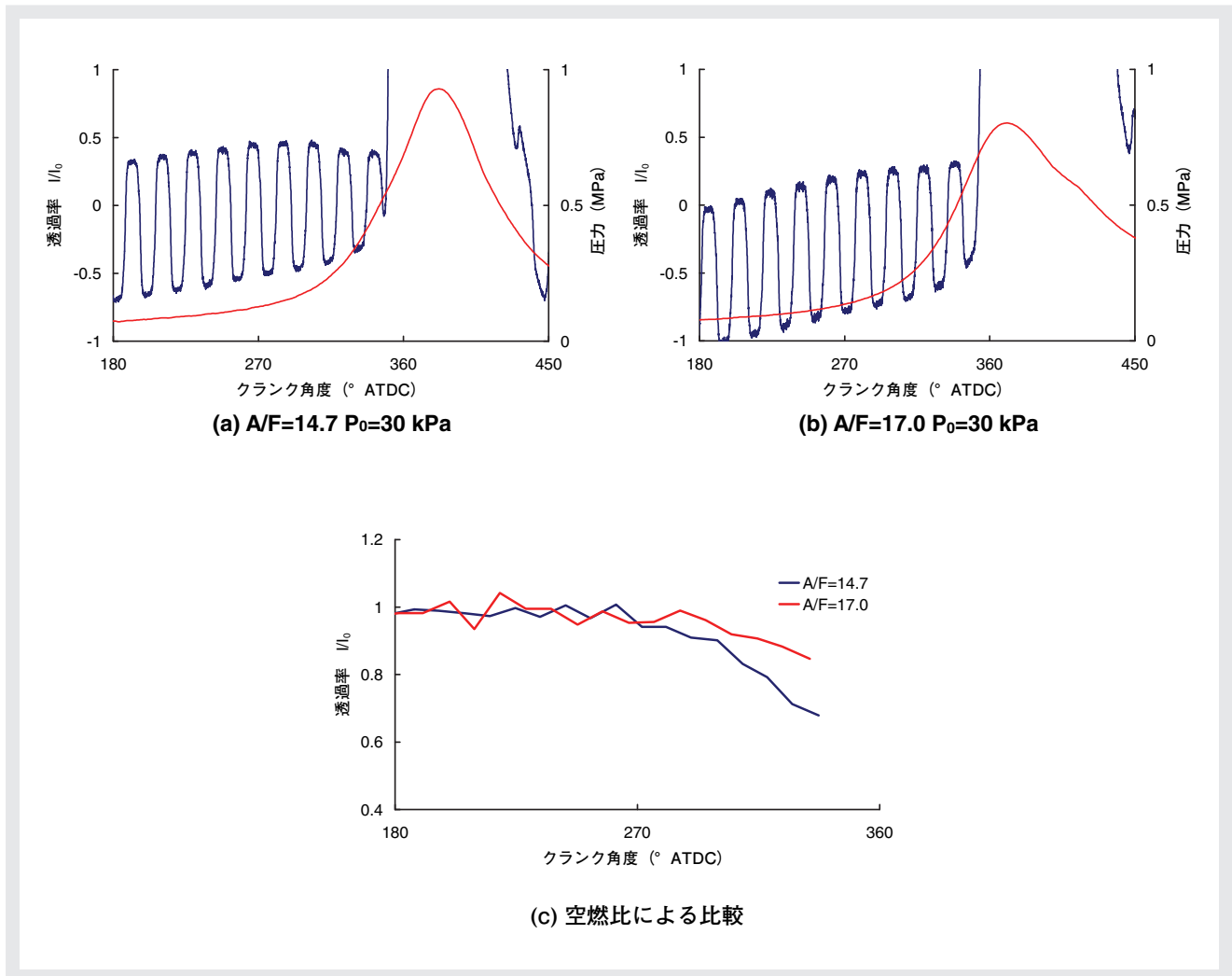


図7 点火プラグ近傍燃料濃度(空燃比)計測結果

図8 点火プラグ近傍CO₂濃度計測結果

測結果と設定値は比較的よく一致している。標準偏差でみると若干ばらつきがあるが、これは空気流量として層流流量計を用いて計測したサイクル平均での値を用いているためである。空燃比を精度良く計測するためには、空気流量の時系列計測が不可欠であるが、これは非常に困難である。このように、ガソリンモル吸光係数の圧力・温度依存性を考慮することで、点火プラグ近傍燃料濃度が計測できることがわかる。

点火プラグ近傍CO₂濃度計測

図8(a)(b)(c)に、機関回転速度1200 rpmで、空燃比を変化させた場合(A/F=14.7, 17.0)の残留ガス(CO₂)濃度計測結果を示す。この際の吸気管圧力P₀は30 kPaである。吸気を絞り、比較的残留ガスの多い状態としてい

る。いずれの空燃比においても、透過率波形のベースラインが1よりも小さくなっている。これは、MCT受光器の特性であり、前サイクルの影響を受けていると思われる。図8(a)(b)における矩形波の山と谷を取った図8(c)では、A/F=14.7の透過率の方が点火時期(-30° BTDC)付近において、A/F=17.0よりも透過率が減少している。これは、理論空燃比付近での燃焼の方が、希薄燃焼よりもCO₂の発生量が多いためだと考えられる。

おわりに

本研究では、自動車用ガソリン機関の点火プラグ近傍の燃料濃度及び残留CO₂濃度をエンジンに特別な改造を加えずに計測できる点火プラグ実装型光学センサシステムを開発した。使用する光ファイバ、レンズ・金属ミラーの

材質、測定部長さ等に関して最適化を行うことで、高負荷条件においても数時間以上連続して計測でき、比較的精度良く測定することが可能となった。このシステムは、エンジンの燃費向上及び排出ガス削減に直接結びつく実用的な技術として、大いに期待できると考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、岡山大学大学院自然科学研究科富田栄二教授に感謝の意を表します。また、この研究テーマに関わっていただいた研究室の卒業生、在校生をはじめとする多くの方々に改めて感謝いたします。

参考文献

- [1] Heywood, J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book, Inc., (1988).
- [2] Nishiyama, A., Kawahara, N., Tomita, E., Fujiwara, M., Ishikawa, N., Kamei, K and Nagashima, K., In-Situ Fuel Concentration Measurement near Spark Plug by 3.392 μm Infrared Absorption Method (Application to a Port Fuel Injected Lean-Burn Engine), SAE Paper No.2004-01-1353, (2004).
- [3] Tomita, E., Kawahara, N., Yoshiyama, S., Kakuho, A., Itoh, T., In-Situ Fuel Concentration Measurement Near Spark Plug In Spark-Ignition Engines by 3.392 μm Infrared Absorption Method, Proceedings of the Combustion Institute, 29, pp.735-741, (2002).
- [4] Tomita, E., Kawahara, N., Shigenaga, M., Nishiyama, A., and Dibble, R. W., In Situ Measurement of Hydrocarbon Fuel Concentration near a Spark Plug in an Engine Cylinder Using the 3.392 μm Infrared Absorption Method (Discussion of Applicability with a Homogeneous Methane Air Mixture), Measurement Science and Technology, 14, (2003), pp. 1350-1356.
- [5] Tomita, E., Kawahara, N., Nishiyama, A., and Shigenaga, M., In Situ Measurement of Hydrocarbon Fuel Concentration near a Spark Plug in an Engine Cylinder Using the 3.392 μm Infrared Absorption Method (Application to an Actual Engine), Measurement Science and Technology, 14, (2003), pp. 1357-1363.
- [6] Kawahara, N., Tomita, E., Nishiyama, A., and Hayashi, K., In-Situ Fuel Concentration Measurement near Spark Plug by 3.392 μm Infrared Absorption Method (Pressure and Temperature Dependence of the Gasoline Molar Absorption Coefficient), SAE Paper No.2006-01-0182, (2006).
- [7] Kawahara, N., Tomita, E., Hayashi, K., Tabata, M., Iwai, K., Kagawa, R., Cycle-Resolved Measurements of the Fuel Concentration near a Spark Plug in a Rotary Engine Using an in situ Laser Absorption Method, Proc. Combust. Inst., 31, 2007, pp.3033-3040.
- [8] Kawahara, N., Tomita, E., Tanaka, Y., Residual Gas Fraction Measurement inside Engine Cylinder Using Infrared Absorption Method with Spark-plug Sensor, SAE paper, (2007), No.2007-01-1849.
- [9] 河原, 富田, 門脇, エタノール混合ガソリンを燃料とした火花点火機関における混合気形成過程, 自動車技術会秋季大会講演論文集, No.20085826, 2008.
- [10] Rothman, L. S., Rinsland, C. P., Goldman, A., Massie, S. T., Edwards, D. P., Flaud, J.-M., Perrin, A., Camy-Peyret, C., Dana, V., Mandin, J.-Y., Schroeder, J., Mccann, A., Gamache, R. R., Wattson, R. B., Yoshino, K., Chance, K. V., Jucks, K. W., Brown, L. R., Nemtchinov, V., Varanasi, P., "The HITRAN Molecular Spectroscopic Database and HAWKS", J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, (1998), Vol. 60, No.5, pp.665-710.



河原 伸幸

Nobuyuki Kawahara

岡山大学大学院
准教授