マイクロカセグレンセンサを用いたF1エンジンの燃焼診断

Combustion Diagnosis of Formula One Engine Using Micro-Cassegrain Sensor

花田尚喜* Naoki HANADA
平出篤志* Atsushi HIRAIDE
山田耕平* Kohei YAMADA
池田裕二** Yuji IKEDA
西山淳** Atsushi NISHIYAMA

要旨

マイクロカセグレンシステムを用いて，F1エンジンのスロットル全開加速や減速運転時の燃焼診断を実施した．

各シリンダ内の燃料混合状態(A/F)を計測し，不整燃焼によるトルクの落ち込みを抑制する制御開発の一助とした．

加減速を繰り返すトランジェント状態は，点火プラグ近傍の混合気がオーバリッチもしくは，オーバリーンとなり不整燃焼へとつながる．また，各シリンダ内の混合気形態が異なる．

各シリンダへの燃料配分を高精度で制御する必要があるが，このためには，高応答な空燃比センサ(LAF センサ)の開発が必要である．

ABSTRACT

Combustion diagnosis of a Formula One engine during wide open throttle (WOT) acceleration and deceleration operations was performed using a micro-Cassegrain system.

The air/fuel mixture (A/F) in each cylinder was measured, which helped in the development of controls to minimize the torque loss due to unstable combustion.

In transient conditions where acceleration and deceleration are performed repeatedly, the air/fuel mixture around the spark plugs becomes too rich or too lean, and results in unstable combustion. In addition, the air/fuel mixture formation is different inside each cylinder.

The fuel distribution to each cylinder needed to be controlled to a high degree of accuracy, and to do this, a highly responsive air/fuel ratio sensor (LAF sensor) is required.

1．まえがき

エンジン出力を向上させるには，混合気をいかに効率よく燃やすかが重要である．シリンダ内の燃料混合気形成，確実な着火，乱流による燃焼促進，掃気と一連の燃焼過程があるが，確実な着火による初期火炎の安定化は不整燃焼を抑制し，熱効率の向上へ繋がる．

シリンダ全体の混合気形態や火炎伝播の解析も必要であるが，ドライバから指摘があったエンジン不調の事象解析を優先し，着火性に直接影響を与える点火プラグ近傍のA/Fを，マイクロカセグレンセンサを用いて計測した．

F1エンジンの場合，スロットルはほとんど全開と全閉操作であり，急激な吸入空気量の変化に応じた燃料制御が必要で，燃料補正が合っていないと不整燃焼となり，ドライバビリティを低下させる．

火炎は混合気が薄すぎても濃すぎても早く伝播できない．ドライバビリティを向上させるには，サイクルごとに適正A/Fとなるように燃料をシリンダ内に供給する必要がある．Fig. 1 に示すように図示平均有効圧(IMEP: indicated mean effective pressure)が立ち上がる際に，失火をともなうサイクルが発生する場合がある．これは，点火プラグ近傍に適正なA/Fが形成されず，不整燃焼が起こるためである．このサイクルが起こる要因解析と回避が重要である．

燃焼診断手法は，吸気圧力，筒内圧力，排気圧力，LAFセンサによるシリンダ間のA/F割合，排ガス特性，の計測がある．また，気筒間燃焼変動計測では，圧力[(1), (2)]，イオン

＊　四輪R&Dセンター
＊＊イマジニアリング(株)

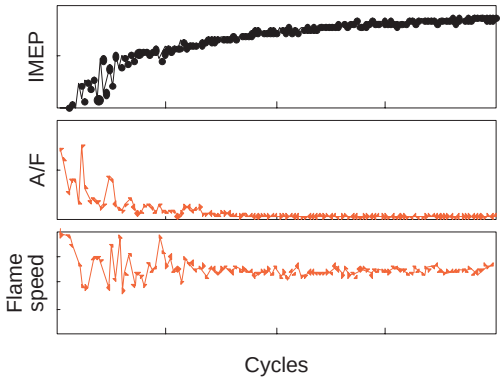

Fig. 1　Combustion characteristics under acceleration

プローブ[3]，IR 吸収法[4], [5]，自発光の計測法[6], [7]等の報告がある．

新たな燃焼診断として，マイクロカセグレンセンサを用いた点火プラグ近傍 A/F の直接計測と，その時系列変化および気筒間燃焼変動計測をおこなった．この手法は 20000 rpm までの時系列解析が可能である．

本稿では，F1エンジンの過渡運転時の不整燃焼解析結果について報告する．

2．計測装置

エンジンは，V8 排気量 2400 cm³ の 2008 年レース用エンジンを用いた．Fig. 2 にエンジンの外観を示す．

点火プラグ近傍の A/F 計測には，マイクロカセグレンシステム（イマジニアリング社製）を用いた．

火炎がある点（0.1 x 0.1mm程度）を通過した際に，その火炎自発光の中で，OH，CH，CN，C_2の四つのラジカルの発光バンドの光をバンドパスフィルタと光電子増倍管を用いて計測する．

これらのラジカル発光強度比は，火炎面での当量比と一義的な相関がある[8]-[16]．これにより火炎伝播速度と火炎面での A/F が推定計測できる．

計測システムは，局所の自発光を計測する光ファイバのセンサ部と自発光強度比を高時間分解能で処理するハードウエア，制御ソフト，およびモニタで構成されている．

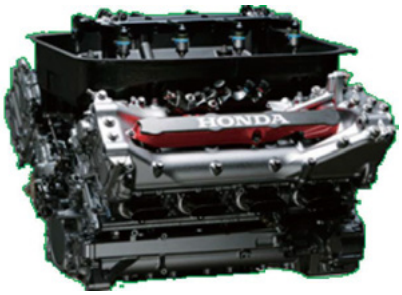

Fig. 2　Honda Formula one engine

センサは，カセグレン方式の光学素子を M10 の点火プラグに内蔵したタイプとした．点火位置からの焦点距離は 3 mm である．

点火プラグにセンサを挿入したことによる燃焼への影響を確認した．燃焼変動を圧力センサによって評価した結果を Fig. 3 に示す．#1 － #4 気筒へ通常の点火プラグを装着，#5 － #8 気筒にマイクロカセグレンセンサ内蔵点火プラグを装着し，エンジン回転 16500 rpm，スロットル全開で 500 サイクルの燃焼圧力を計測した．

空気過剰率（設定ラムダ）は，0.95 とした．

燃焼圧は気筒間ばらつきで 16.7%であり，マイクロカセグレンセンサ内蔵は，燃焼変動へ大きく影響しないことがわかった．

また，回転数，負荷，ラムダ値による悪影響や初期放電からのプラズマがカセグレンセンサで検出されないことも確認できた．

カセグレンセンサの先端にはサファイアガラスを装着し，耐熱と耐圧の対策を施した．

Fig. 4 に，#5 － #8 シリンダにマイクロカセグレンセンサを取付けた全容を，Fig. 5に，プラグホール内の点火プラグに光ファイバを取り付けた状態を示す．

Fig. 6 に装置構成を示す．各シリンダの，カセグレンセンサ出力値，筒内圧力，吸気管圧，排気管圧，LAF センサ

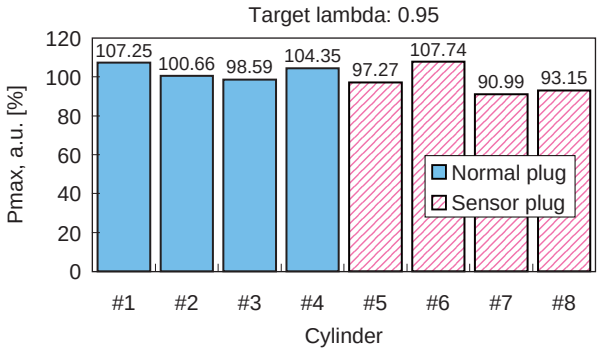

Fig. 3　Comparison of maximum cylinder pressure (Pmax) using normal plug and sensor plug

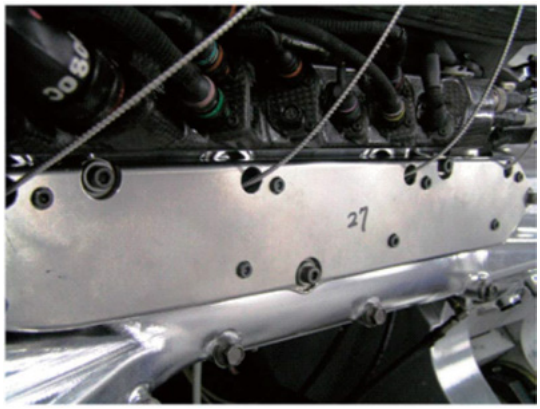

Fig. 4　Photograph of overview of cylinders to which micro-Cassegrain sensors were attached

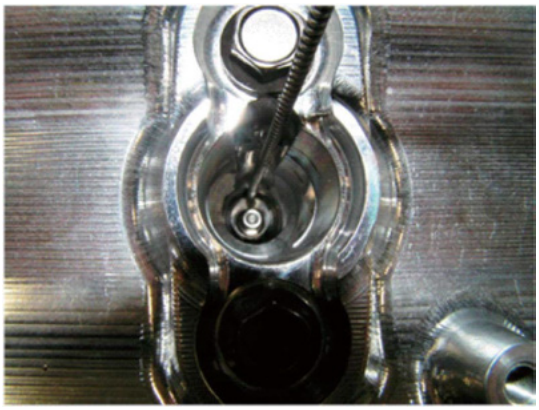

Fig. 5　Photograph of plug hole in which plug with sensor was attached

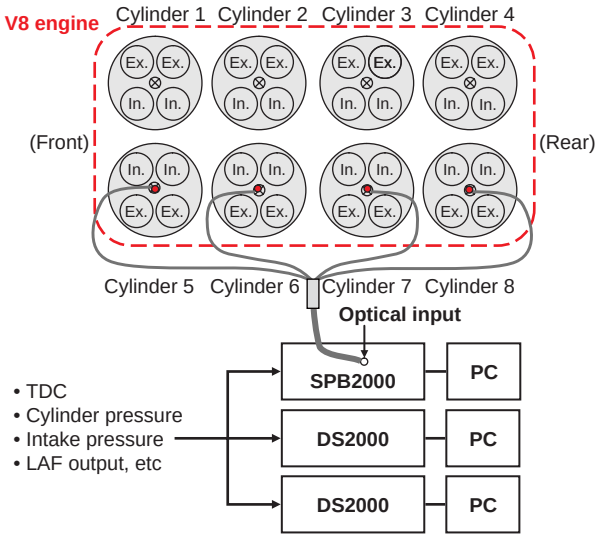

Fig. 6　Schematic diagram of measurement system

出力値，およびクランク角度信号を同期させ取り込んだ．データ処理装置は，SPB2000(イマジニアリング社製)とDS2000(小野測器社製)を用いた．SPB2000は，各ラジカル発光用にバンドパスフィルタと干渉フィルタが設けられ，光電子増倍管により，各シリンダからの光信号が電気信号に変換される．

アンプ，フィルタ，AD 変換(14 ビット)でハードウエアが構成され，データを同時に取り込むことができ，エンジン回転 18000 rpm においてクランク角度 1 ° の分解能による計測が可能である． 各シリンダの発光データと圧力データは，モニタで確認できる．

3．結果および考察

車速によってラム圧が変化し，エアボックス内の空気の流れが変わり，各シリンダへの空気吸入量も変わる．また，エアボックスの形状によっても空気流入量は変化する．特に過渡状態では，不整燃焼が誘発される場合がある．このような状況下における F1 V8 エンジンの燃焼解析をおこなった．解析は，点火プラグ近傍のラムダ(Lambda)，火炎伝播速度(FPS)，反応帯厚さ，IMEP，P max，吸気圧，排気圧を求め，燃焼差異および時系列の燃焼変動を比較した．

3.1. エンジン回転 18000 rpm，スロットル全開負荷，定常運転での燃焼特性

Fig. 7 に，車速変化とエアボックス仕様の違いによる比較結果を示す．横軸はラムダで，縦軸は平均値と変動幅である．#5 シリンダと #6 シリンダの燃焼差異および時系列の燃焼変動を比較した．

車速が速くなると，ラム圧によって IMEP が高くなる．設定ラムダが 0.9 付近で最大圧力となっている．

しかし，P max，IMEPともシリンダ間でその値は異なっている．また，燃焼圧変動幅もラムダ値によって異なっている．

標準エアボックスで 120 km/h，300 km/h では，平均 A/F とプラグ近傍 A/F はほぼ同じであり，望ましい結果といえる．

車速 300 km/h でエアボックス入口形状を変更し計測した．#5 シリンダのプラグ近傍 A/F が設定値から約 0.5 リッチ側へ変化している．入口形状が空気の流れに影響を及ぼし，その結果燃焼室内の A/F 分布に影響を及ぼしていると考えられる．

火炎の伝播速度(FPS)は，ラムダが 0.8 から 0.95 の範囲では，顕著な差異はみられなかった．これは他の F1 エンジンの燃焼解析でも同様の傾向が報告されている[7]．

他方，火炎伝播速度の変動はラムダに関わらず大きい．

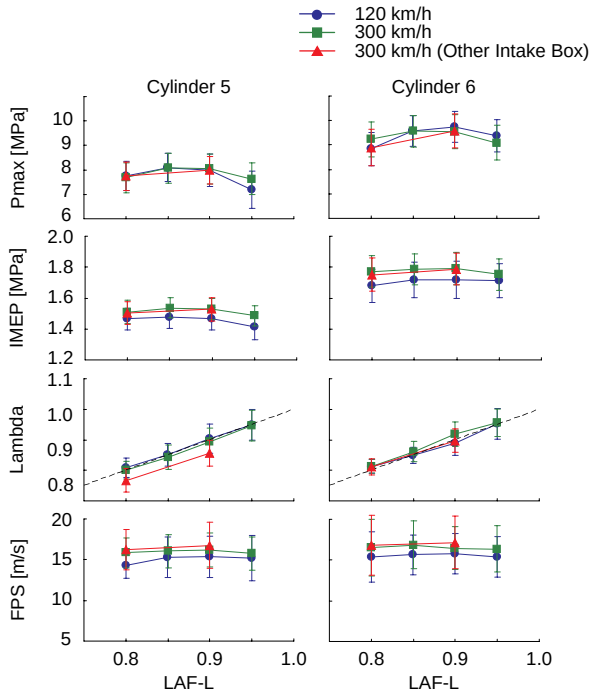

Fig. 7　Combustion characteristics at 18500 rpm and WOT

3.2. エンジン回転 14000 rpm，パーシャル負荷，定常運転での燃焼特性

スロットル開度 30%，エンジン回転 14000 rpm，定常運転下での，#5 シリンダと #6 シリンダの燃焼特性を Fig. 8 に示す．ラムダの値が設定値に対してシフトしていること，火炎伝播の値とその変動値が大きく変わっていることが示されている．

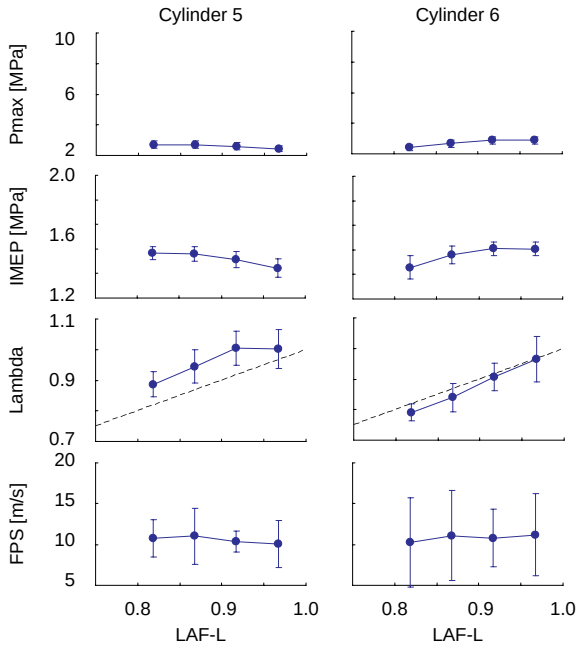

Fig. 8　Combustion characteristics at 14000 rpm and 30 % throttle opening

#5シリンダは，すべての条件でプラグ近傍ラムダがリーンとなっており，パーシャル時では，プラグ近傍のA/F分布に偏りが生じていることが示された．#6 シリンダでは，ラムダの値が，#5シリンダよりも設定値に近くなっている．しかし，火炎伝播速度の変動は #5 シリンダよりも大きくなっており，混合気の形成が均等になっているにもかかわらず燃焼の不安定性が顕著になっていることがわかる．

このように，隣り合うシリンダであっても設定ラムダとプラグ近傍のラムダが大きく異なっており，その時間変動値も大きく異なることがある．圧力とLAFセンサで気筒全体のマクロな状態は把握できるが，プラグ近傍の細部の状態を把握することはできず，これらの計測値に基づく最適化には限界があることの証明でもある．

3.3. トランジェント運転状態での燃焼特性

過渡運転時に生じる失火とトルクの落ち込みを確認し，その原因を解明するため，トランジェント運転下での燃焼解析をおこなった．ラムダ設定値を 0.8 として，エンジン回転数 9000 rpm から 3000 rpm/sec の割合で加速した状態で計測をおこなった．#5シリンダと#8シリンダのP max，IMEP，ラムダおよび火炎伝播速度を Fig. 9 に示す．ラムダは三種類のデータを示している．(a)がカセグレンセンサによるプラグ近傍ラムダ，(b)が各気筒の排気管に取り付けたLAFセンサ値，(c)が設定ラムダである．横軸はサイクル数で，4500 サイクル目が加速開始の時期である．4530 から 4540 サイクル間で，失火をともなう燃焼変動を観測した．

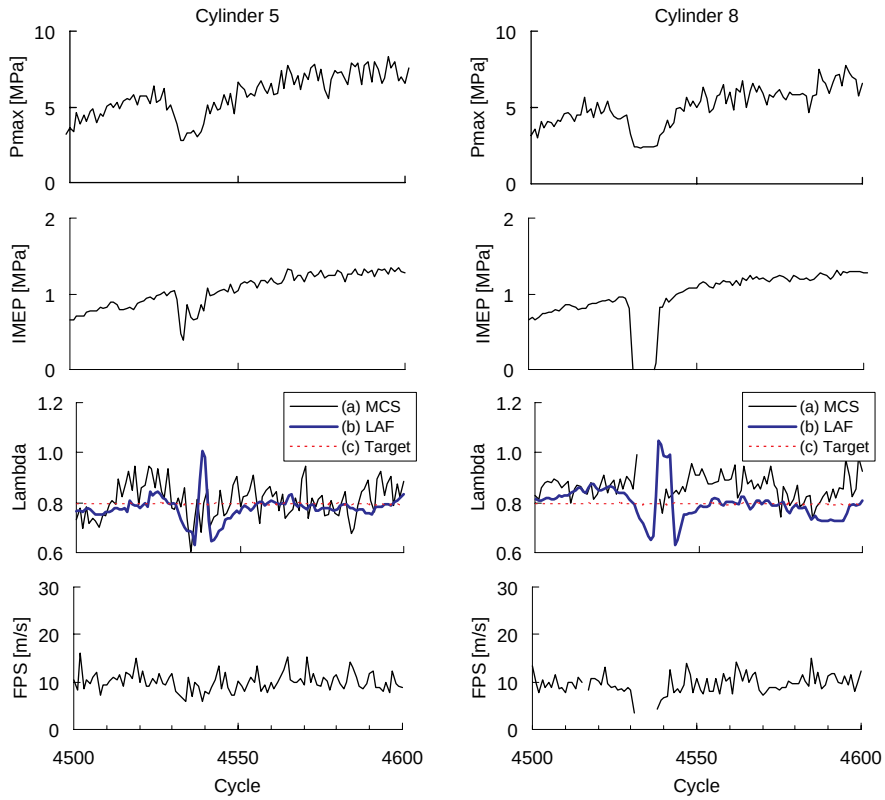

Fig. 9　Cyclic variations of combustion characteristics under transient condition

IMEP も大きく低下している．

#5シリンダにおいては，ラムダ値は下がり失火には至っていないが，プラグ近傍のA/Fがオーバリッチで出力低下を生じている．

一方，#8 シリンダにおいては，はっきりとした失火現象が見られる．#5 シリンダとは逆に，A/Fがオーバリーンで失火している．失火後はすぐに燃焼せず，4サイクル後に燃焼が始まっている．

これは，エアボックス内で生じた剛体渦の影響と考えられる．エアボックス内では，吸入空気の慣性力による循環渦が形成されている．その影響により，シリンダ間でリーンとリッチな状態が形成されていると思われる．この燃料が偏る状況は定常状態でも生じており，それに合わせた燃料噴射量の設定はされているが，トランジェント時には定常運転時に基づく設定では不十分であることが明確となった．レースにおいては，常にトランジェント状態で運転されていることを考えると，この領域でのマッピング補正が必要である．

3.4. 燃料カット復帰サイクルでの燃焼特性

トルク制御を目的に，減速時に燃料をカットし，加速時に燃料噴射を復帰させるような制御がおこなわれている．その際，燃料復帰時に不整燃焼が生じることがある．そこで，燃料復帰状態を台上で模擬し，燃焼状態を計測した．その結果を Fig. 10 に示す．#6 シリンダの燃料カットから復帰までのP max，IMEP，MFB 0 - 10%ラムダと火炎伝播速度のサイクルデータである．ラムダは Fig. 9 同様にプラグ近傍，LAF 計測値および設定値である．

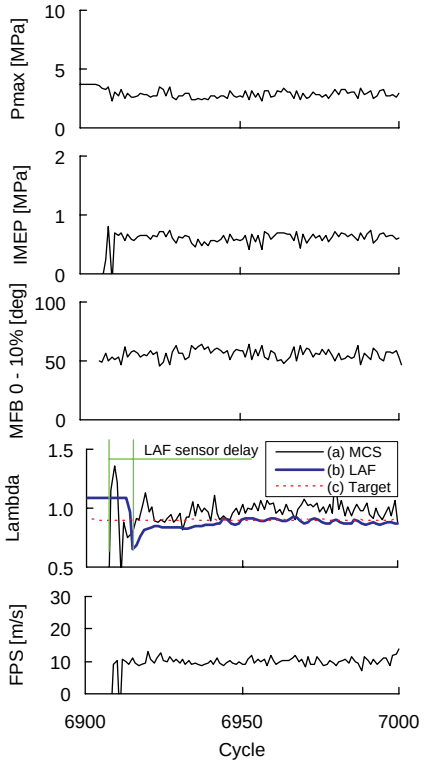

Fig. 10　Cyclic variations of combustion characteristics in fuel cut recovery test

火炎伝播と IMEP およびプラグ近傍のラムダを見ると，燃料カット復帰後1サイクル目では着火しないが，その次のサイクルではリッチで着火，また次のサイクルはリーンに転じている．プラグ近傍のラムダがリッチとリーンを交互に繰り返し，サイクルごとに大きく変動している現象を明確に捉えている．

マイクロカセグレンセンサが，サイクルごとのラムダを計測できており，応答性の高さが証明された．

一方，LAF センサは応答性が低いため，サイクルごとの挙動を計測できず，燃料カット復帰後のラムダ値を 8 サイクル遅れて検知している．

4．まとめ

マイクロカセグレンセンサを用いて，F1エンジンの燃焼診断をおこない，得られた結果を以下にまとめる．

（1）スロットル全開負荷運転，エンジン回転 18500 rpm では，一部の条件を除いて，シリンダ平均ラムダとプラグ近傍ラムダは，ほぼ等しく望ましい状態にある．

（2）上記運転条件では，ラムダによって火炎伝播速度は変わらない．

（3）スロットル全開負荷運転とパーシャル負荷運転では，シリンダ間の A/F 分布の傾向が異なる．
LAF センサを用いてシリンダ平均の A/F を適正な値に設定しても，プラグ近傍では適正値とはならない場合がある．

（4）トランジェント時は定常時と異なる A/F の挙動を示し，トルクの落ち込みや不整燃焼を生じているトランジェント時は，プラグ近傍A/Fがオバーリッチもしくはオーバリーンである．また，同一サイクルでありながらシリンダ間で傾向が異なることが判明した．

（5）トランジェント状態の高精度な燃料制御が今後必要であり，そのためには，高応答な計測機器が必要とされる．マイクロカセグレンセンサはその機能を有し，これを用いることにより今後のエンジン開発が加速できる可能性がある．

参考文献

（1）Neo, G. H., Collings, N.: Pressure Data Analysis of Formula One Racing Engines, SAE Paper, 970061(1997)

（2）Alten, H., Illien, M.: Demands on Formula One Engines and Subsequent Development Strategies, SAE Paper, 2002-01-3359(2002)

（3）Shimasaki, Y., Sakaguchi, J., Maki, H., Suzuki, H., Kondo, N., Yamada, T.: Study on Combustion Monitoring System

for Formula One Engines Using Ionic Current Measurement, JSAE Technical Paper, No. 20055017 (2005)

(4) 池田裕二，西山淳，河原伸幸，冨田栄二，Baritaud, T.: Application of IR Absorption Method to a Racing Engine, 自動車技術会学術講演会前刷集，No.13-07(2007)

(5) Ikeda, Y., Nishiyama, A., Bariatud, T.: Flame Speed Measurement of a Racing Engine by IR Method and Chemiluminescence Method, 14th Lisbon International Symosium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics(2008)

(6) Ikeda, Y., Nishiyama, A., Kim, S. M., Takeuchi, A., Winklhofer, E., Baritaud, T.: Cyclic Variation of Local A/F and Mixture Quality in SI Engine Using Local Chemiluminescence, Proc. of 7th international symposium on internal combustion diagnostics, p. 277-284(2006)

(7) Ikeda Y., Jeong H., Nishiyama A., Baritaud T.: Cylinder to Cylinder A/F Fluctuations Measurement in a Racing Engine by Chemiluminesence, Porc. of 7th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine System, p. 535-540(2008)

(8) Lee, J. G., Kim, K., Santavicca, D. A.: Measurement of Equivalence Ratio Fluctuation and Its. Effect in Heat Release During Unstable Combustion, Proc. of the Combustion Institute, Vol. 28, p. 415-421(2000)

(9) Ohyama, Y., Ohsuga, M., Kuroiwa, H.: Study on Mixture Formation and Ignition Process in Spark Ignition Engine Using Optical Combustion Sensor, SAE Paper, 901712 (1990)

(10) Ikeda, Y., Kaneko, M., Nakajima, T.: Local A/F Measurement by Chemiluminescence OH*, CH* and C2* in SI Engine, SAE 2001 Transactions, Journal of Engines, Section 3, 110 (2001-01-0919)(2001)

(11) Ikeda, Y., Nishihara, H., Nakajima, T.: Measurement of Flame Front Structure and Its Thickness by Planar and Local Chemiluminescence of OH*, CH* and C2*, SAE 2001 Transactions, Journal of Engines, Section 3, 110 (2001-01-0920)(2001)

(12) Ikeda, Y., Kojima, J., Hashimoto, H.: Local Chemiluminescence Spectra Measurements in a High-Pressure Laminar Methane/Air Premixed Flame, Proc. of the Combustion Institute, Vol. 29, p. 1495-1501(2002)

(13) Kojima, J., Ikeda, Y., Nakajima, T.: Multi-point time-series observation of optical emissions for flame-front motion analysis, Measurement Science and Technology, Vol. 14, p. 1714-1724(2003)

(14) Ikeda, Y., Kawahara, N., Tomita, E.: Time-series A/F Analysis in a SI Engine by Micro-Local Chemiluminescence Technique, Proc. of 6th COMODIA 2004, Paper No.C3-3(2004)

(15) Kawahara, N., Tomita, E., Takeuchi, A., Arimoto, S., Ikeda, Y., Nishiyama, A.: Measurement of flame propagation characteristics in an SI engine using micro-local chemiluminescence technique, SAE Paper, 2005-01-0645(2005)

(16) Ikeda, Y., Nishiyama, A., Kawahara, N., Tomita, E., Arimoto, S., Takeuchi, A.: Spark-plug-in sensor for initial flame analysis and its flame structure in an SI engine, SAE Paper, 2005-01-0644(2005)

■著　者■

花田尚喜

平出篤志

山田耕平

池田裕二

西山　淳