

特集 火炎分光分析による簡易燃焼ガス温度計測法の開発*

Development of Simplified Combustion Gas Temperature Measuring Method Using Flame Spectroscopic Analysis

中島 樹志

Tatsushi NAKASHIMA

加藤 毅彦

Takehiko KATO

調 尚孝

Naotaka SHIRABE

斎藤 公孝

Kimataka SAITO

The combustion gas temperature within the internal combustion engine is one of the important information factors for analyzing the combustion process or estimating the engine's performance. We examined whether the Two-color method can be used for measuring the combustion gas temperature within gasoline engines as an easily available approach.

To apply the Two-color method to gasoline engines mainly of pre-mixed combustion, we made it artificially possible to emit luminous flames by mixing in seed particles instead of soot with the flames. In addition, to verify the results of temperature measurement by the improved Two-color method, we attempted to compare the measured temperatures with the reference temperature identifiable from the starting point of light emission from basic metal added to the fuel, as a measuring approach different in principle. As a result of employing combustion flame spectrometry using a high-speed multi-spectrum camera capable of simultaneously taking monochromatic intensity pictures of three different wavelengths in order to perform the improved Two-color method and basic metal light emission analysis, we discovered the improved Two-color method to be capable of performing analysis with a measuring accuracy of ± 80 K and a measuring range of 1000 K to 2400 K.

Key words : Gas temperature, Combustion, Two-color method, Gasoline engine, Direct injection

1. はじめに

火花点火機関における燃焼室内のガス温度は、その機関の性能や排気成分に及ぼす影響が大きい。そのため、火花点火機関の燃焼を解析するのにガス温度を定量的に知ることは非常に有効である。しかし、ガス温度は急速に変化し、サイクル毎に変動し、かつ燃焼室内の場所によって温度が異なることが知られている。従来より多くの研究者によって燃焼室内のガス温度の測定が試みられているが、測定の容易な実用的な方法は少ない。

応答性が優れている点で光学的手法がよく使われているが、火花点火機関に用いられる光学的气体温度計測手法の主なものには、レーザー光を利用したラマン分光法の1種であるCARS法¹⁾、火炎中の発光・吸収を利用した赤外線吸収法^{2),3)}、スペクトルD線反転法⁴⁾等がある。これらすべてに共通していえることは、解析対象の燃焼室を挟んで、撮影系と光源を対向して設置する光学系構成から、筒内観察用エンジンに直線的に1対の窓を取りつけないければならない構造上の制約があるとともに、計測システム全体の光学系が複雑であることから容易に適用しうるものではないことである。また、観察窓のくもりによる計測精度の悪化等、メン

テナンス上の問題もある。

内燃機関に一つの観察窓を設置しただけで、かつ窓にくもりが付いても精度の著しい悪化なく、燃焼ガス温度を簡便に測定しうる手法として、ディーゼル機関では燃焼時に存在する煤の放射強度から温度を測定する二色法⁵⁾⁻⁷⁾が確立されているが、ガソリンを燃料とする火花点火機関では確立されたものがないのが現状である。

本報告では、ガソリンエンジンの燃焼ガス温度計測に簡便に適用可能な手法開発として、二色法のガソリンエンジンへの適用を試みた。

2. 目的

本報告の目的は、二色法のガソリンポート噴射エンジン、及びガソリン筒内直噴エンジンへの適用性を検討すると共に、適用時の計測精度を明らかにすることである。

3. 二色法のガソリン燃焼への適用

3.1 二色法による火炎温度測定の概要

二色法は、物体表面の温度を非接触で測定する方法の中で、簡便ながら精度が良好なため、広く用いられ

* Translated and reprinted with permission from Global Powertrain Congress (GPC) 2003 Proceedings, Vol. No.24, pp.118-125

ている。

輝炎発光，すなわち煤からの固体熱放射の波長特性は，Plankのふく射法則と煤粒子群の単色ふく射率を示すHottelとBroughtonの式によって，以下のように表される。

$$N(\lambda, T) = C_1 / [\lambda^5 \exp\{C_2 / (\lambda \cdot T)\}] \quad (1)$$

$$= \epsilon \cdot C_1 / [\lambda^5 \exp\{C_2 / (\lambda \cdot T)\}] \quad (2)$$

ここで， N ：単色ふく射輝度， C_1 ， C_2 ：プランク定数， λ ：波長， T_a ：輝度温度， T ：真温度， ϵ ：単色放射率， L ：光路長， KL ：煤濃度の相対指標， α ：波長指数である。

これによると， α の値を決定できれば，2波長で発光強度を計測し単色放射能に換算することによって火炎温度（真温度）を求めることができる。これがいわゆる二色法である。

3.2 ガソリン燃焼への適用上の課題

波長指数 α は，煤粒子径や煤の複素屈折率の関数と考えられ，その値は火炎構造や燃料の種類によって異なることが予測される。ディーゼル火炎についての α の測定例として，松井らは直接噴射式機関の高速度撮影用の観察ガラス表面に付着した煤を対象にその透過分光分析を行っている^{8),9)}。すなわち，採取した煤の透過率 I/I_0 を I とし，入射光強度，透過光強度をそれぞれ I_0 ， I とすると，

$$(I/I_0) = \exp(-KL/\lambda^\alpha) \quad (3)$$

なる比例関係が成立し， α が決定できる。燃料には軽油，nドデカンを用いたが，どちらも付着煤層の厚さによらず， α は可視域でほぼ一定値1.38となるとしている。(Fig. 1参照)

一方，ガソリンエンジンでは，主に予混合火炎となるので，通常の燃焼状態では煤粒子は発生しない。そのため，そのままの状態では，可視二色法の適用は不可能である。更に，たとえ成層混合燃焼のように部分的な過濃領域下で煤が生成されたとしても，ガソリン燃焼時の煤の組成は明らかでなく，ディーゼルエンジン同様の値 $\alpha = 1.38$ を用いられる確証はない。

以上を考慮した結果，本研究では簡便に火炎温度の空間的分布を測定するため，何らかの補助手段を用い

て二色法をガソリンエンジンに適用できないか検討した。

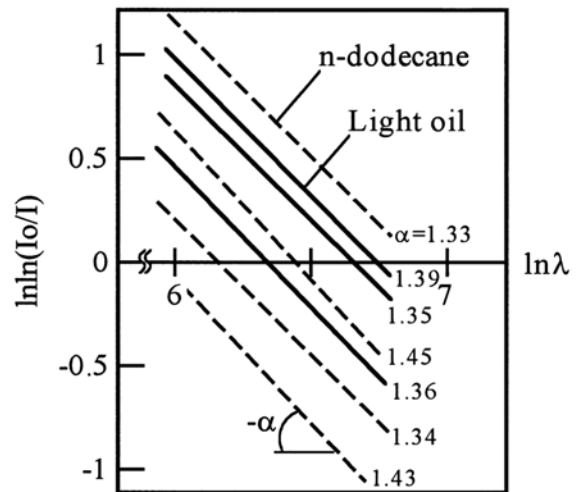


Fig. 1 Transmission spectrometry on soot existing diesel engine

3.3 吸気へのシード粒子混合

予混合燃焼への二色法の適用のため，煤粒子に代わる固体熱放射源として，耐熱性のあるセラミック微粒子を火炎中に混合することを試みた。シード粒子として用いるセラミック粒子の条件として，吸気流への浮遊性，混合性，温度追従性，耐熱性，粒径の均一性等が挙げられる。全般的に共通していえることは，セラミック粒子の粒径への要求である。特に，セラミック粒子とガス温度を等しいとみなせうためには，セラミック粒子とガスが極めて短時間に熱平衡に達することが必要であり，温度に関する応答の早さに影響する微粒化度合いが重要である。

ディーゼル機関に於ける解析として，神本らが可視域の波長指数 α の値に関して厳密な議論を行っている¹⁰⁾。すなわち，球形煤粒子の吸収係数 Q_{abs} をMieの理論解から導き，煤粒子群の透過率 (I/I_0) の波長・粒径依存性を求めている。

$$(I/I_0) = \exp(-Q_{ext} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot NL/4) \quad (4)$$

$$Q_{ext} = Q_{abs}$$

$$= D/\lambda \cdot F_1(n, k) + (D/\lambda)^3 \cdot F_2(n, k) + \dots \quad (5)$$

ここで， Q_{ext} ：煤粒子の減衰係数， D ：粒径， N ：数密度， $n(1-ik)$ ：煤の複素屈折率， F_1 ， F_2 ： n と k の関数である。粒径が10nm単位と波長に比べて小さいので， $(D/\lambda)^4$ に比例する散乱による減衰は考慮されていない。

い. 式(4)右辺と式(2)右辺第2項を対比すると、粒径が小さくなるに従い、式(5)右辺に占める第2項以降の割合が減少するため、 θ の値は1より大きい値から1に近づいてくる。また、球形、単分散の仮定の下では、松井らが実験的アプローチにて突き止めた供試ディーゼルエンジンの火炎に於ける可視域の θ の値1.38は、粒径100nmの煤粒子に相当することが分かる。そこで、本粒径以下であることを条件として選別すると共に、数種類の材料を用いた実験の結果より、平均粒径33nmのアルミナ微粒子を選定した。アルミナの熱伝導率は、炭素そのものの値と比べ低いことから、本供試粒子は、煤粒子の温度に関する過渡応答に対し同等以上のものであると判断する。

シード粒子を火炎中に混合する手段として、シード粒子を吸気流へ混入することとした。吸気ポートのすぐ上流で吸気系を2系統に分け、それぞれに新気とシード空気を供給し、シャッターバルブで吸気系を切り替えることで、観察窓の汚れを最低限に保つように撮影しないサイクルではシード粒子を筒内に供給しないように工夫した。

3.4 高速火炎分光撮影カメラ

本計測では、燃焼ガス温度を2次元にかつ時間変化を追って計測しうることを狙い、二つの単色強度画像を撮影可能な撮影系として、Fig. 2に示す高速度メモリ式ビデオカメラを準備した。MCP型イメージンテンシファイア(感光帯域200~850nm)を内蔵する3板式高速度ビデオカメラ((株)フォトン製、256×256画素、最高撮影速度40500fps)であり、分光ミラーを介して、各撮影素子に特定の波長領域の映像を分配(200~450, 450~530, 530~850nm)する構成としている。各撮影素子の前面に光学フィルタを装着し、火炎を分光撮影することで、3波長の単色強度映像を同時に撮影することが可能である。各撮影素子に、異なる波長領域の映像が入射されるため、同時に分光分析可能な波長には制約があるものの、単純なプリズムによる映像分配の光学系構成に対し、各撮影素子へ入射される映像輝度を高くできるメリットがある。

また、今回の温度計測においては各撮影素子の撮影感度の違いが計測結果に著しく影響する。そこで、撮影素子、イメージンテンシファイア、映像分離光学系等による波長感度特性の違い、及び画面位置での感度の違い(シェーディング特性)をあらかじめ確認し、画像取り込み後、輝度補正を行った。

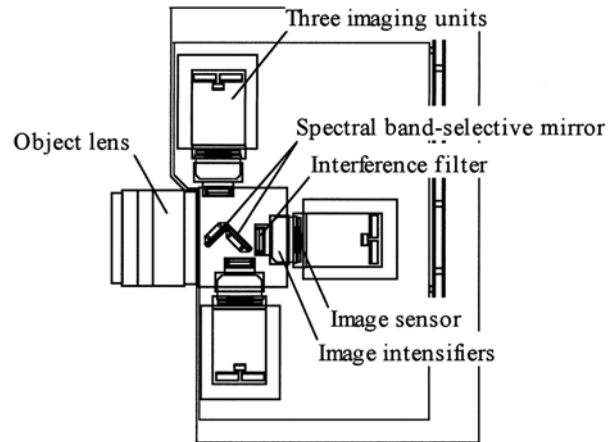


Fig. 2 High-speed multi-spectral video camera

3.5 温度検定

本温度計測法における本質的な課題は、燃焼中にて生成される煤の固体熱放射特性と、人工的に混入するセラミック微粒子の特性を同じと見なせるかにある。セラミック微粒子では、粒径Dがほぼ一樣で更に既知であるものの、粒子群の透過率の波長、粒径依存性が煤粒子群のそのものと同等と見なせる確証はない。そこで、計測結果の検証として、原理を異とする温度計測手法を同時に実施し、比較解析することを試みた。但し、誤差要因を最小に押さえるため、できるだけエンジン実機上での温度計測時と同様な光学系を用いて確認することが必要である。そこで、今回供試する高速度ビデオカメラが、3波長の単色強度を同時撮影できることに着目し、二色法適用時に於いても、余剰する1波長分の単色強度映像を利用し、次のような検定法を考案した。

3.6 金属炎発光開始温度による検定

金属は励起されると特有の光を発する。金属の励起が金属を取り囲む気体の熱エネルギーにて行われるとき、励起される金属粒子の数(N_i)は式(6)で表される。

$$N_i = N \cdot \exp(-E_i/kT)/Z \quad (6)$$

ここで、 N は全金属粒子数であり、 Z はエネルギー準位 E_i への分配関数である。温度を徐々に上昇させたとき、式(6)にて金属が励起され、特定の温度より発光が認められた後、温度に応じ発光強度が増大する傾向を示す。この発光が認められたときの発光開始温度をあらかじめ調査し、一点ではあるものの基準温度を

導くことを試みた。

M.I.T Wavelength Tablesに励起エネルギーと固有波長との関係が詳細に示されている。このテーブルを励起エネルギーと固有波長で整理したものをFig. 3に示す。各元素（金属）の発する固有波長は非常に多くある。これらの内、固有波長の感度が良いことから、基準温度計測に用いる金属として、ナトリウム（固有波長 = 589nm）を選定した。

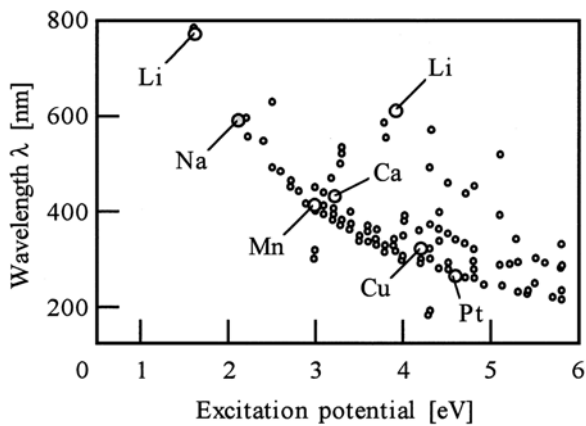


Fig. 3 Sensitive lines of the elements

ナトリウムの発光開始温度を計測するため、安定した火炎温度が作れるバーナー中にナトリウムを含有したガソリンを噴霧し、ナトリウムからの発光を観測した。火炎温度をNa-D線反転法を用いて計測しつつ、エンジン実機上にて用いる光学系、撮影系にて、バンドパスフィルタ（透過中心波長590nm、半値幅9nm）を通過した金属塩発光映像のみを分光撮影した。火炎の温度は、バーナーに供給する支燃物資（酸素、亜酸化窒素、空気等）、燃料（水素、メタン、プロパン、アセチレン等）との組み合わせを変化させるか、供給空燃比を変化させることにより、種々変化させた。

ガソリン中への金属の添加量は、金属のふく射能Eが0.1以上であることを満足する条件で決め、添加有機金属はその添加量をガソリン中に溶解できそうなものを選択した。Fig. 4に温度と発光強度の関係を、Table 1に添加金属の有機化合物、添加量（有機化合物としての量）と発光開始温度を示す。ここで、発光開始温度とは、温度を徐々に上昇させた際に、エンジン実機上にて用いる光学系、撮影系にて、バックグラウンドノイズに対し10倍以上（S/N 10）の発光を検知できる最低温度とした。

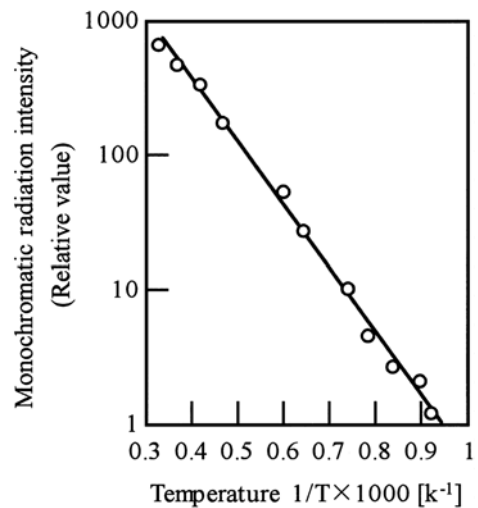


Fig. 4 Relationship between temperature and light emission intensity

Table 1 Additive organic compound and light emission start temperature

Organic compound	Sodium naphthenate
Added quantity	0.0400g/l
Light emission start temperature	≥ 1050 ± 20K

4. 燃焼ガス温度計測システムと計測精度

以上の検討を考慮した燃焼ガス温度計測システムを、Fig. 5に示す。構成としては、アルミナ微粒子を吸気に混合するシード粒子混合部と、ナトリウムを添加した燃料を噴射する金属塩供給部と、二色法適用のための二波長の単色強度撮影とナトリウムのスペクトル撮影の3波長分を同時撮影する火炎分光撮影部からなる。なお、二色法用の撮影に用いた干渉フィルタの中心波長としては、燃焼ガス中のラジカルからの化学発光のバンドを避けるよう、460, 640nm（半値幅8nm）に選定した。

実験に用いた可視化エンジンと燃焼系の概略をFig. 6に示す。エンジンはペントルフ型燃焼室に筒内噴射用スワール噴射弁及び点火栓を有する直噴ガソリン機関¹¹⁾である。このエンジンのシリンダ部に石英製観察窓を装着し、筒内現象観察を可能としている。但し、可視化部がエンジンブロック側に設けられていると共に、ピストンによるさえぎりにより、燃焼室内が観察可能になるのはATDC20 A以降である。

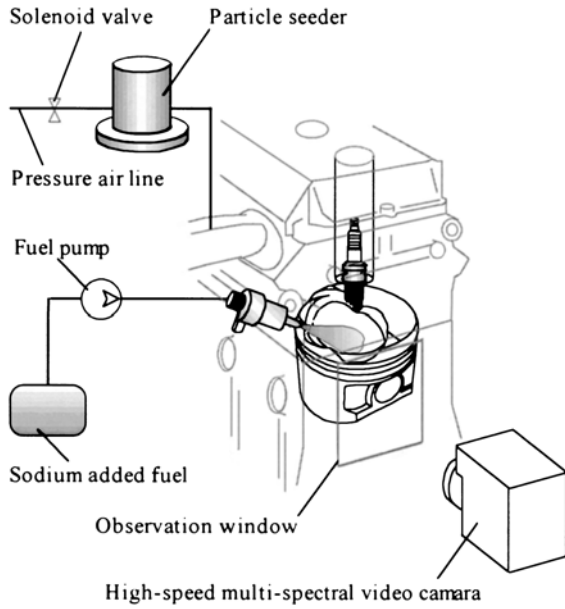


Fig. 5 Combustion gas temperature measuring system

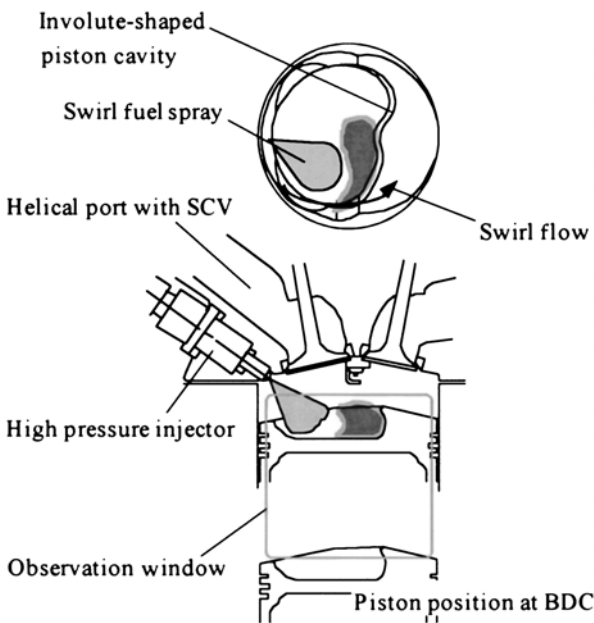


Fig. 6 Engine configuration around the combustion chamber

計測結果の温度検定は、燃焼ガスの温度分布を極力抑えるよう均質燃焼にて実施した。金属塩発光開始法と、アルミナ微粒子からの固体熱放射を利用した二色法にて計測した温度分布をFig. 7に示す。なお、二色法適用においては、温度算出に用いる種々の計算定数は、ディーゼルエンジンでの適用値をそのまま用い、の値に関してのみ、金属塩発光開始法から導かれる基準温度点（図中の火炎輪郭部）との検出誤差が最小

となる値を模索し、1.3という値を設定した。

この値固定にて、空燃比、負荷を変え、金属塩発光開始法での基準温度との計測誤差を確認した結果、誤差として ± 60 Kの範囲内にあることが分かった。更に、Na-D線反転法による基準温度測定時の誤差 ± 20 Kを考慮すると、最大160 K程度の誤差が見込まれる。また、基準温度一点のみの検証であるため、他の温度領域での精度については何ら言及するものではないが、簡易計測法という前提では実用上、十分使用できる能力であると判断した。

また、本手法による温度計測可能範囲としては、1000~2400 Kの領域であった。下限は、低温下の固体粒子からの熱放射強度を検出する際の、S/N 10を確保した上での撮影系の感度により決定し、上限は撮影カメラのダイナミックレンジによる制約である。

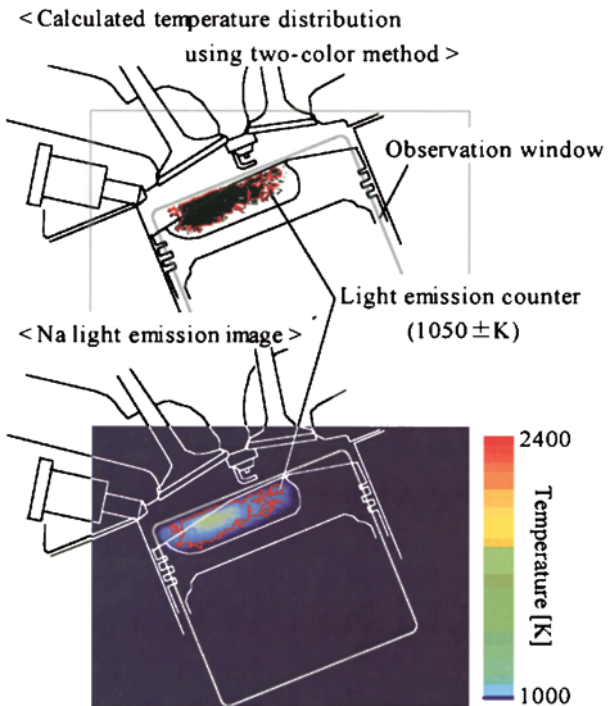


Fig. 7 Sodium light emission and calculated temperature using two-color method (Anlyzed at 40deg. ATDC)

5. 直噴ガソリンエンジンの筒内温度分布計測

前述の二色法に補助手段を追加した簡易燃焼ガス温度計測法をガソリンエンジンに適用し、筒内温度分布測定を試みた。供試したエンジンは、先に述べた直噴ガソリン機関である。

直噴ガソリンエンジンは、部分負荷では成層燃焼、

高負荷と高速時には均質燃焼というように燃焼形態を切り替えて、ガソリンエンジンとしての比出力の高さを確保しながら、部分負荷の燃費率を大幅に改善しようというものである。具体的に説明すると、低負荷では、これまでのポート噴射に比べてはるかに多い空気を吸入する。そして、圧縮行程後半に燃料を噴射し、点火プラグの周りに混合気を集めるようにする。筒内全体としては、空気の多い超希薄状態でありながら、安定した燃焼が可能となるわけで、通常ガソリンエンジンのように吸気を絞って空気量を減らす必要がなくなり、ポンピング損失や冷却損失が減るほか、空気サイクルに近づくので、熱効率が向上する。一方、高負荷では吸気行程に燃料噴射し、点火までの長いクランク角を利用して均質混合気を形成する。こうして燃焼時の空気利用率を高めている。

先の簡易燃焼ガス温度計測法を用い、従来ポート噴射エンジン同様の燃焼形態である均質燃焼と、直噴エンジン特有の成層燃焼での燃焼ガス温度分布を比較解析した。試験条件は、Table 2に示すとおりである。

Table 2 Experimental condition

	Homogeneous	Stratified
Revolution speed	1200r/min	
Fuel injection timing	320deg.BTDC	58deg.BTDC
Ignition timing	15deg.BTDC	24deg.BTDC
A/F	15	30
IMEP	280kPa	

5.1 均質燃焼に於ける空燃比の影響

超希薄燃焼を実現する成層燃焼での解析の前に、均質燃焼にて燃焼過程に及ぼす空燃比の影響を確認した。空燃比を変更し、計測した燃焼ガス温度分布をFig. 8に示す。

燃焼ガス温度計測結果にて全般的にいえることは、燃焼室内全域に高温部が形成されており、若干点火栓に近い中央部程、高温となる温度分布があることが分かる。空燃比の影響を見ると、空燃比が高い（濃度が低い）ものほど燃焼が遅くなり、高温部が後期まで継続している。希薄燃焼による燃焼速度の低下所以であ

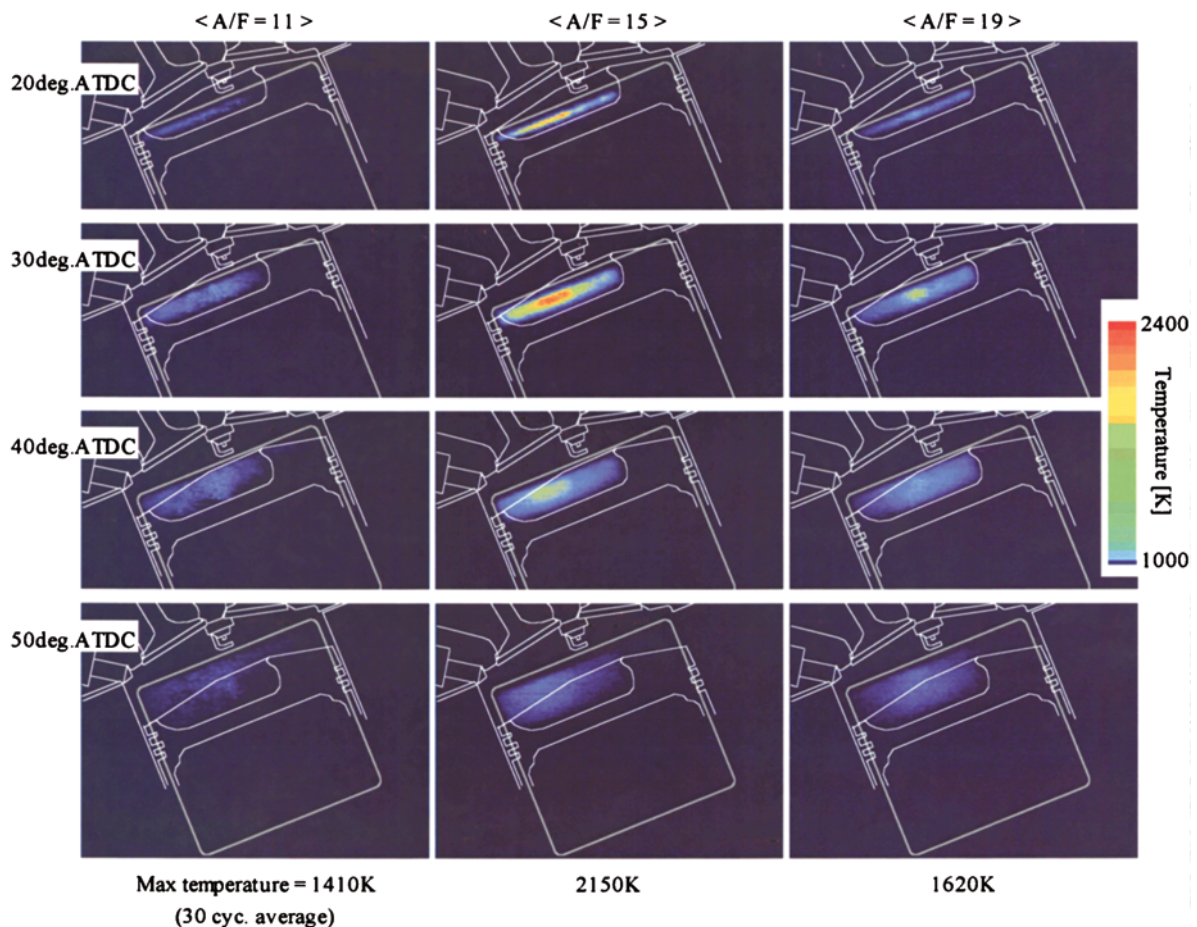


Fig. 8 Influence of total A/F on combustion gas temperature

る。

理論空燃比に近いA/F = 15の条件が最も高く、逆に希薄側のA/F = 19が最も低い値を示しており、希薄燃焼による冷却損失低減の裏付けが確認できる。但し、今回の試験に供試した可視化エンジンの構成上、燃焼室内の観察がATDC20 A以降より可能となるため、最高温度の値そのものに関しては、実際の最高値をとっているかどうかは定かでない。

5.2 成層燃焼と均質燃焼での燃焼ガス温度比較

次に均質燃焼と、直噴エンジン特有の燃焼形態である成層燃焼時の筒内燃焼ガス温度分布を比較解析した。Fig. 9に示すように、均質燃焼に対し、成層燃焼ではピストンキャビティ内に集中して混合気が分布していることから、局所的に高温部が形成されていることが分かる。但し、最高燃焼ガス温度で比較すると、トータル空燃比では2倍の違いがあるにもかかわらず、両者に有意さは見られず同等の温度を示していることが分かる。超希薄燃焼といえども、着火性を確保するためにストイキ近辺の混合気が点火栓周りに形成されていることによるものと推定する。この結果は、均質燃焼に対し、同一空燃比で見たときのNO_x濃度が高くなる成層燃焼のデメリットが発生する要因につながるものである。

6. おわりに

ガソリンエンジンでの燃焼ガス温度計測に簡便に供試可能な計測手法として、固体熱放射特性を利用した2色法の適用性を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 予混合燃焼主体のガソリンエンジンへの二色法適用に当たり、煤に替わるシード粒子を火炎に混入することで擬似的に輝炎発光の形成を可能とした。煤粒子と同等の温度追従性確保のため、平均粒径33nmのアルミナ微粒子を選定した。人工的に混入するセラミック微粒子からの固体熱放射特性を用いた二色法の検証のため、原理を異とする計測手法として、燃料中に金属塩を添加し、金属塩からの発光開始点から判別可能な基準温度と比較することを考案した。
- (2) 高速度マルチスペクトラカメラを用い、改良二色法と金属塩発光解析を同時に実施するように燃焼火炎を分光分析した結果、改良二色法は計測精度 ± 80 K、計測範囲1000 ~ 2400 Kの能力があるこ

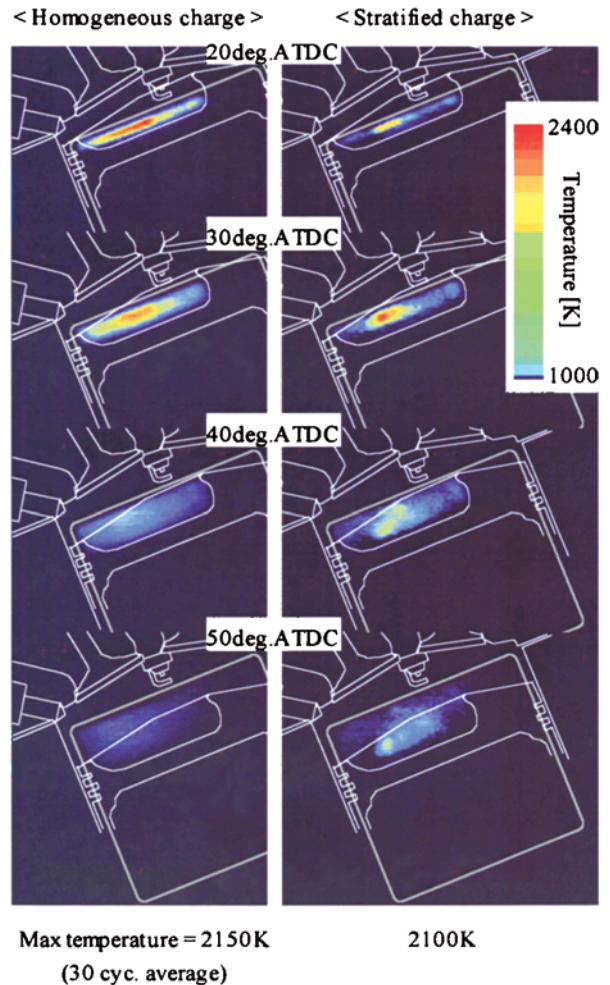


Fig. 9 Comparison of combustion gas temperature between stratified combustion and homogeneous combustion

とが分かった。

- (3) 直噴ガソリンエンジンに本計測手法を適用し、直噴エンジン特有の燃焼形態である成層燃焼時の筒内燃焼ガス温度分布を、従来ポート噴射エンジン同様の燃焼形態である均質燃焼での特性と比較し、特徴を明らかにした。

< 参考文献 >

- 1) Akihama, K., Asai, K., JSME, 57-541, B (1991)
- 2) Millar, G.M., Uzehara, O. A., and Meyers, P. S., SAE Trans., 62 (1954)
- 3) Muzio, L. J., Smith, D. S., and Starkman, E. S., Combustion and Flame, 18 (1972)
- 4) Shoji, H., JSME, 51-463, B (1985)
- 5) Gstrein, W., Technische Universitat Graz (1986)

特 集

- 6) Zhao, H., Ladommatos, N., Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 24 (1998)
- 7) Yasu, Kamimoto, Matsui, Matsuoka, JSME, 47-417, B (1981)
- 8) Matsui, Y., Kamimoto, T., Matsuoka, S., Oguri, A., JSME, 44-377 (1978)
- 9) Matsui, Y., Kamimoto, T., Matsuoka, S., JSME, 45-398 (1979)
- 10) Kamimoto, T., Internal Combustion Engine (Japan), 25-314, 27 (1986)
- 11) Harada, J., Tomita, T., Mizuno, H., Mashiki, Z., and Ito, Y., SAE 970540 (1997)



< 著 者 >



中島 樹志
(なかしま たつし)
(株)日本自動車部品総合研究所
第1研究室
パワートレイン分野の研究に従事



加藤 毅彦
(かとう たけひこ)
(株)日本自動車部品総合研究所
第1研究室
パワートレイン分野の研究に従事



調 尚孝
(しらべ なおたか)
(株)日本自動車部品総合研究所
第1研究室
パワートレイン分野の研究に従事



斎藤 公孝
(さいとう きみたか)
パワトレ事業グループ 特定開発室
パワートレイン分野の先行技術開発
に従事