

## 論文 Article

## 2色法によるディーゼル機関の火炎温度およびKL値の測定に関する研究

原稿受付 2011年3月28日

ものづくり大学紀要 第3号 (2012) 13~17

張博<sup>\*1</sup>, 菅谷 諭<sup>\*2</sup>, 神本 武征<sup>\*3</sup>, 青柳 友三<sup>\*4</sup>, 長田 英朗<sup>\*4</sup><sup>\*1</sup> ものづくり大学大学院 ものづくり学研究科 ものづくり学専攻<sup>\*2</sup> ものづくり大学 技能工芸学部 製造学科<sup>\*3</sup> ものづくり大学 名誉学長<sup>\*4</sup> 新エイシーイー

## Measurements of flame temperature and KL factor in a diesel engine by the two-color Method

Hiroshi CHO<sup>\*1</sup>, Satohi SUGAYA<sup>\*2</sup>, Takeyuki KAMIMOTO<sup>\*3</sup>Yuzo AOYAGI<sup>\*4</sup> and Hideaki OSADA<sup>\*4</sup><sup>\*1</sup> Graduate student, Graduate School of Technologists, Institute of Technologists<sup>\*2</sup> Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists<sup>\*3</sup> Institute of Technologists<sup>\*4</sup> NACE

## Abstract

The diesel engine has been receiving mounting critical attention for its pollutants emissions. This study aims to measure flame temperature and soot concentration in a diesel engine, and the author designed and built an optical system of the two-color method. Experiments have been conducted using a single cylinder heavy duty diesel engine, and the effects of EGR and fuel injection pressure on in-cylinder flame temperature and KL factor have been investigated. The result show that the radiation intensity from the flame increases first with crank angle due to soot formation and drops later due to soot oxidation, and the level of intensity at a later crank angle correlates well with soot emission value in engine exhaust.

**Key Words** : flame temperature, KL factor, diesel engine, two-color Method, EGR, fuel injection pressure,

## 1. はじめに

ディーゼルエンジンは、高い熱効率を有するが、窒素酸化物とススなどの排出が高いので、その低減が緊急の課題となっている。窒素酸化物は排気還流(EGR)により火炎温度を下げることによって低減できる。しかしEGRによってススの生成は増し、酸化は抑制されるので燃料噴射圧力を高めて燃料と雰囲気との混合状態を改善してススの排出も低減するという方法が採られている。このアプローチの有効性を確認し、さらに精度を高めるには筒内の火炎温度とスス濃度の正確な測定が必要である。

ディーゼルエンジンの火炎温度は2000K以上と高温であり、回転数に合わせて高速に変化する。この測定法として、火炎中の高温スス粒子からの連続放射に注目する2色法と呼ばれる光学的方法が広く使用されている。<sup>1,2,3)</sup>

2色法によれば火炎温度だけでなくスス濃度に比例するKL値を計測できるので、2色法はススの生成と酸化過程を追跡するうえで最適の測定法と言える<sup>4)</sup>。このような利点から従来、2色法により、ディーゼルの火炎解析は研究されてきた。

ディーゼル火炎に対する2色法の適用法には二つの方法がある。一つは燃焼室内の1点からの輻

射光強度情報をプローブを通してサンプルして局所的な火炎温度と  $KL$  値を測定する方法である。もう一つは、高速度撮影した火炎のカラー画像に2色法を適用して燃焼室内火炎の温度と  $KL$  値の2次元分布を得る方法である<sup>5)</sup>。藤野らは画像解析法により EGR が火炎温度と  $KL$  値に及ぼす影響を調べている。しかしこの方法ではサンプルサイクル数が少ないため影響度の精度が低い<sup>6)</sup>。

現状では最新の高過給エンジンにおける EGR 率と燃料噴射圧力が燃焼と排気に及ぼす影響は十分理解されたとは言い難い。

本研究では、最新の高過給エンジンにおいて高 EGR 率と高噴射圧力が火炎温度と  $KL$  値の局所値に及ぼす影響を多数サイクルにわたって調査することを目的としている。

## 2. 2色法測定原理

2色法は輝炎の中のスス粒子からの熱放射に注目している。可視波長範囲で 3000K 未満の温度であれば 1 単位立体角当たりの単波長黒体放射力

$i_{\lambda b}(\lambda, T)$  は Wien の式で表せる。

$$i_{\lambda b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\pi\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (1)$$

$\lambda$  は波長、 $T$  は絶対温度であり、 $C_1$  と  $C_2$  は、プランクの第 1 および第 2 の定数である。

輝炎の波長放射率を  $\varepsilon_\lambda$  とすると、火炎の単波長放射  $i_\lambda(\lambda, T)$  は式(2)で表現できる。

$$i_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda \frac{C_1}{\pi\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (2)$$

$i_\lambda(\lambda, T)$  は波長  $\lambda$  における輝度温度  $T_a$  を使うと式(3)のようにも書ける。

$$i_\lambda(\lambda, T) = \frac{C_1}{\pi\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T_a}\right) \quad (3)$$

Hottel と Broughton は輝炎のふく射に関する次の式(4)を提案した。

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda^\alpha}\right) \quad (4)$$

$KL$  は  $KL$  因子と呼ばれる。K はほぼス濃度に比例し、 $L$  は光検出の方向の火炎厚さである。 $\alpha$  は放射率の波長依存性を表現する指数である。

式(2)~(4)から式(5)が導ける。

$$KL = -\lambda^\alpha \ln \left[ 1 - \exp\left\{-\frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T}\right)\right\} \right] \quad (5)$$

式(5)に 2 つの異なった波長  $\lambda_1$  および  $\lambda_2$  をあてはめると以下の式(6)が求められる。 $T_{a1}$  と  $T_{a2}$  は 2 つの波長における輝度温度である。

$$\begin{aligned} & \left[ 1 - \exp\left\{-\frac{C_2}{\lambda_1} \left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T}\right)\right\} \right]^{\lambda_1^{\alpha_1}} \\ & = \left[ 1 - \exp\left\{-\frac{C_2}{\lambda_2} \left(\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T}\right)\right\} \right]^{\lambda_2^{\alpha_2}} \end{aligned} \quad (6)$$

Hottel と Broughton によれば  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.39$  である<sup>7)</sup>。ニュートンラフソン法を使用し、2 つの測定輝度温度を式(6)に代入することで真温度  $T$  を求める。さらに  $KL$  は式(5)に  $T$  を代入して求める。

## 3. 実験装置及び実験条件

### 3.1 使用エンジン

表 1 にエンジンの仕様を示す。実験には単気筒 4 サイクル直噴式ディーゼルエンジンを使用した。実験装置は、外部過給機による過給を 501.3 kPa まで行うことに加え、任意の EGR 率、EGR ガス温度で運転できる。

Table.1 Engine specifications

Item	Specifications
Engine type	DI single cylinder OHV 4 valve
Displacement [L]	2.004
Bore x Stroke [mm]	135 × 140
Engine speed [rpm]	1200
Fuel injection system	Common rail system (max Pinj; 200MPa)
Nozzle	Minisac 0.177×8-150
Piston	Monotherm steel piston
Combustion chamber (diameter / bore)	Toroidal 107mm diameter for observation (0.73)
Compression ratio	16
Swirl ratio	1.4
Air charging system	External super charger

### 3.2 実験条件

表 2 に実験条件を示すように、高過給の条件で EGR 率と燃料噴射圧力の影響を調べた。回転速度  $N_e=1200\text{rpm}$ 、スワール比  $R_s=1.4$  を標準条件とし、燃料噴射量に応じて燃量噴射圧力、過給圧・EGR 率を設定した。スス付着による光学窓の汚れの影響を補正するため実験の途中で適宜、基準条件(reference)においてデータを採取した。基準条件の条件は表 2 に示した。

Table.2 Experimental conditions

No.	Boost (Pb) kPa abs	EGR rate %	Common rail pressure $P_{cr}=P_{inj}$ MPa	Injection quantity (q) $\text{mm}^3/\text{st}$
3	126.3	0	150	45
4			200	
5	271.3	51	200	135
6			220	
7	Reference 07-111125R1200L10A			
8	271.3	51	180	135
9			150	
10	Reference 10-111125R1200L10A			
11	271.3	51	120	135
12			90	
13	Reference 13-111125R1200L10A			
14	271.3	0	200	135
15		30		
16		40		
17		50		
18	Reference 18-111125R1200L10A			

### 3.3 測定装置

図 1 に測定装置の概略を示す。エンジン内の火炎ふく射光はプローブから光ファイバを通り分光器に入る。ハーフミラーで光を二分化し、それぞれに干渉フィルタで分光される。干渉フィルタを通過した単色光は光電子増倍管で光電変換して検出される。検出された光が強い場合には ND フィルタを通し出力を下げる。干渉フィルタの中心透過波長は、可視域に存在するラジカルの発光および化学発光のバンドを避けて、535, 632 nm とした。

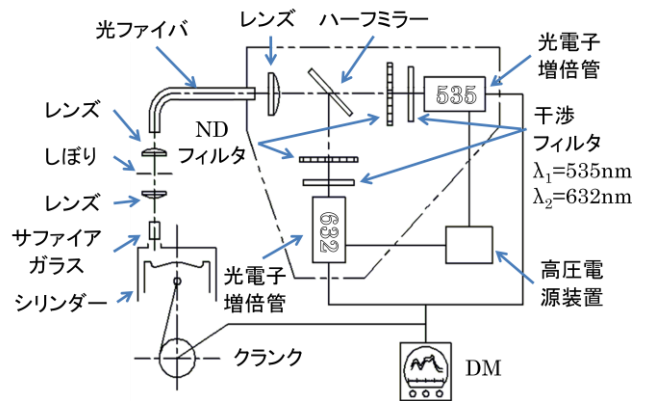


Fig.1 Schematic diagram of the two-color method

### 3.4 プローブ

図 2 に試作した高過給エンジン用の光学プローブの外観と断面図を示す。プローブ先端部にはサファイアガラスが付いており、エンジンの高温高压の燃焼ガスからふく射を取り出す。2 枚のレンズの間に直径 0.4 mm のピンホールを入れることにより、検出する火炎ふく射光の平行度を上げている。プローブを出た光は光ファイバ(コア直径 0.2 mm) に入る。

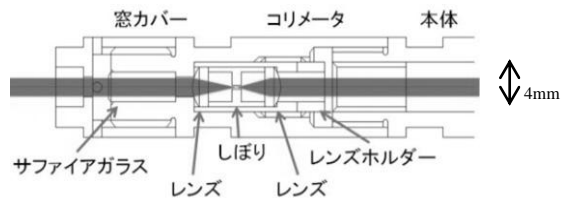


Fig.2 Cross sectional view of the optical probe designed for this study

## 4. 実験結果と考察

図 3 は基準条件における検出出力の経過時間を示す。時間経過とともに出力が減衰しているのは時間とともにプローブ先端の光窓表面にススが付着したためと考えられる。

この減衰曲線と測定終了後に行った検出器出力と輝度温度の検定曲線から図 3 の 4 個の基準条件における測定データを 2 色法により計算した結果を図 4 に示す。図に見るように減衰を補正した 2 波長におけるふく射強度から計算した火炎温度および  $KL$  因子は互いに良く一致している。また最高温度はほぼ 2400 K,  $KL$  の最大値は 1 程度である。

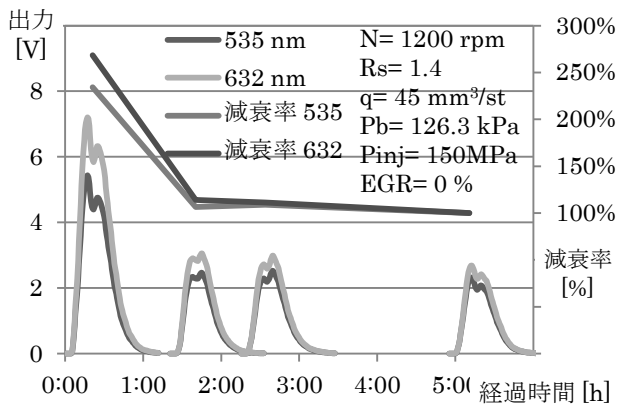


Fig. 3 Change of the output level with time under reference condition

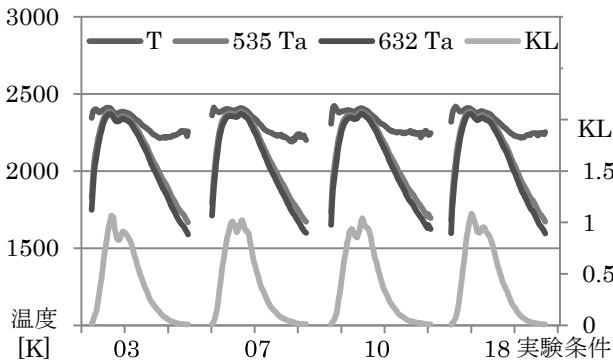


Fig. 4 Calculated time records of  $T$  and  $KL$  under reference condition

ほかの条件においても光学窓のよごれの影響を補正して2色法による解析を試みたが、良い結果が得られなかった。基準条件では燃料噴射量が45 mm<sup>3</sup>/stであるのに対し他条件の噴射量は135mm<sup>3</sup>/stと多く、その結果、最大筒内圧力値が基準条件時の9MPaの2倍近い18 MPaに達した。プローブの外側からかかる18 MPaと内側の大気圧との差によりプローブに歪が発生し、レンズとピンホールから成る光学系に狂いが生じたものと推察される。

そこで輻射光強度の変化にのみ注目して燃焼中のススの生成・酸化過程と排気スス濃度との関係を定性的に考察することにした。

図5と図6に噴射圧力・EGR率を変化させた測定結果とふく射強度の変化およびスス濃度(FSN: Filter smoke number)を示す。噴射圧力を下げると出力が低下し、同時に燃焼が長引くことが分かる。これは噴射圧力の低下により燃料の噴射にかかる時間が長引き、かつ燃料と空気との混合が遅くなったためと考えられる。またEGR率を上げると出力が低下し、燃焼が長引くことが分かる。

これはEGR率の増加により、酸素濃度が低下して酸化反応が緩慢化したためと考えられる。

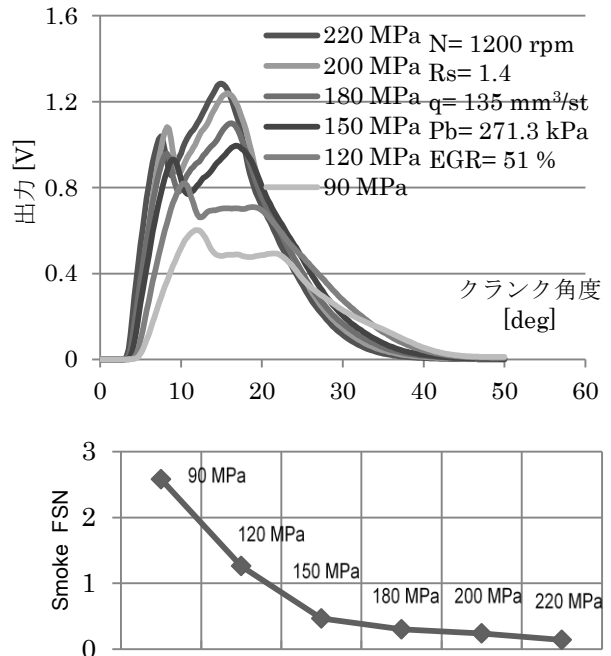


Fig. 5 The result of a measurement that changed injection pressure

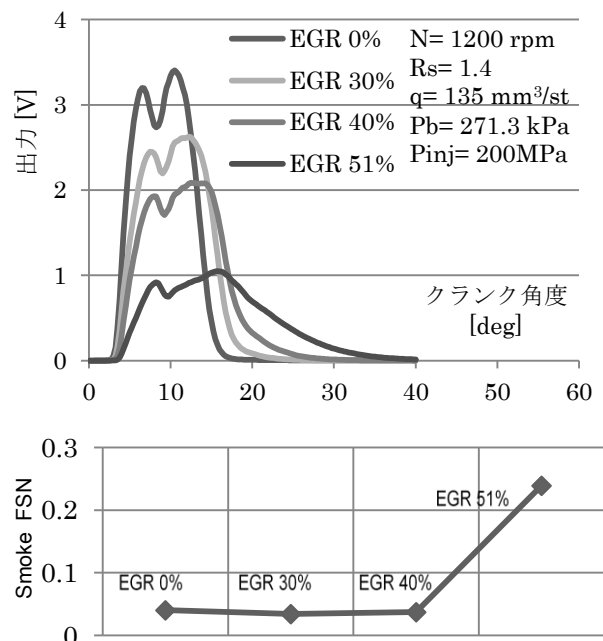


Fig. 6 The result of a measurement that changed an EGR rate

図7に各条件の筒内圧力変化を示した。基準条件では筒内圧力は約9 MPaであるが、その他の条件では18 MPaに達していることがわかる。

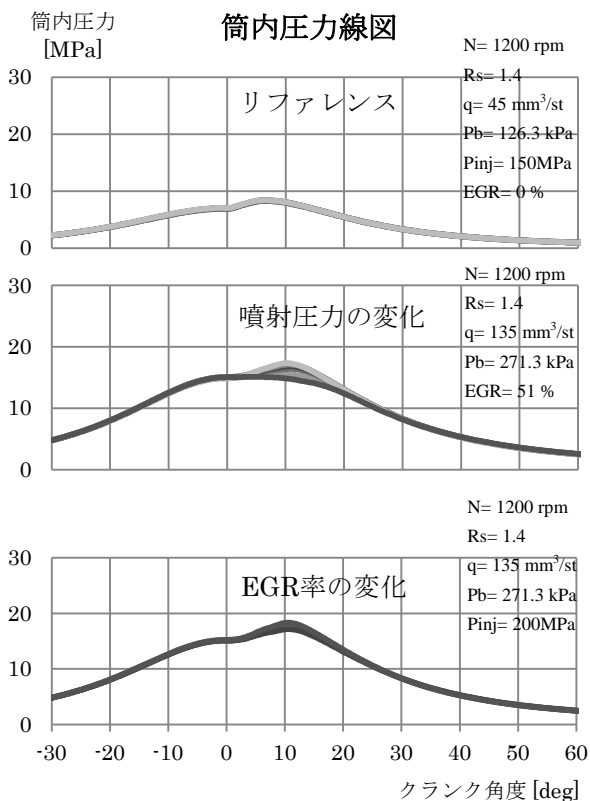


Fig. 7 A comparison between in-cylinder pressure diagrams for reference and other conditions

## 文献

- 1) Uyehara, P.S., Myers, K.M., Watson and L.A. Wilson, "Diesel Combustion Temperatures - The Influence of Operating Variables." Trans. ASME, 69-5, 1947, pp. 465.
- 2) Y. Matsui, T. Kamimoto and S. Matsuoka, "A Study on the Time and Space resolved Measurement of Flame Temperature and Soot Concentration in a DI Diesel Engine by the Two-Color Method" SAE Trans. 88-2 No.790491, 1979
- 3) Zhao, H., and Ladommatos, N., Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines, *Prog. Energy Combustion Sci.*, vol.24, 1998, pp.221-255
- 4) Kamimoto T. and Murayama Y., Reexamination of the emissivity of diesel flames, *Int. Journal of Engine Research*, Vol.12. Issue 6, Dec. 20012, pp.580-600.
- 5) Ahn S-K., Kamimoto T., et al., "Measurement of Flame Temperature Distribution in a Diesel Engine by Means of Image Analysis of High Speed Photographs", Proc. Of the 13th Int. Cong. On High Speed Photonics, Tokyo, pp688-691 (1978)
- 6) 藤野ほか3名, ボアスコープによるディーゼル燃焼の直接観察と火炎温度, 第20回内燃機関シンポジウム予稿集, 2009年9月
- 7) Hottel, H.C., and Broughton, F.P. Determination of true temperature and total radiation from luminous gas flames. *Industrial and engineering chemistry*, 1932, 4, 2, pp.166-175

## 5. まとめ

1. レンズとピンホールを内蔵したディーゼル火炎のふく射検出用プローブを設計・試作し、二色法による温度と KL 因子の解析を行った。
2. EGR なし、軽負荷の条件で、光学窓のよごれを補正して 2 波長におけるふく射強度から火炎温度と KL 因子が求められることを示した。
3. 高過給、高 EGR 条件では適切なふく射出力が得られなかった。高負荷ではシリンダ内圧が 200 気圧レベルに上昇するため、プローブが歪みふく射強度に誤差が生じたと想像される。
4. 高過給条件で、噴射圧と EGR がふく射強度に及ぼす影響を定性的に考察した。その結果、噴射圧力を下げると、ふく射強度が低下すると同時に燃焼が長引くこと、EGR 率を上げるとふく射強度が低下し、かつ燃焼が長引くことが分かった。
5. 燃焼期間後半におけるふく射強度の値は排気中の煙濃度の傾向と一致することが分かった。