

光ファイバー温度計の計測精度に関する研究

(第2報, 火炎温度計測の誤差因子および補正方法)

石田 正弘*・駱 貴峰*
植木 弘信*・黒川 清司*Studies on Measurement Accuracy of
the Optical Fiber Thermometer(2nd Report; Error Factor and Calibration Method of
Flame Temperature Measurement)

by

Masahiro ISHIDA*, Gui-Feng LUO*,
Hironobu UEKI* and Kiyoshi KUROKAWA*

Error factors were investigated in measurement of diesel flame temperature by means of the optical fiber thermometer (OFT), and the following techniques were proposed in the present paper to measure the flame temperature accurately. (1) The calibration method by means of the black-body furnace and the reference light-pipe sensor for obtaining the accurate sensor characteristics. (2) The appropriate correcting method for compensation of a decreased OFT-output due to sensor contamination. (3) Measurement under the steady engine operation condition and under the condition of a small OFT-output fluctuation. (4) Strictly simultaneous sampling of a couple of OFT-output data.

The influence of the selected couples of two-waves, that is, the visible two-color and the infrared two-color, on the flame temperature and the soot concentration parameter KL was compared, and in addition, the simplified two-color method was proposed and also compared with the above two-color method.

1. まえがき

燃焼火炎からの輻射エネルギーに注目した火炎温度計測法が、近年各方面でますます利用されつつある。内燃機関燃焼室内のガス温度の瞬時測定法として、可視域あるいは赤外域において適切に選択された2つの波長の輻射エネルギー強さから火炎温度を推定する2色法が一般的になりつつあり、特にディーゼル火炎の場合、燃焼ガス中に存在するすす粒子群からの強い輻射エネルギーに注目した可視2色法の適用が多

い¹⁾ 2) 3)。筆者ら^{4) 5)}は直径1.3mm、長さ約180mmのサファイヤ棒で製作されたライトパイプセンサーを、直接噴射式ディーゼル機関のシリンダヘッドのグローブプラグ孔を利用して燃焼室内に挿入し、その受光部を燃焼室内の適切な位置に設置することにより、測定対象領域からの輻射エネルギーを捕え、波長800nmおよび950nmの赤外2色法を適用して実時間で燃焼火炎温度およびすす濃度の時間履歴を計測した。火炎温度計測システムはサファイヤ棒製ライトパイプセンサー、

平成6年9月30日受理

*機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

光ファイバーケーブルおよび光ファイバー温度計本体から構成されたが、センサーを燃焼室内に挿入したことに基づく受光部の汚損が計測精度上の重要な問題として提起された。

本報告では、第一報⁶⁾で明らかにされたサファイヤセンサー受光部の受光特性、センサーおよび光ファイバーケーブルの光伝送特性など基本的特性を考慮してセンサー受光特性の検定方法を確立するとともに、火災温度計測精度に及ぼすセンサー受光部の汚損の影響を定量的に評価し、汚損に基づく計測誤差を除去するための補正方法を提案している。さらに、実機機関において計測された火災温度推定値の誤差因子について詳細な検討を加え、光ファイバー温度計によるディーゼル火災温度の高精度計測を試みた。合わせて、単に2波長の放射エネルギー強さの比から火災温度を推定する簡易2色法を提案し、その精度を検討した。

2. 火災温度計測原理

2.1 2色法

可視域あるいは赤外域において適切に選択された2つの波長の放射エネルギー強さからディーゼル火災温度を推定する2色法の計測原理は、Matsuiら¹⁾によってほぼ完成された。すなわち、波長 λ 、真温度 T 、輝度温度 T_a の単位波長当りの単色放射エネルギー $N(\lambda, T)$ が次式で表されることを基礎にしている。

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

$$\text{ただし、} \varepsilon(\lambda) = 1 - \exp(-KL/\lambda^\alpha) \quad (2)$$

$$C_1 = 3.74041 \times 10^8 \quad (\text{W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2)$$

$$C_2 = 1.42868 \times 10^4 \quad (\mu\text{m} \cdot \text{K})$$

ここで、 $\varepsilon(\lambda)$ は単色射出率であり、これに対し Hottel-Broughton の式(2)が成立すると仮定する。KLはすす濃度を代表するパラメータであり、 α は限られた波長域では定数として扱え、文献(1)を参考にすれば赤外域では0.95、可視域では1.39である。式(1)および(2)からKLについて次式が得られる。

$$KL = -\lambda^\alpha [1 - \{\exp(C_2/\lambda T) - 1\} / \{\exp(C_2/\lambda T_a) - 1\}] \quad (3)$$

選定された2つの波長 λ_1, λ_2 についてKLの値が同じであるという仮定を導入すれば次式を得る。

$$[1 - \{\exp(C_2/\lambda_1 T) - 1\} / \{\exp(C_2/\lambda_1 T_{a1}) - 1\}]^{\lambda_1^{\alpha_1}} \\ = [1 - \{\exp(C_2/\lambda_2 T) - 1\} / \{\exp(C_2/\lambda_2 T_{a2}) - 1\}]^{\lambda_2^{\alpha_2}} \quad (4)$$

2波長の輝度温度 T_{a1}, T_{a2} が計測結果から与えられれば、式(4)にニュートン・ラプソン法を適用し、数値解として真温度 T を算定できる。

2.2 簡易2色法

燃焼火災温度の場合、式(1)の $[\exp(C_2/\lambda T) - 1]$ の項の大きさは1に比べて十分大きいので次式で近似できる。

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

ここで、2波長 λ_1, λ_2 の単色放射エネルギー強さの比を取ると次式となる。

$$N_1/N_2 = 1 / (f \cdot b) \cdot \exp(c/T) \quad (6)$$

$$\text{ただし、} b = (\lambda_2/\lambda_1)^{-5}$$

$$c = C_2 (1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)$$

$$f = \varepsilon(\lambda_2) / \varepsilon(\lambda_1)$$

b, c, f は二つの波長を選定すれば定数と見なせる。一方、後述の Fig. 5に示すように光ファイバー温度計電圧出力 V と放射エネルギー強さ N は比例関係すなわち、 $V = a(\lambda) \cdot N$ であり、計測された2波長の出力電圧比 V_1/V_2 を R とすると、

$$N_1/N_2 = a_2 V_1 / a_1 V_2 = k \cdot R; \quad k = a_2 / a_1 \quad (7)$$

で表せるから、式(6)および(7)から得られる次式で火災の真温度 T が算定できる。

$$T = c / \log_e(k \cdot f \cdot b \cdot R) \quad (8)$$

3. 火災温度計測システム

Fig. 1にディーゼル機関燃焼室内の火災温度計測システムを示す。傾斜先端型ライトパイプセンサーの受光部を通過した放射エネルギーは、約15mの光ファイバーケーブルで4チャンネル光ファイバー温度計(アキュファイバー社製モデル100C、略称OFT)へ送られ、OFTは中心波長がそれぞれ赤外域の2波長950nm, 800nmおよび可視域の2波長700nm, 600nmについて放射エネルギー強さを検出する。この電圧出力

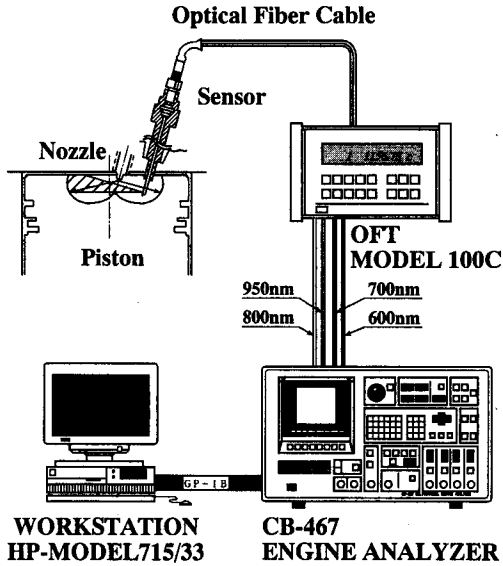


Fig. 1 Flame temperature measuring system

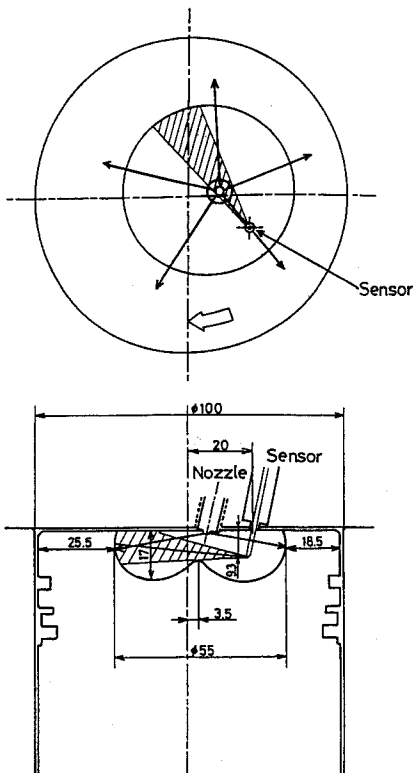


Fig. 2 Combustion chamber configuration and measuring volume

は4チャンネルエンジンアナライザー（小野測器製モデル CB-467）へ転送され、クランク角0.25°ごとのデータとしてサンプリングされ、さらにワークステー

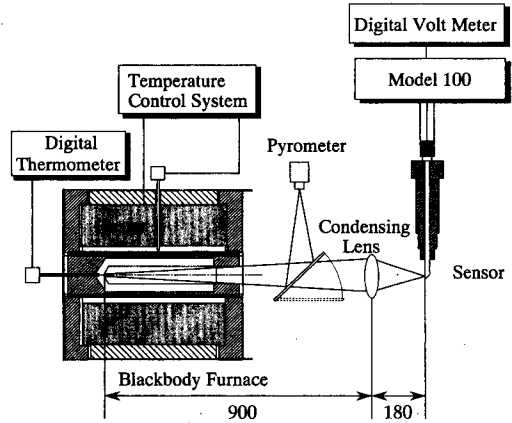


Fig. 3 Temperature calibration system with black-body furnace

ション（HP 製モデル715/33）に記録、解析される。Fig. 2は供試機関の燃焼室形状およびセンサーの装着状態を示す。また、センサーの受光角度特性⁶⁾から推定された測定対象領域をハッチング領域で示した。ライトパイプセンサーは直径1.3mmの平滑なサファイヤ棒であり、先端面がセンサー軸に対して約45°の傾きを有し、測定対象領域からの輻射エネルギーを取込む受光部は傾斜面に正対するサファイヤ円柱表面である。なお、供試機関は自動車用4サイクル直接噴射式過給ディーゼル機関（三菱自動車工業製 4D31-T型、シリンダー直径100mm、ストローク105mm）であり、図中の放射状に広がる5本の矢印付き実線は、燃料噴射ノズルの噴孔軸を示す。

4. センサー受光特性の検定

実験前後のセンサー受光特性の変化を検定するため、Fig. 3に示す黒体炉検定システム⁶⁾を用いた。まず、黒体炉自身の特性を明らかにするため、長さ約280mmの平坦先端型標準ライトパイプセンサーを黒体炉内に挿入し、炉内温度分布を赤外2色法および可視2色法により調べた。その結果を Fig. 4に示す。センサー受光部が炉のキャビティ底近くにある場合の可視2色法により計測された温度は1073.8℃、同時に計測された放射温度計による値は1074℃で、可視2波長の輝度温度も一致していたことから、この計測された温度はほぼ真温度であると判断された。

一方、小さい黒丸印で示す赤外2色法による値は、この時1067℃であった。この差の原因として、次のFig. 5に細い一点鎖線と破線で示す赤外2波長のOFT出力と輻射エネルギー強さの関係に誤差が含まれているものと判断してその補正を行い、太い一点鎖

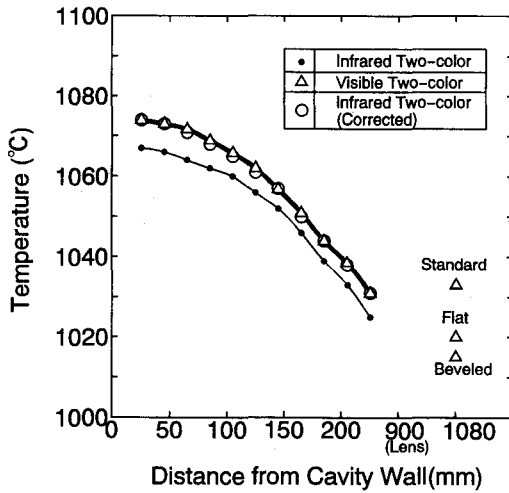


Fig. 4 Temperature distribution in the black-body furnace

線と破線のように修正すると、赤外2色法による黒体炉内温度分布は Fig. 4 の白丸印のようになり、白三角印の可視2色法による値とほぼ一致する。なお、Fig. 5 は OFT 出力と輻射エネルギー強さの関係を各波長毎に示したもので、細い一点鎖線と破線で示す赤外2波長および太い点線と実線で示す可視2波長の関係は本光ファイバー温度計自身が有する関数に基づくもので、いずれの場合も両者は比例関係にあり、比例定数は波長毎に異なる。

Fig. 4 によれば、センサー受光部がキャビティ底から遠ざかるにつれて温度が次第に低下する。これは黒体炉壁の温度がキャビティ底のそれより低い温度であることを意味し、センサーの受光対象領域が広がったため、計測される視野内平均温度が低下しているものと判断される。同図の右端に検定装置集光レンズの焦点において計測された温度を示した。標準センサーが示す集光レンズ焦点の温度1032.8℃は、キャビティ底の温度1073.8℃より低い。これは、黒体炉からの輻射エネルギーが集光レンズを通過するときに約8%減衰すること、および集光レンズの視野がキャビティ底より広い範囲になっていることに基づいているものと推定された。

一方、著者が研磨処理し再生した供試センサーを計測ホルダーに装着し、集光レンズ焦点において温度を計測したところ、平坦先端型の場合1020.0℃、また傾斜先端型の場合1002.8℃であった。このように標準センサーより低い温度が指示されたのは、受光部表面の研磨仕上げが完全でないこと、あるいはその受光部形状に依存した輻射エネルギーの散乱が生じることな

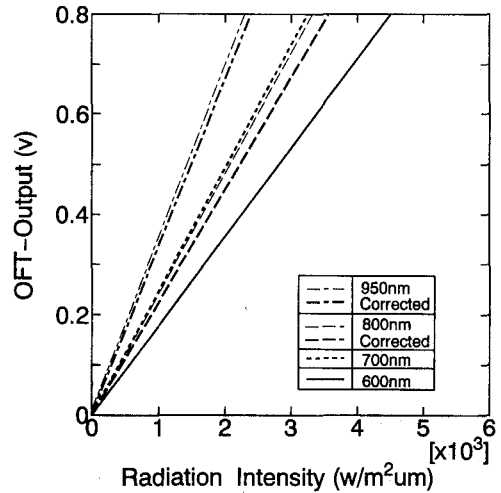


Fig. 5 Relationship between OFT-output and radiation intensity

どに起因している⁶⁾。輻射エネルギーの総合的通過率すなわちセンサーファクターは波長ごとに極僅かに異なったが、本実験に用いた研磨再生状態の平坦先端型および傾斜先端型センサーの平均的センサーファクターは、上記の検定結果よりそれぞれ0.790および0.364と推定された。

5. ディーゼル火炎温度計測誤差因子の検討

5.1 受光部汚損の影響

文献(4)でも報告されたように、実験に供した後のセンサー受光部表面は、ディーゼル火炎に晒されるために何らかの汚損を生じ、輻射エネルギーの受光率が低下する。ここでは、センサー受光部表面を人為的にすすで汚損し、汚損の程度を累積した場合の輻射エネルギー受光率の低下を調べた。Fig. 6 は汚損程度に基づく OFT 出力の低下率を示すもので、図から分かるように、汚損程度にほぼ比例して受光率が低下する。しかも、その低下率は波長が短いほど大きく、950nm の低下率を1とした場合、800, 700, 600nm の低下率はそれぞれ1.120, 1.195, 1.307であった。

Fig. 7 は、新しいセンサーの受光率を基準に、実験後および研磨再生後の波長950nmの受光率の変化の例を示す。センサーの受光率は最初の実験で約25%も大きく低下し、以後、文献(6)に示された方法で再生研磨処理を行って5%ほど回復できるが、研磨を十分にし難いため最初の受光率を回復できないことが分かる。それ以後の状態では、実験前後の受光率の低下は5~10%であるから、汚損に基づく波長950nmの受光率の低下率を実験前後の検定値から求め、その他の波長の

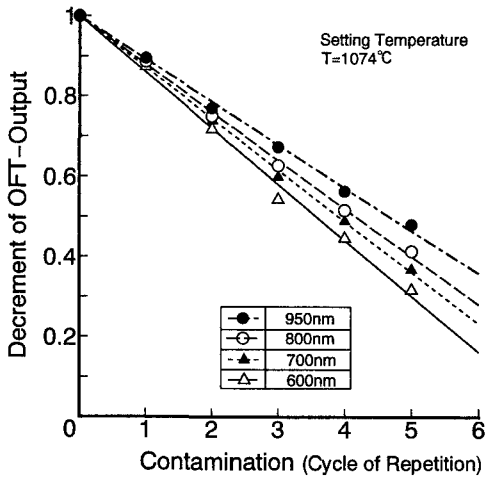


Fig. 6 Decrease in received radiation energy due to sensor contamination

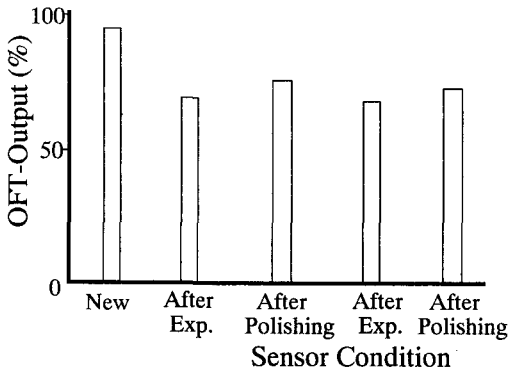


Fig. 7 Compensation method of the decreased radiation energy due to contamination

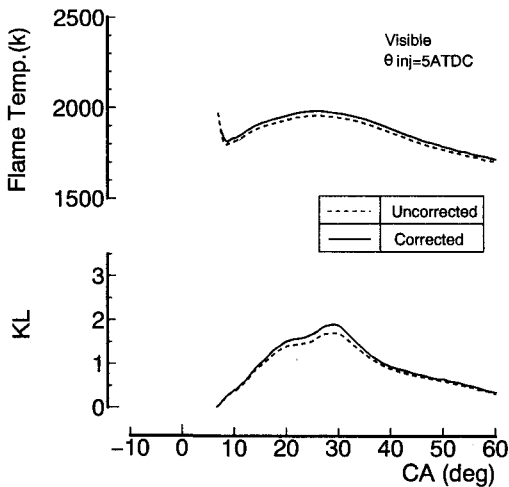


Fig. 8 Influence of sensor contamination on flame temperature history

低下率は Fig. 6 の結果から推定した。なお、連続運転中に得られた一連の実験結果については、センサーは実験後の汚損状態にあったと想定して補正を行った。

Fig. 8 は供試機関の回転速度1750rpm, 正味平均有効圧 $P_{me}=8.30\text{bar}$, 燃料噴射開始時期上死点后5度の運転条件で可視2色法により計測された燃焼室火炎温度の時間履歴の一例を示す。横軸はクランク角度で、計測値は連続した350サイクルに亘る平均サイクルの時間履歴である。図中の破線はセンサーの汚れ補正前の値であり、実線は補正後の値である。汚れの補正によって、主燃焼時期の最高火炎温度は25℃すなわち1.3%、KL 値は0.2すなわち約10%だけ変化した。最高火炎温度1985 K に比べ、この補正量は僅かに1.3%であるが、この温度レベルでの25℃は、窒素酸化物の生成率に与える影響において無視できない。

5.2 機関運転中の OFT 出力変動

機関回転速度1750rpm の高負荷 ($P_{me}=8.30\text{ bar}$) および低負荷 ($P_{me}=3.97\text{bar}$) の運転条件下で、OFT 出力の1サイクル中の最高出力電圧を5分毎、40分間に亘って調べ、Fig. 9の結果を得た。高負荷、低負荷とも、OFT 出力の電圧変動幅はほぼ同じであるが、平均電圧値に対する変動割合は両者で著しく異なる。すなわち高負荷では±4%であるが、低負荷では±17%にも達する。本実験では、Fig. 2に示したように、センサー受光部をディーゼル機関燃焼室内に挿入しているため燃焼火炎に直接晒される。センサー受光部の時間平均温度は1000K 以下であるため、燃焼期間末

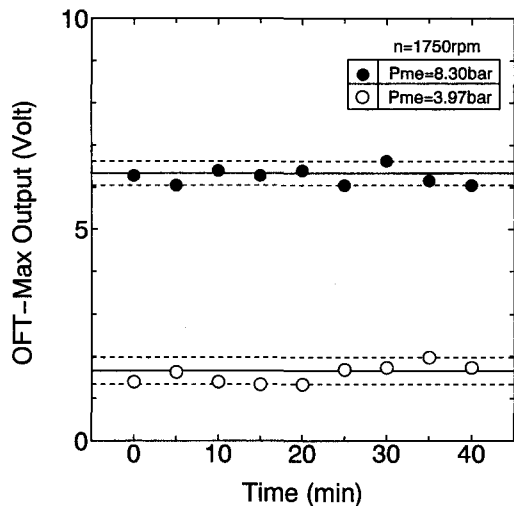


Fig. 9 Fluctuation of OFT-output

期にすすなどが受光部に付着することが考えられ、このことが OFT 出力電圧の経時変化として現われるものと推定される。しかしながら、1 サイクル毎に2000 K を越える高温火炎に遭遇するため、前サイクルで受光部に付着した僅かなすすは再燃焼して除去されることが期待される。同図の高負荷の計測結果では、40 分の計測期間で比較的安定した OFT 出力が得られており、燃焼のサイクル変動が存在することを考慮すれば、連続運転中のセンサーの汚損程度の経時変化は無視できる。一方、低負荷では出力変動率が長く長い周期の変動があるから、多数回に亘る計測結果から現象を判断する必要がある。

5.3 2 波長データの同時性

OFT データの2 波長同時性が火炎温度の計算値に与える影響を調べた結果が Fig.10である。同図は、同時計測された700nmおよび600nmに可視2色の OFT データについて、対応する両者のデータを故意に±1/4 度だけ位相をずらして火炎温度および KL 値の時間履歴を計算したものである。僅か1/4 度(24μs)のサンプリング時間差が計算結果に及ぼす影響は大きく、特に燃焼開始初期の火炎温度、および KL 値の時間履歴に著しい影響を与えることが分かる。すなわち、燃焼初期および末期での OFT 出力電圧が低く、極僅かのサンプリング位相差が2 波長の OFT 出力電圧比に大きく影響し、火炎温度の推定値に大きな誤差をもたらすことになる。したがって、本実験では OFT 出力を4 チャンネル燃焼解析装置を用いてクランク角1/4 度毎にサンプリングするととも

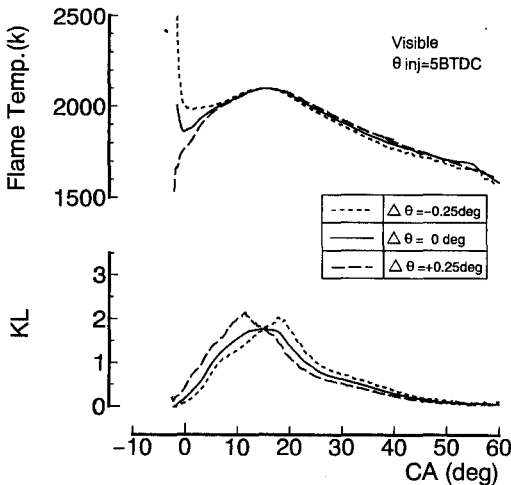


Fig.10 Estimated error in temperature due to sampling phase difference between two waves

に、燃焼解析装置の各チャンネル間のサンプリング時間遅れがほとんどないことを確認している。

5.4 可視2色法と赤外2色法の比較

Fig.4 で求めたセンサーファクター、Fig.5 に示した可視域・赤外域4 波長の単色輻射エネルギー強さと OFT 出力の検定結果、Fig.6 および7 で示したセンサー受光部の汚損補正方法を考慮して、実測されたディーゼル燃焼火炎の温度時間履歴を算定した。Fig.11 および12は、機関回転速度1750rpm、正味平均有効圧Pme=8.30 bar の運転条件で、燃料噴射時期を上死点

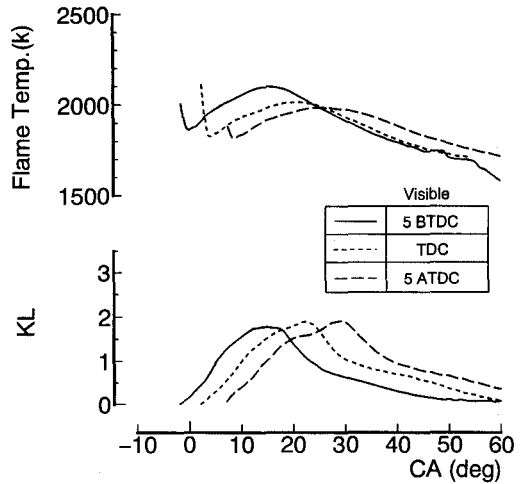


Fig.11 Change in time-histories of flame temperature and KL due to injection timing retard (Visible 2-color method)

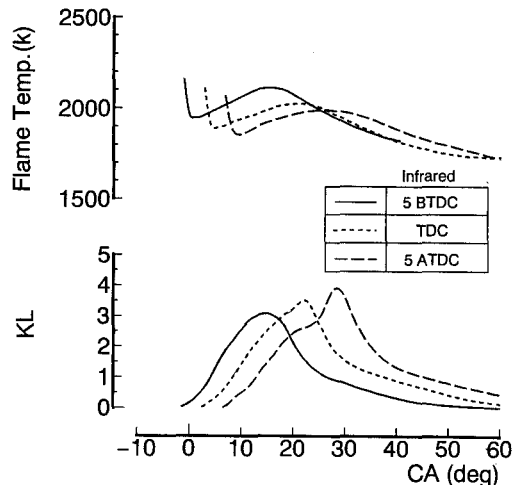


Fig.12 Change in time-histories of flame temperature and KL due to injection timing retard (Infrared 2-color method)

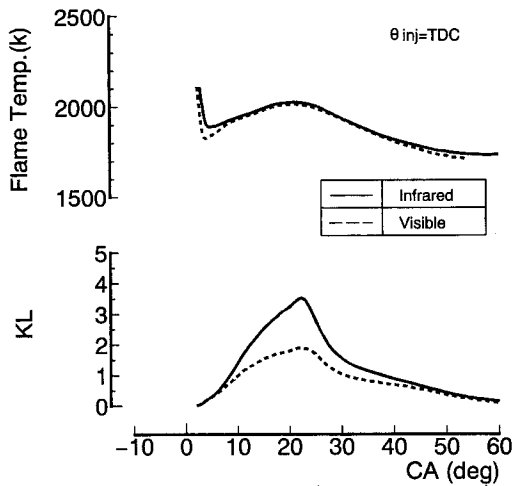


Fig.13 Comparison of temperature time histories between visible and infrared two-color methods

前5度、上死点、上死点后5度と噴射時期を遅延した場合の火炎温度およびすす濃度を代表するKL値の時間履歴の変化を、それぞれ可視2色法および赤外2色法により算定した結果を示す。また、Fig.13はそれぞれの上死点の結果を定量的に比較したものである。

Fig.13から分かるように、火炎温度計算結果は可視2色法と赤外2色法とで極めて良く一致しており、特に、燃焼過程中期の拡散燃焼最高火炎温度は0.5%以下の精度で一致している。なお、燃焼開始初期および燃焼期間末期では両者の火炎温度計算値に若干の差が見られるが、この原因として、これら部分でのOFT出力がかなり低く、かつサイクル毎にかなり変動すること、また、実測のOFT出力レベルが赤外2波長の方が高く可視2波長が低いことなどが考えられる。このことから判断すると、輻射エネルギー強さが大きいために計測されるOFT出力の大きい赤外2色法の方が計測精度は高いものと推定される。

一方、すす濃度のパラメータKL値は、赤外2色法による値が可視2色法による値より燃焼期間全体が高く、ピーク値は約2倍になっている。いずれの方法によってもKL値が一致することが望ましいが、式(2)の α の値に対して、可視域と赤外域で異なる値を採用していることなどを考えると、いずれの値が正確であるかは判断し難い。しかしながら、KL値の時間履歴の傾向は両者で一致しているから、燃焼過程におけるすすの生成・酸化率の時間的変化が判断できるし、Fig.11および12に示したように、それぞれの2色法において、運転条件に伴うすすの生成過程の変化を知ることができる。

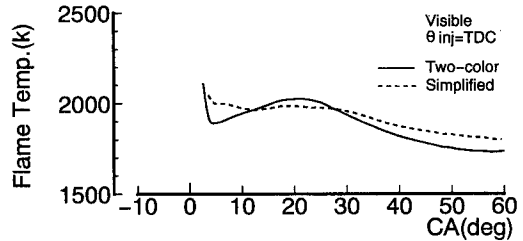


Fig.14 Comparison of calculated temperatures between simplified and precise two-color methods

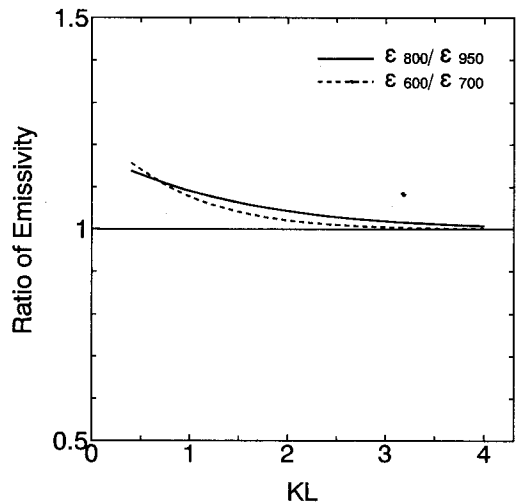


Fig.15 Relation between KL and emissivity ratio of the two waves

Fig.11および12に示した火炎温度およびKL値の時間履歴の噴射時期遅延に伴う変化は、極めて合理的である。すなわち、噴射時期を遅延するとともに、拡散燃焼時の最高火炎温度が次第に低下しており、このことが機関から排出される窒素酸化濃度の低下が推定されるし、また、KL値のピーク値が噴射時期遅延によって増加し排煙濃度が増加することが推定される。すなわち、窒素化合物とすすの典型的な背反関係が確認される。

5.5 2色法と簡易2色法の比較

Fig.14は式(4)の基づく2色法と式(8)に基づく簡易2色法による火炎温度時間履歴の計算値の比較を示す。ただし、簡易2色法の計算では、Fig.15に示すように、2波長の放射率の比 f は可視2波長、赤外2波長によってあまり変わらないし、また、KL値による大きな変化もないので、便宜上 $f=1.05$ の値を採用している。両者の火炎温度のレベルはほぼ一致しているが、時間

履歴の傾向が異なる。このことは、 f の値を一定としていることに起因している。すなわち、燃焼期間の KL 値の大きな変化、換言すれば f 値の僅かな変化が、火炎温度の時間履歴に大きな影響を与えていることが分かる。KL 値の変化が少ない予混合燃焼火炎の温度を計測する場合は、 f を一定と見做しても差し支えないが、本研究が対象とするディーゼル火炎のように、燃焼過程ですす濃度が大きく変化する場の火炎温度時間履歴を議論する場合には、この簡易 2 色法は適切でない。

6. むすび

光ファイバー温度計を用いて、ディーゼル燃焼火炎温度を計測する場合に生じる計測誤差因子を検討し、それらの誤差を除去するための方法を提案した。すなわち、黒体炉および標準センサーを用いたセンサー受光特性の正確な検定、センサーの汚損に基づく輻射エネルギー強さの補正、安定した出力信号の取得、2 波長データサンプリングの同時性の重要性を示した。

可視 2 色法と赤外 2 色法の比較から、火炎温度の計測精度を確認するとともに、一方、2 波長の輻射エネ

ルギー強さの比から簡単に火炎温度を推定する簡易 2 色法を提案し、この方法によればディーゼル火炎温度のレベルについてはほぼ推定できるが、火炎温度の時間履歴は評価できないことを明らかにした。

謝辞 本研究の推進にあたり、住友財団1993年度研究助成を戴いたこと、また日鉦計測システム(株)の三上順氏の協力があつたことを記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Matsui, Y., ほか 2 名, SAE paper No. 800970 (1980)
- 2) Yan, J., and Borman, G. L., SAE paper No. 891901 (1989)
- 3) Mohammad, I. S., and Borman, G. L., SAE paper No.910728 (1991)
- 4) 石田ほか 5 名, 機論, 58-555(B) (1992), 3482
- 5) 石田ほか 5 名, 機論, 58-555(B) (1992), 3489
- 6) 石田ほか 3 名, 長崎大学工学部研究報告, 24-43 (1994), 129