CO₂-4.3 μm バンド放射輝度を利用する燃焼ガス温度の測定[†]

松田 守弘*・鬼頭 完爾*

Measurement of Combustion Gas Temperature Using CO₂-4.3 μm Band Radiance

Morihiro MATSUTA* and Kanji KITO*

Measurement of gas temperature in an internal combustion engine is very important for studying the combustion process. The measurement is, however, difficult and many methods, so far reported, are almost always tested in laboratories and have difficulties for practical application.

In the present study, a method for the temperature measurement by measuring the radiance of CO₂-4.3 μm band (CO₂-4.3 μm band radiance method) is proposed and experimentally investigated for the accuracy and precision. The method has been found to be applicable for measuring the gas temperature in practical engines.

The main findings are as follows.

- (1) Spectral emissivity of CO₂-4.3 μm band, calculated from the statistical model, coincides with that experimentally obtained. It depends on the optical path length, total gas pressure, and CO₂ concentration or partial pressure. The combustion gas, therefore, can not always be regarded as a blackbody even under high CO₂ concentration.
- (2) The radiance-temperature calibration curves for the combustion gas can be obtained by calculation.
- (3) The calibration curves also depend on the optical path length, total gas pressure, and CO₂ concentration. However, if the measurement is restricted to the gas in internal combustion engines and 2~3% error is allowed for temperature calibration, the calibration curves can be regarded to depend only on the optical path length.
- (4) It has been experimentally clarified that the engine gas temperature can be measured within ±10% accuracy.

(5) The method provides useful temperature information in an internal combustion engine, informative to the analysis of the combustion process.

1. はじめに

一般に放射率が波長によらず一定で、しかもその値が既知である黒体や灰色体の温度測定は容易で、放射計でも比較的容易に測定することができる。それに対してガス体の温度測定は難しく、これまでいくつかの測定法（たとえば、スペクトル反転法¹⁾、二色法²⁾、超音波法³⁾、など）が報告されているが、ほとんどが実験室的で、実用には多くの困難を伴う。

最近左伯ら⁴⁾は、ガス中の CO₂ バンドにおける単色赤外線放射強度の測定による温度測定法を報告しているが、これはガス中の CO₂ 濃度が数 % 以上であれば黒体とみなせるという仮定に基づいている。しかし、放射率は濃度だけでは決まらず、光学的厚みや全圧、温度などによっても変わるため、厳密な温度測定は期待できないと思われる。

筆者らは、CO₂ 分子の分光放射率をバンドモデルの適用により求め、ガス中の CO₂ バンドの放射輝度の測定による温度測定法を検討した。すなわち、放射輝度と温度の関係（以後この関係を校正曲線と呼ぶことにする）をあらかじめ求めておき、対象ガス中の CO₂-4.3 μm バンド放射輝度から校正曲線により温度を求めるもので、本論文では、測定法の原理、エンジン燃焼ガスを対象としたときの校正曲線の求め方、当測定法の実験検証、および実機エンジン燃焼ガス温度測定などについて述べる。

2. 測定原理

温度測定対象が燃焼ガスのような気体の場合、その中に含まれている CO₂ 分子に注目する。CO₂ 分子は、赤外域にいくつかのバンドスペクトルを有するが、その中で最も強い (00°0)-(00°1) 間の振動・回転遷移で

[†] 第 15 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 51・8)

* (株)豊田中央研究所 名古屋市天白区久方 2-12

* Toyota Central Research and Development Laboratories, Inc., Nagoya

(Received August 31, 1976)

起る 4.3 μm バンドの放射輝度のみを測定する。そのために放射計の光電検出器の前に 4.3 μm バンドのみを透過する光学的なバンドパスフィルタを置く。そうすると、放射計の光電検出器からは次式で表わされる放射輝度 N_T に比例する電気信号が出力される。

$$N_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r_\lambda \tau_\lambda \varepsilon_{\lambda,T} d\lambda \quad (1)$$

ここで N_T は温度 T における CO₂-4.3 μm バンドの放射輝度 [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]、 r_λ は光電検出器の分光感度、 τ_λ は 4.3 μm バンドパスフィルタの分光透過率、 $\varepsilon_{\lambda,T}$ は温度 T における 4.3 μm バンドの分光放射率、 $e_{\lambda,T}$ は温度 T における黒体の分光放射輝度 [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$]、 (λ_1, λ_2) はバンドパスフィルタの透過波長範囲、 λ は波長 [μm] である。

そこで、(1)式を各温度について計算し、放射輝度と温度の関係、すなわち、校正曲線を求めておけば、放射計の光電出力より求まる放射輝度より対象の温度を求めることができる。

(1)式において、光電検出器の分光感度 r_λ とフィルタの分光透過率 τ_λ は、放射計が決まれば決まるし、黒体の分光放射輝度 $e_{\lambda,T}$ はプランクの式より求めることから、CO₂-4.3 μm バンドの分光放射率 $\varepsilon_{\lambda,T}$ さえわかれば、(1)式を計算して校正曲線を求めることができる。

3. CO₂-4.3 μm バンドの分光放射率

分光放射率をバンドモデルを使って求めるが、バンドモデルは Beer の法則から出発して、放射率をいくつかのバンドパラメータで表わすもので、各種研究されている⁵⁾。その中で CO₂-4.3 μm バンドに適用され、実測放射率とかなりよく合うのは、一様統計バンドモデルであるが、それによると、分光放射率は次式のように表わされる⁵⁾。

$$\varepsilon_{\lambda,T} = 1 - \exp \left[-\frac{S}{d} u \sqrt{1 + \frac{1}{4} \frac{(S/d)u}{(\gamma_N/d) \{ (B-1)p_{\text{CO}_2} + p_t \}}} \right] \quad (2)$$

ここで S は線強度 [$\text{atm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$]、 d は線間隔 [cm^{-1}]、 $u = p_{\text{CO}_2} l$ で光学的厚み [$\text{atm} \cdot \text{cm}$]、 γ_N は N₂ あるいは CO₂ と N₂ の衝突によるスペクトル線のひろがりの半値幅 [cm^{-1}]、 B は自己ブロードニング係数、 p_{CO_2} は CO₂ 分圧 [atm]、 p_t は全圧 [atm]、 l はガスの厚み [cm] である。

S/d 、 γ_N/d 、 B はバンドパラメータと呼ばれるもので、波長と温度の関数であり、それらの値がわかれば、(2)式より分光放射率を求めることができる。

Fig. 1 Calculated spectral emissivity of CO₂-containing gas, using experimental band parameters, at a temperature of 1200 K and a total pressure of 1 atm, for various optical path lengths and CO₂ concentrations

バンドパラメータについては、理論^{6),7)}と実験^{8),9)}による研究があるが、理論値は算出過程に仮定を設けており、それによる分光放射率と実測分光放射率との一致はあまりよくない。しかし、実験困難な高温領域の分光放射率算出には役立つので、後述の校正曲線を作る際のバンドパラメータとしては、1200 K までは国友らの実験値⁸⁾を、1200 K 以上は実験値がないので、Ben-Aryeh の理論値を使用することにした。

Fig. 1 にバンドパラメータの実験値を (2)式に代入して求めた分光放射率の一例を示す。佐伯らは CO₂ 濃度が 2.6% 以上であれば、黒体放射条件を満たすと考えているが⁴⁾、Fig. 1 のように分光放射率は光学的厚み u 、全圧 p_t および CO₂ 濃度 n_{CO_2} (または CO₂ 分圧 p_{CO_2}) に依存し、 u 、 p_t の組合せによっては CO₂ 濃度が 3% 以上でも放射率が 1 以下で、かならずしも黒体放射条件を満たすとはいえないと思われる。なお、Oppenheim らは、CO₂ 濃度が 100% で、 $u=1.07 \text{ atm} \cdot \text{cm}$ 、 $p_t=0.07 \text{ atm}$ 、 $u=1.37 \text{ atm} \cdot \text{cm}$ 、 $p_t=0.09 \text{ atm}$ 、 $u=2.08 \text{ atm} \cdot \text{cm}$ 、 $p_t=0.14 \text{ atm}$ 、 $u=2.33 \text{ atm} \cdot \text{cm}$ 、 $p_t=0.155 \text{ atm}$ の 4 ケースについて分光放射率を実測しているが⁹⁾、いずれも 1 以下で、また同一条件で (2)式より求めた分光放射率とかなりよく一致していることを確認している。

4. 校正曲線

校正曲線は (2)式から求まる分光放射率を (1)式に代入して計算することにより求まるが、フィルタの分

Fig. 2 Spectral transmittance of filter¹⁰⁾

光透過率 τ_{λ} , 光電検出器の分光感度 r_{λ} およびフィルタの透過波長範囲 (λ_1, λ_2) としては, 温度測定に使用する市販の赤外線放射計 (Barns Engineering Corporation 製モデル 12-550) の値を使用した. フィルタの分光透過率, 光電検出器の分光感度を Fig. 2, Fig. 3 に示す¹⁰⁾. また, フィルタの透過波長範囲は $\lambda_1=4.0 \mu\text{m}$, $\lambda_2=4.55 \mu\text{m}$ である.

(1) 式の右辺の積分計算は

$$N_T = \sum_i r_{\lambda_i} \tau_{\lambda_i} \varepsilon_{\lambda_i} \tau_{\lambda_i} \Delta\lambda \quad (3)$$

Fig. 3 Spectral response of detector¹⁰⁾

による. ここで, 各分光曲線 (Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 など) からの波長の読取り間隔 $\Delta\lambda=0.05 \mu\text{m}$ で, i は 1 から 11, すなわち $\lambda_1=4.0 \mu\text{m}$ から $\lambda_2=4.55 \mu\text{m}$ までを 11 分割して行った. なお, 黒体の分光放射輝度はハンドブック¹¹⁾の値を使用した.

(1) 式あるいは (3) 式より計算される放射輝度は,

(2) 式あるいは Fig. 1 からわかるように三つのパラメータ, p_i , p_{CO_2} (あるいは n_{CO_2}), l で規定され, 広範な条件下での温度測定を可能にするには, 三つのパラメータの多数の組合せによる校正曲線を必要とする. しかし, 三つのパラメータが決まらなると温度が求まらないことは実用的でない. 測定対象をエンジン燃焼ガスに限定し, すなわち p_i , p_{CO_2} , l の範囲を Table 1 のようにした場合, u を固定すると三つのパ

Table 1 Range of parameter

Parameter	Range
p_i [atm]	1~30
n [%]	3~15
p_{CO_2} [atm]	0.03~4.5
l [cm]	1~9

ラメータが変化しても, 放射輝度がわずかしかな変化せず, 放射輝度の中央値をその u での放射輝度としても, 温度校正誤差が小さいと予想される.

一例として $u=0.6 \text{ atm}\cdot\text{cm}$ について検討してみることにする. $u=0.6 \text{ atm}\cdot\text{cm}$ のとき, Table 1 より $1 \text{ atm} \leq p_i \leq 20 \text{ atm}$, $0.067 \text{ atm} \leq p_{\text{CO}_2} \leq 0.6 \text{ atm}$, $3\% \leq n_{\text{CO}_2} \leq 6.7\%$, $1 \text{ cm} \leq l \leq 9 \text{ cm}$ となり, 放射輝度は Fig. 4 に示すように幅をもった曲線になる. その幅の中央値をとると, 温度校正誤差は Table 2 のようになり, 校正誤差の平均値は $\pm 2.7\%$ と見積られる. そのほかの u についても同様の検討を行ったが, いずれも $\pm 2\sim 3\%$ となり, 予想どおり校正誤差が小さいことがわかった.

以上のようにしてパラメータが u だけの校正曲線を求めたが, その一部を Fig. 5 に示す.

1200 K で曲線が不連続であるが, これは前記のように, 1200 K まではバンドパラメータとして実験値を, 1200 K 以上は理論値を用いたためである. 1200 K でのこの程度のずれは, 前記校正誤

Table 2 Calibration error at $u=0.6 \text{ atm}\cdot\text{cm}$

Temp. [K]	Error*	
	[K]	[%]
1200	25	2.1
1300	30	2.3
1400	35	2.5
1500	40	2.7
1600	45	2.8
1700	50	2.9
1800	65	3.6

* $\pm$ error

Fig. 4 Radiance vs. temperature at $u=0.6 \text{ atm}\cdot\text{cm}$

Fig. 5 Calibration curves

差 $\pm 2 \sim 3\%$ 以下で、ほとんど問題にならない。

5. 温度測定実験

5.1 実験検証

当測定法の妥当性および精度を明らかにするために、CO₂ チャンバで設定温度と測定温度の比較を行った。

実機エンジンの条件 (Table 1) を考慮し、対象気体の CO₂ 分圧と共存気体としての N₂ 分圧の種々の組合せについて実験を行った。検証用 CO₂ チャンバは Fig. 6 に示すとおりで、内径は 30 mmφ、長さは 15 mm と 50 mm の 2 種類、両端にはサファイア窓がついている。真空ポンプでチャンバ内を排気した後、CO₂ と N₂ を所定の圧力で封入し、チャンバ内温度をヒータと熱電対 (0.53 mmφ クロメル-アルメル) でコントロールする。熱電対の指示温度が一定 (時間的に) になった後、チャンバからの CO₂-4.3 μm バンドの放射輝度を、サファイア窓 (厚さ 5 mm、透過率 0.83) を通して検定後の前記放射計で測定し、Fig. 5

Fig. 6 CO₂ chamber l : 15 or 50 mm

Fig. 7 Accuracy and precision of 4.3 μm band radiance method

の校正曲線を使って温度になおした。なお、ガスの厚みとしてはチャンバの長さを用いた。

測定温度と設定温度 (熱電対指示温度) の関係を Fig. 7 に示す。これより当測定法は $\pm 10\%$ の精度で温度測定ができると結論される。なお、この精度は、放射計自身の精度が $\pm 5\%$ で、熱電対による設定温度の測定精度が $\pm 3\%$ であること、また前記のように温度校正誤差が $\pm 2 \sim 3\%$ であることなどを考慮すれば、ほぼ妥当であると考えられる。

5.2 エンジン燃焼ガス温度の測定

前記のように当測定法の妥当性が確かめられたので、実機エンジンの燃焼ガス温度測定を行った。

エンジンは 18R 形で、側面から見た測定位置を Fig. 8 に示す。すなわち、主室内の吸気バルブと排気バルブ近傍の温度を測定するために、ピストン上下方向に直交する方向の 2 ヲ所にサファイア窓 (前記チャンバと同じ) を取付け、放射輝度を測定した。

燃焼条件をいろいろ変えて測定したが、測定位置が排気バルブ側のときの放射計出力波形と圧力計 (豊田工機製エンジン指圧計) 出力波形の一例を Fig. 9 に示す。このときの燃焼条件は、点火時期: 上死点前

Fig. 8 Measured points of 18R engine

Fig. 9 Output from radiometer and pressure transducer during an engine operation cycle. Spark timing: 30 deg. before top dead center (B.T.D.C.), air fuel ratio: 17/1, engine speed: 1800 r.p.m., time scale: 54.4 deg./div., amplitude: 2 V/div.

Fig. 10 Gas temperature vs. crank angle
0: top dead center

30°, 燃料対空気: 1 対 17, 回転数: 1800 r.p.m. である。Fig. 9 の放射計出力波形より CO_2 -4.3 μm バンドの放射輝度が、圧力計出力波形から全圧がそれぞれ求まる。 CO_2 濃度は鮎沢ら¹²⁾と類似の方法による測定により未燃ガス領域(上死点前)で 2%, 既燃ガス領域(上死点后 20°以上)で 12%, 未燃と既燃の中間領域(上死点から 20°まで)で 6% とわかっているのので, Fig. 5 より各クランク角での温度が求まる。そのようにして求めた温度経過を Fig. 10 に示す。これから上死点后 20°のとき最高温度 1800 K 程度であること、排気弁が開き始める上死点后 115°でも 1150 K 程度であることなどがわかり、今後のエンジン燃焼解析に役立つ温度情報が得られつつある。

なお、ほかの測定法によるクロスチェックは、適当な測定法がないため、まだ行っていない。

当測定法を実機エンジン燃焼ガスのような非一様光路(温度、 CO_2 分圧、 CO_2 濃度が一様でない対象)へ適用するには問題があるが、これまで実機エンジンの燃焼ガス温度を簡便に測定する方法がなかったために、不十分ながら測定したものである。

前記測定例では実験の都合上 Fig. 8 のようにピストンの上下方向に直交する方向から測定したが、火炎がピストンの上下方向に直交する方向へ伝ばんすることから今後はできるだけ一様光路に近づけるために、放射計の光軸を火炎伝ばん方向に直交すなわちピストンの上下方向と平行になるようにして測定を行う予定である。

6. おわりに

CO_2 分子の 4.3 μm バンドの分光放射率をバンドモデルの適用により求め、ガス中の CO_2 -4.3 μm バンドの放射輝度の測定による温度測定法を検討し、つぎのような結果を得た。

(1) 一様統計バンドモデルの適用により求めた分光放射率は、文献 9) に既報された実測放射率とかなりよく一致する。また分光放射率は、光学的厚み、全圧、 CO_2 濃度(あるいは CO_2 分圧)に依存し、高濃度でも黒体とみなせるとはかぎらない。

(2) エンジン燃焼ガスを対象としたときの校正曲線(放射輝度-温度)を計算によって求めることができた。

(3) 校正曲線も光学的厚み、全圧、 CO_2 濃度に依存するが、測定対象をエンジン燃焼ガスに限定し、 $\pm 2 \sim 3\%$ の温度校正誤差が許される場合は、光学的厚みにだけ依存するとみなすことができる。

(4) 実験検証により当測定法を使えば、 $\pm 10\%$ の精度で温度測定ができることを明らかにした。

(5) 実機エンジンの燃焼ガス温度測定を行い、エンジン燃焼解析に役立つ温度情報を得た。

当測定法によればエンジン燃焼ガスのような密閉容器内のガス体でも、赤外線透過窓を一方につけるだけでよいという利点があり、また、最近の赤外線放射計は、取扱いが比較的容易であることなどから、これまで難しかったガス体の温度測定が簡便に、しかも現場で行えるようになった。

しかし、温度などが一様でない対象、すなわち非一様光路での測定は、手前の低温領域での吸収や、後方器壁からの放射の影響を受けるなどの問題があり、より信頼しうる測定温度を得るためには、今後これらの問題を解決してゆく必要がある。

終りに、本研究に関し種々のご助言を賜った京都大学 国友孟教授、豊田中央研究所 森本主査、川本主任、高橋、片岡、所、大塚各位に感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 土屋: ナトリウム D 線反転法による気体温度の瞬間測

- 定, 日本化学雑誌, **84-4**, 300/306 (1963)
- 2) H.C. Hottel, et al.: Determination of the Temperature and Total Radiation from Luminous Gas Flames, *Industrial & Engineering Chemistry*, **4-2**, 166/175 (1932)
- 3) 山家, 他: 超音波による気体温度測定法, 日本機械学会論文集, **31-225**, 795/798 (1965)
- 4) 佐伯, 他: 赤外線ふく射法による燃焼ガス温度の測定, 日本機械学会講演論文集, **750-15**, 271/274 (1975)
- 5) 国友: 伝熱工学の進展, 203, 養賢堂 (1974)
- 6) W. Malkmas: Infrared Emissivity of Carbon Dioxide (4.3-μ Band), *Journal of the Optical Society of America*, **53-8**, 951/961 (1963)
- 7) Y. Ben-Aryeh: Spectral Emissivity Calculations by the Statistical Model Applied to the 4.3-μ Bands of CO₂ at High Temperature, *Applied Optics*, **6-6**, 1049/1055 (1967)
- 8) 国友, 他: 炭酸ガス 4.3 ミクロンバンドの狭域バンドモデルパラメータ, 第9回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 221/224 (1972)
- 9) U.P. Oppenheim, et al.: Statistical Model Applied to the Region of the ν₃ Fundamental of CO₂ at 1200 K, **53-3**, 344/350 (1963)
- 10) Calibration and Specification Data for Model 12-550 Spectral Master, Barnes Engineering Company.
- 11) M.A. Bramson: Infrared Radiation, A Handbook for Applications, 384, Plenum Press (1968)
- 12) 鮎沢, 他: ニサイクル機関の点火栓近傍および局所の混合比とガス組成の測定, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 742, 373/378 (1974)