

火炎近傍の非接触固体温度測定に関わる諸問題に関する一考

Some Consideration of Nonintrusive Thermometry for Solid Surface near Flame

平沢太郎*・鎌田祐一**・中村祐二***

Taro HIRASAWA, Yuichi KAMATA and Yuji NAKAMURA

(Received June 2, 2010)

It is important for the research and development on combustors to measure temperature of burner and its surrounding wall. In the present study, the influence of flame on radiation thermometry is examined spectroscopically for the case of measuring solid wall temperature near flames using the multispectral CCD camera and the spectrometer. The influences of vapor and flame reaction are shown to be specific error factors owing to flame. The magnitudes of those influences are, however, found to be quite different; while influence of the vapor molecular band emission is below 10 °C in the range of 500 to 600 °C, the influence of emission of flame reaction can be over 100 °C in the range of 700 to 800 °C in the case of narrow band like 10 nm. Since flame reaction is due to aerosol in surrounds and hard to predict, the measurement wavelength should exclude around 590nm (Na) and around 765nm (K) in the case of radiation thermometry based on relatively shorter wavelength.

Key Words: Nonintrusive Thermometry, Pyrometry, Flame Reaction

1. 緒言

燃焼器などの詳細な研究開発を行うにあたり、バーナやその周辺壁面の温度は、重要な計測要素である。特に、マイクロフレイムを形成するマイクロバーナでは、条件によってはバーナ先端が赤熱するほど高温になる^{1,2)}こともあるなど変化する温度範囲が広く、いっそう温度計測の要求が高くなる。しかし、マイクロフレイムを形成するマイクロバーナでは、バーナサイズが小さいため、熱電対などの接触による計測が困難である。そこで、放射温度計測といった非接触温度計測が不可欠となる。

しかし、マイクロフレイムでは、マイクロバーナ先端に火炎が近接することから、放射温度計測に与える火炎の直接的または二次的な影響を考慮する必要がある。このような検討は、マイクロフレイムに限らず、燃焼器などで保炎器やバーナ先端などの火炎周辺の壁面温度計測を放射温度計によって行う要望に応える上でも重要である。

熱放射の強度をトレーサとした非接触温度計測において、その正確な温度計測の障害になる主要要素として、測定対象物から検出器までの間に存在する雰囲気中の吸収・散乱の効果が挙げられる。雰囲気中の気体分子は吸収帯として作用し、赤外線領域における見かけの放射強度を下げ、

輝度温度の指示値は実際より低くなる。一方、燃焼ガスにより加熱されている被加熱物近傍では、燃焼反応起源の化学発光やすす（輝炎）の熱放射などの寄与で、測定波長によっては逆に測定温度の指示値が実際よりも高くなる場合がある。

固体であるすすからの熱放射場合、広い波長に渡って大きな寄与をするため、その影響を避けるのは現実的に殆ど不可能であるが、すすを形成しない火炎では、一般にその影響は無視できると考えられている。しかし、これは化学発光や吸収帯を避けた適切な測定波長を用いた場合に成り立つ仮定である。

この仮定を満たさない計測の影響は十分に明らかになっていない。特にこれら高温となる固体壁の放射温度計測には、比較的短い波長を利用することができる故のメリットもあり、その場合これら化学発光や吸収帯の影響を受けてしまう可能性がある。

本研究ではこのような火炎近傍で固体壁面の放射温度計測を行う際に、計測に与える火炎の影響について分光学的に検討を加える。計測実験の例を示しながら、火炎に起因する誤差要因の種類に応じて、その影響の程度を評価し、実際の計測において重要な誤差要因を特定することを目的とする。

* 中部大学工学部 (〒487-8501 春日井市松本町 1200)

Chubu University (1200 Matsumoto, Kasugai, Aichi 487-8501, Japan)

** 鎌田科学 (〒480-0303 春日井市明知町 402-12)

Kamata Science Works (402-12 Akechi-cho, Kasugai, Aichi 480-0303, Japan)

*** 北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

Hokkaido University (N13 W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628, Japan)

2. 熱放射による温度計測

固体表面の非接触温度計測を行う場合、通常対象物表面からの熱放射を黒体放射と仮定し、予め評価した材料固有の放射率 ε を用いて（灰色体近似）、観測される放射強度から温度を推定する。この場合、観測点における放射強度 I [λ , T] は固体の表面温度 T [K] と測定波長 λ [m] の関数として、下記の様なプランクの熱放射式で表すことが出来る。ここで、 h [J \cdot s] はプランク定数、 c [m/s] は光速、 k [J/K] はボルツマン係数である。

$$I[\lambda, T] = \varepsilon \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$

観測量である測定強度 I と測定波長 λ から対象物表面の温度 T を求める事が可能となるが、実際には光学系に使用されるレンズの透過率、センサの効率などの装置定数が観測値に乘算されるため、これらの値を予め調べておく必要がある。Fig.1 は完全黒体からの熱放射を仮定した場合の観測強度の波長毎（選択波長に関しては後述）の温度依存性を表したものである。

本研究で用いた CCD センサ（SONY 社製 ICX285AL）の様な、可視光から近赤外線領域に感度が限定されている場合、通常大気中の分子バンドによる吸収は無視できるため、この関係式から直接対象物の表面温度分布を算出する事が可能である^{3,4)}。

しかしながら、前述のように、センサと対象物の間に火炎が存在する場合には、燃焼生成物からの化学発光および吸収などが存在するために対象物表面の見かけの放射強度が変化し、誤った温度を算出する可能性がある。

3. 火炎の分光スペクトル

大気中で火炎の分光スペクトルの一例として、ブンゼンバーナ（RZ-830/RZ-850、新富士バーナ）を使用して LPG 火炎の分光スペクトルを、分光器（USB2000、オーシャンオプティックス）（感度帯：300-1100 nm、S/N 比：250:1、A/D 分解能：12 bit、露光時間：3 ms-65 s、スリット幅：5 μ m、波長分解能：2.5 nm）、集光用レンズ（74-UV Collimating Lens）（200-2000 nm）および光ファイバ P200-2-UV/VIS（ファイバ径 200 μ m）を用いて計測を行った。

火炎先端近傍において、露光時間 60 s の分光計測を 25 回繰り返し行い、その積算した分光スペクトルを Fig.2 に示す。920-1000 nm 付近の水蒸気の水分子発光以外に、約 590 nm のナトリウム (Na) および約 765 nm のカリウム (K) の炎色反応による輝線構造が見られる。

炎色反応は、鋭い線スペクトルとなることから、波長の選択によっては、狭帯域の放射温度計測に大きな影響を与えることが予想される。

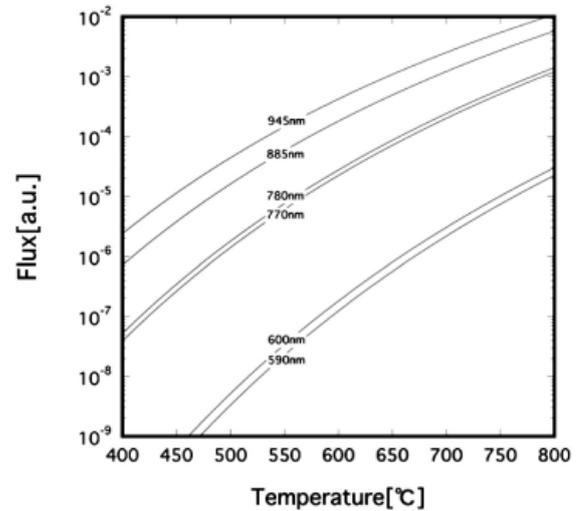


Fig.1 Blackbody model function

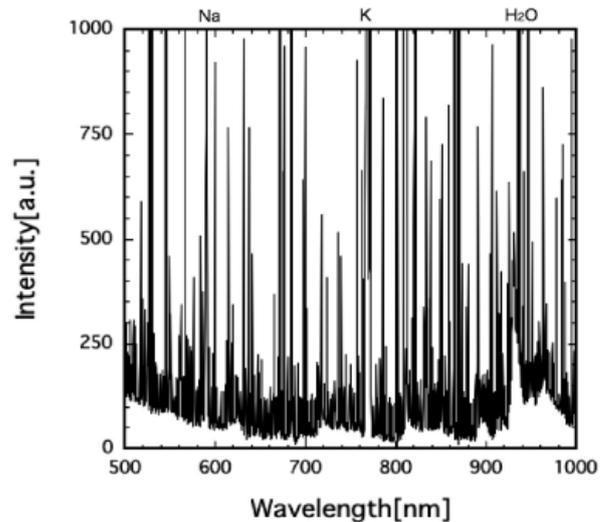


Fig.2 Sample spectrum of flame

発光成分のうち、炎色反応に関しては大気中のエアロゾルがその起源と予想されるが、その検証のため、雰囲気ガス中のエアロゾルを意図的に変化させ、炎色反応の発光強度の変化を測定することとした。

そこで、超音波加湿器（シー・シー・ピー社製 KX-51UP）を用いて火炎およびバーナ周辺に、雨水（中部大学周辺（愛知県春日井市）にて 2010 年 2 月 1 日、2 日に採取）、純水、水道水、黄砂（2010 年 3 月 22 日、23 日に採取）を混入した水道水、および Na と K の成分比が公開されている市販のミネラルウォーターを噴霧した。この状態で火炎の分光計測を行って得られたスペクトルデータのうちの純水および雨水を添加した分光スペクトルの例を Fig.3(a)、3(b) に示す。純水では炎色反応が微弱である一方、雨水では非常に強い

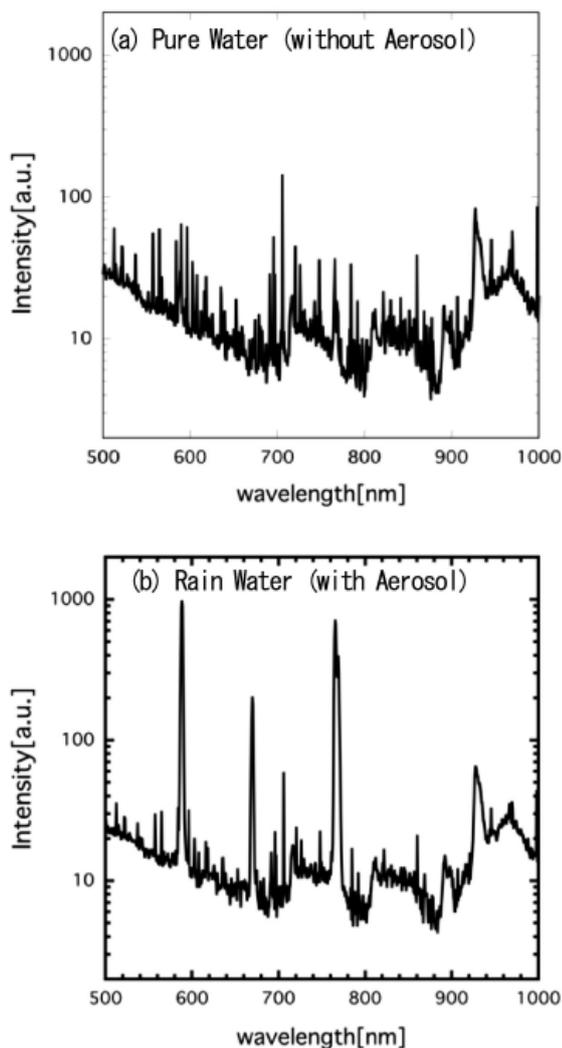


Fig.3 Sample of aerosol enhanced flame spectra

輝線が見られる事がわかる。

Na および K の輝線強度比をトレーサとしてミネラルウォーターの成分表（元素重量比）の値と比較し、外部から供給される成分との依存関係を調べた。その結果を Fig.4 および Table 1 に示す。Fig.4 から非常に強い相関（相関係数 > 0.99）があり、分光結果は初期の微量成分の影響を反映することが確認できる。

以上の実験により、火炎の炎色反応は、燃料が起源ではなく、雰囲気中のエアロゾルが起源であり、組成によりそのスペクトル強度が変化することが分かった。

一般的に Na と K の存在比は、浮遊しているエアロゾルの起源が海洋か大陸かの違いであると予想され、黄砂のスペクトルの K/Na 強度比が雨水をさらに上回っている事からもわかるそのことが伺える。これらの結果は季節による植生や都市部における人工的な化学物質など、一つの考え方で分類するのは極めて困難である。実際これまで大気サ

Table 1 Abundance ratios and observed intensity ratios of water samples

sample	Abundance Ratio [K/Na; Wt%]	Intensity Ratio [K/Na]
A	0.13	0.25
B	0.16	0.25
C	0.30	0.43
D	0.43	0.53
E	0.53	0.55
F	0.65	0.74
G	0.93	0.70
H	2.5	2.2
tap water	-	0.19
Ambient	-	0.44
rain	-	0.59
yellow sand	-	0.73

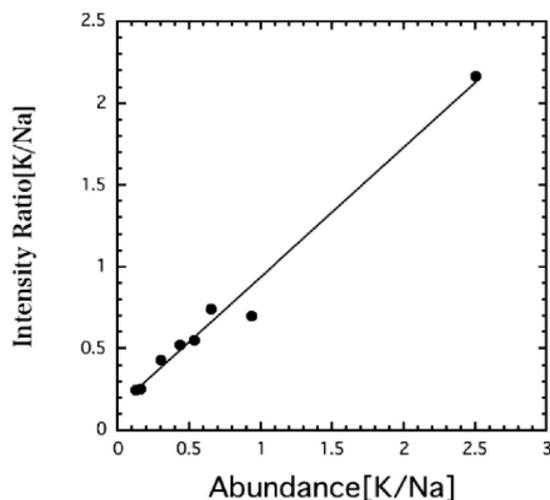


Fig.4 Correlation plot of intensity ratio v.s. abundance ratios

ンプリング等の観測によって得られた結果から組成を比較すると、場所や時期に測定方法などによって最大で5から10倍ほどのばらつきがあるため⁵⁻¹³⁾、定量的に予測するのは困難であると考えられる。

4. 2色分光光学系を用いた2次元温度計測と化学発光の影響

分光スペクトル中に見られた Na/K の炎色反応および水蒸気からの化学発光の影響が、2次元温度計測に対してどの程度の影響を与える可能性があるかを定量的に調べるため、バーナにより加熱された金属表面から得られる放射成分のうち、各測定波長の2次元強度分布を測定した。

分光器によって検出された炎色反応による Na および K に対応した2つの輝線を含む 590 nm (FWHM = 10 nm) 及び

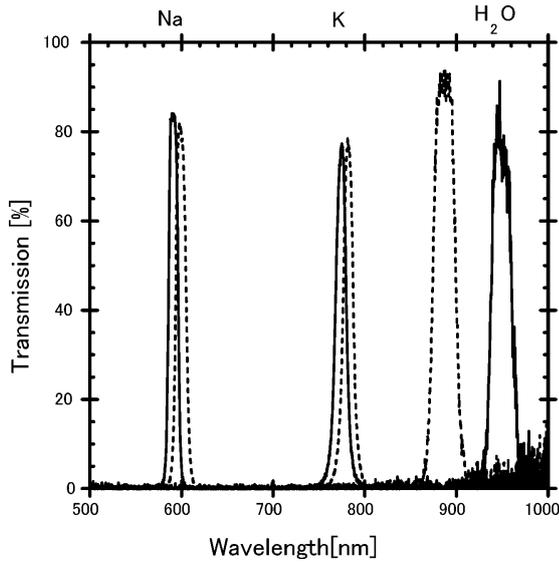


Fig.5 Transmission spectra of bandpass filters

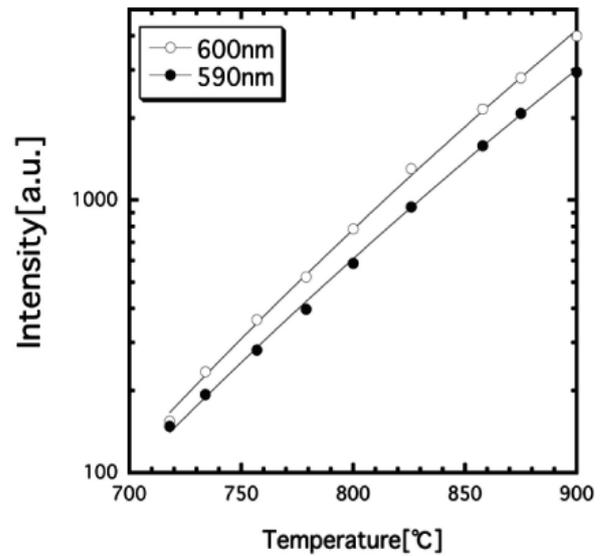


Fig.6 Example of calibration curve fitting

770 nm (FWHM = 10 nm) と、波長依存性の影響が最小限になるようこれらに近接した波長である 600 nm (FWHM = 10 nm) 及び 780 nm (FWHM = 10 nm) を、それぞれ 2 色分光光学系に組み込み同時に撮影することにより、それら炎色反応による温度計測への影響を調べた。同様に、水蒸気分子発光の影響を調べるために、885 nm (FWHM = 30 nm) および 945 nm (FWHM = 10 nm) の同時計測を行った。測定に用いた 6 種類 (3 組) のバンドパスフィルタの分光透過率曲線を Fig.5 に示す。

これらのバンドパスフィルタを 2 色光学系カメラ (MSI2/SONY ICX285AL、フォトロン) に取り付けて、前述の黒体炉を用いて温度較正を行った。この際、2 色光学系カメラには、2 種類のレンズ、25 mm / F1.3 の CCTV レンズ (25 mm / F1.3, Computar) および 105 mm / F2.8 のマクロレンズ (Ai AF Micro Nikkor 105 mm / F2.8, NIKON) を使用した。

温度 T におけるセンサ上での表面輝度は、単位時間当たり、1 ピクセル当たりの強度 I [counts/sec/pixels] で表す事ができ、ウィーン領域 ($\exp [hc/\lambda kT] \gg 1$) においては中間数で良く再現できる。I = aT^b として Fig.6 に示す例のようにフィッティングを行うと、それぞれ Table 2 のようなモデルパラメータで測定値が再現できる。これらのパラメータを用いてセンサ上の単位時間当たりの強度から温度値を算出可能である。

Fig.7 (a) に示すように水平に設置したアルミ (厚さ 2.0 mm) およびステンレス (厚さ 0.3 mm) の薄板を、上方から斜め下向きに前述のバーナで加熱し、上方より 2 色分光光学系で撮影を行った。これらの画像を、前述の温度較正関数を用いて等価な輝度温度分布に変換したのが Fig.7(b)-(d) である。

Table 2 Model parameters of temperature calibration (Blackbody furnace R2 [Ambient to 1100 °C], CHINO)

wavelength	a	b	lens
590nm	2.31E-37	13.58	25mm
600nm	2.29E-39	14.31	25mm
770nm	7.28E-33	12.32	25mm
780nm	2.16E-32	12.16	25mm
885nm	3.39E-37	14.09	25mm
945nm	1.13E-34	13.19	25mm
885nm	9.07E-30	11.38	105mm
945nm	6.36E-28	10.68	105mm
590nm	4.36E-43	15.53	105mm
600nm	1.13E-42	15.44	105mm

次に、鉛直上方に向けてマイクロフレームを形成させたステンレス製のマイクロバーナ (外径: 1.0 mm、内径: 0.7 mm) 先端の温度計測を、水平方向からの観測により行った。燃料はマイクロバーナ先端の温度が比較的高温になる水素とした。

Fig.8(a)、8(b) はマイクロバーナ先端温度を 945 nm、885 nm、590 nm、600 nm の 4 つの波長帯について測定し、これらを輝度温度に変換したもので、この図より Na の炎色反応の影響が他に比べて著しいことが分かる。

これらすべての波長での計測結果と放射温度計測に及ぼす影響を評価するため、Fig.7 および Fig.8 中の □ で囲んだ領域の強度と等価な輝度温度の平均値および波長シフトによる差分の値をまとめたものを Table 3 に示す。

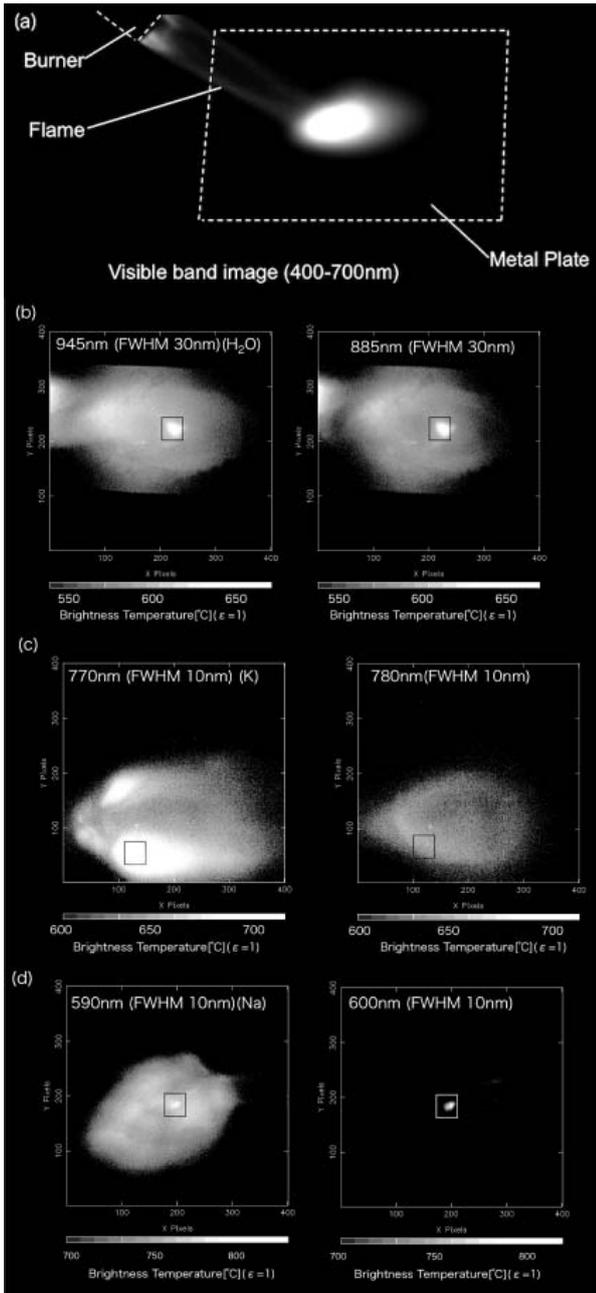


Fig.7 Equivalent brightness temperature distributions in the various wavelength. (a) visible image (40-700 nm), (b) 945 nm/885 nm, (c) 770 nm / 780 nm, (d) 590 nm / 600 nm

これらの結果から、放射温度計測における、燃焼ガス中の水蒸気の化学発光影響は 10℃ 以下と比較的小さいが、放射温度計測の選択波長によっては、炎色反応の影響により 100℃ もの差が生じることがわかる。

これより、炎色反応の特徴として、1) ウィーン領域では、波長の短い炎色反応の輝線は、水蒸気などの化学発光に比べてその影響が大きくなる、2) 炎色反応は鋭い線スペクトルとなることから、狭帯域の波長選択によっては、その影

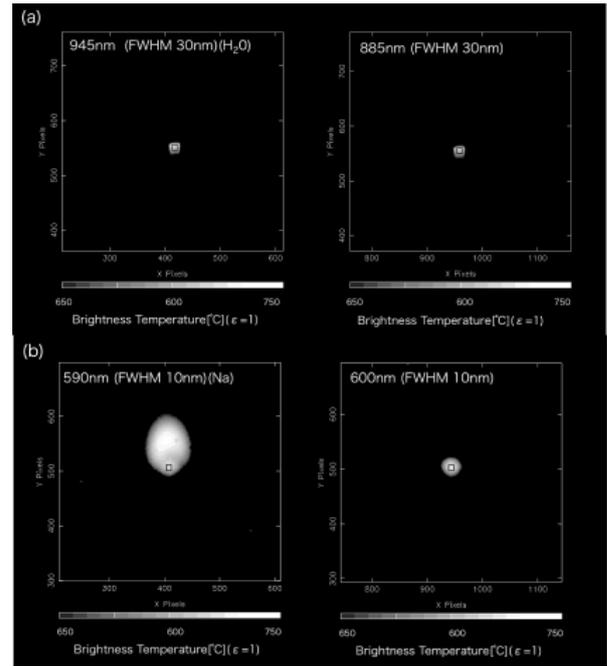


Fig.8 Equivalent brightness temperature distributions of microburner

Table.3 Effects of flame reaction and molecular band emission

λ	FWHM	Intensity [a.u.]	Temperature [°C; $\epsilon=1$]	δT [°C]	δI [%]	Intrusive factor	Object
945nm	30nm	560	608	+8	22	H ₂ O	SUS304 Plate (t = 0.3mm)
885nm	30nm	460	600	-	-	-	
770nm	10nm	1010	720	+110	460	K	Al Plate (t = 2.0mm)
780nm	10nm	180	610	-	-	-	
590nm	10nm	350	770	+90	290	Na	Al Plate (t = 2.0mm)
600nm	10nm	90	680	-	-	-	
945nm	30nm	2000	717	+1	2	H ₂ O	Microburner ($\phi = 1.0$ mm)
885nm	30nm	2800	716	-	-	-	
590nm	10nm	100	720	+13	50	Na	Microburner ($\phi = 1.0$ mm)
600nm	10nm	110	707	-	-	-	

響が大きくなる、ことが挙げられる。したがって、計測に際し、炎色反応による発光の影響はより留意する必要があることが分かる。

5. 結論

火炎近傍で固体壁面の放射温度計測を行う際に、計測に

与える火炎の影響について分光学的に検討を行った。その結果、火炎に起因する誤差要因として、水蒸気および炎色反応が確認された。しかし、これらが温度計測におよぼす影響の程度は大きく異なり、水蒸気の化学発光の影響は 500 ~ 600 °C 域で 10 °C 以下であったのに対し、炎色反応の影響は 10 nm とした狭帯域バンドの仕様では、700 ~ 800 °C 域で 100 °C 以上にもなることがあることが分かった。

主な炎色反応の波長は 590 nm 付近（ナトリウム）、および 765 nm 付近（カリウム）であるため、炎色反応が影響をおよぼすのは、比較的短波長側での放射温度計測である。しかし、測定対象物である固体壁面からの熱放射による輝度温度を測定する場合、その温度が高くなるにつれて最適な観測波長は原理的には短波長側にシフトしてゆくため、比較的短い波長を利用する故のメリットもあるため、比較的短波長を使用した測定では、測定波長にこれら炎色反応の輝線スペクトルを含まないよう特段の注意が必要である。

雰囲気中のエアロゾルを変化させた実験により、火炎の炎色反応は、燃料が起源ではなく、雰囲気中のエアロゾルが起源であり、組成によりそのスペクトル強度が変化することが実証された。エアロゾルなどの形で存在する大気中の化学物質は、定量的な予測は困難であるため、放射温度計測を行う場所での炎色反応の影響の程度も予測は困難である。そのため、実際上は、火炎近傍での固体壁面の放射温度計測においては、炎色反応が生じる可能性のある波長を選択しないようにするほかない。この影響は、特に壁面温度が火炎温度に対し相対的に低温である場合に顕著であると予想される。

謝辞

本研究は独立行政法人科学技術振興機構の戦略的国際科学技術協力推進事業の委託研究として実施した。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 1) T. S. Cheng, Y.-C. Chao, C.-Y. Wu, Y.-H. Li, Y. Nakamura, K.-Y. Lee, T. Yuan, T.S. Leu, “Experimental and numerical investigation

- of microscale hydrogen diffusion flames”, Proceedings of the Combustion Institute, 30-2 (2005) 2489-2497.
- 2) L. M. Matta, Y. Neumeier, B. Lemon, B.T. Zinn, “Characteristics of microscale diffusion flames”, Proceedings of the Combustion Institute, 29-1 (2002) 933-939.
- 3) M. V. Zombeck’s, “Handbook of Space Astronomy & Astrophysics”, 2nd edition (1990).
- 4) G.B. Rybicki and A.P. Lightman, Radiative Processes in Astrophysics (1979) 15-27
- 5) L. Makra, I. BORBÉLY-Kiss, E. Koltay and Sutikno, “Analysis of Elemental Composition of Atmospheric Aerosol in Indonesia”, Acta Climatologica Universitatis Szegediensis, Tom. 32-33 (1999) 65-76.
- 6) P. R. Nair et al., “Chemical composition of aerosol particles over the Arabian Sea and the Indian Ocean regions during the INDOEX (FFP-98) cruise-Preliminary results”, Current Science (Supplement) 80-10 (2001).
- 7) I. F. Al-Moman et al., “Chemical composition of eastern Mediterranean aerosol and precipitation: Indications of long-range transport”, Pure & App.Chem., 69-1 (1997) 41-46.
- 8) B. L. W. Hoflich et al., “Chemical composition of individual aerosol particles from working areas in a nickel refinery”, J. Environ. Monit., 2 (2000) 213-217.
- 9) V. P. Ivanov et al., “Chemical Composition of the Surface Layer of Atmospheric Aerosol of the Baikal Region Studied by Means of Secondary Ion Mass Spectrometry”, Chemistry for Sustainable Development 12 (2004) 165-173.
- 10) M. Nishikawa and S. Kanamori, “Chemical Composition of Korea Aerosol (Yellow Sand Dust) Collected in Japan”, Analytical Science, 7 Supplement (1991) 1127-1130.
- 11) H. Tervahattu et al., “Composition and origins of aerosol during a high PM10 episode in Finland”, Boreal Environment Research, 9 (2004) 335-345.
- 12) V. Malakhov et al., “Determination of the Phase Composition of Atmospheric Aerosol Using the Reference-Free Method of Differentiating Dissolution”, Chemistry for Sustainable Development, 10 (2002) 615-622.
- 13) S. M. Kreidenweis, M. D. Petters and P. J. DeMott, “Single-parameter estimates of aerosol water content”, Environ. Res. Lett., 3 (2008) 035002.