

H&B 2 色法を用いた高速度燃焼温度計測

○臼井寛之（株式会社ノビテック）
三井健司（有限会社三井オプトロニクス）

H&B two-color temperature radiometer for luminous flames by high-speed cameras

Hiroyuki USUI (Nobby Tech. Ltd.)

Kenji MITSUI (Mitsui Optronics Ltd.)

キーワード：高速度カメラ，温度計測，2 色法

Keywords: High-speed camera, Temperature measurement, 2 color temperature radiometry

We have studied a two-color temperature radiometry for luminous flames by color high-speed camera instead of film camera. This system is based on the temperature measurement theory by Hottel & Broughton, and using a single-sensor high-speed camera measures the temperature of subjects by calculating the brightness temperature of luminance of two wavelengths such as red and green. This theory can measure the temperature and KL factor also. This paper discusses the result of Hottel & Broughton two-color temperature radiometry.

1. はじめに

放射率による補正を実施せずに真温度に近い温度計測が可能な 2 色温度計測法は、各種分野での高温計測に用いられている。2 色温度計測法は、基本的には Planck の放射則を展開して温度を得るものであるが、計算式の展開において 2 通りの方法が現用されている。一方は、主に溶融金属の温度計測等に用いられている Ratio Temperature 法で、被検体の 2 波長における放射の強さの比から真温度を知る 2 色法として我が国では 1965 年頃に茨城大学等によって紹介された[1]。他方は、燃焼ガスの真温度を計測するために用いられ、燃焼場に存在するススの 2 波長における輝度温度を計測し、それから真温度と KL 値と称するススの濃さを算出するもので 1932 年に MIT の Hottel と Broughton によって発表され[2]、1974 年頃には東工大によりディーゼルエンジン内の温度計測に応用されている[3]。1978 年に東京で開催された第 13 回 ICHSPP では、フィルム式高速度カメラでディーゼルエンジン内部の燃焼状況を撮影し、その映像からエンジン内部の燃焼温度とススの分布を計測したと報告されている[4]。その手法はその後多く踏襲され、内燃機における燃焼ガスの温度とスス濃度計測の雛形となっている。

しかし、フィルム式高速度カメラによる 2 色温度計測では、撮影画像のフィルム濃度が現像の化学的条件によって一定しないことが不都合である。同じ条件で撮影された画像であっても、現像薬液の濃度や温度によって黒化度が異なるため、撮影時に標準温度ターゲットの同時記録が要求されることになる。然るに高速度撮影時間は秒単位時間以下であるため、黒体炉や温度標準電球の温度を変化させながら同時記録することはできない。それに変わる方法として考案されたのが、温度標準の前で段階変化する ND フィルターを回転させたものを、画像と同一フィルムに撮影し現像後に温度換算する手法である。

近年、フィルム式に代わり多用される半導体画像センサー式高速度カメラシステムは、記録から解析処理に至る間の再現性が安定しており、デジタル処理技術と組み合わせることにより、Ratio2 色温度法による高速温度現象の解析や、Hottel&Broughton 2 色温度法による燃焼ガスの温度分布とスス分布の高時間分解能解析がより容易になった。

ここでは、高速度カメラの撮影画像から Hottel&Broughton 2 色温度法（以下 H&B2 色温度法と記す）により燃焼ガスの温度分布とスス分布の計測について報告する。

2. 測定の原理

H&B2 色温度法の基礎となるものは、燃焼場に存在するスス（Soot）の 2 波長における輝度温度を計測し、それからの演算処理の結果として真温度と KL 値を求めるものである。KL 値はススの濃度と燃焼場の厚さの積で、ススの分布を知る場合に必要とされる。

波長 λ の単波長（Monochrome）における物体の放射エネルギーと真温度の関係は、Planck の放射則で得られるが、3000Kelvin 以下の温度計測域では Wien の近似方程式が使用でき(1)で表される。

$$M_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \dots\dots\dots(1)$$

ここで M_{λ} ：放射の強さ、 λ ：波長 μm 、 c_1 ：第一放射定数 $= 2\pi c^2 h = 3.7403 [\text{J}/\text{m}^3]$ 、 c_2 ：第 2 放射定数 $= c h/k = 14387.69 [\mu\text{m K}]$ 、 T ：真温度（Kelvin）、 ε_{λ} ：温度 T における該当物体の波長 λ における放射率、 C ：真空中の光の速度、 h ：プランクの定数、 k ：ボルツマンの定数である。黒体においては真温度と輝度温度は同一値を示すが、非黒体については、輝度温度は真温度と異なり、波長 λ における輝度温度 T_b の物体からの放射の強さは(2)式で表現される

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T_b}} \dots\dots\dots(2)$$

当式を展開して、ある波長の放射の強さを測定することにより、その波長の輝度温度を得る。真温度と輝度温度の関係は(3)のように表される。

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T_b}} = \varepsilon_{\lambda} \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \dots\dots\dots(3)$$

KL 値は炎の吸収係数であり、放射率（数値的に＝吸収率）と燃焼場の厚さの積であるので、燃焼場におけるススの量をあらわす。これより波長 λ における放射率は(4)式で表される。 α は東工大では 1.38、Hottel と Broughton では 1.39 とされる定数である。

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - e^{-\frac{KL}{\lambda^{\alpha}}} \dots\dots\dots(4)$$

(3)式と(4)式を展開して(5)式を得る。

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_b} + \frac{\lambda}{C_2} \ln(1 - e^{-\frac{KL}{\lambda^{\alpha}}})} \dots\dots\dots(5)$$

2 つの未知数である真温度 T と KL 値の算出方法は、先に KL 値を算出し、さらに KL 値とどちらかの波長の輝度温度から真温度を求めるものである。もちろん真温度を先に求めてから KL 値を算出してもよい。KL 値を先に求め、それより真温度を算出する方法は以下の通りである。

λ_1 波長における輝度温度を T_1 、波長 λ_2 における輝度温度を T_2 とすると、(6)式が成り立つ。

$$\frac{1}{T_1} + \frac{\lambda_1}{C_2} \ln(1 - e^{-\frac{KL}{\lambda_1^5}}) = \frac{1}{T_2} + \frac{\lambda_2}{C_2} \ln(1 - e^{-\frac{KL}{\lambda_2^5}}) \dots\dots\dots(6)$$

この式からデータを 2 分法等により計算して KL 値を得、得た KL 値を (5) 式に代入すれば真温度 T が求められる。

3. 高速カメラによる H&B2 色温度法

3-1. 温度計測に適した高速度カメラ

H&B 2 色温度法による高速温度分布の計測は、2 板式高速カメラ、2 分岐光学系を装着した高速度カメラ、またはカラー高速カメラにより実施が可能である。2 板式高速カメラはレンズからの入射光をプリズムまたはミラーで分岐し、それぞれ別の干渉フィルターを通して 2 つの CCD または C-MOS センサーで受光するもので、イメージ・インテンシファイヤをカップリングすることも可能である。2 波長を自由に選択できる、感度を自由に設定できるというメリットがあるが 2 つのセンサーの分光特性を厳密に合わせる必要がある。2 分岐光学系もレンズからの入射光を 2 分岐し、それぞれの干渉フィルターを通した 2 波長の画像を 1 つのセンサーの受光エリアを 2 つに分割して受光記録するもので、干渉フィルターにより波長と半値幅を厳密に選択できる、同一センサーで受光するので分光感度差が少ないというメリットがある反面、感度が低くなるという問題がある。通常カラー高速カメラを使用する方法は、単板センサーの 2 つの色の濃度出力を使用するもので簡易であるが、計測 2 波長の半値巾が広くなり中心波長の設定に分析知見が必要となる。

高速度カメラによる H&B 2 色温度法計測は、フィルムカメラの現像処理のような不安定なプロセスがないため、より精度の高い温度計測を、より容易に実行できる可能性を有しているが、現状技術の高速度カメラ特有の問題点に留意しなければならない。測温域は、画像センサーがシリコン半導体によって構築されているので分光感度がおおよそ 400～1100nm になり、センサーや関連回路の S/N を考慮すると検知可能な温度範囲は 900℃程度以上ということになり上限は制限を受けない。

高速 H&B 2 色温度計測では、高速カメラは基本的に輝度高温計のセンサーとしての機能が要求されるため、カメラの性能として必要な事項は、(1) 濃度出力の繰返し精度が高いこと、(2) 分光感度と濃度出力が環境変化に対する安定性があること、(3) 入射に対する濃度出力のリニアリティ精度が高いことであるが、基本として(4)エッジエンハンス等の画像処理が施されていないことが必要である。

3-2. 温度校正

カメラの濃度出力を原データとして温度計測を実施するためには、カメラの濃度出力を温度標準で校正する必要がある。フィルム式高速度カメラによる H&B 2 色法温度計測では、現像条件による繰返し誤差を避けるため、温度標準となる黒体炉や温度標準電球の前でステップレベルの ND フィルターを回転させて被写体と同時撮影をするか、2 重撮影しその出力を輝度温度に換算することにより校正が実行された。

環境温度的に安定化が容易な高速度カメラでは、出力値の繰返し精度が充分期待できるため、一度校正を実行すれば長期間その条件が保持され、より容易に安定した温度計測の実行が可能である。

カメラ出力を温度標準で校正する方法としては、黒体炉と熱電対、黒体炉と光高温計を使用することが一般的と考えられるが、2200Kelvin 以上に達する燃焼温度の校正に耐えうる黒体炉や熱電対の利用が困難なので一般的でない。現実的には、輝度温度で校正されたタングステンリボン電球

を使用することが適切であると考えられる。輝度温度標準電球は、その電球固有の波長で較正されているので、高速度カメラを較正する場合は、計測に使用する 2 波長の実効波長における輝度温度に換算することが必要となる。一般的に、温度標準電球のフィラメントにはリボン状のタングステンが使用されており、タングステンの可視域における各温度の放射率は過去に詳細な計測が成されたデータが MIT から報告されているので、これを用いて所望の波長の輝度温度を算出すること可能となる。

4. 温度計測実施例

4-1. 実施システム

H&B 2 色温度法による高速温度分布を高速度カメラで容易に実施する例として、カラー高速度カメラにより、燃烧物の撮影と温度解析を実施した。使用したカメラは Vision Research 社の PhantomV4.3 を使用し、レンズはマイクロニッコール 105mm f 2.8 を装着した。

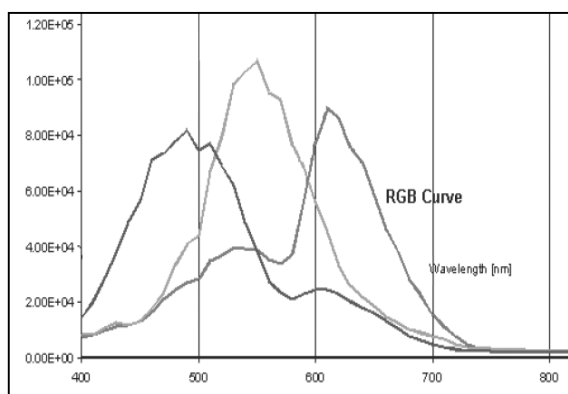


Fig1. Spectral response of PhantomV4.3

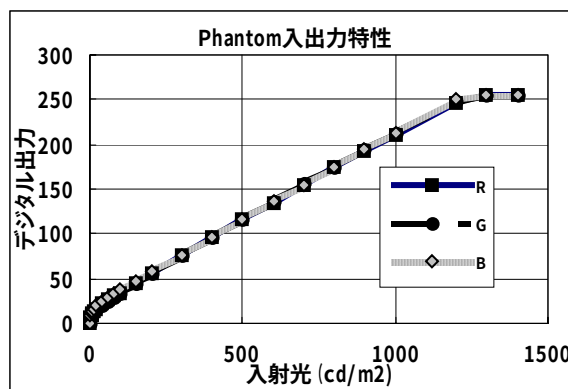


Fig2. Linearity characteristics of PhantomV4.3

Fig1 は PhantomV4.3 の分光感度特性である。計測には G チャンネルと R チャンネルを使用するとして、その中心波長を算出すると、各々 546nm と 596nm となった。Fig2 は PhantomV4.3 の入射光に対する濃度出力の結果である。この結果から、PhantomV4.3 は温度計測に十分使用できるリニアリティを有しているといえる。タングステン温度標準電球の較正波長が 662.4nm における輝度温度であるので、これを 546nm と 596nm 波長における輝度温度に換算したうえ、使用カメラをヒートランしたのち輝度温度較正を実施した。このカメラを使用して、ガスライター（ボタンガス）の火炎を撮影し、その温度分布と KL 値の分布状況を観察した。

中心波長と較正データを設定した三井オプトロニクス社製 2 色温度計測ソフト「HS-Thermera」に撮影画像を読み取り、処理法で「2 色温度 (H&B)」を選択すると、ソフトが各画素における出力値から両波長の輝度温度を算出し、さらに 2 色温度処理を実行して、真温度と KL 値を表示する (Fig3)。

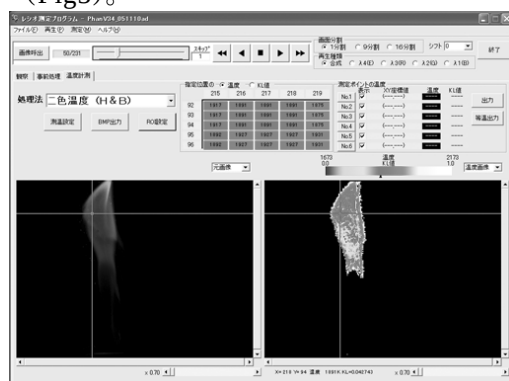


Fig3. Temperature measurement by HS-Thermera

Fig4 に、火打石式ガスライターの点火までの、元画像と温度分布画像および KL 値の時間経緯を示す。

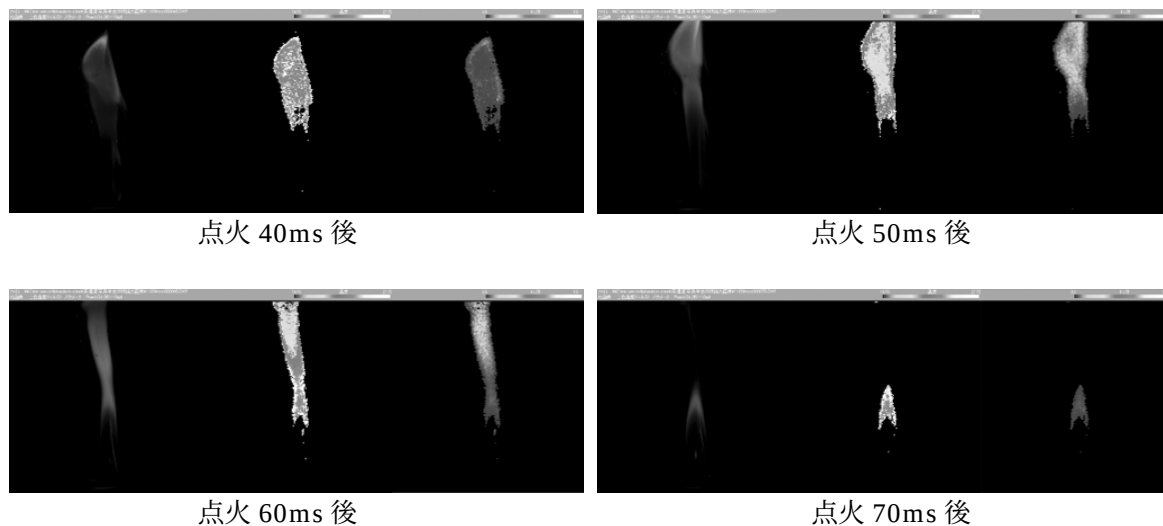


Fig4. Temperature and KL distribution of gas lighter which used the high-speed camera
(Left: Original image, Middle: Temperature image, Right: KL image)

5. 結論

カラー高速度カメラの撮影画像から、Hottel と Broughton の論文が示すガス燃焼の真温度計測と KL 値の分布が計測可能であることを確認した。デジタル画像からの H&B 2 色法による温度計測では、運用面の利便性の向上、温度計測までの手間・時間の省略、撮影毎の校正の不要など多くの利点が挙げられる。今回はガスライターの炎の温度分布計測についての計測例を示したが、当システムは内燃機関特にディーゼルエンジン内の温度分布とススの分布の計測について有効であり、エンジンの燃焼効率の向上と有害物質の排出低減のための研究活動に役立つものと信じる。

参考文献

- [1] 江森康文, 計測と制御, 4, 10, pp.655-63 (1965).
- [2] H.C.Hottel & F.P.Broughton, Industrial and Engineering Chemistry, 4,2 ,pp.166-74 (1932).
- [3] 松井幸雄,神本武征他, 日本機械学会論文集,44,377, pp.228-37 (1978).
- [4] Y.Matsui,T.Kamimoto 他,Proceeding of 13th ICHSPP,pp688-91