



近赤外 2 色法による中高温域温度計測の評価*

鎌田 祐一¹⁾, 平沢 太郎²⁾, 中村 祐二³⁾

Evaluation of Measurement in Mid-High Temperature Range by Near Infrared Two-Color Imaging Pyrometry

Yuichi KAMATA, Taro HIRASAWA, Yuji NAKAMURA

ABSTRACT

The thermal visualization based on two-color in near infrared range has been achieved by developing a thermal imager system built up of multi-peak optical filter and color CCD camera. The present technique enables two-color thermal imager to measure lower temperature ($>500^{\circ}\text{C}$) with higher spatial resolution, compared with traditional two-color thermal imagers. The performance of the prototype thermal imager is evaluated in the present paper. The upper limit of repeatability at around 1000°C has been shown to be $\sim 3^{\circ}\text{C}$ and $\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ (1σ level) with the spatial resolution of $\sim 10\mu\text{m}$ and $\sim 300\mu\text{m}$, respectively. In addition, measurement of high temperature machining of stainless steel with ceramic tool tip is performed to examine the advantage of the present technique. The maximum temperature of tool tip is shown to be $\sim 680^{\circ}\text{C}$ by the prototype thermal imager, while it is $\sim 300^{\circ}\text{C}$ by the infrared thermography based on the wavelength of $5\mu\text{m}$. The observed inconsistency is interpreted to be because of not only the emissivity independency but also the higher spatial resolution by the present technique.

Keywords : Thermal Imager, Pyrometry, Near Infrared

1. はじめに

一般的に市販の熱画像カメラは一部の研究開発用途等の特殊な製品を除くと大部分が $10\mu\text{m}$ 帯の赤外線にける輝度温度を利用したサーモグラフィと呼ばれるシステムである。このようなサーモグラフィで高温測定を行う場合、レイリー領域を用いているために温度に対する輝度の変化が小さい¹⁾ためダイナミックレンジは広い。その反面放射率の誤入力による影響が極めて大きく、正確な温度計測のためには予め放射率を正確に知っておく必要がある。

これに対して、2色法では灰色体近似を仮定する事により、放射率に依存しない、というメリットがある。

市販の2色法カメラでは、モノクロ CCD センサーと反射または屈折などを組み合わせた前置光学系を用いた相対的に解像度の低いものか、可視光領域 ($<750\text{nm}$) の RGB color filter をそのまま利用した超高温 ($>1200^{\circ}\text{C}$) を対象としたもの²⁾がほとんどである。

そこで本研究では、従来の2色法熱画像システムよりも解像度が高く、低温域 ($>500^{\circ}\text{C}$) の計測を可能とする熱画像計

測システムについて検討および試作を行い、その計測特性について評価することを目的とする。

試作カメラシステムの温度較正は $500\text{-}2000^{\circ}\text{C}$ の広い温度域を対象とし、本報では、特に空間分解能と繰返し精度に関する検討を行う。また、試作カメラを用いて旋盤の刃先温度計測を高温領域が微小スケールである場合の例として実施し、サーモグラフィと比較しながら、本方式熱画像計測システムの特性について検討を加える。

2. 計測概要

2.1. 従来の2色法の問題点

従来型の2色法による熱画像計測として、主に3つの方式が挙げることが出来る。

1つはモノクロ CCD の前に前置光学系 (分光光学系) を設置し、反射光学系または屈折光学系により任意の2つのバンドパスフィルターを用いて単色画像を同一チップ上に結像する方法である。この場合、同一チップ上に結像するため同時性が保たれ、さらに任意の単色波長を選択可能である事から CCD の近赤外領域における感度を利用した低温域に最適化する事も可能である。一方で、前置光学系を用いる事で開口効率と共に S/N が低下し、各波長の単色画像はセンサーの一部しか使用しないために解像度も制限され、さらに光

* 原稿受付 2008年8月8日

1) 非会員 鎌田科学 (〒480-0303 愛知県春日井市明知町 402-12, E-mail: kamata@u.phys.nagoya-u.ac.jp)

2) 正会員 中部大学工学部

3) 非会員 北海道大学大学院工学研究科

学系に起因する複雑な色収差の補正を行う必要がある, という短所を持つ.

2 つめはバンドパスフィルターを交換して 2 波長画像を合成する方法で, 前置光学系同様任意の波長が選択可能であるだけでなく, 前置光学系を用いないために高い解像度と S/N を得る事が可能である. そのため, 前置光学系方式と比較してさらに低温領域までの計測が可能となる. 一方で, フィルター交換式では 2 波長の撮像に関して同時性が保たれないために測定対象物である熱源は定常状態である必要がある.

3 つめは, カラー CCD のセンサーの色フィルターの分光特性 (RGB) のうち R と G の強度比を用いて 2 色法を行う方法で, 2 波長画像の同時性が保たれ, フィルター交換方式と比較すると効率は 1/4 に低下する (Bayer パターンの場合有効画素数は 1/4) が, 前置光学系と比較して効率が良く高い S/N が期待できる. 一方で, 測定波長は単色性に乏しい広帯域の 2 つの可視光領域の波長に限定されるため, 測定可能温度域も高温域に制限されるだけでなく, 燃焼場計測の様な分子発光の寄与が大きい場合に測定結果が影響されやすい, という短所を持つ.

これら従来型の 2 色法においては, 高い解像度, 測定波長の単色性, 低温域における計測, 非定常状態の熱画像計測, のすべてを満たすのは困難であるが, 本研究ではこれらを実現するためにカラー CCD とマルチバンドパスフィルターを組み合わせ, 近赤外線領域における感度を利用した新たな方式を提案する.

2.2 計測システム

一般に色変換行列は, 可視光域におけるリニアな RGB の定義された色空間の変換に広く用いられているが, 本開発ではこれを 2 色法熱画像解析に応用し, 任意の 2 波長の成分を単一のベイヤー型カラー CCD を用いて同時測光を行う目的で設計試作を行った.

分光透過率において 3 つの波長でピークを持つ光学フィルターと 3 色カラーセンサーの分光感度特性の組み合わせに関する色変換行列を用いれば, 原理的には 3 波長毎の単色成分を算出可能である.

3 つのピーク波長(j=1,2,3)に対応するレンズとバンドパスフィルターの寄与を積算した透過率と単色入射強度をそれぞれ CR_j, CG_j, CB_j, I_j とすると, カメラによって実測される RGB それぞれの色での測定強度は, 式(4)で近似的に表すことができる.

$$\begin{aligned} R &= C_{R1} \times I_1 + C_{R2} \times I_2 + C_{R3} \times I_3 \\ G &= C_{G1} \times I_1 + C_{G2} \times I_2 + C_{G3} \times I_3 \\ B &= C_{B1} \times I_1 + C_{B2} \times I_2 + C_{B3} \times I_3 \end{aligned} \quad (4)$$

この連立方程式を 3x3 の行列演算を用いて解くことにより, 以下の式(5)のように各波長における単色入射強度を算出する事が可能である.

$$\begin{pmatrix} C_{R1} & C_{R2} & C_{R3} \\ C_{G1} & C_{G2} & C_{G3} \\ C_{B1} & C_{B2} & C_{B3} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

フィルターの分光透過率に大きく依存する装置定数の設計については, 解の存在するように, 逆行列の存在する範囲内で, その設計を最適化する必要がある. この手法は, 原理的には 4 色以上のカラーセンサー (CCD または CMOS) においても同様に適用可能であり, N 色のフィルターを使った場合は, NxN の行列演算によって同様に N 種類の波長の単色成分を算出可能である.

本報では, 上記の色行列による単色変換の最も単純な応用である 2x2 の色行列を用いた 2 つの熱画像システムの試作を行った.

試作された 2 次元 2 色法による熱画像カメラでは, 750nm および 900nm の 2 つの波長でピークをもつ光学フィルターを使用し, 行列演算は 2 行 2 列に簡略化される事になる. 加えて, 後述のように測定量である色指数と温度の関係は, 単色成分を行列演算から算出するまでもなく, R および B バンドの強度比 (色指数) によって表すことが可能である.

評価実験には, 下記の Table1 に記した仕様の 2 種類の 2 次元カラーセンサー KODAK 社製 KAI-0340DC, および SONY 社製 ICX204AK を用い, 2 種類の試作機を製作した.

	sensor	resolution (pix size)	maximum frame rate	bit depth
#1	KAI-0340DC	640x480 (7.4µm)	210fps	10bit
#2	ICX204AK	1024x768 (4.65µm)	60fps	12bit

Fig.1 に, 試作したカメラの構造の概略図を示す.

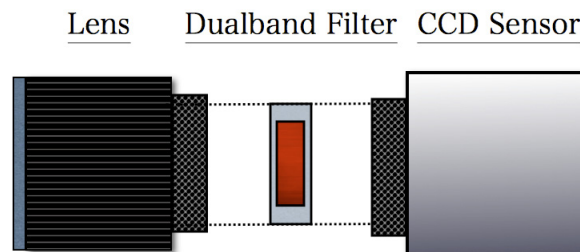


Fig.1 Schematic drawing of hardware configuration

Fig.2 はセンサー # 1 の分光感度特性 (メーカー公開情報) とデュアルバンドフィルターの透過率 (茶線: 設計値) をプロットしたものである.

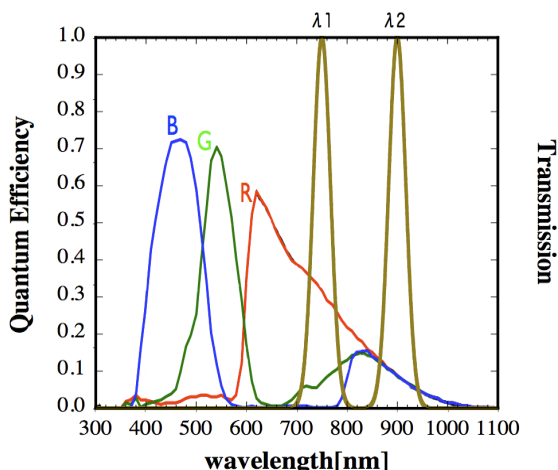


Fig. 2 Quantum efficiencies of RGB color filters and transmission curve of optical bandpass filter.

このような分光感度特性を持つセンサー # 1 を用いた試作カメラでは、B-band では主に 900nm のフィルターの成分を、R-band では主に 750nm および 900nm の2つのフィルター成分の積算値を受光することになる。従って、観測量である R-band および B-band の2色の強度比が、前述の2色法の原理から色温度に依存することで、温度を算出する事が可能になる。

このように、近赤外線領域の特性を利用する事により、従来型のカラーCCD を用いたカメラと比べて、より低温域での2色法温度計測が可能となり、さらには可視光域を用いないため、測定時に、PC ディスプレイや照明器具などによる反射の影響を低減する効果も期待できる。

2.3 温度較正

前述の光学フィルター及びセンサーの分光感度特性の組み合わせから、750nm および 900nm の寄与の加算で近似される R-band と、900nm の単色波長からの寄与で近似される B-band の強度比と温度の相関関数を用いて熱画像解析を行う事ができる。

温度較正曲線を決定するための基準温度光源として、500-900℃の温度域では汎用電気炉（城田電気炉材社製 SUPER100）を、900-2000℃の温度域ではハロゲンランプ（光学用：12V-75W）を用いた。これらの熱源の温度を放射温度計（OPTEX 社製 VF-3000）で測定することにより基準光源とし、較正を行った。その手法の詳細を以下に述べる。

低温領域（500-900℃）の基準光源である電気炉の内部には耐熱黒体塗料（ジャパンセンサー社製高温黒体塗料 JSC-3 号 /耐熱温度 1500℃、放射率=0.95）を内側に塗布した半球殻状のステンレスを設置した。これを電気炉の観測窓を通して放射温度計の単色モードでの放射温度計測を行い、簡易の黒体炉として温度較正を行った (Fig.3)。この際、放射率=0.95 の灰色体を仮定した。

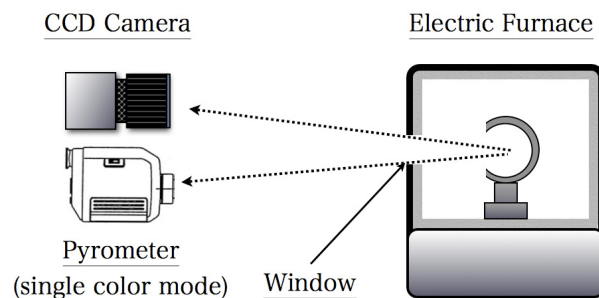


Fig.3 Schematic drawing of the calibration system (500-900℃)

一方、高温領域（900-2000℃）ではハロゲンランプと安定化電源（KIKUSUI /PAS40-9）を組み合わせ、放射温度計の2色モードによる温度較正を行った (Fig.4)。

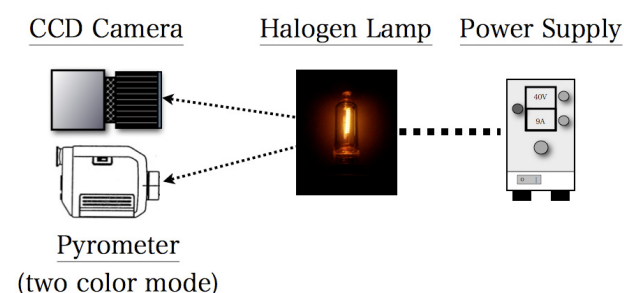


Fig.4 Schematic drawing of the calibration system (900-2000℃)

この際、高温側では光量が大きく ND フィルターを用いて較正を行ったため、分光感度特性の影響による補正を 900℃を基準点として行った。

カメラのすべての画像データは各色 16bit の FITS 形式で保存され、画像データの解析は HEASOFT/FTOOLS Software(NASA/Goddard Space Flight Center 提供の HEASARC software の一部)を用いて行った。

これら方法で、500-2000℃の範囲における温度較正を、Table1 のセンサー#1 について行った結果が Fig.5 である。

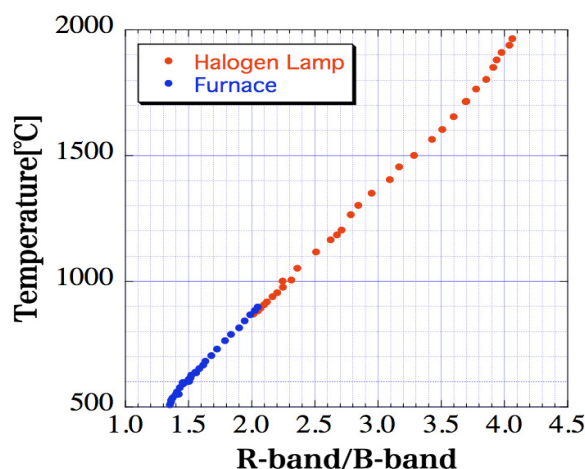


Fig.5 Temperature calibration curves of low and high temperature range (500-900℃ and 900-2000℃).

このデータに対して最小二乗法を用いる事によって、測定される温度 $T[^\circ\text{C}]$ は式(6)に表されるような波長強度比 R/B の一次関数で表す事ができる (相関係数: $R=0.999$).

$$T(^{\circ}\text{C}) = -163.8 + 512.7 (R/B) \quad (6)$$

得られた較正関数は ND フィルターやレンズ、センサーのカバーガラス等の分光透過率およびセンサーの分光感度特性に依存した装置定数によってスケーリングする事により、異なるレンズやカメラの組み合わせにおいても同一の関係式 (温度較正関数) を使用可能である。これは温度に対する個々の波長 (750nm/900nm) での輝度の変化率は装置定数に依存しないことによる。しかし、厳密にはバンドパスフィルターの個々のピークは有限の幅をもつために、入射する熱放射スペクトルも含めて、その分光特性によっては必ずしもスケーリングは成立しない。

ただし少なくとも今回の実験では、後述の旋盤の温度計測に用いたセンサー#2 について、500-900 $^{\circ}\text{C}$ の範囲において両者の結果にスケーリングが成り立つ事を同様の較正実験で確認済みである。

3. 熱画像カメラとしての性能評価及び分光型の利点

3.1 繰り返し精度と空間分解能

熱画像カメラに求められる性能は、その用途によって異なり、目的に応じてシステムを最適化する事が望ましい。

高い精度、高い解像度、高い時間分解能のすべてを満たす事は現実には不可能であり、目的に応じてハードウェアと合わせて解析方法も選択する必要がある。2次元情報を得られる熱画像カメラは高い解像度を最初に求められるが、温度の計測精度 (繰り返し精度) は各ピクセル毎の輝度信号の S/N によって制限される。その S/N の上限はセンサーの画素の飽和電荷量によって決定され、飽和電荷量はピクセルの物理的な大きさに依存する。

これに対して取り込まれた各画素毎の信号に対する雑音レベルが増大するにつれてさらに S/N の実行値は低下する事になり、センサーチップそのものの熱雑音や読み出しノイズなどを如何に低減するかが最終的にデータの質を左右する。

実際に熱画像カメラによる温度のモニタリングを行う場合、測定対象の視野内のサイズによって、温度の算出に使用されるピクセル数は異なる。1素子当たりの飽和電荷量は決まっているため、利用可能な情報の最大値は制限されるが、複数のピクセルの情報を使うことでその上限を押し上げる事が可能となる。これによって、目的に応じて空間分解能を犠牲にしてピクセルビニング処理を行う事で高い繰り返し精度を達成する事も可能である。

そこで、空間的なスケール (興味ある領域のサイズ) と測定温度の繰り返し精度の関係を調べ、本熱画像カメラの評価を行った。

評価には前述のセンサー#1 のカメラを使用し、1000 $^{\circ}\text{C}$ に設定したハロゲンランプを観測した際の連続した際の 16回 (インターバル 1/120s) の時系列データ点の標準偏差を算出した。ビニングのサイズは 2-64pixel 平方の範囲で行い、各サイズスケール毎の時系列データに対して統計処理を行った。この際、1000 $^{\circ}\text{C}$ における基準光源 (前述のハロゲンランプ) の温度揺らぎはカメラの繰り返し精度と比較して無視できるほど小さいと仮定した。

評価実験には、NIKON 105mm AF Micro NIKKOR および接写リング PN-11 を用いており、最短距離 (10cm) での撮影において 1 pixel は 4.3 μm に等価である。これらのデータを元に、測定対象の空間分解能とその時に期待される繰り返し精度の関係をプロットしたのが Fig. 6 である。

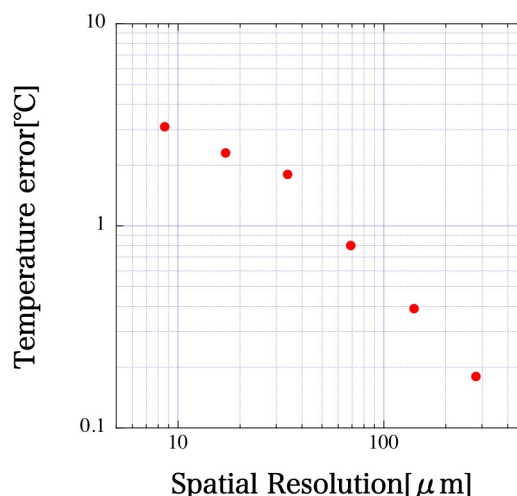


Fig.6 Correlation between spatial resolution and reproducibility error(sensor#1/KAI-0340DC).

3 σ レベルを実用上有意な最小検知温度差と考えた場合、fig.6 から 300 μm の空間分解能では約 0.5 $^{\circ}\text{C}$ の温度差を 1000 $^{\circ}\text{C}$ 近傍で検出可能である事が期待される。

一方、精度を犠牲にして誤差を 10 $^{\circ}\text{C}$ まで許容する場合、10 μm 以下の高い空間分解能を得ることが可能であると見積もられた。この時、ピクセルビニングによる積算効果で S/N が向上している事から、ハロゲンランプの温度安定性は前述の繰り返し精度に比べて十分小さいと考えられる。

3.2 放射率比の影響と補正

2色法では、灰色体近似が成り立つ場合、測定温度は放射率の影響を受けないという大きな利点がある。ただし、現実には完全な灰色体は存在せず、すべての物質には放射率に波長依存性を有するため、2色法を用いても完全にその影響を消去する事はできない。

例えば、600-1000 $^{\circ}\text{C}$ におけるタングステンの分光放射率スペクトルは、波長と温度の関数として、式(7)で表される³⁾。

$$\varepsilon [\lambda (\mu\text{m}), T(^{\circ}\text{C})] = 0.6552 \cdot 0.2633 \lambda - 0.7333 T \times 10^{-4} + 0.7417 \lambda T \times 10^{-4} \quad (7)$$

このモデル関数を仮定すると、今回の試作機の測定波長である 750nm および 900nm では、波長の違いによる灰色体からのずれは 6-7%であると推定される。

また、比放射率 ($\epsilon [750\text{nm}]/\epsilon [900\text{nm}]$) の温度変化が 600-1000°Cにおいて 0.9%と見積もられる (Fig.7)。

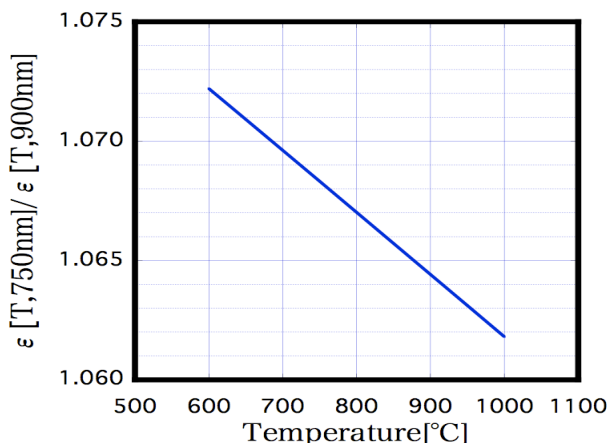


Fig.7 Temperature dependence of emissivity ratio between 750nm and 900nm 5).

この事は、例えばタングステンの表面温度を 600-1000°C の範囲で温度モニタリングを行った場合、波長強度比換算 (2色法) で Fig.5 の温度較正関数から最大で 5°C程度の誤差が生じる事を意味する。

興味ある温度域が 50°C程度の狭い範囲であれば、その誤差はほぼ一桁低減され、実質的には 0.5°C程度までその影響は軽減される事を意味する。ただし、この場合、測定開始時点での対象物の放射率スペクトルおよび波長・温度依存性を予め正確に求めておく必要がある。したがって前述の 2 色法の利点は、放射率に波長依存性がある場合にはその限りではない。

4. 試作カメラによる計測

機械加工の一手段である切削加工において、切削抵抗に起因する温度上昇を抑える事は大きな課題であり、工具の寿命に直接関係する。その一方で、生産効率の向上を目的とした切削速度の高速化や、環境保護を目的とした乾式加工、チタンやステンレスなどの機能性の高い高硬度材料の精密加工が求められるなど、工具温度を上昇させる要因は多い。

切削抵抗の大きな機能性金属の加工においては、刃先のダイヤモンドコーティングを行うなどして、その耐久性を高めることで寿命を延ばすなどの工夫が成されているが、その加工温度は条件によっては 500-1200°Cと極めて高い事が確認されている^{4),5)}。また、高硬度焼き入れ鋼の潤滑油を使用しない乾式加工 (ドライ加工) でも、700°C以上の切削温度が確かめられている⁶⁾。

生産性向上の為の切削速度の超高速化の試みにおいても、条件によって刃先が 700-1100°Cという高温にさらされる事

が確認されており⁷⁾、いずれの場合も工具の耐久性を高めるだけでなく、温度管理や監視が重要となってくる。

一方、このような点接触での温度分布を正確に測定するためには、高い空間分解能が必要とされる事になる。センサーの画素サイズと比較して小さい熱源、すなわち点源と仮定できるような測定対象物の場合、輝度温度方式では、実際の温度よりも低く見積もられることがある。これは、センサーのピクセル当たりの信号強度を対象物の表面輝度として認識する事に起因する。

例えば熱源の大きさがピクセルサイズの 1/2 の面積の場合、10 μm で測定した場合には、実際の温度が 1000°Cであってもその輝度を 1/2 と認識するため、その測定結果はプランクの式から、見かけの温度として 600°Cと表示される事になる。これに対して、2色法での測定では、灰色体近似の下に放射率が 1/2 になったのと等価であるため、対象物のサイズの影響は受けない事になる。

このような 2 色法の利点は、温度測定対象となる高温領域が微小スケールである場合や、特にそれが視野内で点在している場合などに有効である。そこで、その有効性を評価する一例として、切削加工機械の切削工具先端の温度計測を行った。

ステンレスパイプ (SUS304/19mm Φ/t2mm) を旋盤 (Mecanix 社製 L943E, バイト先端:住友電気社製・超硬質工具材料 ACZ310) を用いて切削加工した際の刃先の温度を、サーモグラフィ (NEC 三栄社製 TH5100/測定波長: 5 μm) を用いて測定した結果を Fig.8 の下図に、センサー#2 のカメラを用いて測定した結果を Fig.9b の下図に示す。Fig.8 の上図の点線で囲まれた領域が下図のサーモグラフィによる温度測定領域 (輝度温度) に対応する。Fig.9a はバイト周辺を拡大した写真である。Fig.9b 上図の白い点線で囲まれた領域が、下図の近赤外 2 色法による測定領域に対応する。

これらの画像データの解析には、HEASOFT/FTOOLS を用いて、平滑化処理 (fgauss: σ=3pixels) を行っている。

両者のカメラは完全に同期した測定結果ではないので正確な比較はできないが、2色法カメラでは 4 回の測定で最高温度 660~680°Cを示しているのに対して、サーモグラフィ (5 μm) では同様に 4 回の測定で 290~350°C (ε=1) と低い値を示している。

灰色体近似が成り立つ場合、表面輝度に依存しない 2 色法では単色放射率の影響を受ける事がない。これから仮に 2 色法による測定結果、680°Cが真の表面温度だと仮定するとサーモグラフィの測定結果 (300°C) との違いとして、2 通りの要因が考えられる。

一つは測定対象物の単色放射率の誤入力で、例えばサーモグラフィの単色放射率の設定値を 0.1 とする、すなわち測定対象物であるセラミックバイトの 5 μm における単色放射率が 0.1 である、という解釈である。

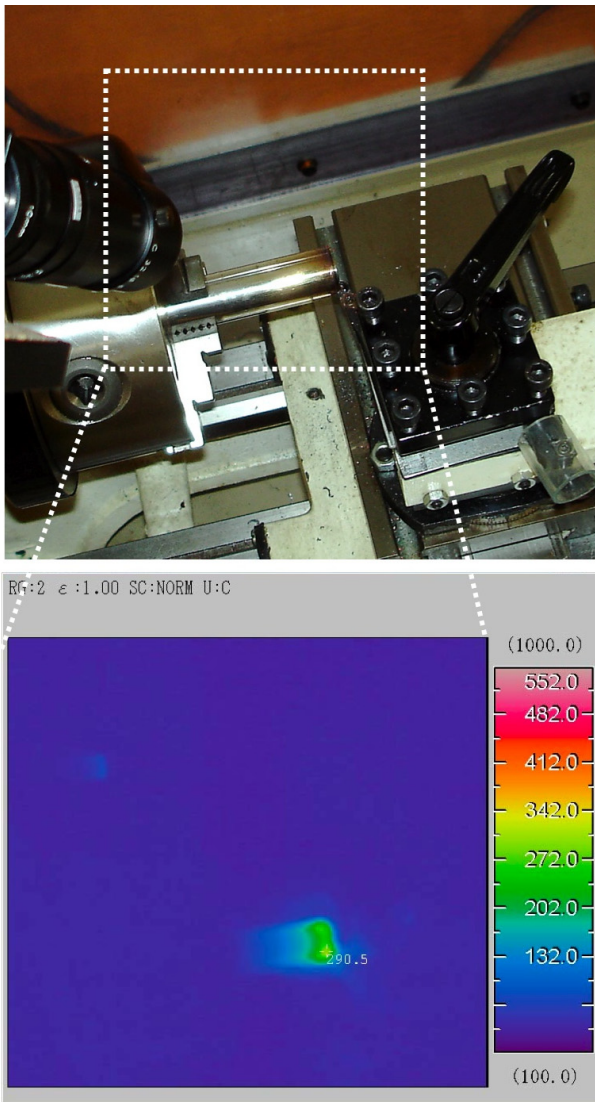


Fig.8 Result of temperature measurements by thermography

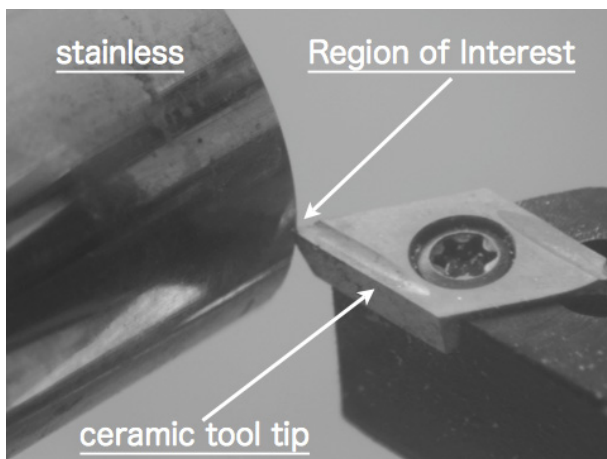


Fig.9a Magnified image of lathe ceramic tool

もう一方は、輝度温度が単位立体角当たりの表面輝度によって算出される事から、熱源のサイズがサーモグラフィの測定画素サイズよりも小さいような場合で、仮にセラミックバイトの $5\mu\text{m}$ における放射率が 1 と仮定した場合、熱源の

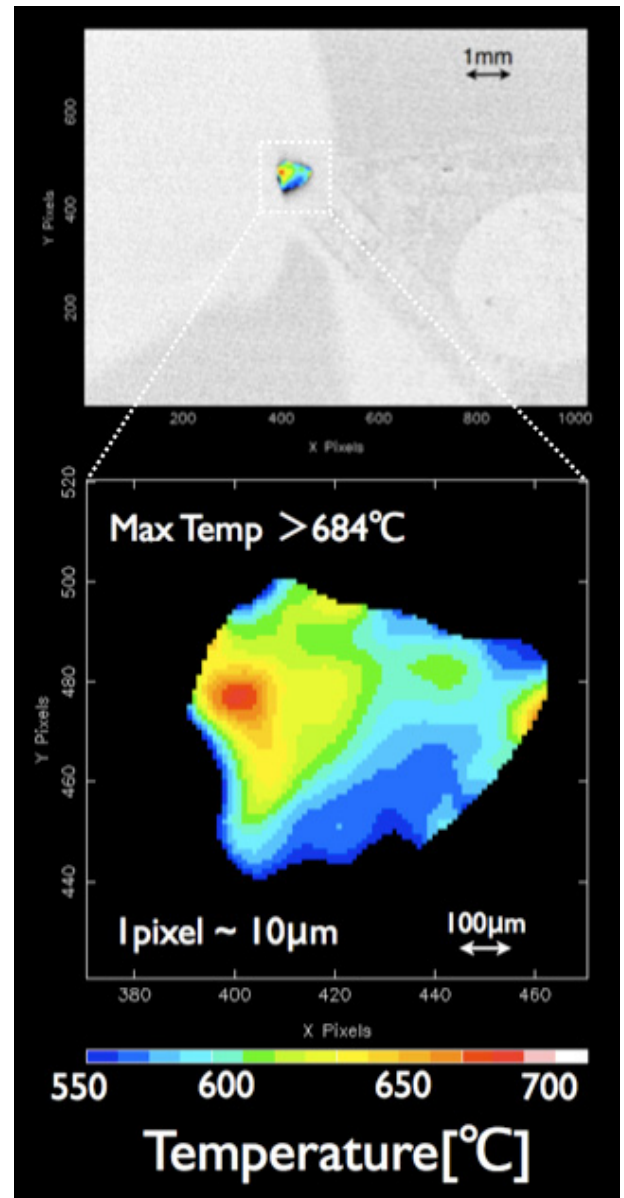


Fig.9b Result of temperature measurements by near infrared two-color imaging

放射領域が画素サイズの $\sim 1/10$ 程度であるという解釈である。

実際には、これらの複合的な要因によって測定結果に違いが生じていると推定されるが、2色法ではこのような不確定性を回避可能である。今回のこのような2色法の利点を生かすことによって、高温切削加工などにおける点熱源が視野内を移動するような場合においても、工具先端の最高温度をリアルタイムでモニタリングする事が可能である事を示している。

ただし、放射率の波長依存性が大きい場合には前述の灰体近似の仮定が成り立たなくなる。波長依存性が一次関数や巾関数のような単純な関数で再現可能である場合に限っては、3色測光を行う事でその影響を本方式で原理的には補正可能であるが、複雑な波長依存性を示すような対象物の場合には予め正確にこれを決定する必要がある。

5. まとめ

一般的なカラーセンサーの近赤外線領域における分光特性を利用して、中温域での測定も可能な 2 色法熱画像カメラを開発した。試作したカメラについて 500-2000°C の範囲で温度較正を行い、実証試験を行った結果、空間分解能 10-300 μ m、繰り返し精度 3-0.2°C を達成する事ができた。

さらに、このような試作機の高い空間分解能を活かし、旋盤の刃先温度計測を行った。画像計測によって得られた刃先先端の最高温度は、同時に測定されたサーモグラフィよりも 300°C 以上高い値 680°C であった。この差は、測定対象の放射率およびサイズに起因するものと解釈され、このように微小な熱源における近赤外 2 色法の優位性を実証する事ができた。これにより、高温切削加工などにおける正確な工具先端温度の計測およびモニタリングの可能性を示す事ができた。

本方式は、カラー型であれば原理的にセンサーの種類を選ばないため高速度化も可能であり、ハードウェアの構造が単純で小型化も容易である。その特性を活かし、今後はセンサーや、レンズ、光学フィルターの組み合わせを用途に合わせて最適化する事により、3 色測光による用途も含めて、様々な応用を展開していく予定である。

参 考 文 献

- 1) G.B. Rybicki and A.P. Lightman; Radiative Processes in Astrophysics (1979) pp.15-27
- 2) 臼井寛之, 三井健司; 「H&B 2 色法を用いた高速度燃焼温度計測」, 高速度撮影とフォトニクスに関する総合シンポジウム 2005 (東京)
- 3) Mikael A. Bramson; INFRARED RADIATION(1968), Chapter.IV, SECT.3, EMISSIVITY OF DIELECTRICS AND METALS, pp117-135
- 4) Mahfudz ALHUDA, 山田啓司, 上田隆司; 「CBN 工具による高硬度鋼の旋削温度測定」, 精密工学会誌 Vol.64, No.11, 1998, pp1684-1688
- 5) 佐藤昌彦, 宮崎和智, 田中久隆; 「微小切削におけるダイヤモンド工具刃先温度の熱放射計測」, 精密工学会誌, Vol.74, No.1, 2008, pp51-58
- 6) 佐本芳正; 「環境に優しい焼入鋼切削の研究」平成 14 年度三重県科学技術振興センター工業研究部研究報告 No. 27 (2003), 報文 9
- 7) 帯川利之; 「切削加工の高速度化, 超高速度化」, 生産研究, 59 巻 6 号 (2007), pp3-8