サーモグラフィ装置の最小検知温度差に関する研究*

黒 川 賢^{*1}, 安 久 正 紘^{*2}
稲 垣 照 美^{*3}, 岡 本 芳 三^{*4}

A Study of Noise Equivalent Temperature Difference of Thermograph

Katashi KUROKAWA^{*5}, Masahiro AGU,
Terumi INAGAKI and Yoshizo OKAMOTO^{*5}NEC san-ei Instruments, Ltd. 2-844-7, Onuma-cho, Kodaira-shi, Tokyo, 187-8516 Japan

The noise equivalent temperature difference (NETD) is one of the most important performance indices of mechanical scanning thermograph, as well as the minimum detectable size as the resolution of the measuring object. This index shows the ability of thermograph that presents the possibility of more precise temperature measurement. It is defined in traditional standard, in which the noise is defined by peak to peak noise voltage. This paper presents a new method to obtain NETD by standard deviation of radiance temperature at individual pixels in thermogram. As this method depends upon statistical treatment, we can treat the NETD quantitatively and objectively. We can also apply this method to another type of thermograph.

Key Words: Measurement, Accuracy, Thermal Radiation, Statistical Treatment, Thermograph, NETD

1. ま え が き

サーモグラフィ装置は、物体表面からの赤外放射を遠隔かつ非接触で検知し、二次元の熱画像(サーモグラム)として表示することを特色としている。これは、対象を広範囲に計測・診断するために有効な手段であることから、工業分野をはじめとする多岐の分野で活用されてきた^{(1)~(3)}。しかしながら、この装置を有効かつ定量的に活用するには、サーモグラフィ装置の性能指標を適正に評価する必要がある。これらの指標には、これまでさまざまな規格や試験・評価方法が定められている^{(4)~(6)}が、より客観的な基準を確立しておくことがサーモグラフィ装置の定量化には極めて重要である。

このことから本研究では、いくつかの性能指標の中から、サーモグラフィ装置にとっては最小検知寸法とともに基本的かつ重要な性能指標の一つとなっている「最小検知温度差」を取上げ、定量的な検討を行った。

最小検知温度差は、別名雑音等価温度差(Noise Equivalent Temperature Difference)ともいわれ、NETDの略語でも示される。この指標は、装置の温度分解能の指標であり、放射率 ϵ が1に近い測定対象物の検知しうる最小温度差を示している。つまり、その測定物を測定したときのサーモグラフィ装置のS/N比が1となるような測定対象物の温度差 ΔT で表され、この値が小さいほどシステムとしての温度分解能は良いことを示している。なお、サーモグラフィ装置の最小検知温度差については、すでに医用赤外撮像装置において日本工業規格化がされている。この規格によると「信号」は温度信号を偏向変調表示した信号波形から求め、「雑音」は雑音電圧のpeak to peakから求めるように規定されている。このときの雑音は、雑音電圧のpeak to peak値 N_{pp} に $1/2\sqrt{2}$ を乗じた $N_{pp}/2\sqrt{2}$ とされている⁽⁵⁾。ところが「雑音」は雑音電圧の周波数成分によって異なってくるため、しばしば用いられる方法としては、その波形のpeak to peakの数値を読みとり、その1/5~1/10の数値の温度換算値をもってNETDと定義する案もとられたりしている。しかしながら、これらの方法では、目盛りの読み方、信号波形の周波数成分あるいは測定者の個

* 原稿受付 1999年3月25日。

^{*1} 正員, NEC 三栄(株) (☎187-8516 小平市大沼町2-844-7)。^{*2} 茨城大学工学部 (☎316-8511 日立市中成沢町4-12-1)。^{*3} 正員, 茨城大学工学部。^{*4} 正員, 東亜大学工学部 (☎751-0807 下関市一宮学園町2-1)。

E-mail: kurokawa@mx6.mesh.ne.jp

人差などにより、データの客観性が乏しく定量的に定まった値を出すのが難しい。したがってここでは、黒体炉を測定した際の熱画像における均一温度範囲内の放射輝度温度 Ts' のばらつき、つまり放射輝度温度 Ts' の標準偏差 $\overline{\Delta Ts'^2}$ を計算し、その値をもって NETD を定義する方法を採用することにした。なお、この定義においては、熱画素固有の温度分解能と画素間の空間的ばらつき両者を含めて NETD を決めているため、NETD に影響を及ぼすような温度分布が黒体炉に存在しては意味はなさなくなる。この手法は、測定者の個人差が入らずデータに客観性をもたせることができる。さらにここでは、本手法を他機種のサーモグラフィ装置の評価も含めた新たな NETD の評価方法として提案したい。なお、評価に当たっては、さまざまなサーモグラフィ装置の中でも代表的な単素子センサを用いた機械的走査形のサーモグラフィ装置を用いることにした。

記 号

- a : センサとレンズとの距離
- A_D : センサの面積
- A_T : 瞬時測定面積
- b : 測定距離
- D : 検出能
- D_{bb}^* : 黒体炉により測定された比検出能
- D_{λ}^* : 波長に依存している比検出能
- $D_{\lambda R}^*$: 相対的比検出能
- f : 焦点距離
- Fe : レンズ系の F ナンバ
- NEP : 雑音等価入射束 (Noise Equivalent Power)
- Ts' : 放射輝度温度
- X : 波長に依存するファクタ
- Φ : レンズの直径
- $\Omega_{T(eff)}$: 実効立体角
- ϵ : 放射率
- λ : 波長
- τ_0 : 空間伝搬係数
- τ_{λ} : 光学系の伝搬係数
- ΔE_{λ} : センサに入るエネルギーの微小変化
- Δf : 増幅系の周波数帯域幅
- ΔN_{λ} : 温度の微小変化による分光放射輝度の微小変化
- ΔT : 微小温度差
- $\overline{\Delta Ts'^2}$: 放射輝度温度の標準偏差
- ΔW_{λ} : 分光放射発散度の微小変化

2. 理論的検討

測定対象物温度 T における NETD は、その温度における装置の S/N 比が 1 になるような温度差 ΔT で表され、次式 (1) で定義される。

$$NETD = \left[\frac{\Delta T}{S/N} \right]_T \quad \dots\dots\dots (1)$$

今、サーモグラフィ装置の走査系を取除いたモデルとして、図 1 に示すような光学モデルを考える。

ここで測定対象物の温度 T に微小温度差 ΔT が生じたとき、センサに入るエネルギーに生じる微小変化 ΔE_{λ} は、分光放射輝度の微小変化 ΔN_{λ} および他の各ファクタを用いて表すと式 (2) で示される⁽⁷⁾。ここで添字 λ は波長を示す。

$$\Delta E_{\lambda} = \tau_0 \tau_{\lambda} \epsilon \Delta N_{\lambda} A_T \Omega_{T(eff)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、図 1 の光学モデルにおいて焦点距離 f に比べて測定距離 b が十分大きい場合は、 $a \approx f$ となり式 (2) で使用されている物理量に対して次の関係式 (3)、(4) および (5) が成り立つ。

$$A_T = A_D \left[\frac{b^2}{a^2} \right] = A_D \left[\frac{b^2}{f^2} \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\Omega_{T(eff)} = \pi \frac{(\Phi/2)^2}{b^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Fe = \frac{f}{\Phi} \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、温度の微小変化 ΔT による測定対象物からの分光放射輝度の微小変化 ΔN_{λ} は、微小分光放射発散度 ΔW_{λ} を用いると式 (6) として表される。

$$\Delta N_{\lambda} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\Delta W_{\lambda}}{\Delta T} \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

式 (3)～(5) および (6) を、式 (2) に代入することにより次式 (7) が導かれる。

$$\Delta E_{\lambda} = \frac{1}{4} \tau_0 \tau_{\lambda} \epsilon \left[\frac{\Delta W_{\lambda}}{\Delta T} \right] A_D \frac{1}{Fe^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

装置の S/N 比のノイズは、センサのノイズにより決定されているので、雑音等価入射束 NEP 、 NEP の逆数で定義される検出能 D 、その D を正規化したセンサの比検出能 D_{λ}^* を用いて測定対象物の温度 T に

Fig. 1 Fundamental optical model of thermograph

おける S/N 比を示すと式(8)になる⁽⁸⁾。

$$\left[\frac{S}{N}\right]_T = \frac{\Delta E_\lambda}{NEP} = D\Delta E_\lambda = \frac{D_\lambda^*}{\sqrt{A_D\Delta f}} \Delta E_\lambda \quad \dots\dots\dots(8)$$

さらに、式(7)および(8)より次式(9)を導くことができる。

$$\left[\frac{S}{N}\right]_T = \frac{1}{4} \tau_0 \epsilon \tau_\lambda \frac{1}{Fe^2} \frac{\sqrt{A_D}}{\sqrt{\Delta f}} D_\lambda^* \frac{\Delta W_\lambda}{\Delta T} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで装置の波長特性を考えると、 τ_0 、 τ_λ 、 D_λ^* 、 $\Delta W_\lambda/\Delta T$ が波長特性をもっていることになり、これらのファクタが装置の波長特性を決めることになる。今、装置の波長特性が λ_1 から λ_2 までとすると、式(9)は次式(10)のように書き直すことができる。

$$\left[\frac{S}{N}\right]_T = \frac{1}{4} \epsilon \frac{1}{Fe^2} \frac{\sqrt{A_D}}{\sqrt{\Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_0 \tau_\lambda D_\lambda^* \frac{\partial W_\lambda}{\partial T} d\lambda \quad \dots\dots\dots(10)$$

NETD は式(10)の逆数で示され、 $\epsilon=1$ において定義される。なお、実機においては、指示値を標準黒体炉に合わせるための補正係数 K を考慮し次式(11)で表される。

$$NETD = 4KF e^2 \frac{\sqrt{\Delta f}}{\sqrt{A_D}} \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_0 \tau_\lambda D_\lambda^* \frac{\partial W_\lambda}{\partial T} d\lambda \right]^{-1} \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 τ_0 は空間伝搬係数であり、伝搬空間における水蒸気や炭酸ガスなどの影響を受ける可能性があるが、装置の性能指標としての NETD は、これらの影響のない ($\tau_0=1$) 状況において定義される。そこで、波長に依存するファクタを X とすると、 X は式(12)で示される。

$$X = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_\lambda D_\lambda^* \frac{\partial W_\lambda}{\partial T} d\lambda \quad \dots\dots\dots(12)$$

一方、光学系はセンサの波長特性を生かすように、また、不要な波長はカットするようにコーティングを施

された赤外線透過材料で構成されている。特にセンサのピーク感度波長領域では、ほぼ 100% 透過するように作製されている。なお、図 2 は、光学系を含めたセンサの波長特性 $\tau_\lambda D_\lambda^*$ の最大値を 100% とする相対値 $D_{\lambda R}^*$ の一例を示したものである。図 2 中①、②および③は、それぞれ電子冷却(TE 冷却)で 213 K に保持された HgCdTe センサを利用した短波長 (3~5.3 μm) タイプ、スターリングクーラ(ST 冷却)で、77 K に保持された HgCdTe センサを利用した中間波長 (5.5~8 μm) タイプおよびスターリングクーラ(ST 冷却)で 77 K に保持された HgCdTe センサを利用した長波長 (8~13 μm) タイプの試作形のサーモグラフィ装置を意味する。

ここでは代表例として、タイプ③のサーモグラフィ装置の 303 K における NETD を式(11)を用いて求めてみる。まず式(12)で示される波長に依存するファクタ X を求める。図 2 において、波長 λ (X 軸)の細分化 (0.2 μm ごと)を行い細分化されたときの $D_{\lambda R}^*$ と Planck の放射則を基に求めた 303 K における単位温度差あたりの放射発散度との積を求め、その積を λ_1 (7.7 μm) から λ_2 (13.5 μm) まで積分する。一般に、赤外線センサの性能指標としての比検出能は、標準黒体炉を測定し、ある周波数 (例 1 kHz) を中心に増幅系の周波数帯域幅 $\Delta f=1$ Hz として求めた D^*_{bb} で示される。そのため、さらに絶対値を求めるに当たっては、 $D^*_{bb}: 1.7 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ を掛けることによりファクタ X を求める。これより $X^{-1}=2.65 \times 10^{-8} \text{ Hz}^{-1/2} \cdot \text{cm} \cdot \text{K}$ が得られる。

次に式(11)に以下の装置の各ファクタ値、

補正係数 $: K=3.5$

光学系の F ナンバ: $Fe=1.36$,

センサの面積 $: A_D=25 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$,

Fig. 2 Relation between wavelength and relative specific detectivity

Table 1 Specifications of blackbodies

	Model IR-R24*	Model TH11-349
Core portion	Double conical cavity	Cylindrical cavity
Operating temperature	50 to 450°C (Max 500°C)	Following to an environment temperature
Cavity emissivity	0.993 (Effective emissivity)	—
Temperature stability	±0.15K/30min	—
Cavity aperture diameter	φ 60	φ 60
Radiator temperature	Platinum temperature detector for calibration	Mercurial thermometer for calibration
Adjustment method	Pulsed PID method using indicating controller	—

* : Blackbody Furnace by the National Research Laboratory of Metrology

Fig. 3 Experimental apparatus for evaluation of thermograph

周波数帯域幅 : $\Delta f = 10^5$ Hz,
を代入すると 303 K における NETD は,

$$\begin{aligned} \text{NETD} &= 4 \times 3.5 \times 1.36^2 \times 10^{1/2} \times 10^2 \\ &\times (25 \times 10^{-6})^{-1/2} \times 2.65 \times 10^{-8} \\ &= 4.3 \times 10^{-2} \text{ K} \end{aligned}$$

となる。同様に、タイプ①とタイプ②のサーモグラフィ装置についての 303 K における NETD は、それぞれ 2.3×10^{-1} K および 1.4×10^{-1} K となる。

3. 実験装置と実験方法

図 3 は、実験装置の概念図を示したものである。標準黒体には、(株)チノー製の計量研型黒体炉 (MODEL IR-R 24)、NEC 三栄(株)製の黒体炉 (TH 11-349) および 273 K 近辺で水の 3 重点が実現できるような氷ブロックを利用した。データ採集に際しては、主として MODEL IR-R 24 を用い、設定不足の温度領域においては TH 11-349 を用いた。表 1 には、(株)チノー製および NEC 三栄(株)製の標準黒体炉のおもな仕様を示してある。サーモグラフィ装置は、2 章で述べた異なる 3 種類の検出波長帯域をおのおの有する 3 台である。

実験では、温度検定の基準となる標準黒体炉とサーモグラフィ装置の検出部の距離を 20 cm で一定に保ち、光軸を合せた状態で熱画像を採取した。そして均一な温度分布の範囲を選択し、その矩形範囲内の 900 (=30×30) ポイントの放射輝度温度 T_s' のばらつき、つまり放射輝度温度 T_s' の標準偏差 $\overline{\Delta T_s'^2}$ を計算し、それをその温度における NETD とした。

4. 実験結果および考察

図 4 は、このように各機種ごとに NETD を求めたもので、機種①、②および③における NETD の理論値と実験値をそれぞれの黒体温度に対して示している。‘黒マーク’はその NETD (標準偏差) の実測値であり、‘白マーク’は式 (11) から求めた理論値である。図 4 からは、常温 (300 K) 近辺における長波長に感度を有する機種③の NETD の値は小さく、NETD の観点からは、常温近辺の温度計測にはこのような機種が優れていることがわかる。一方、温度が上昇するに連れて、長波長タイプの機種③の NETD に比べて、短波長に感度を有する機種①の NETD が急激によく (小さな値に) なっていくことがわかる。理論値は約 423 K 以上、実験値は約 403 K 以上で、機種①の方がむしろよくなっている。つまり、高温領域においては、むしろ短波長タイプの機種①のほうが NETD の観点からは優れていることがわかる。波長と NETD に関するこれらの事実は Planck の放射則から容易に推察できる。図 2 から機種①は 3~5.3 μm に $D_{\lambda R}^*$ のピーク値が存在し、機種③は 8~13 μm にそのピーク値が存在していることがわかる。一方 Planck の放射則において、常温近辺での黒体放射発散度は 10 μm 近辺に

Fig. 4 NETD obtained by standard deviation of radiance temperature

Fig. 5 Histogram of radiance temperature

ピークがあり、温度が高くなるにつれて、放射発散度は短波長側に移行する。これらの事実から、高温領域で機種①のNETDが機種③のNETDより小さくなる可能性があるといえる。理論値と実験値は、図4に示すように良好に一致していることから、本研究で提案したNETDに関する理論や実験が妥当なものであると考えられる。なお、図4における実測値の特性が理論値のように滑らかでなく凹凸が生じているのは、標準偏差を求める黒体炉計測範囲内のわずかな温度不均一性の存在により、求める標準偏差にばらつきが生じるためである。また、長波長タイプの機種③の高温領域においてNETDが上昇きみなのも、黒体炉が高温になるに連れて黒体炉温度の不均一性の影響が大きくなってきているためと考えられる。

図5の「菱形黒マーク」は、294.1 Kの標準黒体炉を機種③で測定した際の矩形領域内900ポイントの放射

輝度温度データを基にして、放射輝度温度のヒストグラムを示したものである。この900ポイントの平均値294.08 Kと標準偏差0.0606 Kを基にして正規分布形を描くと点線で示すような形状となり、ヒストグラムは正規分布に非常に近い。この事実からも、標準黒体炉の均一な温度分布の熱画像を基に、画素の放射輝度温度 T_s' の標準偏差 $\Delta T_s'^2$ をサーモグラフィ装置の「雑音」と見なして、その値をその温度におけるNETDとして求める本手法は、客観性のある求め方といえる。

5. 結 び

本研究は、機械的走査形のサーモグラフィ装置を用いた新たなNETDの定義に関する理論的および実験的研究を行ったもので、以下のような結果を得た。

(1) 本手法は、放射輝度温度のばらつきを統計的

に処理しており、その結果には、測定者の個人差が入らず客観性をもたせることができ、サーモグラフィ装置の NETD 評価には適している。

(2) 本研究で提案している NETD に関する理論値と実験値は、良好に一致している。

(3) 標準黒体炉の均一な温度分布の熱画像における放射輝度温度のばらつき、つまり、放射輝度温度の標準偏差を新たな NETD として定義することを提案したい。

(4) 本手法は、他機種のサーモグラフィ装置も含めた新しい NETD の定義法として有効となりうる可能性がある。

題点, 光応用・視覚研究会資料, LAV-87-8, (1987), 21-32.

- (2) Colantonio, A., Thermal performance patterns on solid masonry exterior walls of historic buildings, *SPIE Thermosense XIX*, (1996), 87-95.
- (3) 岡本芳三, 遠赤外線リモートセンシング熱計測法, (1994), 80-252, コロナ社.
- (4) ASTM Committee, *ASTM E*, 1256-95 (1996)
- (5) 日本工業標準調査会審議, 医用赤外線撮像装置 (JIS T 1141-1986), (1986), 6, 日本規格協会.
- (6) 防衛庁, 防衛庁規格 NDS C 0212 (赤外線撮像装置試験方法), (1993), 1-35.
- (7) 黒川 賢, 微小面の放射温度計測, 光応用・視覚研究会資料, LAV-87-2 (1987), 11-20.
- (8) 赤外線技術研究会編, 赤外線工学, (1991), 116-118, オーム社.

文 献

- (1) 梅干野晃, 都市・建築環境における赤外線応用計測と問