

P47

## 電流分布の赤外線による可視化とその応用 Visualization of Current Distributions by Infrared Imaging and Its Application

-赤外線による過渡熱分布測定-  
-Transient Temperature Distribution Measurement by Infrared Imaging-

鈴木 剛<sup>\*1</sup>(学生員), 齋藤 兆古<sup>\*2</sup> (正員)

Goh SUZUKI (Stu.), Yoshifuru SAITO (Mem.)

In order to realize the reliable nondestructive inspection systems, many infrared image sensor systems are developed and utilized because of their high visual capability. Recently, nuclear electric power plant is increasing its usefulness not warm up earth atmosphere accompanying with human life activities. We are now developing to enhance an infrared inspecting system to carry out the condition based maintenance methodology mainly for nuclear electric power plant use. At first, this paper clarifies a relationship between the pixel value constructing infrared image and absolute temperature even though automatic gain control function equipped in infrared CCD camera is activating to get the highest contrast image. Second we demonstrate the absolute temperature visualization when heating the targets by magnetic induction. This makes it possible to clarify the versatile capability of our scheme for various condition based maintenance applications.

*Keywords:* Infrared image, Nondestructive testing, induction heating

### 1 緒論

映像情報による診断は、医学の世界などでも用いられているように極めて具体的な状態把握を可能にする。たとえ言語の異なる民族間でも、映像情報を用いることで意思疎通が可能となる。このように人間の視覚情報処理は全地球人類共通の強力な知的機能である。人間は外部から得る情報のなかで 80 パーセント以上を視覚から取り入れている[1]。

近年、商品の品質検査・管理のために、赤外線カメラを用いた非破壊検査技術が広範に用いられている[2-4]。この背景として、赤外線カメラの広汎な普及と監視技術の高度化が挙げられる。

本研究は、第 2 世代赤外線非破壊検査として、コンピュータを前提とする画像処理技術、すなわち、画像認識・識別・監視技術を含めた、赤外線画像情報による知的非破壊検査・監視技術の開発を目指すものである。

本論文では、従来から我々が提唱する“基準温度同時撮影法”を用いて検査対象である金属の過渡温度上昇分布動画像を赤外線ビデオカメラの熱画像から抽出し、金属中の欠損やシステム欠陥箇所、また非金属体へ混入した金属片可視化法を提案する。

連絡先： 鈴木 剛，〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2，法政大学 大学院工学研究科 電気工学専攻 齋藤兆古研究室

e-mail: suzuki@ysaitoh.k.hosei.ac.jp

<sup>\*1</sup>法政大学大学院 <sup>\*2</sup>法政大学大学院

### 2 基準温度同時撮影法

本実験において使用した赤外線カメラは「三菱サーマルイメージャ（形式 IR-SC 1 三菱電機株式会社）」である。

赤外線画像は対象物の温度分布をモノクロ濃淡情報として表示するものであり、温度の高い部分を白色、温度が低い部分を黒色で可視化する。温度の高低に伴う白黒濃淡情報の範囲（ダイナミックレンジ）は有限であるため、対象の温度情報を高コントラストで取得する方途として、AGC (Automatic Gain Control, 対象の温度分布で最も支配的な温度を中心としたダイナミックレンジへ自動制御する機能) が組み込まれている。これは相対的な温度分布可視化に有効であるが、絶対的な温度分布可視化を不可能にする。可動部分や動力源を含むシステムにおいては、相対的な温度分布よりも遙かに絶対的な温度分布が有意義である場合もある。これは、多くの機器が特定の許容絶対温度内で正常に機能すべく設計されていることから自明である。

以上の事から、単純な赤外線可視化画像から各種機器の適正動作温度を前提とする高精度連続監視システム構築は困難である。しかし、AGC は広範囲な温度幅の撮影を可能とし、赤外線カメラの適用範囲をより広汎なものとする。換言すれば AGC が備わっていない場合、温度感知範囲が限定されるため、不測の温度に対する熱画像が得られない。



Fig.1 Infrared cup images containing different temperature water.

赤外線 CCD に拠る熱画像は対象の赤外線反射率に依存する。すなわち、対象の赤外線反射率が厳密に既知で無い限り厳密な熱画像・温度画像は得られない。

AGC と赤外線反射率問題を解決する一方法として、本論文では、赤外線画像中に既知の異なる温度を持つ複数の温度基準画像を被温度測定対象と同時に撮影し、既知温度を有する複数の画像を構成するそれぞれの画素値とそれらの温度間の関係を用いて被温度測定対象の絶対温度を測定する“基準温度同時撮影法”を提唱する[2, 3, 4]。さらに、この基準温度同時撮影法と誘導加熱を併用した赤外線非破壊検査の幾つかの例を示す。

Fig. 1 は異なる温度の湯を満したコップの赤外線画像である。それぞれのお湯の温度は、上段の左から 46. 4℃, 29. 0℃, 25. 2℃, 下段の左から 15. 7℃, 12. 8℃である。赤外線カメラの AGC 機能が有効に機能し、高温から低温へ至るカップのお湯を最大コントラストで可視化している。お湯の表面画像を構成する画素値は、高温から順に、180, 101, 87, 52, 43 となり、絶対温度と画素値は比例しないことが判る。従って、赤外線画像から対象物の相対的な温度分布は可視化可能であるが、高精度な絶対温度分布の可視化は困難である。通常のデジタルカメラ用 CCD であっても、赤外線波長領域に於ける光エネルギーの入射によって電荷移動が励起されることから、赤外線 CCD と同じ機能を有する。このため、仮に通常の CCD を用いて正確な絶対温度画像が取得可能であれば、遙かに低コストで温度センシングシステムの構築が可能となる。

“基準温度同時撮影法”の基本的な着想は、長さなど幾何学的情報が既知の対象を画像中に同時に写し込み、全体の画像中で、幾何学的情報が既知の対象画像を基準として幾何学的情報が未知である対象物の幾何学

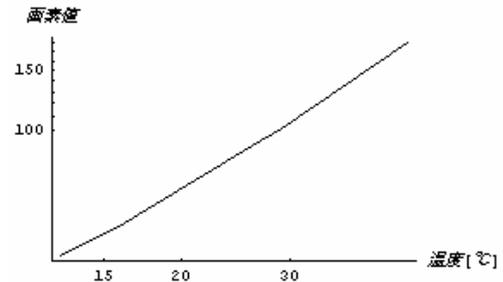


Fig. 2 Temperature versus pixel value

的情報を求める航空写真に拠る地図作成法と同様である。このため、“基準温度同時撮影法”では、温度が既知である対象の赤外線画像を構成する画素値と温度の関係把握しなければならない。

多くの自然科学の問題では、温度上昇などの拡散現象は時間・空間に対しては指数関数的に変化する。このため、ここでは赤外線画像を構成する画素値と絶対温度の関係も指数関数的に關係すると仮定し、Fig.2 に示すように両者を両対数グラフへプロットする。Fig.2 から画素値と温度が比例するため、明らかに両者の関係は指数関数的であり、Fig.2 を用いて画素値を温度へ換算すれば絶対温度分布の可視化画像を得ることが可能となる。

### 3 誘導加熱に拠る非破壊検査



Fig. 3 Two Iron plates to simulate a straight crack.

Fig. 4 Thermal Image of two iron plates when heating by alternating magnetic fields.

#### 3.1 鉄板中の亀裂探査

鉄板中のクラックを模擬するため 2 枚の鉄板を接合した実験モデルを Fig.3 に示す。平面状スパイラル励磁コイルへ通電し Fig.3 のモデルを誘導加熱した。定常的な加熱状態を表す赤外線画像を Fig.4 に示す。Fig.5

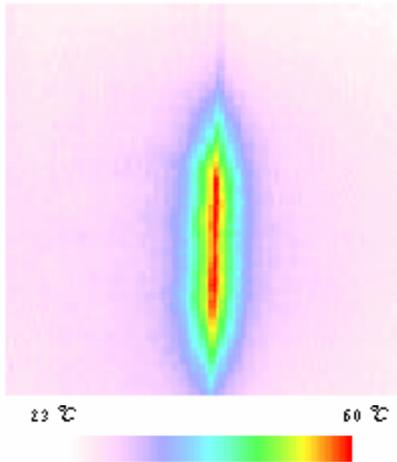


Fig.5 Absolute temperature distribution of two iron plates when heating by alternating magnetic fields.

は基準温度同時撮影法によって得られた絶対温度分布である。赤部分が最も高温部を示し、白色に近づくにつれ低温部を示す。この結果から鉄板接合部分は周囲に比べて摂氏 30~40 度高温であることがわかる。すなわち、加熱電流である渦電流密度は鉄板の接合部で最大となる。

### 3.2 非金属材料中の金属探査



Fig. 6 A cloth folding in a  $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$  iron plate

衣料品中の縫製針や魚介類中の金属網破片探査は直接人体の内外へ障害を与えるため、極めて精密で正確な検査を必要とする。

Fig.6 に示すように非金属中に混入した金属片を模擬し、二つ折りにした布間に  $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$  の鋼板を挟んだ。Fig.7 に示す励磁コイルへ通電して生成される交流磁界中へ Fig.6 の金属片を挟んだ布を配置する。誘導加熱開始 2 分後に赤外線画像を撮影した。得られた赤外線画像へ基準温度同時撮影法を適用して絶対温度上昇分布を可視化した。Fig.8 は温度上昇画像を示す。



Fig. 7 Exciting coil used for induction heating

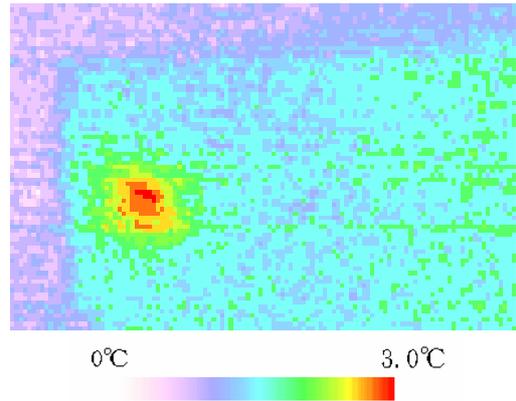


Fig. 8 Absolute temperature rise distribution of the cloth folding in an iron plate

Fig.9 はノイズの状況を把握するために Fig.8 の温度上昇を縦軸に取った Fig.8 の 3 次元表示である。

Fig.8, 9 より金属片が位置する部分の温度は、誘導加熱前と比較して約  $3^\circ\text{C}$  温度上昇することが確認できる。すなわち、金属片は布の間に挟まれているため目視が不可能であるが、誘導加熱によって金属片が加熱され、結果として、非金属中に混入した金属が可視化される。

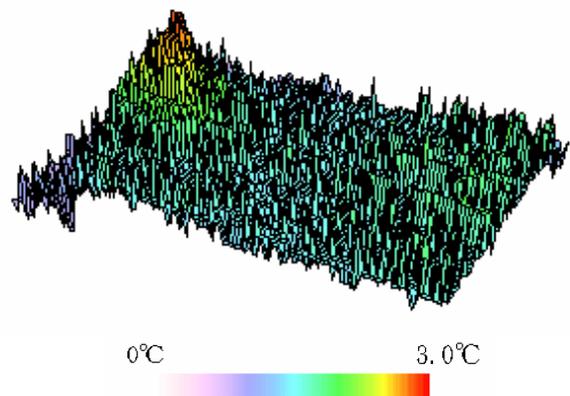


Fig. 9 3D representation of the absolute temperature rise distribution

次に、加熱対象となる金属と、温度上昇の関係について吟味する。Fig. 10 はそれぞれ  $0.5 \times 0.5$ ,  $1.0 \times 1.0$ ,  $1.5$

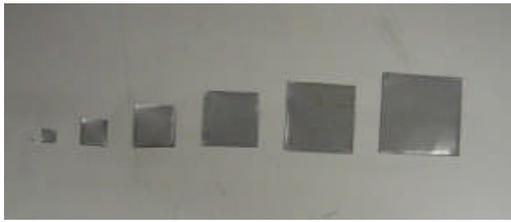


Fig. 10 Six tested metallic plates having different surface area.

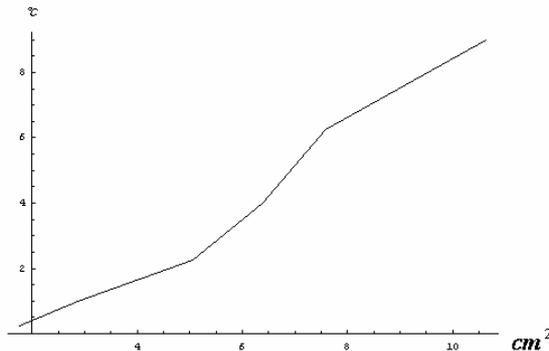


Fig. 11 Temperature rise versus surface area of the tested metallic plates

×1.5, 2.0×2.0, 2.5×2.5, 3.0×3.0cm<sup>2</sup>の6種類の金属片を示す。これらの金属片を3.1や3.2節と同様にそれぞれを布に挟んだ状態で誘導加熱を行い、絶対温度上昇分布画像を基準温度同時撮影法によって得た。

6種類の金属片で、それぞれの最高温度上昇は1.76°C, 2.95°C, 5.66°C, 6.39°C, 7.59°C, 10.63°Cであった。金属片の表面積と、温度上昇の関係をFig. 11に示す。Fig. 11の結果から以下のことがわかる。

- 1) 同じ条件下で誘導加熱を行った場合、励磁コイル面と平行な加熱対象金属の表面積が大きいほど発熱量が大きい、
- 2) 最大温度上昇値から金属片の励磁コイルに平行な面の相対的な寸法の概略が把握できる。

#### 4 結言

本論文では、赤外線 CCD カメラを用いて絶対温度測定を可能とする一方法として“基準温度同時撮影法”を提唱し、その有効性を検証した。その結果、赤外線カメラを用いた絶対温度状態監視システム構築の一端が開けた。

#### 参考文献

- [1] 中島 龍興, 近田 玲子, 面出 薫; “照明デザイン入門”, 彰国社(1955)
- [2] 鈴木剛, 齋藤兆古, 堀井清之, “過渡熱伝達分布測定による金属欠損の可視化”, 第35回可視化情報シンポジウム, 可視化情報 C211, Vol.27, Suppl. No.1 (2007年7月)
- [3] 鈴木 剛, 齋藤 兆古, 堀井 清之, “電気抵抗の赤外線画像による可視化”, 第36回可視化情報シンポジウム, 可視化情報 P01-001, Vol. 28, Suppl. No.1 (2008年7月)
- [4] 鈴木 剛, 齋藤 兆古, “過渡熱伝達分布測定による金属欠損の可視化”, 第16回MAGDA コンフェレンス in 京都, (2007.11.22-23)