

P21

## 過渡熱伝達分布測定による金属欠損の可視化

Defect Visualization by Transient Thermal Distributions

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

Goh SUZUKI and Yoshifuru SAITO

In order to realize the reliable inspecting systems, many infrared image sensors are utilized because of their high visual capability not depending on the human visible light condition. Recently, nuclear electric power plant is considered as one of the deterministic methodologies to prevent the warming up the earth system accompanying with human life activity. We are now planning to enhance the infrared inspecting system to carry out the condition based maintenance methodology for nuclear electric power plant. At first, this paper clarifies a relationship between the pixel values 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, which is the most important inspecting factor in the nuclear power plant, on the bended and cracked iron sheet.

*Keywords:* Infrared image, Condition based maintenance, and Nondestructive testing

### 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との説もある<sup>1)</sup>。

近年、商品の品質管理・保証のため、赤外線カメラを用いた非破壊検査の技術が実用化されている<sup>2)</sup>。現代文明を支える多くの構造物は鉄を主体とする構造材で構成されている。構造物の非破壊検査は、言うまでもなく人工的構築物の根幹を支える構造体の検査であり、その重要性は人類文明そのものを支える基幹技術と言える。例えば原子炉の熱交換器などでは渦電流(ECT)による非破壊検査が広汎に用いられている。ECT は非磁性体金属に対して極めて効果的な検査手段であるが、磁性体に対しては解決すべき課題が残されている。

本論文では、磁性体を含むあらゆる種類の金属材料を検査対象とする非破壊検査法の一方法を提案する。検査対象である金属の過渡熱分布動画像を赤外線ビデオカメラで撮影し、赤外線動画像から絶対温度上昇分

ム欠陥箇所を可視化する方法を検討する。その結果、検査速度は ECT に比較して低下するが、被検査対象である金属の材質に依存せず、連続監視を可能とする高度な CBM (Condition Based Maintenance) 技術の一方法の開発へ繋がる。

### 2 赤外線カメラ

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熱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の情報を高コントラスト化するために、殆ど全ての赤外線 CCD カメラでは AGC(Automatic Gain Control, 対象物の赤外線画像中において支配的溫度に合わせて出力感度を自動制御する機能)が組み込まれている<sup>3)</sup>、これは相対的な温度分布可視化には有効であるが、絶対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温度分布が有意義である。これは、多くの機器は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。

AGC 機能は熱分布の走査範囲を自動的に最適化する

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](mailto: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

ことで広範な熱分布画像を取得可能とする。AGC は絶対温度を測定不可能とし、相対温度で表示するために熱画像の習得情報を最大化する機能とも言える。赤外線を用いた温度分布撮影機器としてサーモグラフィが知られているが、サーモグラフィも走査温度範囲を限定しなければ温度情報が得られない。また、完全黒体が存在しない限り絶対温度測定精度は期待できない。



Fig.1 Infrared cup images containing different temperature water.

本論文では、赤外線カメラを使用して撮影された赤外線可視化動画像をコンピュータの論理的演算機能を利用して絶対温度動分布可視化画像へ変換する。さらに、具体例として、誘導加熱された鉄板の絶対温度分布可視化画像例を示す。

Fig. 1 は 5 種類の異なる温度の湯を入れたコップの赤外線画像である。熱電対で測定したそれぞれのお湯の温度は、上方、左から順に 46.4、29.0、25.2、下方、左から 15.7、12.8 である。赤外線 CCD カメラの AGC 機能が有効に機能し、高温から低温のお湯まで最大コントラストで可視化している。

それぞれのお湯の表面熱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。従って、赤外線画像から対象物の相対温度分布は可視化可能であるが、絶対温度分布の可視化は不可能である。通常の CCD (Charge Coupled Device) 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 から正確な絶対温度画像がされるとすれば、遙かに低コストで汎用性に富む CBM 用絶対温度センサシステム構築が可能となる。

以上の状況を鑑み、ここでは画素値と絶対温度の関

係を明らかにする。多くの自然科学の問題では、温度上昇などは指数関数的に時間に対して変化する。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。

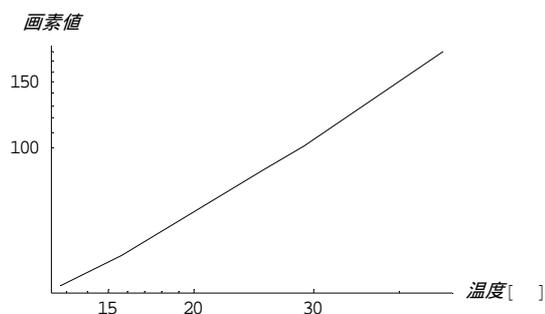


Fig. 2 Temperature versus pixel value relation

Fig.2 から明らかに画素値と温度関係は指数関数であり、この関係を利用して通常の赤外線画像から、AGC が作用していたとしても、赤外線画像中に熱電対で測定される基準温度を持つ画像を同時に取得することで絶対温度可視化画像を得ることが可能とされる。

すなわち、赤外線画像に既知の温度を持つ物体を同時に撮影し、Fig.2 に示す温度と熱画像の画素値間の校正曲線を用いて熱画像から絶対温度分布画像を得る。

### 3 欠損と温度分布の変化

鉄の欠損を想定し、歪みを持つ Fig.3 に示す珪素鋼板を用意する。歪み部分を平面ドーナツ状励磁コイル上に置き、誘導加熱した。加熱状態を赤外線画像として取り込み、Fig.2 の関係用いて、Fig.3 の赤枠部分の絶対温度分布をカラー表示した結果を Fig.4 に示す。赤部分が最も高温を示し、白色に近づくにつれ低温を示す。



Fig.3 Silicon steel sheet with bending at an edge

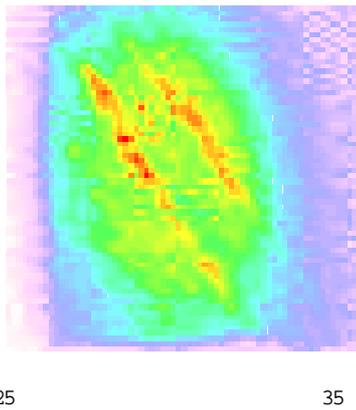


Fig.4 Absolute temperature distribution of the iron sheet shown in Fig.3

#### 4 接合部分と温度分布の変化

鉄板の溶接部分を想定し、2枚の鉄板を接合したものの Fig.5 に示す。鉄板接合部分を誘導加熱し、赤外線カメラを用いて撮影した結果を Fig.6 に示す。さらに接合部分の絶対温度分布をカラー表示した結果を Fig.7 に示す。赤部分が最も高温を示し、白色に近づくにつれ低温を示す。鉄板接合部分は周囲に比べて 30~40 度高温であることがわかる。



Fig. 5 Two iron plates to simulate a crack



Fig. 6 Infrared image of two iron plates when simulating a crack by connecting two iron plates

#### 5 赤外線動画の絶対温度表示

撮影した赤外線動画をワンフレーム毎に絶対温度画像へ Fig.2 の関係を用いて変換することで、赤外線動画から絶対温度変化動画を得ることが出来る。

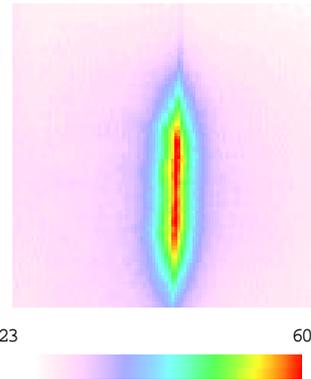
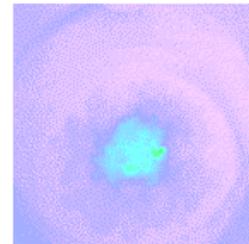


Fig.7 Absolute temperature distribution of two iron plates when simulating a crack by connecting two iron plates

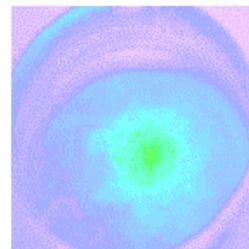
アルコールランプで加熱中の水をいれた鍋



加熱開始  
0 秒後



加熱開始  
30 秒後



加熱開始  
60 秒後

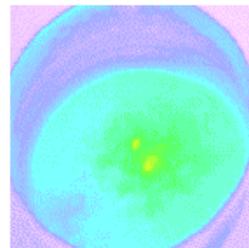


Fig.8 Transient temperature distributions of water in a pan

具体例として、鍋に水をはり、アルコールランプで加熱した赤外線動画画像を絶対温度分布動画画像へ変換した結果を Fig.8 に示す。鍋の中心が始めに高温になり、徐々に鍋全体の温度が上がっていく様子がわかる。すなわち、過渡絶対温度分布動画画像が得られる。

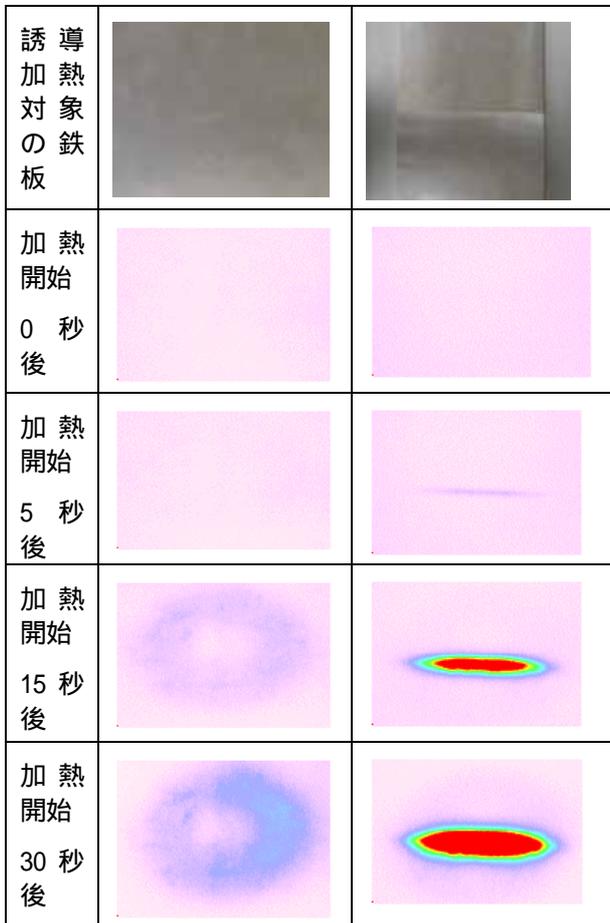


Fig.9 Comparison of transient temperature rise

### 6 鉄板接合部の絶対温度分布

鉄板のクラック部分を想定し 2 枚の鉄板を接合させて誘導加熱した。比較のため、同じ条件で接合部を持たない鉄板を誘導加熱した。接合部を含む部分と接合部が存在しない部分の過渡絶対温度分布動画画像を比較した。この結果を Fig.8 に示す。Fig.8 から加熱開始直後では、鉄板の接合部と接合部がない鉄板それぞれの絶対温度分布画像の区別は困難であるが、加熱開始 5 秒後から、徐々に高温部分が明確となり、加熱開始 30 秒後程度で両者の違いは決定的となることが判る。

以上の結果から、単純な赤外線画像そのものではクラックを模擬した鉄板接合部の判定が明確に出来ない。しかし、赤外線画像を本論文で提案する方法で正確な絶対温度分布画像へ変換することで鉄板のクラック（接合部）が極めて明確に判定可能とされることが明らかにされた。

### 6 まとめ

本論文では、赤外線 CCD カメラ並びに赤外線画像の特徴を述べ、それらを用いた絶対温度分布測定法を提案し、具体例を示した。その結果、赤外線カメラを用いた絶対温度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) 臼田優, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之: 電子回路基盤の赤外線可視化画像モーダルウェーブレット解析, 第 33 回可視化情報シンポジウム B 203 工学院大学 2005 年 7 月 26 日
- 3) 堀川岳洋: 赤外線動画画像からの熱情報の抽出, 2003 年度法政大学卒業論文