

2008 年度 修士論文

赤外線ビデオカメラを用いた電流分布の可視化とその応用

Visualization of Current Distributions
by Infrared Imaging and Its Application

指導教授 齋藤兆古

法政大学大学院工学研究科
電気工学専攻修士課程

学籍番号 07R3119

氏名 鈴木 剛

Abstract

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 eddy currents. This makes it possible to clarify the versatile capability of our scheme for various condition based maintenance applications.

目次

Abstract	..... i
第1章 序論	..... 4
第2章 基準温度同時撮影法	..... 5
2. 1 赤外線	..... 5
2. 2 赤外線カメラ	..... 6
2. 3 Automatic Gain Control	..... 6
2. 4 黒体と反射率	..... 6
2. 5 計算機中の赤外線画像データ	..... 7
2. 6 AGC 機能と画素値	..... 8
2. 7 画素値と温度の関係	..... 9
2. 8 基準温度同時撮影法	..... 11
第3章 基準温度同時撮影法による金属欠損の可視化	..... 13
3. 1 鉄板中のクラック探査	..... 13
3. 2 鉄板中の歪み探査	..... 14
3. 3 データベース法	..... 15
3. 4 基準温度同時撮影法を用いた連続監視	..... 16
3. 5 データベース法を用いた連続監視	..... 19
3. 6 まとめ	..... 22
第4章 金属片の探査	..... 23
4. 1 実験	..... 23
4. 2 加熱対象金属のサイズと温度の関係	..... 24
4. 3 まとめ	..... 25
第5章 導電性繊維の評価	..... 26
5. 1 導電性繊維	..... 26
5. 2 導電性繊維の温度画像	..... 27
5. 3 導電性繊維の電位分布画像	..... 27
5. 4 導電性繊維の電気抵抗分布画像	..... 28
5. 5 まとめ	..... 29

第6章 結論	..... 30
参考文献	..... 31
研究業績	..... 31
謝辞	..... 32

第1章 序論

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[2]。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。

また、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 (Eddy Current Testing) による非破壊検査が広汎に用いられている。渦電流による非破壊検査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。

そこで、本研究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。

知的非破壊検査・監視技術の開発の基本技術として、本論文では赤外線カメラを用いた“基準温度同時撮影法”を提唱する[2]。本手法は検査対象である金属の過渡温度上昇分布動画を、赤外線ビデオカメラによって得られた熱動画像から厳密に抽出可能とし、金属中の欠損やシステム欠陥箇所、また非金属中に混入した金属片を可視化する。

提唱する手法は、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と考えられる。

第2章 基準温度同時撮影法

2.1 赤外線

赤外線とは可視光と同種の光波である。可視光と赤外線の波長帯については、一般に可視光端部が $\sim 100\mu\text{m}$ 、赤外線が $0.78\sim 1000\mu\text{m}$ だとされている。すなわち、赤外線とは可視光よりも波長の長い光波である。

宇宙に存在する物体は全て絶対零度以上の温度を持っている。例えばドライアイスは約 195K である。また、絶対零度以上の温度を持つ物体からは、その温度に対応した強さの赤外線が放射されている[3]。

2.2 赤外線カメラ

本研究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-SC1 三菱電機株式会社）」である。

赤外線カメラで撮影された赤外線画像は、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。一例として、それぞれ温度の異なるお湯の入ったコップを用意し、通常デジタルカメラで撮影した画像と、赤外線カメラで撮影した赤外線画像を比較する。通常デジタルカメラで撮影された画像を図 2.1 に、赤外線カメラによって撮影された赤外線画像を図 2.2 にそれぞれ示す。

図 2.1 から、温度の違いを感知することはできないが、図 2.2 の赤外線画像からは温度の違いを明確に感知することができる。



図 2.1 温度の異なるお湯

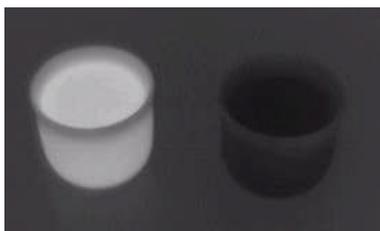


図 2.2 温度の異なるお湯の赤外線画像

2. 3 Automatic Gain Control

本研究では赤外線ビデオカメラで撮影した赤外線可視化動画像を絶対温度分布動画像へ変換することを基幹技術とする。

赤外線動画像から絶対温度分布動画像への変換で最も問題となるのが、殆んど全ての赤外線ビデオカメラに組み込まれている AGC (Automatic Gain Control) である。AGC とは赤外線カメラの感度レンジを撮影対象の温度分布中で最も支配的な温度に設定し、ダイナミックレンジを自動制御する機能である。この機能は、感度のダイナミックレンジが限られた赤外線 CCD を用いて広範囲な温度幅の撮影を高コントラストで可能とし、赤外線カメラの適用範囲をより広汎な温度へ対応可能とする。換言すれば赤外線カメラに 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の撮影が困難となる。

しかし、AGC 機能を持つ赤外線カメラはダイナミックレンジを自動制御するために、相対的な温度分布を把握するのには極めて有効であるが、絶対的な温度分布画像を撮影不可能とする。

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。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、大多数の AGC 機能を利用した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。

2. 4 黒体と反射率

1835 年に、赤外線も光波の一種であることが示され、その後一定温度における同じ波長の放射線に対する物質の吸収能力と放射能力との比は、物体の性質には関係なく温度のみに依存して、一定の値を持つという法則が発見された。さらに、入射したあらゆる光を完全に吸収する理想的な物体として黒体という概念が導入された。黒体とは、表面に入射した光を 100 パーセント吸収するものとしているが、実際にこれに相当する物体は存在しない。すなわち黒体とは理想物体にすぎない。この黒体は、エネルギー放射の能力があらゆる物体より大きく、放射率 1 とし、これによっていろいろな物体の熱や光の放射能力の比較基準とされる [3]。

仮に測定対象物が理想的な黒体であれば、放射されるエネルギーより絶対温度を得ることが可能とされる。しかし、黒体とはあくまで理想物体にすぎず、測定対象物によって放射率がそれぞれ異なる。すなわち、黒体以外の対象物では、放射エネルギーより真の温度値を得ることは難しい。また、得られた熱画像には、必ず、測定対象物以外の物体が放射する赤外線が反射像として混入する。このように、サーモグラフィ法等で赤外線カメラに

より得られる表面温度分布は、対象物表面から放射、あるいは反射された赤外線領域の電磁波のエネルギー量全てが放射率既知の対象物表面から放射された赤外線とみなして計算されるため、一般に真の温度値とは一致せず、見かけ上の温度となる。

2.5 計算機中の赤外線画像データ

本論文は赤外線カメラを使用して撮影された赤外線動画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事を基幹手段としている。

本章では、赤外線カメラを用いて撮影された赤外線画像が計算機中でどのように現されるかを示す。温度分布として表示されるモノクロ濃淡情報は計算機中で「画素値」の分布として表される。画素値とは0～255の8ビット整数値を用いて画像濃淡を表現するものである。画素値0で黒色を表し、画素値255で白色を表し、中間色はその間の数値で表される。

一例として図2.3に炎の灯ったアルコールランプを、図2.4には図2.3に示したアルコールランプの赤外線画像を、さらに図2.5には図2.4の赤外線画像を計算機に取り込み、表示された画素値分布の概略をそれぞれ示す。図2.3, 2.4, 2.5を観察すれば、アルコールランプで最も温度が高い炎部分の画素値が、最大値の255を取ることがわかる。



図 2.3 アルコールランプ



図 2.4 アルコールランプの赤外線画像

52	57	59	67	110	254	255	68	58	55	56	51
54	56	58	67	112	254	255	69	58	57	55	54
56	57	59	62	86	254	196	65	58	56	55	54
57	56	58	59	72	255	90	61	58	56	55	55
54	56	59	59	28	85	27	21	57	57	57	56
54	56	56	25	26	26	16	10	38	56	55	54
55	53	52	26	25	21	17	15	44	56	56	53
52	53	52	44	30	27	23	29	47	51	52	54
51	53	51	49	29	28	27	37	50	50	54	52
54	52	52	51	50	48	50	49	50	52	50	52

図 2.5 アルコールランプの画素値分布

2. 6 AGC 機能と画素値

実際に AGC が作用した場合の画素値の変化を示す。図 2.6 は摂氏 26 度のお湯で満たされたコップを、赤外線ビデオカメラを用いて撮影した赤外線画像である。図 2.6 の赤外線画像中における支配的な温度を意図的に変化させることで、お湯部分を構成している画素値がどのように変化していくかを示す。図 2.7 は摂氏 26 度のお湯と同時に氷を撮影した赤外線画像である。さらに、図 2.8 は摂氏 26 度のお湯と同時に炎の灯ったアルコールランプを撮影した赤外線画像である。



図 2.6 摂氏 26 度のお湯の赤外線画像



図 2.7 摂氏 26 度のお湯と氷の赤外線画像

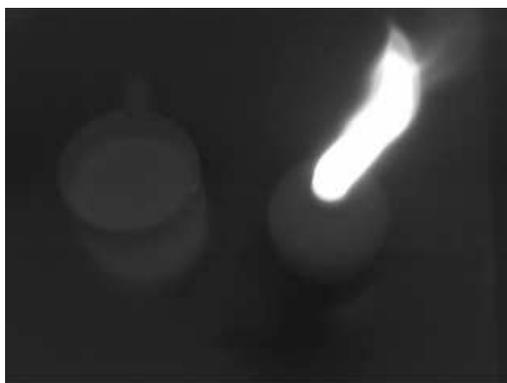


図 2.8 摂氏 26 度のお湯と炎の赤外線画像

お湯の温度は変化していないが、AGC が作用し赤外線画像を構成する支配的な温度に連動してダイナミックレンジの自動制御が行われ、その結果、赤外線画像におけるお湯部分を構成している画素値がそれぞれ異なる値となる。

わかり易くするために、図 2.6, 2.7, 2.8 のお湯部分の画像を切り出し比較する。図 2.9 が結果であり、左から図 2.6, 2.7, 2.8 におけるお湯部分の画像である。

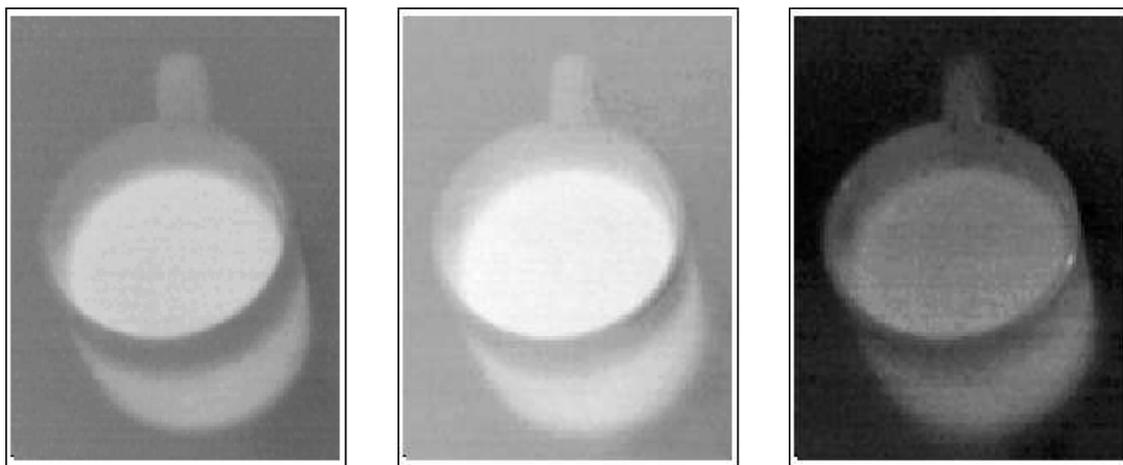


図 2.9 AGC 作用時の赤外線画像

図 2.9 において、赤外線画像におけるそれぞれのお湯部分を構成する画素値は左から順に、92、105、61 となっている。全て同じ温度のお湯を撮影した赤外線画像であるが、それぞれが異なって映し出されているのは明白である。すなわち、お湯の温度自体に変化はなくても、同時に撮影される環境に依存して赤外線 CCD の出力が変化する。このため、赤外線熱画像を構成する画素値のみの情報から正確な温度を得ることは困難である。これが赤外線 CCD を用いた絶対温度分布測定の基本的问题点である。

2. 7 画素値と温度の関係

2. 6 節で述べた赤外線画像を構成する画素値と、温度の関係を明らかにする。図 2.10 は、5 種類の異なる温度のお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、上段左のお湯が最も高温で 46. 4℃、上段中央が 29. 0℃、上段右が 25. 2℃である。さらに下段左は 15. 7℃、下段右は 12. 8℃である。赤外線カメラの AGC 機能が有効に機能している為、高温から低温へ至るコップのお湯を最大コントラストで可視化され、目視においてもそれぞれの温度関係が極めて把握しやすい。

次に図 2.10 の赤外線画像における、5 種類のお湯部分を構成する画素値を示す。それぞれ、高温から順に、上段は 180、101、87 さらに下段は 52、43 なる画素値である。



図 2.10 温度の異なるお湯の赤外線画像

これらの画素値と絶対温度を比較すれば、単純な比例関係ではないことが判る。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関係すると仮定し、図 2.11 に示すように両者を両対数グラフへプロットする。図 2.11 から画素値と温度が比例することが判り、明らかに両者の関係は指数関数的である。したがって、この関係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。

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。

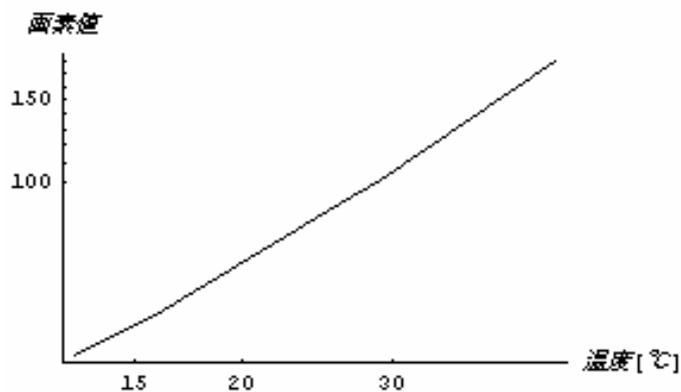


図 2.11 画素値と温度の関係図

2. 8 基準温度同時撮影法

2. 7 節で述べた、赤外線画像を構成する画素値とそれらの温度の関係を用いて赤外線画像を絶対温度分布画像へと変換する手法を述べる.



図 2.12 検査対象金属と基準温度

図 2.12 において、画像右にある一枚の鉄板が温度分布を得たい検査対象物である。検査対象物と同時に左赤枠内の基準温度を撮影しておく。図 2.12 では、あらかじめ温度のわかっている湯の入ったコップを使用している。

さらに図 2.12 を、赤外線ビデオカメラを用いて撮影し、赤外線画像を構成する画素値と温度の関係を基準温度で正規化する。これによって、赤外線画像を構成する画素値全てに絶対温度が割り振られ、赤外線画像を絶対分布画像へ変換することが可能となる。我々は本手法を“基準温度同時撮影法”と呼ぶ。

“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を把握しなければならない。

AGC と赤外線反射率問題を解決する一方法として“基準温度同時撮影法”は有効である。図 2.12 において、基準温度としてお湯を用いている。この理由としては、熱電対温度計の計測能力とお湯の温度の可制御性にある。ただし、ここではお湯と検査対象物の反射率が等しいと仮定して実験を行っている。この仮定は、基準温度として検査対象物と同じ材質

(反射率) の物体、若しくは検査対象物中の複数点の温度が測定可能であれば、厳密な温度計測が可能である事を意味する。

第3章 基準温度同時撮影法による金属欠損の可視化

本章では基準温度同時撮影法による金属欠損の可視化について述べる。被検査対象を誘導加熱し赤外線画像より得られた温度分布画像によって、欠陥部分を可視化する。さらに静止画のみではなく動画像を用いることで欠陥部分を連続監視する手法について検討する。

3.1 鉄板中のクラック探査

図 3.1 は鉄板中のクラックを模擬するため 200mm×200mm×9mm の2枚の鉄板を接合した実験モデルを示す。



図 3.1 接合部分を含む鉄板

次に、家庭用 IH 調理器を用いて、図 3.1 のモデルを誘導加熱した。ここで用いた IH 調理器は「SONY SONETT (形式 81-15755 SONY) 100V 1.2KW」である。熱的過渡現象が終了した定常状態の赤外線画像を図 3.2 に示す。



図 3.2 接合部分を含む鉄板赤外線画像

図 3.2 の赤外線画像のみでも、接合部分が周囲に対して高温であることは明らかである。基準温度同時撮影法によって得られた絶対温度分布を図 3.3 に示す。

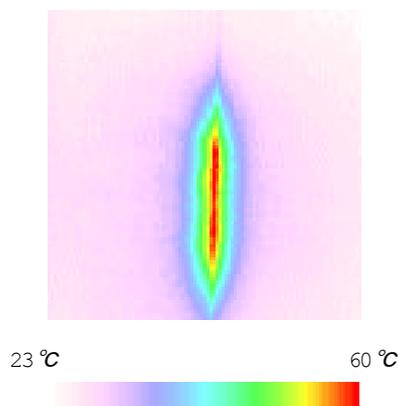


図 3.3 接合部分を含む鉄板絶対温度分布画像

赤色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。最も高温な部分は接合中心部分で、およそ摂氏 60 度を示した。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ことがわかる。

3. 2 鉄板中の歪み探査

鉄の欠損を想定した歪み部分を有する検査対象を図 3.4 に示す。検査対象は厚み 0.3mm の珪素鋼板である。図 3.4 の赤枠部分（歪み部分）を図 3.5 に示す平面ドーナツ状励磁コイル上に置き 50kHz、40V で 60 秒間誘導加熱した。誘導加熱に用いた平面ドーナツ状励磁コイルはインダクタンス $25 \mu\text{H}$ 、内部抵抗 $580\text{m}\Omega$ である。



図 3.4 歪みを持つ珪素鋼板

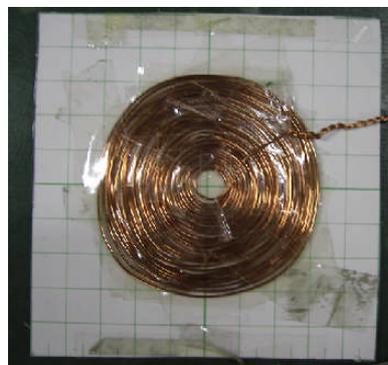


図 3.5 平面ドーナツ状励磁コイル

赤枠部分の加熱状態を撮影した赤外線画像を図 3.6 に、図 3.6 を絶対温度分布に変換しカラー表示した結果を図 3.7 に示す。

図 3.7 は赤色部分が最も高温を示し白色に近づくにつれ低温を示す。この結果から、歪みを持つ部分に渦電流が集中し周辺と比較して摂氏 3 度ほど高温となっていることが判る。

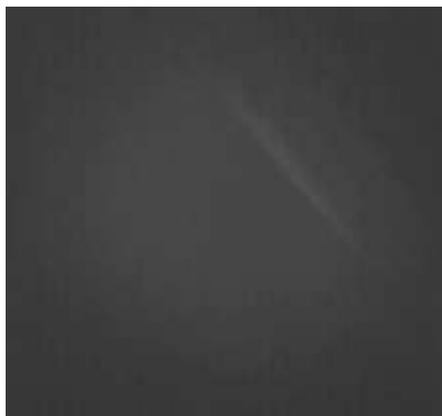


図 3.6 歪み部分の赤外線画像

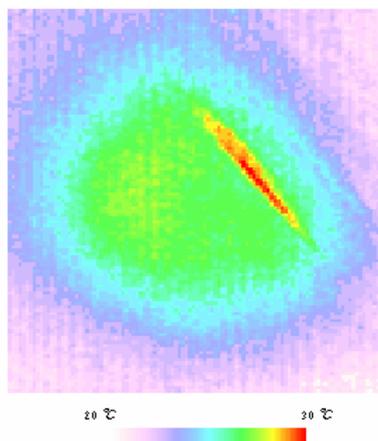


図 3.7 歪み部分の赤外線画像

3.3 データベース法

3.2 章では、検査対象金属を図 3.5 に示す平面ドーナツ状励磁コイルを用いて誘導加熱した。このため、検査対象物は平面ドーナツ状励磁コイルと相似形状に加熱され、絶対温度分布画像より珪素鋼板の歪み部分のみを抽出することは出来ない。この事実は、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・監視技術への応用を考えた場合に解決すべき点である。このため、検査・監視技術の確立という観点に立ち返り、検査対象物が正常である場合のデータベースを用意しておくことで、情報として得たい欠陥部分のみの抽出を試みた。

図 3.4 と同じ材質で欠陥をもたない珪素鋼板を用意し、50kHz 40v で 60 秒間誘導加熱を行い図 3.8 の赤外線画像を得た。

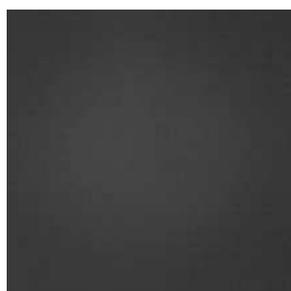


図 3.8 正常値のデータベース

図 3.8 の赤外線画像を絶対温度分布画像へ変換し、欠陥部分を持つ珪素鋼板の絶対温度分布画像と差分した結果を図 3.9 に示す。

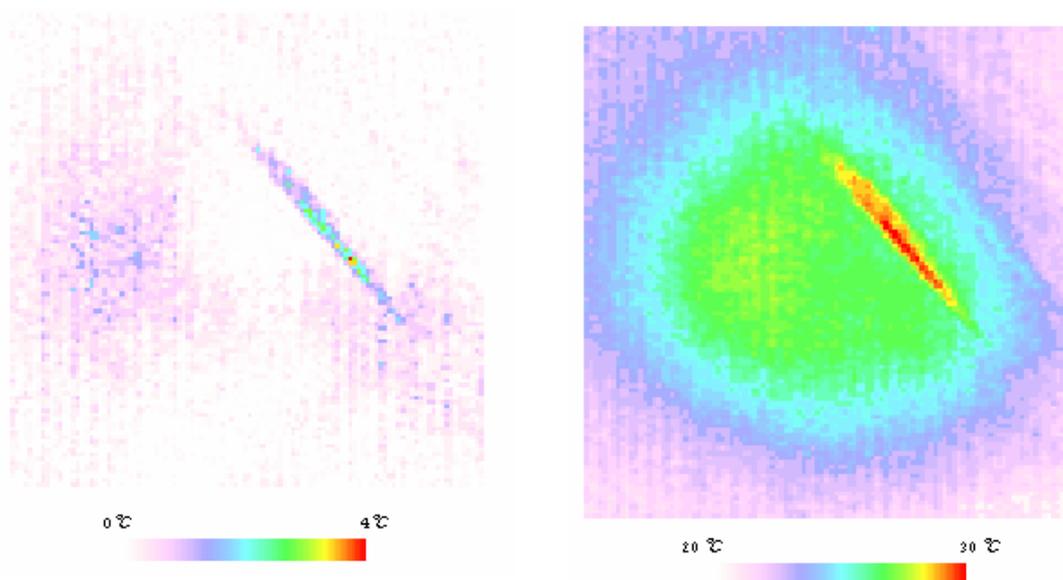


図 3.9 差分画像を用いた場合（左）と、用いない場合（右、図 3.7）の比較

図 3.9 の結果から、差分画像を用いることで、歪み部分のみの情報が抽出された。この結果は、検査技術の観点からあらかじめ正常値を用意することで更なる高精度な検査結果が期待可能であることを意味する。

3. 4 基準温度同時撮影法を用いた連続監視

基準温度同時撮影法を用いて連続監視技術の構築を試みる。基本的な手法は撮影した赤外線動画をワンフレームごとに絶対温度分布画像へと変換し、絶対温度を監視する手法である。

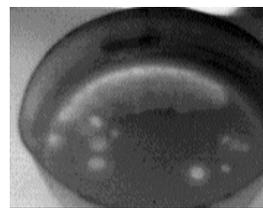
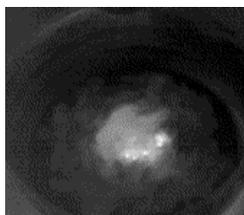
具体例として、水を満たした鍋をアルコールランプで加熱した赤外線動画と家庭用 IH 調理器を用いて加熱した赤外線動画をそれぞれ絶対温度分布動画へと変換して比較検討した。

赤外線動画を比した結果を図 3.10 に示す。さらに、それを絶対温度分布動画へと変換した結果を図 3.11 に示す。

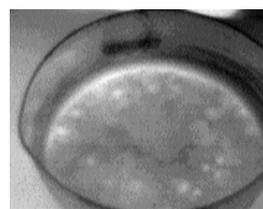
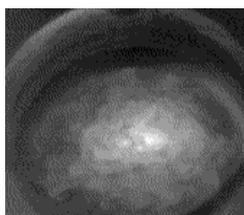
アルコールランプによる加熱

IH 調理器による加熱

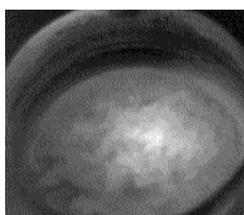
加熱開始 5 秒



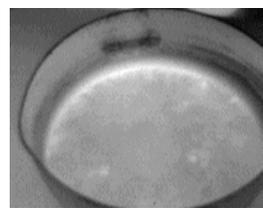
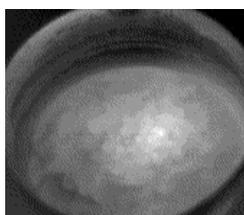
加熱開始 20 秒



加熱開始 30 秒



加熱開始 40 秒



加熱開始 50 秒



加熱開始 60 秒



図 3.10 水を満たした鍋の加熱過程赤外線動画像

アルコールランプによる加熱

IH 調理器による加熱

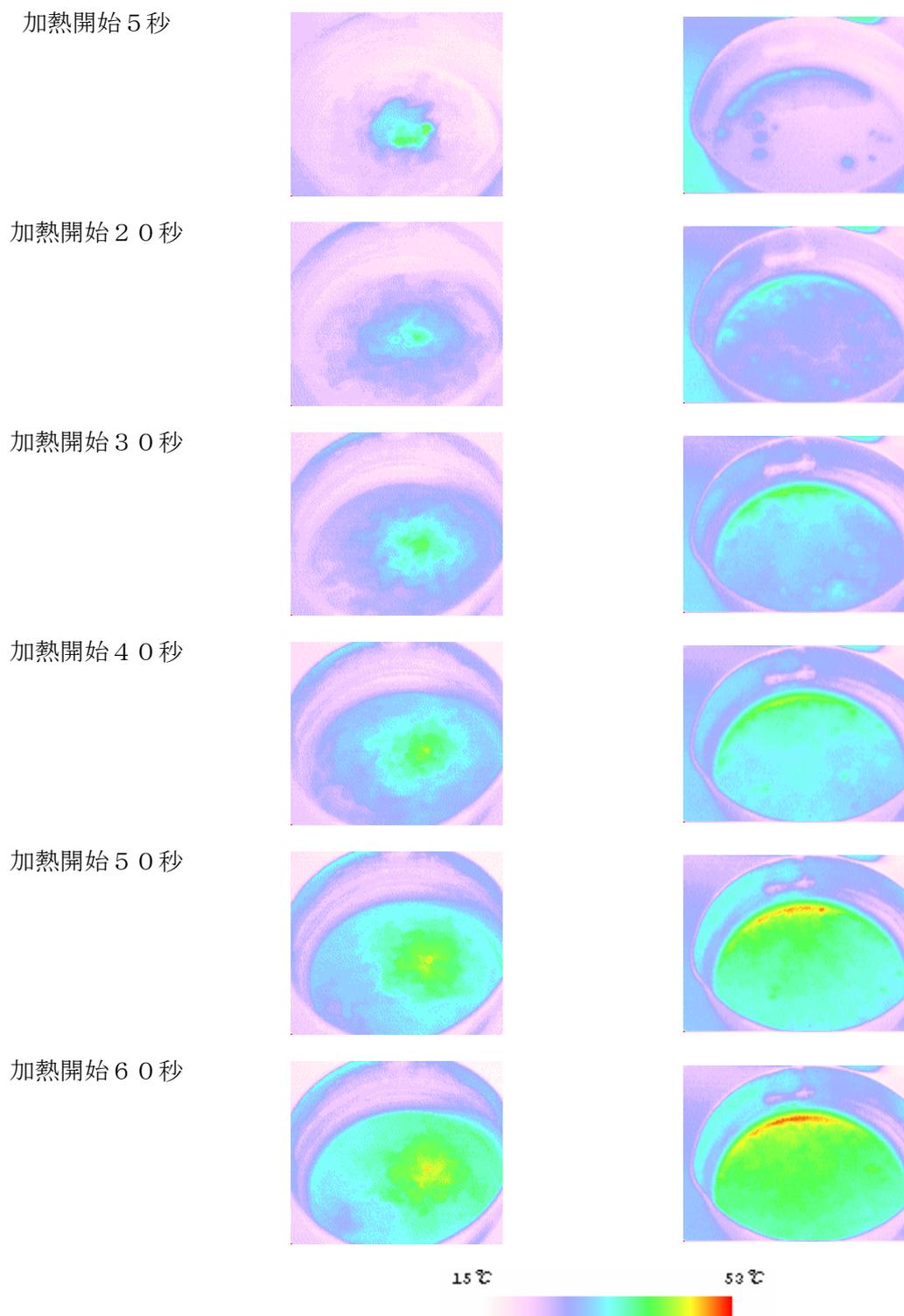


図 3.11 水を満たした鍋の加熱過程絶対温度分布動画像

図 3.11 より、アルコールランプによって過熱された鍋のお湯は炎が鍋の中心を局所的に加熱している為、鍋の中心から温度が上昇し最終的に鍋全体のお湯の温度が上昇していく様子が観察される。

IH とは Induction Heating、すなわち、誘導加熱を意味する。アルコールランプを用いた加熱に対して、IH 調理器により加熱された鍋のお湯は鍋自体が発熱体となっているために鍋の接する部分から全体的にお湯の温度が上昇していく様子が観察された。

この結果、本手法を用いることで赤外線ビデオカメラにより撮影された赤外線動画像を、絶対温度分布動画像へ変換し、加熱方法による温度上昇分布の相違が把握可能とされた。これは、赤外線 CCD カメラを用いて、機器や系統の絶対温度が監視可能となり結果として機器や系統の異常事態の連続監視が可能である事を意味する。

3. 5 データベース法を用いた連続監視

基準温度同時撮影法を用いた非破壊検査の応用として、3. 3 章で述べたデータベースを用いた非破壊検査法へ、3. 4 章で述べた連続監視法の適用を試みる。

実験に用いる、100mm×100mm×0. 3mm の珪素鋼板を図 3.12 に示す。この珪素鋼板の裏面にはヤスリによる傷が付いているが、表面からの目視では傷を確認することはできない。裏面の画像を図 3.13 に示す。

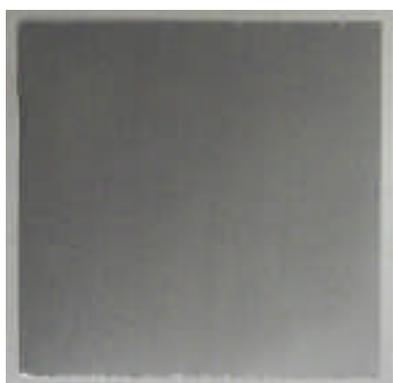


図 3.12 検査対象金属表面の画像

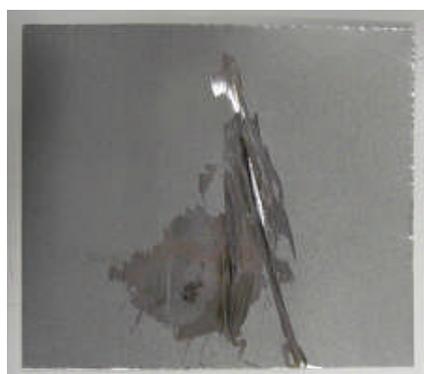


図 3.13 検査対象金属裏面の画像

ヤスリによる傷とは珪素鋼板が薄くなっている部分である。この珪素鋼板を 3. 2 章の図 3. 5 で用いた平面ドーナツ状励磁コイルを用いて誘導加熱し、絶対温度分布の変化を連続監視した。連続監視過程の赤外線動画像を図 3.14 に示す。

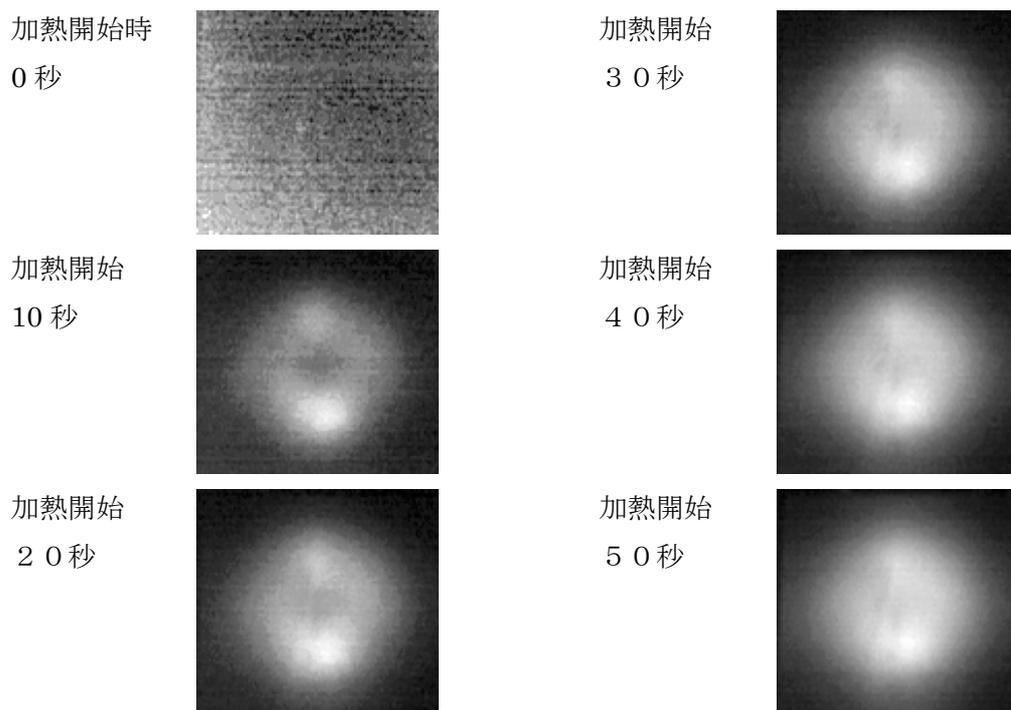


図 3.14 検査対象金属の加熱過程赤外線動画像

図 3.14 の結果より、単純な赤外線動画像からヤスリによる傷部分を特定するのは困難である。その理由は平面ドーナツ状励磁コイル形状と相似に加熱された部分の情報が極めて支配的であり、傷部分のみの温度変化を抽出することが困難であることに起因する。

このため、3.3 節で述べた欠損の無い正常な金属の加熱動画を基準画像として、画像データの差分によって傷部分のみの温度情報抽出を試みた。この結果を図 3.15 に示す。

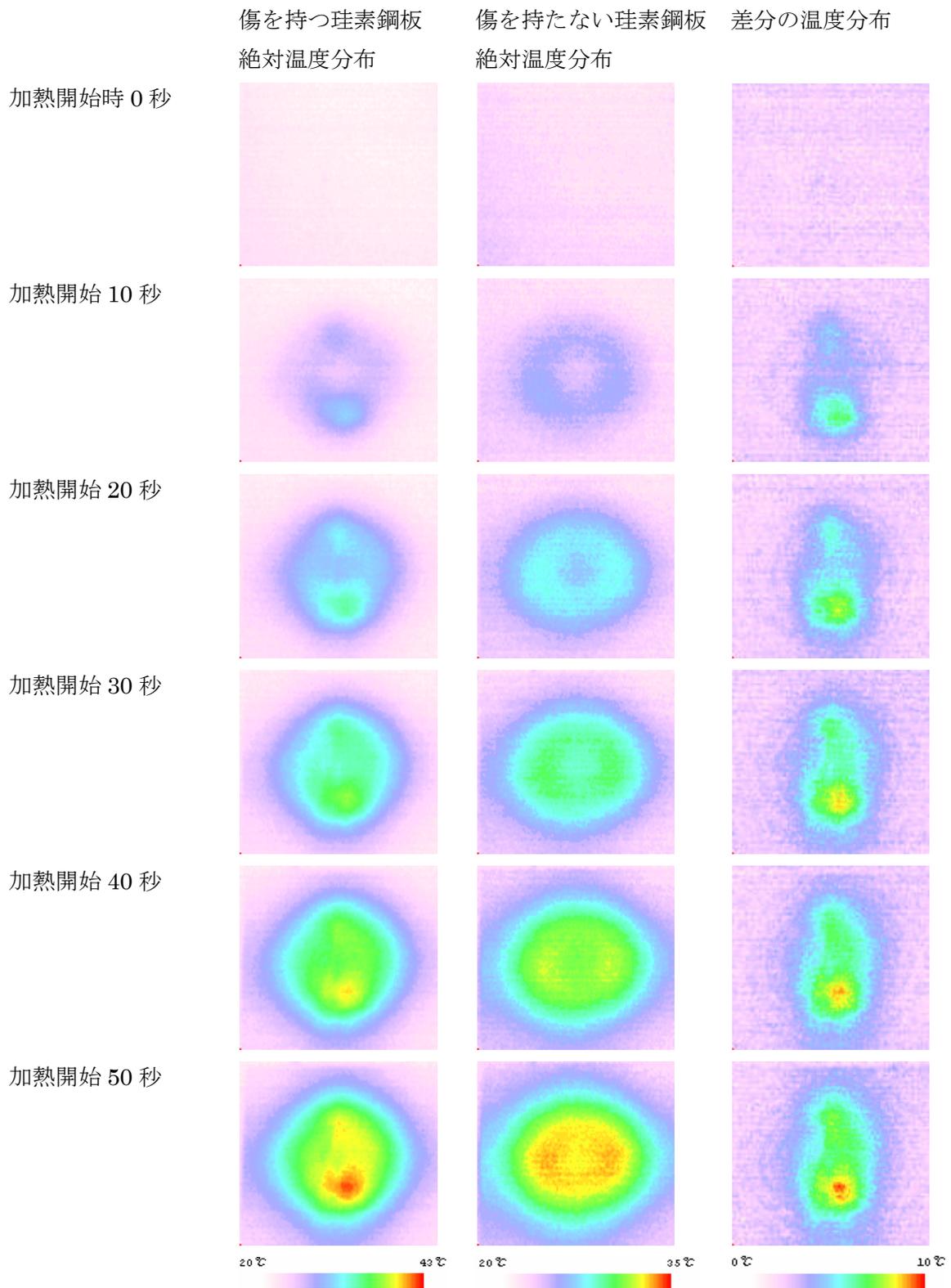


図 3.15 データベースを利用した差分による欠損部分の可視化

傷部分の温度は、誘導過熱開始10秒を経過後に周囲よりも高温となり、周囲との温度差は時間と共に顕著に現れた。加熱開始50秒後には傷のない部分と比較して摂氏10度高温となった。

以上の結果、図3.12に示した珪素鋼板の目視では特定不可能な傷部分を絶対温度上昇画像として可視化することに成功した。

3.6 まとめ

本章では、基準温度同時撮影法と誘導過熱を利用した非破壊検査法の一例を示した。さらに、検査という観点より、正常値の基準を用いるデータベース法を提案し、その結果、検査対象金属の欠陥部分のみを抽出することに成功した。最後に絶対温度の連続監視法を提案し、欠陥部分の温度変化を連続監視することに成功した。

第4章 金属片の探査

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。本章ではこのような金属片の探査法に関する、非金属中に混入した不要金属の検出を、基準温度同時撮影法と誘導過熱を応用して試みる。

4.1 実験

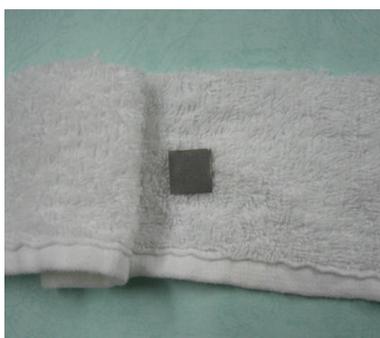


図 4.1 1cm×1cm の鉄片を含む布画像



図 4.2 誘導加熱に用いた励磁コイル

図 4.1 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 1.0cm×1.0cm の鋼板を挟んだ。

図 4.2 に示す励磁コイルへ通電して生成される交流磁界中へ図 4.1 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。図 4.3 は温度上昇画像を示す。

図 4.4 はノイズの状況を把握するために図 4.3 の温度上昇を縦軸に取った図 4.3 の 3 次元表示である。

図 4.3, 4.4 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摂氏 3°C 温度上昇することが判る。すなわち、金属片自体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。

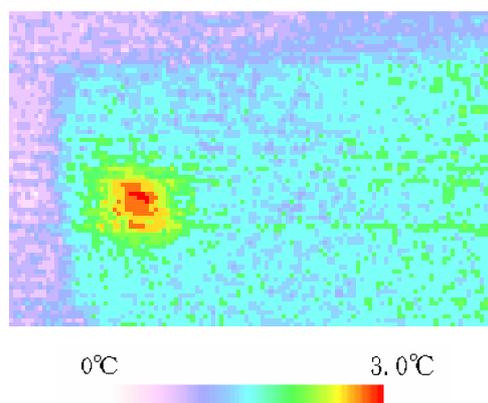


図 4.3 鉄片を含む布の絶対温度分布画像

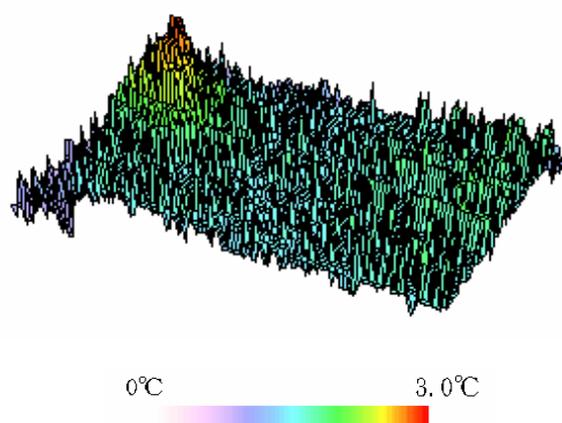


図 4.4 鉄片を含む布絶対温度分布画像の3D表示

4. 2 加熱対象金属のサイズと温度の関係

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。図 4.5 は、それぞれ $0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm}$, $1.0\text{cm} \times 1.0\text{cm}$, $1.5\text{cm} \times 1.5\text{cm}$, $2.0\text{cm} \times 2.0\text{cm}$, $2.5\text{cm} \times 2.5\text{cm}$, $3.0\text{cm} \times 3.0\text{cm}$ の 6 種類の金属片を示す。これらの金属片を図 4.1 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 種類の金属片において、それぞれの最高温度上昇は、摂氏 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、温度上昇の関係を図 4.6 に示す。図 4.5, 4.6 の比較から、金属片の大きさが励磁コイルの大きさに近づくほど渦電流が広範に分布し発熱温度が高くなることがわかる。

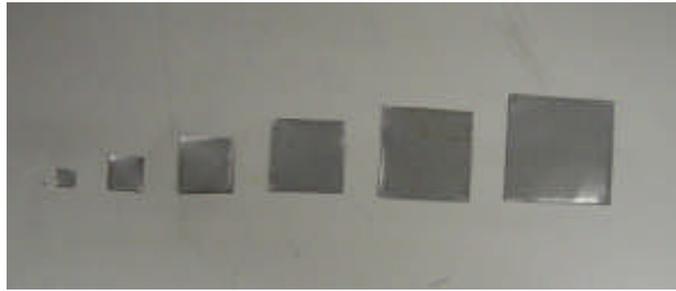


図 4.5 表面積の異なる、6 種類の金属片

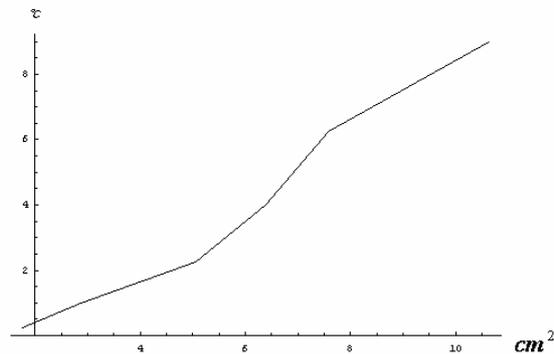


図 4.6 温度と金属片の表面積の関係図

4.3 まとめ

本章では、基準温度同時撮影法と誘導過熱を利用して、非金属体中へ混入した金属片の探査例を示した。この結果、以下のことが判明した。

- 1) 同一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。

以上より、基準温度同時撮影法を、金属片探査実験に応用することで、従来の金属片探査実験からは得られなかった付加的情報の抽出が可能であることが判明した。

第5章 導電性繊維の評価

本章では基準温度同時撮影法を用いて電磁シールド材として極めて有用な柔軟性に富む導電性繊維の評価を行う。

5.1 導電性繊維

近年、我々の日常生活において電気・電子機器は必要不可欠な文明の利器となっている。マイクロコンピュータの搭載によりこれらの電気・電子機器は多彩な機能を発揮するために高周波信号を利用している。このため、近傍電磁界の影響を受け易く、機器自身も周辺へ電磁界を放射するだけでなく、容易に電磁界の影響を受けて誤動作へ繋がる。具体的な例は、ペースメーカーへの携帯電話に拠る影響である。この影響を削減するには電磁界シールド技術を個人が着用する洋服にまで拡充することが決定的な一方途であろう。

他方、ビジネスの中心となっている近年のインテリジェントビルは作業環境の温度・湿度の管理に力を入れている所が多く、アメニティー空間の実現が重要なテーマとなっている。中でも湿度環境に関しては、静電気発生と密接な関係があり、精密機器などの生産工場においては、生産性、品質の向上のみならず、安全対策面でも極めて重要な因子となっている。また、一般商業ビルにおいても、各種のコンピュータや電子機器、計器類が、静電気を含めた放電等の、電磁波ノイズや不要電流等が原因となり、各種の誤作動を起す可能性を持つ。

このような静電気や電磁波環境に対し、建造物の十分な帯電防止施設やシールドを行うための複雑な設計と施工が必要とされている[4]。以上のような現状への対策として導電性繊維が期待される。

既存の導電性繊維には大きく分けて二種類の繊維がある。一方は電気の流れやすい金属を利用した金属細線や金属メッキ繊維・金属蒸着繊維。他方は、カーボン・ブラック粒子などを導電フィラーとしてポリマー材料に混入した練り込み方の炭素複合繊維である。

これらの具体的応用例として、主にEMI (Electro Magnetic Interface)、シールド (Shield) 対策部品として導電性ガasketの被覆材、導電性テープの基材に使用されている。また、メッシュ繊維を黒色導電化した繊維は PDP (プラズマディスプレイパネル) の電磁波防止素材として家電製品メーカー各社に採用されている。本論文内で実験対象としたものは図 5.1 に示す繊維であり、繊維自体が導電体と発熱体を兼ね、既存の導電性素材では成し得ない、熱エネルギーのハンドリングが可能とする性質を有する。



図 5.1 導電性繊維

5. 2 導電性繊維の温度画像

図 5.2 は導電性繊維に直流を通電し導電性繊維が発熱した状態の絶対温度分布表示である。ほぼ均一な温度上昇が確認され、組成は均一であると考えられる。

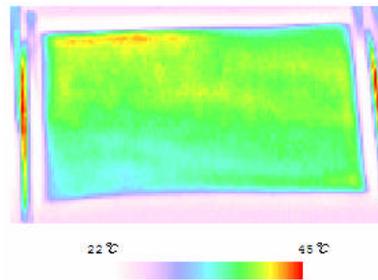


図 5.2 直流通電時の導電性繊維の絶対温度分布

5. 3 導電性繊維の電位分布画像

導電性繊維に対し直流通電させ、導電性繊維の過熱が飽和した状態での電位分布を得る。電位分布を測定するにあたって、繊維の厚みは無視できるものとして表面電位を測定した。導電性繊維の表面電位を図 5.3 に示す。また、同時刻の導電性繊維の絶対温度分布を図 5.4 に示す。

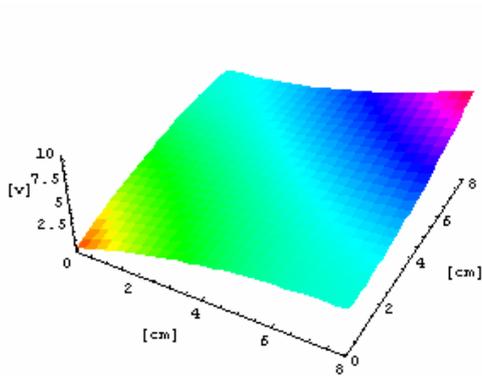


図 5.3 導電性繊維の表面電位分布

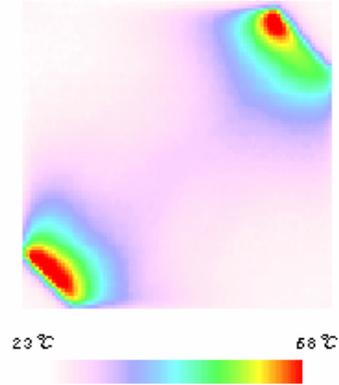


図 5.4 導電性繊維の絶対温度分布

導電性繊維の組成の均一度を吟味する為に、電流の通電方向を時計周りに 90° 回転し、上記と同様の実験を行った。両者の電位分布間の相関係数を求めると 0.988699 となった。よって、通電方向の変更前後で測定した両者の電位分布の相関は極めて高い。すなわち、導電性繊維は組成に方向性を持たず、均一な組成である。

5.4 導電性繊維の電気抵抗分布画像

次に、電気抵抗分布の測定を考える。導電性繊維に対し直流電流を通電させ、導電性繊維の過熱が飽和した状態の赤外線熱画像を得る。絶対温度分布は導電性繊維の熱源分布を可視化している。すなわち、絶対温度分布は導電性繊維の電氣的”抵抗損失”に比例する。さらに、導電性繊維に対し直流電流を通電し、導電性繊維の過熱が飽和した状態での電位差分布を得る。電位差分布を x 軸、y 軸方向に分けて導出する。x 軸方向の電位差分布を図 3.5 に、y 軸方向の電位差分布を図 3.6 に示す。絶対温度分布が電氣的”抵抗損失”に比例しているとするれば、熱画像と電位分布から、相対的な電気抵抗が求まる。

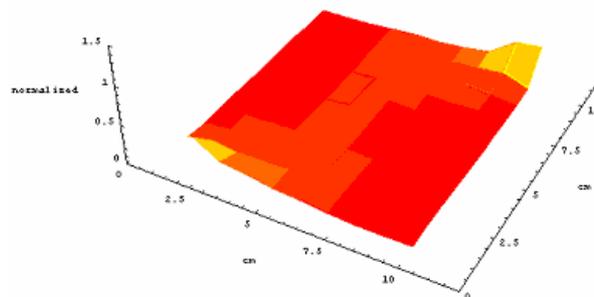


図 3.5 導電性繊維の x 軸方向の電位差分布

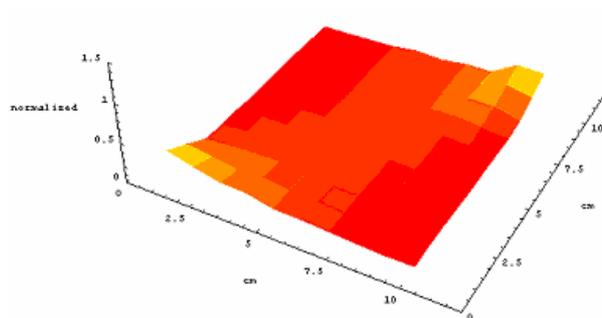


図 3.6 導電性繊維の y 軸方向の電位差分布

赤外線熱画像から導出した抵抗分布には電極付近に誤差が発生した。この原因は、導電性新素材の本質的性質として、電極材料である金属に比較し電氣的抵抗値が大きいため電極の接触抵抗が無視できないことに起因する。よって、電極近傍を除いて、電氣抵抗分布は電流の通電方向へ依存せず均一であることが判明した。

ここでは、導電性新素材の電氣的基礎データを赤外線熱画像応用による可視化法を提案した。その結果、導電性繊維は織物性に起因する電氣的な異方性を持たず、均一な組成を持ち、組成が一様な高品質であることが判明した。

5.5 まとめ

本章では、赤外線熱画像を利用して導電性素材の物性測定を行った。電極付近での接触抵抗が確認されたことから、これらの導電性素材を用いて何らかのプロダクトを製作した際、電極周辺に電流の局部集中が発生しその過大電流に起因する発熱により“履歴現象”の発生等、何らかの物性変化が起こる事が予想される。

すなわち、導電性素材には従来型の電極は適さず、電磁誘導の利用や電氣化学的な観点から改善された電極の開発が必要である。

第6章 結論

本論文では、赤外線画像を構成する画素値と絶対温度が指数関数的に関係すると仮定し、両者を両対数グラフへプロットすることで、画素値と温度の関係は指数関数であるという関係を解明した。すなわち、赤外線画像に基準温度として既知の温度を持つ物体を同時に撮影し、温度と熱画像の画素値間の校正曲線を用いて得られる絶対温度は、熱電対と同程度の分解能を持つ温度画像である。

第2章では、赤外線カメラを使用して撮影された赤外線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分布可視化動画像へ変換する具体的方法を述べた。本手法を「基準温度同時撮影法」と呼ぶ。

第3章では、第2章で述べた「基準温度同時撮影法」を利用した、非破壊検査法の具体的な例を述べた。「基準温度同時撮影法」の特徴として、連続監視機能を可能とすることや正常（基準）値の基準を用いることで、特定部分のみの熱分布画像を抽出することが可能であることを述べた。この結果は、我々が目的としている画像処理技術、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・監視技術の強力な基幹技術の開発がなされたと言える。

第4章では、非金属中に含まれる金属片探査実験の例を述べた。衣料品中の縫製針や魚介類中の金属網破片探査などを想定した実験である。これらの、金属網破片探査は直接人体の内外へ障害を与え得るため、極めて精密さが必要とされる。本章では、特に金属片の表面積と誘導加熱時の発熱が比例的な関係にあることを解明し、その精度を実験的に検証した。

第5章では、導電性新素材の電気的基礎データを赤外線熱画像応用により可視化する手法を提案した。その結果、導電性繊維は電気的な異方性を持たず均一な組成であることが示された。また、電極付近においては接触抵抗が支配的であることが確認され、導電性新素材を何らかのプロダクトに応用する場合は、接触抵抗を考慮に入れ電極部における工夫が必要とされることがわかった。

以上、「基準温度同時撮影法」と誘導加熱を組み合わせることにより種々の検査手法が考えられ、また必要な情報を画像情報として得られるという特徴より、画像処理技術を用いた知的非破壊検査・監視技術開発の基幹技術の一端が構築されたと思われる。

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: 電流分布の赤外線による可視化とその応用、MAGDA コンファレンス、p47、(November. 2008)
- [3] 大森豊明: ”赤外線のはなし”、日刊工業新聞社 (1986)
- [4] 渡邊大輝、齋藤兆古: 導電性繊維と骨材の抵抗率測定および電流分布に関する考察、法政大学卒業論文 2008年3月システムデザイン学科卒業論文要項集

研究業績

- [1] 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、(July. 2007).
- [2] 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、MAGDA コンファレンス、p21、(November. 2007)
- [3] 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、法政大学計算科学研究センター研究報告、(2007 年度).
- [4] 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、(July. 2008).
- [5] 鈴木剛、齋藤兆古: 電流分布の赤外線による可視化とその応用、MAGDA コンファレンス、p47、(November. 2008)
- [6] 鈴木剛、齋藤兆古: 「未定」、法政大学計算科学研究センター研究報告、(2008 年度)

謝辞

本研究を進めるに当たり、齋藤兆古教授、早野誠治元教授には多くのご指導、ご支援を賜りました。深く感謝致します。

また、齋藤兆古研究室の皆様、公私にわたりご助言、ご支援を賜りました。ありがとうございました。