

補助事業番号 2022M-183
補助事業名 2022年度 エネルギーの流れに着目した電磁誘導—赤外線サーモグラフィ
非破壊検査・評価法のメカニズムの解明及び手法の確立 補助事業
補助事業者名 東北大学 工学研究科 講師 程 衛英

1 研究の概要

本事業では、電磁誘導—赤外線サーモグラフィにおける「電磁損失—熱」のエネルギーの流れに着目し、電磁誘導—赤外線サーモグラフィによる欠陥の非破壊検査・評価のメカニズムを解明するとともに、時間と空間における温度の分布及び変化を分析する。さらに、サーモグラフィによる欠陥の識別及び欠陥の深さ評価法を提案する。欠陥付近の温度変化は、誘導コイルと欠陥の位置関係、欠陥端部・側面の渦電流の集中、及び欠陥による熱伝達の妨げに左右されることが明らかになった。さらに、温度の空間変化率（勾配）を利用した欠陥識別法や、温度の時間変化率に基づくPulsed Phase Thermography（PPT）を用いた欠陥深さ評価法を提案できた。

2 研究の目的と背景

赤外線センシング技術の進歩と赤外線カメラの普及に伴い、赤外線サーモグラフィ技術は産業・社会のさまざまな分野に活用されている。赤外線サーモグラフィは非接触で広範囲にわたる温度あるいは温度変化を画像化可能であるため、構造物の非破壊検査やプロセスのモニタリングに適していると考えられる一方、損傷形態によって感度が大きく異なり、測定環境における外乱や被検体の表面状態などに影響されやすいという克服すべき課題も存在する。一方、電磁誘導測定法は導電性材料にしか適用できないが、赤外線サーモグラフィを‘補完’する性質を持っている。電磁誘導—サーモグラフィ（Induction-Thermography、IT）は、電磁誘導で被検体の温度を変化させるアクティブなサーモグラフィ法である。電磁誘導は電磁非破壊検査と電磁誘導—赤外線サーモグラフィにおける共通の現象であり、電磁誘導によって発生した渦電流は電磁誘導—赤外線サーモグラフィと渦電流探傷法における共通の物理量である。そのため、同じエネルギー源を用いて渦電流を発生させることが考えられる。同じエネルギー源とそれによって発生する渦電流をシェアすることによって、より効率的なハイブリッド法が構築可能であると考えられる。

本研究では、エネルギーの流れに着目し、シミュレーション解析を用いた電磁誘導—赤外線サーモグラフィにおける非破壊検査・評価のメカニズムを解明し、より効率的な非破壊検査・評価を構築するための基礎検討を行う。

3 研究内容

研究期間中に以下の内容を実施した。

（1）理論分析とシミュレーション解析による電磁誘導—赤外線サーモグラフィのメカニズムの物理解明

導電性被検体中の電磁場の拡散及び熱伝導が拡散現象として拡散方程式で定式化される。一般的に使われる構造鋼の電磁拡散係数は熱拡散係数より大きく（4桁ほど）、電磁場（及び電磁誘導によって発生した渦電流）は被検体の中に瞬時に拡散する。一方、電磁エネルギー

ギーから変換された熱の伝達はより遅く、温度は徐々に変化する。電磁誘導—赤外線サーモグラフィはこのような温度の分布及び変化を検出することにより損傷を検出する。電磁誘導—赤外線サーモグラフィはFig. 1(a)に示す「加熱 (heating)」と「冷却 (cooling)」のプロセスで実施される。Fig. 1(b) は本研究に使用した励磁コイルと欠陥のセットアップである。「加熱」プロセスでは、励磁コイルに高周波数の励磁電流が流れ、被検体表面に渦電流が誘導される。電磁損失（渦電流損失+ヒステリシス損失）が熱に変換され、被検体の温度が上昇する。励磁コイルの構造、励磁電流の大きさ・周波数、励磁コイルと欠陥の位置関係、欠陥の形態などにより、被検体の各箇所の温度上昇は異なる。励磁電流が大きく、また、励磁周波数が高いほど、渦電流密度は大きく、温度上昇は大きくかつ速い。渦電流密度が大きい欠陥の周辺はホットスポットになる。一方、励磁電流は0になっている「冷却」段階に、熱はホットスポットまたはホットエリアから周囲に拡散するため、全体的に温度が下がるが、欠陥による熱拡散の妨げにより、特定の箇所に温度低下が抑制され、また、一部の箇所への熱の伝達が困難となり、温度上昇が抑制されることもある。本研究では、シミュレーション解析により、「加熱」及び「冷却」過程における欠陥の挙動を明らかにした。Fig. 2 は、試験片表面の温度分布をいくつかの時点で示しており、表面温度が時間とともに変化するを示す。また、Fig. 3 は、数個の評価ポイントの位置及び各評価ポイントの温度の時間変化を示す。P1 及び P2 はそれぞれ欠陥の端部及び側面から 1 mm 離れた位置にある。P3 は励磁コイルの直下に位置し、欠陥から離れている。励磁コイルと欠陥の位置関係により、各ポイントの「加熱」及び「冷却」段階における温度変化が異なることが示された。

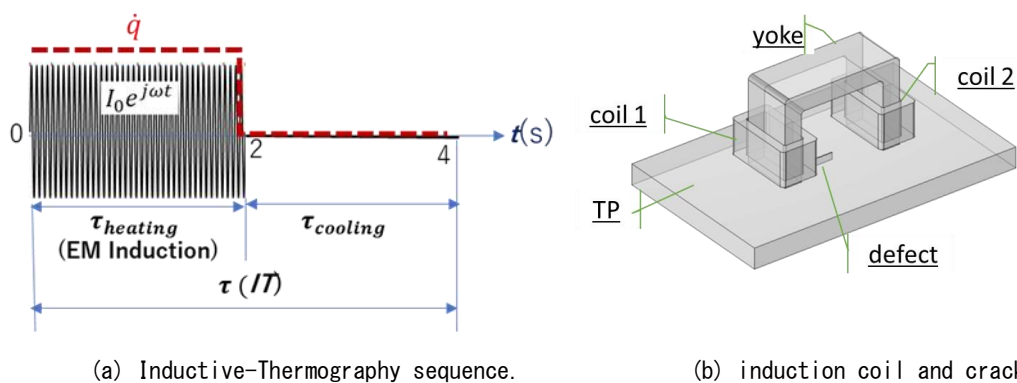


Fig. 1 Set-up of Inductive Thermography

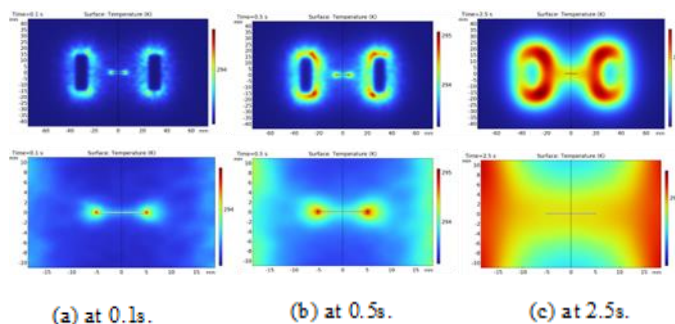


Fig. 2 Distribution of temperature on the surface

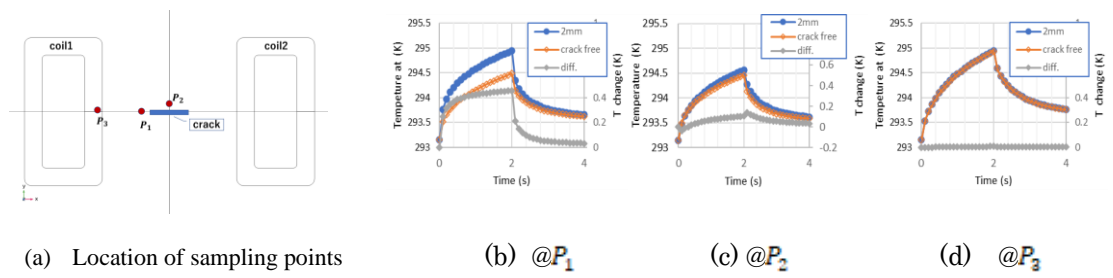


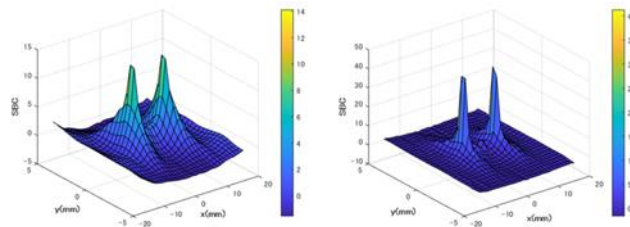
Fig. 3 Time-varying temperature at particular points.

(2) 欠陥の識別性の向上

(1) で明らかにした温度変化のメカニズムに基づき、温度信号の勾配（空間微分）から Signal to Background Contrast (SBC) を評価する欠陥の識別法を提案した。

$$SBC = \frac{S_d - S_b}{SD_b}$$

ここで、 S_d と S_b はそれぞれ欠陥及び背景の信号であり、 SD_b は背景信号の標準偏差である。通常では温度を使用して SBC を算出するが、本研究では温度の勾配を使用して SBC 算出した。Fig. 4 に温度と温度の勾配から見た SBC を示す。温度の勾配を使用することで、欠陥はより鮮明に表示され、識別は容易になる。



(a) in terms of T (b) in terms of gradient of T

Fig. 4 SBC in the vicinity of a crack

(3) 欠陥の深さサイジング法の構築

まず、評価ポイントの温度変化を分析した。各ポイントの温度変化は、ジュール熱の発生と欠陥による熱伝導の妨げの総合効果である。ポイントごとに 'heating' 及び 'cooling' 過程におけるそれぞれの効果が異なる可能である。P1 では、'heating' 段階では渦電流効果が優勢であり、'cooling' 段階では欠陥による熱伝導の妨げが支配的である。一方、P2 では、'heating' 及び 'cooling' の両段階において、欠陥による熱伝導の妨げが支配的である。

本研究では、温度の時間変化率に基づいた Pulsed Phase Thermography (PPT) を用いた欠陥の深さ評価法を提案した。PPT では、時間領域の信号を周波数領域に変換し、基本波

と第3高調波や第5高調波の位相を分析することによって、欠陥深さを評価する。’ heating ‘と’ cooling ‘段階ともに欠陥による熱伝導への妨げるに支配された P2 の PPT は欠陥の深さ評価に有効であることを示した。Fig. 5 は温度 (T) の PPT 信号と温度の時間変化率 (d T/dt) の PPT 信号を示す。温度変化率 (d T/dt) の PPT 信号は、より深い欠陥の評価に有効であることを示した。

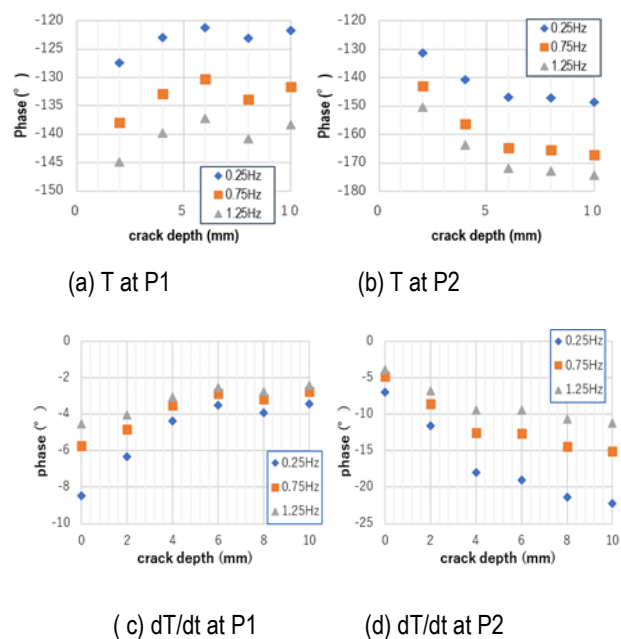


Fig. 5 Change of phase of PPT signals with crack depth

(4) 実測による検討

赤外線カメラを使用して、異なる材料における温度変化の測定試験を行った。この試験により、金属材料にける熱伝導が非常に速いことが明らかになった。そのため、高フレームレートの赤外線カメラが必要であることが分かった。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本補助事業による研究により、電磁誘導—赤外線サーモグラフィのメカニズムが解明され、欠陥検出及び深さサイジング法が確立された。この技術は、過酷な環境やアクセスが困難な箇所における欠陥検査及び評価に期待される。さらに、電磁気特性と熱特性の両方を利用することにより、マルチ材料部材の検査及び評価にも期待が寄せられる。また、信号処理法などを組み合わせることで、状態監視などへの展開も期待される。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本補助事業者の程は20年以上にわたり、電磁気非破壊検査・評価の研究活動を携わってきた。今回の事業では、電磁誘導によって発生する電磁損失を熱の発生源とした赤外線サーモグラフィを電磁現象に加え、マルチフィックスに基づく非破壊検査・評価法へと発展させた。

理論分析やシミュレーション解析による電磁誘導—赤外線サーモグラフィのメカニズムの解明により、電磁—熱伝導の物理現象に対する理解が深まった。電磁—伝熱のマルチフィックス現象を利用することで、より多様な研究対象を取り入れ可能とあり、研究分野を広げることが期待される。また、本事業を基盤として、将来的に新たな学問分野を開拓するための基礎が構築された。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

発表論文

- (1) 程衛英、「エネルギーの流れに着目した電磁誘導—赤外線サーモグラフィ非破壊検査・評価のメカニズムの解明」、2022年日本非破壊検査協会秋季講演大会、2022年10月26日、東京
- (2) 程衛英、「シミュレーション解析による電磁誘導—赤外線サーモグラフィのメカニズムの解明及び欠陥検出・サイジング」、令和4年度第3回電磁非破壊検査・数値解析調査研究委員会、2023年3月22日、ハイブリット（九州大学・オンライン）
- (3) Weiyang Cheng, “Clarification of the mechanism of induction thermography for crack detection and depth sizing”, presented in InterMag 2023, May 18, 2023, Sendai. 論文も投稿中

7 補助事業に係る成果物

- (1) 補助事業により作成したもの
特になし
- (2) (1) 以外で当事業において作成したもの
特になし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 東北大学工学研究科量子エネルギー工学専攻（フトウホクダイガク コウガクケンキュウカリョウシエネルギーコウガクセンコウ）

住 所： 〒980-8579
宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01-2
東北大学大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻

担 当 者： 講師 程 衛英（テイ エイエイ）

担 当 部 署： 工学研究科（コウガクケンキュウカ）

E - m a i l : weiyang.cheng.d3@tohoku.ac.jp

U R L : https://web.tohoku.ac.jp/hashizume_fan_club/home/home.html