

令和 6 年 5 月 2 8 日現在

機関番号： 1 1 3 0 1

研究種目： 基盤研究(C)（一般）

研究期間： 2020 ~ 2023

課題番号： 2 0 K 0 5 0 0 0

研究課題名（和文）数理モデルに基づいた電磁気特性や初期状態の電磁気特性に依存しない損傷評価法の構築

研究課題名（英文）Development of Mathematical Model-Based Methods for Evaluating Defects Independent of Electromagnetic Properties or Initial States

研究代表者

程 衛英（Cheng, Weiying）

東北大学・工学研究科・講師

研究者番号： 4 0 7 3 9 6 6 1

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000 円

研究成果の概要（和文）：電磁気特性、あるいはその初期状態の特性の把握が難しいであることは電磁気法による構造物の損傷評価に直面する難題である。

本研究では、上述の問題点に着目し、電磁気非破壊検査・評価法による鉄鋼構造物の欠陥や減肉などの「幾何寸法上の損傷」の評価において、数理モデルに基づいた周波数領域信号の分析により、導電率に依存しない減肉（肉厚）評価・き裂の寸法評価法を確立できた。また、電磁気特性変化による経年劣化検査・評価において、高感度で導電率変化を検出・評価する方法を構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電磁気非破壊検査の測定信号は検査対象の寸法と電磁気特性によって変わるため、電磁気特性の把握は寸法評価の前提であるが、被検体の電磁気特性の把握は困難である。また、対象毎に合わせたマスターカーブの作成は現実ではない。本研究では、数理モデルに基づいて、電磁気特性に左右されない損傷評価法を構築できた。よって、一本のマスターカーブを用いて、多様な材質に発生した多様な形態の損傷を評価可能になった。また、共振周波数による導電率測定は高感度であり、材料の劣化評価において感度が向上させた。これにより、構造物の損傷をより効率且つ高感度に検査・評価可能になった。

研究成果の概要（英文）：Electromagnetic properties, or their initial states, are crucial for Electromagnetic non-destructive testing and evaluation (EMNDT&E), yet challenging to obtain. Assessing dimension of defects/specimens without prior knowledge of their electromagnetic properties, or characterizing degradations without reference to the virgin state, are vital. We constructed a mathematical model-based method to valuate wall thinning or layer thickness independently of conductivity. We also devised a method to evaluate the depth of an ideal crack with zero conductivity, independent of the host material's conductivity. Furthermore, we devised a method to evaluate the depth of a crack with non-zero crack conductivity, without knowledge of the conductivities of the host specimen and inside the crack. In addition, we developed a method to measure conductivity with high sensitivity, thus enables characterizing degradation by correlating changes between electromagnetic properties with mechanical properties.

研究分野： 電磁気非破壊検査・評価

キーワード： 非破壊検査・評価 電磁気計測 数理モデル 電磁気特性 損傷評価 材料劣化 欠陥 減肉

1. 研究開始当初の背景

構造物や機械の安全で安心な長期運転は、持続可能な開発目標の一つである。構造物に検出された欠陥の深さ・長さや、構造物の残肉などの定量的な幾何寸法は、構造物の健全性評価や余寿命推定に不可欠パラメーターである。電磁気非破壊検査・評価法は、鉄鋼構造物に発生した損傷の検出・評価に広く活用されている。検査信号は被検体の厚みや欠陥の寸法、および被検体および損傷区域の電磁気特性の関数であるが、多くの場合、損傷の寸法と電磁気特性はともに未知である。測定信号から損傷の寸法と電磁気特性を同時に同定する逆問題解析が多く研究されているが、計算量が膨大なため、検査現場での適用は困難である。また、解の唯一性についても疑問視されている。

健全性評価に最も関心が高いのは損傷の寸法である。通常、欠陥や減肉などの‘幾何形状上の損傷’の評価は、被検体の電磁気特性を把握した前提で実施されているが、現場にある被検体の材質やその電磁気特性を把握することは困難である。さらに、応力腐食割れのような内部接触欠陥の接触具合を把握するのはほぼ不可能である。つまり、被検体や損傷内部の電磁気特性の把握は非常に難しい。また、非破壊検査の現場では依然としてマスターカーブを用いた寸法評価が一般であるが、検査対象毎にマスターカーブを作成することは現実ではない。以上の学術の背景及び検査現場のニーズに基づき、被検体や損傷内部の電磁気特性に依存されない損傷評価が求められる。

また、経年運転による‘材料の特性変化という損傷’、すなわち劣化の電磁気非破壊評価とは、電磁気特性の変化と機械特性の変化の相関関係を用いて劣化程度を推定することである。劣化の評価に未劣化状態の電磁気特性が必要であるが、実機構造物の初期状態の電磁気特性を確保することは困難である。さまざまな劣化モードにおける未劣化及び段階的に劣化する試験体を作成し、それらの電磁気特性の変化と機械特性の変化の相関を確認することで、材質変化や劣化評価の研究がすすめられた。その結果、電磁気特性の変化と機械特性の変化の相関関係を用いた劣化評価の可能性が確認された。しかし、実機対象物の初期状態の電磁気特性がほぼ保有されていないため、劣化による電磁気特性の‘変化’が求められない。つまり、電磁気非破壊損傷評価は電磁気特性やその初期状態の特性に依存しており、その依存性を解決しない限り、電磁気非破壊評価法の現場適用は程遠いことである。

2. 研究の目的

以上の背景に踏まえ、本研究の最終的な目的は、鉄鋼構造物の電磁気特性や初期状態の電磁気特性に依存しない、現場や実機に適用可能な電磁気非破壊評価法の確立である。具体的な目標は以下である。

- (1) 欠陥評価：被検体の電磁気特性や欠陥の接触具合に依存せずに欠陥寸法を評価する方法の確立。
- (2) 肉厚評価：一層または二層の構造物の各層の電磁気特性に依存せず、各層の厚さを評価可能な方法の構築
- (3) 材質の劣化評価：高感度で電磁気特性の変化を検出可能で、構造物の初期電磁気特性に依存しない劣化評価法の構築

3. 研究の方法

物理現象の解明は研究の基礎であるため、まず理論分析とシミュレーション解析を用いて、各

パラメーター（寸法と電磁気特性、周波数など測定因子）が電磁気測定信号に与える影響を分析する。次は、この信号分析に基づいて、変動や把握が困難な要素（電磁気特性や初期電磁気特性）に依存しない数理モデルを構築する。もしくは、求めたい物理量（損傷の寸法）に対して最も高感度であり、排除したい要素（電磁気特性）に最も低感度である特徴関数を抽出する。これにより、理論的に電磁気特性に依存しない評価法を構築できた。その後、簡単な構造体から複雑な構造体へと順次で実測を行い、数理モデルを実測信号に適用することによって、手法の適用性を検証する。

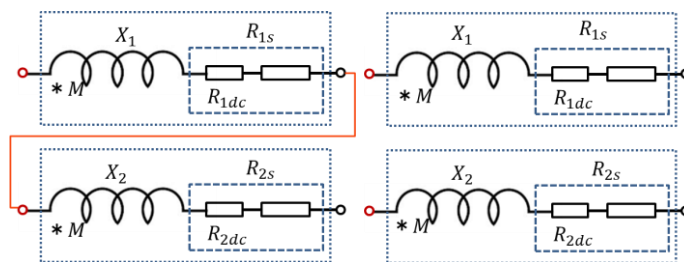
4. 研究成果

（1）非磁性二層積層部材の各層の厚さ評価

積層部材の性能は各層の厚さに依存しており、それらの厚さ測定やモニタリングは構造物の性能維持や安全確保に不可欠なことである。先行研究で構築できた、単層非磁性・導電性被検体における導電率の把握が不要な板厚測定・評価法を基にして、二層積層部材における上下層それぞれの厚さの測定・評価法を開発した。周波数掃引渦電流測定とインピーダンス正規化を行い、その後対周波数差分を計算し、得られた差分から特徴量を抽出した。この特徴量を低周波と高周波の帯域毎に分析することで、二層積層の上層・下層の厚さを正確かつ簡単に測定・評価する方法を構築した。この特徴量は各層の導電率に依存しないため、上下層の導電率の大小関係を把握すれば、それぞれの正確な導電率の値を知る必要はない。

（2）被検体の導電率変化による影響が小さい、数 Hz における強磁性鋼板の板厚測定・評価法の構築

強磁性鋼板において、測定信号は導電率・透磁率の変化の両方に影響される。数 Hz の低周波での測定では、磁場が鋼板厚の全体に浸透し、鋼板に誘起される渦電流による抵抗変化が極めて小さいため、被検体の導電率変化による影響をほぼ無視可能である。被検鋼板上に配置された二つの同芯コイルを和動と差動で接続し(図1)、それぞれの接続におけるインピーダンスを測定し、その差分からコイル自身の抵抗が完全に除去されることで、二つのコイルのマルチインダクタンスが求められた。鋼板は二つの同芯コイルの鉄心に相当しており、鋼板が厚いほど、マルチインダクタンスは大きくなる。このマルチインダクタンスと板厚の相関を用いることで、板厚を評価する。また、数 Hz の帯域において、周波数変動によるマルチインダクタンスの変化が少ないため、複数の周波数の信号を用いることで評価の信頼性が高まる[1]。



(a) 和動

(b) 差動

図1 両同芯コイルの接続

の同芯コイルを和動と差動で接続し(図1)、それぞれの接続におけるインピーダンスを測定し、その差分からコイル自身の抵抗が完全に除去されることで、二つのコイルのマルチインダクタンスが求められた。鋼板は二つの同芯コイルの鉄心に相当しており、鋼板が厚いほど、マルチインダクタンスは大きくなる。このマルチインダクタンスと板厚の相関を用いることで、板厚を評価する。また、数 Hz の帯域において、周波数変動によるマルチインダクタンスの変化が少ないため、複数の周波数の信号を用いることで評価の信頼性が高まる[1]。

（3）磁気特性の影響を軽減可能な数十 Hz における強磁性配管やパイプの肉厚測定・評価法の確立

全く同じ二個の貫通コイルを用いて外径が一定である鋼管の肉厚測定・評価法を開発した(図2)。電磁場が板厚方向にほぼ均一に分布しているシックスキンの条件を満たす場合、渦電流損

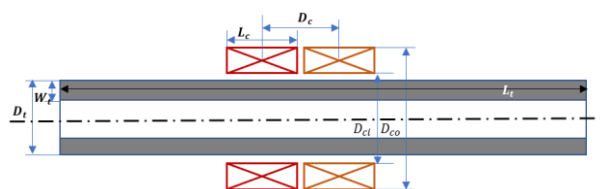


図2 両貫通コイルを用いた測定

ス dZ の成分とした差分抵抗 dR にはコイル自身の抵抗が含まれない。固有抵抗と固有インダクタンスと肉厚の相関により肉厚を評価した。よって、磁気特性変化による影響が低減された固有抵抗と固有インダクタンスを用いた肉厚測定・評価法を構築できた[2]。

(4) 共振による導電率変化の高感度な検出及び劣化評価

鉄鋼構造材料の導電率は劣化とともに変化することが確認されており、導電率の変化を検出・評価することが材料劣化評価に非常に有効であることが分かった。渦電流法による非破壊的な導電率測定法について、Transformer モデルに基づいた分析では、通常の渦電流法による測定信号から直接導電率を求める場合、導電率測定の感度は最高でも 50% しかなく、劣化による微小な導電率変化を十分検出できないことが懸念された。本研究では、厚みが一定である試験体における導電率と周波数の積が一定であることに着目し、共振周波数を検出することで導電率の変化を検出する方法を提案した (図3)。この共振周波数による導電率変化の測定の感度は 100% 達するため、高感度で導電率変化を測定し、導電率変化に伴う劣化評価法を構築できた[3, 4]。

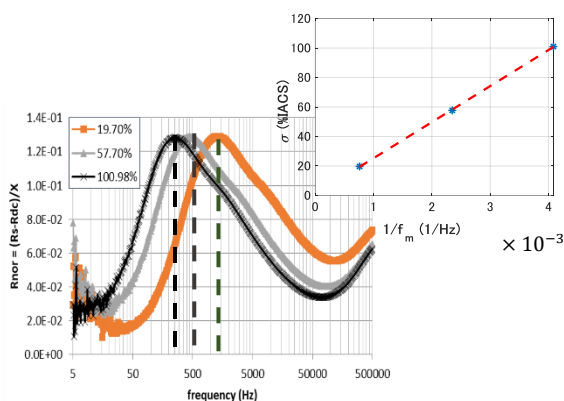


図3 共振、共振周波数と導電率の関係

(5) 導電率に依存しない非磁性導電性被検体に発生した完全割れ及び接触欠陥の深さ評価

完全に割れ、すなわち、電流を通さない欠陥を‘理想欠陥’と定義し、欠陥導電率が 0 とした。また、欠陥の両側面が部分的に接触し、渦電流が部分的に通過できる欠陥を‘リアル欠陥’と定義し、欠陥導電率は 0 ではないとした。先行研究 (1) で構築した導電率に依存しない肉厚や減肉の検査・評価法を、導電率に依存しない欠陥評価へ発展させた。

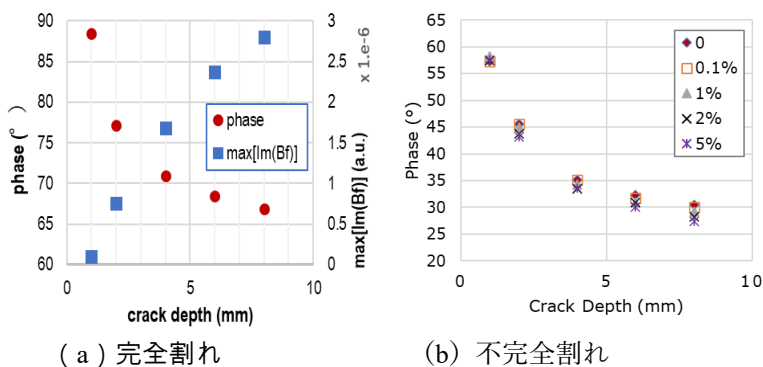


図4 EDM で作成されたマスターカーブ

励磁周波数を掃引して検査を行い、多周波数の信号使うため、まず、理論分析及びシミュレーション解析により、欠陥の渦電流測定信号の周波数特性を分析した。検出コイルによる欠陥のインピーダンス信号 ΔZ は周波数 ω に比例しており、一定の周波数範囲内において、固有インピー

ダンス信号 $\Delta Z/\omega$ の振幅値はほとんどフラットであることを明らかにした。磁気センサーで取得した磁束密度信号 ΔB の振幅値も $\Delta Z/\omega$ と似ている周波数特性を持っている。以上の結果を踏まえ、周波数掃引で得られた多周波数の磁束密度信号 ΔB を用いて欠陥評価を行った。また、理論解析とシミュレーション解析により、理想欠陥の ΔB 信号は周波数と試験片の導電率の積である $\sigma\omega$ の関数であり、同じ深さの欠陥において‘同じ $\sigma\omega$ 、同じ ΔB 信号、そして、スペクトル上同じ ΔB の極値’が成立することが明らかにした。スペクトル上同じ ΔB の極値が同じ欠陥深さに対応することを利用して、深さが異なる EDM ノッチ（理想欠陥）の測定により、’深さ $\sim\Delta B$ の極値’のマスターカーブ（図 4（a））を作成した。このマスターカーブを参照することによって、導電率が不明である試験体に埋め込む理想欠陥の深さを特定できた[5]。

不完全割れの欠陥の深さ評価において、スペクトル上 $df(Bf)$ の最大実数部の位相が、最も欠陥内部の導電率に影響されない深さ評価の特徴量であることを明らかにした。EDM ノッチの‘深さ $\sim df(Bf)$ の最大実数部の位相’のマスターカーブ(図 4(b))を作成することによって、導電率（接触具合）に依存せず、リアル欠陥の深さ評価が可能になった[5]。

（6）マイクロ波による配管内面減肉の検出・評価

研究が進むにつれ、当初計画していなかったマイクロ波を用いた配管の減肉検査に展開した。マイクロ波測定信号の周波数一波数一空間のドメイン変換を行い、空間（パイプの場合は距離）ドメインに信号を再構成することに成功した。また、スペクトル解析により、損傷寸法（ここでは全面減肉の長さ）を評価した。このドメイン変換による損傷位置の同定及び損傷寸法の評価の研究は、2023 年に採択された新規テーマ【〈波数・空間〉ドメインにおける検査対象の位置同定と寸法評価のフレームワークの構築】の基盤となっている。今後は新しい研究テーマに進める予定である [6]。

＜引用文献＞

- ① Weiyang Cheng, Measurement of Magnetic Plates at a Few Hertz With Two Concentric Coils and Thickness Estimation Using Mutual Inductance, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 70 1-10 2021 年
- ② Weiyang Cheng, Interpretation of Impedance in the Light of Energy Dissipation and Eddy Current Nondestructive Evaluation of Pipe Wall Thickness, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 71 1-11 2022 年 2 月
- ③ Weiyang Cheng, Frequency Properties of an Air-Cored Coil and Application to Conductivity Measurement, IEEE Access 8 219802-219809 2020 年 12 月
- ④ Weiyang Cheng, Hidetoshi Hashizume, Frequency properties of a flexible printed circuit coil and inductive measurement of conductivity, AIP Advances 11(1) 015133-015133 2021 年 1 月 1 日
- ⑤ Weiyang Cheng, Analysis of Eddy Current Testing Signals’ Frequency Responses and Conductivity-Invariant Crack Sizing, 2023 IEEE International Magnetic Conference (INTERMAG) 2023 年 5 月
- ⑥ Weiyang Cheng, Yijun Guo, Hidetoshi Hashizume, Localizing, identification and sizing of inner surface pipe wall thinning by means of domain transformation and spectral analysis, Mechanical Systems and Signal Processing 188 110024-110024 2023 年 4 月

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Cheng Weiying, Guo Yijun, Hashizume Hidetoshi	4. 巻 188
2. 論文標題 Localizing, identification and sizing of inner surface pipe wall thinning by means of domain transformation and spectral analysis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 110024 ~ 110024
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ymssp.2022.110024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Cheng Weiying	4. 巻 -
2. 論文標題 Analysis of Eddy Current Testing Signals' Frequency Responses and Conductivity-Invariant Crack Sizing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE International Magnetic Conference (INTERMAG)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/INTERMAG50591.2023.10265083	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 W. Cheng	4. 巻 70
2. 論文標題 Measurement of Magnetic Plates at a Few Hertz With Two Concentric Coils and Thickness Estimation Using Mutual Inductance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIM.2021.3087820	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 W. Cheng	4. 巻 71
2. 論文標題 Interpretation of Impedance in the Light of Energy Dissipation and Eddy Current Nondestructive Evaluation of Pipe Wall Thickness	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/tim.2022.3147310	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Cheng Weiying	4. 巻 8
2. 論文標題 Frequency Properties of an Air-Cored Coil and Application to Conductivity Measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 219802 ~ 219809
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/access.2020.3042571	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Cheng Weiying, Hashizume Hidetoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Frequency properties of a flexible printed circuit coil and inductive measurement of conductivity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 015133 ~ 015133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000112	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Weiying Cheng
2. 発表標題 Analysis of eddy current testing signals' frequency responses for conductivity-invariant crack sizing
3. 学会等名 Intermag 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 程 衛英, 郭一君, 橋爪秀利
2. 発表標題 マイクロ波計測信号の周波数から波数へのドメイン変換及び スペクトル解析による配管内の減肉の位置同定と寸法評価
3. 学会等名 第31回MAGDAコンファレンスin 鹿児島
4. 発表年 2022年

1．発表者名 程 衛英
2．発表標題 コイルの周波数特性に基づいた高感度導電率測定及び金属間化合物評価への適用
3．学会等名 日本非破壊検査協会2021年度秋季講演大会
4．発表年 2021年

1．発表者名 Weiyang Cheng , Hidetoshi Hashizume
2．発表標題 Frequency properties of a flexible printed circuit coil and application to conductivity examination
3．学会等名 the 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials Conference (MMM2020) (国際学会)
4．発表年 2020年

1．発表者名 程衛英，古川敬，橋爪秀利
2．発表標題 周波数掃引渦電流測定信号の周波数解析による導電性二層積層部材の厚さ評価
3．学会等名 日本非破壊検査協会2020年度秋季講演大会
4．発表年 2020年

1．発表者名 程衛英、橋爪秀利
2．発表標題 渦電流測定信号の周波数応答解析による非磁性金属積層部材の厚さ同定
3．学会等名 令和2年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4．発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------