

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年4月27日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760684

研究課題名（和文） 強度及び位相変調広帯域複合電磁場による革新的健全性評価技術の実現

研究課題名（英文） Development of innovative non-destructive methods for the evaluation of the structural integrity using broadband electromagnetic fields

研究代表者

遊佐 訓孝（YUSA NORITAKA）

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60466779

研究成果の概要（和文）：

時間変動電磁場を用いる非破壊検査手法において、電磁場の強度及び位相を調整することで情報量を飛躍的に向上させる技術に関し、メカニズム解明も含む高度化及び各種検討を実施した。kHz 電磁場を用いた検討においては、情報量向上の要因を明らかにするとともにその限界について検討し、また対象の磁気特性によるプローブ小型化の可能性を見出した。GHz 電磁場を用いた検討においては、発信部の形状の最適化により電磁場を制御することで、著しい信号対ノイズ比の改善を実現した。

研究成果の概要（英文）：

This study developed a method to significantly enhance the information contained in signals of non-destructive methods using time-dependent electromagnetic fields. Numerical simulations and experimental verifications were carried out to fully reveal the physical background of the method applied to kHz electromagnetic fields. They also evaluated the applicable limit of the method, and confirmed that the magnetic property of the target would enable to make probes smaller. Studies for the application to GHz electromagnetic fields demonstrated that controlling electromagnetic fields leads to a significant improvement of signal-to-noise ratio.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 材料加工・処理

キーワード：材料評価、非破壊検査、電磁非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

現代社会において構造物の健全性の確保は最重要課題の一つであり、材料及び機器の劣化状態を早期かつ定量的に把握するための検査・評価技術の重要性は近年益々高まっている。現在様々な物理現象を用いた多くの技術が存在するが、時間変動電磁場を用いたものは、中でも特に長い歴史を有しており、実用上は高速、非接触などの優れた特性を有

している。にもかかわらず、現状その適用先は比較的限定されているのが実情である。その最大の理由の一つは、表皮効果のために得られる情報が被検査部表層部のものに限定されるという問題を有しているためである。

このような問題を解決するために、従来数多くの試みが行われてきた。最も古典的な手法は低周波を用いることであるが、低周波化に伴う感度及び分解能の低下は避けること

が出来ないという問題がある。近年は SQUID 等の高感度センサを併用した報告もあるが、実環境への適用においては取り扱いという面で困難さは大きいと言わざるをえない。リモートフィールド技術の適用も試みられているが、信号が微弱である上に信号の位相分離特性が悪く、また直接磁束の遮蔽が管体系以外では困難という問題がある。パルス励磁は近年再び多くの研究発表がなされるようになった技術であるが、同期検波技術が適用できないために信号と雑音との分離が困難であり、また多くの周波数成分を含むため、信号評価も容易ではない。

近年、時間変動電磁場を用いた非破壊検査手法において、複数の電磁場を重ね合わせる等により、被検査体内部の電磁場を積極的に制御し、もって測定信号に含まれる材料内部の情報を向上させることの可能性が見出された。当該手法は正弦波励磁であるために既存の同期検波技術がそのまま適用可能であり、装置を複雑化すること無く高信号対雑音比の実現が可能である。また、適用可能である周波数が従来の低周波励磁及びリモートフィールド技術と比べて遥かに高いにもかかわらず、信号の分離特性が極めて良好であることも注目に値する。これは実用上高速化、高感度化、高空間分解能化、及び低導電性材料への適用等の優れた特性に繋がるものである。しかしながら、原理的にはより高周波に適用可能と考えられるものの、現状試験装置の問題で適用周波数の上限が 100kHz に留まっており、周波数限界については評価が出来ていない。また、技術自体が近年新たに見出されたものであるために、メカニズムにも一部不明な点があり、現状その定量性・技術限界は不明であると言わざるをえない。

2. 研究の目的

本研究は以上のような背景により実施されるものであり、現状十分な知見が蓄積されていない当該技術に関して、適用周波数を現状の kHz 領域から GHz まで拡張し、完全なメカニズム解明を行うとともに、金属材料及び複合材料に発生した各種きず、及び電磁気特性変化を伴う各種劣化状態の本技術に基づく定量的評価手法を開発し、その有効性を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

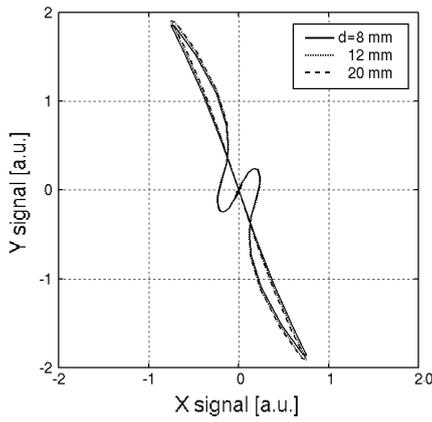
本研究の実施に際しては、従来研究において実績を有する kHz 領域と、現状解明がほとんど進んでいない GHz 領域に分割し、数値解析と検証試験による分析と解明、実証をすすめる。平成 23 年度は現状の kHz 領域から数 MHz までの検討を、24 年度はさらに高周波領域である 40GHz までの周波数における検討を行う。有限要素法に基づく数値解析により、

メカニズム解明と共に、周波数依存性、発現条件及び適用限界等を定量的に評価・分析し、検証試験により信号対雑音比評価も含めて有効性実証を行う。模擬きずのみならず各種自然欠陥も対象として検討を行うことで、将来の実機適用にも資する基幹技術の確立及び基礎データを収集する。

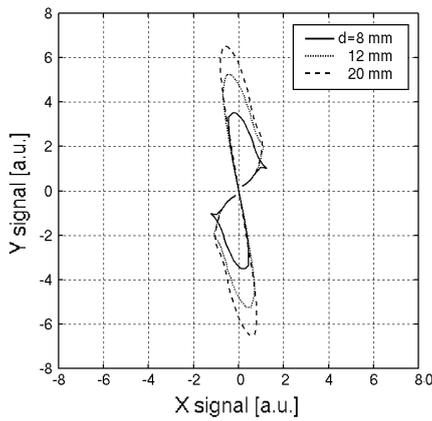
4. 研究成果

kHz 電磁場における当該技術の適用においてはまず、3次元有限要素法解析環境の整備を行った。続いて、整備された環境を用いて、各種電磁場の発振条件におけるきず信号の数値解析を行い、得られた結果に基づいて、各種条件が探傷信号からのきず評価の度合いに及ぼす影響を評価・分析した。得られた解析結果の一例を図 1 に示す。図はきず長さが 10mm の場合と 40mm の場合で、きず深さによる探傷信号の変化の様子を示したものであるが、きず長さにより信号が大きな影響を受けていることが確認できる。このような特性を有するメカニズムについて数値解析及び理論解析に基づいて検討した結果、きず領域内部にどのような電場が発生しているかが当該技術により得られるきず信号の特徴を議論する際に肝要であることを明らかとした。図 2 は前述の長さ 10mm と 40mm のきず内部の電場分布を示したものであるが、前者においてはきず深さによる電場の差異が確認できず、図 1 と整合する結果となっている。数値解析結果に基づいてアレイ化した探傷プローブを設計・製作し、検証試験により数値解析結果の妥当性を確認した。また、最終的に数値解析探傷試験により、対象毎の最適な発振条件及びその時のきず信号からのきず性状評価の可能性について評価・検討を行った。

以上是非磁性材料を対象とした検討であったが、加えて、当該技術の磁性材料への適用性についても検討を行った。従来の非磁性材料に対する適用においては、励磁源からある程度離れた箇所にて信号検出を行う必要があるためにプローブの大型化が不可避という問題が存在していたのだが、SUS430 平板を用いた検証試験の結果、磁性材料を対象とした場合は励磁源の比較的近傍での信号検出が可能であり、よってプローブを小型化することが可能であることを見出した。続いて 3次元有限要素法解析及び理論解析により、被検査体の磁気的特性が被検査体内部に誘導される電流の分布に及ぼす影響を詳細に評価し、材料の磁気的特性が渦電流の分布に及ぼす影響により本事柄が説明されることを明らかとした。

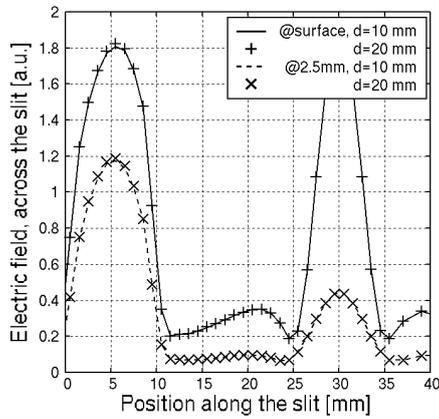


(a) 対象きず長さ : 10 mm

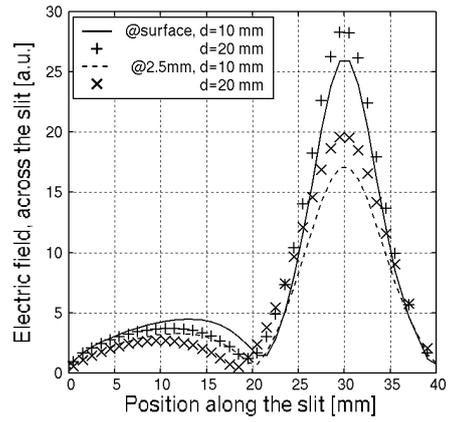


(b) 対象きず長さ : 40 mm

図 1 きず信号評価解析結果例



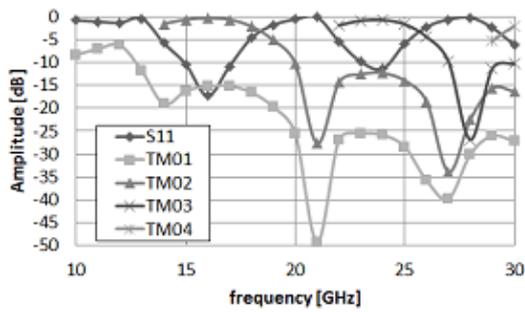
(a) 10 mm



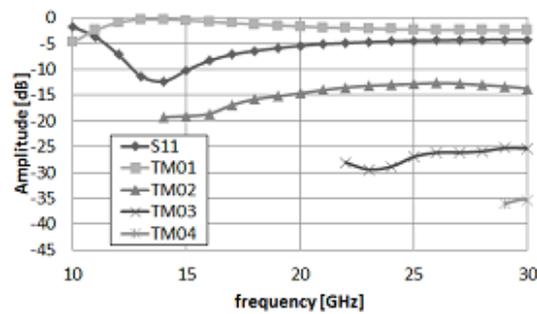
(b) 40 mm

図 2 きず領域内電場分布解析結果

GHz 電磁場における検討においては、マイクロ波の発信部（プローブ）の形状により、発信されるマイクロ波の様相が大きく影響を受けることを見出し、3次元有限要素法解析によるプローブ形状最適化を試みた。得られた解析結果の一例を図 3 に示す。図中横軸が適用周波数を、縦軸がプローブにて反射してしまったマイクロ波 (S11) 及びプローブから発信されたマイクロ波の強度 (TM_{xx}) を表している。従来型プローブでは全体的に反射の割合が大きく、また周波数依存性も強いものに対して、本研究において製作されたプローブでは、TM₀₁ モードのマイクロ波の発信が支配的であり、また周波数依存性も小であることが確認できる。数値解析の結果に基づいて実際に製作されたプローブを用い、40GHz まで発振が可能であるネットワークアナライザを用いた検証試験を実施した。試験の結果が図 4 である。内径 39mm の直管内部に人為的に加工した減肉を対象として行われたものであり、2ns 付近の信号はマイクロ波発信部（プローブ）を透過せずに反射したマイクロ波に起因するものである。図より、従来型のプローブでは発信部における反射波以外を確認することは出来ないが、新型プローブでは対象とした減肉からの信号を明瞭に捉えることができている。製作されたプローブ及び構築された測定体系を用い、様々な形状を有する減肉からの信号の収集試験を実施し、きずの形状パラメータが測定信号に与える影響を評価するとともに、測定信号からのきず形状の評価、及びきずときず以外の信号源分離を試みた。

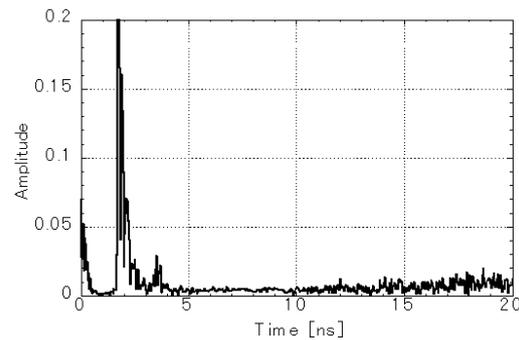


(a) 従来型プローブ

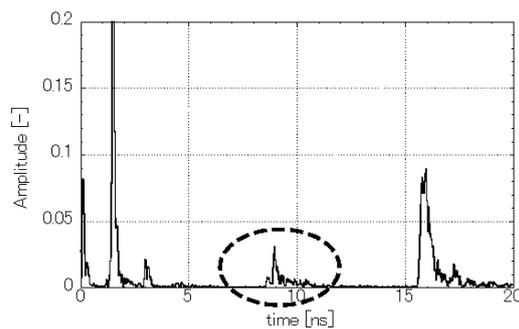


(b) 新型プローブ

図 3 発信マイクロ波特性解析結果



(a) 従来型プローブ



(b) 新型プローブ

図 4 検証試験結果

以上に併せて、当該術を実機に適用する際には不可欠である、当該技術を用いた非破壊検査の観点からの、実験室レベルでの検証試験において用いられる人工スリットと、実構造物において発生しうる実きずとの差異に

についても検討を行った。実きずとしては特に熱疲労割れに着目し、SUS304L 平板に対して人為的に導入された熱疲労割れを用いた評価・分析を実施した。kHz 電磁場を用いた測定試験により得られた信号を図 5 に示す。明瞭な信号を確認することができる。切断調査結果に基づいて詳細な有限要素法解析を実施した結果、きず伝播に伴う材料の磁気特性変化の影響の可能性が示唆されたものの、対象とした割れはほぼ人工スリットと等価と見なされうるということが明らかとなった。

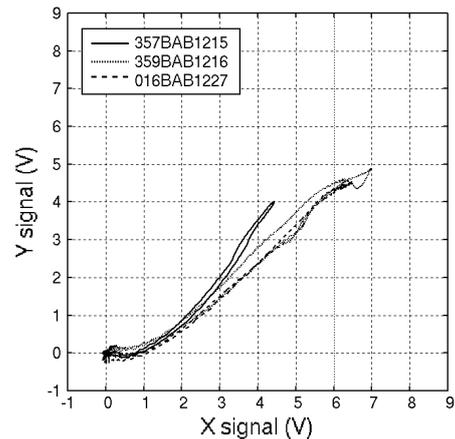


図 5 熱疲労割れ測定信号例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. 遊佐訓孝、橋爪秀利、Iikka Virkkunen、Mika Kemppainen、渦電流探傷試験における熱疲労割れの数値モデリング、保全学、査読有、11 巻、2012 年、73-78.

〔学会発表〕(計 7 件)

1. Kota Sasaki, Linsheng Liu, Noritaka Yusa, Takashi Wakai, Hidetoshi Hashizume, Development on microwave nondestructive testing of a wall thinning inside a pipe by optimizing microwave probe and analyzing wall thinning profile, 1st International Conference on Maintenance Science and Technology Tokyo 2011, 2012 年 11 月 13 日, 東京大学
2. Linsheng Liu, Kota Sasaki, Noritaka Yusa, Hidetoshi Hashizume, A novel approach of microwaves on remote and nondestructive detection of both gradual and abrupt wall thinning inside a metal pipe, Ninth International Conference on Flow Dynamics, 2012 年 9 月 20 日, 仙台

3. 遊佐訓孝、橋爪秀利、強度変調複合電磁場を用いた渦電流探傷法による鉄鋼材料表面きず深さ評価、日本鉄鋼協会第165回秋季講演大会、2012年09月18日、愛媛大学
4. Linsheng Liu, Kota Sasaki, Noritaka Yusa, Hidetoshi Hashizume, Application of microwaves on remote and nondestructive testing of both biofouling and wall thinning inside a metal pipe, 日本保全学会第9回学術講演会, 2012年07月26日, 東京
5. 佐々木幸太、遊佐訓孝、橋爪秀利、配管減肉に対するマイクロ波探傷法の口径依存性評価、第17回動力・エネルギー技術シンポジウム、2012年06月22日、九州大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

遊佐 訓孝 (YUSA NORITAKA)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60466779

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号