

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 14 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560498

研究課題名(和文)電磁波伝達関数を用いた非接触金属探傷法

研究課題名(英文)Non-contact metallic inspection by using electromagnetic transfer function

研究代表者

本島 邦行(Motojima, Kuniyuki)

群馬大学・理工学研究院・教授

研究者番号：30272256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究テーマは、大型プラントなどで多く利用されている配管設備を容易に保守管理するための新たな試験方法を開発することである。本研究テーマでは、金属配管を円形導波管にみたて、内部に電磁波を伝搬させることで電磁波伝達関数を計測し、その変化から金属配管の異常(き裂の有無・変形・異物混入)を容易に検出する新たな計測法である。

この結果、金属管中に存在する直径5mm×厚さ2mmの金属片を検出できることが実験により実証された。さらに、屈曲部を多く持つ金属管の異常検出も容易におこなえることが明らかとなった。これにより、新たな金属配管の異常検出試験方法の基礎を確立することができた。

研究成果の概要(英文)：Metallic tubes used in factories and industrial plants may be deformed as a result of long term use and other natural causes. In this research, a new non-destructive inspection method by using electromagnetic wave transfer functions is developed. In the new method, metallic tubes are regarded as a circular waveguide, and deformation on the tubes can be detected by electromagnetic wave propagation inside the tube. Measuring the transfer functions (S parameter S11) through the tubes, deformations inside the tubes can be detected by changing the transfer functions.

To verify this method, numerical and actual experiments were performed. As the results of them, small metallic piece (size: 5mm×2mm) placed inside the tube can be detected. This new detection method can be applied to complex shape tube with many bends, e.g. heat exchanger. New non-destructive inspection for metallic tubes is achieved by the results of this research.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：非接触計測 非接触探傷試験 電磁波伝達関数

1. 研究開始当初の背景

原子力発電所などの大型プラントでは多くの配管設備が利用されているが、それらを保守管理するための計測技術は安全運用に欠かせない重要な技術である。配管に生じたき裂や変形を検出できなかったために、大きな事故に繋がった例は枚挙にいとまがない。配管に生じたき裂等を検出する試験方法として、超音波探傷、磁粉探傷、浸透探傷、渦流探傷、放射線透過などの計測方法が用いられている。しかし、被測定対象(配管など)にセンサを接触させる必要があったり、磁粉や試薬の塗布、あるいは放射性物質の取り扱いが必要であるため、いずれの試験方法も被測定対象全体を非接触で計測することは容易でない。被測定対象を容易に試験するために、非接触で容易に広範囲を試験可能とする探傷試験法が必要とされていた。

2. 研究の目的

電磁波は、絶縁性材料中を透過し、導電性材料によって反射するため、非接触計測に有効な媒体である。また、アンテナ間干渉やエバネッセントモードによるトンネル効果など顕著な波動性を持つ。

そこで本研究では、これら電磁波の持つ波動性を金属配管のき裂・変形を検出するための探傷試験に適用し、従来にない計測技術を確立するのが目的である。そのために、以下の2点を明らかにすることが目的である。

(1) 金属製配管上にあるき裂を、非接触試験で検出可能にすること

この目的は、断熱材などの電磁波透過性を持つ材料が被測定対象である金属配管を覆っていても探傷試験を可能にすることである。本研究テーマで用いる電磁波による計測法では、被覆材を取り除くことなく、その上から計測が可能である。そこで、(a) 非接触探傷に最適なアンテナ、(b) 非接触探傷可能な最大間隔、(c) 検出可能き裂サイズと計測周波数の関連性、を明らかにすることである。

(2) 金属製配管内の電磁波伝搬を用いて、配管変形の検出を可能にすること

この目的は、複数の湾曲部を持つ金属製配管中に存在する変形を、配管内に電磁波を伝搬させることで容易に検出可能にすることである。金属製配管を「円形導波管」として扱い、配管の一端から電磁波を入射して配管中を伝搬させ、他端で伝達関数を計測することで、配管全体にわたる変形の有無を検出することが可能となる。この計測法では、配管の直径によって決まる遮断周波数より少しだけ高い周波数を用いる点が特徴である。そうすることで変形部分を伝搬する電磁波に、エバネッセントモードのトンネル効果による伝達関数位相特性変化が生じるので、これを検出する計測方法である。そこで、(a) 配管の変形量と伝達関數位相遅延量

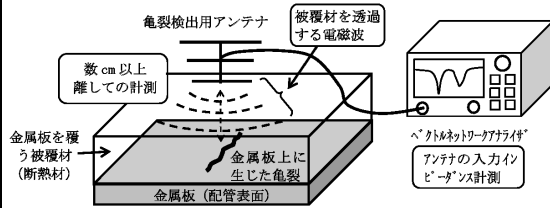
の関係、(b) 遮断周波数と最適な計測周波数の関係、を明らかにすることで、配管内の変形・異物混入を高感度に検出する。

3. 研究の方法

電磁波伝達関数を用いた非接触金属探傷試験を、以下の研究方法で実施した。

き裂探傷試験：

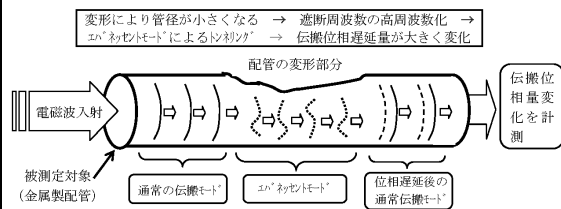
電磁波を用いた金属き裂探傷のために、電磁波探傷用のアンテナをセンサとして用いる。ベクトルネットワークアナライザでアンテナの入力インピーダンスを計測して変化を調べることで、き裂を検出する。(図1)



[図. 1 電磁波を用いた非接触探傷試験法]

配管変形検出試験：

金属製配管を円形導波管として内部に電磁波を伝搬させ、配管の入力・出力の電磁波伝達関数(伝送特性)をベクトルネットワークアナライザで計測する。金属管の形状で決まる遮断周波数より少しだけ高い計測周波数を用いると配管の変形によりエバネッセントモードが生じるため、伝送特性が大きく変化する現象を用いる。



[図. 2 電磁波伝達関数変化による異常検出]

4. 研究成果

平成 23 年度には、金属製配管の保守管理を容易にするために、金属配管に生じたき裂を電磁波を用いて非接触で検出する探傷試験方法について実施した。この新たな探傷試験方法では、断熱材などで被覆された金属製配管の近傍に置かれたアンテナから電磁波を照射し、そのアンテナの入力インピーダンス変化を計測することで、直接目視することのできない配管上のき裂を検出する試験方法である。センサであるアンテナと、スロットアンテナとして振る舞うき裂が電氣的に共鳴する電磁波現象を利用した計測方法である。そのため、き裂長と計測周波数には強い依存性があり、き裂が電磁波共鳴しない計

測周波数では、き裂を見つけ出すことができなかった。また、電磁波は偏波特性を持つために、き裂の向きによっては探傷感度が大きく異なってくる。そこで、これらの問題点を解決するために、き裂の方向による探傷感度変化を生じさせない円偏波電磁波を、広帯域周波数で発生させる事ができるヘリカルコーンアンテナを開発した。(図3)

この新開発のヘリカルコーンアンテナは、周波数 2GHz~7GHz の広帯域電磁波に対して良好な送受信特性を有し、アンテナエレメントが螺旋状をしているために円偏波電磁波を発生させることができる。このアンテナを用いて探傷実験を行った結果、金属き裂から約 30mm 程度離れた位置に置かれたヘリカルコーンアンテナから広帯域電磁波(周波数: 2GHz~7GHz)を照射し、金属板に生じた十数 mm のき裂が検出できることを確認した。また、き裂の向きによる探傷感度の依存性がなく、多様なき裂に対して良好な探傷感度を得た。アンテナの入力インピーダンス測定には、一般の高周波用測定器であるベクトルネットワークアナライザ(VNA)を用いて、実数・虚数の両面からインピーダンス変化を計測した。



[図. 3 ヘリカルコーンアンテナ]

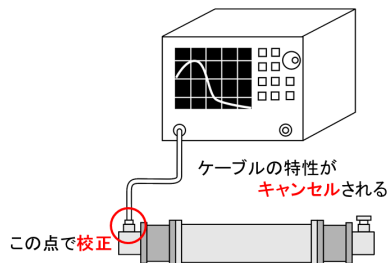
平成 24 年度は、ネットワークアナライザ及び同軸導波管変換器、矩形円形導波管変換器によって構成される計測環境を構築した。そして、金属管の両端にネットワークアナライザを接続し、一端から入力した電磁波を他端まで伝搬させることで得られる電磁波伝達関数を計測し、その変化を評価することで金属管の変形および内部異物の検出試験を実施した。その結果、金属管断面積の約 10% 程度の変形に関しては容易に検出が可能であることが判明した。また、10mm 程度の大きさを持つ金属異物が金属管内に存在する場合も検出可能であった。さらに、金属管の一端に同軸導波管変換器経由で終端抵抗を接続して反射波を抑えた状態を作り、もう一方の端から入射させた電磁波の反射を計測することで、より高感度な変形および異物検出がおこなえる新たな計測方法を考案した。こ

の結果、工場プラントなどで多用されている金属配管に生じた変形および金属管内に存在する異物を、両端もしくは一端に計測器を接続することで容易に検出することが可能となり、プラントの保守管理・安全性向上に寄与することが期待できる。

平成 25 年度は、前年度の検出精度向上を可能とする計測方法の開発を実施した。新たに発案・実施した計測方法は、金属配管の一端(入射側)から電磁波を放射し、一方の他端を電氣的に終端しておき、入射端における電磁波伝達関数の反射波特性(Sパラメータの S11 特性)を計測する方法である。この計測方法は前年度に考案して一部実施していたものであるが、平成 25 年度の計測方法では正常な金属配管・同軸導波管変換器・矩形円形導波管変換器などの計測環境を全て一括して校正し、金属管に生じた異常を反射波伝達関数特性(S11)として計測することで、より高感度な異常検出を可能とする計測方法である。(図4)

#### 精度向上 一校正方法の変更一

校正方法変更による精度の向上



16/29

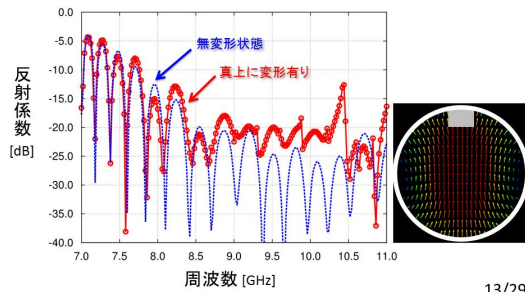
[図. 4 新校正方法による試験感度向上]

この新たな計測方法の導入により、金属管中に置かれた直径 5mm x 厚さ 2mm のナットを検出することが可能となった。これは、前年度と比べ約 5 倍の検出感度である。また、内部が滑らかな金属管だけでなく、途中で内径が異なり段差がある金属配管の異常検出についてもシミュレータを用いて検証した。その結果、この場合も金属管全体を一括して校正する方法が有効に働き、内径が単一で滑らかな金属管の場合よりは検出感度が多少低下するが、前年度よりも高感度な計測が可能であることが判明した。(図5)

以上の研究結果により、工場プラントなどで使用される金属配管の異常検出試験方法の基礎原理および計測可能性の実証実験をおこなうことができた。これにより、新たな金属配管の異常検出試験方法の基礎を確立することができた。

## 異物の挿入

変形が真上に生じている状態



13/29

[図. 5 異物挿入時の電磁波伝達関数変化]

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 9件)

- 佐藤和也、本島邦行、松原雅昭：変形部を有する円形導波管の電磁波伝搬解析、電子情報通信学会論文誌C、査読有、Vol. J94-C, No.7, pp.193-196, 2011.
- 衣川義幸、佐藤和也、本島邦行、松原雅昭：広帯域アンテナを用いた非接触探傷法、電子情報通信学会論文誌C、査読有、Vol. J94-C, No.7, pp.197-201, 2011.
- 小林貴紀、本島邦行：波動関数を用いた散乱体近傍に存在する波源位置推定法、電子情報通信学会論文誌C、Vol. J94-C, 査読有、No.8, pp.223-226, 2011.
- K. Motojima and Hiroyuki Sutou, "Position Search Technique for Unknown Wave Sources Using Spherical Wave Function," Electromagnetics, 査読有, Vol.31, No.7, pp.494-504, 2011.
- 増田浩太郎、米田佑樹、本島邦行、松原雅昭：広帯域円偏波アンテナを用いた非接触探傷法、日本 AEM 学会誌、査読有、Vol.20, No.4, pp.683-688, 2012.
- 森田祐樹、本島邦行：ダイアディックグリーン関数を用いた完全導体球近傍に存在する波源位置推定法、電子情報通信学会論文誌C、査読有、Vol. J96-C, No.3, pp.35-39, 2013.
- 大曾根暖、小川潤也、羽賀望、本島邦行：ラジオダクト及び見通し内 VHF 帯伝搬異常と地震との統計的関連性、J. of Atmos. Electr., 査読有, Vol.33, No.2, pp.115-125, 2013.
- 米田佑樹、羽賀望、本島邦行：マイクロ

波を用いた円形金属管内部における変形検出の試み、電気学会論文誌D、査読有、Vol.133, No.9, pp.868-875, 2013.

高橋恭平、羽賀望、本島邦行：GPS 測位誤差と地震発生との関連解析、J. of Atmos. Electr., 査読有, Vol.34, No.1, pp.41-53, 2014.

[学会発表](計 18件)

- 津久井康平、羽賀望、本島邦行：スパイラルアンテナを用いた非接触探傷法、電気学会 ETT-14-73, ETG-14-73, pp.227-230, 桐生市、2014年3月4日。
- 津久井直樹、羽賀望、本島邦行：Sパラメータを用いた金属管内の欠陥検出法、電気学会 ETT-14-75, ETG-14-75, pp.233-236, 桐生市、2014年3月4日。
- 大曾根暖、羽賀望、本島邦行：見通し内 VHF 帯伝搬異常と地震とのロジスティック回帰分析、大気電気学会誌、Vol.8, No.1, pp.92-93, 小金井市、2014年1月10日。
- 小川潤也、羽賀望、本島邦行：レイトレーシング法を用いた VHF 帯電波伝搬シミュレーション、大気電気学会誌、Vol.8, No.1, pp.94-95, 小金井市、2014年1月10日。
- 樋口友基、羽賀望、本島邦行：連続ウェーブレット変換を用いた VHF 帯伝搬異常と地震との統計的関連性、大気電気学会誌、Vol.8, No.1, pp.96-97, 小金井市、2014年1月10日。
- 本島邦行、真下桂吾：雷雨発生時の見通し内 VHF 帯電波伝搬特性変化、大気電気学会誌、Vol.7, No.2, pp.78-79, 熊本市、2013年7月5日。
- 森田祐樹、羽賀望、本島邦行：ダイアディックグリーン関数を用いた球導体近傍に存在する波源位置推定法、アンテナ伝搬研究会技術資料、AP2012-160, pp.35-40, 東京江東区、2013年2月7日。
- 米田佑樹、羽賀望、本島邦行：マイクロ波を用いた円形金属管内部における変形検出の試み、アンテナ伝搬研究会技術資料、AP2012-160, pp.41-46, 東京江東区、2013年2月7日。
- 高橋恭平、羽賀望、本島邦行：GPS 測位誤差と地震発生との関連解析、大気電気学会誌、Vol.7, No.1, pp.62-63, 東京新宿

区、2013年1月9日。

大島隆弘、羽賀望、本島邦行：震源域別見通し内 VHF 帯伝搬異常特性、大気電気学会誌、Vol.7, No.1, pp.64-65, 東京新宿区、2013年1月9日。

小川潤也、羽賀望、本島邦行：見通し内 VHF 帯伝搬異常と内陸性地震との関連解析、大気電気学会誌、Vol.7, No.1, pp.66-67, 東京新宿区、2013年1月9日。

大曾根暖、羽賀望、本島邦行：ラジオダクト及び見通し内 VHF 帯伝搬異常と地震との統計的関連性、大気電気学会誌、Vol.7, No.1, pp.68-69, 東京新宿区、2013年1月9日。

本島邦行、増田浩太郎、米田佑樹、坂本賢治、松原雅昭：ヘリカルコーンアンテナを非接触探傷法、日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス、CD、松山市、2012年9月24日。

本島邦行：多方向 FM 放送波伝搬観測結果と震央位置の関連性、大気電気学会誌、Vol.6, No.2, pp.68-69, 吹田市、2012年9月14日。

菅原慶、本島邦行：地震発生前後における見通し内 VHF 帯伝搬異常解析、大気電気学会誌、Vol.6, No.1, pp.134-135, 調布市、2012年1月6日。

和田卓也、本島邦行：GPS-TEC の異常変動と地震との統計的関連性、大気電気学会誌、Vol.6, No.1, pp.136-137, 調布市、2012年1月6日。

高橋恭平、本島邦行：GPS 測位における位置誤差と地震との関連性、大気電気学会誌、Vol.6, No.1, pp.138-139, 調布市、2012年1月6日。

本島邦行、松原雅昭：電磁波を用いた金属管変形検出、日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス、CD、北九州市、2011年7月18日。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

本島 邦行 (MOTOJIMA KUNIYUKI)

群馬大学・理工学研究院・教授

研究者番号：30272256