

平成 29 年 5 月 2 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420382

研究課題名(和文) 電磁波を用いた非接触遠隔探傷試験法の開発

研究課題名(英文) Non-contact remote inspection by using electromagnetic wave propagation

研究代表者

本島 邦行 (Motojima, Kuniyuki)

群馬大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：30272256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究テーマは、原子力発電所などの大型プラントで多く利用されている金属配管の保守管理のために、電磁波を用いた新たな欠陥探傷試験方法を開発することである。金属管内に電磁波を放射するために、シミュレータを駆使して電磁波放射プローブを設計し、実際の被計測管に合わせたプローブを作製して、ベクトルネットワークアナライザを用いた実証実験をおこなった。その結果、異物として寸法が1mmに満たない金属片を金属管内に配置した場合でも、その存在の有無と位置を特定することができた。さらに、金属管がU字に湾曲している先に異物が存在している場合でも同様に検出及び位置の特定も可能であることが実証された。

研究成果の概要(英文)：Metallic tubes used in industrial plants may occur in cracks and change in shape owing to external factors and long-term usage. In order to prevent accidents caused by defects in the metallic tubes, various inspection methods have been established. However, these conventional methods require long detection time and effort to inspect the long tubes. In order to avoid this problem, an original method using propagation characteristic of electromagnetic waves is proposed. In the proposed method, metallic tubes are regarded as waveguides, and the defects can be detected by using propagating electromagnetic waves inside the tubes under test. To verify this method, we conducted experiments using a vector network analyzer. As a result, the proposed method is effective for detecting defects such as foreign matter and cracks, and for estimating the location and direction of the cracks. Furthermore, the proposed method is effective even if there is a bend or branch in the metallic tubes.

研究分野：電磁波工学

キーワード：非接触探傷試験 電磁波伝達関数 導波管伝搬 周波数分散性 隅奇モード

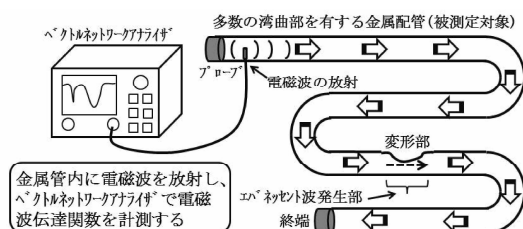
1. 研究開始当初の背景

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あるいは配管に混入した異物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。被測定対象である金属配管の全体を容易に試験するために、非接触かつ容易に広範囲の試験を可能とする探傷試験法が必要とされている。

2. 研究の目的

電磁波は絶縁性材料中を透過することができ、また金属などの良導体に囲まれた空間を低損失で伝搬する特性を有するため、非接触遠隔計測に有効な媒体である。しかし、超音波やX線などに比べ波長が長く分解能が得られないため、研究背景にある工場プラントで用いられている金属配管に生じたき裂・変形、および管内に混入した異物の検出などを目的とする探傷試験には用いられてこなかった。しかし、電磁波を金属管中に放射すると金属管が“円形導波管”として振る舞うため内部を効率よく遠方まで伝わる。また大型プラント等などでは長大で湾曲部を多数持つ配管が使われているが、このような形状をした金属配管であっても内部を伝搬する電磁波は減衰が少ないため、長い距離を伝搬することができ湾曲部においても損失が少ない。しかも電磁波は、その波長と金属配管の直径である導波路サイズによって遮断周波数以下で反射したり、あるいはエバネッセントモードなどを生じたりと顕著な波動性を持つ。これら電磁波の持つ波動性を、金属配管のき裂・変形検出、および混入した異物の発見などの探傷試験に応用し、従来の探傷試験法にない独自の計測技術を確立するのが本研究課題の目的である。

3. 研究の方法



[本計測法の外観図]

本研究課題の目的を達成するために、金属管内を伝搬する電磁波の伝達関数特性を計測することで金属管の異常検出を可能にする計測方法を開発する。

具体的には、金属配管の片側から金属管内に電磁波を放射し、管内を伝搬する電磁波伝達特性をベクトルネットワークアナライザで計測する。このために重要となるのは、金属管内を伝搬させる広帯域電磁波をいかにして金属管内に放射するかである。以前の研究では、市販の同軸・矩形導波管変換器を用いて矩形導波管内に電磁波を放射し、その後、自作した矩形・円形導波管変換器を経由することで（円形）金属管内に電磁波を放射していた。しかしこの方法では、複数の変換部分があるため各部における反射波が高感度な計測の妨げとなっていたため、円形金属管内に直接電磁波を放射できる機構が必要であった。また、金属管の直径が変わるたびに新たな機構（矩形・円形導波管変換器など）が必要となり、多様で柔軟な計測ができなかった。そこで本研究課題では、被測定対象の金属配管内部に直接電磁波を放射することができる高効率かつ広帯域周波数で使える電磁波放射プローブの開発をおこなった。電磁波放射プローブの開発方法として、研究室所有の電磁波シミュレータと数値解析用PCクラスタを活用し、金属管内でも広帯域で高性能放射特性が得られるプローブ形状を設計した。その結果、従来の直線状導体を放射体とするプローブより、導体中間部を太くした形状のプローブが広帯域周波数特性に優れていることが分かり、さらに特定の誘電率を持つ誘電体をプローブにかぶせることで広帯域かつ低反射特性となることが判明した。ひとたび電磁波放射プローブ形状が決まれば電磁波の相似則によって、あとは金属管の直径に合わせた相似形のプローブを用意することで多様な金属配管の計測が可能となる。このシミュレーション結果で得られた形状・材料の電磁波放射プローブを作製し、本研究課題である金属管の異常検出の実証実験をおこなった。

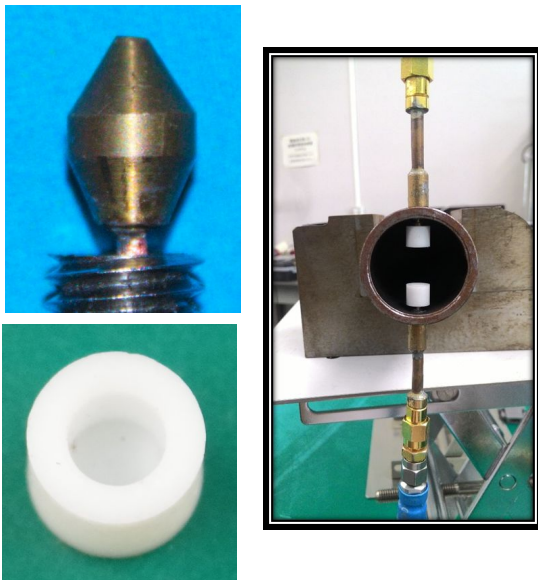
また、金属配管に生じたき裂・変形・異物の位置を高精度に検出するために、円形金属管片端の上下対称位置に2つの電磁波放射用プローブを配置し、そこから金属管内に直接広帯域電磁波を放射する計測方法を考案した。この新たに考案した計測方法では、上下対称に設置した2つのプローブを各々ベクトルネットワークアナライザのポート1と2に接続し、両ポートにおける反射係数(SパラメータのS11とS22)を計測する。そして、両ポートの計測結果の和をとることで金属管内を伝搬する“偶モード”が算出でき、また差をとることで“奇モード”の算出が可能となる。これらの偶奇モードによる計測結果を用いることで、金属管内に生じたき裂・変形・異物の位置をより高精度に特定することが可能となる。

さらに、本研究課題の目的は、金属管に生じたき裂や異物をより高感度に検出可能とすることでもある。このために申請時の研究計画では、金属管表面に生じたき裂からの漏洩電磁波を波源と見なし、以前独自開発した電磁波源位置特定法を利用して、き裂位置の推定をおこなう予定であった。(外部計測法)しかし、本研究課題を進めた結果、申請書で予定していた外部計測法よりも、金属管内を伝搬する電磁波を用いた計測方法(内部計測法)の方が、容易かつ高感度にき裂や異物を検出し、高精度でそれらの位置を特定できることが判明した。これは、金属管内に広帯域電磁波を放射し、金属管内を伝わる電磁波の伝搬速度分散性を考慮した周波数-時間変換をおこなうことで高感度に精度良くき裂や異物の位置特定が可能であることが判明したことによる。

4. 研究成果

本計測方法の異常検出感度および異常位置特定精度を検証するために、実際の金属配管内に異物を混入させて検出の可否・精度に関する実証実験を行った。

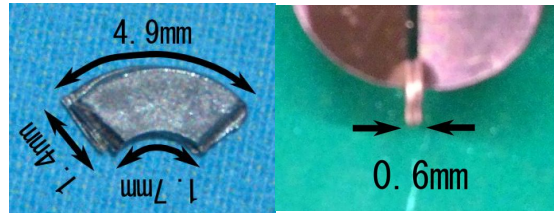
まず初めに、高感度・広周波数帯域特性を持つ電磁波放射プローブを製作した。基本構造はシミュレータを用いた設計から得られているため、被計測対象である金属配管の直径に合わせた相似形状として、電磁波放射プローブを製作して計測に用いた。



[作製した電磁波放射プローブ(左図)と金属管対象位置に配置したプローブ(右部)]

計測にはベクトルネットワークアナライザを用いたが、上下対称に配置された2つのプローブをベクトルネットワークアナライザの2つのポートに各々接続し、電磁波伝達関数(Sパラメータ)を計測した。その結果、異物として次図に示すような小さな金属片(外周4.9mm,内周1.7mm,厚み0.6mmの扇形)

が金属管内に存在する場合、その存在の有無と位置(電磁波放射プローブからの距離)を特定することができた。これによりこの新たに開発した高性能プローブを使用することで、金属管内に存在する寸法が1mmに満たない異物であっても検出可能であることを実証した。

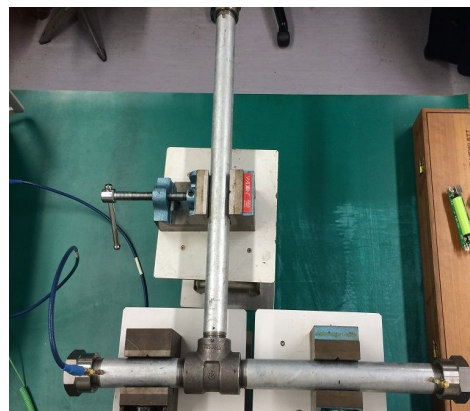


[本計測法で検出できた異物]

さらに、多様な形状の金属管に対しても本研究課題の計測方法が適用できることを実証するため、U字に湾曲している金属管内の異物検出実証実験をおこなった。



[湾曲部を持つ金属配管の計測]



[T字分岐金属管の計測]

その結果、U字金属管の湾曲部の先にある異物であっても、直線金属管の場合と同様に検出可能であり、またおよその位置も特定することが可能であることが立証された。他の計測手法では、被計測体である金属管が曲がっている場合には、湾曲部が計測の障害となり計測感度を低下させる要因となる。しかし、本研究課題では金属管内に電磁波を伝搬させる独自の計測方法であるため、金属管に湾

曲部が存在していても何ら問題なく金属管内部を電磁波が伝搬することができるため、精度に悪影響を及ぼさずに計測可能であることが明らかになった。

さらに、分岐構造を持つT字金属管での計測もおこなった。この場合には金属管が分岐しているために、この分岐部で電磁波が反射し、また分岐方向に伝搬する電磁波は多くないため、き裂や異物からの反射電磁波が分割されてしまい計測感度がやや低下してしまう。しかし、従来の計測方法では不可能であったT字分岐した先にある異物やき裂も検出可能な計測方法であることが立証できた。

これらの結果、電磁波を用いた新たな金属管探傷試験法を確立することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7件)

谷川廣祐、本島邦行、羽賀望：見通し内VHF帯放送波の伝搬異常と地震及び地表平均風速の統計的関連性、J. of Atmos. Electr., Vol. 37, No. 1, pp.11-24, 2017. 査読有。

竹内良、本島邦行、羽賀望：電磁波伝搬特性を用いた金属管内の欠陥検出法、電気学会論文誌D、Vol.136, No.5, pp.364-372, 2016. 査読有。

南條利昂、羽賀望、本島邦行、岩崎博之：落雷と見通し内VHF帯伝搬異常の統計的関連性、J. of Atmos. Electr., Vol. 36, No.1, pp.23-38, 2016. 査読有。

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., Vol. 34, No.2, pp.87-100, 2014. 査読有。

K. Motojima and N. Haga, Stochastic relation between anomalous propagation in the line-of-sight VHF radio band and occurrences of earthquakes, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, pp.2119-2124, 2014. doi:10.5194/nhess-14-2119-2014. 査読有。

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., Vol.34, No.1, pp.41-53, 2014. 査読有。

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、Vol.133, No.9, pp.868-875, 2013. DOI: 10.1541/ieejias.133.868、査読有。

〔学会発表〕(計 15件)

大澤祐輝、本島邦行、羽賀望：複数の観測点における見通し内VHF帯放送波の伝搬異常と地震の関連解析、日本地震予知学会、第3回学術講演会アブストラクト集、pp.49-52、調布市、2016年12月21

日発表。

谷川廣祐、本島邦行、羽賀望：見通し内VHF帯放送波の伝搬異常と地震及び地表平均風速の統計的関連性、日本地震予知学会、第3回学術講演会アブストラクト集、pp.45-48、調布市、2016年12月21日発表。

高橋昌史、羽賀望、本島邦行：IoTを応用した電力デマンド制御システム、平成28年度電気学会産業応用部門大会、講演番号5-22、V-223-226、前橋市、2016年8月31日発表。

鶴淵健太、羽賀望、本島邦行：電磁波伝搬特性を用いた金属管内欠陥検出法の高精度化、平成28年度電気学会産業応用部門大会、講演番号2-6、II-89-92、前橋市、2016年8月30日発表。

廣木星也、羽賀望、本島邦行：電磁波を用いた金属管内の非金属異物検出法、平成28年度電気学会産業応用部門大会、講演番号2-5、II-85-88、前橋市、2016年8月30日発表。

阿久澤一起、高橋昌史、本島邦行、羽賀望：近距離無線通信技術を応用した住宅向けマイクログリッドの構築、電気学会研究発表会資料KNG-16、横浜市、2016年2月23日発表。

南條利昂、羽賀望、本島邦行、岩崎博之：落雷とVHF帯伝搬異常の統計的関連性、日本大気電気学会誌、Vol.10, No.1, pp.132-133、調布市、2016年1月9日発表。

谷川廣祐、本島邦行、羽賀望：ウェーブレットを用いた見通し内VHF帯放送波の伝搬異常と地震の統計的関連性、日本地震予知学会、第2回学術講演会アブストラクト集、pp.10-13、調布市、2015年12月21日発表。

本島邦行：見通し内VHF帯放送波伝搬異常と地震発生との関連性解析、日本地震予知学会、第2回学術講演会アブストラクト集、pp.5-8、調布市、2015年12月21日発表。

羽賀俊哉、羽賀望、本島邦行：スイッチング電源によって3線ACケーブルに生じる電流のモード解析、電子情報通信学会信学技報、EMCJ2015-89(2015-11)、鎌倉市、2015年11月13日発表。

樋口友基、羽賀望、本島邦行：VHF帯電磁波伝搬異常のリアルタイム検出と通知システム、大気電気学会誌、Vol.9, No.1, pp.106-107、千葉市、2015年1月10日発表。

大島恭平、羽賀望、本島邦行：UHF帯TV波における伝搬異常とラジオダクトとの統計的関連性、大気電気学会誌、Vol.8, No.2, pp.56-57、太田市、2014年7月11日発表。

関龍之介、羽賀望、本島邦行：複数GPS受信器を用いたエリア別位置情報誤差計測、大気電気学会誌、Vol.8, No.2,

pp.54-55, 太田市, 2014年7月11日発表.
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見通し内 UHF 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.2, pp.52-53, 太田市, 2014年7月11日発表.

K. Motojima and N. Haga, " Stochastic relation between the line-of-sight VHF propagation and earthquakes, " 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Proceedings 13A-S5, pp.151-154, Tokyo, May 13th, 2014. (Invited) 2014年5月13日発表.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

本島 邦行 (MOTOJIMA, Kuniyuki)

群馬大学理工学部・教授

研究者番号 : 30272256