

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04919

研究課題名（和文）金属管内電磁波伝搬を用いた高精度金属配管欠陥検出法

研究課題名（英文）High-precision defect detection method for metallic tubes using electromagnetic wave propagation inside the metallic tube

研究代表者

本島 邦行 (Motojima, Kuniyuki)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：30272256

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究テーマは、金属管を電磁波伝搬用の”円形導波管”に見立て、その内部に電磁波を放射して管内を伝搬させ、その伝送特性から容易に金属管内の欠陥検出を可能とする独自の計測法であるが、3年間実施した本研究テーマの成果は、1．管内を伝搬する電磁波伝送特性を用いた計測方法が有効であること、2．金属管内の伝搬損失の影響を受けにくい計測方法として電磁波伝搬位相特性（群遅延特性）を用いることが有効であること、3．金属管に生じたき裂などの検出も本計測法で可能であること、などの3点である。以上の結果から、金属配管の欠陥検出において電磁波を用いた新たな計測分野を切り開くことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大規模プラントでは多くの金属配管設備が利用されているが、それらを効率的に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。従来の配管検査法はどれも局所的な検査であり、配管全体を効率よく検査する計測方法が確立されておらず、安全管理上の問題点であった。本研究成果では、金属配管を電磁波円形導波管に見立てて、その内部を伝搬する広帯域電磁波を利用することで、配管の両端で電磁波計測するだけで配管全体を容易に検査可能とする新たな計測方法であり、安全管理上有用な新たな計測分野の確立を可能とするものである。

研究成果の概要（英文）：The original idea in this research theme is to regard metallic tubes as circular waveguides which can propagate the electromagnetic wave inside of it. By radiating the electromagnetic wave inside the metallic tube, it can propagate the electromagnetic wave through the metallic tube with integrity. Main research results are follows: 1. the measurement method using the electromagnetic wave transmission characteristics propagating in the pipe is effective for detecting clogs, 2. electromagnetic wave propagation characteristic has well integrity, especially group delay characteristic is very valid for measurement for metallic tubes trouble, 3. this measurement method is possible to detect cracks occurred on the pipe wall. From the above results, a new measurement field using electromagnetic waves for detection of metal tube defects has been established.

研究分野：電磁波工学

キーワード：電磁波伝達関数 円形導波管 電磁波伝搬位相特性 群遅延特性 配管き裂

### 1. 研究開始当初の背景

大規模プラントでは多くの金属配管設備が利用されているが、それらを効率的に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。配管に生じた異常(き裂・変形・異物の存在など)を見逃し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。そのため金属配管の異常を検出するための探傷試験は、重要な技術である。従来、配管に生じた異常を検出する試験方法として、超音波探傷、浸透探傷、渦流探傷、放射線探傷などの計測方法が用いられている(表1)が、計測範囲が局所的な範囲に限定されるため、金属配管全体の検査には多くの時間と労力が必要となり困難であった。

従来、金属配管の異常検出に電磁波が用いられることはなかった。その理由として、電磁波の速度は超音波などと比べると桁違いに速いため、計測において分解能が得られず細かな傷などが見つけられなかったためである。ところが、金属配管を“円形導波管”に見立てて内部に電磁波を放射すると、長大な金属配管であっても電磁波は管内を良好に伝搬する。そこで、詳細な傷や金属内部の欠陥検出には不向きであるが、長大な金属配管全体の正常/異常を容易に判断する計測手法として電磁波は有用であることを発想した。しかし、情報伝達手段として光ファイバーが主流となった現代においては、通信用途で円形導波管が使われることがなく、ましてや円形導波管に異常が存在するような場合における電磁波伝搬特性の知見がほとんどない状況であった。そこで、円形導波管内の電磁波伝搬特性の解析から開始し、異物などの異常があった場合における伝搬特性の変化などを調べる必要があった。

[表. 1 各種探傷試験法と本手法の比較]

試験法	本手法(電磁波)	超音波探傷	浸透探傷	渦流探傷	放射線透過
遠隔計測	◎ (数十メートル以上)	△ (数十 cm 以内)	×	×	△ (要被曝対策)
計測原理	金属管を“円形導波管”にみたてて内部に電磁波を放射し、その伝搬特性を計測する	被試験体に接触させたトランスデューサから超音波を放射し、傷からの反射波を計測する	あらかじめ被試験体に蛍光薬を塗布し、傷に染み込んだ蛍光薬を特殊なセンサーで計測する	被試験体近傍に配置された電磁コイルから低周波交流磁束を照射し、渦電流変化を計測する	被試験体に X 線を照射し、透過する放射線を計測する (レントゲン撮影)
特徴	<b>一度の計測で金属管全体の異常検出試験が可能</b> 金属管のみ可能	非金属試験体にも適用可能 被試験体内部の探傷も可能	非金属試験体にも適用可能 試薬塗布が必要	被試験体は金属に限られる	被試験体内部の探傷に最適 放射線の取扱いに資格が必要

### 2. 研究の目的

金属配管を多数有する工場プラントの安全保守管理のために、金属配管内部に電磁波を放射し、金属管内を伝搬する電磁波伝搬特性を計測することで、金属配管全体の正常/異常の判断を容易に可能とする新たな計測方法の開発が目的である。従来の計測方法では、センサー等を当てている近傍しか計測できない(表1)が、本研究テーマで提案した計測法では金属配管の全長にわたる計測試験が可能となる。

これらの目的を達成するためには、円形導波管内を伝搬する電磁波の伝搬特性を調べる必要がある。特に、管内に異物が存在する場合や管壁にき裂が生じている場合などの電磁波伝搬特性に関する知見はほとんど無く、基礎的な実験から始めることでこれら学術的な知見を蓄積するのも目的の1つである。

### 3. 研究の方法

初めに金属配管内部に電磁波を放射する手段と、金属配管内部を伝搬してきた電磁波を計測する方法が必要となる。金属配管内部に放射する電磁波の元になる高周波信号として、ベクトルネットワークワーカーアナライザ(図1, 以下、VNA)が発生する高周波信号を用いた。VNAからの高周波信号は、同軸導波管変換器→矩形円形導波管変換器(特注品)(図2)を経由して、被測定金属配

管の一端から金属配管内に放射される。そして、被測定金属配管内を伝搬した電磁波は、金属配管の他端において前述とは逆に、被測定金属配管→矩形円形導波管変換器→同軸導波管変換器→VNA、の経路でVNAに戻り、伝達関数（SパラメータのS21）として計測される。実験の様子を図3に示す。



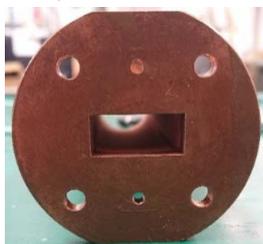
図1：ベクトルネットワークアナライザ（VNA）



矩形円形導波管変換器（特注品）



同軸導波管変換器



矩形導波管接合部



円形導波管接合部

図2：計測器と被計測対象金属管を接続するための実験用機器  
（同軸導波管変換器、矩形円形導波管変換器（特注品））

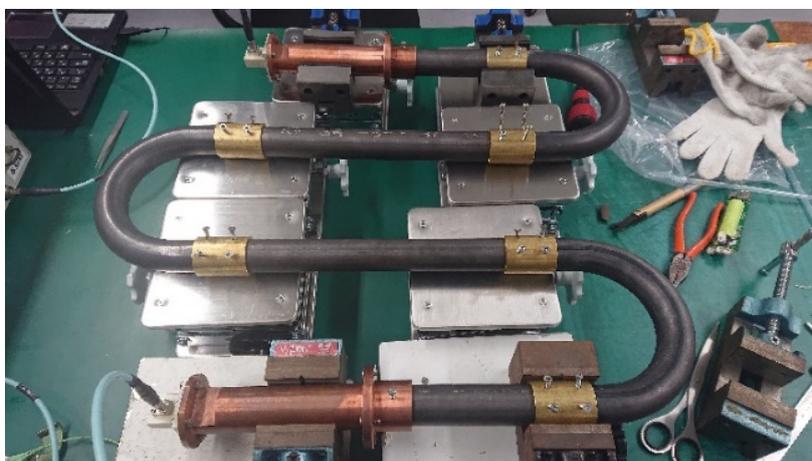


図3：実験の様子（多数の湾曲部を持つ金属配管の計測）

本研究テーマで提案する金属配管内における電磁波伝搬特性を用いた金属配管異常検出法を評価・検証するために、以下の3点について研究を進めた。

(1) 多数の湾曲部を有する金属配管内の広帯域電磁波伝搬特性を明らかにした。

本研究テーマは、金属配管を“円形導波管”に見立てて、内部を伝搬する電磁波の伝搬特性を計測することで金属管の異常を検出する方法である。本計測法の特徴として、金属配管に湾曲部があっても内部を伝搬する電磁波にはほとんど影響がなく、従来法では計測できなかった部分も容易に計測できる点である。

そこで、多数の湾曲部を有する金属配管内を伝搬する電磁波の伝送特性を実験によって明らかにし、本研究テーマで提案する計測手法が有効であることを評価・確認した。

(2) 電磁波伝搬特性における群遅延特性を用いた計測方法の有効性を検証した。

金属管内伝搬損失の影響を受けにくい計測方法として、電磁波伝搬特性の位相情報を利用した群遅延特性を提案した。電磁波伝搬の振幅特性は、金属配管内の各部分で生じる反射波などの影響を受けやすく、また配管長が長くなった場合には損失も大きくなるため、金属配管の異常を検出する方法に適さない。一方、電磁波伝搬の位相特性は、管内の反射波の影響や伝搬による損失の影響を受けにくいいため、本研究テーマで目的とする金属配管の異常検出法として適している。そして、配管に全く異常がない場合であっても位相特性は周波数に比例して変化するため、そのままでは位相特性の変化（変動）が分かりにくい。そこで、位相特性を周波数で微分することで得られる“群遅延特性”を用いた。

(3) 金属配管に生じたき裂の検出可能性について検証・評価した。

金属管内を伝搬する電磁波は、円形導波管内を伝搬する電磁波と同様の伝搬特性・伝搬モードを持つはずであるが、それによって金属管の内壁表面に高周波電流が励起される。励起された高周波電流も金属管内を伝搬する電磁波の一部と見なせるが、金属配管にき裂などが有る場合、その励起される高周波電流の流れをき裂が妨げるため電磁波伝搬特性に影響が表れる。本研究テーマでは、金属配管に生じたき裂が電磁波伝搬特性に与える影響についても評価した。さらに、金属配管内を伝搬する電磁波の伝搬モードによって金属管内壁を流れる高周波電流の向きが決まるが、その高周波電流の向きとき裂の向きのなす角によって高周波電流が遮断される程度が変わってくる。そこで、金属配管内の電磁波伝搬モードと金属配管に生じたき裂の向きや長さによる電磁波伝搬特性変化を、実験により評価した。

#### 4. 研究成果

本研究テーマの研究成果は、主に以下の3点である。

(1) 湾曲部を多数有する金属配管の異常検出法として、管内を伝搬する電磁波伝送特性を用いた計測方法が有効であること。

前節の図3の実験風景で示すような多数の湾曲部を有する金属配管が被計測対象である場合でも、本研究テーマで提案する電磁波伝搬特性を用いた計測方法が有効であることを示した。図3の金属配管を計測した結果を、図4に示す。これは、電磁波伝搬の群遅延特性を計測した結果であるが、青線が金属管内に異物が存在しない場合の計測結果であり、オレンジ線が異物が存在する場合の結果である。この結果から明らかなように、湾曲部を多数有する金属配管であっても、異物存在の有無を判別できる。金属管内の異物の位置を移動しても、ほぼ同様の結果が得られており、異物の存在位置に関わらずに、異物の有無を判断できる。

この結果は、金属配管が湾曲している場合であっても、内部を電磁波が良好に伝搬することで計測可能となることも示しており、本研究テーマの特徴である計測媒体として電磁波を用いることの有効性を実証した結果である。

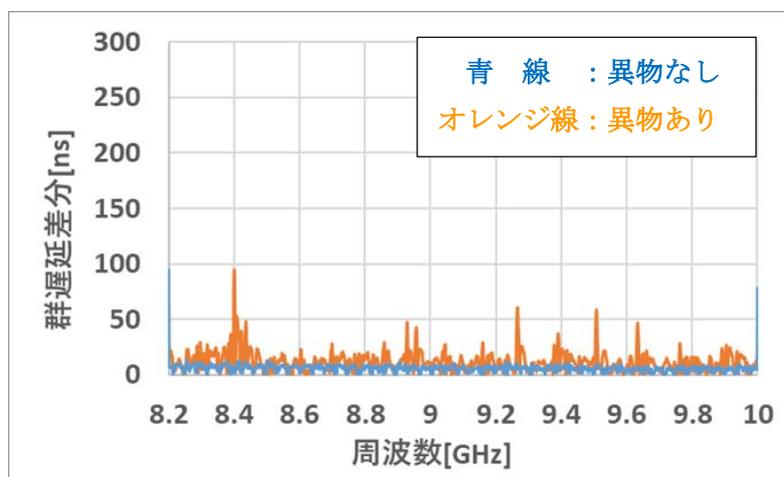


図4：多数の湾曲部を持つ金属配管における電磁波群遅延特性

(2) 金属管内の伝搬損失の影響を受けにくい計測方法として電磁波伝搬位相特性（群遅延特性）を用いることが有効であり、これにより高精度な計測が可能となること。

被計測対象の金属配管長が長くなることによる電磁波伝搬損失が増大する場合や、金属配管

の途中に分岐部や接合部などによって反射波が生じる場合は、電磁波伝搬振幅特性の計測結果から、金属配管の異常の有無を判断することは困難となる。例えば、図3に示すような複数の湾曲部を有する金属管の電磁波伝搬振幅特性は、金属管に異常がない場合であっても図5のように大きな損失を生じるため、異常の有無の評価が困難となる。一方、電磁波伝搬位相特性（群遅延特性）を用いることで、図4に示すように異常の有無が明確になる。

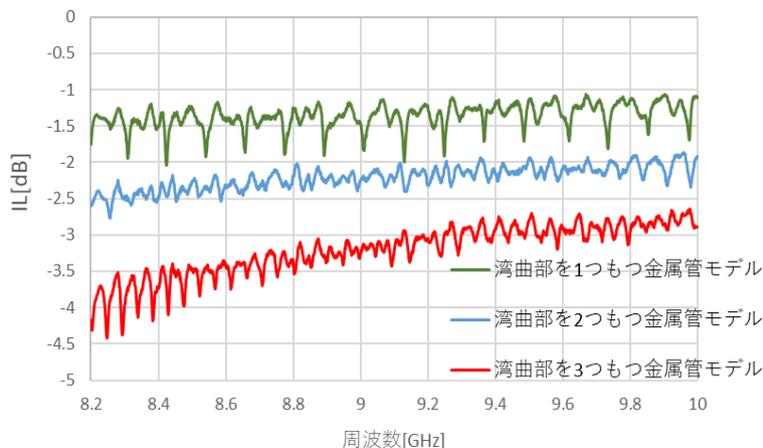


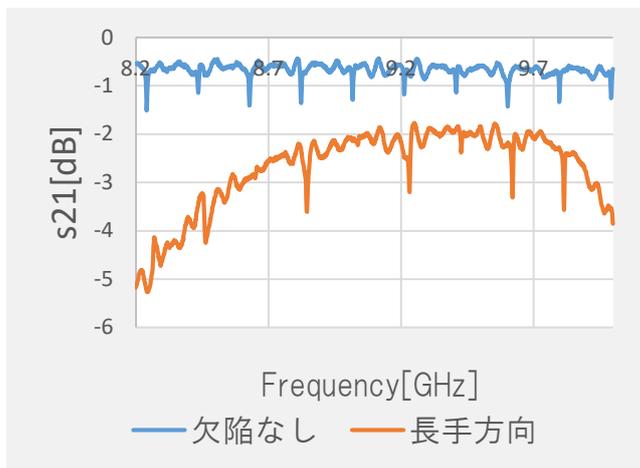
図5：湾曲部を持つ金属配管における電磁波伝搬振幅特性

(3) 金属管に生じたき裂などの検出も本計測法で可能であり、金属管内の高周波電流の向きとき裂の向きのなす角が計測精度に大きく影響を与えていること。

金属配管内を伝搬する電磁波は、金属管内壁面上に高周波電流を励起させるため、金属管内壁の電気伝導度変化の影響を受ける。そこで、図6(a)に示すように、き裂が存在する金属管を測定し、き裂が電磁波伝搬特性にどのような影響を与えるかを評価した。その結果、き裂が存在する金属管の電磁波伝搬振幅特性を図6(b)に示すが、き裂（長手方向）が存在する金属管の電磁波伝搬特性に大きな損失が生じていることが明らかであり、本計測方法の有効性を確認できる。しかし、き裂の方向と金属管内電磁波伝搬モードに関連性があり、管内壁面に励起される高周波電流の向きとき裂の向きによっては、異常の検出感度が低下する場合があることも明らかとなった。これは、高周波電流を遮断する向きなき裂は、電磁波伝搬特性に大きな影響を与えるが、高周波電流の向きと並行なき裂ではあまり影響を及ぼさないためである。



(a) き裂・腐食した金属管



(b) き裂部を伝搬する電磁波伝搬振幅特性

図6：き裂・腐食した金属管における電磁波伝搬特性

以上の結果から、金属配管の異常検出法として管内を伝搬する電磁波を用いることが有効であることが、多様な実験をおこなうことで立証できた。この成果を発展させることで、金属配管の欠陥検出を目的とした計測において、電磁波を用いた新たな計測分野を切り開くことができた。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 小倉佑哉、本島邦行	4. 巻 38
2. 論文標題 Molchan's Error Diagramによる見通し内VHF帯放送波の伝搬異常と地震との関連性解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. of Atmos. Electr.	6. 最初と最後の頁 101-112
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 長谷川勇氣、廣木星也、本島邦行	4. 巻 139
2. 論文標題 電磁波遅延特性を用いた金属管内の異物検出法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 652-656
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejias.139.652	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kuniyuki Motojima, Yuya Ogura
2. 発表標題 Statistical consideration of relationship between occurrences of earthquake and anomalous radio wave propagation with taking the climatic factor
3. 学会等名 6th International Workshop on Earthquake Preparation Process（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成田貴一、本島邦行、岩崎博之
2. 発表標題 気象レーダを用いた落雷の短時間予測
3. 学会等名 2020年度(第11回)電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野里和樹、本島邦行
2. 発表標題 見通し内VHF帯放送波における伝搬異常の発生要因解析
3. 学会等名 日本地震予知学会第8回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹澤直樹、本島邦行
2. 発表標題 MF帯放送波の日没時伝搬異常と地震発生の関連性解析
3. 学会等名 日本地震予知学会第8回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤智也、江川大輝、村越将也、本島邦行
2. 発表標題 電磁波伝送特性を用いた金属管内異物検出法
3. 学会等名 2021年度(第12回)電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江川大輝、佐藤智也、村越将也、本島邦行
2. 発表標題 電磁波を用いた金属管内の異物検出判定法
3. 学会等名 2021年度(第12回)電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坪井孝充、本島邦行
2. 発表標題 スマート農業による農作物最適育成環境の解析
3. 学会等名 2021年度(第12回)電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤智也、江川大輝、本島邦行
2. 発表標題 電磁波遅延特性を用いた管長の長い金属管内の欠陥検出法
3. 学会等名 2020年度(第11回)電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川勇氣、佐藤智也、本島邦行
2. 発表標題 電磁波群遅延特性を用いた金属管内の欠陥検出法
3. 学会等名 第10回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤智也、長谷川勇氣、本島邦行
2. 発表標題 電磁波群遅延特性を用いた管長の長い金属管内の欠陥検出法
3. 学会等名 第10回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会
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
---------	---------