

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760265

研究課題名（和文） 回転磁場励磁インピーダンス計測による保温材付配管の外面腐食検査システムの開発

研究課題名（英文） Development of an inspection system for surface corrosion of pipes covered with heat insulators by ac impedance method using rotating magnetic field

研究代表者

木下 勝之 (KINOSHITA KATSUYUKI)

山口大学・大学院理工学研究科・講師

研究者番号：80325240

研究成果の概要（和文）：本研究は、電磁気現象を利用して、保温材付配管の局所的な外面腐食を簡便に検査できるシステムを開発することを目的としている。まず、回転磁場を励磁するための電磁石の設計および製作を行い、所定の性能を有することを確認した。次に配管の腐食領域の計測精度を上げるための計測条件について検討を行い、特定の計測条件を見出した。

研究成果の概要（英文）：In this study, a pipe inspection system using electromagnetic phenomenon for surface corrosion of pipes covered with heat insulators is developed. An electromagnet to produce a rotating magnetic field was created for the pipe inspection system; it was confirmed to have an enough performance. To improve inspection accuracy of the surface corrosion of pipes, measurement conditions of impedance at the frequency were examined; the specific frequencies to improve inspection accuracy were found.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：連続体力学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：非破壊検査，磁気インピーダンス，保温材付配管，表面腐食

1. 研究開始当初の背景

現在、プラント施設管理の現場で求められている非破壊検査のニーズとして、

- 保温材で覆われているような配管の外面腐食について保温材を外さずに検査したい。

- 簡易検査でいいので、できるだけ短時間かつ簡単に多くの個所や長い距離を検査したい。
 - 全面腐食ではなく部分的な腐食である孔食を発見したい。
- というものがある。保温材付配管用の非破壊

検査法としては、パルス渦電流探傷法と放射線法が挙げられる。しかし、前者は円周方向に関して平均的な肉厚検査しか行えない欠点を持ち、局所的な腐食の検査は困難である。また、後者は、最も実用化が進んでいるが、作業効率に問題があるとともに作業被爆の可能性のある点が最も重要な懸念事項である。また近年注目されているガイド波は、入力部の保温材を剥がす必要があるため保温材付配管の検査には簡便性などの点で問題がある。

研究代表者は、これまで鉄系形状記憶合金線材の酸化鉄皮膜の磁気インピーダンスを計測することにより、形状記憶合金の変態量を計測できることを示した。この技術は、静的磁場を印加しながら線材の両端のインピーダンスを計測するだけでよく、任意距離ごとに配線のみが保温材の外にできるようにしておけば、保温材を外さずに外面腐食を計測できる可能性がある。また、交流インピーダンスを計測するセンサ部と静的磁場を印加する励磁部を一体化したプローブを開発し、板状試験片の厚さ分布が計測可能であることを示した。よって、本手法により配管の減肉分布を計測することが可能であると判断される。そして、外部磁場の励磁方法を回転磁場にするることによって、磁気異方性ベクトルを計測できるシステムを開発し、SM490A試験片の研削方向を特定できることを確かめた。この技術により、配管の円周方向に回転磁場を励磁することによって局所的な腐食を発見できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、保温材付配管のような皮膜付構造物の外面腐食を非破壊検査できる手法を開発することにある。この目的を達成するためにこれまで開発してきた磁気インピーダンス現象を利用した非破壊検査システムを応用する。基本的な計測方法は、外部磁場を変化させながら配管の交流インピーダンスを計測し、その変化から腐食状態を推測する。その際、磁石を長軸方向に移動更新ごとに回転磁場を励磁することによって、外面腐食を円周方向と長軸方向の2方向探査できるシステムとする。システムを開発する上での課題は、①配管用の各種計測装置および計測方法の開発、②腐食位置や腐食面積などの情報を推定するシステムの開発である。本研究では、①の課題について取り組み、まず配管励磁用の2次元電磁石など計測装置の開発を行い、次に計測方法について検討を行った。

本研究で用いる2次元電磁石の設計条件としては、配管の磁化を飽和させ磁気インピーダンスの変化量を大きくするために、磁極中心の磁場が100kA/m以上必要であるとともに

に回転方向に均一な磁場を形成できることが重要である。そのためには、できるだけ磁場の外部漏れを減らすとともに、配管に対して移動しながら励磁できるように電磁石を縦置きで用いるため、磁極柱がヨークをたわませて変形するのを抑える必要がある。そこで、エネルギー加速装置で用いられている4極電磁石を参考に2次元電磁石を設計・製作した。特徴は、4極電磁石の理想磁極形状である双曲線形状を取り入れていることと磁極にテーパをつけることによって磁極端部からの磁束の漏れの低減しているところである。また、ヨーク形状を八角形にすることによって四角形状より剛性を高くし、磁極柱の重量によるヨークの変形を抑制した。設計・製作した電磁石が予定通りの性能を有しているか、性能試験を行った。

計測方法の課題として、腐食領域の分解能向上技術について検討した。できるだけ長い距離の配管の異常を計測するためには、磁場による単位長さ当たりのインピーダンス変化量を大きくしなければ計測できる腐食領域の分解能は小さいものになる。これまでの研究で、コイルプローブのインピーダンスの変化量がある特定の周波数で他の周波数と比べて数百倍になることがわかっている。配管は、構造上誘電体として働く空気層を持つため十分に長い場合、コイルと同様な周波数特性を持つ可能性を持っている。そこで、本研究では配管の磁気インピーダンスの周波数特性を計測し、コイルと同様な現象が見られるか検証した。さらに、任意の周波数で表面欠陥同定試験を行い、配管の周波数特性を利用することによって、欠陥の探索感度を向上させることが可能か調べた。

3. 研究の方法

(1) 2次元電磁石の開発等試験装置の開発

まず、開発した電磁石内部で均一な磁場が生じているか、また磁場の漏れの程度を調べるために、図1に示すように電磁石内に座標軸を設定し、x-z平面とy-z平面において磁場を測定した。磁場の測定は、図2に示すようにxyzステージ(中央精機(株), LT-214-1)にホール素子プローブを固定し、ガウスメータ(東陽テクニカ(株), 421型ハイコストパフォーマンスガウスメータ)を用いて行った。また、回転磁場性能を調べるために、2次元ホール素子センサを作成し、回転磁場を励磁しながら、電磁石中央におけるx, y方向の磁場を計測した。

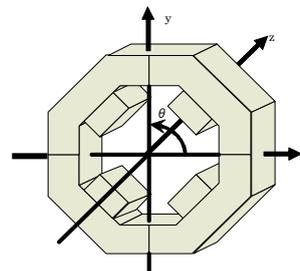


図1 磁場測定における座標系の定義

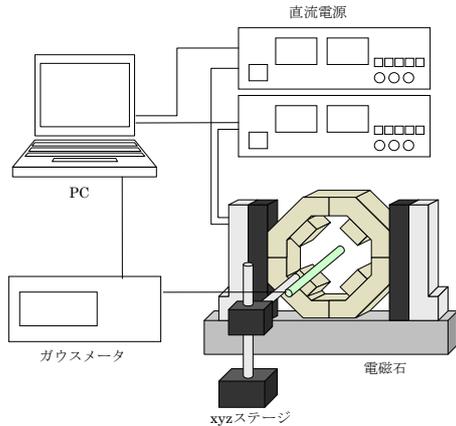


図2 電磁石性能試験装置概要

(2) 試験方法（分解能向上技術）の検討

① 試験片

試験片は、配管用炭素鋼管 SGP を用い、大きさは径が 10A (外径 17.3mm, 内径 12.7mm), 長さ 500mm を用いた。表面欠陥として、図 3 に示すように試験片表面に、直径 10mm, 長さ 50mm, 深さ 1mm のフライス加工によって未貫通孔加工を施した。

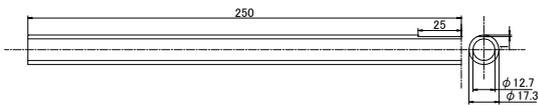


図3 試験片形状および寸法

② 計測方法

本来、回転磁場の励磁は二次元電磁石で行うべきだが、今回新たに開発した配管用 2D 電磁石は、磁極間の磁場均一性には優れるが磁気インピーダンス計測用としては十分な性能を保持していなかった。そこで、図 4 に示すように 1D 電磁石の磁極間に配管を挟み込んだ上で、配管の両端を固定し、電極を取り付け磁気インピーダンスの計測を行った。インピーダンスの計測は、LCR ハイテスタ ((株) 日置電機製, 3535) を用い、2 端子法によって計測した

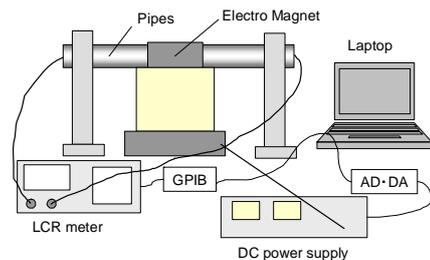


図4 磁気インピーダンス計測システム概要

磁気インピーダンスの周波数特性は、5MHz から 5MHz ずつ 120MHz まで測定周波数を変化させて、それぞれの周波数において磁場を励磁してインピーダンス波形を測定した。回転磁場を模擬した実験では、図 5 に示すように欠陥を上に向けた状態から反時計周りに配管を 45° ずつ回転させて磁気インピーダンスを測定し、欠陥位置と磁場励磁方向に関連性があるか調べた。欠陥同定試験では、二本試験片を用意し、再現性の確認も行った。

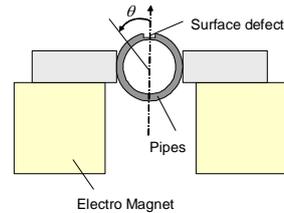


図5 配管の回転方向の定義

4. 研究成果

(1) 2次元電磁石の性能試験

図 6 に x-z 平面における y 方向磁場測定結果を示す。磁極は z = -29mm のところからテーパが施されているため、z = -30mm のときは 20% 程度他の距離と比べて減少しているが、これは想定どおりの結果であり 3 次元的な磁場漏れが低減できているといえる。開発した電磁石は、管径 10A (外径 17.3mm) の配管の励磁用として設計されており、管径範囲の x 方向 ±8mm 以内では磁場の大きさが最大と最小で 8% 程度の差になっており比較的均一な磁場が形成できている。図 7 に示す yz 平面における x 方向磁場分布も同様な傾向を示しており、開発した電磁石は磁場分布に関しては十分な性能を有しているといえる。また、印加電流 2A 時の電磁石中心部における最大磁場は約 100kA/m の大きさが計測され、ほぼ設計どおりの性能を持つことが分かった。次に回転磁場の精度を確かめるために、電磁石中心部で 2 次元磁場を計測した結果を図 8 に示す。回転磁場の精度は、図 8 の円の半径が均一であるほど良く、今回の測定では最大 3% の誤差が生じていた。この誤差は、機器の計測誤差を考慮すると十分な精度であり、回転磁場発生装置としても今回開発した電磁石は十分な性能を有していることが分かった。

今回開発した電磁石は、磁場分布等については十分な性能を有していることがわかった。しかし、実際に配管の磁気インピーダンス計測を行ったところ、インピーダンスが変化せず磁化器として用いることができなかつた。この原因については、現在調査中であり電磁石の形状等を含め今後検討が必要である。

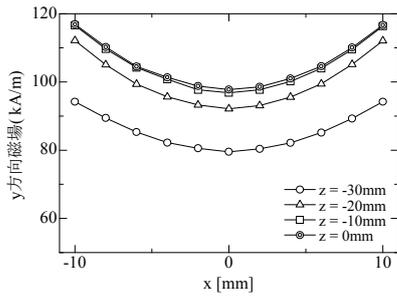


図6 xz平面 ($z = -30\text{mm} \sim 0\text{mm}$ 領域) における y 方向磁場分布

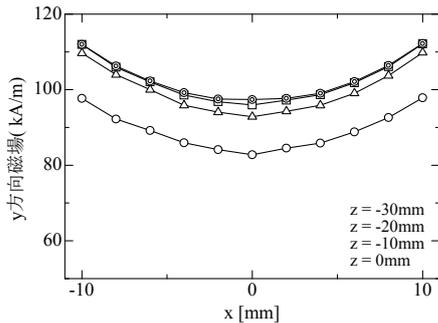


図7 yz平面 ($z = -30\text{mm} \sim 0\text{mm}$ 領域) における x 方向磁場分布

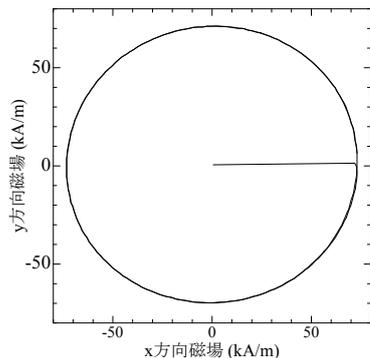


図8 電磁石中心部の2次元磁場形状

(2) 試験方法 (分解能向上技術) の検討

① 磁気インピーダンスの周波数特性

Fig.4 に欠陥を設けていない配管について、周波数を変えながらインピーダンスと位相角を測定した結果を示す。インピーダンスは、30 および 95MHz において最大値を示し、上に凸の波形を示しているが、位相角は 25MHz、50MHz と 80MHz で 0 を示しており共振周波数であることがわかる。

次に、5MHz から 5MHz ずつ 120MHz まで測定周波数を変化させて、計測した磁気インピーダンス波形より得た電流 2A 時の最大インピーダンス値と周波数の関係について Fig.5 に示す。参考のため無磁場での周波数と

インピーダンスの関係についても併せて示す。インピーダンス変化量は、30 と 95MHz 付近の 35MHz と 100MHz で最大となっているが、共振周波数とおぼしき、25MHz、50MHz と 80MHz ではほぼ 0 になっている。このことから、共振点ではなく、上に凸のピークを示す周波数付近にインピーダンス変化量が最大になる周波数が存在するといえる。

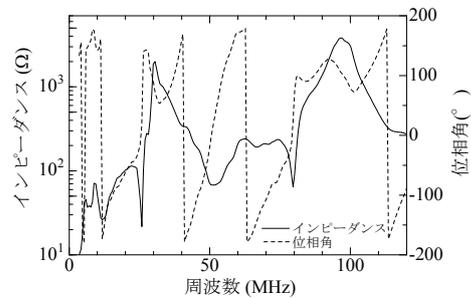


Fig.4 配管の交流インピーダンスと位相角の周波数特性

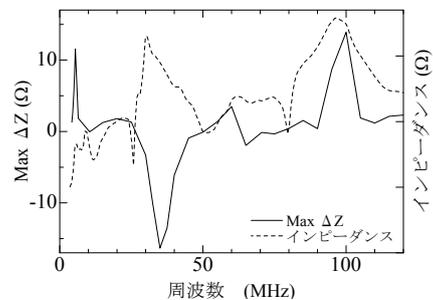


Fig.5 配管の磁気インピーダンスと無磁場時のインピーダンスの周波数特性

② 欠陥位置同定試験

Fig.5 の結果から、35MHz において欠陥の存在によるインピーダンス変化量も最大になることが期待されることから、比較的きれいな波形が得やすい 5MHz と 35MHz において欠陥位置を変化させながら、インピーダンス変化量を測定した結果を Fig.6 に示す。 $\Delta Z(0^\circ)$ は、 0° のときの最大インピーダンス変化量に対する各角度での最大インピーダンス変化量との差を表している。100MHz で試験しないのは、60MHz 以上の周波数では、インピーダンス波形の再現性が低いためである。5MHz および 35MHz とともに肉厚が最も薄い方向と励磁方向が一致する 90° と 270° のとき最も変化割合が大きくなっている。しかし、5MHz のときインピーダンスが減少するのに対して、35MHz は逆に増加しており、周波数によって欠陥がインピーダンス変化に及ぼす影響が変化している。以前の研究から、板厚が減少すると同じ磁場量でも磁性体積が小さくなることから磁化が増加しインピーダンス変化量も増加することが確かめられ

ている。しかし、今回の結果では、逆に減少する傾向が見られることから、今後配管の回路モデルを検討し、透磁率つまりインダクタンスの変化がインピーダンスにどのように影響を及ぼすか調査する必要がある。周波数による変化量の大きさを比較すると、35MHzが最大約2.5Ω変化するのに対して、5MHzでは約1.5Ωとなり、35MHzで変化量が大きくなっている。つまり、磁気インピーダンス変化量が最大となる周波数において、欠陥によるインピーダンス変化量も最大となるといえる。

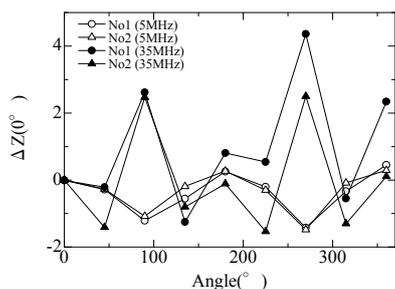


Fig.6 欠陥初期位置に対する各角度のインピーダンス差

(3) 今後の展望

(1) の結果から、今回製作した二次元電磁石は磁場発生装置としては満足できる性能を有していたが、配管を磁化する装置としては十分ではなかった。この点については、今後原因の究明を行うとともに電磁石の改良が必要である。しかし、(2) の結果から配管の交流電流インピーダンスが共振周波数を持ち、コイルと同じ周波数特性を持つことが見出された。そして、磁気インピーダンス変化量の大きい周波数を用いると、欠陥位置を同定しやすくなることが確認できた。よって、今後は2次元電磁石を改良した上で、より長い配管を用いて実験を行い、実機レベルで適用可能な技術であるか検討していく必要がある。

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0件)

[学会発表] (計1件)

①藤田洋平, 木下勝之, 上西 研, 回転磁場励磁インピーダンス計測による配管の表面欠陥の計測, 第22回「電磁力関連のダイナミクス(SEAD)」シンポジウム, 2010年5月20日, 門司

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木下 勝之 (KINOSHITA KATSUYUKI)

山口大学・大学院理工学研究科・講師

研究者番号: 80325240

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし