

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05007

研究課題名(和文) 直流バイアス矩形波磁界を使用した熱交換器伝熱強磁性体鋼管の欠陥検査法の提案

研究課題名(英文) Proposal of Defect Inspection Method for Ferromagnetic Steel Pipe in Heat Exchanger Using DC Bias Square Wave Magnetic Field

研究代表者

後藤 雄治 (GOTOH, Yuji)

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：00373184

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：強磁性鋼管は、発電所や石油プラントの熱交換器の伝熱管に使用される。強磁性鋼管の外側欠陥は、支持鋼板(バッフル)との摩擦によって発生する。本研究では、強磁性鋼管の外側欠陥を検出するために、強磁性鋼管に挿入するタイプの、直流バイアスと矩形波交流磁界を併用した電磁気センサープローブによる探傷法を提案した。強磁性鋼管の磁束密度と渦電流は、プレイヒステロンモデル法(プレイモデル法)を使用したマイナーループ磁化曲線を考慮した3次元非線形電磁界解析法によって解析される。本提案手法は検証実験との比較も行い、有用性が示される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、熱交換器内の伝熱強磁性体鋼管の検査に電磁気現象を利用したものとして、大きな直流磁界と微小交流磁界を併用した直流磁化渦電流探傷試験法が存在する。しかし、この手法は2種類の励磁コイルが必要となるため、別々の電源を必要とする。一方、本提案手法は、1個の電源のみで探傷が可能となる新しい検査法である。この手法は、より小型で安価な装置構成が実現できる利点を有している。特に励磁コイルは1個で済むため、電磁気センサー内の励磁コイルの体積を節約し、検出コイルの巻数を増やすことができ、探傷感度を高めることができる。それゆえ、多管式熱交換器鋼管のスタンダードな検査手法として全国に普及・定着できると思われる。

研究成果の概要(英文)：The ferromagnetic steel tubes are used for heat transfer tubes of heat exchangers in power plants or oil plants. The outside defect in the ferromagnetic steel tube is generated by friction with the supporting steel plate (baffle). In this research, in order to detect the outside defect in the ferromagnetic steel tubes, the electromagnetic inspection sensor probe of the type inserted in the ferromagnetic steel tubes using a square wave alternating magnetic field with DC bias is proposed. The flux density and eddy current in the ferromagnetic steel tubes is estimated by the 3-D nonlinear FEM taking account of the minor loop curve using the play hysteresis model method. The usefulness of this proposed inspection method is shown also in comparison with experimental verification.

研究分野：計測工学

キーワード：電磁非破壊検査 渦電流探傷試験 マイナーループ磁気特性 強磁性体鋼管

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

発電所や石油化学プラントなどの多管式熱交換器伝熱管には主にオーステナイト系ステンレス鋼管(以下、非磁性管と称す)と炭素鋼鋼管(以下、強磁性管と称す)が使用されている。現在、非磁性管の保守検査の手法としては、センサを管内に挿入して検査を行う渦電流探傷試験(ECT)が適用されている。一方で、強磁性管の検査において ECT を適用した場合、表皮効果の影響により外面側の欠陥検出が難化すること、強磁性材が有する磁気特性の不均一性が原因で、磁気ノイズが生じて欠陥検出の妨げになること等の課題がある。近年、このような強磁性管検査の課題を克服するために、主に ECT に直流磁化を併用させた電磁気検査手法が注目されている。この手法は永久磁石もしくは電磁石により管を内部から磁化させ、磁気特性の不均一性を低減させる手法である。一方で、その電磁界現象は明確にされていない。

2. 研究の目的

本研究では電磁界現象の解明を目的とし、電磁気センサに直流バイアス矩形波交流磁界を印加し、強磁性管の外面欠陥を検出する手法を基礎研究として提案した。提案検査手法の電磁界現象は、強磁性管のマイナーループ磁化特性を考慮した3次元非線形有限要素法(FEM)により検討した。マイナーループを考慮した解析を行うためには、鋼管のヒステリシス特性をモデル化することが必要となる。ヒステリシス特性をモデル化する方法として、プライザツハモデル法、プレイモデル法、ストップモデル法などが提案されているが、本解析では、ヒステリシス特性の計算の記述が簡単なプレイモデル法を採用した。また、本提案検査手法の有用性を実験的に検証した。

3. 研究の方法

(1) 検査モデル

図1に提案電磁気センサの1/4領域の寸法図と円周方向に外面欠陥を施した検査鋼管(STB340-SC材)を示す。この電磁気センサは、直列に接続された2つの励磁コイル、1対の差動型検出コイル及び磁気ヨーク材(パーメンジュール材)から構成されている。励磁コイルの巻き数は220ターン×2、差動検出コイルの巻き数は100ターン×2である。この検査鋼管の寸法は外径φ19mm、肉厚2mm、長さ460mmである。外面欠陥の幅(z方向)は10mm、深さ(x方向)は0.5mmである。また、電磁気センサと検査鋼管との距離(リフトオフ:L<sub>0</sub>)は1mmとなっている。図2に直流バイアス電流をかけた矩形波交流電流の励磁電流波形を示す。直流バイアス電流値は0.8A、矩形波交流電流の振幅は0.1A、励磁周波数は500Hzである。

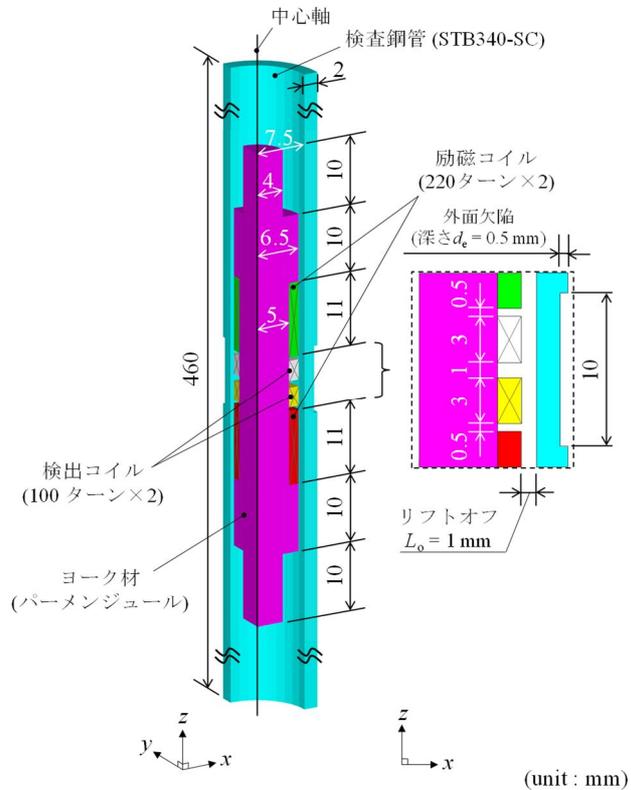


図1 1/4 解析モデル

(2) プレイヒステロンによるモデル化

スカラプレイヒステロンモデルは、 $H$  と  $B$  のヒステリシス関係は次式で与えられる。

$$B(H) = \sum_{n=1}^{N_p} f_n(p_n(H)) \quad (1 \leq n \leq N_p)$$

ここで、 $N_p$  はプレイヒステロン数、 $p_n$  はプレイヒステロン、 $f_n$  は形状関数である。プレイヒステロン  $p_n$  は次式で与えられる。

$$p_n(H) = \max(\min(p_n^0, H + \zeta_n), H - \zeta_n) \quad (1 \leq n \leq N_p)$$

ここで  $p_n^0$  は直前の時点における  $p_n$  の値、 $\zeta_n$  はヒステロンの幅である。 $\zeta_n$  は次式で計算される。

$$\zeta_n = (n - 1) \frac{H_s}{N_p} \quad (1 \leq n \leq N_p)$$

ここで、 $H_s$  は飽和磁界である。式(1)~(3)で記述されるプレイヒステロンモデルは、ヒステリシス特性を表現することができる。プレイヒステロン  $p_n$  の動きを図3に示す。

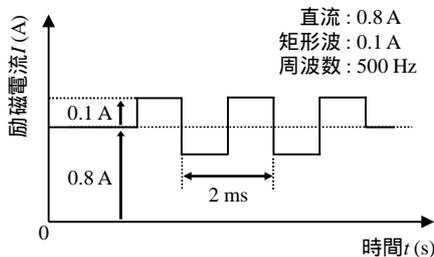


図2 励磁電流波形

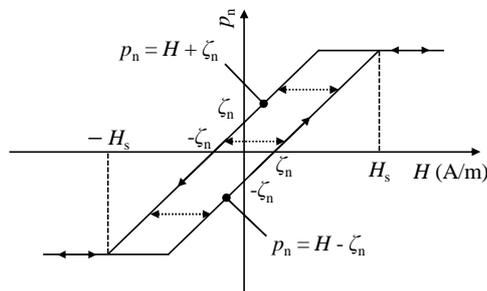


図3 プレイヒステロンの動き

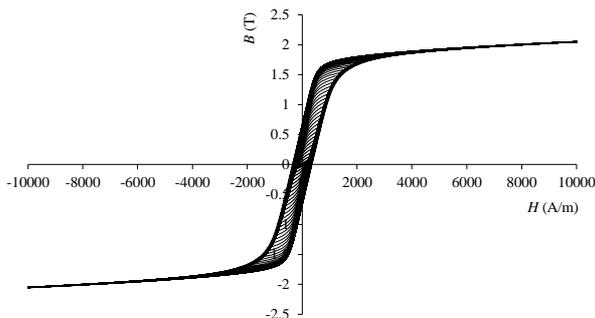


図4 検査鋼管(STB340-SC 材)のヒステリシス磁化曲線

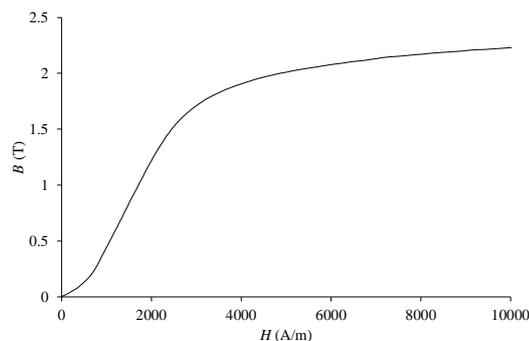


図5 ヨーク材(パーメンジュール)の初磁化曲線

### (3) プレイモデルを用いたマイナーループを考慮した解析手法

この検査方法は、直流バイアス矩形波電流による交流磁界を検査鋼管に印加するので、マイナーループ磁化特性を考慮した三次元非線形 FEM 解析により鋼管内の磁束密度及び渦電流を計算する。図4は、プレイモデルで使用した検査鋼管(STB340-SC)のヒステリシス磁化曲線の実測値である。ヒステリシス曲線は80本で、各ループの最大磁束密度の間隔は0.07 Tである。また、FEM 解析を容易にするため、ヨーク材(パーメンジュール)の磁気特性には初磁化曲線を使用した。FEM の step-by-step 法では、励磁周波数が 500Hz のとき、時間間隔  $\Delta t$  を  $6.25 \times 10^{-5}$  s とした。定常状態を得るために、9.0 周期(=288 ステップ)分の計算を行った。本解析(A- $\phi$ 法)の基本方程式は次式で与えられる。

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 - \sigma \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad} \phi \right)$$

$$\text{div} \left\{ -\sigma \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad} \phi \right) \right\} = 0$$

ここで、 $\mathbf{A}$  は磁気ベクトルポテンシャルであり、 $\phi$  はスカラーポテンシャル、 $\nu$  は磁気抵抗率、 $\mathbf{J}_0$  は渦電流密度、 $\sigma$  は導電率である。磁気特性の非線形反復計算にはニュートン・ラフソン(N-R)法を用いた。

## 4. 研究成果

### (1) 外面欠陥検査の解析結果

図6(a)に解析結果による磁束ベクトル分布の表示領域を示す。図6(b)に検査鋼管に欠陥が無い場合における、直流バイアス矩形波交流磁界を印加したときの磁束ベクトル分布を示す。この図から検査鋼管の内表面側の磁束密度( $B=0.18$  T)が外表面側( $B=0.79$  T)に比べ小さくなっていることが分かる。また図6(c)と(d)に、図6(b)における磁束ベクトル分布の直流磁束成分のみと交流磁束成分(反抗磁界)のみの分布をそれぞれ示す。なお交流磁束成分の分布は直流バイアス矩形波における磁束分布から直流磁束成分の分布を引き算して求めた。図6(c)から、直流磁束成分は検査鋼管の肉厚全体に様に分布しており、直流磁束成分が検査鋼管外側まで十分に浸透していることが分かる。次に、図6(d)から、検査鋼管の内表面側の交流磁束密度( $B=-0.65$  T)が外表面側( $B=-0.04$  T)に比べマイナス側に大きくなっていることが分かる。このことから、交流磁束成分は表皮効果により検査鋼管の内表面に集中していることが分かる。そのため、図6(b)に示すように、検査鋼管内に直流バイアス矩形波交流磁界を印加したときに、検査鋼管内表面側では矩形波交流磁界の反抗磁束による渦電流の発生が影響し、検査鋼管の内表面領域の磁束量が減少していると考えられる。図7は検査鋼管に外面欠陥が有る場合の解析結果を示している。図7(a)に解析結果による磁束ベクトル分布の表示領域を示す。

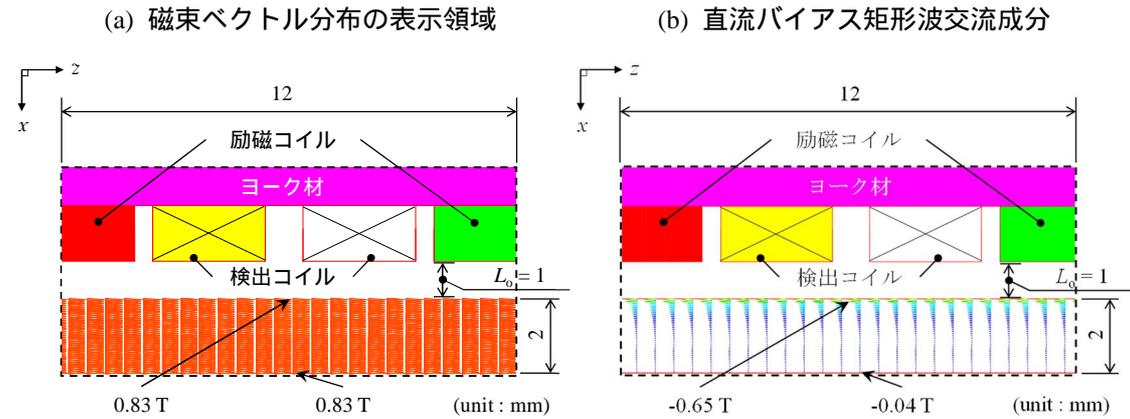
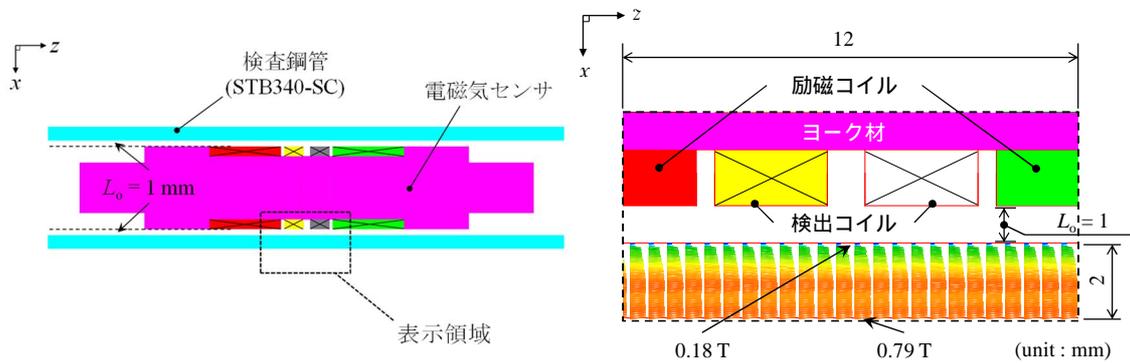


図6 欠陥が無い場合における磁束ベクトル分布

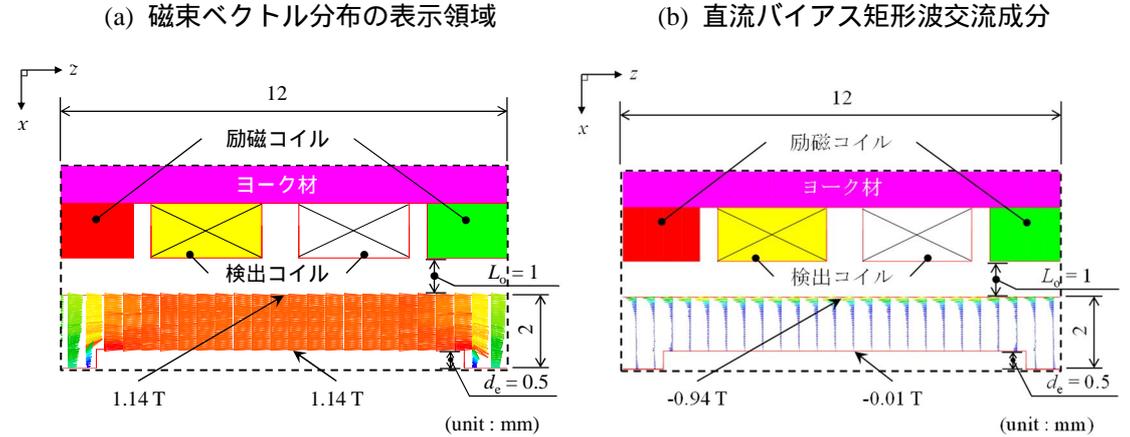
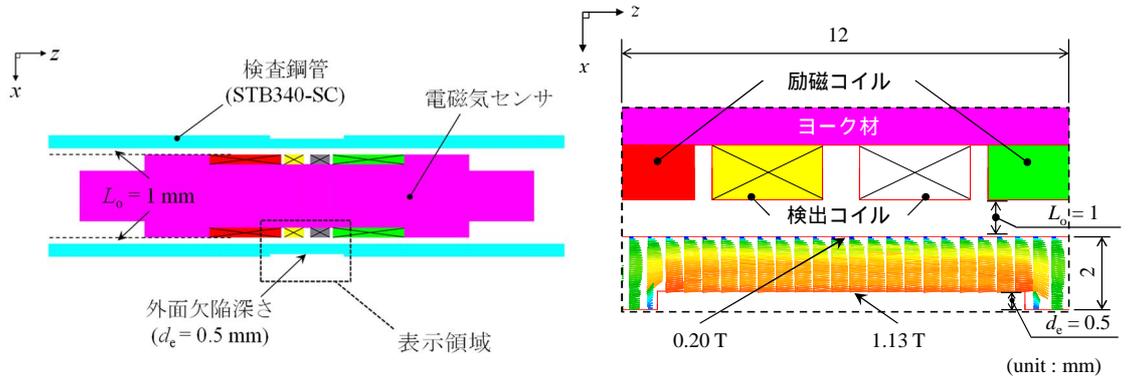


図7 外面欠陥がある場合における磁束ベクトル分布

図7(b)に直流バイアス矩形波交流磁界を印加したときの磁束ベクトル分布を示す。また図7(c)と(d)に、図7(b)における磁束ベクトル分布の直流磁束成分のみと交流磁束成分(反抗磁界)のみの分布をそれぞれ示す。図6と図7の各磁束成分で検査鋼管の外表面と内表面の磁束密度を比較

すると、どの成分においても外面欠陥の磁束密度が大きくなっていることが分かる。これは外面欠陥による鋼管肉厚体積が減少し、磁束が欠陥部を迂回したため、磁束密度が大きくなったと考える。以上の結果から、検査鋼管に外面欠陥がある場合、直流磁束は欠陥部の肉厚全体にわたり、健全部に比べて大きくなり、外面欠陥まで浸透していない鋼管内表面の交流磁束に影響し、欠陥有無の信号差を捉えることができる。従って、直流バイアス矩形波交流磁界により、鋼管の外面欠陥の検査が可能であることが分かった。

## (2) 検証実験

ここでは、解析結果で得られた差動型検出コイル内の出力電圧を実験で得られた出力電圧と比較する。検証実験モデルおよび検査条件は、解析と同条件である。外面欠陥の中心を  $z=0$  mm とし、提案電磁気センサをリフトオフ  $L_0=1$  mm に保ちながら、 $z$  方向に 33 mm から -33 mm まで 3 mm ステップで移動させる。そして各移動位置で 2 つの検出コイルの差動出力電圧を測定した。図 8 に実験とプレイモデル法による非線形電磁界解析による外面欠陥の検出信号を示す。また、直流バイアス電流 0.8 A を印加していない場合の実験結果も併せて示す。縦軸に電磁気センサの差動型検出コイルによる出力電圧を示し、横軸にセンサの移動位置を示す。この結果から、差動信号が外面欠陥の両側で変化しており、外面欠陥を検出できることが分かる。また差動型検出コイルの出力電圧について、プレイモデル法を用いた解析結果が実験結果と一致していることが分かる。さらに、直流バイアス電流を印加していない矩形波交流磁界のみを用いた場合は、外面欠陥を検出できないことも分かる。従って鋼管の外面欠陥を検出するために、直流磁界が必要であることが分かる。図 9 に検査鋼管の初磁化曲線のみを考慮した解析と、プレイモデル法による鋼管のマイナーループを考慮した解析を比較した結果を示す。縦軸に電磁気センサの差動型検出コイルによる出力電圧を示し、横軸にセンサの移動位置を示す。この結果から、マイナーループを考慮した解析による差動検出信号は、初磁化曲線を考慮した解析による差動検出信号よりも大きく、実験値とも一致していることが分かる。このことから、初磁化曲線のみを考慮した解析よりも、プレイモデル法によるマイナーループを考慮した解析の方が有用であることが示された。

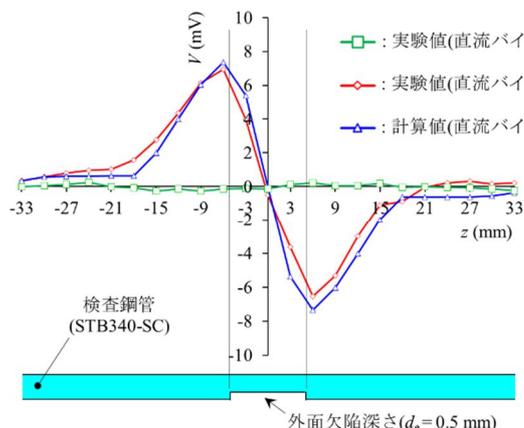


図 8 外面欠陥の検査結果

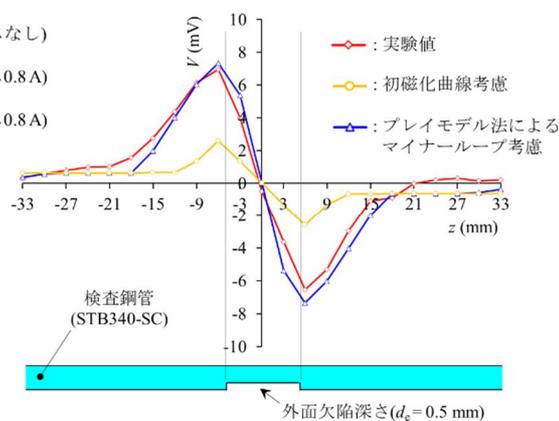


図 9 各解析手法比較結果

## (3) まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめて示す。

マイナーループ磁化曲線を考慮した 3 次元非線形電磁界解析を使用して、本提案検査手法の現象解明を行った。直流バイアス矩形波交流磁界が検査鋼管に伝わると、鋼管の内側では矩形波交流磁界による表皮効果の影響で交流磁束分布は、鋼管の内表面に集中し外側には浸透していないことが確認された。一方で直流バイアス磁界による直流磁束成分は鋼管の肉厚全体に均一に分布していることが分かった。そして、鋼管に外面欠陥があると直流磁束は欠陥を迂回して欠陥近傍の磁束密度が上昇する。この直流磁束密度の上昇変化が鋼管の内表面側に集中する矩形波交流磁界に伝わり、交流磁束密度も上昇した。従って、欠陥有無の交流信号変化を提案電磁気センサの検出コイルによって捉えていることが分かった。

外面欠陥の検出において解析と実験を比較した結果、鋼管の欠陥検出信号の振幅が実験結果と解析結果でおおよそ一致し、プレイモデル法によってマイナーループ磁化曲線を考慮した電磁界解析の有用性が認められた。また、両結果ともに外面欠陥の端部で検出信号が最も大きく変化していることが確認された。これは検出コイルが差動型であり、片側の検出コイルが鋼管健全部の信号を捉え、もう一方の検出コイルが欠陥部の信号を捉えたことで最も信号差が大きくなったためと考えられる。そして、実験では直流バイアス磁界が無ければ外面欠陥を検出できないことも確認され、直流磁界の必要性も示された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 M.Tohara and Y.Gotoh	4. 巻 33
2. 論文標題 Experimental Evaluation of Defect in Ferromagnetic Steel Tube by Electromagnetic Sensor Using Square Wave AC Magnetic Field with DC Bias	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 529-539
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2021.3093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 S.Yoshioka , A.Fujii, M.Tohara, and Y.Gotoh	4. 巻 33
2. 論文標題 Proposed Inspection Method for Opposite-Side Defect in Steel Plate Using Synthetic Magnetic Field with High and Low Excitation Frequencies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 2511-2520
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2021.3380	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 M.Tohara, M.Kuromizu, and Y.Gotoh	4. 巻 33
2. 論文標題 Examination of Inspection Method for Outer-side Defect on Ferromagnetic Steel Tube by Velocity Effect Using Insertion-Type Static Magnetic Field Sensor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 2867-2877
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2021.3463	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 M.Tohara and Y.Gotoh	4. 巻 64
2. 論文標題 Electromagnetic Inspection for Defect of Ferromagnetic Tube Using Rectangular Wave with DC Bias	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 281-288
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 M.Tohara and Y.Gotoh	4. 巻 57
2. 論文標題 Inspection Method of Outer Side Defect in Ferromagnetic Steel Tube by Insertion Type Electromagnetic Sensor Using Square Wave Alternating Magnetic Field with DC Bias	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 Art. No.6200105
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 M.Tohara and Y.Gotoh	4. 巻 33
2. 論文標題 Experimental Evaluation of Defect in Ferromagnetic Steel Tube by Electromagnetic Sensor Using Square Wave AC Magnetic Field with DC Bias	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 529-539
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 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 黒水将史, 東原純, 後藤雄治
2. 発表標題 直流磁界印加による高速移動を考慮した強磁性鋼管検査法の検討
3. 学会等名 日本非破壊検査協会、第1回電磁非破壊検査・数値解析調査研究委員
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒水将史, 東原純, 後藤雄治
2. 発表標題 直流磁界の速度効果を用いた強磁性鋼管の外欠陥検査法について
3. 学会等名 実践教育訓練学会、実践教育研究発表会 全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒水将史, 東原純, 後藤雄治
2. 発表標題 強磁性体鋼管の欠陥検査を目的とした静磁界による速度誘導型ECTの提案
3. 学会等名 計測自動制御学会、センシングフォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M.Tohara and Y.Gotoh
2. 発表標題 Examination of Insertion Type Electromagnetic Inspection for Outer Side Defect on Ferromagnetic Steel Tube by Speed Effect Using Only Static Magnetic Field
3. 学会等名 IEEE International Magnetics Virtual Conference, InterMag (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y.Gotoh
2. 発表標題 Inspection of steel tube using electromagnetic phenomenon
3. 学会等名 2021 high-Level Foreign Expert on electromagnetics application Project, North China Electric Power University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大隣徳彰、東原純、後藤雄治
2. 発表標題 直流バイアス矩形波磁界の速度効果を用いた強磁性体鋼管の欠陥検査法の提案
3. 学会等名 日本非破壊検査協会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 船岳雷太、 望月優希、 後藤雄治
2. 発表標題 直流バイアス矩形波交流磁界を使用した鋼板の裏面に施されたニッケルメッキ厚さ評価
3. 学会等名 日本非破壊検査協会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野鷹、王磊進、後藤雄治
2. 発表標題 全波整流波交流磁界を使用した鋼板裏面欠陥検査法の提案
3. 学会等名 日本非破壊検査協会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 板井和彦、 谷井裕太、 後藤雄治
2. 発表標題 電磁気を使用した埋設部の鋼板板厚評価法の基礎的検討
3. 学会等名 日本非破壊検査協会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 王磊進、 大野鷹、 後藤雄治
2. 発表標題 パルス磁界を用いた鋼板板厚評価の検討
3. 学会等名 計測自動制御学会
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
---------	---------