

機関番号：17501

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20710128

研究課題名（和文） 直流及び交流磁場を併用した原子力発電プラント内の鋼管減肉
モニタリング検査研究課題名（英文） monitoring inspection of steel tube in nuclear power generation plant
using DC and AC magnetic field

研究代表者

後藤 雄治 (GOTOH YUJI)

大分大学・工学部・機械・エネルギーシステム工学科・准教授

研究者番号：00373184

研究成果の概要（和文）：原子力発電所では、炉心内の1次冷却系配管や、炉心付近の構造物に関して入念な検査が実施されている。しかし炉心から離れた2次系の鋼管は、放射線が含まれない部分であるため、長期間に渡る詳細検査の頻度は必ずしも多くはない。そこで運転を止めず、安価で常時検査が可能となる状態監視検査技術の構築が望まれる。本研究では、直流磁場と微小交流磁場を併用することにより、短時間で鋼管の裏面減肉検査が実施できる電磁気検査法の研究開発を行った。

研究成果の概要（英文）：In the nuclear power plant, the careful inspection is carried out about primary cooling system tubes in the reactor core, and the structure near the reactor core. However, as for the steel tubes of the secondary system that does not contain a radioactive material, inspection is made scanty. In this research, the monitoring inspection method for the opposite side defect of steel tubes in the secondary system is examined using the DC and AC magnetic field.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：電磁非破壊検査

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、社会システム工学・安全システム

キーワード：マイナーループ、鋼管減肉検査、原子力プラント、直流及び交流磁界、非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

原子力発電プラントには、2次冷却系配管等において、磁性を有する鋼管が使用されている。これらの鋼管は、使用年月が経つに連れて様々な腐食が生じるため、定期検査が実施されている。原子力発電所等では、炉心内の1次冷却系配管や、炉心付近の構造物に関しては入念な検査が実施されているものの、炉心から離れた2次冷却系配管や構造物においては、検査が手薄になる事例も少なからずある。特に2次系の鋼管検査では一般的に

超音波等を使用した大掛かりな検査となるため、検査時間や労力がかかり、頻繁には行えない。そこで安全性を保つためにも安価で、運転を止めずに、常時検査が可能となる状態監視検査技術が必要となる。

近年、直流磁場と微小交流磁場を併用することにより、短時間で鋼板の裏面減肉検査が実施できる電磁気検査法の研究開発が行われている。この検査技術は装置構成もシンプルであり、扱いやすい手法であるものの、検査原理が不明瞭なため、原子力発電プラント

への適用はされてこなかった。従って、この現象が解明されれば、原子力発電プラントへの適用も可能となり、さらなる開発も広がるものと考えられる。この現象を解明するには、検査鋼材のマイナーループを考慮した解析が必要となり、複雑な計算アルゴリズムを有する事が、この検査技術の発展を遅らせている要因の一つと考えられる。

2. 研究の目的

電磁現象を利用した鋼管裏面欠陥の非破壊検査手法の一つに直流磁化渦電流探傷試験法がある。この手法は、大きな直流磁場で鋼管表面より印加させ、鋼管肉厚内の透磁率の値を変化させた上で交流磁界を印加させ、交流磁界の変化で裏面欠陥の評価を行うものである。この現象を解明するには、検査鋼材のマイナーループ磁気特性を考慮した解析が必要となる。そこで本研究では、有限要素法によるマイナーループを考慮する三次元磁界解析法の開発を行い、この検査手法の現象解明や最適な検査条件を検討し、原子力発電所内の2次系鋼管の減肉検査に適用し、運転を止めずに状態監視を行う検査手法の検討を目的とした。

3. 研究の方法

(1) マイナーループを考慮する三次元交流非線形電磁界解析手法の開発

原子力発電所内の鋼管に、ある一定の直流磁界を加えた上に微小交流磁界を重ねた場合、鋼管内の磁気特性はマイナーループとなり、変分透磁率を考慮する必要がある。そのため、この検査手法の現象解明を行うには、マイナーループを考慮した非線形磁界解析を行わなくてはならない。そこでここでは、実測で求めた検査鋼管のヒステリシス曲線を用いてマイナーループを求める非線形磁界解析法の開発を行う。解析手法の開発には六面体辺要素によるステップ・バイ・ステップ法を用いた三次元有限要素法の電磁界解析を使用する。本解析では図1に示す、実測によって得られた鋼材(SS400)の複数のメジャーロープを予めコンピュータにデータとして蓄積しておく。マイナーループの始めの上側曲線は、メジャーロープを線形補間することで求め、マイナーループの下側曲線はその上側曲線を折り返して求める。さらに次のマイナーループの上側曲線はその下側曲線を折り返し、この操作を延々と繰り返してマイナーループを作製し、ニュートン・ラフソン法(以下、NR法と呼ぶ)により非線形反復計算を行う。具体的な計算手順は以下のように行う。

①メジャーロープによる線形補間

時間ステップ1回目の計算は初期磁化曲線を利用し、次の時間ステップで得られた磁

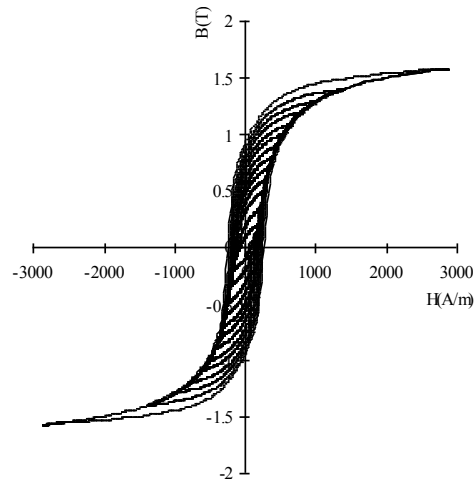


図1 試験鋼材のヒステリシス曲線 (SS400)

束密度 B が1ステップ目より大きければ、引き続き初期磁化曲線を使用する。1ステップ目より次のステップの B が小さければ初期磁化曲線を離れ、図1に示す複数のメジャーロープを使用して、線形補間により得られるマイナーループの上側曲線へと移動する。

②マイナーループの下側曲線

ある k 回目の時間ステップで求めた B_k が、 $B_k > B_{k-1}$ となった場合、図2に示す様に $k-1$ 回目の b_1 点を最小値 ($H_{\min 1}, B_{\min 1}$) として記憶し、最大値の a_1 点と最小値の b_1 点で中間値 e_1 点の外部磁場 H_{e1} と磁束密度 B_{e1} を次式で求める。

$$H_{e1} = (H_{\max 1} + H_{\min 1}) \times 0.5 \dots \dots \dots (1)$$

$$B_{e1} = (B_{\max 1} + B_{\min 1}) \times 0.5 \dots \dots \dots (2)$$

マイナーループの上側曲線と下側曲線は中間点 e_1 に対して点対称であると仮定し、 k 回目の B_k に見合うマイナーループの下側曲線上の H_k を求める手順は以下になる。

(a) 中間点 e_1 に対して B_k の点対称となる上側曲線上の B_f を次式を使用して求める。

$$B_f = B_k + 2(B_{e1} - B_k) = B_k - 2(B_k - B_{e1}) \dots \dots \dots (3)$$

(b) 線形補間を使用してマイナーループの上側曲線上の B_f に対する H_f を求める。

(c) 求めたいマイナーループの下側曲線上の H_k は、中間点 e_1 を基準とした H_f の点対称の値であるとして求める事ができる。そこで H_f に対して点対称な下側曲線上の H_k を次式を使用して求める。

$$H_k = H_f + 2(H_{e1} - H_f) = H_f - 2(H_f - H_{e1}) \dots \dots \dots (4)$$

ある k 回目の時間ステップの B_k と一つ前の時間ステップの B_{k-1} の間に、 $B_k > B_{k-1}$ の関係が続く場合、上述の(a)~(c)を繰り返してマイナーループの下側曲線上の H_k を求めていく。

なお、 B_k と最大点 a_1 の $B_{\max 1}$ に $B_k > B_{\max 1}$ の関係が出現した場合は、初期磁化曲線を使用して H_k を求め、その後、 $B_k > B_{k-1}$ の関係が続く場合は常に初期磁化曲線を使用する。初期

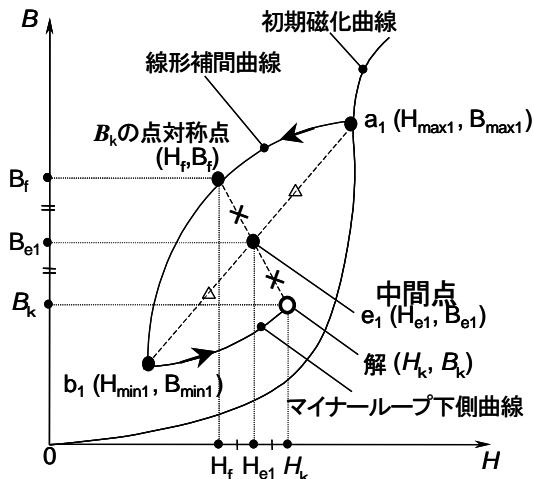


図2 マイナーループの下側曲線の作成法

磁化曲線を使用して単調増加後、 $B_k < B_{k-1}$ となった場合は、①節に戻り、線形補間を使用してマイナーループの上側曲線上の H_k を求める。

③新たなマイナーループの上側曲線

ある k 回目の時間ステップ時の B_k と、一つ前の時間ステップ時の B_{k-1} が $B_k > B_{k-1}$ の場合は上述②節の(a)~(c)を繰り返す。しかし $B_k < B_{k-1}$ となった場合は、図3に示す様に、新たなマイナーループの上側曲線に移動する必要がある。上側曲線上に存在する H_k は次の手順で求める。

(d) $k-1$ 回目の点を、新たな最大点 $a_2 (H_{max2}, B_{max2})$ としてコンピュータに記憶する。

次に、この最大点 a_2 と最小点 $b_1 (H_{min1}, B_{min1})$ の新たな中間点 $e_2 (H_{e2}, B_{e2})$ を(1)および(2)式で求める。

(e) 新たな中間点 e_2 を使用して、 B_k に対して点対称なマイナーループの下側曲線上の B_{f2} を次式で求める。

$$B_{f2} = B_k + 2(B_{e2} - B_k) = B_k - 2(B_k - B_{e2}) \dots (5)$$

(f) 次に、このマイナーループの下側曲線上の B_{f2} に対して点対称な古いマイナーループの上側曲線上の B_f を、古い中間点 e_1 を使用して次式で求める。

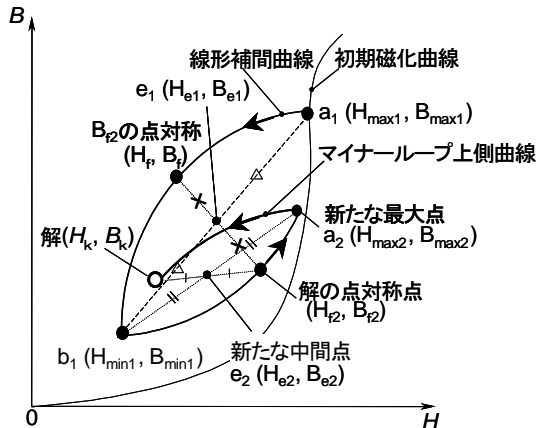


図3 新たなループ上側曲線の作成法

$$B_f = B_{f2} - 2(B_{f2} - B_{e1}) \dots (6)$$

(g) (6) 式で求めた B_f は、予めコンピュータに記憶している実測で求めた複数のメジャーループ上に存在する点である。そこで、この B_f に対する H_f をメジャーループの線形補間によって求める。

(h) 次に、古い中間点 e_1 を使用して、 H_f に対するマイナーループの下側曲線上の H_{f2} を次式を使用して求める。

$$H_{f2} = H_f - 2(H_f - H_{e1}) \dots (7)$$

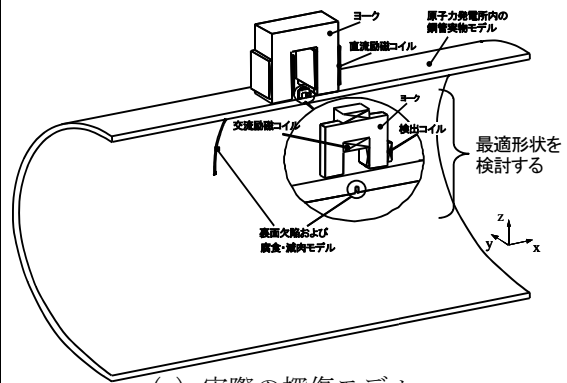
(i) 最終的に求めたい新たなマイナーループの上側曲線上の H_k は、新たな中間点 e_2 を使用して求めた H_{f2} に対して点対称となる。そこで次式を使用して求める事ができる。

$$H_k = H_{f2} - 2(H_{f2} - H_{e2}) \dots (8)$$

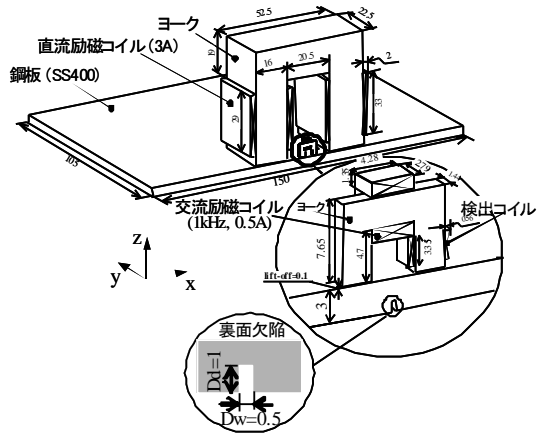
以後、この(d)~(i)の手順を繰り返し、新しいマイナーループの下側曲線や上側曲線を延々と求めていく事が可能となる。

(2) 直流と交流磁界を使用した鋼管裏面欠陥検査モデル

実際の原子力発電所内の2次系鋼管は大型鋼管が多く管径が大きいため(図4(a)参照)、ここでは平板鋼板(SS400)で2次系鋼管を模擬して検討を行った。解析及び実験に使用したモデルを図4(b)に示す。これは直流磁化器で平板鋼材(SS400、厚み3mm)に表面より直流磁界を印加し、さらに鋼板内のx方向に水



(a) 実際の探傷モデル



(b) 鋼板での近似モデル

図4 鋼管裏面欠陥検査モデル

平交流磁場を発生させる微小交流磁化器を、リフトオフ(磁化器と鋼板との距離)0.1mmで配置したモデルである。鋼板の裏面欠陥はx方向の幅(Dw)=0.5mm、z方向の深さ(Dd)=1mm、y方向の長さ(Dl)=100mmの矩形スリット状として検討を行った。直流磁化器及び交流磁化器のヨーク材は珪素鋼板とし、解析では渦電流は流れないものとした。それぞれの磁化器の、ヨーク材の磁気特性は線形とし、直流磁化器のヨーク材は($\mu_{rx}=\mu_{ry}=\mu_{rz}=500$)、交流磁化器のヨーク材は($\mu_{rx}=\mu_{ry}=\mu_{rz}=1500$)と仮定した。解析に用いた鋼材は等方性として取り扱い、磁化特性はx、y、zの3方向とも同じヒステリシス曲線を用いた。磁化条件は直流磁化器には3A、交流磁化器には1kHz、0.5Aとした。解析は一次六面体辺要素を用いたA- ϕ 法で行った。

4. 研究成果

(1) 直流磁界による影響

鋼板に直流磁界を加えた場合の材料内部の磁束密度ベクトル分布を図5に示す。図には、裏面欠陥が存在しない場合と存在する場合の比較を示している。同図(a)から、裏面欠陥が存在しない場合、材料内部には一様に直流の磁束が分布し、鋼板表層の磁束密度は $|B|=1.29T$ である事が分かった。これに対し、

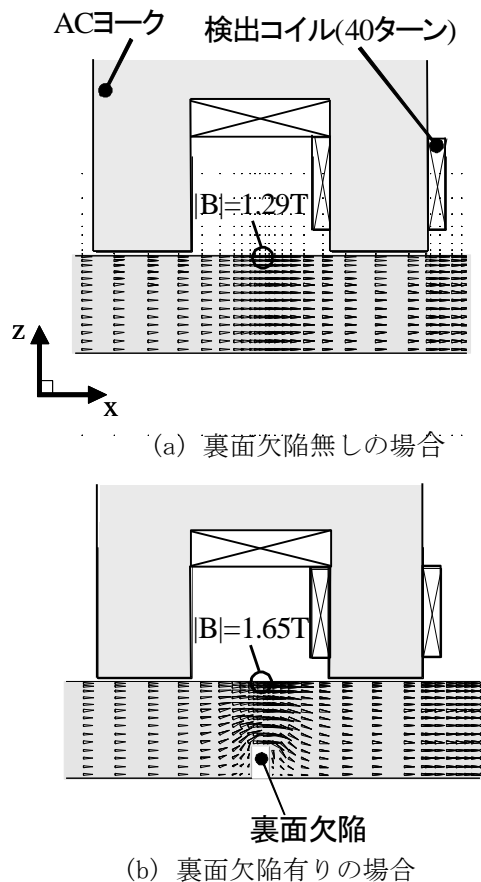


図5 直流磁化における磁束密度分布(DC=3A)

図(b)の裏面欠陥が存在する場合には、鋼材内部の磁束は裏面欠陥を迂回して分布するため、材料表面から裏面欠陥までの間の磁束密度が増加している。裏面欠陥が存在する場合の材料表層の磁束密度は $|B|=1.65T$ まで増加していることが分かった。

(2) マイナーループ

以上の直流磁化条件で、交流磁化器により1kHz、0.5Aの微小交流磁界を加えた場合の材料表層におけるマイナーループの解析結果を図6に示す。図の外部磁場 $H[A/m]$ は、材料中の透磁率より算出した。図から、裏面欠陥が存在する場合と、存在しない場合とでは、マイナーループの形状や初期磁化曲線上におけるマイナーループの発生位置が異なる事が理解できる。裏面欠陥が存在する場合、材料表層の直流磁界における磁束密度が大きいいため、マイナーループも初期磁化曲線上のBが大きい位置で発生し、ループが扁平になる事が分かる。

(3) 交流磁界による影響

検出コイルに得られる裏面欠陥の探傷信号は、微小交流磁化の度合いによって決定される。微小交流磁界によって発生する材料中の渦電流は、図7(a)に示す様に、マイナーループ中の磁束密度Bの最大値と最小値との差で発生する。そこで、この微小交流磁界によって発生する磁束密度分布が、裏面欠陥の有無でどの様に変化するか検討を行った。結果を図7(b)、(c)に示す。図は、微小交流磁界によって発生する等磁束密度の分布をそれぞれ示している。図から裏面欠陥の有無に関係なく交流の磁束は鋼材表層のみに分布し、裏面欠陥部まで浸透していない事が理解できる。また裏面欠陥が存在する場合、裏面欠陥と鋼材表層までの間の磁束密度が低減されている事も合わせて理解できる。これは裏面欠陥が存在するため、直流の磁束密度が鋼板表層に集中して分布し、磁気飽和領域に近づいたため、微小交流磁束が進入できなくなったためだと考えられる。

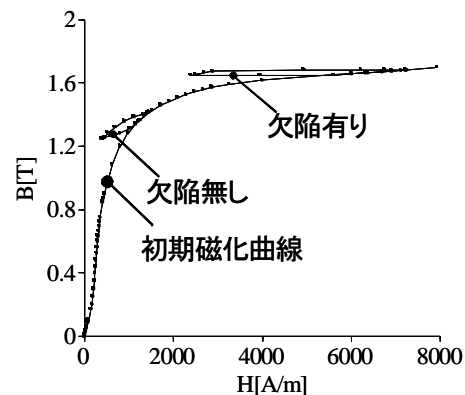


図6 直流磁界と微小交流磁界併用時におけるマイナーループの解析結果(DC=3A、AC=1kHz、0.5A)

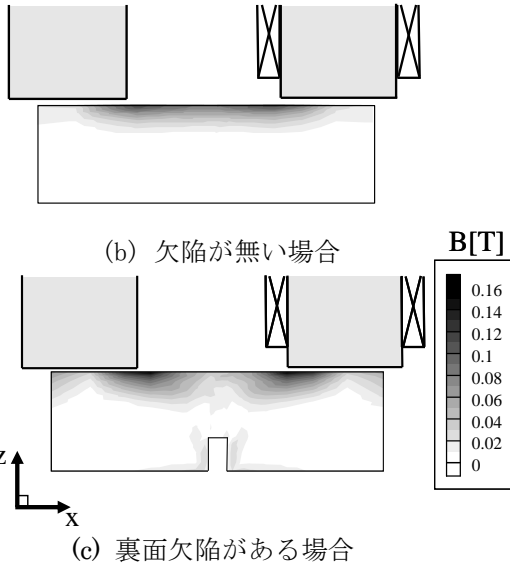
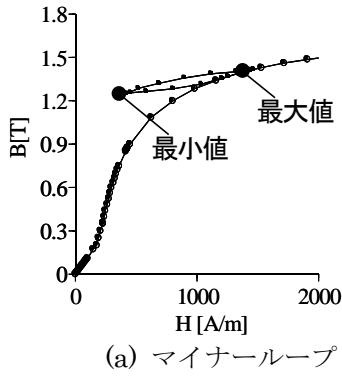


図7 裏面欠陥の有無による交流磁束の等磁束密度分布の変化(DC=3A、AC=1kHz、0.5A)

(4)裏面欠陥の探傷実験および解析結果との比較

リフトオフ 0.1mmを保ったまま、直流及び微小交流磁化器を x 方向に 1mm ピッチで移動させた場合の、検出コイルに得られる磁束密度の測定を行った。探傷結果を図8に示す。図の縦軸は、欠陥部における検出コイル内の、磁束密度の低下の割合 ΔB を示している。図には計算値も合わせて示している。図から、裏面欠陥に近づくにつれて鋼板内の磁束密度が大きくなる結果、交流磁界によるマイナーループの微分透磁率が小さくなるため、検出コイルで得られる交流の磁束密度が減衰する事が分かる。これは、裏面欠陥付近では、微小交流磁化器による交流磁束が少なくなる事を意味している。また計算値は実測値によく一致し、本解析手法の信憑性を裏付ける結果が得られた。

(5)裏面欠陥深さによる影響

裏面欠陥の幅 (Dw) と長さ (Dl) は一定に保ったまま、深さ (Dd) のみを変化させた場合、検出コイルに鎖交する磁束密度の変化について解析を行なった。結果を図9にそれ

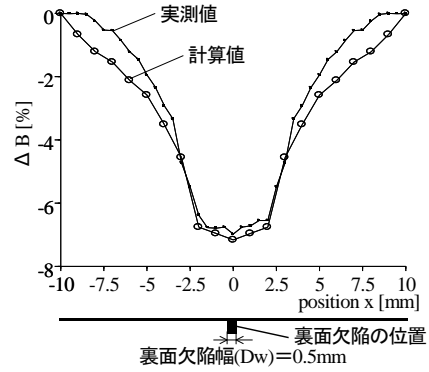
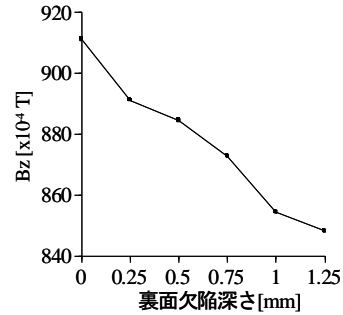
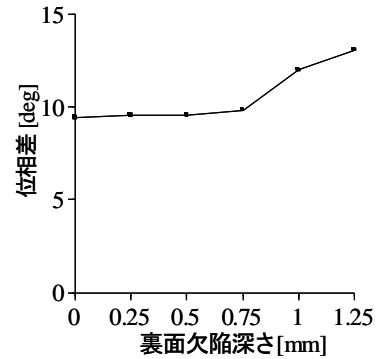


図8 裏面欠陥の探傷結果 (DC=3A, 1kHz, 0.5A)



(a) 検出コイル内に鎖交する磁束密度



(b) 励磁電流波形と磁束密度波形の位相差

図9 欠陥深さ変化が検出コイルの磁束密度に与える影響 (DC=3A, 1kHz, 0.5A)

ぞれ示す。図9(a)は裏面欠陥深さに対する検出コイル内の磁束密度の値の変化を示し、図9(b)は励磁電流波形との位相差を示している。図(a)から、裏面欠陥の深さが深くなるにつれて磁束密度の振幅がほぼ直線的に低下することが分かる。これは欠陥深さが深くなると、鋼材表面から裏面欠陥までの間を通る直流磁束が密になり、磁気飽和に近づき、交流磁化器からの交流磁束の浸入量が減るためだと考えられる。一方、図(b)から、裏面欠陥の深さが増しても、大きな位相差は得られていない事が分かる。本手法の場合、交流磁化器から発生する交流磁束や、それによって生じる渦電流は裏面欠陥に到達する訳では無いため、大きな位相差は生じない事が理解できる。図(b)の位相差は、鋼材表面の直流磁化の大きさによって変化する透磁率の変化を捉

えていると考えられる。

(6)まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- ①裏面欠陥の存在する鋼材に大きな直流磁界を加えると、磁束密度は欠陥を迂回して分布し、裏面欠陥周辺の磁束密度が増加する。それにより、交流磁界を加えた際のマイナーループの微分透磁率が変化する。
- ②本提案検査手法で裏面欠陥を探傷する場合、微小交流磁界で鋼材表層の直流磁化の度合いを測定することになり、裏面欠陥を間接的に測定していることになる。
- ③本提案手法は、電磁現象を利用しているため、超音波探傷に比べて安価な検査装置と成り得る。また原子力発電プラントにおける信頼性・安全性に大きく貢献できる技術である。さらに、この検査手法の現象解明には、直流磁界の上に交流磁界を加えたマイナーループを考慮する非線形磁界解析が必要になったが、三次元形状におけるこの解析手法の実験との比較や解析精度を検討する研究は世界的にも例が少ない。そのため本解析アルゴリズムの使用が多方面の研究分野(医療福祉機器や電気機器等の開発)でも大きく貢献できると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Y.Gotoh, A.Kiya and N.Takahashi,” Electromagnetic Inspection of Outer Side Defect on Steel Tube with Steel Support using 3D Nonlinear FEM Considering Non-Uniform Permeability and Conductivity”, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol.46, no.8, 2010, pp. 3145-3148.
- ②小野田二千翔、徳本貴則、後藤雄治 “静磁界及び微小交流磁界を併用した鋼板肉厚測定法の三次元非線形磁界解析評価”、検査技術、日本工業出版、査読無、vol.15、no.4、2010、pp.18-22.
- ③ Y.Gotoh, K.Sakurai and N.Takahashi,” Electromagnetic inspection method of outer side defect on small and thick steel tube using both ac and dc magnetic fields”, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol.45, no.10, 2009, pp. 4467-4470.
- ④ Y.Gotoh and N.Takahashi,” Evaluation of detecting method with ac and dc excitations of opposite side defect in steel using 3d non-linear FEM taking account of minor loop”, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol.44, no.6, 2008, pp.1622-1625.
- ⑤ N.Takahashi and Y.Gotoh,” 3D Nonlinear Finite Element Analysis of Electromagnetic Inspection of Defects in Steel”,

Electromagnetic Nondestructive Evaluation, IOS Press, 査読有, vol.11, 2008, pp.26-33

[学会発表] (計 9 件)

- ①田中秀和、後藤雄治、高橋則雄 “直交流磁界を利用した鋼板裏面のニッケルめっき厚さ検査手法”、日本非破壊検査協会、九州支部研究発表会、pp.17-21、2010
- ②陣内北斗、桜井健太、後藤雄治、高橋則雄 “直流及び交流磁界の合成磁界を使用した内挿プローブによる厚肉伝熱鋼管の減肉検査法(線形補間を使用したマイナーループを考慮する三次元交流非線形渦電流解析と実験による評価)”、第 22 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、pp.432-437、2010
- ③陣内北斗、後藤雄治、桜井健太、諸藤雄太郎、高橋則雄 “直交流併用型内挿プローブによる厚肉鋼管の減肉検査法”、平成 22 年度秋季講演大会講演概要集、日本非破壊検査協会、pp.265-266、2010
- ④ Y. Gotoh, H. Fujioka, M.Katoh and N.Takahashi,” 3D nonlinear analysis of electromagnetic inspection of outer side defect on steel tube with steel support using alternating flux leakage testing”, Japan-US Symposium on Emerging NDE Capabilities for a Safer World, 225-231, 2010
- ⑤徳本貴則、小野田二千翔、後藤雄治 “静磁界及び微小交流磁界を併用した鋼板肉厚測定法の三次元非線形磁界解析評価”、日本保全学会、第 5 回学術講演会、pp.163-166、2009
- ⑥小野田二千翔、徳本貴則、後藤雄治、高橋則雄 “直・交流合成磁界による鋼板肉厚測定手法”、電気学会、九州支部大会、07-2P-14、2009
- ⑦桜井健太、後藤雄治、高橋則雄 “直流及び微小交流磁界を併用した鋼管減肉検査”、日本非破壊検査協会、表面探傷シンポジウム、pp.82-87、2009
- ⑧徳本貴則、後藤雄治、高橋則雄 “静磁界及び微小交流磁界を併用した鋼板減肉検査手法の検討”、日本非破壊検査協会、九州技術サロン、pp.7-10、2009
- ⑨徳本貴則、後藤雄治、高橋則雄 “直流磁化 ECT における直流磁界が探傷に及ぼす影響”、日本 AEM 学会、第 20 回 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム、pp.33-36、2008

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 雄治 (GOTOH YUJI)

大分大学・工学部・機械・エネルギーシステム工学科・准教授

研究者番号：00373184