

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860005

研究課題名(和文) 磁性配管減肉の Pulsed Eddy Current による検出と逆問題アプローチによる減肉のサイジング

研究課題名(英文) Detection of wall thinning in carbon steel based on pulsed eddy current testing method and sizing of defect using inversion approach

研究代表者

解 社娟 (XIE, Shejuan)

東北大学・流体科学研究所・教育研究支援者

研究者番号：50633939

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000 円、(間接経費) 690,000 円

研究成果の概要(和文)：炭素鋼配管の内面欠陥定量評価は原子力プラントの安全確保において重要な課題であり、非磁性鋼の非破壊検査より著しく困難である。本研究では、透磁率の低減可能な磁気飽和パルス ECT 法を提案し、その炭素鋼への適用性を評価した。

平成 24 年度の主な研究実績は、炭素鋼減肉欠陥を対象とした磁気飽和パルス ECT 試験の実行と、磁気ヨークが強磁性材料に作る静磁場分布の解析を行った。平成 25 年度の主な研究実績は、磁気ヨークを使って、炭素鋼磁気飽和パルス ECT 信号の順解析コードを開発した。

研究成果の概要(英文)：Quantitative non-destructive evaluation of wall thinning of inner side in carbon steel piping is a difficult and urgent issue for safety of nuclear power plants, especially compared to NDT of non-magnetic material. In this research, The feasibility of the magnetic saturation PECT method for wall thinning detection in carbon steel piping is proposed and validated.

Firstly, the simulated polarization approach is adopted for the calculation of the static magnetic field distribution generated by the electromagnetic magnet, then the material permeability distribution is predicted according to the B-H curve of the targeted material. Finally the efficient magnetic saturation PECT forward simulation tool is updated for the carbon steel based on the Ar (reduced A) method and the Fourier series strategy to validate the wall thinning detection in carbon steel material.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：炭素鋼配管 減肉欠陥 定量評価 磁気飽和 パルス ECT 法

1. 研究開始当初の背景

原子力発電所には原子炉設備などの安全を確保するために、定期的な非破壊検査が要求されている。局所減肉は流動加速腐食(FAC)などの原因によって配管の内部に発生された欠陥であり、プラントの安全に大きな脅威を与える。一方、炭素鋼は原子力プラントの配管等に広く使われ、その局所減肉の非破壊評価は原子力プラントの安全確保に不可欠である。現状、炭素鋼配管に発生した局所減肉を精度よく検査する非破壊評価技術はいまだ十分に確立されていない。

パルス渦電流法は励磁電流が大きく、且つ周波数成分が豊富なため、非磁性ステンレス鋼配管の減肉検査に有望と言われている。しかしながら、炭素鋼が強磁性材料のため、パルス渦電流法を適用した場合表皮深さが小さく、厚肉配管の検査にはいまだ困難である。

一方、磁気飽和によって炭素鋼の透磁率が減少されることが可能であり、磁気飽和させた炭素鋼検査対象にパルス渦電流法を適用すれば、厚い配管にある減肉の検査も実現できる可能性が高い。

2. 研究の目的

本研究では炭素鋼配管における減肉欠陥の定量評価を目標に磁気飽和パルス ECT 法の有効性評価を行う。炭素鋼配管補強部の内面欠陥定量評価は原子力プラントの安全確保において重要な課題であり、非磁性鋼の非破壊検査より著しく困難である。本研究では、透磁率の低減可能な磁気飽和パルス ECT 法を提案し、その炭素鋼配管への適用性を評価する。主な研究内容は、磁気飽和パルス ECT 信号の高速順解析手法の開発、逆解析に基づいた炭素鋼減肉欠陥定量評価手法の有効性評価である。

3. 研究の方法

炭素鋼の表皮深さを増やすために、電磁石を用いた磁気飽和で透磁率を減らすことを目指す。図 1 に磁気飽和パルス ECT 法の基本的な考え方を示す。電磁石によって発生された強い静磁場を用いて、検査対象を磁気飽和させる。飽和した検査対象物に従来のパルス渦電流法を適用すれば、厚い磁性板の反面にある減肉欠陥に対する検出能力を向上することが可能である。

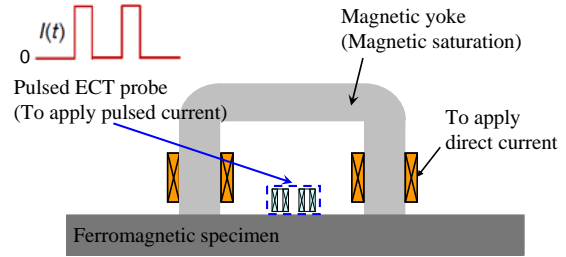


図 1 磁気飽和パルス ECT 方法

4. 研究成果

(1) 静磁場シミュレーション手法の開発

まず、磁気飽和パルス渦電流法の有効性を数値シミュレーションによって確認した。

適用した数値解析手法は SPM (Simulated Polarization Method) に基づいた FEM-BEM 併用法である。SPM 法の支配式は以下に示す：

$$-\frac{1}{\mu_0} \Delta \mathbf{A} = \nabla \times \mathbf{M} \quad \text{in } \Omega_{FEM}, \quad (1)$$

$$-\frac{1}{\mu_0} \Delta \mathbf{A} = \mathbf{J}_0 \quad \text{in } \Omega_{BEM}, \quad (2)$$

ここで Ω_{FEM} は磁性導体領域、 Ω_{BEM} は空気領域、 \mathbf{J}_0 は電磁石の励磁電流、 \mathbf{M} は磁性材料中の磁化、 \mathbf{A} はベクトルポテンシャル、 μ_0 は空気の透磁率である。

式③は強磁性材料の構成式である。図 2 に示されたように非線形の挙動を示す。ただし、 B_s は飽和磁束密度である。本研究では、磁性材料の異方性を省略し、③式に磁束密度の最大値を適用する。

$$\mathbf{M}(\mathbf{B}) = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{H}(\mathbf{B}) \quad (3)$$

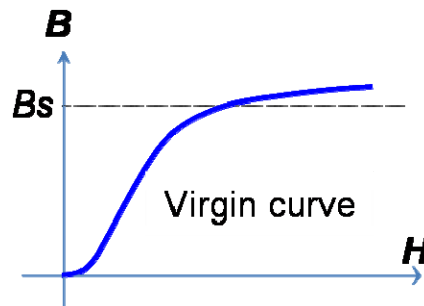


図 2 Virgin curve of B-H relationship

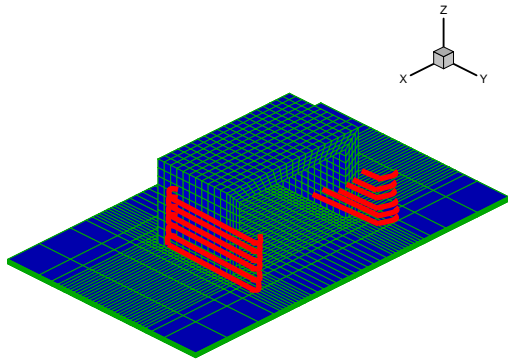


図3 Simulation model for static magnetic field calculation

式①～③に基づいて、電磁石に作られた静磁場を解析する FEM-BEM 併用法コードを作成し、その磁場分布を計算した。図3に計算モデル、図4に起磁力が 20 kAT (Ampere Turn)である場合の磁場分布を示す。ヨークの下ある磁場がかなり強く、その領域を飽和させたことが分かる。

計算された磁束密度に従い、検査対象内部の局所透磁率を材料の $B-H$ 関係によって求めることができる。図5に飽和した炭素鋼板表面の透磁率分布を示す。電磁石の直下にある領域の透磁率が5ほどでありほぼ均一であり、従来の透磁率より著しく低下された。

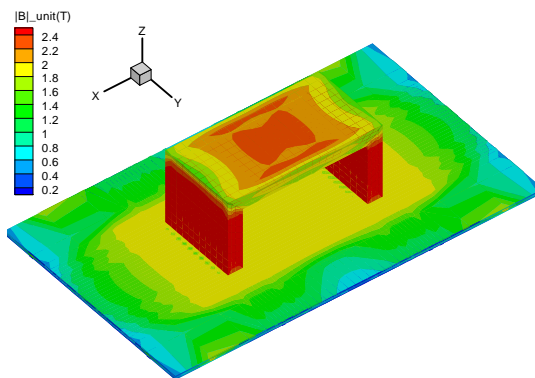


図4 Calculated static magnetic field distribution

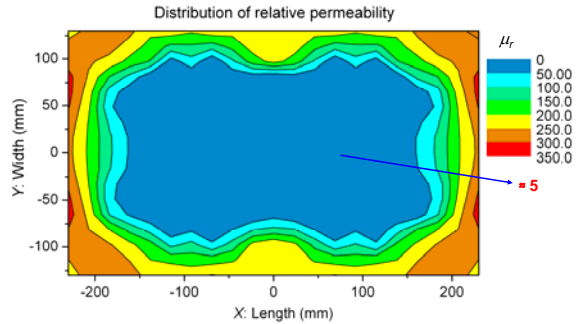


図5 Permeability distribution of the surface of carbon steel specimen

(2) 磁気飽和の効果

① ECT 信号への影響

Ar 法コードを用いて透磁率による ECT 信号への影響を評価した。そこで、検査対象欠陥を炭素鋼板に加工されたスリットとした。ECT 試験は欠陥の反対側から実施された。

TR 型 ECT プロブをヨーク足の間を設置された。プロブのパラメータを表1に示す。また、コイル間の距離を 40 mm、リフトオフを 0.5 mm とした。

図7に異なる透磁率の ECT 信号を示す。但し、励磁周波数が 20 Hz である。透磁率の減少につれ、欠陥信号が著しく増幅され、磁気飽和の効果が明らかである。欠陥信号の向上は磁気飽和による表皮深さの増加に関わる。欠陥部に到達した渦電流の割合が大きければ、欠陥による渦電流の変化も大きく、結果として ECT 信号の大きさも増やされる。

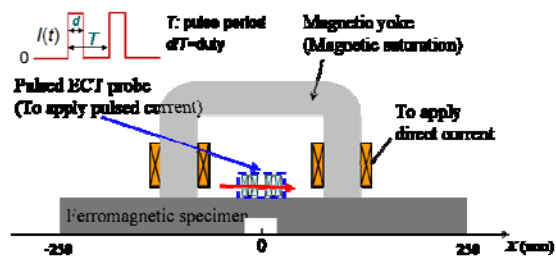
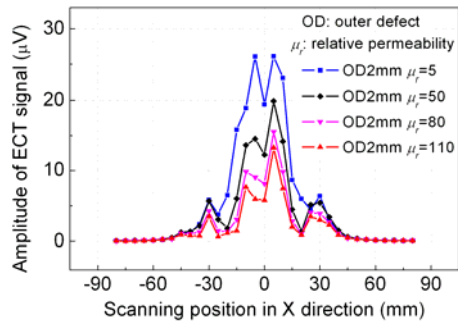


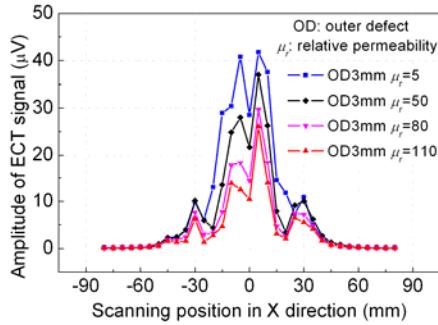
図6 Probe scanning of magnetic saturation ECT and PECT

表1 Parameters of PECT probe

| | ID (mm) | OD (mm) | H (mm) | Turn |
|---------|---------|---------|--------|------|
| T. coil | 5 | 10 | 5 | 296 |
| R. coil | 5 | 10 | 5 | 3446 |



(a) OD=2mm



(b) OD=3mm

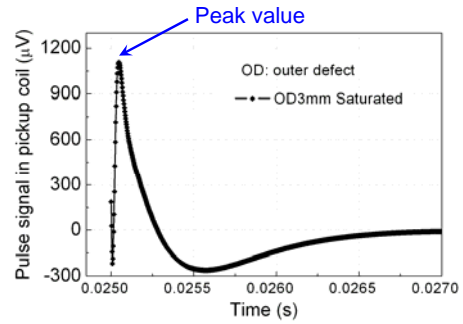
図7 ECT signals on various permeability, frequency=20Hz

② PECT 信号

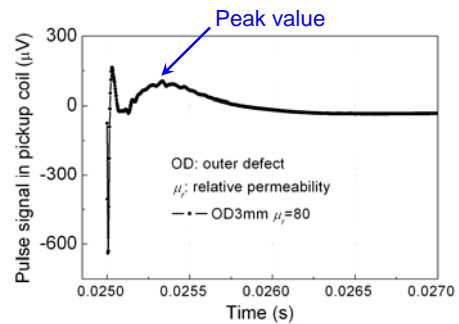
まず、従来の非磁性体に適用した PECT 解析コードを磁気飽和 PECT のシミュレーションに改修し、平板炭素鋼にある局所減肉の PECT 信号を計算した。計算中、パルス励磁電流を 1.0 A/T、パルス周波数を 20 Hz とした。

図 8 に異なる透磁率の PECT 信号を示す (飽和前の透磁率を 80 とした)。飽和した状態の PECT 信号が著しく大きくなった。

PECT 信号の特徴量として、パルス信号のピークが一般的に使われている (図 8 参照)。図 9 に局所減肉を対象に検査された PECT 信号の特徴量を示す。2 種類の欠陥 (深さ 2 mm と 3 mm の局所減肉) と飽和前後の検査結果を示している。2 種類の欠陥ともに飽和後の信号が著しく大きくなった。このような解析結果が磁気飽和 PECT 法が炭素鋼板の外表面にある局所減肉欠陥の検出に十分適用可能であることを示された。

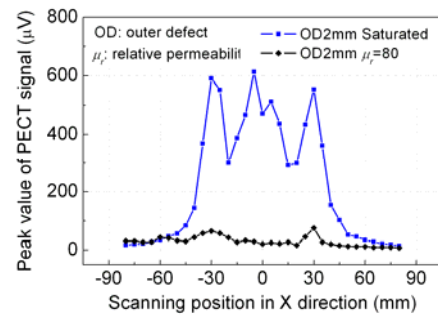


(a) Saturated

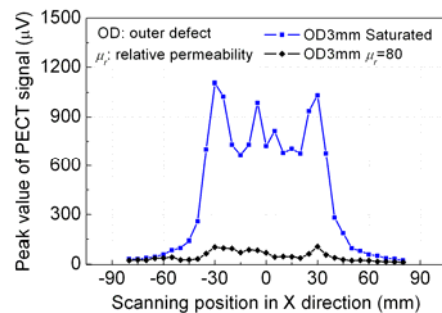


(b) $\mu_r=80$

図8 Comparison of transient pulse signal, probe is put at coordinate of -30mm



(a) OD=2mm



(b) OD=3mm

図9 Comparison of scanning signals of peak value extracted from transient PECT signal

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Hong-En Chen, Xiaowei Wang, Toshiyuki Takagi and Tetsuya Uchimoto, Sizing of wall thinning defects using pulsed eddy current testing signals based on a hybrid inverse analysis method, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, Vol. 49 (2013), 1653-1656, DOI: 10.1109/TMAG.2012.2236827
- ② Shejuan Xie, Yunfei Li, Wenlu Cai, Hong-En Chen, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto and Yasuhiko Yoshida, A Numerical method for simulation of nonlinear eddy current testing signals based on transient Ar formulation, Materials Transactions, 査読有, Vol. 54 (2013), 964-968, DOI: 10.2320/matertrans.m2013034
- ③ Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi and Tetsuya Uchimoto, Development of a very fast simulator for pulsed eddy current testing signals of local wall thinning, NDT & E International, 査読有, Vol. 51 (2012), 45-50, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.06.002>
- ④ Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Li Wang, Toshiyuki Takagi and Tetsuya Uchimoto, An inversion scheme for sizing of wall thinning defects from pulsed eddy current testing signals, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol. 39 (2012), 203-211, DOI: 10.3233/JAE-2012-1462

[学会発表] (計 3 件)

- ① Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Seiya Sato, Hong-En Chen, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi and Yasuhiko Yoshida, Evaluation of plastic deformation and characterization of electromagnetic property using pulsed eddy current testing method, ISEM'2013, 2013 年 08 月 01 日, Quebec, Canada.

- ② Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Haiqiang Zhou, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto and Gerd Dobmann, Evaluation of Wall Thinning in Carbon Steel Piping Based on Magnetic Saturation Pulsed Eddy Current Testing Method, ENDE'2013, 2013 年 06 月 26 日, Bratislava, the Slovak Republic.
- ③ Shejuan Xie, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto and Zhenmao Chen, Wall thinning reconstruction from pulsed eddy current testing signals based on inversion analysis, 日本 AEM 学会, MAGDA2012, 2012 年 11 月 21 日, 仙台, 日本.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

解 社娟 (XIE, Shejuan)

東北大学・流体科学研究所・教育研究支援者
研究者番号：50633939