磁性管ECTの未飽和領域磁化による ノイズ低減数値解析法

学生員 後藤 雄治 (職業能力開発大学校)

正員 橋本 光男 (職業能力開発大学校)

Numerical Analysis Simulation of Magnetic Noise Reduction for ECT of Magnetic Tube by Unsaturated Magnetization

Yuji Goto, Student Member, Mistuo Hashimoto, Member
(Polytechnic University)

Eddy Current Testing(ECT) is one of the non-destructive testing methods using electromagnetic phenomena and an effective method for detecting cracks or flaws in conducting materials. ECT can detect internal small cracks in non-ferromagnetic heat exchanger tubes on petroleum plants. In this case differential type probe coils are usually used for inspection of the tubes and defects can be detected as a probe impedance trajectory by moving the coils inside the tube. And higher frequency in this method is needed for the purpose of detecting very small surface cracks in tubes. But it is difficult to test thick ferromagnetic steel tubes using the conventional ECT method. Because test signals of the steel tubes include magnetic noises caused by distribution of initial permeability. Therefore we studied to control the initial permeability and to reduce the magnetic noise using a permanent magnet which magnetize the steel tube on region of less than magnetic saturation point. This ECT probe is differential coils type wound around a columnar permanent magnet. We purposed to make its phenomenon clear by numerical analysis using axisymmetric FEM.

キーワード：磁気ノイズ低減、渦電流探傷試験、非線形静磁界解析、交流線形渦電流解析

1. 緒言

石油プラント等の熱交換器鋼管の検査は化学プラントの健全性確保上重要であり、渦電流探傷試験(Eddy Current Testing : ECT)の適用が検討されている。ECTは非接触で高速に検査できるメリットを持っている。しかし厚肉の磁性管へのECTの適用は必ずしも適しているとは言えない。その理由は、材料内の磁気特性の不均一により欠陥部以外からの磁気ノイズが大きく、S/N比が低下するためである。磁性管には一般的にリモートフィールド法を用いたECTが用いられることが多いが、管肉が厚いことや管の外側にアルミのフィンが付いていることが多いため、適用できない。また、磁気ノイズの低減には、管を完全に磁気飽和させて比透磁率を1にする方法も有用であるが、肉厚が厚く内径の小さい場合に管内側から磁気飽和させることは物理的に不可能である。そこで本研究では、永久磁石により材料を管内部より磁化させ、磁気特性のばらつきを抑えることによりS/N比を向上させるECT手法について数値解析により検討した。

2. 未飽和領域磁化ECTの解析方法

<2・1> 未飽和磁化ECT解析

ECTはプローブコイルにより交流磁場を生み出し、材料中に渦電流を発生させ、コイルのインピーダンスを計測することにより材料中のき裂を検出する手法である。厚肉の磁性管のき裂をECTで測定すると、磁性管材料内の透磁率の不均一により、き裂部分以外からの磁気ノイズが大きく現れるため、き裂による信号が明確に得られない。そこで、円筒形の永久磁石をプローブに組み込み、未飽和領域ではあるが、透磁率のばらつきを低減させ、磁気ノイズを抑える程度に磁化させ、き裂による信号を鮮明に得られるECTプローブを提案した。そのプローブの外観図をFig.1に示す。この現象を解析するには、永久磁石による静磁場磁化による強磁性体の磁化特性と、ECTコイルによる交流磁場問題の二つを考慮に入れなくてはならない。ここでの交流磁場はコイルに流す電流が小さいため、マイナーループの特性と考えることができる。そこで数値解析を行うにあたって、まず強磁性体を静磁場で磁化させた状

態に交流磁場を加えた時の、強磁性体内の交流透磁率を求める必要がある。そしてこれを用いて、ECTプローブに得られる磁気ノイズを解析的に評価することにより、最適な磁化領域を検討することができる。

図1 未飽和磁化ECTプローブ
Fig.1 Model of unsaturated magnetization ECT probe

<2・2> 静磁界非線形解析及び

線形渦電流解析の基本方程式

本研究では、有限要素法による非線形静磁界解析で強磁性体内の磁束密度を求め、その磁束密度に応じた交流比透磁率を各要素に与え、交流線形渦電流解析により強磁性体の磁気ノイズの解析を行う方法を提案する。また、交流比透磁率は実験と交流線形渦電流解析により求める。解析モデルは軸対称として取り扱う。ここで使用する非線形静磁界解析及び交流線形渦電流解析の解析方法を以下に示す。

<2・2・1> 非線形静磁界方程式

非線形静磁界解析の支配方程式はベクトルポテンシャル A を用いて、

$$\nabla \cdot \text{rot} A = J_0 \quad (1)$$

と表すことができる。なお、 J_0 、 ∇ は強制電流密度及び、磁気抵抗率 ($\nu = 1/(\mu_r \cdot \mu_0)$) である。本解析で用いる強磁性体は、等方性磁気材料としている。ここでは軸対称問題を取り扱うので、非線形静磁界解析における汎関数 χ は次式で表される。

$$\chi = \frac{1}{2} \iint_s \nu \left\{ \left(\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{A_\theta}{r} + \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right)^2 \right\} 2\pi r dr dz - \iint_s J_0 A_\theta 2\pi r dr dz \quad (2)$$

この式を変分原理(エネルギー原理)に基づいて、有限要素法により非線形静磁界解析を行う。強磁性体の磁気特性は、磁気抵抗率が磁束密度によって変化する非線形特性を示すことから、磁気抵抗率は磁束密度の関数として表すことができる。解析では、あらかじめ強磁性体の磁化特性 ($B-H$ 曲線) を磁気抵抗率と磁束密度の曲線に変換し、この曲線に合うよう、(2)式の磁気抵抗率 ν を修正し、収束条件を満たすまで反復計算を行う。本研究の非線形解析における反復手法及び収束判定法には、ニュートンラプソン法を用い、非線形反復時の収束判定には、次式を用いた。

$$\left| \frac{(\sum A^{(k)} - \sum A^{(k+1)})}{\sum A^{(k+1)}} \right| < \varepsilon \quad (3)$$

ここで、 $\sum A^{(k)}$ 、 $\sum A^{(k+1)}$ はそれぞれ、 k 及び $k+1$ 回目のポテンシャルの総和であり、 ε は収束判定値である。本解析では、 ε をより小さい値にしても得られる解に変化が見られないことを確認したうえで 1.0×10^{-5} とした。本解析では軸対称有限要素法を使用し、要素は4節点1次アイソパラメトリック要素を用いた。

<2・2・2> 線形渦電流解析方程式

交流線形渦電流解析の支配方程式は次式で表せる。

$$\text{rot}(\nu \text{rot} A) = J_0 - J_e \quad (4)$$

ここで J_e は、渦電流密度 $J_e = -j\omega\sigma A$ である。また、 σ 、 ω は導電率及び、角周波数である。軸対称モデルの交流磁場における汎関数 χ は次式で表される。

$$\chi = \frac{1}{2} \iint_s \nu \left\{ \left(\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{A_\theta}{r} + \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right)^2 \right\} 2\pi r dr dz - \iint_s \left(J_s \theta - \frac{1}{2} J \omega \sigma A_\theta \right) A_\theta 2\pi r dr dz \quad (5)$$

この式を変分原理(エネルギー原理)に基づいて、有限要素法により交流線形渦電流解析を行う。軸対称有限要素法による交流線形渦電流解析では、ECTプローブコイル部のベクトルポテンシャルを用い、周回積分を行うことによりコイルのインピーダンスを算出することができる。

$$Z = \frac{-j\omega N_t \oint_C A_c dl}{I} \quad (6)$$

ここでの N_t 、 A_c 、 I はそれぞれコイルの巻数、コイル部のベクトルポテンシャル、強制電流である。

3. 交流磁気特性の測定

本研究では、実験及び数値解析により交流磁場における磁気特性を求めた。交流比透磁率測定モデルをFig.2に示す。これは実際に石油化学プラントの熱交換器で使用されている強磁性体鋼管(材質: STB35)の外側に励磁コイル(1600ターン)を巻き、管内にECTプローブのコイルを挿入した構造である。交流磁気特性測定の手順を示したフローチャート図をFig.3に示す。また、Fig.4に強磁性体(STB35)の磁化曲線を示す。まず直流電流で外側より鋼管を磁化させ、励磁電流に応じたインピーダンスをECTプローブで測定する。次に、磁気ベクトルポテンシャルによる非線形静磁界解析により、この励磁電流に応じた管内の磁束密度を求める。一方比透磁率をパラメータにした交流線形渦電流解析により、コイルのインピーダンスを求める。この結果と実験により得られたインピーダンスから強磁性体内の交流比透磁率を導きだし、またその時の磁束密度とで交流磁場における磁気特性 ($B-\mu_r$ 曲線) を求めた。本実験ではECTプローブに加える周波数は300kHzで行った。

この方法により得られた結果をFig.5に示す。

4. 数値解析によるノイズ評価

本研究では、交流磁化曲線(Fig.5)を使用し、ECTプローブによる磁気ノイズを求めた。

<4・1> 磁気ノイズ解析手順

本研究の磁気ノイズ解析手順を示したフローチャート図をFig.6に示す。磁気ノイズを求めるには、まず強磁性体内の各要素にランダムに磁気特性分布を与え、初期透磁率のばらつきを与える。次に、永久磁石による直流磁化における強磁性体内の磁束密度分布を非線形静磁界解析により求め、その磁束密度分布から実験及び解析により求めた交流磁気特性(Fig.5)を使用して、強磁性体内の交流の比透磁率分布を導き出す。その交流比透磁率分布を基にして交流線形渦電流解析を行い、磁気ノイズの評価を行う。

図2 交流比透磁率測定モデル

Fig.2 Measurement equipment of alternating permeability

図3 交流磁気特性の測定手順

Fig.3 Flow chart of alternating magnetization curve measurement

図4 材質STB35の磁化曲線

Fig.4 B-H curve of STB35

図5 交流磁気特性 (B- μ_r 曲線)

Fig.5 B- μ_r curve for alternating magnetic flux

図6 磁気ノイズ解析フローチャート

Fig.6 Flow chart of magnetic noise analysis

<4・2> 解析モデル

実機検査に適応可能な検査プローブの検討を行った。実際の熱交換器鋼管の検査には、その構造的制約から鋼管内側からしか検査出来ない。また管内を通すプローブは鋼管内径より、プローブの最大径が限定される。さらにこの鋼管は肉厚が厚いため、内部から完全に磁気飽和させるのは不可能である。そこで、プローブ内部に永久磁石を組み込み、未飽和領域となるが鋼管内側を磁化させ、磁気ノイズ低減を検討した。本研究での解析モデル図をFig.7に示す。このモデルに対して軸対称解析を行った。これは、円筒形の永久磁石の周りにECTコイルを差動形に巻いた構造である。被検材である強磁性体は、実際の石油化学プラント内の熱交換器鋼管に使用されている材質(STB35)とした。長さは220mm、厚さ4.4mm、導電率は 6.333×10^6 S/mである。また、材料内の初期透磁率のばらつきは評価出来ないため、直流磁化による初期比透磁率を最大比透磁率(2000)の10~25%程度とし、各要素にランダムにその磁気特性を与えた。被検材を磁化させる永久磁石は、解析上直流磁化電流で模擬し、長さは12mmで、外半径11mm、厚さ2.5mmとした。また差動形ECTコイルは、長さ2.0mm、外半径15mm、厚さ2.5mmで、コイル巻数は各160ターンである。また、周波数は300kHz一定とした。この永久磁石と差動形プローブコイルを同時に移動させて解析を行った。このプローブコイルのインピーダンス変化により直流磁化された強磁性体の磁気ノイズ評価を行う。

図7 解析モデル

Fig.7 Model of numerical analysis

<4・3> 磁気ノイズ解析結果及び考察

永久磁石の残留磁気値を0.0、0.5、0.8、1.1 Tと変化した時の強磁性体内部の交流比透磁率分布をFig.8に示す。残留磁気値が0.0 T時では、比透磁率のばらつきが大きいことがわかる。残留磁気値を0.5、0.8 Tと増加させるにつれ、比透磁率のばらつき分布が小さくなっていることが理解できる。さらに1.1 T時まで増加すると、ほぼ永久磁石の中心部付近の強磁性体内部より磁化分布が均一になっており、交流比透磁率は減少傾向を示していることが理解できる。また、交流比透磁率分布は永久磁石の残留磁気値の増加に伴い、永久磁石中心部付近からムラがなくなることが理解できる。

図8 永久磁石の残留磁気値をパラメータにした強磁性体内の交流比透磁率分布
Fig.8 Distribution change of alternating permeability in material

5. き裂信号解析

実機検査に適応可能な永久磁石を検討した。内径が17mmの強磁性体鋼管内に挿入するプローブ内部に設置する永久磁石の残留磁気値を考慮すると、物理的に約1.0 Tを大幅に越える永久磁石の使用は現実的ではないことから、き裂信号解析に使用する永久磁石の残留磁気値は1.1 T一定として解析を行った。

<5・1> き裂信号解析モデル

解析モデルはFig.7を使用した。ECTプローブの周波数は300kHzより、鋼管内側のき裂検出の検討を目的としているため、き裂モデルは鋼管内側に想定し、管厚に対して40%の深さとした。き裂幅を1、2、3mmと変化した時の解析を行った。

<5・2> き裂信号解析結果及び考察

き裂幅を変化させた時の強磁性体内の交流比透磁率分布

変化の解析結果をFig.9に示す。き裂が存在しない時は、鋼管内側の比透磁率分布は均一であるのに対し、き裂の存在により比透磁率分布の乱れが現れていることが理解出来る。また、き裂幅が増えるに伴いその乱れは大きく、特にき裂のエッジ部に大きな変化が現れていることが分かる。この時のき裂信号（レジスタンス成分、リアクタンス成分）及び、リサージュ波形をFig.10に示す。き裂幅が大きくなるにつれて、それぞれの振幅は大きくなることが理解出来る。またリサージュ波形より、き裂の幅変化による位相差が現れていることも合わせて理解できる。

図9 き裂幅変化による交流比透磁率分布
(永久磁石の残留磁気値1.1T一定)
Fig.9 Distribution of alternating permeability
near crack in material
(Remanence of permanent magnet:1.1T)

(a) き裂幅変化によるリサージュ波形
(周波数300kHz)

(b) き裂幅変化によるインピーダンス変化
(周波数300kHz)

図10 き裂幅変化によるECT信号
Fig.10 ECT signal of change crack width

6. 実験による検討

実機検査に適応可能な検査プローブの作成及び、実験を行った。実験に用いた検査プローブは通常ECTプローブ及び、残留磁気値1.1Tの永久磁石を挿入したECTプローブの2種類である。これらのプローブの寸法をFig.11に、実験装置の外観図をFig.12に示す。なお、ECTコイルの巻数、周波数、強磁性体材料等は解析時のものと同じにした(Fig.7)。また、検査したき裂の大きさは、径がそれぞれ3φ及び5φの貫通き裂の2種類のものとした。実験により得られたき裂信号（リアクタンス成分、レジスタンス成分）をそれぞれFig.13に示す。通常ECTプローブによる探傷結果は、5φの貫通き裂のレジスタンス成分は大きく検出できているが、3φの貫通き裂のレジスタンス成分は、き裂部以外の磁気ノイズと同じ振幅のため見分けが付きにくくなっている。また、き裂信号のリアクタンス成分に関しては、磁気ノイズの振幅が大きく現われているため、どれがき裂信号の振幅なのか全く見当がつかない結果となっている。これに対して残留磁気値1.1Tの永久磁石を挿入したECTプローブによる探傷結果ではリアクタンス成分、レジスタンス成分共に、き裂部以外の磁気ノイズを低減させ、き裂信号の振幅を大きく表していることが理解できる。

図11 通常ECTと未飽和磁化ECTプローブ
Fig.11 Model of normal ECT probe and
unsaturated magnetization ECT probe

図12 実験装置の外観図
Fig.12 Model of verification experiment

(a) 通常ECTプローブによる実験波形
(周波数: 300kHz, き裂: 3φ, 5φ 貫通)

(b) 未飽和磁化ECTプローブによる実験波形
(周波数：300kHz, き裂：3φ, 5φ 貫通)

図13 通常ECTと未飽和磁化ECTプローブ
との比較
Fig.13 Crack signal of normal ECT and
unsaturated magnetization ECT

7. まとめ

磁性管ECT未飽和領域磁化によるノイズ低減数値解析による評価を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 強磁性体内の交流磁場による磁化特性を求めた。
- (2) 強磁性体を磁化させた時の交流比透磁率分布を求め、磁気ノイズ評価を解析的に示すことができた。
- (3) 実験及び解析により、未飽和磁化領域によるECTの有用性を示した。

未飽和磁化領域によるECTは、磁気飽和させない程度の磁化力のため、プローブの管への吸着が少なく、実際の検査作業で扱いやすい手法と考えられる。

(平成9年1月20日受付、平成9年3月10日再受付)

文 献

- [1] 後藤雄治、福富幸幸、橋本光男：弱磁化プローブによる厚肉鋼管の内面検査法の評価、日本非破壊検査協会、平成7年度春季大会、pp.191-194
- [2] 後藤雄治、福富幸幸、佐藤宏、橋本光男：弱磁化による磁性管ECTのノイズ低減、The Fourth MAGDA Conference in Tottori、pp.193-196(1995)
- [3] Y.Goto, M.Hashimoto: Magnetic Noise Reduction for ECT of Thick Steel Tube by Unsaturated Magnetization, The First US-Japan Symposium on Advances in NDT, pp.265-268(1996)
- [4] 後藤雄治、橋本光男：磁性管ECTの未飽和領域磁化によるノイズ低減数値解析、電気学会、平成8年マグネティックス研究会、pp.165-169

後藤雄治（学生員）1972年5月28日生まれ。1996年3月職業能力開発大学校電気工学科卒業。同年4月職業能力開発大学校研究課程工学研究科電気・情報専攻入学、現在に至る。電磁現象を応用した強磁性体の非破壊検査に関する研究に従事。電気学会、日本AEM学会、日本非破壊検査協会学生会員。

橋本 光男（正員） 1950年12月11日生まれ。1972年茨城大学工業短期大学部電気工学科卒業。1976年同電子工学科卒業。1971年東京大学工学部、文部技官、助手。1990年職業能力開発大学校電気工学科助教授。1995年同教授、現在に至る。工学博士。電磁気を応用した非破壊評価に関する研究に従事。電気学会、日本AEM学会、日本非破壊検査協会会員。