

強磁性体鋼管の内面非破壊検査法

岡山職業能力開発短期大学校
職業能力開発大学校

後藤 雄 治
橋 本 光 男

Non-destructive Inner Defect Testing Method of Thick Ferromagnetic Steel Tubes

Yuji GOTOH, Mitsuo HASHIMOTO

要約 石油化学プラント等で使用されている鋼管は、使用される環境に起因した様々なき裂が生じる。そのき裂が進み、設備の破損につながるようなことがあると、その影響の及ぼす範囲は極めて広く、また深刻な事態をもたらすことになる。そのため近年、プラントが社会や地球環境に調和適合できるだけ信頼性・安全性を確保できるよう、材料劣化や損傷程度を推定する材質評価やき裂の検査技術の高度化のニーズは高くなってきている。石油化学プラント内の熱交換器管等における検査手法の一つに渦電流探傷試験法がある。これは電磁現象を利用した非破壊検査手法であるため、非接触でかつ高速の検査が実施できる利点を有している。しかし、検査対象が強磁性体である場合は、透磁率のバラッキによる磁気ノイズが生じ、検出感度を低下させる。またその非線形特性のため、現象の理解を難しくしている。そこで本研究では、有限要素法による静磁界非線形解析と線形渦電流解析を使用し、石油化学プラント内の強磁性体鋼管検査に適用可能な渦電流探傷試験法の検討を行った。

I 緒言

石油プラント等に使用されている熱交換器鋼管（強磁性体鋼管）のき裂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き裂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⁽¹⁾³⁾。

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押さえることによりS/N比を向上させるECT手法（未飽和領域磁化ECT）について数値解析により検討した。

II 未飽和領域磁化ECTの解析方法

1 解析手順

ECTは検査コイルに交流電流を流し交流磁場を生み、材料内に渦電流を発生させる。コイルのインピーダンスを測定しながら、材料上を非接触で平行移動させ、き裂の存在により変化するインピーダンスの値から、き裂の検出および評価を行う検査手法である。しかし、厚肉（管厚4～5mm）の強磁性体鋼管のき裂検査をECTで測定すると、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といった欠点があ

り、ECTを強磁性体鋼管に適用するは困難である。そこで、円筒形の永久磁石の周りにECT検査コイルを巻き、それを強磁性体鋼管内に挿入し、鋼管内部を未飽和領域ではあるが、磁気ノイズを抑える程度に磁化させ、き裂信号を明確に得られるECT検査プローブ（未飽和磁化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検査プローブ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¹⁴⁾。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、まず強磁性体を永久磁石（静磁場）で磁化させた状態に交流磁場を加え、そのときの強磁性体内の交流透磁率を求める必要がある。そして、その値を用いて、ECT検査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。

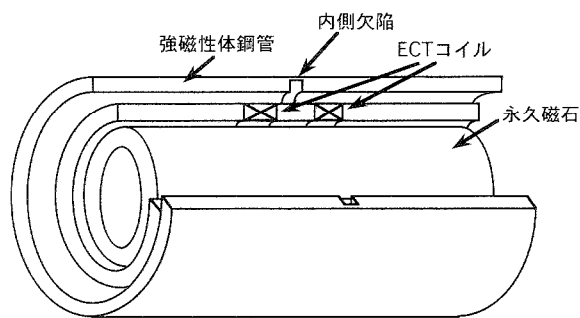


図1 未飽和磁化ECTプローブ

Fig.1 Model of unsaturated magnetization ECT probe

2 永久磁石による磁化およびECT解析

本研究では軸対称有限要素法を使用し、円筒形の永久磁石により鋼管内側を磁化させたときの強磁性体内部の磁束密度を静磁界非線形解析で求め、ECT検査プローブによる磁気ノイズの解析を線形渦電流解析で求める。静磁界非線形解析および線形渦電流解析の解析方法を以下に示す。

2.1 静磁界非線形解析

静磁界非線形解析の基本方程式を以下に示す。

$$\mathbf{v} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{J}_0 \quad (1)$$

なお \mathbf{A} 、 \mathbf{J}_0 、 \mathbf{v} はそれぞれベクトルポテンシャル、強制電流密度、磁気抵抗率 ($\mathbf{v} = (1/\mu_r \times \mu_0)$) である。ここでは軸対称問題を取り扱うので、静磁界非線形解析における汎関数は次式で表される。

$$\chi = \frac{1}{2} \iint_S \mathbf{v} \left\{ \left(\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{A_\theta}{r} + \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right)^2 \right\} 2\pi r dr dz - \iint_S \mathbf{J}_0 A_\theta 2\pi r dr dz \quad (2)$$

この式を変分原理に基づいて、静磁界非線形解析を行う。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 (\mathbf{v} -B²曲線) に変換し、この曲線に合うよう、(2)式の磁気抵抗率 \mathbf{v} を修正し、収束条件を満たすまで反復計算を行う。なお本研究で扱う強磁性体は、等方性磁性材料として非線形解析を行っている。また、本研究の非線形解析における反復手法および収束判定法には、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。

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

ここで、 $\sum \mathbf{A}^{(k)}$ 、 $\sum \mathbf{A}^{(k+1)}$ はそれぞれ、 k および $k+1$ 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無いことを確認した上で、その値を 1.0×10^{-3} とした。

2.2 線形渦電流解析

交流線形渦電流解析の支配方程式を以下に示す。

$$\operatorname{rot}(\mathbf{v} \operatorname{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 - \mathbf{J}_e \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{J}_e は渦電流密度 $\mathbf{J}_e = -j\omega\sigma\mathbf{A}$ である。また σ 、 ω は導電率および角周波数である。軸対称モデルの交流磁場における汎関数は次式で表せる。

$$\chi = \frac{1}{2} \iint_S \mathbf{v} \left\{ \left(\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{A_\theta}{r} + \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right)^2 \right\} 2\pi r dr dz - \iint_S \left(\mathbf{J}_s \theta - \frac{1}{2} \mathbf{J}_\omega \sigma A_\theta \right) A_\theta 2\pi r dr dz \quad (5)$$

この式を変分原理に基づいて、交流線形渦電流解析を行う。軸対称有限要素法による線形渦電流解析は、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。以下にその式を示す。

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

ここで 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。

Ⅲ 交流磁気特性の測定

本研究では、実験および数値解析により交流磁場における磁化特性を求めた。測定モデルをFig.2に示す。

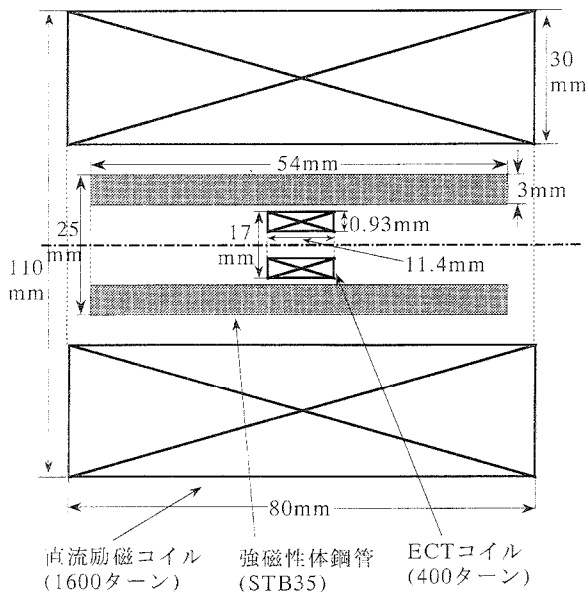


図2 交流比透磁率測定モデル

Fig.2 Measurement equipment of alternating permeability

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）を置き、管内にECT検査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に強磁性体鋼管（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検査プローブで測定する。それと同時に、磁気ベクトルポテンシャルによる軸対称有限要素法の静磁界非線形解析により、この直流励磁に応じた管内部に発生する磁束密度を求める。一方、比透磁率をパラメータにし、線形渦電流解析を使用して、ECTコイルのインピーダンスを求め、実験により得られたインピーダンス値における材料内部の交流の比透磁率を求める。そして材料内の磁束密度と交流比透磁率とで交流磁場における磁化特性（ $B-\mu_r$ 曲線）

を求めた。本実験ではECT検査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。

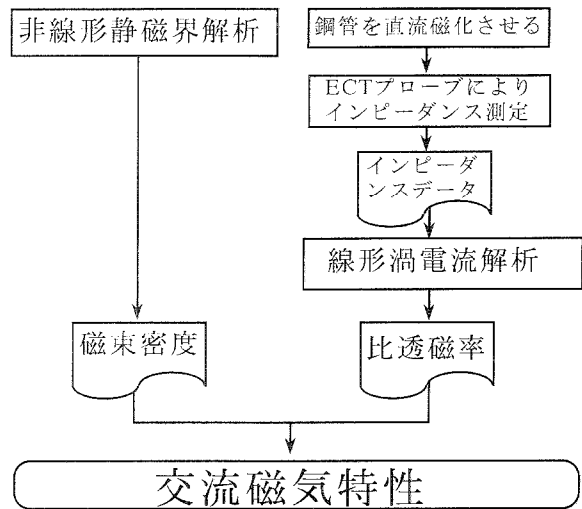


図3 交流磁気特性の測定手順

Fig.3 Flow chart of a alternating magnetization curve measurement

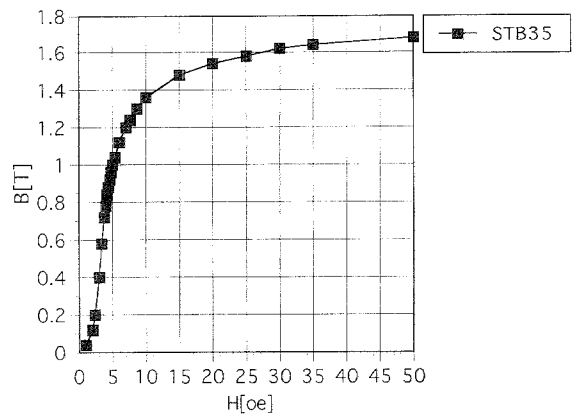


図4 材質STB35の磁化曲線

Fig.4 B-H curve of STB 35

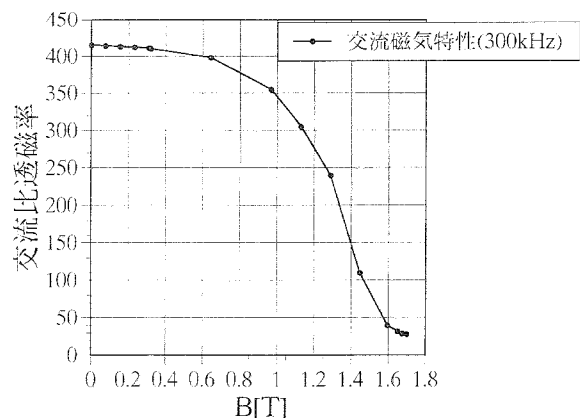


図5 交流磁気特性（ $B-\mu_r$ 曲線）

Fig.5 $B-\mu_r$ curve for alternating magnetic flux

IV 数値解析による磁気ノイズと、き裂評価

本研究では、交流磁化曲線 (Fig.5) を数値解析に使用し、ECTにおける磁気ノイズを求めた。

4.1 解析手順

本研究の磁気ノイズおよび、き裂評価の解析手順を示したフローチャート図をFig.6に示す。強磁性体鋼管のECTにおける磁気ノイズを評価するため、まず有限要素法における強磁性体内の各要素に、最大比透磁率の5~20%の範囲内で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た。次に、永久磁石の直流磁化における強磁性体内部の磁束密度分布を静磁界非線形解析により求め、その磁束密度分布から実験および解析により求めた交流磁化特性 (Fig.5) を使用して、強磁性体内部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線形渦電流解析を使用し、ECT検査プローブに得られるインピーダンスを求め磁気ノイズおよび、き裂の評価を行った。

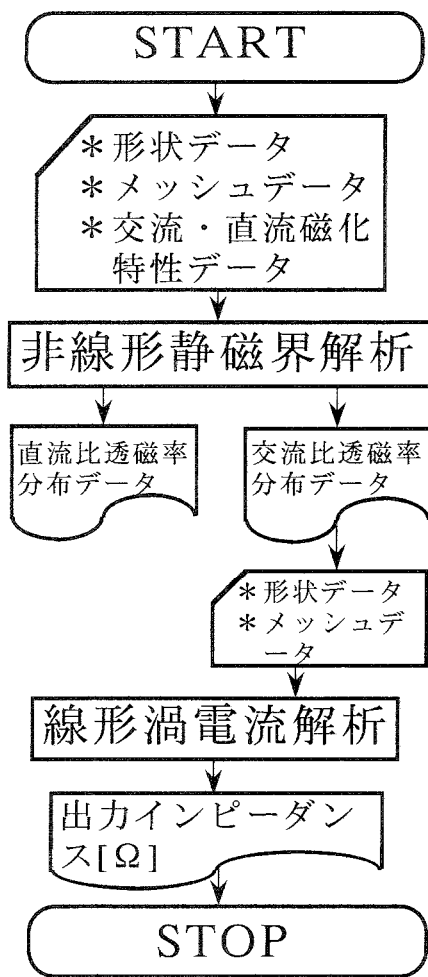


図6 磁気ノイズ解析フローチャート
Fig.6 Flow chart of magnetic noise analysis

4.2 磁気ノイズ解析

4.2.1 解析モデル

実機検査に適応可能な検査プローブを考慮し、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できない。また管内を通ずECT検査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、比透磁率を1にし、磁気ノイズを消すことは物理的に不可能である。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、初期透磁率のばらつきを抑え、磁気ノイズを低減させた上でECTを適用するプローブモデルの検討を行った。その解析モデル図を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プローブを強磁性体鋼管内に挿入したモデルである。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) であり、その形状は、管長220mm、肉厚4.4mmで、導電率は 6.333×10^6 S/m である。この鋼管を内側より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、このECTコイルに使用する励磁周波数は300kHz一定とした。この永久磁石と差動形ECT検査プローブコイルを一体型とし、鋼管内側に設けたき裂の上を非接触で平行に移動させて解析を行った。そのときのECT検査プローブコイルに得られるインピーダンス変化により強磁性体鋼管内側き裂を解析的に評価した。

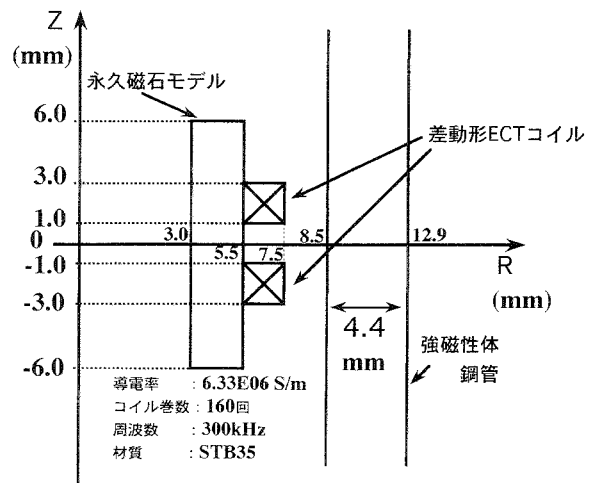


図7 解析モデル
Fig.7 Model of numerical analysis

4.2.2 解析結果および考察

き裂が無い状態で、永久磁石の残留磁気値を0.0、0.5、0.8、1.1Tと変化させたとき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0.0T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、0.8T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り、さらに1.1T時まで増加すると、ほぼ永久磁石の中心部付近では、材料内の交流比透磁率分布のばらつきが抑えられ、値が均一になっていることが理解できる。これより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。

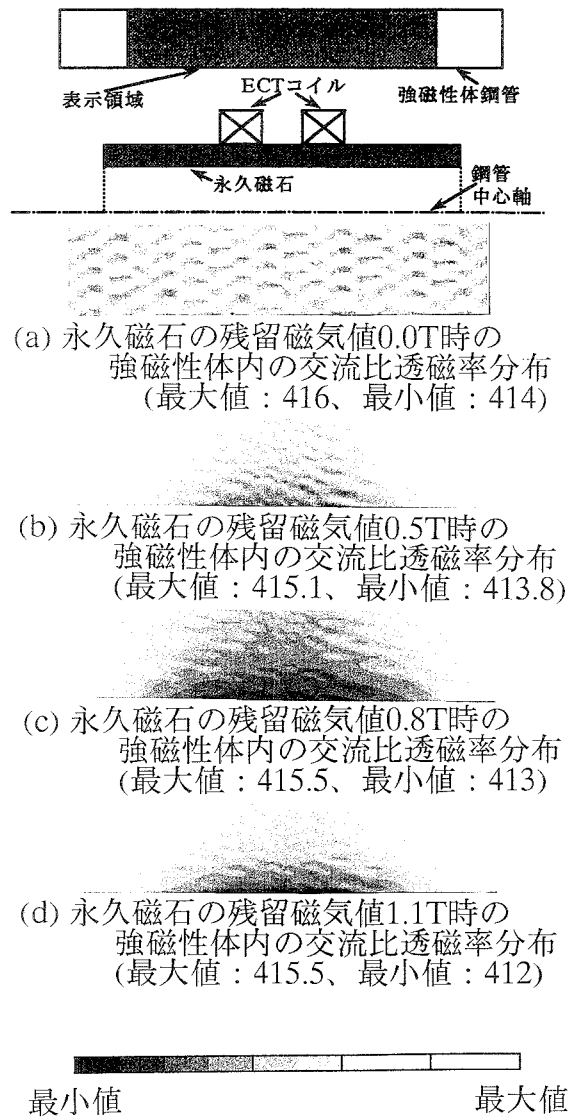


図8 永久磁石の残留磁気値をパラメータにした強磁性体内の交流比透磁率分布

Fig.8 Distribution change of alternating permeability in material

4.3 き裂信号解析

4.3.1 解析モデル

実機検査に適応可能な永久磁石の残留磁気値を検討した。内径が17mmの強磁性体鋼管内に挿入するECT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1.0T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1.1T一定として解析を行った。本研究では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。解析モデルはFig.7を使用し、き裂幅を1、2、4mmと変化させ、永久磁石と差動型ECTコイルを一体型としたプローブをき裂の上をリフトオフ1.0mmを保ったまま平行に移動させたときのECTコイルに得られるインピーダンス解析を行った。なお、ECTコイルの励磁周波数は300kHz一定とした。

4.3.2 解析結果および考察

き裂幅を変化させたときの強磁性体内部の交流比透磁率分布変化の解析結果をFig.9に示す。

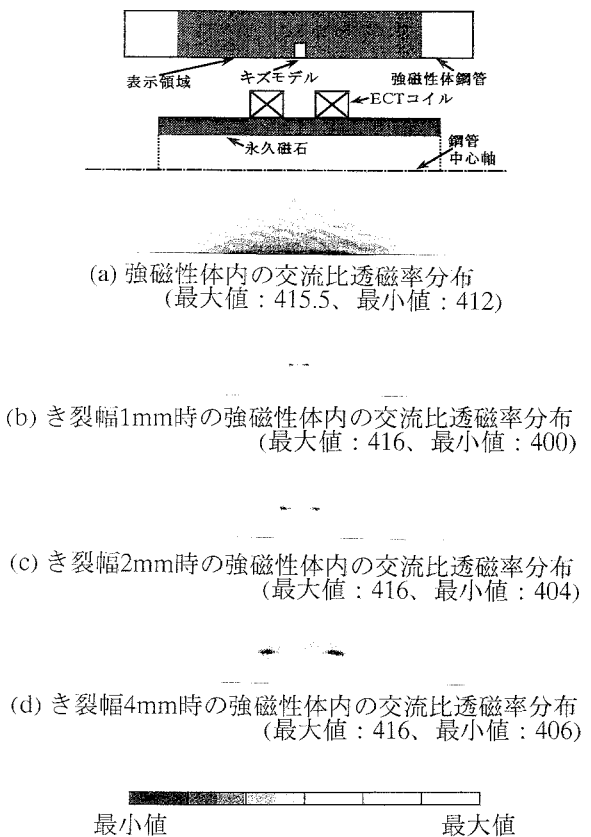


図9 き裂幅変化による交流比透磁率分布 (永久磁石の残留磁気値1.1T一定)

Fig.9 Distribution of alternating permeability near crack in material (Remanence of permanent magnet:1.1T)

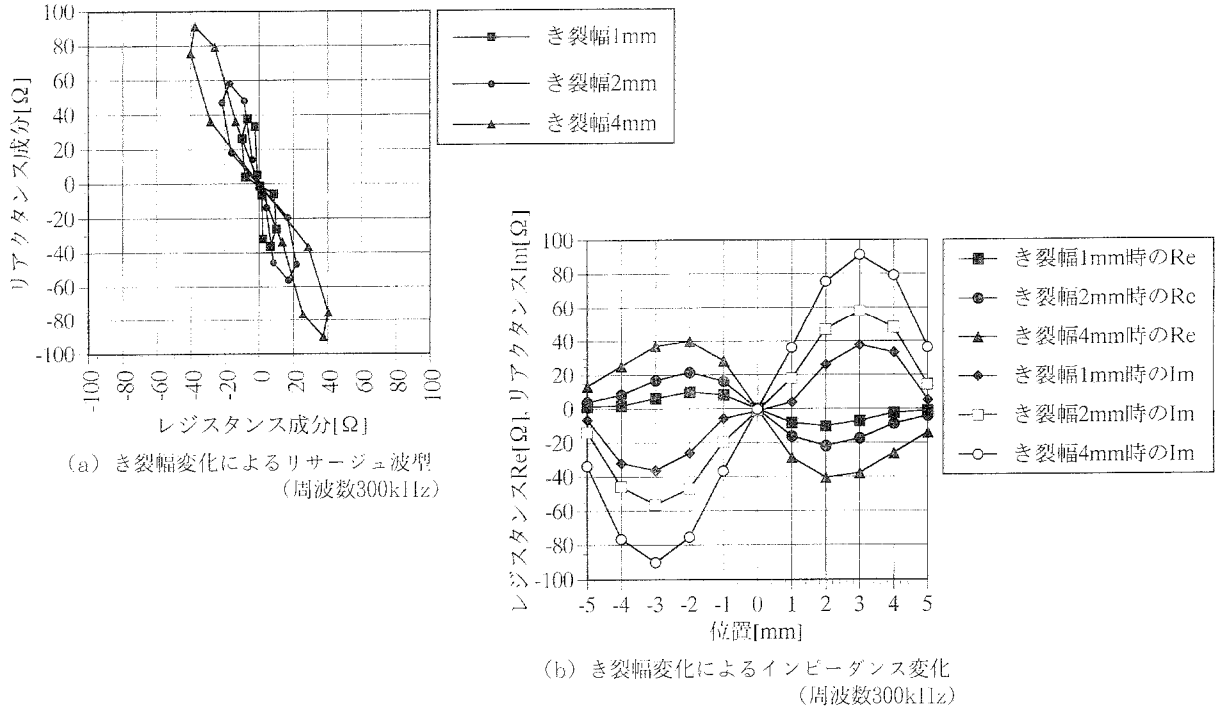


図10 き裂幅変化によるECT信号
Fig.10 ECT signal of change crack width

き裂が存在しないときは、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できる。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。また、このときのき裂によるインピーダンスのX成分、Y成分および、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できる。またリサージュ波形より、き裂の幅変化による振幅の変化や位相差が現れていることも合わせて理解できる。

V 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および、実験を行い、未飽和磁化ECTプローブの適用性の検討を行った。実験に用いた検査プローブは通常ECT検査プローブおよび、残留磁気値1.1Tの永久磁石を挿入したECT検査プローブ(未飽和磁化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、測定装置の外観図をFig.12にそれぞれ示す。

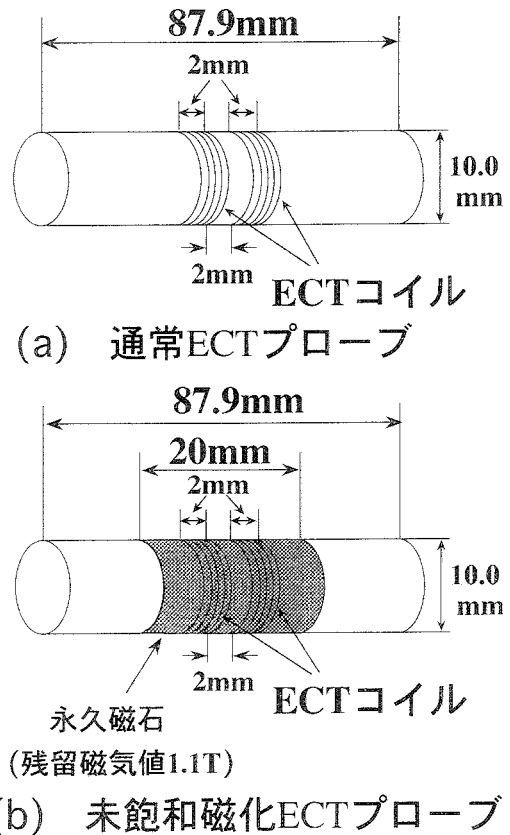


図11 通常ECTと未飽和磁化ECTプローブ
Fig.11 Model of normal ECT probe and unsaturated magnetization ECT probe

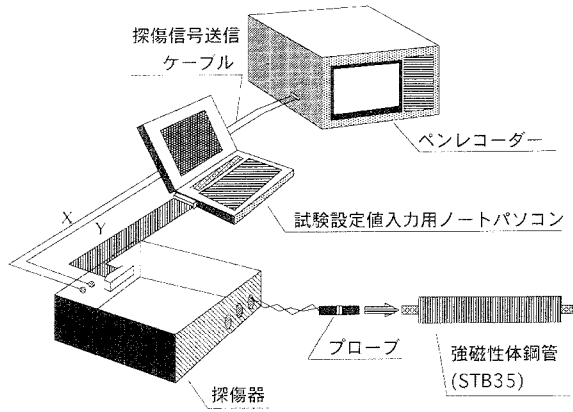


図12 実験装置の外観図

Fig.12 Model of verification experiment

なお、これらのプローブのコイル巻数、周波数、強磁性体材料は解析時のものと同じにした(Fig.7)。また、検査を行ったき裂の大きさは、3φおよび5φの貫通き裂とした。実験により得られたき裂によるインピーダンスのX成分、Y成分をFig.13に示す。通常ECT検査プローブによる探傷結果は、5φの貫通き裂信号のX成分では大きく検出できてはいるが、3φの貫通き裂信号のX成分では、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Y成分に関しては、磁気ノイズの振幅が大きく現れているため、どれがき裂の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、残留磁気値1.1Tの永久磁石を挿入した未飽和磁化ECTプローブによる探傷結果ではX成分、Y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、より鮮明に表していることが理解できる。

VI まとめ

強磁性体鋼管の内面非破壊検査法により得られた結果を以下に示す。

- (1) 強磁性体内の交流磁場印加時における交流磁気特性を、静磁界非線形解析と線形渦電流解析を併用することにより求めることができた。
- (2) 強磁性体を磁化させたとき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) 実験および解析により、未飽和領域磁化によるECT検査の有用性を示した。
- (4) 未飽和領域磁化によるECTは、磁気飽和させない

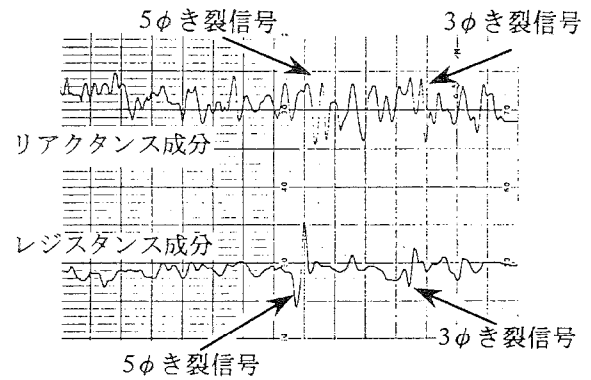
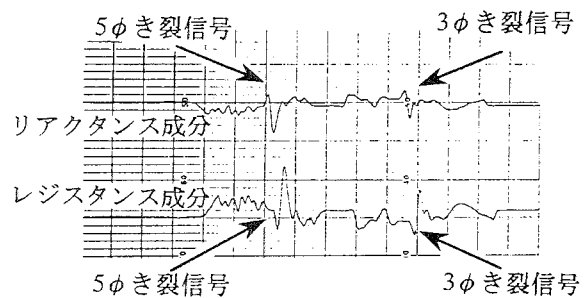
(a) 通常ECTプローブによる実験波形
(周波数：300kHz、キズ：3φ、5φ貫通)(b) 未飽和磁化ECTプローブによる実験波形
(周波数：300kHz、キズ：3φ、5φ貫通)

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

程度の磁化力のため、検査プローブの強磁性体鋼管への吸着が少なく、実際の検査作業で扱いやすい手法であることが分かった。

[参考文献]

- (1) 後藤雄治、福富広幸、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、春季大会講演概要集、1995年、pp.191-194
- (2) 後藤雄治、福富広幸、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 講演論文集、

- 1995年、pp.193-196
- (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, U.S.A, 1996年、pp.265-268
- (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資料、1996年、pp.165-169
- (5) 後藤雄治、橋本光男: 未飽和領域磁化による磁性管ECTのノイズ低減シミュレーション、第4回職業能力開発研究発表講演会講演論文集、1996年、pp.93-94
- (6) 後藤雄治、橋本光男: 未飽和磁化による厚肉鋼管ECTのノイズ低減数値解析、(社)日本非破壊検査協会、平成9年度秋季大会講演概要集、1997年、pp.85-88