

リモートフィールド法を使用した鋼管き裂検査

岡山職業能力開発短期大学校 後 藤 雄 治
職業能力開発総合大学校 橋 本 光 男

Inspections of Steel Tubes using Remote Field Eddy Current Testing

Yuji GOTOH, Mitsuo HASHIMOTO

要約 我が岡山職業能力開発短期大学校は、鉄鋼や石油化学、自動車関連メーカーの密集した水島工業地帯に隣接し、地域産業の支援事業展開を推進している。これらの各種プラントでは大量の配管が用いられている。プラント内の配管は、使用される環境に起因した様々なき裂が生じる。万が一それらのき裂が進み、設備の破損につながるようなことがあると、直接大きな災害に結び付く可能性があり、深刻な事態をもたらす恐れがある。そのため近年では、プラントの信頼性や安全性を確保できるよう、損傷程度を推定するき裂検査技術向上のニーズは高まりつつある。配管保守検査には、安価でしかも高速にかつ非接触で検査が行えるといった利点を有する電磁現象を応用した渦電流探傷試験法（Eddy Current Testing : ECT）が有用とされている。しかし検査対象が強磁性体鋼管の場合、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、この手法によるき裂検出は困難である。そこで最近では強磁性体鋼管に適応可能な検査手法として、リモートフィールド渦電流探傷試験法（Remote Field Eddy Current Testing : RF-ECT）が注目されつつある。RF-ECTは励磁コイルと検出コイルを独立させ、励磁コイルからの直接伝搬磁場ではなく、間接伝搬磁場によりき裂検査を行なうことから、材料内の透磁率のバラツキによる影響を受けにくい特徴を持っている。しかし、この手法は現象理解が難しく、検査原理が解明されていないため、検査装置の開発および普及はあまり行なわれていないのが現状である。そこで我々は、有限要素法による電磁界解析と検証実験により、この手法の検査原理の解明を行った。まずベクトルポテンシャル A 分布より、励磁コイルから管軸方向に、管内を直接伝搬する直接磁場と、管外面より再侵入する間接伝搬磁場の分布を解析により確認し、間接伝搬磁場の強度を測定することにより管内外面き裂を同感度で検出できる事を実験および解析で明かにした。さらに通常ECTとの検査比較を行ない、強磁性体鋼管におけるRF-ECTの有用性を確認する事ができた。しかし、この手法は、間接伝搬磁場の強弱を検査に使用するという原理上、鋼管外面に支持棒や冷却フィン等が付着しているケースでは磁気ノイズが発生する可能性があるといった短所があることも理解できた。

I 緒 言

鉄鋼や石油化学プラントにおける熱交換器管及び、復水器には数多くの配管が用いられている。これらの配管の保守検査は、構造的制約上、管内部から検査を行わなければならないため、き裂検査法としては内

挿コイルを用いた渦電流探傷試験（Eddy Current Testing : ECT）による検査方法が実用的である。これは超音波探傷や放射線検査に比べ取り扱いが容易であり、検査速度が速く、装置が安価などの利点も合わせ持っている。従来ECTは、き裂による励磁コイルのインピーダンスまたはその近傍の磁束の変化を検出

して探傷を行うものであった。しかし、検査対象が強磁性体の場合では材料内の透磁率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比が低下するため検出は困難である¹⁾²⁾。そこで、近年では強磁性体鋼管の保守検査法としてリモートフィールド渦電流探傷試験法 (Remote Field Eddy Current Testing : RF-ECT) が注目されつつある³⁾⁴⁾。しかし、この手法は、励磁-検出コイル間隔の設定やき裂による波形変化等の検査原理が厳密には解明されていない。そのためこの検査装置の開発および普及はあまり行われていないのが現状である。そこで我々は、数値解析によりこの手法の検査原理の解明と、き裂検出信号の基礎的データの蓄積、さらに検証実験により通常のECTとの比較を行ない、この検査手法の評価および有用性を示した。

II リモートフィールド渦電流探傷試験法

通常のECTは、管内側に挿入した交流励磁コイルのインピーダンス変化や、励磁コイル近傍 (Near Field Area) の磁束の変化を検出コイル等で検出して探傷を行なう。しかし、配管が炭素鋼のような強磁性体になると表皮効果のため、検出コイルに近い管内側表面におけるき裂は高感度で検出できるが、裏側、管外面き裂に対しては検出できなくなる。また強磁性体は材料内の透磁率が不均一なため、き裂部以外からの磁気ノイズが大きく、S/N比が低下する問題もある。このような強磁性体鋼管の外表面および内面き裂検査手法としてRF-ECTが注目されつつある。Fig.1にRF-ECTの原理図を示す。RF-ECTは励磁コイルと検出コイルの距離を一定に保ったまま管内部を非接触で管軸方向に平行移動させ、き裂探傷を行なう。管内の交流励磁コイルにより発生した直接磁場は管軸方向に進むが、距離が離れるに伴い、指数関数的に減衰する。しかし、励磁コイルより発生した磁場の一部は管外に漏洩し、管軸方向に遠方 (Remote Field Area) まで伝わり、ある距離で再び管内部に戻る。RF-ECTは、この間接伝搬磁場の強弱を検出コイルで検出する仕組みとなっている。検出コイル近傍にき裂が存在すると、この間接伝搬磁場に変化が生じ、出力電圧に変化が生まれるといった原理である。RF-ECTでは材料の透磁率変化による磁気ノイズの影響はあまり無く、管外面き裂を管内面より検査できる特徴を有している。

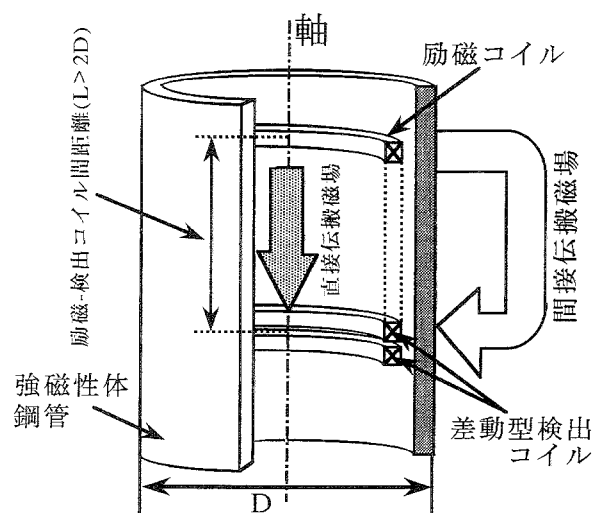


Fig.1 RF-ECT原理図

III 数値解析

1. 交流線形渦電流解析

本研究ではRF-ECTの電磁場現象解明を行なうため、磁気ベクトルポテンシャル A を変数とした軸対称三次元有限要素法を用い、数値解析を試みた。交流線形渦電流解析の支配方程式を以下に示す。

$$\text{rot}(\text{vrot}A) = J_o - J_e \quad (1)$$

$$\text{div}J_e = 0 \quad (2)$$

ここでの渦電流密度 J_e は、

$$J_e = -j\omega\sigma A \quad (3)$$

である。なお A , J_o , J_e , ν , σ , ω はそれぞれベクトルポテンシャル、強制電流密度、渦電流密度、磁気抵抗率 ν ($\nu = \mu_o \times \mu_r$)、導電率、角周波数である。また、本解析で使用した強磁性体は等方性磁性材料とし、透磁率を一定とした線形モデルとして取り扱っている。

2. 解析モデル

解析に用いたモデルをFig.2に示す。RF-ECTは、励磁コイルにより発生した磁束のうち鋼管内側を鋼管軸方向に伝搬する直接磁場が、励磁コイルから離れるに従って急激に減衰するのに対し、鋼管厚肉部に侵入する間接磁場は鋼管軸方向に遠方まで伝わり、鋼管径の2倍程度離れた位置で再び鋼管内部に戻り、その磁束の変化を検出コイルで検出するといった原理である。以上のことから、解析に使用した鋼管の外径は22.0 mmとし、1つの励磁コイルと2つの検出コイルを想定し、検出コイルは差動型をとることにより、2つの

検出コイルの間の空間に侵入した間接磁場のみの評価を行なった。また励磁-検出コイル間の距離を管径の2倍以上の44.5mmとして解析を行った。管厚は1.4mm、励磁周波数は500Hzとした。また材料の導電率は $1.833 \times 10^6 \text{ S/m}$ 、比透磁率は236の線形として解析を行った。

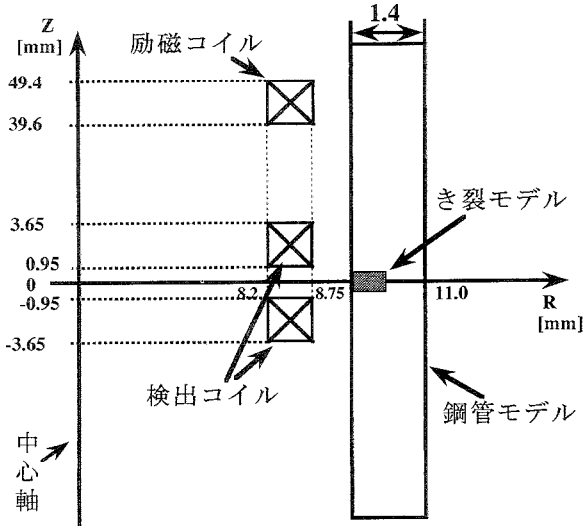


Fig.2 解析モデル

3. 解析結果

3.1 管内外面の誘導電圧分布

Fig.2に示す解析モデルで、管内外面に分布する誘導電圧を模擬する rA 分布を解析的に求めた。誘導電圧は有限要素法の各要素における rA を求めることにより得られる。これはその点にコイルを置いたときの誘導電圧に等しい。コイル一巻分の誘導電圧 V はベクトルポテンシャルを用いて次式で表すことができる。

$$V = \int_s \frac{\partial B}{\partial t} ds = -j\omega \oint_s A_s ds \quad (4)$$

ここでの s はコイルの巻き線に沿った積分経路、 ω 、 B はそれぞれ角周波数、磁束密度である。また本研究では軸対称三次元解析を用いているため、ベクトルポテンシャルは周回方向成分のみを有し、かつその値は周回方向に変化しない。従って、各要素における半径を r とすると(4)式は次式として表すことができる⁵⁾。

$$V = -j\omega 2\pi rA \quad (5)$$

上式の $-j\omega 2\pi$ は定数であるので、解析の容易性から本研究では管内外面に分布する z 軸方向の誘導電圧を rA で模擬して表した。その結果をFig.3に示す。Fig.3の横軸はFig.2解析モデル図の z 軸座標を表し、縦軸に管内外面における rA の値を示している。この図から励磁コイル近傍（Near Field Area）では管内

の誘導電圧は管外より2桁高いことが判る。しかし管内の誘導電圧は励磁コイルから離れるにつれ、急激に降下する。一方管外の誘導電圧はゆるやかに降下していることが理解できる。励磁コイルから20mm以上離れると管内の誘導電圧値は管外の誘導電圧値より低くなり、直線的に減衰することが理解できる。しかし、管径の約2倍である励磁-検出コイル間隔40mm付近から、少し電圧値が上がり、その後は緩やかな減少傾向を示している事が理解できる。これは、励磁-検出コイル間隔40mm付近から間接磁場が侵入していると考えられる。この励磁-検出コイル間隔が40mm以降の領域がリモートフィールド領域（Remote Field Area）と呼ばれ、間接伝搬磁場の侵入を計測することにより、管減肉が測定されることになる。この結果では横軸0mmの位置で、管内の電圧波形が谷を作っているが、これは特定の周波数において生じるもので、直接伝搬磁場と間接伝搬磁場の位相が180度近くずれているときに生じる。この結果は rA の位相をプロットしたFig.4からよく理解できる。

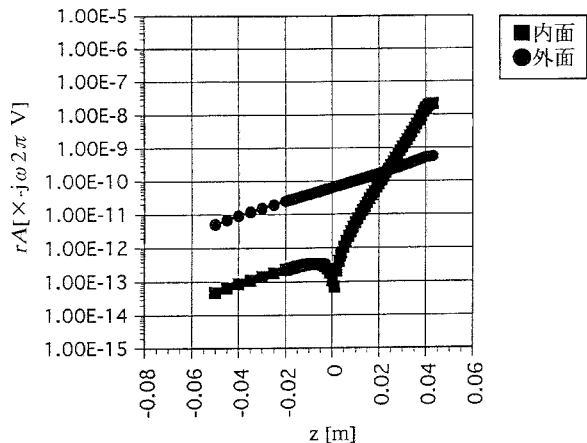
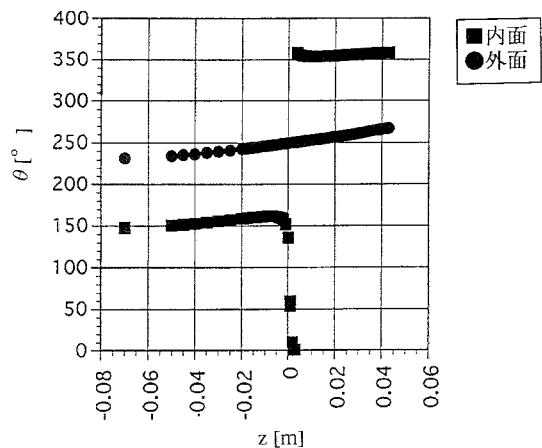
Fig.3 管内外面の rA 分布（周波数：500Hz）

Fig.4 管内外面の位相分布

3. 2 磁束分布（ベクトルポテンシャル表示）

材料内および空間に分布する磁束分布を解析的に求めた。軸対称三次元場における各要素における磁束 ϕ は、半径を r 、 ds を積分路上 θ （軸対称三次元場では周回方向）の微小ベクトルとしたとき、ベクトルポテンシャル A を使用し次式で表す事ができる。

$$\phi = \oint_{\theta} A \cdot ds = 2\pi r A \quad (6)$$

よって上式から磁束分布をベクトルポテンシャル A で模擬することができる。その結果をFig.5に示す。

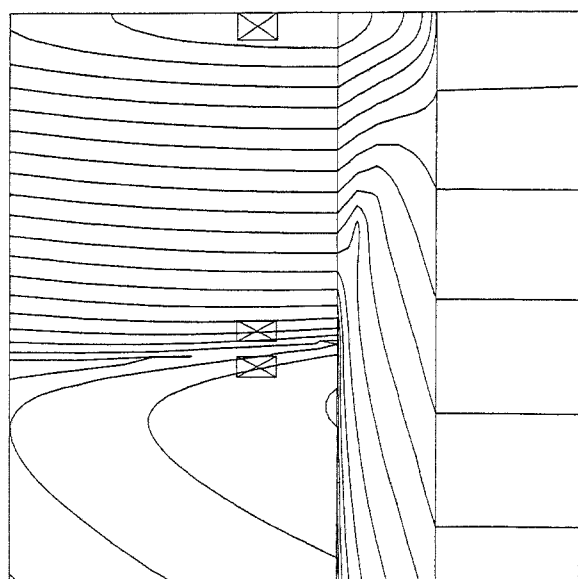


Fig.5 ベクトルポテンシャルA分布

このコンターラインはベクトルポテンシャル A を指数でプロットしたものである。管の内側の励磁コイルからベクトルポテンシャルが急激に減衰している様子が理解できる。逆に管外ではゆるやかに減衰している。励磁コイルから離れた領域では管外部のベクトルポテンシャルが管の内側に向かって分布していることが理解できる。Fig.6は、このベクトルポテンシャル A の位相をプロットしたものである。Fig.3の谷の部分にあたる場所では位相が大きく変化していることが分かる。これらの結果から、RF-ECTでは管内の励磁コイルからの直接磁場が急激に減衰する理由は、励磁コイル近傍における管内側に渦電流が発生するため、渦電流により発生する磁場で直接磁場が打ち消されるためであり、同時に位相も変化することが考察できる。

3. 3 RF-ECTのき裂信号解析

励磁-検出コイル間隔を一定に保ったまま、き裂を有する管内面を z 軸方向に移動させた時の差動型検出

コイルに得られる出力電圧の解析を行なった。解析モデルはFig.1とし、2つの差動型検出コイルに得られる出力電圧は(5)式を使用した。

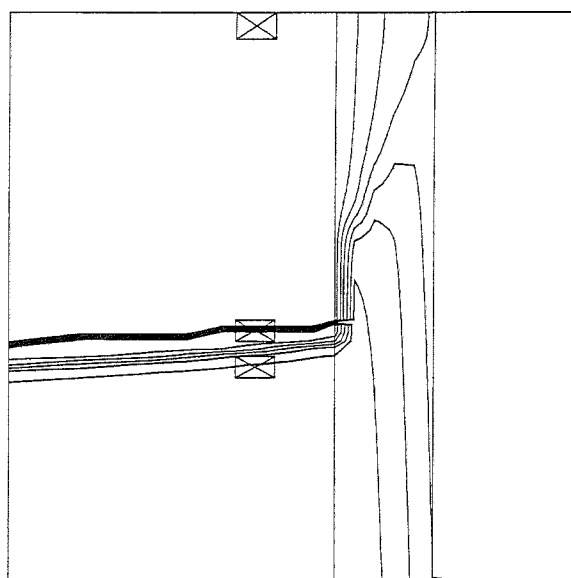


Fig.6 ベクトルポテンシャルAの位相分布

3. 3. 1 き裂深さ変化

き裂深さをパラメータにしたときの出力電圧評価を行なった。解析結果をFig.7~12にそれぞれ示す。Fig.7~9は外面き裂、Fig.10~12は内面き裂である。き裂幅を2mm一定とし、深さを管内外面より肉厚に対し20~80%と変化させ、励磁-検出コイル間隔を一定に保ったまま管内を z 軸方向に平行移動させた時の差動型検出コイルに出力電圧として得られた信号解析結果である。なお、Fig.7、10は出力電圧のレジスタンス成分、Fig.8、11はリアクタンス成分、Fig.9、12は絶対値をリサージュ波形に表した結果である。これらの結果から管内外面き裂共に、き裂深さが深くなるにつれて、信号の振幅値が大きくなる様子が理解できる。またFig.9、12の振幅の大きさ（波形の長さ）がほぼ同じことから、RF-ECTでは管内面および外面き裂の両者ともほぼ同感度で信号が得られ、管内側から管外面き裂も検出が可能であることが理解できる。また同じくFig.9、12から、き裂深さ変化に伴い、信号の振幅だけでなく位相角にも変化が現れ、き裂深さに比例して位相が左に回転することが同時に理解できる。また、管外面き裂は内面き裂に比べ、リサージュ波形がシャープに現れることが分かる。

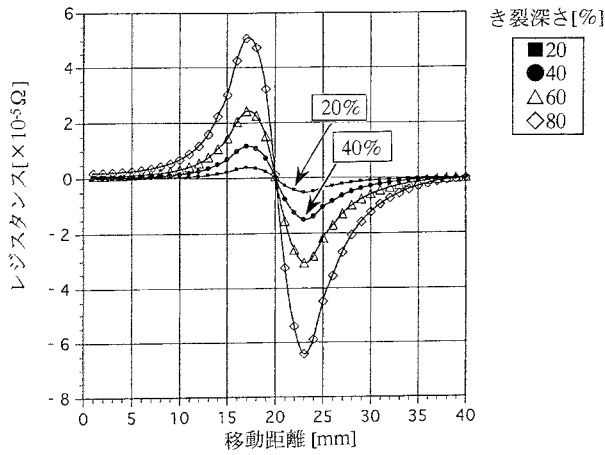


Fig.7 外面き裂によるレジスタンス成分
(き裂幅 2 mm、深さ20~80%)

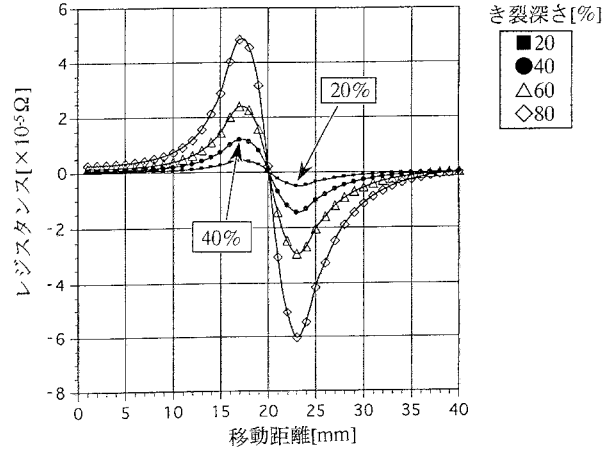


Fig.10 内面き裂によるレジスタンス成分
(き裂幅 2 mm、深さ20~80%)

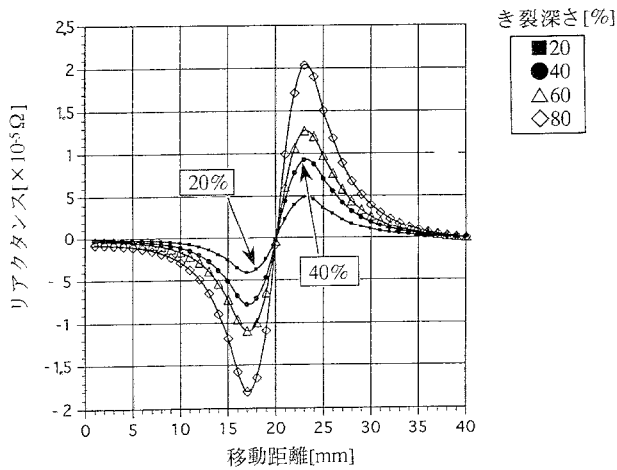


Fig.8 外面き裂によるリアクタンス成分
(き裂幅 2 mm、深さ20~80%)

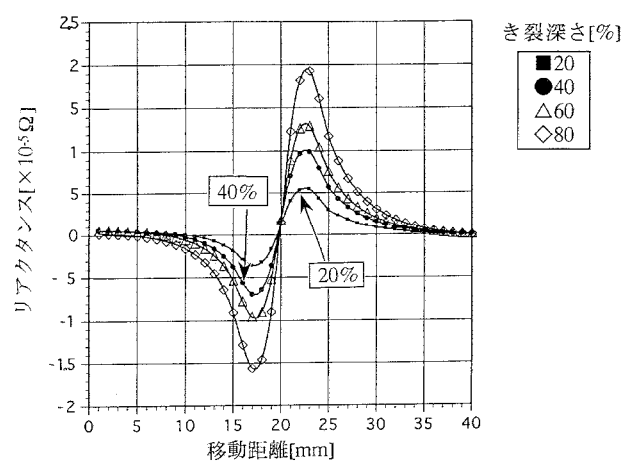


Fig.11 内面き裂によるリアクタンス成分
(き裂幅 2 mm、深さ20~80%)

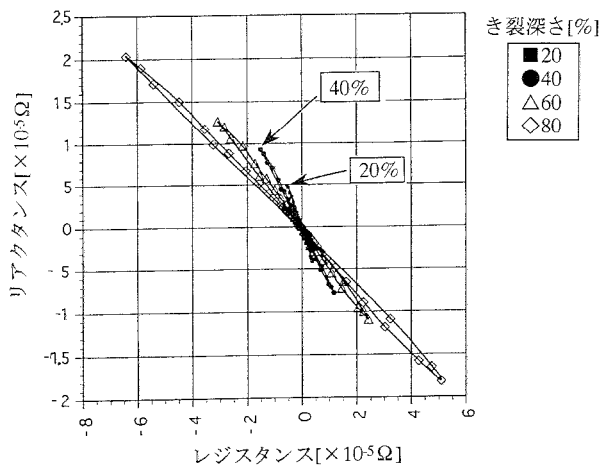


Fig.9 外面き裂によるリサージュ波形
(き裂幅 2 mm、深さ20~80%)

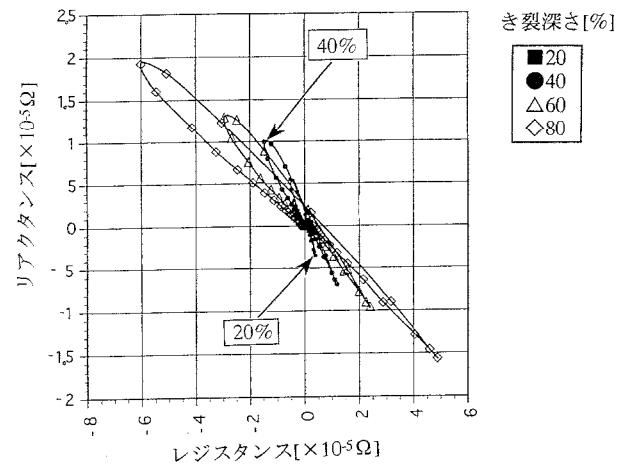


Fig.12 内面き裂によるリサージュ波形
(き裂幅 2 mm、深さ20~80%)

3. 3. 2 き裂幅変化

次にFig.13～18は、管内外面よりき裂深さを肉厚に対し60%一定とし、き裂幅を1～5mmに変化させたときの解析結果を示す。Fig.13～15は外面き裂、Fig.16～18は内面き裂である。またFig.13、16は出力電圧のレジスタンス成分、Fig.14、17はリアクタンス成分、Fig.15、18は絶対値をリサージュ波形に表した結果である。これらの結果から、き裂検出波形のピーク間の距離は、き裂幅1mm時で5mm、き裂幅5mm時で7.5mmとなることが分かる。いまき裂波形のピーク幅を次の様に近似するとする。

$$\text{き裂波形ピーク幅} = \text{き裂幅} / 2 + \text{検出コイル幅} \quad (7)$$

2つの差動型検出コイルの中心幅は4.6mmであるので、これを上式に代入すると、き裂幅1mm時でピーク幅5.1mm、き裂幅5mm時で7.1mmとなるので、ほぼこの(7)式に合うことが分かる。よって出力電圧波形ピーク幅からき裂幅が評価できることがわかる。次にFig.15、18のリサージュ波形から、深さが一定であれば、両者ともほぼ一樣な位相を示すことが判る。しかし、Fig.18の内面き裂波形に関しては、き裂幅が大きくなるにしたがい、第2象限および第4象限の波形の対称性が崩れる傾向にある。このため位相判定の誤差が大きくなることが考えられる。今後励磁コイルと検出コイル間の変化等においてこの波形の改善が得られるか検討したい。

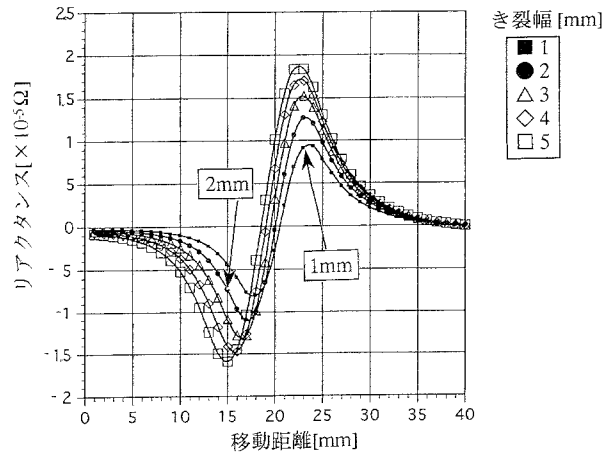


Fig.14 外面き裂によるリアクタンス成分
(き裂幅1～5mm、深さ60%)

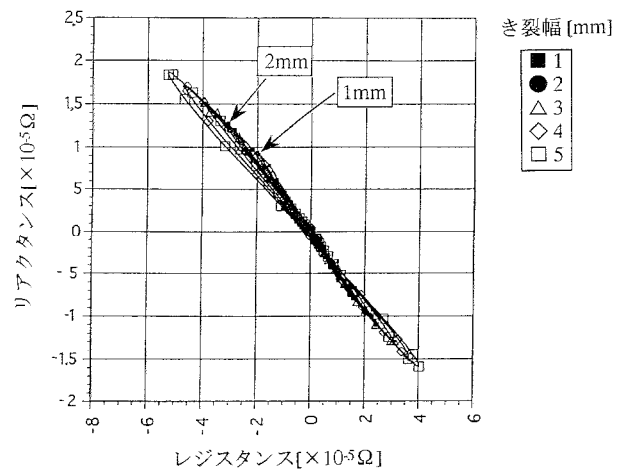


Fig.15 外面き裂によるリサージュ波形
(き裂幅1～5mm、深さ60%)

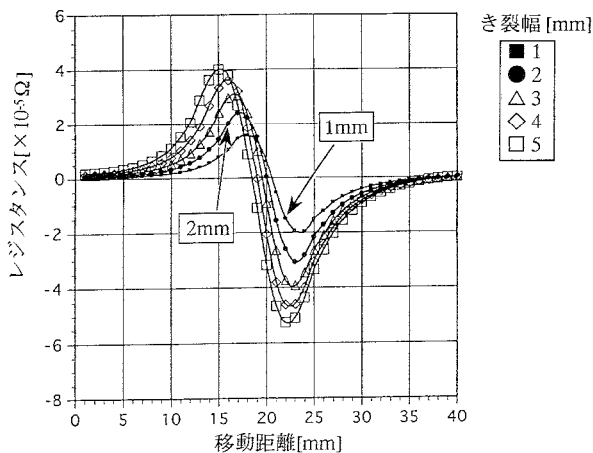


Fig.13 外面き裂によるレジスタンス成分
(き裂幅1～5mm、深さ60%)

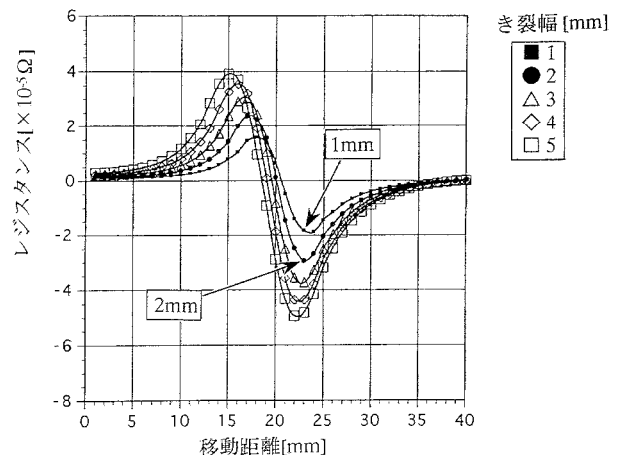


Fig.16 内面き裂によるレジスタンス成分
(き裂幅1～5mm、深さ60%)

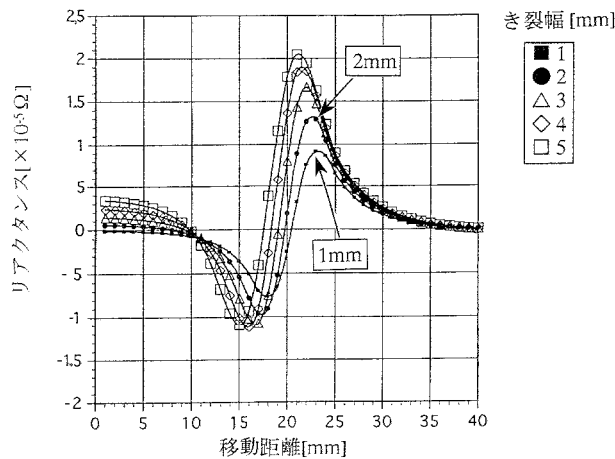


Fig.17 内面き裂によるリアクタンス成分
(き裂幅 1 ~ 5 mm、深さ60%)

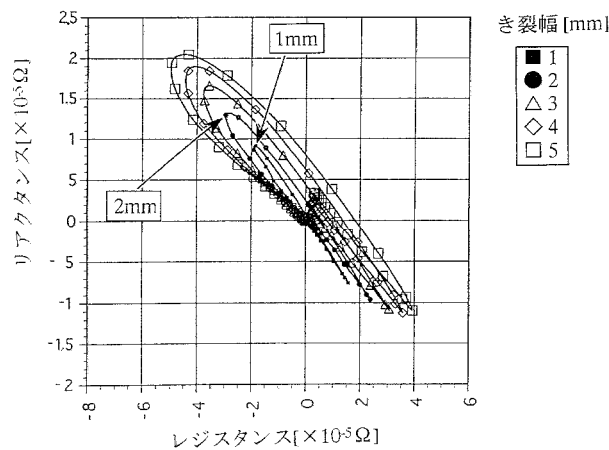


Fig.18 内面き裂によるリサージュ波形
(き裂幅 1 ~ 5 mm、深さ60%)

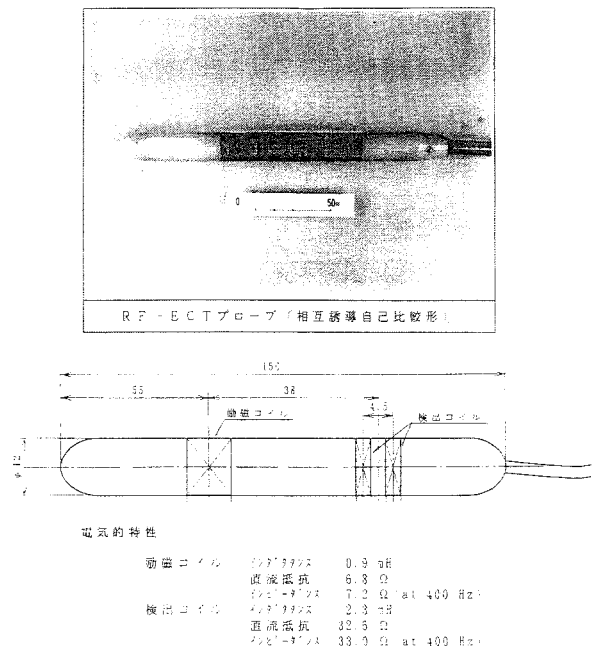
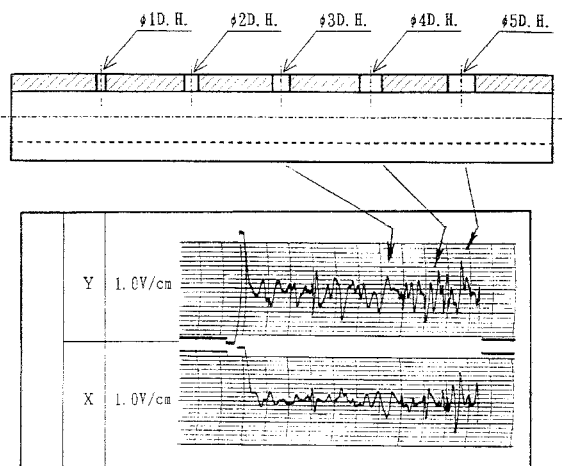
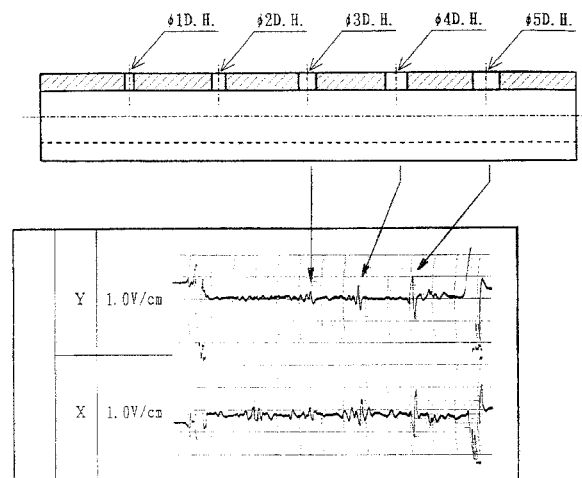


Fig.19 実験に使用したリモートフィールド ECTプローブ外観図



(a) 通常ECTによる検査波形 (1 kHz)



(b) リモートフィールドECTによる検査波形 (500Hz)

Fig.20 通常ECTとリモートフィールドECTとの比較

IV 検証実験による評価

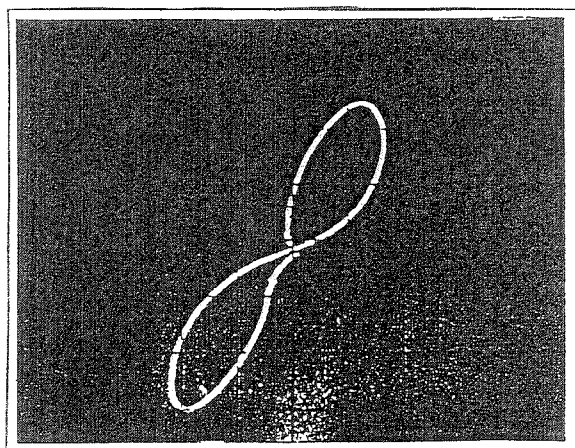
1. 通常ECTとRF-ECTの比較

実機検査による検証実験を行った。実験に用いた検査プローブは通常ECTプローブ及び、RF-ECT検査プローブの2種類である。RF-ECT検査プローブの寸法をFig.19に示す。検査する鋼管は、直径が19 ϕ で管厚が2.1mmの鋼管を使用した。検査鋼管の直径が19mmであることから、プローブの励磁コイルと検出コイルの距離を管径の2倍の38mmとした。検査周波数は、通常ECTは1kHzでRF-ECTでは500Hzとした。またき裂の大きさは1、2、3、4、5 ϕ の貫通き裂とし、それぞれの検査手法での探傷試験を行った。その実験結果をFig.20にそれぞれ示す。

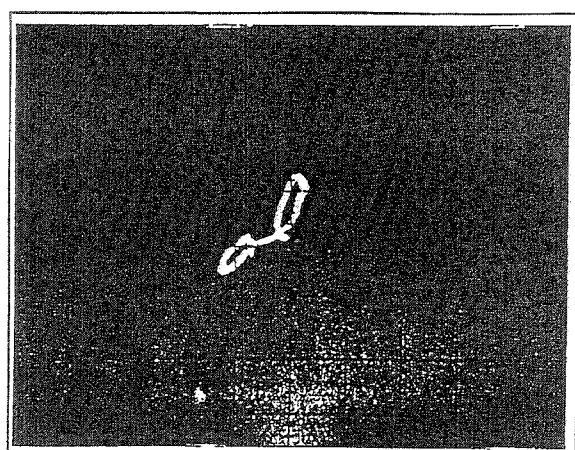
通常ECTプローブによる探傷結果は、X成分、Y成分共に、磁気ノイズの振幅が大きく現われているため、どれがき裂による信号なのか全く見当がつかない結果となっている。しかし、RF-ECTでは1、2φといった幅の狭いき裂は難しいものの、3、4、5φのき裂に対しては信号が得られていることが理解できる。

2. RF-ECTによる内外面き裂波形比較

Fig.19のプローブおよび、直径が19φで管厚が2.1mmの鋼管を使用し、管内外面き裂検査における信号波形の比較を行なった。検査したき裂の大きさは内外面共に幅4φとし、深さをそれぞれ管厚に対し20および40%の深さを付いた。また周波数は500Hz一定として行なった。実験結果（リサージュ波形）をFig.21、22にそれぞれ示す。

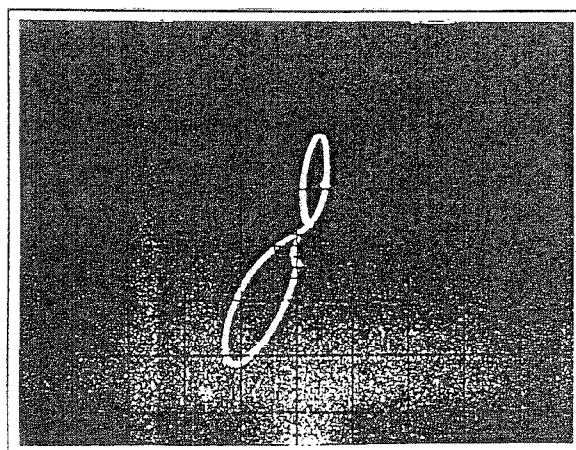


(a) 内面き裂（4φ、深さ20%）

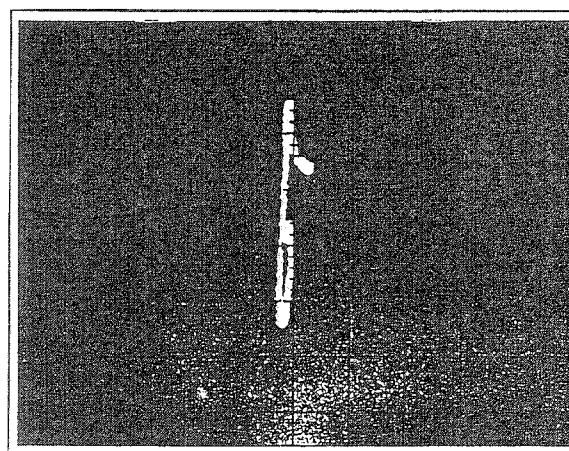


(b) 外面き裂（4φ、深さ20%）

Fig.21 実験リサージュ波形



(a) 内面き裂（4φ、深さ40%）



(b) 外面き裂（4φ、深さ40%）

Fig.22 実験リサージュ波形

解析では軸対称三次元解析のため、き裂モデルは周方向一様のスリット状となるため、局部き裂モデルであるこれらの実験結果とは同条件での比較検討はできないが、Fig.21、22両者とも解析同様、外面き裂は内面き裂よりシャープな波形として検出されていることが理解できる。またFig.21では、内面き裂の方が外面き裂に比べ振幅が大きく評価されているものの、Fig.22のようにき裂深さが肉厚に対し40%と深くなると、き裂内外面は両者ともほぼ同感度で検出できることが合わせて理解できる。

V まとめ

強磁性体鋼管検査におけるRF-ECT法の電磁界解析を行った。これにより、磁場分布及び信号変化の振る舞いが明確になった。また検証実験によりこの手法の

有用性を示すことができた。主な結果を次にまとめて示す。

- (1) 管内外面の磁場分布を明らかにし、管内を直接伝搬する直接磁場と、管外面を通り、管軸方向に遠方まで伝わる間接磁場の振る舞いが明確になった。直接伝搬磁場は、励磁コイル近傍の管内に生じる渦電流により磁場が妨げられ指数関数的に減衰する。しかし厚肉部を通る間接伝搬磁場は緩やかに減衰する。励磁コイルより管径の約2倍程度離れた領域（Remote Field Area）では、間接伝搬磁場が支配的であることが理解できた。
- (2) 解析によりき裂深さに比例して出力電圧の位相が変化することが分かった。またき裂の体積に比例して信号強度が変化することが合わせて理解できた。これらは内外面き裂両者とも同様の傾向を示すことが分かった。
- (3) き裂幅については、検出信号からき裂幅が推定できることが解析により示すことができた。
- (4) 実験により通常ECT法とRF-ECT法との比較から、RF-ECT法の有用性を示すことができた。しかし間接伝搬磁場の強弱により、き裂評価を行うといった原理上、小さなき裂に対しての検出は難しく、また鋼管の外側に冷却用のフィン等が付着している場合には磁気ノイズが発生する可能性があり、適用は難しいことが予想される。

演概要集、pp.341-344（1998）

- (5) 中田高義、高橋則雄：電気工学の有限要素法（第2版）、森北出版（1982）

【参考文献】

- (1) 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法、電気学会論文誌A（基礎・材料・共通部門）、Vol.117-A、NO.7、pp.761-766（1997）
- (2) Y.Gotoh and M.Hashimoto：Approximate Numerical Analysis Method of Alternating Magnetic Flux Leakage Testing、International Symposium on Non-Linear Electromagnetic Systems、V.Kose and J.Sievert（Eds.）IOS Press、pp.193-196（1998）
- (3) 福富広幸、高木敏行、黄皓宇、谷順二：非磁性体に適用するリモートフィールドECTの3次元渦電流解析、第7回MAGDAコンファレンス講演論文集、日本AEM学会、pp.99-102（1998）
- (4) 福富広幸、高木敏行、谷順二、西川雅弘：非磁性管におけるリモートフィールドECTの数値解析、（社）日本非破壊検査協会平成10年度春季大会講