

内面チタンコーティング管に適用する 渦電流探傷試験法の数値解析評価

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

Numerical Analysis Evaluation for ECT of Inner Titanium Coating Tubes

Yuji GOTOH, Mitsuo HASHIMOTO

要約 我が岡山職業能力開発短期大学校は瀬戸内海に隣接する水島工業地帯にほど近く、能力開発セミナーやF方式等を通し、地元産業界の支援事業を行なっている。工場地帯には電力供給のため数多くの発電所や各種プラントが隣接し、それに伴う膨大な量の配管が使用されている。これらの配管は長時間苛酷な腐食環境下で使用されているため、寿命が短く、頻繁に交換が必要となる。そのため近年では、これらの配管には腐食に強く寿命の長いチタン材の適用が検討されている。しかし、管全てをチタン材で製造するにはコストがかかるため、特に腐食の激しい管内面をチタン材でコーティングする様になってきた。

従来、各種プラント内の熱交換器管検査には渦電流探傷試験法(Eddy Current Testing : ECT)が適用されてきた。これは交流電流を流したコイルを被試験体表面に近づけ、導体内に電磁誘導による渦電流を発生させ、き裂による渦電流の変化をコイルのインピーダンス等により測定する手法であり、高速でかつ非接触で検査が行えるといった利点を有している。しかし管内面をチタンでコーティングした管にECT検査は適用が難しい。なぜなら管内面のチタン層内外部の導電率の差が大きく、特にチタンの導電率は値が小さいため、渦電流は管のチタン層内部では発生しないので、チタン層部にあるき裂信号はチタン層外部き裂信号に比べ小さくなるからである。そこで我々はこの様な管にも適用可能なECTの改良を行なった。その結果ECTの励磁周波数を500kHz程度まで上げることにより探傷が可能となり、チタン層内外のき裂判別も可能になることが数値解析および検証実験により確かめられたので報告する。

I はじめに

各種プラント等に使用されている配管は、使用される環境に起因した様々なき裂や腐食が生じる。それらが進み、設備の破損につながると、そ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、近年ではプラント内の熱交換器細管等には、腐食を抑え耐久性を高めるため、管内面に腐食に強く

薄肉のチタンを圧着した管なども使用されつつある¹⁾。しかし、プラントの健全性や安全性を確保するには、保守検査として管内部の損傷程度を推定する探傷検査や減肉検査は必要不可欠であり、その技術の高度化のニーズはますます高くなってきている。各種プラントの熱交換器細管検査には、高速でかつ非接触で探傷が行える渦電流探傷試験法 (Eddy Current Testing) が有用である^{2) 3)}。しかし、管内側にチタンを圧着し

た、導電率の異なる材質で構成される二重構造管検査の評価は行われていない⁵⁾。そこで、本研究では数値解析を用い、内面チタン二重管の減肉検査に適応可能なECT最適検査条件の検討を行った。

II 内面チタン二重管のECT解析

本稿では、内面をチタン材でコーティングした配管内に、管周回方向に銅線を巻いた2つのコイルで構成されたプローブ（差動ピン型ECTプローブ）を挿入し、2つのコイルにそれぞれ位相が180度反転させた交流電流を流すモデルを検討した。2つのコイルに交流電流を流した時の電流波形ピーク時におけるコイルのインピーダンスおよび、管内部に発生する渦電流密度等を軸対称三次元有限要素法を使用した交流電磁界解析により評価した。その基本方程式および電磁界解析条件、解析結果を次項より示す。

2.1 交流電磁界解析基本方程式

本解析では磁気ベクトルポテンシャルAを変数とする軸対称三次元有限要素法を用いた。交流電磁界解析の支配方程式を以下に示す。

$$\text{rot}(\nu \text{ rot}A) = J_0 - J_e \quad \dots\dots\dots (1)$$

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

なおA、J₀、J_e、ν(ν=1/(μ₀×μ_r))はそれぞれ磁気ベクトルポテンシャル、強制電流密度、渦電流密度、磁気抵抗率である。ここでの渦電流密度J_eは、次式で表される。

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

ここで、ω、σは角周波数及び導電率である。軸対称三次元モデルの交流電磁場における汎関数χは次式で表される。

$$\chi = \frac{1}{2} \int_V \nu \left[\left(\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{A_\theta}{r} + \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right)^2 \right] 2\pi r dr dz - \int_S \left(J_{s\theta} - \frac{1}{2} J \omega \sigma A_\theta \right) A_\theta 2\pi r dr dz \quad \dots\dots\dots (4)$$

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。軸対称三次元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A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。

$$Z = \frac{-j\omega N_t \oint_C A_c dl}{I} \quad \dots\dots\dots (5)$$

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。

2.2 解析条件

本稿では各種プラントの熱交換器で使用されている、内面をチタン材でコーティングした管の減肉検査のためのECT解析を行った。解析では、まず差動型プローブの2つのコイルに流す励磁周波数を変化させたとき、管内部に発生する渦電流密度分布を評価した。次に、管内側から様々な深さのキズを想定したときのプローブコイルに得られるインピーダンスの解析を行なった。解析に使用した配管モデルは、黄銅（C6871）および白銅（C7060）材で構成された管内側に厚さ0.3mmのチタン材（TTH35w）を圧着した、異なる2種類の材質で構成される管である。解析モデル図をFig. 1に示す。解析は軸対称とするためFig. 1はz軸を管軸とし、1/2領域のみを示している。2つのコイルに流れる電流はz軸を中心とした周回方向であり、差動型をとるため、それぞれ流れる方向は逆向きとなる（位相180度反転）。管の外径は32.0mmで、管厚は2.0mmである。また、2つのコイルの巻数はそれぞれ60ターンで、

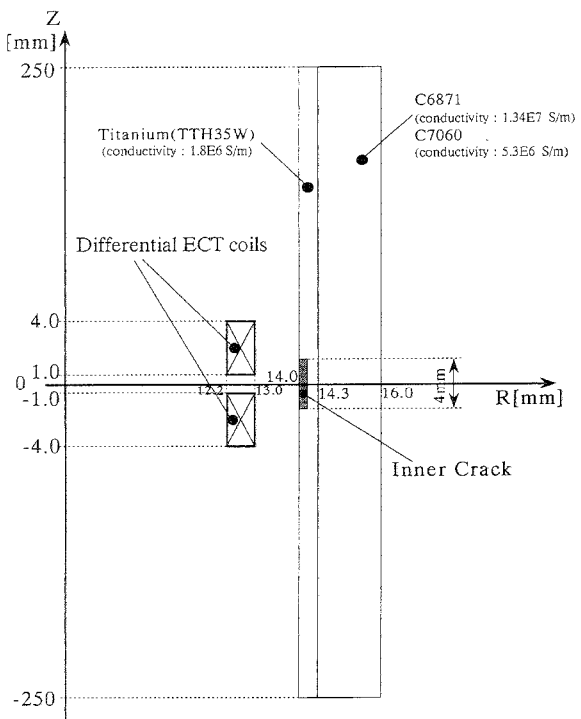


Fig. 1 Model of numerical analysis

リフトオフ（管内表面からコイルまでの距離）は1.0 mmである。なお黄銅（C6871）、白銅（C7060）およびチタン材の導電率はそれぞれ、 13.4×10^6 、 5.3×10^6 、 1.8×10^6 [S/m]であり、比透磁率は全て真空の比透磁率1である。また、本稿では管内側に想定する孔食や腐食割れ等による減肉を総称して“キズ”と定義し、解析ではその幅(z軸方向)を4 mm一定とした。解析条件をまとめてTable 1に示す。

Table 1 解析条件

周波数 [kHz]	25、50、100、500、1000、2000
ECTコイル	差動ポイン型プローブ (各60ターン)
材質	チタン($\mu_r=1$ 、 $\sigma=1.8 \times 10^6$ [S/m]) 黄銅($\mu_r=1$ 、 $\sigma=13.4 \times 10^6$ [S/m]) 白銅($\mu_r=1$ 、 $\sigma=5.3 \times 10^6$ [S/m])
管寸法	黄銅および白銅配管 長さ500mm、外径32φ、肉厚2mm (管内面より深さ0.3mmチタン材)
キズ寸法	幅4mm、深さ0~2mm
節点、要素数	5252、5100
解析手法	軸対称交流線形渦電流解析法

2.3 解析結果

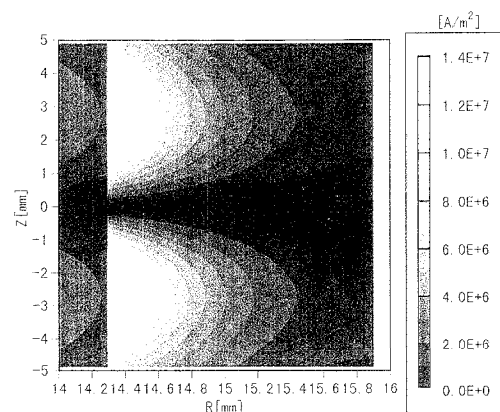
2.3.1 渦電流密度分布

周波数をパラメータ (25kHz~1 MHz) とし、キズが無い状態での材料内部に発生する渦電流密度分布の解析を行なった。解析結果をFig. 2、3にそれぞれ示す。Fig. 2は管内表面より0.3mm ($R=14 \sim 14.3$ mm)はチタン層とし、それ以外の層($R=14.3 \sim 16$ mm)は黄銅材(C6871)としたときの結果で、Fig. 3はFig. 2と同様に管内表面より0.3mmはチタン層とし、それ以外の層は白銅(C7060)材としたときの渦電流密度分布解析結果図である。表記はそれぞれ白黒等高分布とし、色が白くなるにつれ渦電流密度の値は高くなるように示した。励磁コイル近傍に渦電流が集中している様子が理解できる。また2つのコイルの位相が180度反転しているため、2つのコイルの間のR軸($z=0$ mmライン)を境に、分布が上下対称になっていることが理解できる。Fig. 2、Fig. 3とも周波数が低い領域では、チタン層内にはほとんど渦電流は発生せず、チタン材に比べ導電率の高い黄銅(C6871)や白銅(C7060)内に渦電流が集中して分布していることが観察される。これは(3)式からも分かる通り、渦

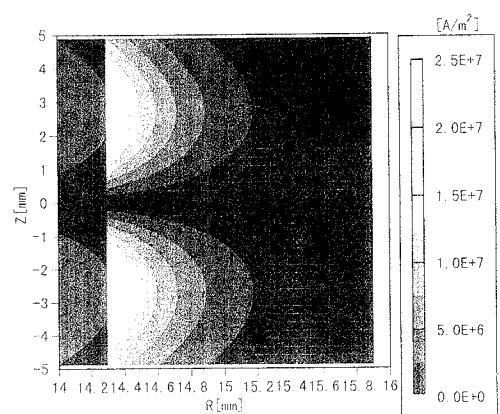
電流密度は周波数および比透磁率ともに同じ場合では、材料の導電率に比例するからである。しかし、励磁周波数を500kHz、1 MHzと上げるに伴い、表皮効果が高まり、チタン層内にも渦電流が発生する様子が理解できる。また黄銅は白銅に比べ導電率が約2.5倍大きいため、発生する渦電流も大きい。例えばFig. 2 (b)とFig. 3 (b)の同周波数(100kHz)での渦電流最大値を比べると、黄銅材であるFig. 2 (b)の方が約2.1倍大きい事が理解できる。それゆえ、黄銅材の方が白銅材に比べ、チタン層との渦電流の差は大きいことが合わせて理解できる。

2.3.2 キズを付加したモデルのインピーダンス解析

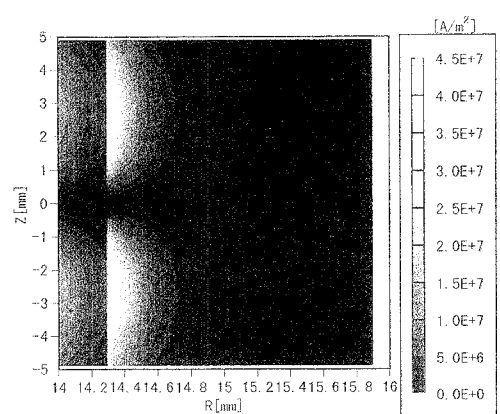
一般的に熱交換器管内に生じるキズは、管内部流体による孔食や腐食割れ等、えぐり取られるといったキズである。そのため、数値解析でこれらを模擬するため、管内側減肉を想定し、キズ幅を4 mm一定とした。Fig. 4は管内表面より0.3mm ($R=14 \sim 14.3$ mm)はチタン層とし、それ以外の層($R=14.3 \sim 16$ mm)は黄銅材(C6871)とし、キズ深さを管内表面から0.1~0.4 mmと変化させたときの結果である。Fig. 5はFig. 4と同様に管内表面より0.3mmはチタン層とし、それ以外の層は白銅(C7060)材とし、キズ深さを管内表面から0.1~0.4mmと変化させたときの差動インピーダンス解析結果である。それぞれ、横軸をインピーダンスのレジスタンス成分($\text{Re}[\Omega]$)、縦軸をインピーダンスのリアクタンス成分($\text{Im}[\Omega]$)としたリサージュ波形を示した。リサージュ表記であるため、縦軸および横軸の値の大きさを同じとし、振幅だけでなく位相角の差も比較できるように示してある。解析では、2つのコイルの距離(2mm)およびリフトオフ(1mm)を一定に保ったまま、差動ポイン型プローブをz軸方向に1mmピッチで21点平行移動(2つのコイル中心点： $z=-10 \sim +10$ mm)した時の各移動点における2つのコイルのインピーダンスの差を求めた。2つのコイルの差であるため、キズが無い、もしくはキズから2つのコイルが遠い位置では、両者のコイルのインピーダンス差は0である。しかし、どちらかのコイルがキズに近づくと、キズは空気層であるため、渦電流が発生しないので、キズに近い方のコイルにはインピーダンスが小さくなる。そのため、2つのコイルのインピーダンスに差が生まれるため、ある値の信号が生じる。キズの上を2つのコイルが通過すると、このインピーダンスの大きな差が2つ現われることになる。



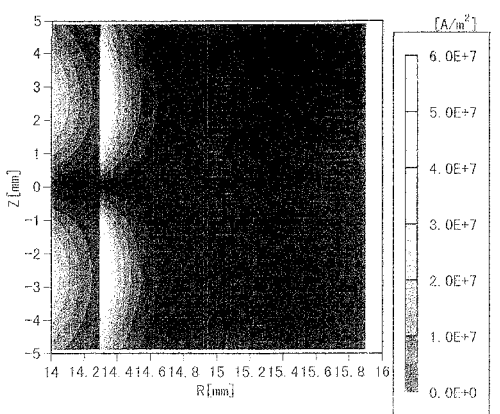
(a) Frequency: 50kHz



(b) Frequency: 100kHz

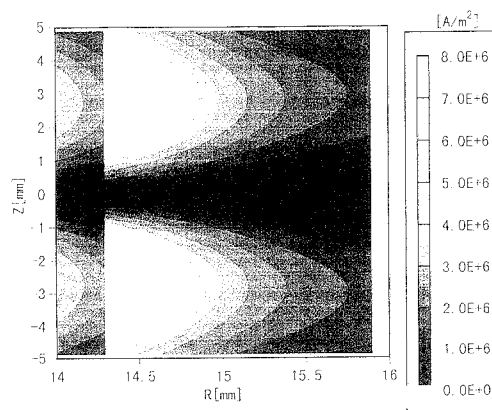


(c) Frequency: 500kHz

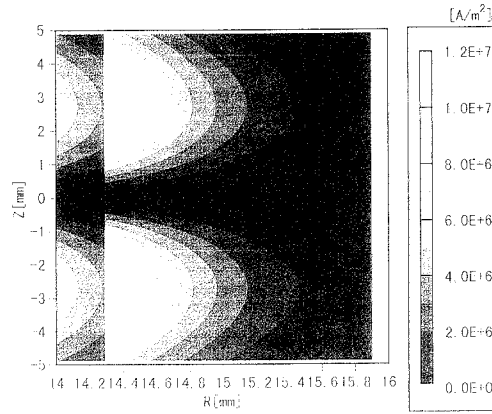


(d) Frequency: 1MHz

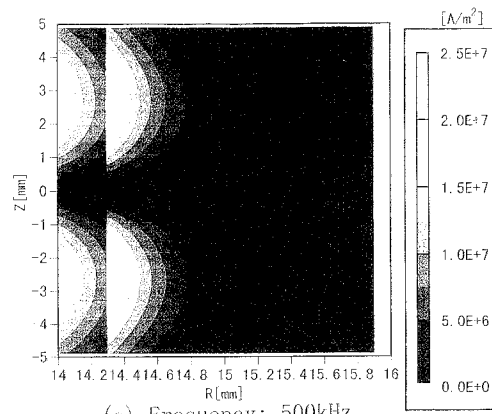
Fig. 2 Distribution of eddy current in material (TTH35W, C6871)



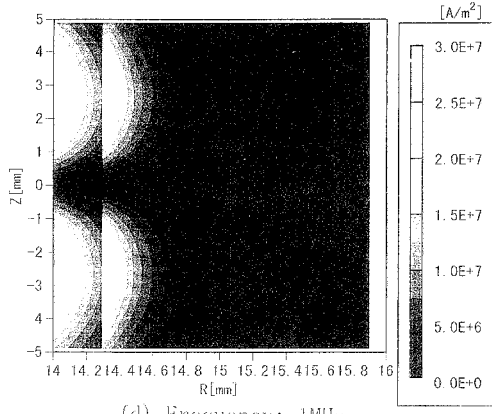
(a) Frequency: 50kHz



(b) Frequency: 100kHz

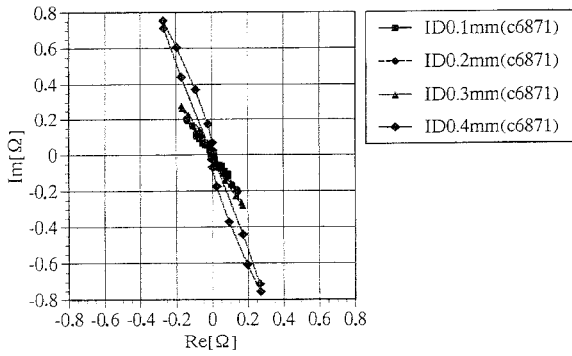


(c) Frequency: 500kHz

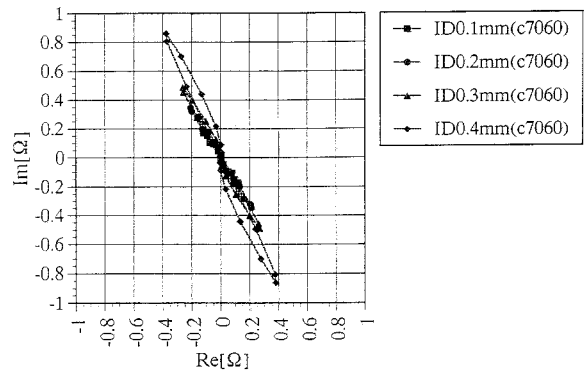


(d) Frequency: 1MHz

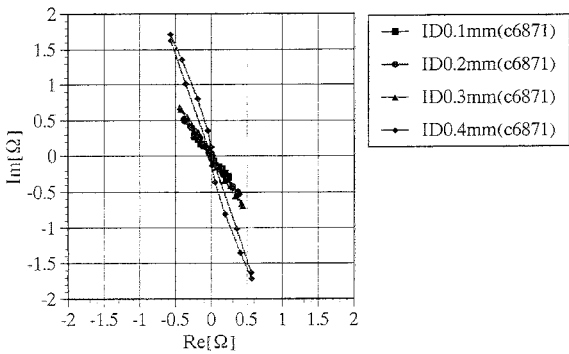
Fig. 3 Distribution of eddy current in material (TTH35W, C7060)



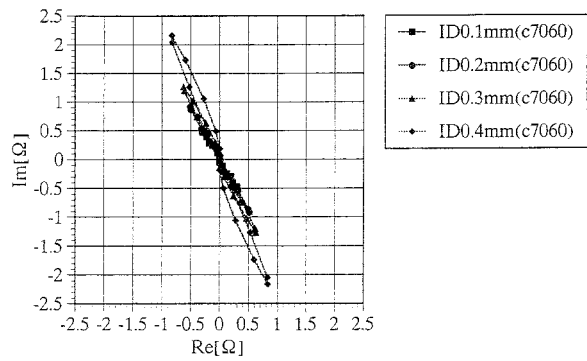
(a) Frequency: 50kHz



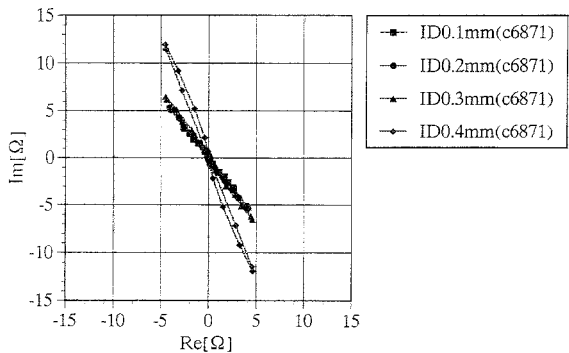
(a) Frequency: 50kHz



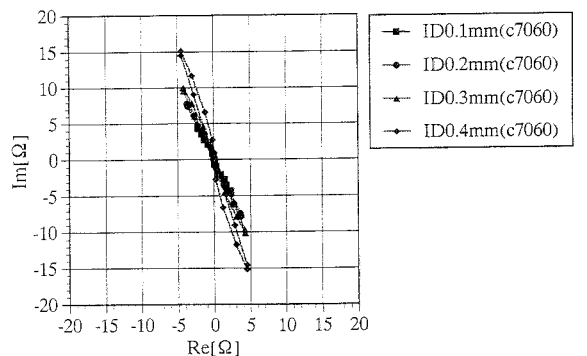
(b) Frequency: 100kHz



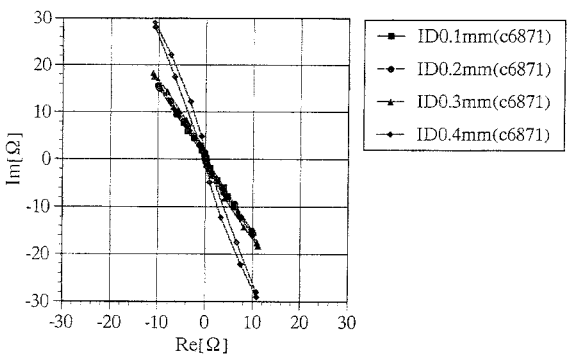
(b) Frequency: 100kHz



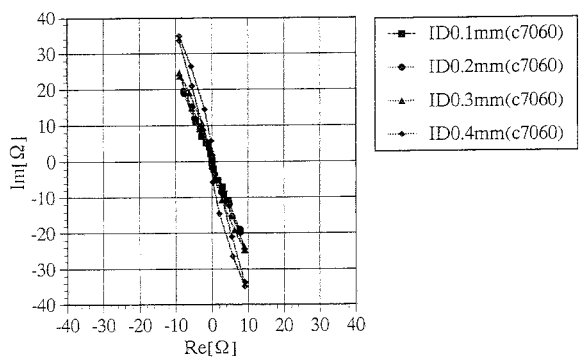
(c) Frequency: 500kHz



(c) Frequency: 500kHz



(d) Frequency: 1MHz



(d) Frequency: 1MHz

Fig. 4 Analysis signal on different crack depths (TTH35W, C6871)

Fig. 5 Analysis signal on different crack depths (TTH35W, C7060)

Fig. 4、Fig. 5 の両者とも、キズ深さがチタン厚さ (0.3mm)未満の時は振幅の大きさに違いが見られるものの、どの周波数においても大きな位相差は現れないのに対し、キズ深さがチタン層を越えると、チタン内に比べ大きく位相差が現れることが理解できる。例えばFig. 4 (b)ではキズ深さが0.1~0.3mm(記号：■~▲)では、位相角に差は無く、全ての記号が重なっている。それに対し、キズ深さ0.4mm(記号：◆)は0.1~0.3mmの各波形と大きく位相差が現われ、右に約20度回転している。Fig. 5はFig. 4同様、キズ深さがチタン層内と外での位相差は現われてはいるが、Fig. 4の黄銅管に比べ、チタン材と白銅材との導電率の差が小さいため、位相差は小さいことが判る。次にFig. 6には黄銅、白銅管における、各キズ深さによる位相角変化を表した。横軸にキズ深さを示し、縦軸に最大位相差を示している。またFig. 6 (a)には黄銅材、Fig. 6 (b)には白銅材管の結果を示した。両者ともチタン層は管内表面より0.3mmまでであることから、チタン層内における位相角は大きく現れ、その層を越えたキズは急激に位相角が減少傾向を示すことが理解

できる。しかし、励磁周波数を1~2MHz等の高周波数にすると渦電流の浸透深さが浅くなりチタン層内部(キズ深さ0.3mmまで)での渦電流が支配的となるため、チタン層内外での位相差が小さくなるのが合わせて理解できる。チタン材および黄銅、白銅材における各周波数による渦電流の浸透深さをTable 2にそれぞれ示す。

Table 2 各材質における渦電流浸透深さ

励磁周波数 [kHz]	チタン	黄銅	白銅 [mm]
25	2.37	0.87	1.38
50	1.68	0.62	0.98
100	1.19	0.44	0.69
500	0.53	0.19	0.31
1000	0.38	0.14	0.22
2000	0.27	0.10	0.16

この表から、励磁周波数が100kHzまででは、渦電流の浸透深さはどの材質もチタン層の0.3mm以上であることが分かる。しかし1MHz以上になると渦電流の浸透深さは黄銅、白銅材共に0.3mm以内となり、2MHzまで周波数を上げると、全ての材質において渦電流はチタン層の0.3mm以内に分布することが理解できる。それゆえ周波数2MHzでは、渦電流はチタン層内部が支配的となるため、出力信号はチタン層内部の情報メインとなり、チタン層内と、層を越える深いキズ信号差は小さくなると考察できる。Fig. 6では、周波数25kHz~500kHzではキズ深さに比例して位相角は減少傾向を示し、周波数が高くなるにつれ、その減少差は増すのに対し、1MHz以上になるとその傾向が崩れることが分かる。このことから、キズ深さがチタン層内か、それより深いかの判別には周波数が500kHz程度が最適であることが理解できる。また500kHzまででは、位相角が120度以下であればチタン層を越え黄銅、白銅にまで達する深いキズであることが理解できる。次に、Fig. 7には黄銅、白銅管におけるキズ深さ変化に対する Z/f の値を示したものである。これは、コイルより得られる出力インピーダンス Z の大きさはリアクタンス成分が支配的であることから、 Z を周波数 f で割ることによりリアクタンス成分 L の大きさによる判別を試みたものである。周波数が低い領域では、チタン層内の信号は小さく、チタン層外のキズとの信号差は明確に得られるが、周波数が高い領域ではチタン層内外のキズ信号の差が無くなっていることが理解できる。また、黄銅に比べ白銅管の方がチタン層内外のキズ判別が難しいことが合わせて理解できる。

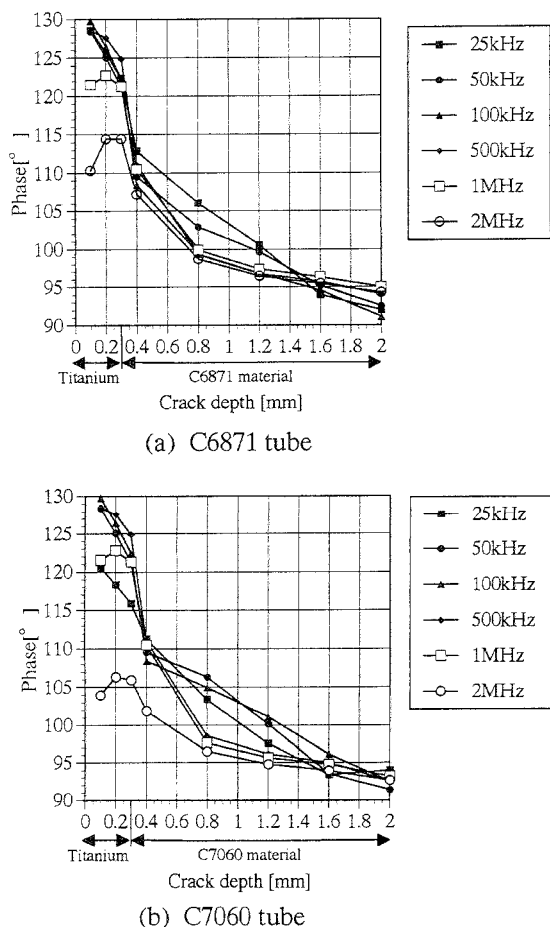


Fig. 6 Analysis phase angle on different crack depths

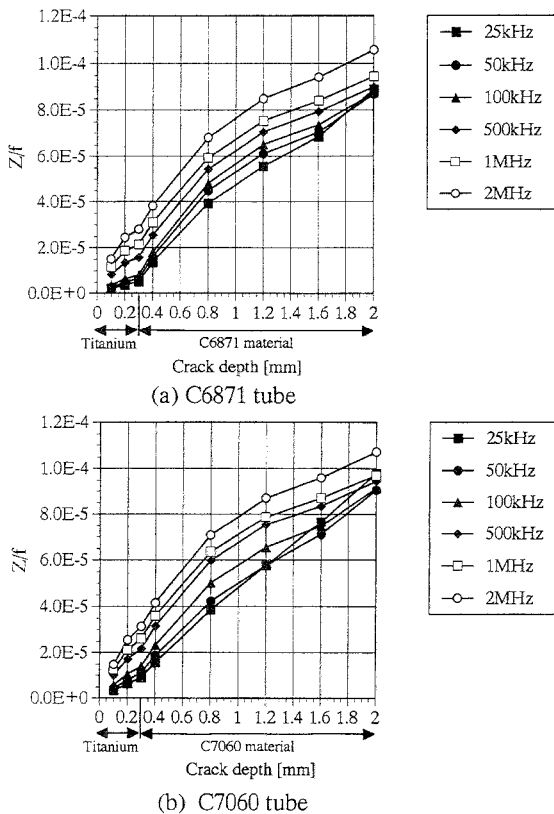


Fig. 7 Analysis waveform (Z/f) on different crack depths

III 実機による検討

実機検査により最適検査条件の検討を行った。実験で使用した管およびキズのモデルをFig. 8 に示す。実験に使用した管は外側が白銅(C7060)で、内側に0.3 mm厚さでチタン(TTH35w)圧着した二重管であり、内側局部にキズを加工したものである。検査プローブは差動型ボビンプローブで、管内に挿入し、管軸方向に平行移動させることにより、差動出力インピーダンスを測定するものである。またリフトオフは1.63mmである。実験には周波数をパラメータとし、各キズにより得られる出力インピーダンス信号(X:レジスタンス成分、Y:リアクタンス成分)を測定した。測定を行ったキズは7種類で、管内側より深さ0.25、0.3、0.5、0.75、1.0mmと、2φ、3φの貫通キズである。また貫通キズ以外の5つのキズ(No.1~5のキズ)はそれぞれキズ深さを半径とした反円形状にキズ加工を施したものである。実験により得られたキズ信号をそれぞれFig. 9 に示す。各周波数において、管内側キズ(1~5のキズ)の信号は、キズの大きさが増すに連れて振幅が大きくなるのが理解できる。また貫通キズに関しても、同様の傾向がみられる。しかし周波数

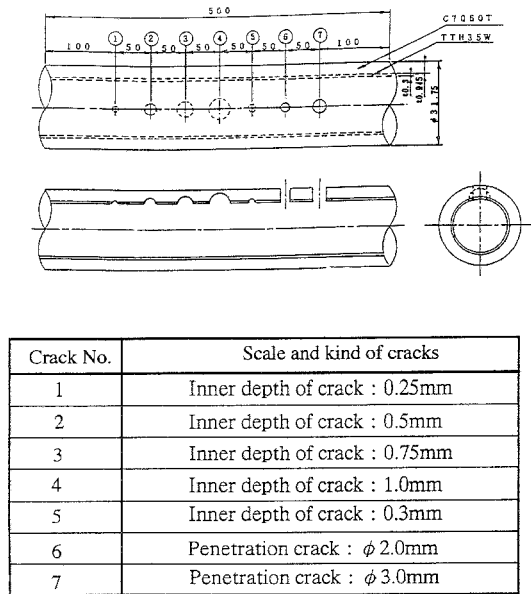


Fig. 8 Experiment model of tube and cracks

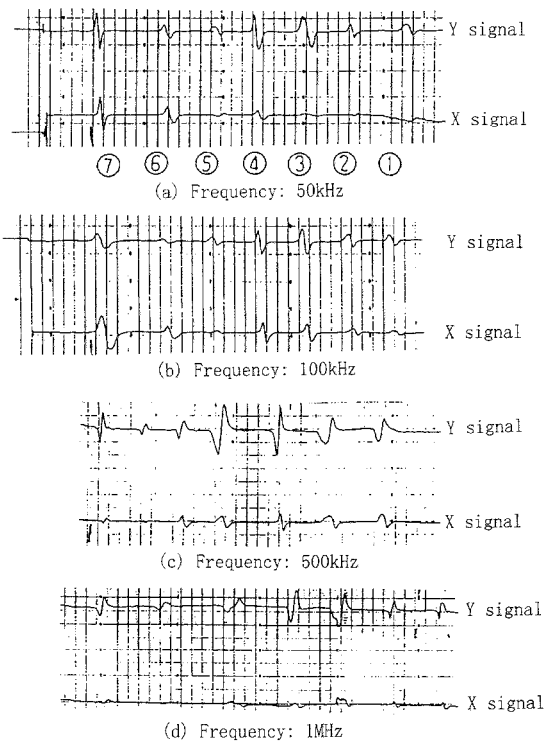


Fig. 9 Crack signal of ECT (C7060)

を1MHzまで増加させると、信号自体の振幅が小さく、キズの種類を判別するには困難であることが理解できる。次に各信号をリサージュ波形に表した結果をFig. 10に示す。これらは位相角差を比較するため、縦軸(X[Ω])と横軸(Y[Ω])のスケールを同じに示してある。周波数が100kHz時では貫通(記号:○,+)と内面キズ(記号:■,●,▲,◆,□)での位相差が大きく

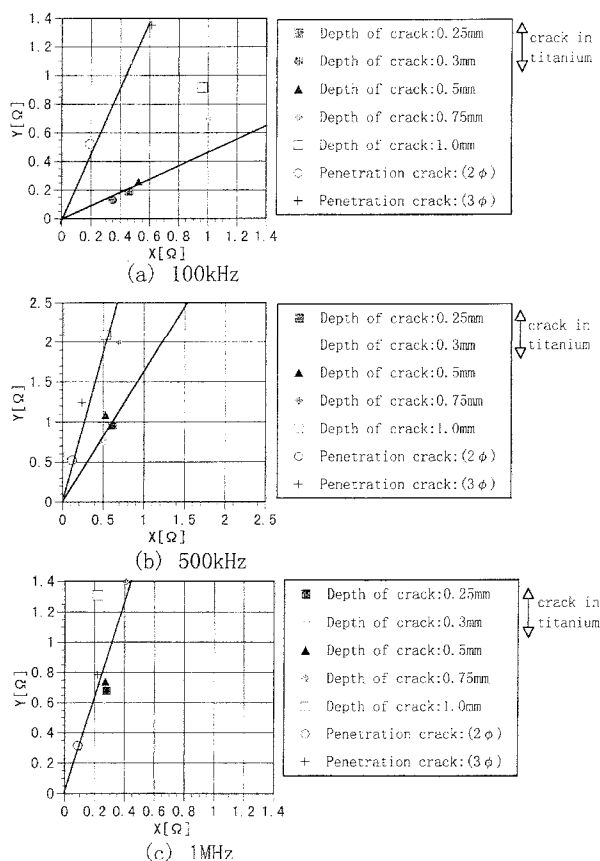


Fig.10 Lissajous waveform of ECT Crack signal (C7060)

現われていることが分かる。また内面キズでは、キズの大きさが増すにつれ振幅が大きくなることが理解できる。また貫通キズ信号に関しても、径が大きい方が振幅は大きいことがわかる。しかしチタン層内か、それを越えたキズかの位相角差による判別はつかない。これに対し、周波数を500kHzまで上げると、チタン層付近までの深さのキズと、それ以上の深さのキズでの位相差が生じることが分かる。キズ深さ0.25~0.5mm(記号：■,●,▲)と、それ以外のキズでは位相差が現われていることが理解できる。また位相角の近い、キズ深さ0.25~0.5mmでも0.25, 0.3mmのキズ(記号：■,●)は同位相に対し、これらと0.5mm深さのキズ(記号：▲)では、差は小さいものの位相差があることが分かる。以上のことから、キズがチタン層内の深さか、それ以上深いかの判別が、位相角差により可能であることが考察できる。しかし周波数を1MHzまで増加させると、位相差はほとんど見られず、全てがほぼ同位相に現われている。これは、高周波数による渦電流の浸透深さが浅く、渦電流がチタン層のみに集中して発生しているため、全てのキズ信号がチタン層内部の情報だけを表しているためだと考えられる(Table 2参照)。

IV まとめ

内面チタンコーティング管に適用する渦電流探傷試験法の数値解析評価について得られた結果を以下にまとめて示す。

- (1) 渦電流解析により、内面チタンコーティング管の渦電流強度分布が評価できた。導電率の関係で管全体の肉厚を検査する周波数(50~100kHz程度)では、チタン部には渦電流の発生は少なく、評価しにくい。チタン部に限定して検査を行うには、高い周波数にしなければならないことが分かった。
- (2) チタン層内の健全性を検査するには励磁周波数を500kHz程度にした高い周波数領域を使用することにより可能となることが理解できた。また、チタン内外キズの判別が位相差を見ることにより可能であることが解析および実験により示すことができた。
- (3) 管全体の減肉を検査するには50~100kHz程度の周波数を用いて位相および信号強度より求めることができることが分かった。
- (4) 本稿は、各種プラント保守検査の先端的かつ実践的技術であるため、今後、高度な職業能力開発セミナーとして、大きく地元産業界に貢献できる内容であると考えている。

【参考文献】

- [1] 橋本光男：コア付きECTプローブの数値解析による設計法、日本非破壊検査第三分科会資料、No. 30026、pp.22-29、(1992)
- [2] 橋本光男、福富広幸、高木敏行他：ECTにおける三次元ベンチマーク問題とその実験及び解析2(解析結果)、(社)日本非破壊検査協会、平成5年秋季大会講演概要集、pp.271-278、(1993)
- [3] 俣賀文雄、福富広幸、橋本光男、原田豊、岡野栄三郎：ECTにおける付着物モデルの実験及び解析、(社)日本非破壊検査協会第3分科会資料、No. 30052、pp.19-23、(1994)
- [4] 福富広幸、俣賀文雄、橋本光男、原田豊、岡野栄三郎：ECTにおける付着物モデルの実験及び解析、(社)日本非破壊検査協会春季大会講演概要集、pp.123-126、(1994)
- [5] 福富広幸、橋本光男、原田豊、岡野栄三郎：外側付着物を有するECTモデルの実験と解析、日本AEM学会MAGDAコンファレンス講演論文集、pp.177-178、(1994)