

# 渦電流探傷試験法

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

Eddy Current Testing

Yuji GOTOH, Mitsuo HASHIMOTO

**要約** 交流を流したコイルを金属材料表層に近づけると、導体内部には電磁誘導により渦電流が発生する。そしてこの渦電流が反抗磁場を生み、コイルにインピーダンスを発生させる。仮に、材料表層にキズが存在する場合、このコイルのインピーダンスはキズの周辺で変化する。この現象を用いて被試験体中のキズ等を検出することができる。この手法を用いた非破壊検査は、渦電流探傷試験（Eddy Current Testing : ECT）と呼ばれ、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おり、主に種々の工場内やプラント内の配管保守検査に実施されている。

岡山職業能力開発短期大学校は、鉄鋼産業の盛んな地域に面しており、セミナーやF方式、事業内援助等を通し、地域鉄鋼業及び機械産業界等とのつながりの歴史は古い。本稿は、各種工場やプラント等に多く使用されている配管検査を対象とした電磁現象を応用した各種ECT手法についての解説を行い、地域産業プラント等の保守検査技術向上への貢献を目的としている。

## I 緒言

火力、原子力発電プラントや石油化学プラント等では大量の配管が用いられている。各種プラント内の配管は、使用される環境に起因した様々なキズが生じる。万が一それらのキズ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配管キズ検査技術向上のニーズは高まりつつある。

交流を流したコイルを導体に近づけると、導体には電磁誘導により渦電流が発生する。この現象を用いて被試験体の電氣的物性の測定、もしくは被試験体中のキズ等を検出することができる。この手法を用いた非破壊検査は、渦電流探傷試験（Eddy Current Testing : ECT）と呼ばれ、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。この検査手法は超音波探傷や放射線検査等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<sup>(1)(3)</sup>。そこで我々はこのECT法に着目し、キズの種類や被検材の材質等に適応した各種ECT手法の研究開発を行ってきた<sup>(4)(6)</sup>。本稿では配管を検査対象とし、被検材の材質やその形状、キズ形態等で使い分けを行なった各種ECT手法について、それぞれの原理と特徴を説明し、これらの検査方法を使用し実際に鋼管や配管に適用した際のキズ判定等について報告する。

## II 各種渦電流探傷試験法

本研究では検査対象の材質により、通常ECT法、リモートフィールドECT法、磁気飽和ECT法、未飽和磁化ECT法の4手法に着目し、研究開発を行ってきた。これら各検査手法の特徴を表1にまとめて示す。

表1 各種ECT手法

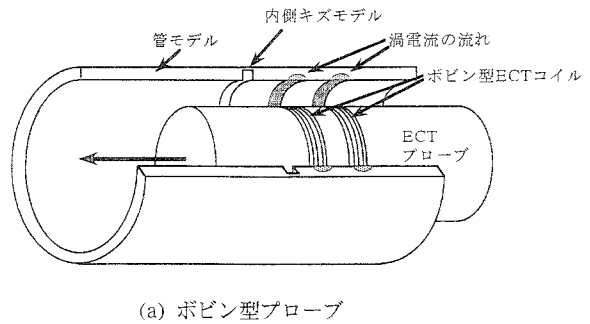
試験法	材質	検出物理量	キズ位置
通常ECT	常磁性体	インピーダンス コイル誘導電圧	表面
リモート フィールド	常磁性体 強磁性体	コイル誘導電圧	内外面
磁気飽和	強磁性体	インピーダンス	内表面
未飽和磁化	強磁性体	インピーダンス	内表面

## 2.1 通常ECT法

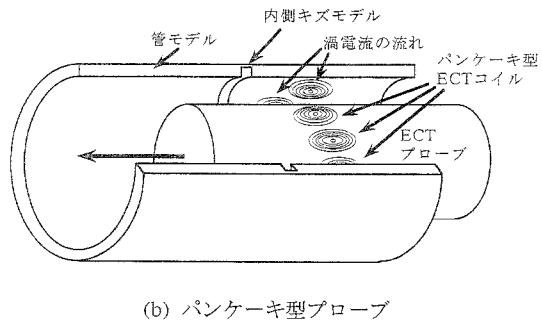
### 2.1.1 原理と特徴

ECTはコイルに交流電流を流し、被検材の表面に渦電流を発生させ、コイルのインピーダンス変化によりキズの評価を行う手法である。従って、この検査手法では、試験体に誘起された渦電流分布に影響を与える因子は全て検出対象となる。探傷評価にはインピーダンスの絶対値だけでなく、レジスタンスとリアクタンスの二成分により得られるリサージュ波形の振幅の大きさや形、位相差等を使用する。このリサージュ波形により、キズが管の内面・外面のものか、またその深さ等、キズの様々な情報を得ることができる。これらは全て電気信号であるため高速に処理できることから、ECTは原子力プラントのSG伝熱管等の長さが数メートルから数十メートルもあり、しかも数百本から数千本にもおよぶ膨大な量の管を高速で検査できるといった長所を有している。しかし、被検材が鋼材といった強磁性体の場合は、強磁性体内の透磁率のばらつきによる磁気ノイズが発生し、キズ信号を打ち消してしまうため、適用は難しい。検査プローブには種々のタイプがある。特に石油や原子力プラントの伝熱管検査に実用化されているものとしてはFig.1に示すようなポビン型とパンケーキ型プローブがある。ポビン型は、管と同軸な2つのコイルが配置されているプローブである。このプローブコイルにより渦電流は管周方向に発生する。よってこの流れを阻害する軸方向のキズに対しては良い検出性を示す。検出信号は渦電流の情報を周方向に積分したものとなるため、その信号はキズ形状に反映しない。しかし、ふらつきに強くプローブの移動によるノイズ（ガタ信号）発生を抑え、高速に探傷できる特徴を持っている。

パンケーキ型は、管径に比べ小さいコイルを1つもしくは複数搭載しているプローブである。これらのプローブコイルにより渦電流は管の一部分に発生するため、周方向のキズ検出に有効であり、信号がそのままキズの形状に対応する。しかし、プローブのふらつきによるガタ信号には弱い<sup>7) (9)</sup>。



(a) ポビン型プローブ



(b) パンケーキ型プローブ

Fig.1 通常ECTプローブの種類

### 2.1.2 キズ検出

キズの上をパンケーキ型プローブコイルが移動する際の三次元有限要素法による渦電流解析結果を行なった。解析モデルをFig.2に、解析結果をFig.3にそれぞれ示す。

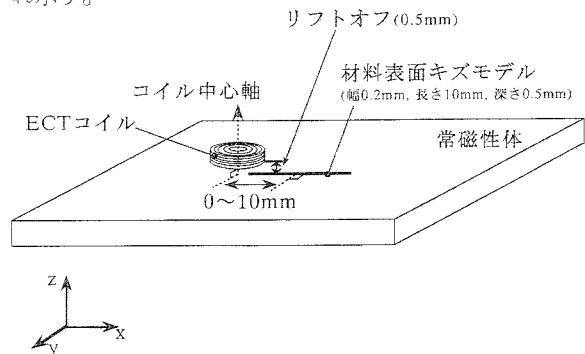


Fig.2 通常ECTの三次元渦電流解析モデル図

ここでは、励磁周波数を300kHzとし、材料とコイルの距離（リフトオフ）を0.5mmとした。またFig.3は、キズ中心部とパンケーキ型プローブコイルの中心部が0~10mmまで変化したときの材料内部に生じる渦電流分布をベクトル表示した結果を示している。なお、図中に渦電流の最高値を数字で表記してある。これらの結果から、キズの存在から渦電流は大きく変化していることが判る。この渦電流の変化がプローブのインピーダンス信号に大きく影響をもたらす事が理解できる。キズの深さや減肉率は、プローブのインピーダンス軌跡を調べることにより求めることができる。

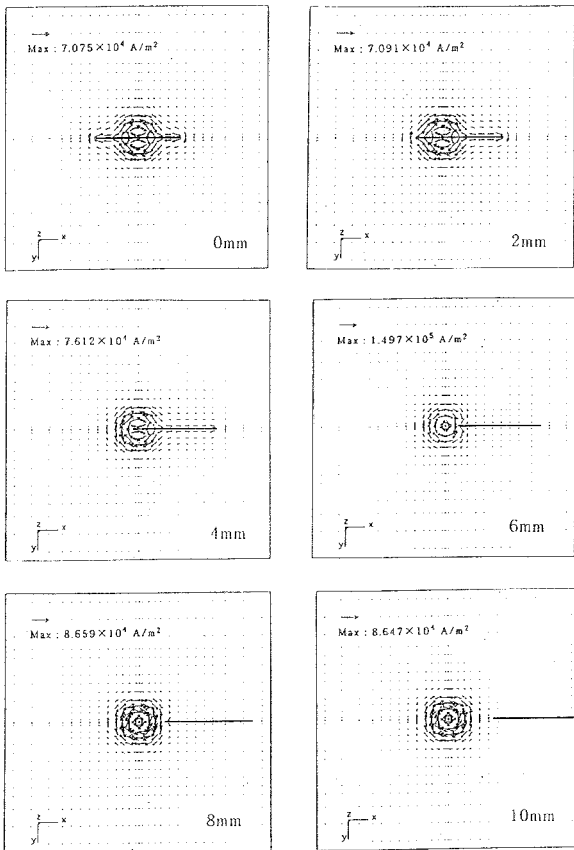


Fig. 3 材料内の渦電流分布

Fig.4はポピン型プローブコイルを使用し、キズによるインピーダンスのリサージュ波形を示したものである。貫通キズを基準にして、位相が小さくなる場合は外側のキズであり、また逆に位相が大きくなる場合は内側のキズと判断できる<sup>(10),(11)</sup>。

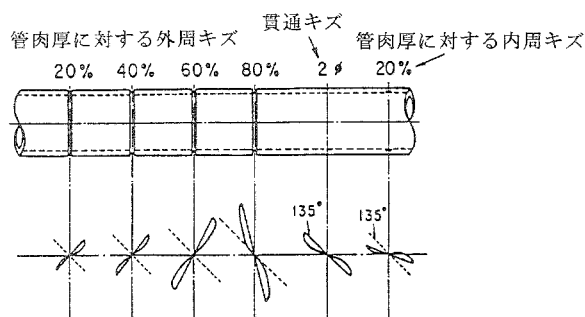


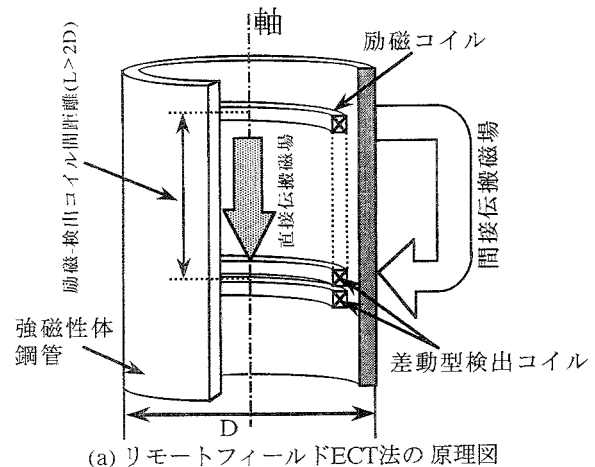
Fig. 4 キズモデル形状とインピーダンス波形

## 2.2 リモートフィールドECT法

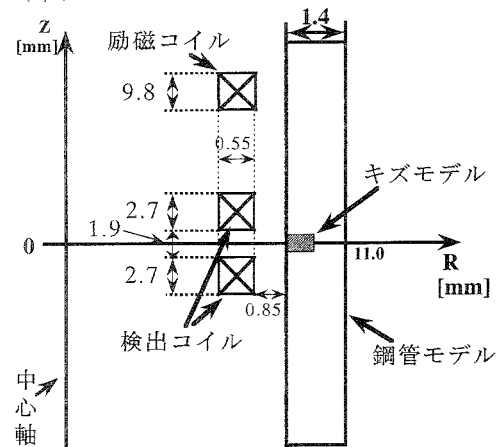
通常ECTは被検材が鋼材等の強磁性材の場合、磁気ノイズが大きく発生し、探傷試験が困難である。そこで、検査対象が鋼材でも通常ECT同様、高速に検査が行える手法として考案された検査法の一つにリモートフィールドECT法がある<sup>(12)</sup>。

### 2.2.1 原理と特徴

リモートフィールドECT法は、通常ECTより励磁周波数を500~1kHz程度まで下げ、励磁コイルからの間接伝搬磁場の強弱により探傷を行なう手法である。この原理図をFig.5 (a) に示す。鋼管検査の場合、励磁コイルによって発生した磁場のうち鋼管内側を鋼管軸方向の検出コイルに向かう直接磁場は、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、鋼管の外側に出た間接磁場は鋼管軸方向に遠方まで伝わる。鋼管径の約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。管内の直接磁場が急激に減衰する理由は、管内での渦電流が発生することにより生じる磁場がそれを打ち消すためである。この検査手法は鋼管の内側と外側の両面におけるキズをほぼ同じ感度で検出できるといった特徴を有している。本稿では軸対称三次元有限要素法による交流線形解析によりこの手法の現象説明を行った。Fig.5 (b) 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。



(a) リモートフィールドECT法の原理図



(b) 軸対称解析モデル図

Fig. 5 リモートフィールドECT解析モデル

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Aを用いて次式で表すことができる。

$$V = \int_s \frac{\partial B}{\partial t} ds = -j\omega \oint_s A_s ds \quad (1)$$

ここでのsはコイルの巻き線に沿った積分経路、 $\omega$ 、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(1)式は次式として表すことができる。

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

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。また解析に使用した励磁周波数は500Hz一定とした。その解析結果をFig.6に示す。

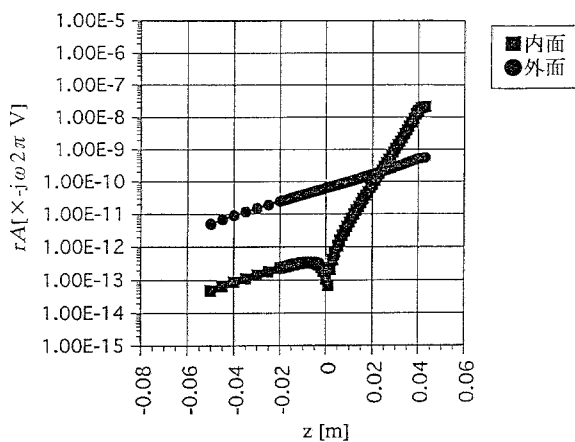


Fig. 6 管内外面のrA分布 (周波数 : 500Hz)

Fig.6の横軸はFig.5 (b) の解析モデル図の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磁場より低くなり、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.7からよく理解できる。

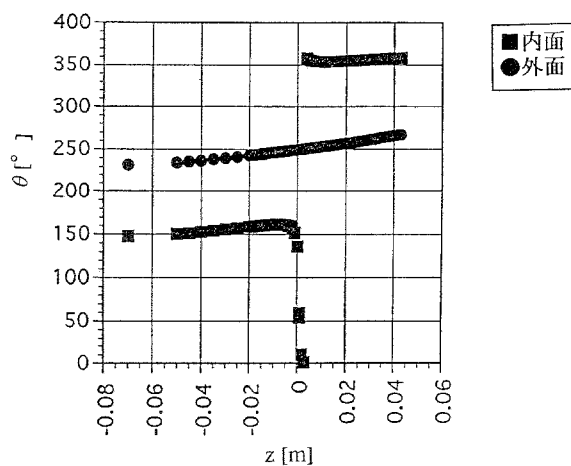


Fig. 7 管内外面の位相分布

次に、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いては、次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。

$$\phi = \oint_{\theta} A \cdot ds = 2\pi rA \quad (3)$$

$\phi$ は各要素における磁束、rは半径、dsは積分路上 $\theta$  (軸対称三次元場では周回方向)の微小ベクトルである。結果をFig.8に示す。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.9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.6の谷の部分にあたるここ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、

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、渦電流が発生させ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。

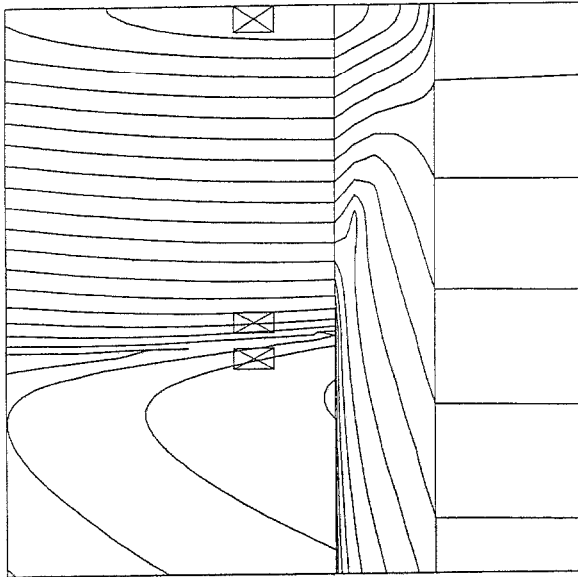


Fig. 8 ベクトルポテンシャルA分布

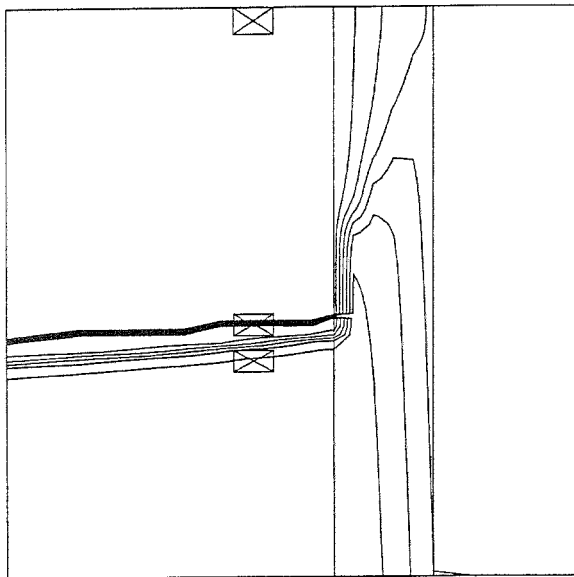
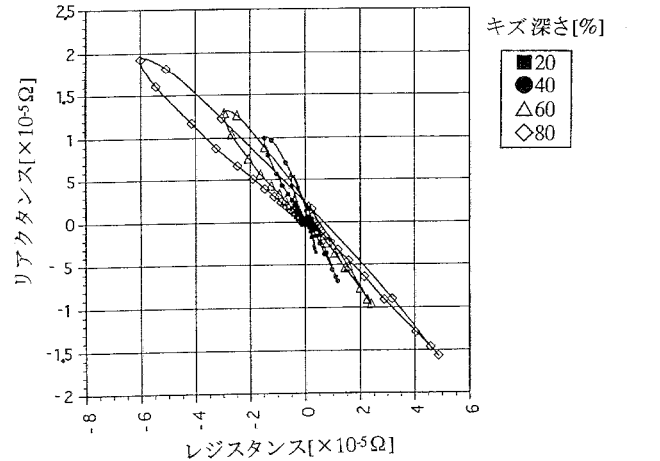


Fig. 9 ベクトルポテンシャルAの位相分布

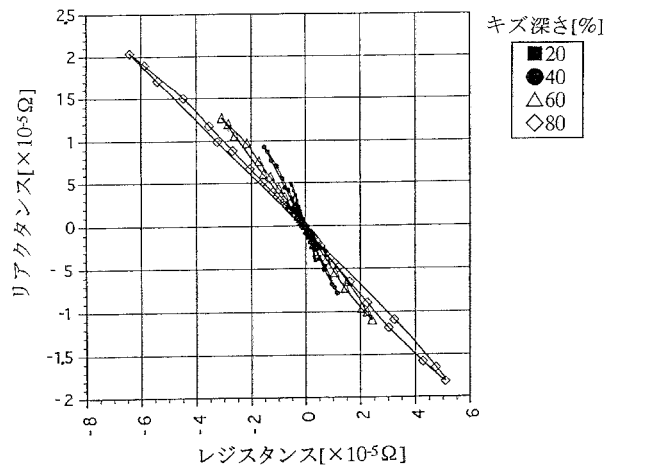
2.2.2 キズ検出

鋼管内外面に周回方向にスリット状のキズを設け、プローブを移動させたときの検出コイルに得られる信号評価を行った。解析結果をFig.10、11に、実験結果をFig.12、13にそれぞれ示す。Fig.10は深さをパラメー

タにし、Fig.11は幅をパラメータにしたときの結果である。これらから、キズ深さが深くなると、位相は左に回転することがわかる。また外側キズは、内側キズよりリサージュがシャープな軌跡を描くことが判る。これはFig.12、Fig.13の実験値からも確認することができる。



(a) 管内面キズ (キズ幅: 2mm, キズ深さ: 管肉厚に対し20~80%変化)



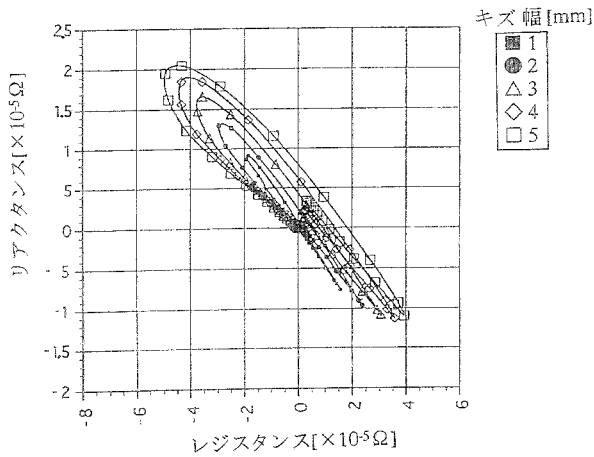
(b) 管外面キズ (キズ幅: 2mm, キズ深さ: 管肉厚に対し20~80%変化)

Fig.10 解析リサージュ波形 (キズ深さ変化)

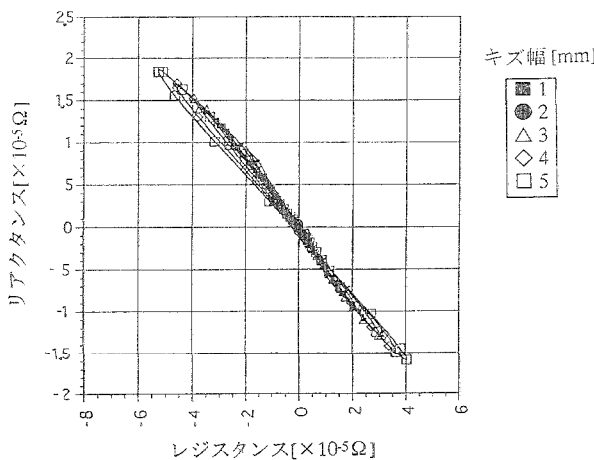
2.3 磁気飽和ECT法

検査材料が強磁性体鋼管の場合、材料内の磁気特性の不均一によりキズ部以外からの磁気ノイズが大きく現れるため、キズによる信号が明確に得られない。そこで、検査対象が鋼材でも通常ECT同様、高速に検査が行える手法としてリモートフィールドECT法が考案され、多くの研究開発がなされてきた。しかしその過程でこの手法にも以下に示す欠点があることが明らかとなった。

- (1) リモートフィールドECT法は通常ECT法ほど敏感ではないが強磁性体の透磁率変動の影響を受ける。

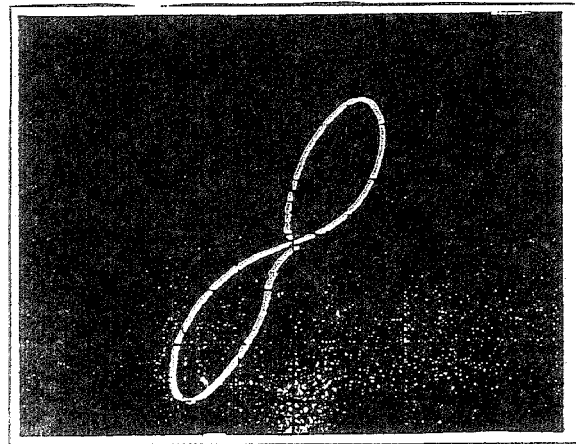


(a) 管内面キズ (キズ幅: 1~5mm変化, キズ深さ: 管肉厚に対し60%一定)

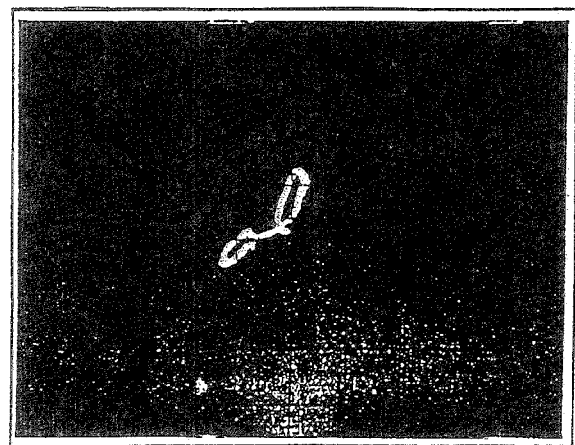


(b) 管外面キズ (キズ幅: 1~5mm変化, キズ深さ: 管肉厚に対し60%一定)

Fig.11 解析リサージュ波形 (キズ幅変化)



(a) 管内面キズ (キズ幅: 4mm)



(b) 管外面キズ (キズ幅: 4mm)

Fig.12 実験リサージュ波形 (キズ深さ: 管肉厚に対し20%一定)

(2) リモートフィールドECT法は励磁コイルからの間接伝搬磁場の大きさを探傷に使用するという原理上、通常ECT法と比較して低周波数を使用するため検査速度を通常ECT法ほど上げることができない。また微小なキズの検出性能が劣る。

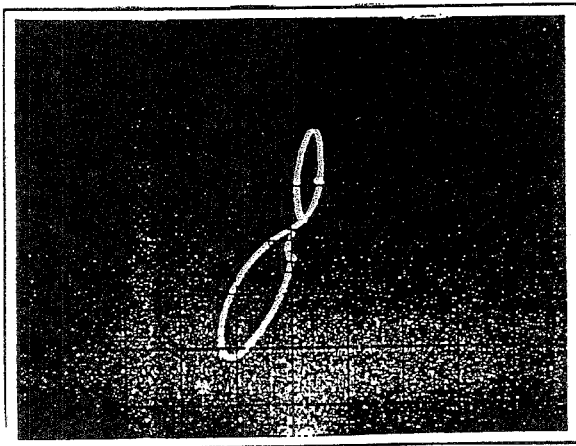
上述の欠点を克服し、強磁性体鋼管のキズ検出性能を向上させるため、磁気飽和ECT法の検討が行なわれた。強磁性体は大きな磁場で磁化されると磁気飽和により、材料内の比透磁率は1に近づく。この現象を利用し、鋼管外側および内側から励磁コイルにより鋼管を磁化させる。磁化により鋼管が完全に磁気飽和すると、材料内の比透磁率は1となり、非磁性体と同様に通常のECTが適用できる (Fig.14参照)<sup>(13)</sup>。この励磁磁場の供給には、検査する強磁性体鋼管の外側全体に磁化コイルを設ける方法と、鋼管内部に挿入するプローブにコイルまたは永久磁石を配置する2つの方法がある。前者は強い磁場を使うことができるが装置が大型化する。後者は強い磁場が加えられないが検査が簡単

になる利点がある。しかし、いずれにしても強磁性体の磁気ノイズを完全に打ち消すことは困難である。

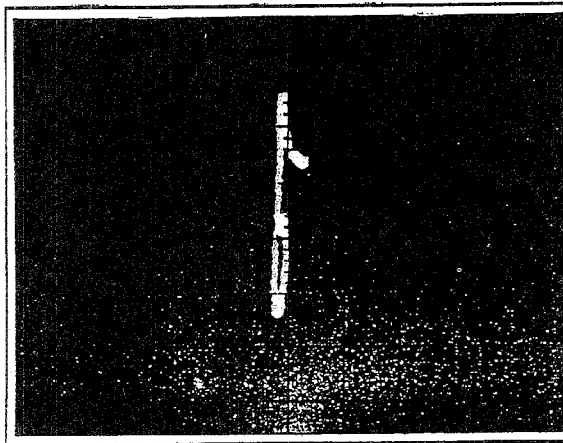
## 2.4 未飽和領域磁化ECT法

### 2.4.1 原理と特徴

検査材料が厚肉の強磁性体鋼管 (肉厚4mm以上) の場合、通常のECTでは材料内の磁気特性の不均一によりキズ部以外からの磁気ノイズが大きく現れるため、キズによる信号が明確に得られない。磁性管には一般的に2-2でも述べたリモートフィールド法が用いられることが多いが、管肉厚が4mmを越えるものや管の外側にアルミの冷却フィンが付いている鋼管に対しては、原理上適用は難しい。また、磁気ノイズの低減には、管を完全に磁気飽和させて材料内の比透磁率を1にする磁気飽和ECT法も有用であるが、厚肉が4mmを越える厚い管や、内径の小さい場合に管内側から磁



(a) 管内面キズ (キズ幅: 4mm)



(b) 管外面キズ (キズ幅: 4mm)

Fig.13 実験リサージュ波形  
(キズ深さ: 管肉厚に対し40%一定)

気飽和させることは物理的に不可能である。そこで我々は、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、キズによる信号のS/N比を改善した上でECTを適用する検査手法の検討を行った。この手法を未飽和領域磁化ECT法と呼ぶ<sup>(14),(15)</sup>。未飽和領域磁化ECT法では、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、通常ECTが適用可能な程度まで透磁率のばらつきを低減させ、磁気ノイズを抑え、キズによる信号を明確に得る工夫が施されてある。そのプローブの外観図をFig.15に示す。永久磁石の残留磁気値を0.0、0.5、0.8、1.1Tと変化させた時の強磁性体鋼管内断面の交流比透磁率分布解析結果をFig.16に示す。永久磁石が無いとき(0T時)では、比透磁率のばらつきが大きいことがわかる。しかし、永久磁石の残留磁気値を0.5、0.8Tと増加させるにつ

れ、比透磁率のばらつきが小さくなり1.1Tでは、ほぼ鋼管内側では比透磁率分布が均一になっていることが理解できる。この状態でキズを有し、その幅が変化したときの解析結果をFig.17に示す。キズが存在しないときは鋼管内側の比透磁率は均一なのに対し、キズが存在することにより比透磁率分布に乱れが生じていることが理解できる。またキズ幅が増えるに伴いその乱れは大きくなり、特にキズのエッジ部に大きな変化が生じていることが判る。

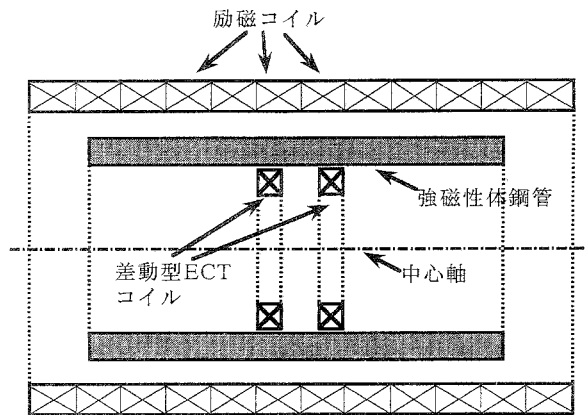


Fig.14 外側励磁における磁気飽和法の概念図

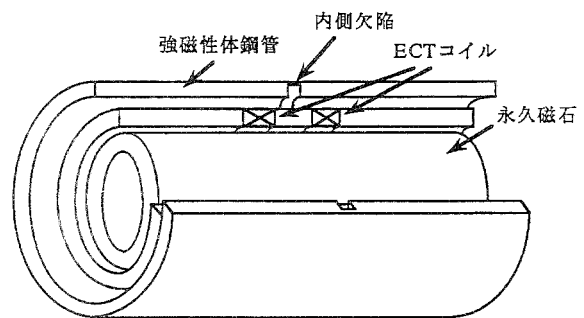


Fig.15 未飽和領域磁化ECTプローブ

#### 2.4.2 キズ検出

1.1Tの残留磁気値を持った永久磁石によるプローブを使用し、探傷検査を行ったときのインピーダンス解析結果をFig.18に示す。キズ幅が大きくなるにつれ、それぞれの振幅は増加し、位相差が生じていることが理解できる。

次に、通常のECTと未飽和磁化ECTとの比較試験を行った実験結果をFig.19に示す。通常ECTでは、磁気ノイズが大きく発生し、キズによる信号が得られないのに対し、未飽和磁化ECTプローブによる結果では、磁気ノイズが低減され、キズ信号が得られていることが理解できる。

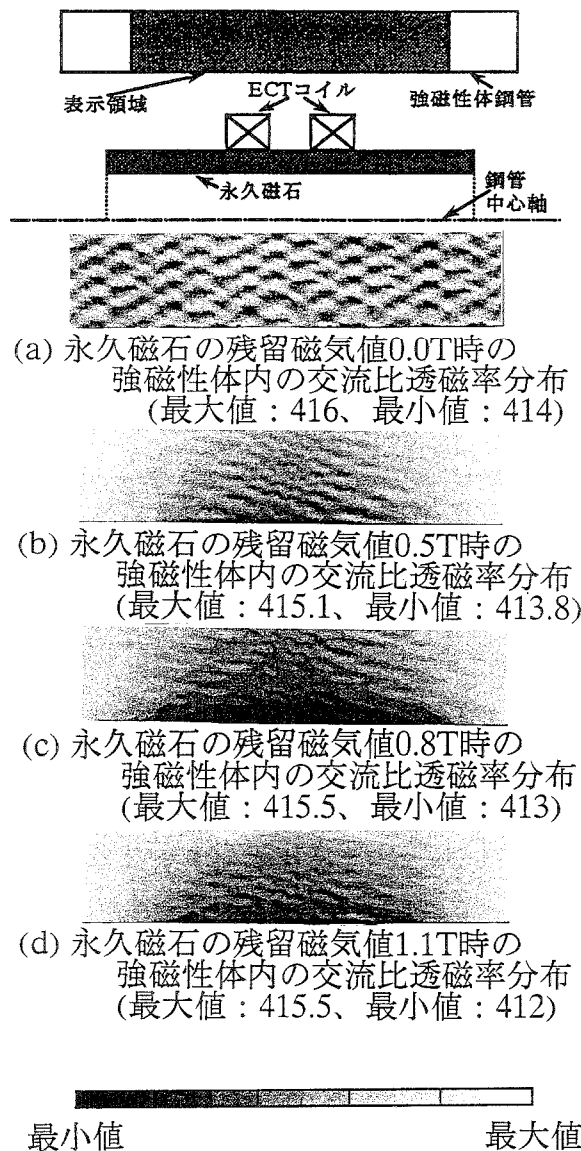


Fig.16 永久磁石の残留磁気値をパラメータにした強磁性体内部の交流比透磁率分布

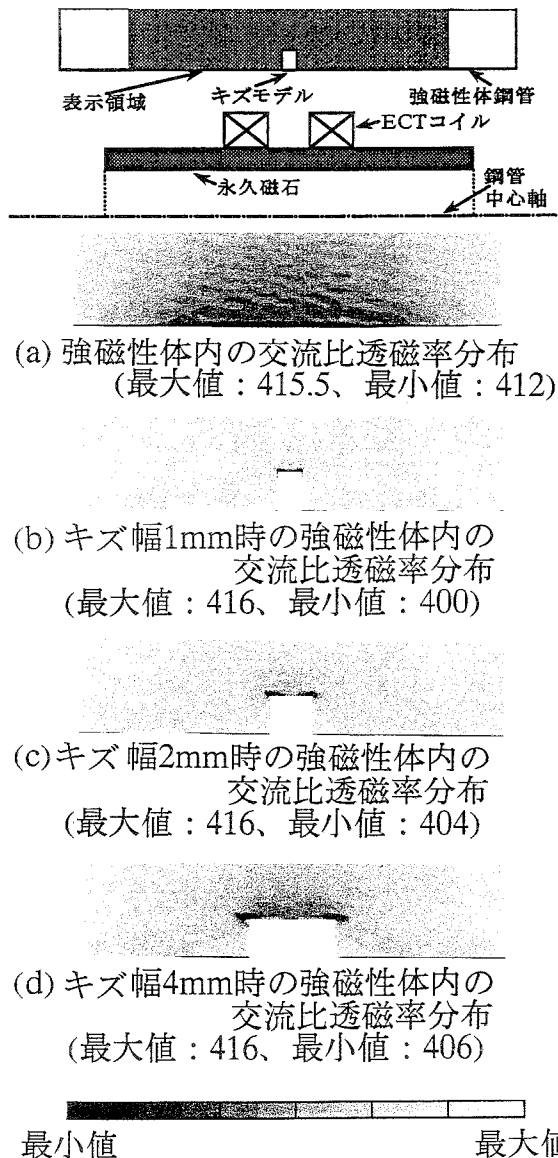


Fig.17 キズ幅変化による交流比透磁率分布 (永久磁石残留磁気値1.1T一定)

### III おわりに

本稿では電磁現象を応用した各種ECT手法すなわち、通常ECT法、リモートフィールドECT法、磁気飽和ECT法及び未飽和磁化ECT法について、それぞれの原理と特徴の紹介を行った。ECTは被検材の材質やその形状、キズ形態等で各手法の使い分けがされているが、電磁現象を利用していることから、最大の特徴は、どれも高速非接触で検査が行えることである。一方、近年コンピュータの高速化や解析アルゴリズムの充実等により、ECTを支援する数値解析技術は、ECTプローブの開発等に適用され、各種ECT手法のキズ検出精度向上に大きく貢献しており、今後のさらなる発展が期待されている。

### IV 今後の検討課題

近年では強磁性体鋼管の検査需要が高く、磁性体に適用可能なECT手法への期待が大きい。しかし、強磁性体は透磁率のばらつきやヒステリシス特性等の非線形磁気現象が密接に関係し、現象理解を難しくしている。磁性管には本稿でも取り上げたりリモートフィールドECT法や磁気飽和ECT法、未飽和領域磁化ECT法等の適用が検討され、一部実用化しているものの、S/N比や検査速度等の改善すべき課題は多く残る。今後はECT法の高速かつ非接触で検査が行なえるといった特徴を生かし、より信頼性の高い、磁性体に対する検査手法の構築に努めたいと考えている。



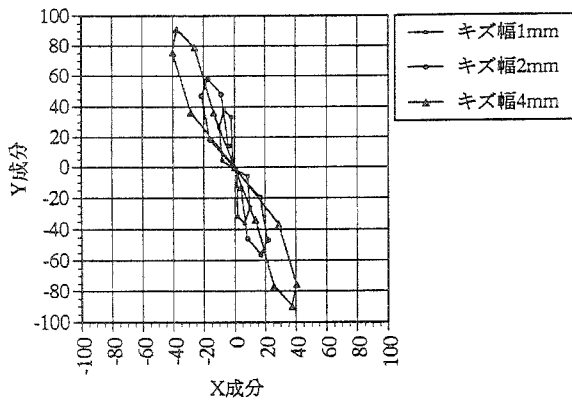


Fig.18 キズ幅変化によるリサージュ波形 (周波数300kHz)

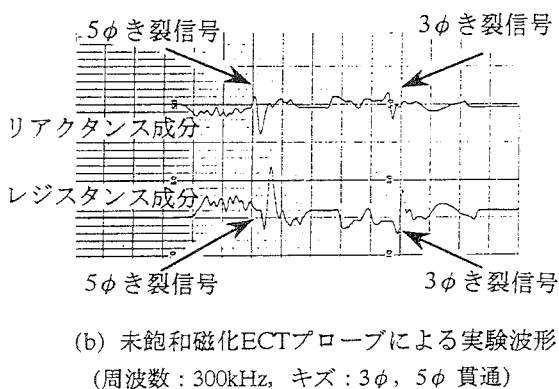
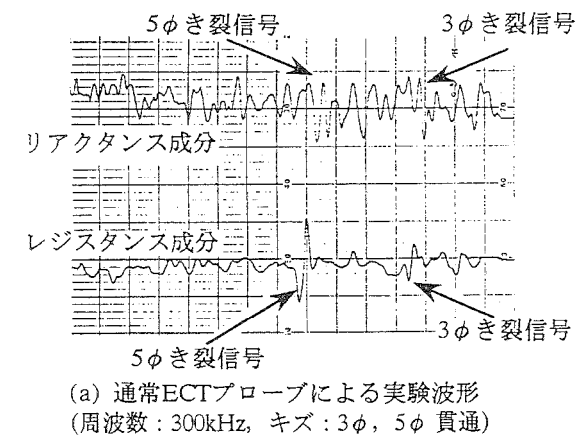


Fig.19 通常ECTと未飽和領域磁化ECTプローブとの比較

[参考文献]

(1) Akihisa Kameari: Solution of Asymmetric Conductor with A Hole by FEM using Edge-Elements, COMPEL, 9, pp.230-232 (1990)  
 (2) K.R.Richer, W.Renhart, O.Biro et al, Problem 8, Coil above a crack, COMPEL, 9, pp.254-256 (1990)

(3) Jiaming Jin: The Finite Element Method in Electromagnetics, A Wiley-Interscience Publication (1993)  
 (4) 福富広幸: 渦電流探傷法を支援する数値解析に関する研究、平成6年度、職業能力開発大学校修士論文  
 (5) 佐藤宏: 渦電流探傷試験法を支援する数値解析プログラムの開発に関する研究、平成8年度、職業能力開発大学校修士論文  
 (6) 後藤雄治: 強磁性体を対象とした電磁非破壊検査の数値解析支援に関する研究、平成9年度、職業能力開発大学校修士論文  
 (7) 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)  
 (8) 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)、日本非破壊検査、平成5年度秋季大会講演概要集、pp.271-278 (1993)  
 (9) 福富広幸、橋本光男: 反復法によるECTの三次元渦電流解析、日本非破壊検査、平成5年度秋季大会講演概要集、pp.261-266 (1993)  
 (10) 佐藤宏、橋本光男、福富広幸: き裂モデルの数値解析法の検討、日本非破壊検査協会平成8年度春季大会講演概要集、pp.91-94 (1996)  
 (11) 佐藤宏、越後智美、橋本光男: 三次元渦電流解析によるECTプローブの特性評価、画像技術の表面探傷への応用シンポジウム講演論文集、pp.125-128 (1997)  
 (12) 小山潔、星川洋、藤井徹: Remote-Field渦流試験における端効果の検討、日本非破壊検査平成5年度秋季大会講演概要集、pp.281-282 (1993)  
 (13) 坂本隆秀、藤原弘次、有田芳夫: 強磁性伝熱管の内挿コイルの渦流探傷試験、非破壊検査、41 (12)、pp.685-693 (1992)  
 (14) 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、Hawaii、USA、pp.265-268 (1996)  
 (15) 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)