

JAERI-Research

96-058



乱れ磁束検出型渦電流探傷プローブの 開発と基本特性

1996年10月

海老根典也・竹内信次郎・荒 克之

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

乱れ磁束検出型渦電流探傷プローブの開発と基本特性

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

海老根典也・竹内信次郎*・荒 克之[†]

(1996年10月7日受理)

欠陥の方向性によらず探傷可能な渦電流探傷プローブの開発を目的として、欠陥によって発生する磁束の乱れ成分のみを効果的に検出する方法を提案した。本方法は、励磁コイルによって作られる磁界の空間分布の対称性が欠陥の存在によって乱されることに着目し、乱れ成分のみを検出する手法である。プローブは、励磁磁界を発生させる平行四辺形平面コイルと、欠陥による磁束の乱れ成分を検出する差動型コイルで構成される。探傷プローブを試作し、平板上の模擬欠陥について探傷試験を行い、基本特性を調べた。その結果、縦欠陥、横欠陥および直径0.5mmの穴を検出することができ、本方法の有効性を確認した。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

* 原子炉工学部

† (株)エムティアイ

Development and Characteristic of a New Eddy Current Probe
for Detection of Magnetic Flux Distorted by a Flaw

Noriya EBINE, Shinjiro TAKEUCHI* and Katsuyuki ARA⁺

Department of Reactor Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 7, 1996)

A new type of eddy current probe, which is able to detect effectively the magnetic flux component distorted by a flaw and thus to eliminate the dependency of detection sensitivity in flaw detection, is proposed. This method is based on the principle that the symmetry of the spatial distribution of the magnetic field generated by the exciting coil is distorted by a flaw. The probe is to detect only the distorted magnetic flux component. The new type probe consists of exciting planar coils having a parallelogrammic shape and differential pick-up coils detecting magnetic flux. Using the probe fabricated on trial, the feasibility test detecting artificial flaws on a plate was conducted to obtain the basic characteristics. As a results, both the horizontal and the vertical slit-flaws and even the small hole of 0.5 mm in diameter can be detected successfully, and this method was confirmed to be effective.

Keywords: Eddy Current, Magnetic Flux, Detection Probe, Parallelogrammic Planar Coil,
Magnetic Flux Detection Coil

+ Department of Reactor Engineering

* MTI Co., Ltd.

目 次

1.	はじめに	1
2.	探傷法の原理	1
2.1	従来型の渦電流探傷法	1
2.2	乱れ磁束検出型渦電流探傷法の提案と基本原理	2
3.	平面コイル探傷プローブの構成と試作	3
3.1	基本構成	3
3.2	励磁用平面コイル	4
3.3	磁束検出コイル	5
4.	平行四辺形プローブによる探傷試験	7
4.1	平行四辺形渦電流探傷プローブの構成	7
4.2	実験方法	7
4.3	結果および考察	7
5.	まとめ	9
	参考文献	9

Contents

1.	Introduction	1
2.	Principle of Flaw Detection Method	1
2.1	Conventional Eddy Current Method	1
2.2	Proposed Eddy Current Method by Detection of Distorted Magnetic Flux and its Basic Principle	2
3.	Trial Fabrication of Planar Eddy Current Detection Probe	3
3.1	Basic Structure	3
3.2	Exciting Planar Coil	4
3.3	Magnetic Flux Detection Coil	5
4.	Experiments Using Parallerogrammic Eddy Current Probe	7
4.1	Structure of Parallerogrammic Eddy Current Probe	7
4.2	Test Procedure	7
4.3	Results and Discussion	7
5.	Conclusion	9
	References	9

1. はじめに

軽水炉発電が開始されてから既に約20年が経過し、我が国では現在40基以上の運転が行われている。これら原子力発電プラントは、設計寿命を約40年と設定しており、今後その寿命期間の後半を迎えるプラントに対しては、その構成機器の経年変化の把握や運転期間長期化への関心が高まっている。特に主要な機器に対しては、安全性および健全性の確保が求められている。そのために、機器の状態を把握する非破壊検査がおこなわれている。

数多い原子力機器の検査の中でも、加圧水型原子炉プラントの蒸気発生器伝熱管（SG細管）の探傷検査は、重要なものの一つである。それには、金属材料および構造物を対象とした非破壊検査法の一つとしてよく知られている渦電流探傷法が用いられている。SG細管の渦電流探傷には、管内へ挿入するボビンコイル型探傷プローブが広く使われている。しかし、渦電流の流れが細管の円周方向に限られるため、円周方向の傷や割れに対して検出感度が悪いという欠点がある^{(1), (2)}。そのため、マルチコイル型プローブや回転型プローブが開発されているが、耐久性や曲がり部の挿入性が劣り、またデータ処理量が増大するなどの実用上の問題点があるため、部分的に試行されているにすぎない。そのため、渦電流探傷法の高機能化と検出感度の向上を目指して、将来型の渦電流探傷プローブの研究が盛んになりつつある。例えば、アレイ化した複数のマイクロプローブの信号から傷形状の同定を行う方法^{(3),(4)}、3相コイルを用いる方法⁽⁵⁾、プレーナ形コイルを用いる方法⁽⁶⁾、フェライト磁心上に直交8の字コイル群をアレイ化する方法⁽⁷⁾、回転磁界を用いる方法^{(8),(9)}などそれぞれ新しいプローブが提案されている。

著者らは、欠陥の方向性によらず高感度の検出が可能でかつ形状の小型化が可能な渦電流探傷プローブの開発を目的として、平面コイルによって作られる磁界の空間分布が欠陥によって乱されることに着目して、その磁束の乱れ成分のみを効果的に検出する方法について研究を進めている^{(10)~(13)}。本報告書は、励磁コイルおよび磁束検出コイルの実験的検討をもとに、探傷不能領域を持たない平行四辺形平面コイルプローブの提案と、試作プローブの探傷特性についてまとめたものである。

2. 探傷法の原理

2. 1 従来型の渦電流探傷法

渦電流探傷法の原理を図1に示す。交流電流が流れているコイルを金属板の表面に近づけると、電磁誘導により金属板中に渦電流が生じる。このとき、渦電流の大きさは金属板の比抵抗によって決まる。したがって、金属板中に欠陥や傷割れがあると、局部的に比抵抗が変化したことになり、渦電流の流れが乱れ、結果的にコイルのインピーダンスが変化する。従来の渦電流探傷法においては、このインピーダンス変化を測定して欠陥を同定する方法がとられている。この方

1. はじめに

軽水炉発電が開始されてから既に約20年が経過し、我が国では現在40基以上の運転が行われている。これら原子力発電プラントは、設計寿命を約40年と設定しており、今後その寿命期間の後半を迎えるプラントに対しては、その構成機器の経年変化の把握や運転期間長期化への関心が高まっている。特に主要な機器に対しては、安全性および健全性の確保が求められている。そのために、機器の状態を把握する非破壊検査がおこなわれている。

数多い原子力機器の検査の中でも、加圧水型原子炉プラントの蒸気発生器伝熱管（SG細管）の探傷検査は、重要なものの一つである。それには、金属材料および構造物を対象とした非破壊検査法の一つとしてよく知られている渦電流探傷法が用いられている。SG細管の渦電流探傷には、管内へ挿入するボビンコイル型探傷プローブが広く使われている。しかし、渦電流の流れが細管の円周方向に限られるため、円周方向の傷や割れに対して検出感度が悪いという欠点がある^{(1), (2)}。そのため、マルチコイル型プローブや回転型プローブが開発されているが、耐久性や曲がり部の挿入性が劣り、またデータ処理量が増大するなどの実用上の問題点があるため、部分的に試行されているにすぎない。そのため、渦電流探傷法の高機能化と検出感度の向上を目指して、将来型の渦電流探傷プローブの研究が盛んになりつつある。例えば、アレイ化した複数のマイクロプローブの信号から傷形状の同定を行う方法^{(3),(4)}、3相コイルを用いる方法⁽⁵⁾、プレーナ形コイルを用いる方法⁽⁶⁾、フェライト磁心上に直交8の字コイル群をアレイ化する方法⁽⁷⁾、回転磁界を用いる方法^{(8),(9)}などそれぞれ新しいプローブが提案されている。

著者らは、欠陥の方向性によらず高感度の検出が可能でかつ形状の小型化が可能な渦電流探傷プローブの開発を目的として、平面コイルによって作られる磁界の空間分布が欠陥によって乱されることに着目して、その磁束の乱れ成分のみを効果的に検出する方法について研究を進めている^{(10)~(13)}。本報告書は、励磁コイルおよび磁束検出コイルの実験的検討をもとに、探傷不能領域を持たない平行四辺形平面コイルプローブの提案と、試作プローブの探傷特性についてまとめたものである。

2. 探傷法の原理

2. 1 従来型の渦電流探傷法

渦電流探傷法の原理を図1に示す。交流電流が流れているコイルを金属板の表面に近づけると、電磁誘導により金属板中に渦電流が生じる。このとき、渦電流の大きさは金属板の比抵抗によって決まる。したがって、金属板中に欠陥や傷割れがあると、局部的に比抵抗が変化したことになり、渦電流の流れが乱れ、結果的にコイルのインピーダンスが変化する。従来の渦電流探傷法においては、このインピーダンス変化を測定して欠陥を同定する方法がとられている。この方

法の等価回路を図2(a)に示す。すなわち、金属板の局部等価抵抗 r_e の変化に伴うコイルインピーダンス Z の変化を測定する。インピーダンス Z を $Z = R_{eq} + j\omega L_{eq}$ とすると、

$$R_{eq} = r_c + r_e \cdot \frac{\omega^2 L_1 L_2}{r_e^2 + \omega^2 (\ell_2 + L_2)^2} \quad (1)$$

$$L_{eq} = \ell_1 + L_1 - \frac{\omega^2 L_1 L_2 (\ell_2 + L_2)}{r_e^2 + \omega^2 (\ell_2 + L_2)^2} \quad (2)$$

となる。一般に、 r_e はコイルの抵抗 r_c やリアクタンス成分 $\omega(L+L_2)$ に比べてかなり小さく、 r_e の変化に伴うインピーダンス Z の変化も小さい。そのため、この変化成分のみを検出するには比較用コイルを別途用意して、ブリッジ回路構成とすることが必要とされる。しかし、比較用コイルとのブリッジ回路構成を採用する場合には、プローブ走行に伴う振動などにより不平衡雑音成分が必然的に外乱として入り込むため、この外乱雑音が微小欠陥の検出を制限する原因になる。

2. 2 亂れ磁束検出型渦電流探傷法の提案と基本原理

図2(b)に示すようにコイルのインピーダンスの変化ではなく、コイルの作る磁界に注目すると、 ϕ_1 はコイルのみに鎖交する磁束、 ϕ_2 は渦電流によって発生する磁束のうちコイルと鎖交しない磁束、 ϕ_m はコイルと金属板の両方に鎖交する磁束に分類される。 r_e が変化すれば、 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_m はともに変化する。したがって、この磁束変化成分のみを検出できるような磁束センサの幾何学的配置が可能ならば、比較用コイルが不要となり、しかもより高感度の探傷が期待できる。これは、インピーダンスはスカラーラー量であるのに対し、磁束はベクトル量で空間的に方向性を有することに着目している。この考えが、著者らが提案する乱れ磁束検出型渦電流探傷の基本原理である。

例として、図3(a)に示すように欠陥がない金属平板に対面してソレノイドコイルが配置されている場合を考える。いま、コイルは一定の高周波電流で励振されているとする。このときの点 $P(x_p, y_p, z_p)$ における磁界ベクトルの大きさを $H_p(x_p, y_p, z_p)$ とし、その x, y, z 方向成分をそれぞれ $H_x(x_p, y_p, z_p)$ 、 $H_y(x_p, y_p, z_p)$ 、 $H_z(x_p, y_p, z_p)$ とする。 H_x, H_y のそれぞれの線 (x, y, z_p) および線 (x_p, y, z_p) 上における分布は、図3(b)の実線に示すように奇関数となる。したがって、同図に示すように、長さ $2a$ の磁束検出コイルを線 (x, y, z_p) 上に $x=-a$ から $x=a$ にわたって配置したとすると、検出コイル（コイルはその長手方向を軸とするソレノイド状に一様に巻かれているとする）が検出する磁束総量 ϕ_x は、検出コイルの巻数、形状および透磁率から定まる定数を K とすると、

$$\phi_x = K \int_{-a}^a H_x dx = 0 \quad (3)$$

となる。線 (x_p, y, z_p) 上に $y=-a$ から $y=a$ に配置した場合も同様に磁束総量 ϕ_y は、

$$\phi_y = K \int_{-a}^a H_y dy = 0 \quad (4)$$

と、考えることができる。

つまり、欠陥がなく磁界の対称性が保たれているときには $\phi_x = 0$ 、 $\phi_y = 0$ となり検出コイルの両端に誘起する電圧はゼロとなるのに対して、欠陥が存在する場合には磁界分布は図3(b)の

点線に示すように対称性が乱され、 $\phi_x \neq 0$, $\phi_y \neq 0$ となり電圧が誘起されることになる。すなわち、被探傷金属板に欠陥や割れが無いときには出力はゼロで、欠陥や傷がある場合のみ出力信号が得られるような検出コイルの空間配置が可能となる。一方、磁界のz方向成分の空間分布は図3(c)に示すようにxおよびyに対して偶関数となるので、原点に対して対称に配置されたz方向の差動検出コイルを採用すれば、同様の結果が得られる。

ここで、被探傷金属板内の傷による渦電流の乱れが外部磁界の乱れの発生源となる様子を図4に示す。金属平板に誘起する渦電流の密度分布を J_e とすると、 $\text{div}J_e = 0$ 、より、 $J_e = \text{rot}M_e$ が導かれる。ここに M_e は電磁界解析分野において「電流ベクトルポテンシャル」と呼ばれているもので、その物理的意味は J_e が作る等価的な磁気ダイポール密度分布（単位体積当たりの磁気モーメント分布）である。いま金属平板中に欠陥がない場合およびある場合の渦電流密度分布をそれぞれ 0J_e , fJ_e とする。欠陥があるときの渦電流密度分布 fJ_e は欠陥がないときの分布 0J_e に欠陥があるために新たに発生した渦電流密度分布 dJ_e が重畠したものであると考えることができ、

$$^fJ_e = ^0J_e + dJ_e, \quad (5)$$

と書ける。したがって、 dM_e を欠陥のまわりに現われる等価的磁気ダイポール密度分布とすると、

$$^fJ_e = ^0J_e + \text{rot}dM_e, \quad (6)$$

となる。欠陥がある場合のコイル周辺の磁界は、コイルの励振電流と欠陥がないときの渦電流 0J_e が作る磁界に欠陥のまわりに現われる等価的磁気ダイポール密度分布 dM_e が作る磁界が重畠したものと考えることができる。すなわち、欠陥があるとそこに磁化分布 dM_e が出現して外部磁束分布を乱す源となると考えることができる。この dM_e の分布の様子が分かれれば、欠陥の大きさ、深さなどを推定することが可能であり、乱れ磁束検出法の新たな可能性が考えられる。

以下に、乱れ磁束検出法に関する基本式を整理して示す。

dJ_e と dM_e の関係式はそれぞれの位置ベクトルを r' とすると、

$$dJ_e(r') = \text{rot}dM_e(r') \quad (7)$$

また、 $dM_e(r')$ による位置 r におけるベクトルポテンシャル $A(r)$ と磁束密度 $B(r)$ は、

$$A(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V'} \frac{dM_e(r') \times (r - r')}{|r - r'|^3} dV' \quad (8)$$

$$B(r) = \text{rot}A(r) \quad (9)$$

と表せる。

3. 平面コイル探傷プローブの構成と試作

3. 1 基本構成

金属管内挿型探傷プローブとしての基本構成例を図5(a)に示す。円周面上に取り付けた複数の直列接続された励磁用平面コイルと、その周辺に配置された磁束検出用コイルから成る。励磁コ

点線に示すように対称性が乱され、 $\phi_x \neq 0$, $\phi_y \neq 0$ となり電圧が誘起されることになる。すなわち、被探傷金属板に欠陥や割れが無いときには出力はゼロで、欠陥や傷がある場合のみ出力信号が得られるような検出コイルの空間配置が可能となる。一方、磁界のz方向成分の空間分布は図3(c)に示すようにxおよびyに対して偶関数となるので、原点に対して対称に配置されたz方向の差動検出コイルを採用すれば、同様の結果が得られる。

ここで、被探傷金属板内の傷による渦電流の乱れが外部磁界の乱れの発生源となる様子を図4に示す。金属平板に誘起する渦電流の密度分布を J_e とすると、 $\text{div}J_e = 0$ 、より、 $J_e = \text{rot}M_e$ が導かれる。ここに M_e は電磁界解析分野において「電流ベクトルポテンシャル」と呼ばれているもので、その物理的意味は J_e が作る等価的な磁気ダイポール密度分布（単位体積当たりの磁気モーメント分布）である。いま金属平板中に欠陥がない場合およびある場合の渦電流密度分布をそれぞれ 0J_e , fJ_e とする。欠陥があるときの渦電流密度分布 fJ_e は欠陥がないときの分布 0J_e に欠陥があるために新たに発生した渦電流密度分布 dJ_e が重畠したものであると考えることができ、

$$^fJ_e = ^0J_e + ^dJ_e, \quad (5)$$

と書ける。したがって、 dM_e を欠陥のまわりに現われる等価的磁気ダイポール密度分布とすると、

$$^fJ_e = ^0J_e + \text{rot}^dM_e, \quad (6)$$

となる。欠陥がある場合のコイル周辺の磁界は、コイルの励振電流と欠陥がないときの渦電流 0J_e が作る磁界に欠陥のまわりに現われる等価的磁気ダイポール密度分布 dM_e が作る磁界が重畠したものと考えることができる。すなわち、欠陥があるとそこに磁化分布 dM_e が出現して外部磁束分布を乱す源となると考えることができる。この dM_e の分布の様子が分かれれば、欠陥の大きさ、深さなどを推定することが可能であり、乱れ磁束検出法の新たな可能性が考えられる。

以下に、乱れ磁束検出法に関する基本式を整理して示す。

dJ_e と dM_e の関係式はそれぞれの位置ベクトルを r' とすると、

$$^dJ_e(r') = \text{rot}^dM_e(r') \quad (7)$$

また、 $^dM_e(r')$ による位置 r におけるベクトルポテンシャル $A(r)$ と磁束密度 $B(r)$ は、

$$A(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V'} \frac{^dM_e(r') \times (r - r')}{|r - r'|^3} dV' \quad (8)$$

$$B(r) = \text{rot}A(r) \quad (9)$$

と表せる。

3. 平面コイル探傷プローブの構成と試作

3. 1 基本構成

金属管内挿型探傷プローブとしての基本構成例を図5(a)に示す。円周面に取り付けた複数の直列接続された励磁用平面コイルと、その周辺に配置された磁束検出用コイルから成る。励磁コ

イルによって作られる磁界は円周面に沿って空間的な周期性をもち、この周期性が欠陥によって乱されたとき、その乱れ成分のみをどのように感度良く検出するかが本プローブの重要なポイントとなる。コイル群の配置を平面展開したものを図5(b)に示す。プローブには軸方向の乱れを検出する磁束検出コイルAおよび円周方向の乱れを検出する磁束検出コイルBを設けてある。複数個の平面コイルは直列接続されており、その接続方法の例を図6に示す。(a)の左図に示すような角形平面コイルを採用するとして、その極性を右図のように表すとすると、その接続方法には(b),(c)に示す2通りが考えられる。渦電流は、図に示した電流の流れ模様の鏡像となるので検出対称とする欠陥や傷割れに対してより有効な接続を選ぶことになる。実際には、いくつかの代表的欠陥パターンに対する検出特性試験を検出コイルの配置と関連づけながら実施し決定する必要がある。

3. 2 励磁用平面コイル

探傷プローブの性能は励磁コイルによって発生する磁界分布に支配されると考えられるので、以下のように、正方形および平行四辺形の励磁用平面コイルについて比較検討を行った。

3. 2. 1 正方形平面コイルの励磁界分布

実験に使用した2連の励磁用正方形平面コイルを図7に示す。外形寸法が $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ の正方形平面内に直径 0.11 mm の線を巻いたコイルを2個作り、それらを 2 mm の間隔をおいて平行に配置し、励磁電流が互いに対称になるような接続で2連にしたものである。

励磁界分布測定回路を図8に示す。励磁用平面コイルには $200\text{ kHz} - 93\text{ mA}$ (peak to peak)の正弦波励磁電流を供給した。図中には電流の方向とそれが作る磁界の方向を示してある。左側のコイルでは磁界はコイル中心に吸い込まれるように、また右側のコイルではコイル中心より涌き出るように分布する。励磁界分布の計測は、厚さ 1 mm のアルミ板の上に正方形平面コイルを置き、その上の高さ 0.5 mm の位置で磁束検出コイルを移動させているときの誘起電圧(振幅)をロックインアンプを用いて測定し、位置検出器の電圧とともに連続してXYレコーダに記録した。測定に使用した磁束検出コイルは、直径 0.2 mm 、長さ 45 mm のパーマロイ磁性線の中央部に直径 $50\text{ }\mu\text{m}$ の線を 1 mm 幅に納まるようにして巻いたものである。したがって、この磁束検出コイルで検出するのは、磁束検出コイル部の磁性線幅を長手方向に横切る磁束である。このような検出体系とした理由は図5(a)に示した実際のプローブにおいて高透磁率の磁性線に巻いた磁束検出コイル群を用いることになるからである。すなわち、実際の磁界検出体系において励磁界分布を評価することが本測定の目的である。磁束検出コイルは、図8に示すX, Y座標にしたがって、Y方向位置を定めた後、X方向へ移動させた。また、Y方向位置については、 1 mm 刻みで移動させた。

このようにして得られた励磁界による電圧分布を図9に示す。図9(a)は、正方形コイルが1個、(b)は、コイルが2連の場合である。測定を実施した平面励磁コイルのわずか 0.5 mm 上面での磁界は励磁コイル面での磁界とほぼ等しいと考えると、この測定面での磁界の方向は図8の矢印で示すように励磁電流にはほぼ直交していると考えてよい。したがって、図9に示す測定結果に

おいて、X方向の磁界測定では励磁コイルの上下端部では磁界が非常に弱く、左右端部で検出される（左端部で正方向とすると右端部では負方向となる）。また、図から磁界が最大となる位置は励磁コイルの端部より約2mmほど内側であることがわかる。(a)と(b)を比較すると、1個の正方形平面コイルの励磁界のおよぶ範囲はほぼコイル領域内に限られ、したがって2個のコイルを連結してもコイル同士に挟まれた中間部の合成磁束は相乗効果により強まるということではなく、個別の正方形平面コイルの磁束がそれぞれの対応位置に現れるだけである。それゆえ、正方形平面コイルを多数横方向に連結したとしても、2連の正方形平面コイルの磁界分布の周期的な繰り返しになる。

3. 2. 2 平行四辺形平面コイルの励磁界分布

正方形平面コイルにおいては、図9に示すように、横欠陥（長手方向が移動方向に直交しているき裂状欠陥）がコイルの左右端部を上下に移動する場合は渦電流が乱され、欠陥周辺部に見かけ上の磁気ダイポール分布が誘起され磁界分布を乱すが、上下端中央部近傍を移動する場合は欠陥の方向と渦電流の方向が同じなため、渦電流の乱れすなわち磁界の乱れはほとんど生じない。縦欠陥（長手方向が移動方向と同じき裂状欠陥）が上下に移動する場合は逆に励磁コイルの上下端中央部近傍で磁界が乱され、左右端部では乱されない。すなわち、正方形平面コイルのプローブには欠陥の方向性による欠陥検出に対する空間的な死角が生じるという問題がある。

この問題を解決するためコイルの形状を平行四辺形にした場合の磁界分布を検討した。2連にしたコイルの形状を図10に示す。横欠陥および縦欠陥の両者に対して有効な斜め方向の渦電流を被探傷金属面に誘導するために、斜め方向の電流成分が流れるような平行四辺形平面コイル状のプローブとしたものである。この構成においても、コイルの斜め角度と同じ角度の斜め欠陥に対しては死角となるが、一般に金属管においては円周方向の欠陥と縦欠陥が検出の対象であり、図に示すような平面展開構成では横欠陥と縦欠陥のみを考えればよい。正方形平面コイルの場合と同様にして測定した平行四辺形平面コイルの励磁界による電圧分布を図11に示す。図11(a)は、コイルが1個の場合、(b)は、コイルが2連の場合である。正方形平面コイルの場合と同様にコイルの形状に沿った磁界分布が得られている。斜め両端部の約2 mm内側あたりが磁界強度が高く、この部分を横欠陥および縦欠陥が移動するとき磁束の乱れが大きく生じることになる。すなわち、平行四辺形平面コイルでは縦欠陥に対してはコイルの上下端部および左右の斜め端部で磁束の乱れが生じ、横欠陥に対しては左右の斜め端部で磁束の乱れが生じることになる。したがって、欠陥が上下に移動するとき欠陥は必ず左または右の斜め端部を通過するようにコイルの辺の長さと斜め角度を調整すれば、欠陥の方向性と位置空間に対する欠陥検出の死角をなくすことができる。

3. 3 磁束検出コイル

3. 3. 1 磁束検出コイルの構成

図12は磁束検出コイルの構成を説明するための図である。(a)に示すように被探傷金属板に誘起されて流れる渦電流 i_e は穴の周辺においてそれを避けるように湾曲して流れることになる。

そのため、この湾曲した電流成分によって穴の左上側では磁束 ϕ_1 が、右上側では ϕ_2 がそれぞれ発生する。さらにこれらをX成分に分解すると ϕ_{1x} および ϕ_{2x} となり、両者のX軸成分の方向は反対になることが分かる。図12の(b),(c)は、渦電流に沿って形成される磁束を金属板の表面の上方空間で検出するためのコイルである。(b)の一方向に巻かれた検出コイルでは、 ϕ_{1x} および ϕ_{2x} の変化によって誘導される誘導電圧 e_{1x} および e_{2x} は逆極性となり、A, B端子間では、打ち消しあって小さくなり、かつ $|e_{1x}|$ および $|e_{2x}|$ に差がある場合のみ検出コイルに誘導電圧が観測されるにすぎない。それに対して、(c)の差動検出コイルでは、誘導電圧 e_{1x} , e_{2x} を加算する結線であるため(b)の検出コイルの場合よりはるかに高い誘導電圧を観測することが可能である。したがって、磁束検出コイルとしては差動コイル群を直列接続する構成が良い。

3. 3. 2 磁束検出コイルの走査方向

本探傷法は磁束の乱れを検出するため、検出素子である磁束検出コイルの走査方向の違いによる欠陥の検出特性について調べた。励磁には図7に示した2連の12mm角の正方形平面コイルを用いて、その中央部に磁束検出コイルを配置した。使用した検出コイルは、直径0.2 mm, 長さが19 mmのパーマロイ磁性線2本を1組として磁心とし、直径50 μm の線を75ターンー75ターンに差動巻きしたものを2連にしたコイルである。各75ターンの巻線部の長さは4.5 mm, 巷線部の全長は18 mmとし、励磁用平面コイルの外枠付近の磁束も検出できるように平面コイルの幅より長くしている。検出対象とした欠陥は、150 mm角の厚さ1 mmのアルミ板の中央部に開けた直径0.5 mmの貫通穴とした。プローブの走査方向は図13に示すように(a)横走査（磁束検出コイルの中心軸に対して欠陥が直角方向に横断する）と(b)縦走査（磁束検出コイルの中心軸に対して欠陥が平行に通過する）とし、ロックインアンプで測定した磁束検出コイルの検出電圧について比較検討した。

横走査の結果は、図14の(a)に示す通りである。欠陥の通過によって誘起電圧が変化している所は欠陥の検出が可能であることを示している。しかし、電圧振幅の非常に小さくなる所(Y = ±2mm付近)があり、ここでは欠陥が検出不能となるため何らかの検出漏れ防止の対策が必要となる。

縦走査の結果は、図14の(b)に示す通りである。欠陥の検出可能な範囲は磁束検出コイルの中心軸を対称に土約2 mmの狭い範囲に限定されており、磁束検出コイルから欠陥が遠いほど電圧は小さくなっている。また、磁束検出コイルの中心軸上を対称な欠陥が通過する場合には原理的に磁束分布の対称性が崩れず誘起電圧が生じないため、検出不能である。縦走査による使用方法では、欠陥が磁束検出コイルの近傍を通過した時に検出が限られ、検出不能領域があまりにも広い。

以上の2つの走査方向の比較から、欠陥が必ず磁束検出コイルを横断するようにした横走査のほうが欠陥の検出漏れが少なく本探傷法には適している。

4. 平行四辺形プローブによる探傷試験

4. 1 平行四辺形渦電流探傷プローブの構成

管を探傷するためには、円筒形の内挿形プローブを構成する必要があるが、基礎的特性を検討するためにプローブを平面に展開した状態で試験を行った。図15に、平行四辺形渦電流探傷プローブの構成を示す。この平行四辺形探傷プローブは細長い6個の平行四辺形をした励磁コイルと走査方向の前縁端部、後縁端部および斜めの中間部に配置した磁束検出コイルで構成されている。欠陥検出の中心的役割を果たすのは斜めに配置された磁束検出コイルであり、このコイルによる検出電圧変化により欠陥を検出する。励磁コイルに流れる励磁電流の方向は、隣接する平面コイル部分で励磁磁界が互いに強め合って同じ方向になるように接続されている。各平面コイルで使用した線の直径は0.11 mmで、7本/mmの線密度で巻いてある。磁束検出コイルは、微小な傷に対する感度を持たせるために直径0.2 mmのパーマロイ磁性線2本を一組として磁心とし、その周囲に直径50 μ mの線を75ターンー75ターンの差動巻きにした1連の差動コイルを最小単位としている。本プローブは磁束検出コイルと励磁コイルの組み合わせが周期的に繰り返す構成になっており、また、検出対象とする欠陥は、空間周期の長さより十分小さなものであり、一つの磁束検出コイルの周辺の特性を把握できれば他の部分の特性も同様と考えられる。そのため、本実験では、基礎的特性把握のため、3連の差動コイルを磁束検出コイルとして平行四辺形の斜めの部分にのみ配置したものを用いた。

4. 2 実験方法

図16は、平行四辺形平面コイルプローブによる探傷試験をするための測定回路である。探傷試験では、中央部に模擬欠陥を加工した縦300mm、横300mm、厚さ1mmのアルミ板上を探傷プローブを走行させ、各種の傷によって斜めに配置した磁束検出コイルの出力電圧が変化する様子をロックインアンプにより測定しリニアポテンショメーターの位置信号とともに記録した。励磁コイルには200 kHz の正弦波電流を0.5Ap-p 流した。なお、厚さ0.1 mmのポリイミドシートをアルミ板とプローブの間に敷き、リフトオフ高さは一定に保っている。

また、探傷の対象とした模擬欠陥は、本方法の探傷限界を知るためにできるだけ小さい直径0.5 mmおよび1 mmの穴および長さ5 mm、幅0.4 mmのスリットとした。穴の深さは、板厚1 mmに対して深さ/板厚が、15, 30, 50, 75, 100 %（貫通）とした。欠陥がプローブと対面する場合を内面欠陥、裏面にある場合を外面欠陥と呼ぶことにする。また、スリット欠陥の長手方向が探傷プローブの走査方向と平行な場合を縦欠陥、垂直な場合を横欠陥と呼ぶこととする。

4. 3 結果および考察

4. 3. 1 横欠陥および縦欠陥の検出

長さ5mm、幅0.4mm、深さ15%の内面の横欠陥および縦欠陥の探傷結果をそれぞれ図17お

より図18に示す。励磁磁場分布が斜めになっているため欠陥の方向が異なっていても、磁束検出コイルを通過する際に明瞭な電圧変化が生じており、欠陥検出が可能である。両欠陥の探傷結果には、縦欠陥のほうが磁束検出コイルを通過するX方向の長さが長いために電圧変化の生じている長さが長くなるという違いがある。一般に欠陥は幅が非常に狭いため、電圧変化の生じている長さに注目することにより欠陥の方向及び長さの同定が期待できる。

4. 3. 2 内面欠陥および外面欠陥の検出

図19に直径1mm、深さ30%の内面の穴を探傷した場合の磁束検出コイルの出力電圧変化の記録を示す。プローブのいずれの位置を欠陥が通過しても明瞭な電圧変化がみられる。図20は図19と同じ大きさの外面欠陥の探傷結果である。出力電圧変化が小さいためレコーダーの感度を10倍で記録した。内面欠陥の場合と比べると電圧変化が小さくなっているが、無欠陥部分との差異は明らかである。

4. 3. 3 励磁周波数特性

図21および図22はそれぞれ内面及び外面の横欠陥（長さ5 mm, 幅0.4 mm, 深さ15%のスリット）に対してプローブの励磁電流の周波数を変えたときの磁束検出コイルの出力電圧変動のピーク値を示したものである。欠陥の通過位置は図15の点Pを原点とする座標においてY=15mmの場合である。内面欠陥については60 kHz以下の低い周波数では検出電圧が小さく、それより高い周波数領域で大きな検出電圧が生じ160 kHz付近で検出感度が最大となる。また、外面欠陥については、20 kHzの低い周波数で検出感度が極大となりそれ以上の周波数領域では検出感度が低下する。しかし60 kHz以上の周波数領域において再び検出感度が高くなるが同時に被探傷アルミ板表面の材質不均質性に基づく雑音信号も大きくなる。周波数によるこの違いは、表皮効果によるものである。アルミニウムの浸透深さ（表面における電流値の37%になる深さ）は、200 kHzでは、0.22 mm程度であるのに対して、20 kHzでは0.75 mm程度である。本結果は深さが15%（0.15 mm）の欠陥についてのものである。そのため、内面欠陥では高い周波数、外面欠陥では低い周波数で検出できるわけである。この表皮効果の特徴を生かし、多重周波数を同時に励磁電流として加える方法により、欠陥の深さに関する情報が得られる可能性がある。

4. 3. 4 穴欠陥の深さによる検出電圧の変化

欠陥の深さの違いによる検出電圧の変化を示したものが図23および図24である。これらには欠陥がY=23 mmの位置を通過した際の出力電圧のピーク値をプロットしてある。いずれも欠陥深さが大きくなるにしたがい検出電圧は大きくなっている。内面欠陥の場合は明瞭な出力電圧の変化が現れるため、深さ15%であっても直径0.5 mmの穴を十分に検出できている。一方、外面欠陥の場合は出力電圧変化が小さい。

5. まとめ

縦欠陥および横欠陥の両方が共に検出可能で、空間的に欠陥検出の不能部分のない渦電流探傷プローブを実現するため、乱れ磁束検出型の平行四辺形探傷プローブを考案し、試作した。プローブは、励磁コイルを平行四辺形平面コイルとし、乱れ磁束検出コイルとして探傷時の走査方向に直交する励磁コイルの前縁部と後縁部に、また隣接する平面コイルの斜めの中間部に差動コイル群を直列接続した構成とした。

模擬欠陥による探傷試験を行った結果、縦欠陥および横欠陥のいずれであっても検出ができたことから、本プローブは、欠陥の方向に左右されない探傷が可能であることが確認できた。また、直径0.5 mmの貫通穴の探傷が可能であったことから、平行四辺形平面コイルプローブの適用範囲は、小さい穴の探傷から大きなスリット欠陥に至るまで有効であることが分かった。また、励磁周波数を変えることにより内面欠陥および外面欠陥が検出できることから、欠陥の深さに関しては、周波数の多重化を行い表皮効果を利用した認識ができると考えられる。

今後は、定量化のための欠陥形状と出力電圧パターンの関係等を把握し、ニューラルネットワーク等と結合した傷検出形状認識システムの可能性を探求する予定である。また、管内挿型の探傷プローブを開発する計画である。

参考文献

- (1) 日本非破壊検査協会（編）：渦流探傷試験III，日本非破壊検査協会，(1984)
- (2) 神村武男：「非破壊計測技術の最近の話題：II. 渦電流応用技術」，日本原子力学会誌，33, 638 (1991)
- (3) 上坂充・白田和己・宮健三・青木一彦・高橋歩：電気学会論文誌C, 115, 961 (1995)
- (4) G.Z.Chen, Y.Yoshida, K.Miya: 原子力学会・1994年春の年会要旨集，論文J47, 448, (1994)
- (5) I.Marinova, S.Hayano, N.Ishida, Y.Saito: J. Appl. Phys., 75, 5904 (1994)
- (6) S.Yamada, M.Kato, M.Iwahara, F.P.Dawson: IEEE Trans. Mag., 31, 3185 (1995)
- (7) I.Sasada, I.Watanabe: ibid., 3149
- (8) S.Nagata, M.Enokizono: Simulation and Design of Applied Electromagnetic Systems (ed. T.Honma), Elsevier Science B.V., 25 (1994)
- (9) 徳村和憲・小山潔・星川洋：非破壊検査協会平成6年度秋季大会講演概要集，133 (1994)
- (10) 海老根・荒・中島・竹内・原：日本応用磁気学会誌，20, 633 (1995)
- (11) 海老根・竹内・荒・中島：電気学会マグнетックス研究会資料，MAG-94-76 (1994)
- (12) 海老根・竹内・荒・中島：電気学会マグネットックス研究会資料，MAG-94-225 (1994)
- (13) 海老根・竹内・荒：電気学会論文誌A, 115, 999 (1995)

5. まとめ

縦欠陥および横欠陥の両方が共に検出可能で、空間的に欠陥検出の不能部分のない渦電流探傷プローブを実現するため、乱れ磁束検出型の平行四辺形探傷プローブを考案し、試作した。プローブは、励磁コイルを平行四辺形平面コイルとし、乱れ磁束検出コイルとして探傷時の走査方向に直交する励磁コイルの前縁部と後縁部に、また隣接する平面コイルの斜めの中間部に差動コイル群を直列接続した構成とした。

模擬欠陥による探傷試験を行った結果、縦欠陥および横欠陥のいずれであっても検出ができたことから、本プローブは、欠陥の方向に左右されない探傷が可能であることが確認できた。また、直径0.5 mmの貫通穴の探傷が可能であったことから、平行四辺形平面コイルプローブの適用範囲は、小さい穴の探傷から大きなスリット欠陥に至るまで有効であることが分かった。また、励磁周波数を変えることにより内面欠陥および外面欠陥が検出できることから、欠陥の深さに関しては、周波数の多重化を行い表皮効果を利用した認識ができると考えられる。

今後は、定量化のための欠陥形状と出力電圧パターンの関係等を把握し、ニューラルネットワーク等と結合した傷検出形状認識システムの可能性を探求する予定である。また、管内挿型の探傷プローブを開発する計画である。

参考文献

- (1) 日本非破壊検査協会（編）：渦流探傷試験III，日本非破壊検査協会，(1984)
- (2) 神村武男：「非破壊計測技術の最近の話題：II. 渦電流応用技術」，日本原子力学会誌，33, 638 (1991)
- (3) 上坂充・白田和己・宮健三・青木一彦・高橋歩：電気学会論文誌C, 115, 961 (1995)
- (4) G.Z.Chen, Y.Yoshida, K.Miya: 原子力学会・1994年春の年会要旨集，論文J47, 448, (1994)
- (5) I.Marinova, S.Hayano, N.Ishida, Y.Saito: J. Appl. Phys., 75, 5904 (1994)
- (6) S.Yamada, M.Kato, M.Iwahara, F.P.Dawson: IEEE Trans. Mag., 31, 3185 (1995)
- (7) I.Sasada, I.Watanabe: ibid., 3149
- (8) S.Nagata, M.Enokizono: Simulation and Design of Applied Electromagnetic Systems (ed. T.Honma), Elsevier Science B.V., 25 (1994)
- (9) 徳村和憲・小山潔・星川洋：非破壊検査協会平成6年度秋季大会講演概要集，133 (1994)
- (10) 海老根・荒・中島・竹内・原：日本応用磁気学会誌，20, 633 (1995)
- (11) 海老根・竹内・荒・中島：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-94-76 (1994)
- (12) 海老根・竹内・荒・中島：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-94-225 (1994)
- (13) 海老根・竹内・荒：電気学会論文誌A, 115, 999 (1995)

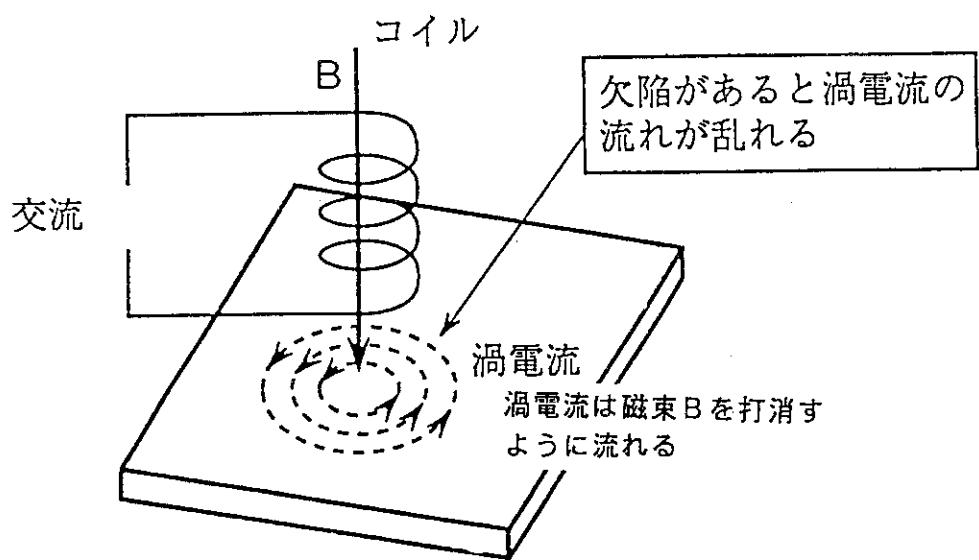


図1 漏電流探傷法の原理

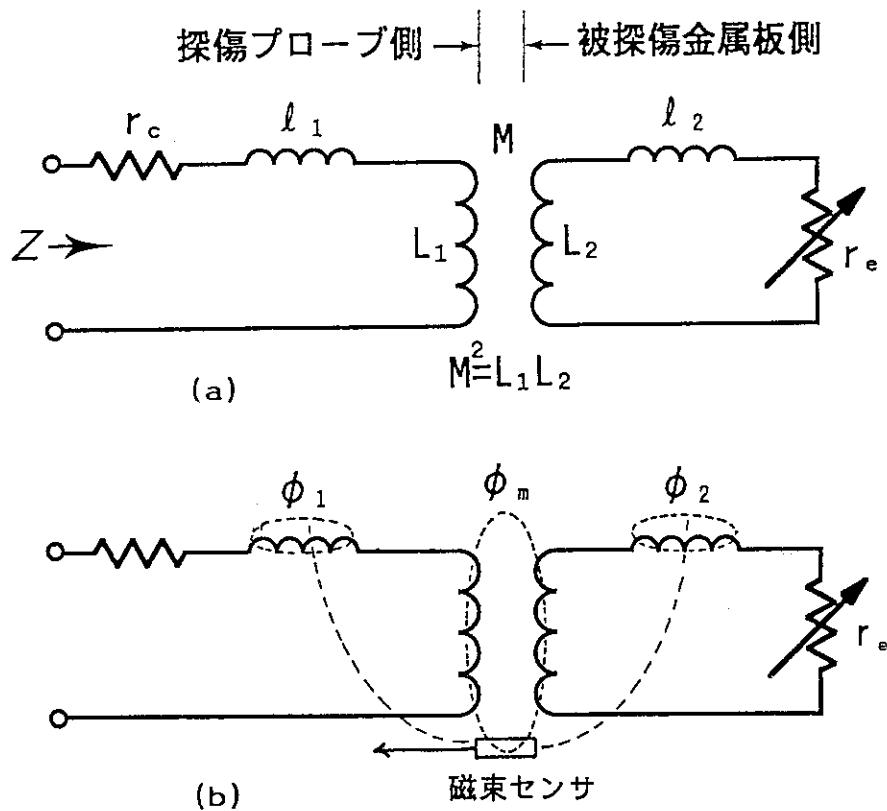


図2 漏電流探傷法の等価回路 ; (a)従来型, (b)乱れ磁束検出型

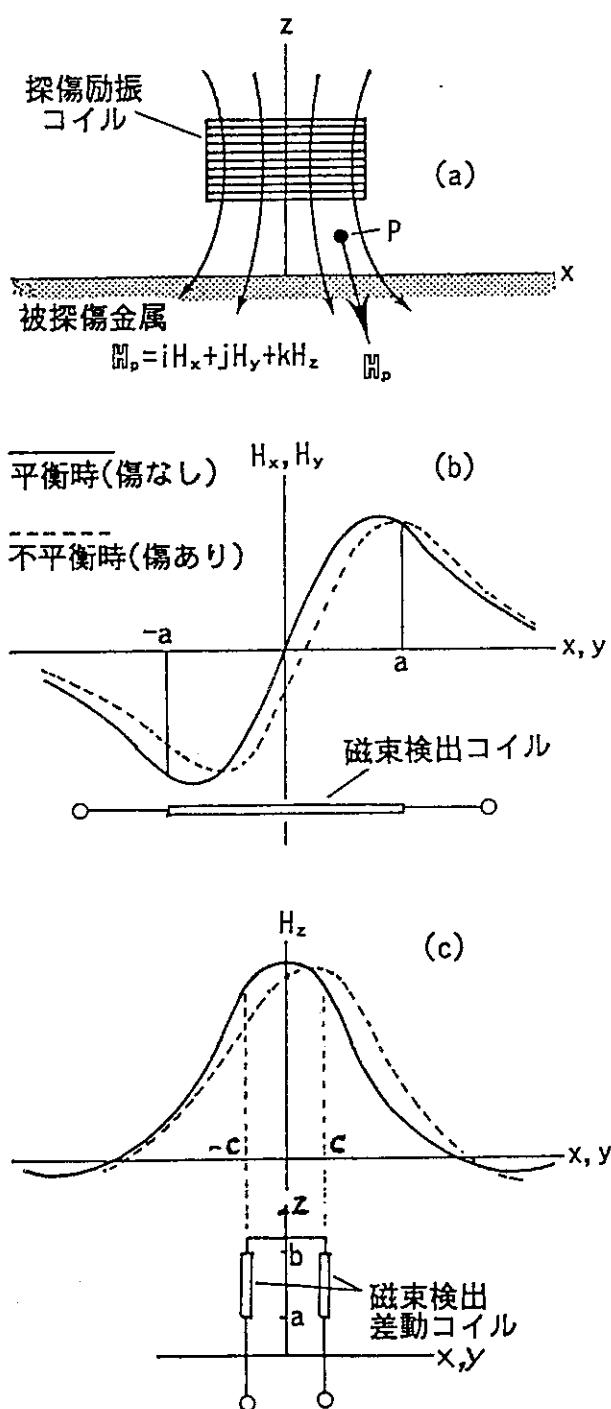


図3 亂れ磁束検出型渦電流探傷法の原理；(a)励磁コイルによる磁界，
(b)磁界のx成分およびy成分の分布，(c)磁界のz成分の分布

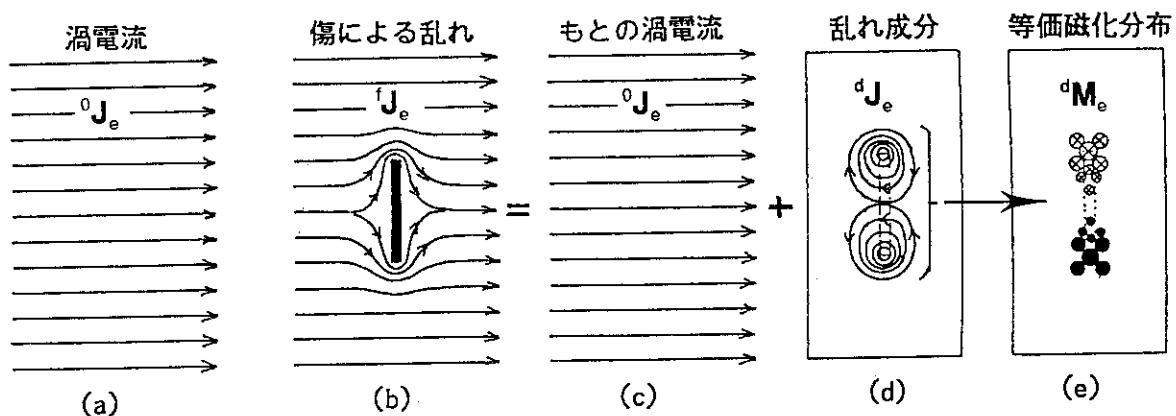


図4 漏電流分布；(a)欠陥がないときの局部漏電流分布, (b)欠陥による漏電流分布,
(c)もとの漏電流分布, (d)漏電流の乱れ成分, (e)乱れ成分による等価磁化分布

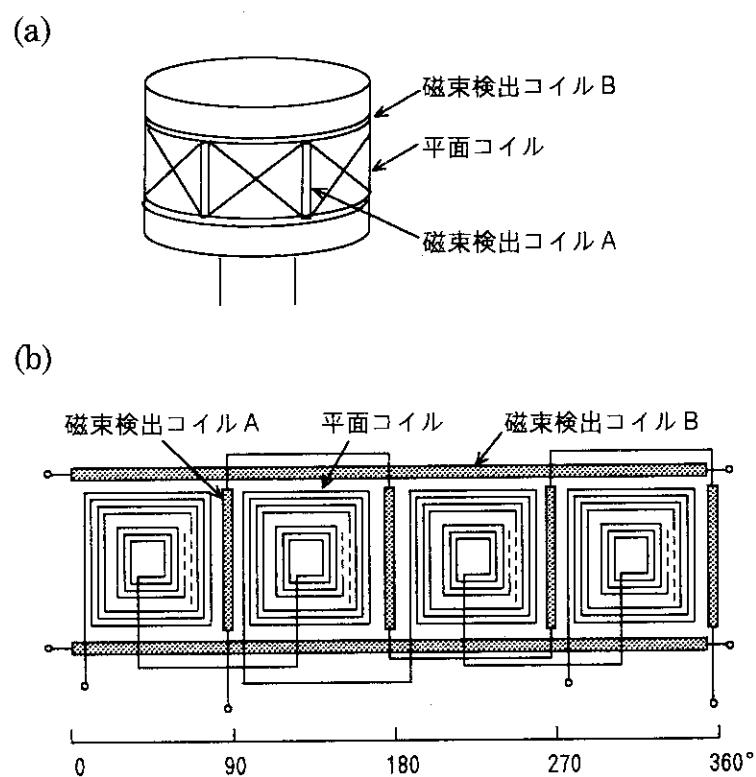


図5 亂れ磁束検出型探傷プローブの基本構成；
(a)金属管内挿型探傷プローブの基本構成, (b)プローブの平面展開図

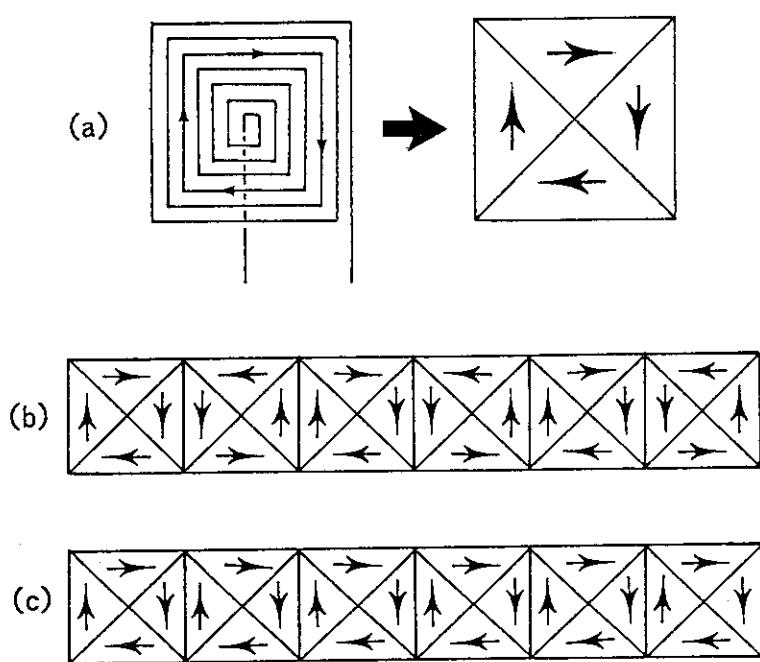


図6 探傷プローブ用平面コイルとその接続配列の例；
 (a)角型シングル平面コイルとその極性表現、(b)平面コイルの極性が交互に逆転する接続配列、(c)平面コイルの極性をそろえた接続配列

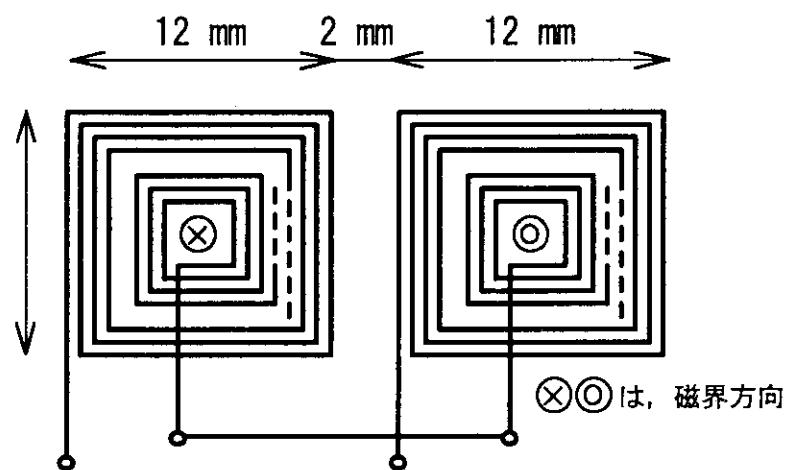


図7 2連の正方形平面コイル

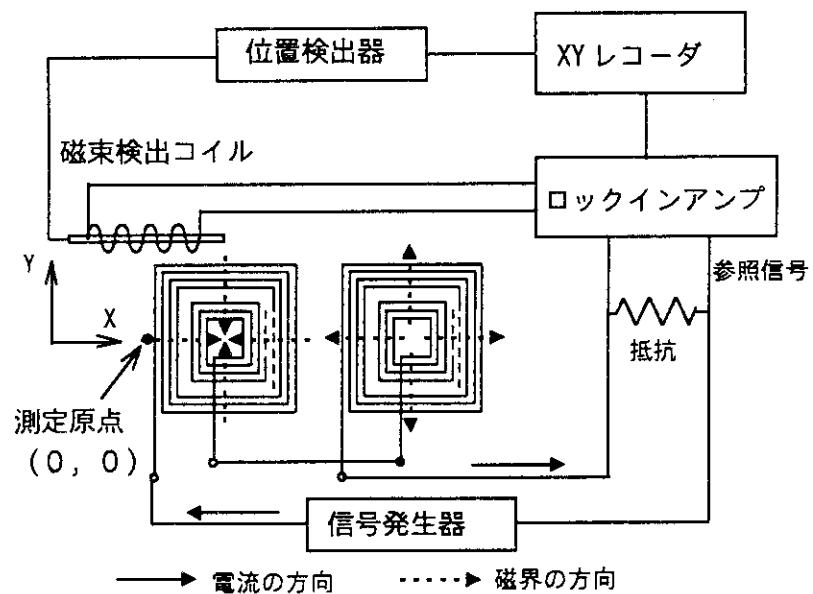


図8 励磁界分布測定回路

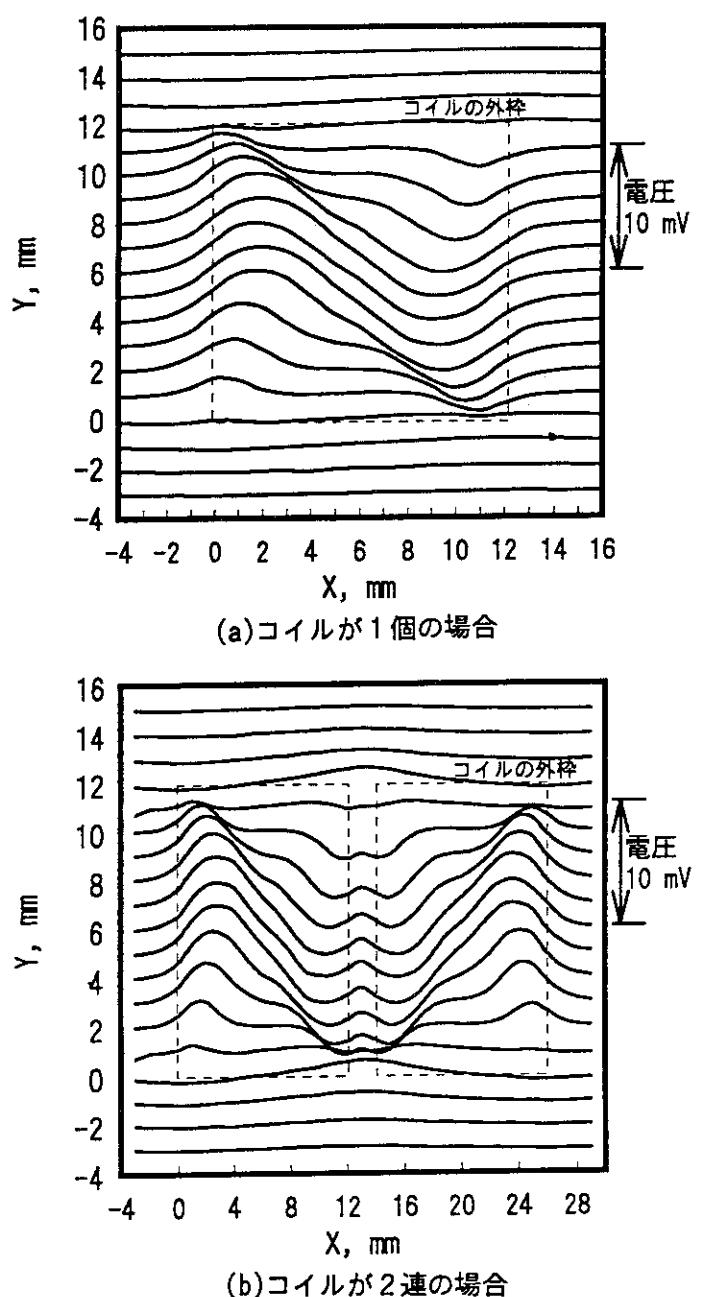


図9 正方形平面コイルの励磁界による電圧分布

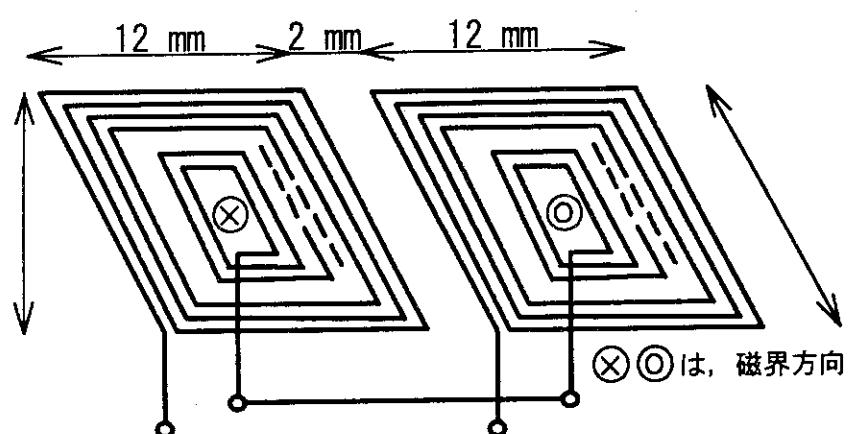


図10 2連の平行四辺形平面コイル

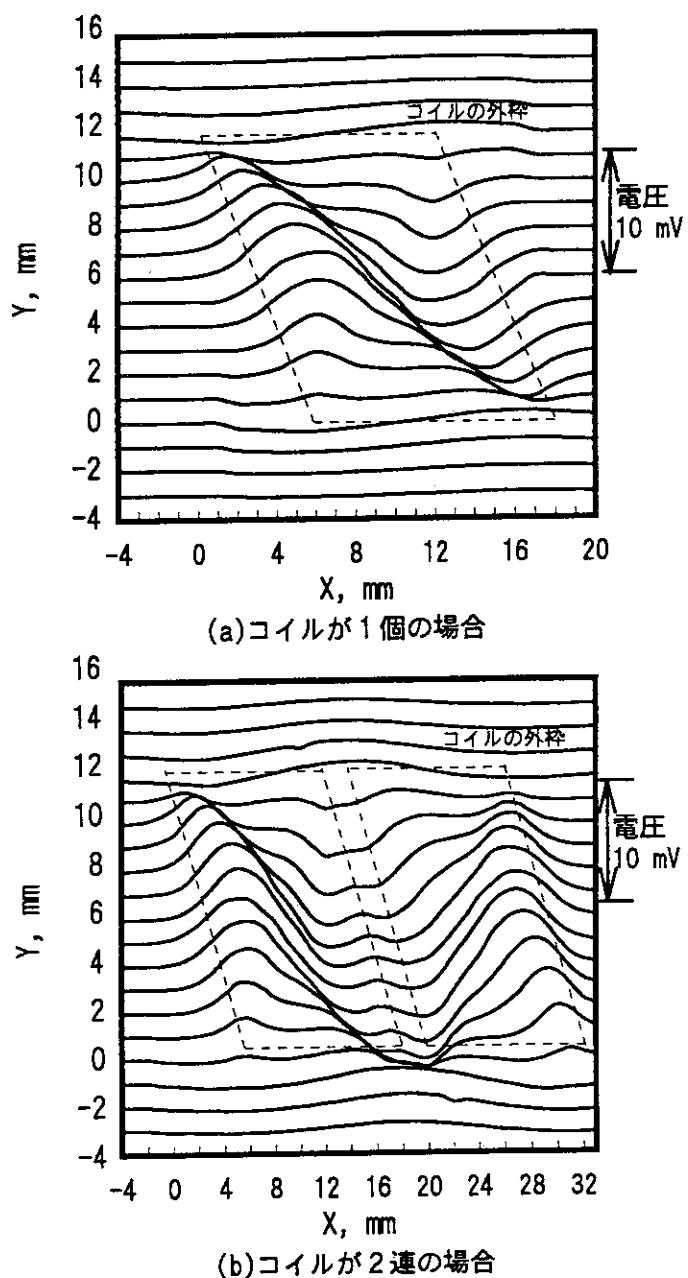


図11 平行四辺形平面コイルの励磁界による電圧分布

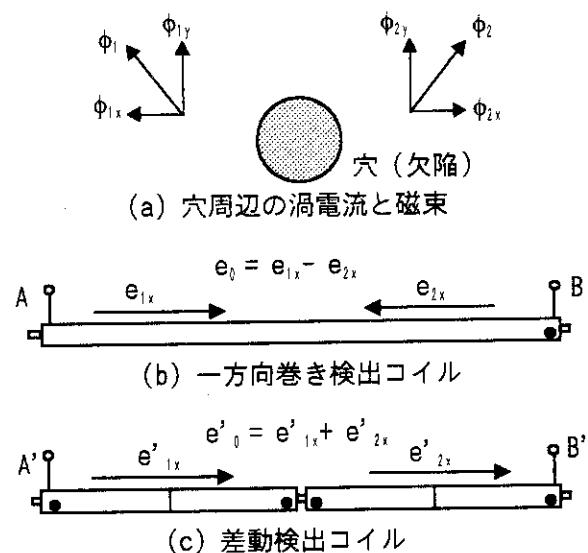


図1-2 磁束検出コイルの構成

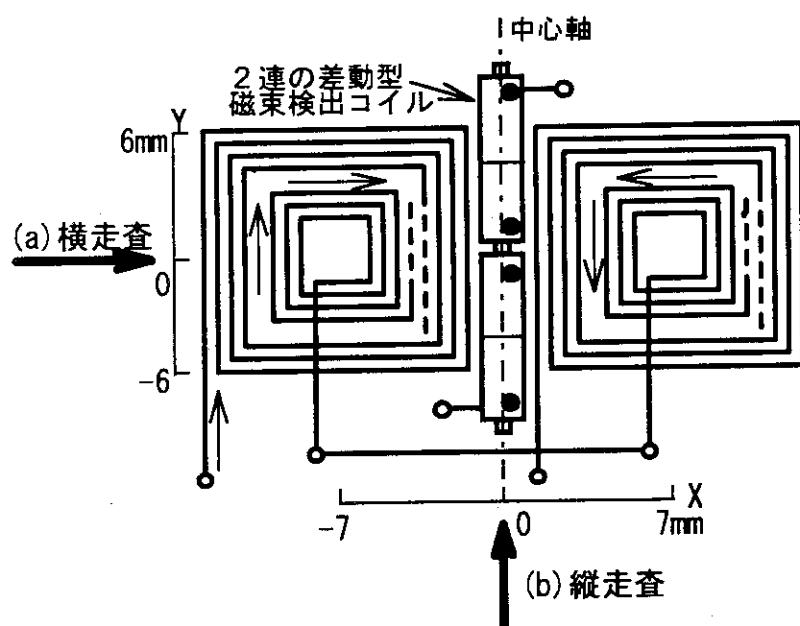


図1-3 プローブの走査方向

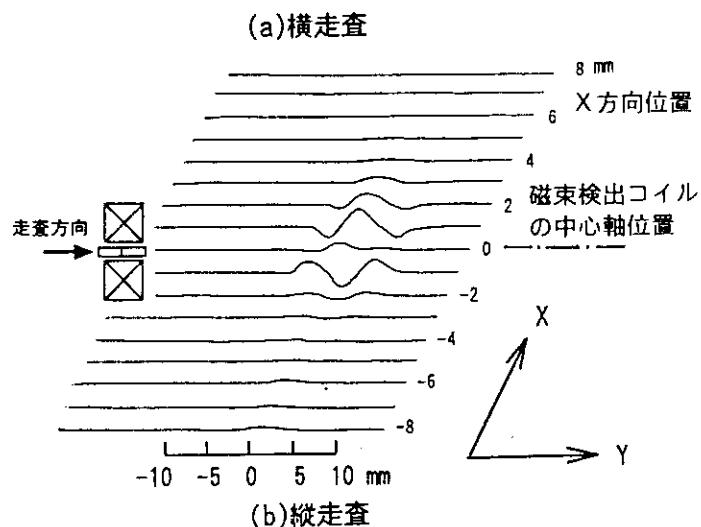
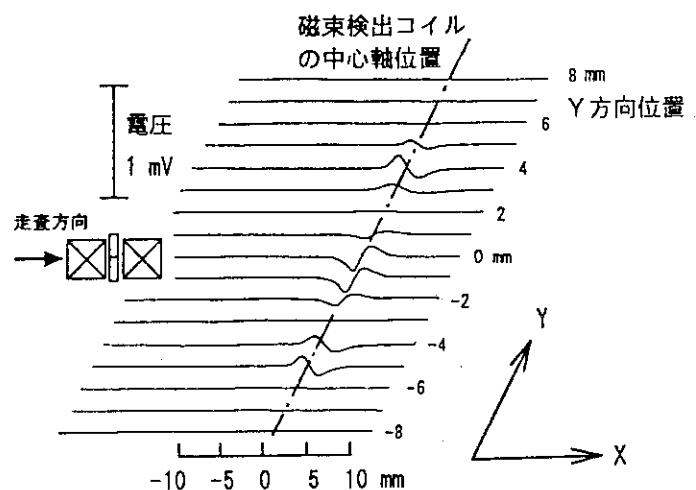


図14 磁束検出コイルの欠陥検出特性

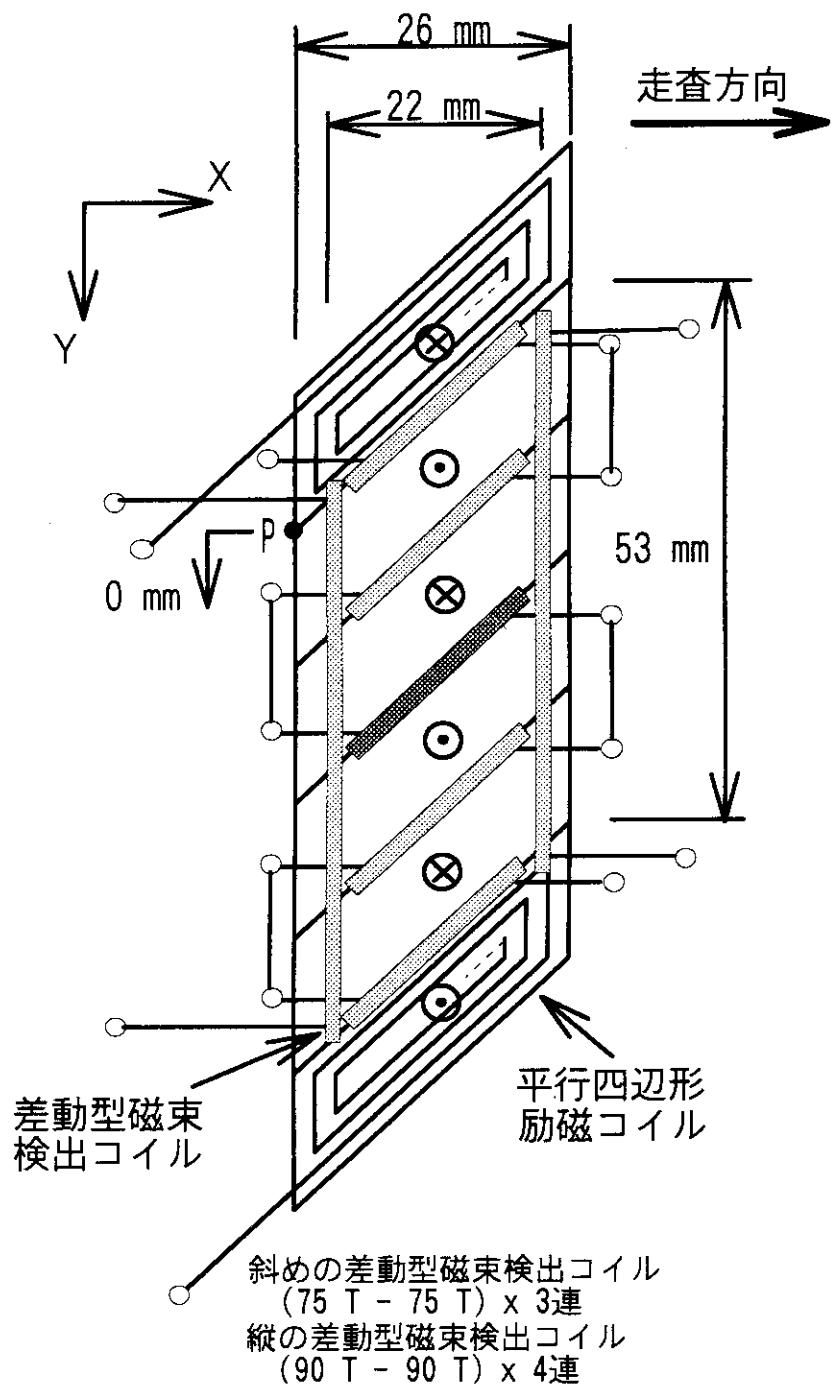


図15 平行四辺形渦電流探傷プローブ

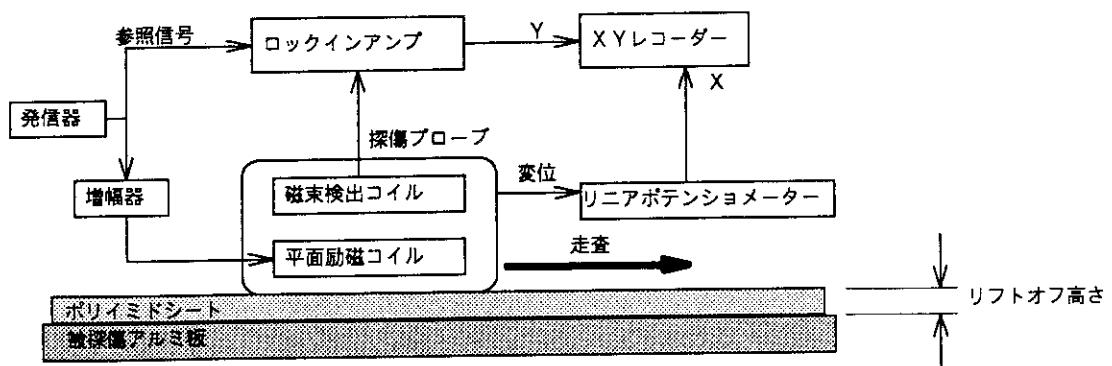


図16 探傷試験用測定回路

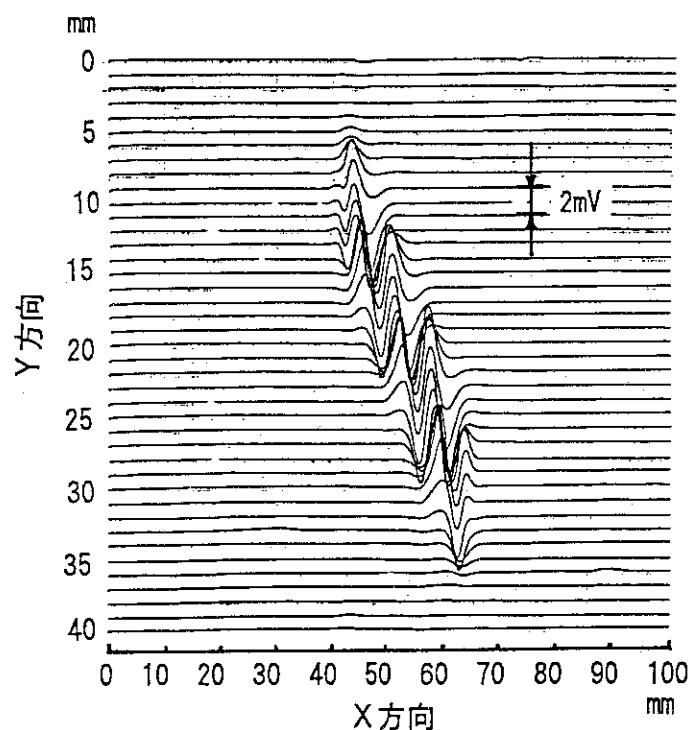


図17 横欠陥の検出結果
(長さ5mm, 幅0.4mm, 内面深さ15%)

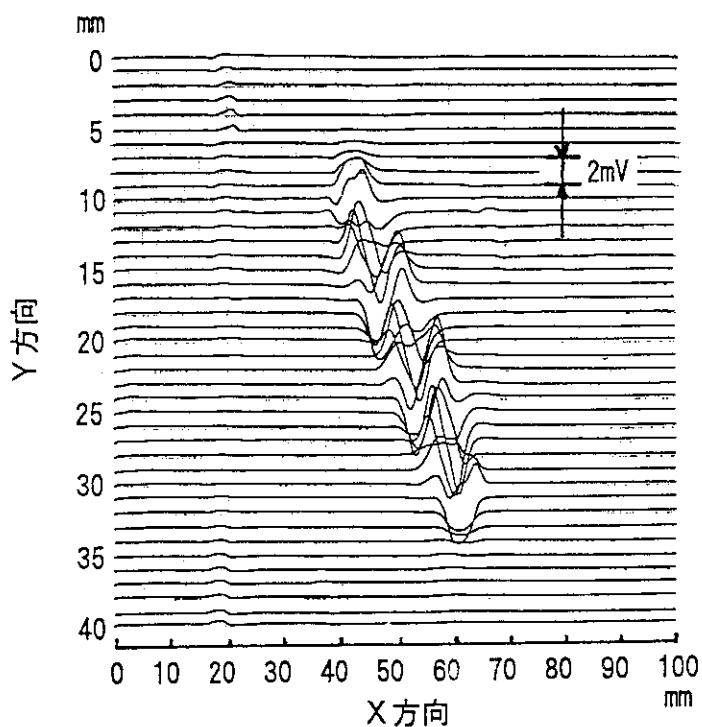


図18 縦欠陥の検出結果
(長さ5mm, 幅0.4mm, 内面深さ15%)

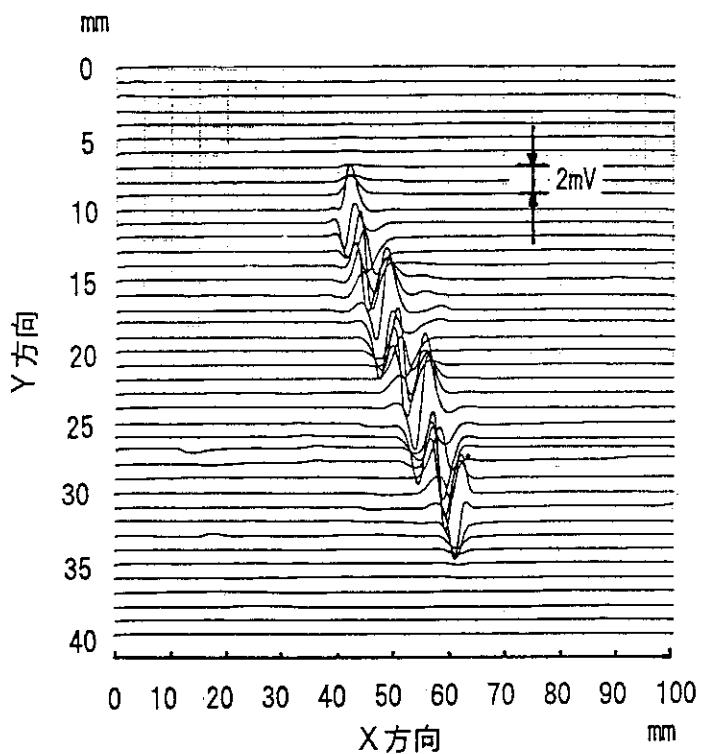


図19 内面欠陥の検出結果
(直径1mm, 深さ30%, 穴)

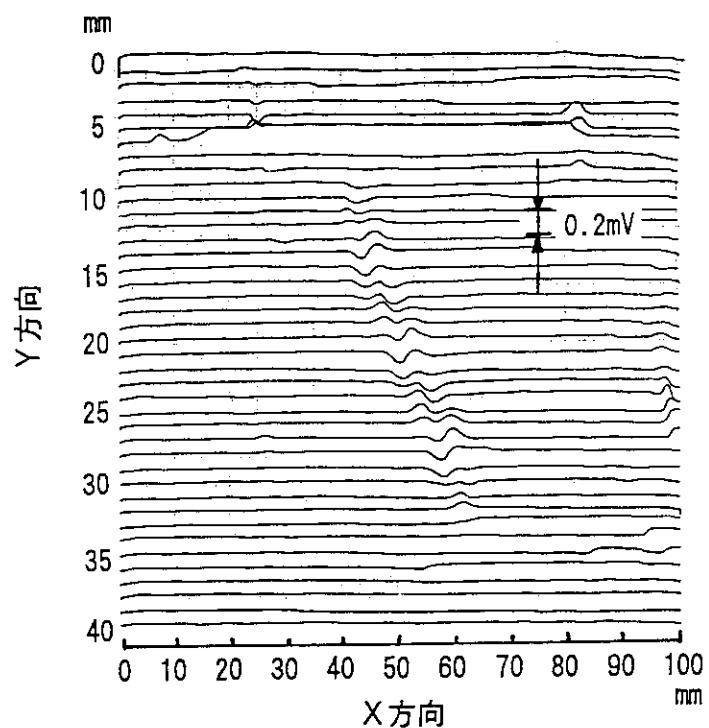


図20 外面欠陥の検出結果
(直径1mm, 深さ30%, 穴)

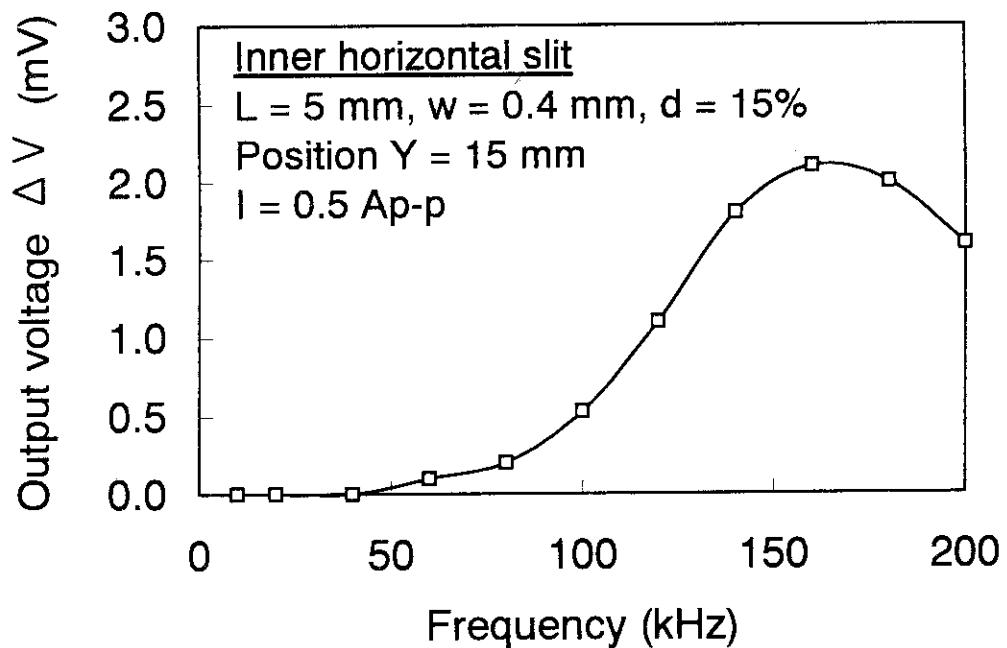


図 2 1 内面欠陥の検出電圧の励磁周波数特性

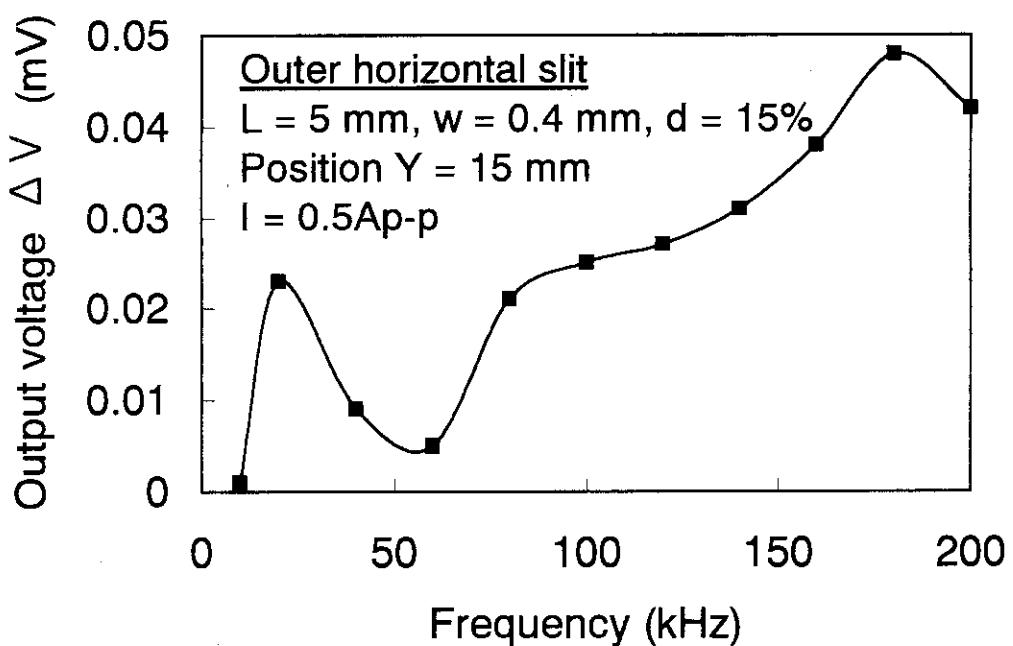


図 2 2 外面欠陥の検出電圧の励磁周波数特性

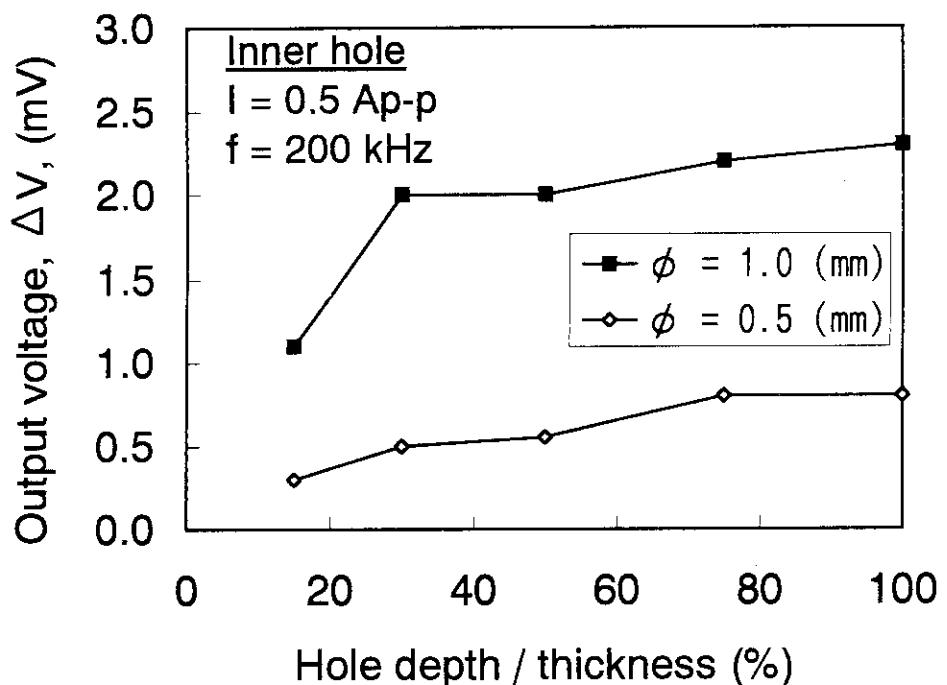


図23 内面欠陥の深さによる検出電圧変化

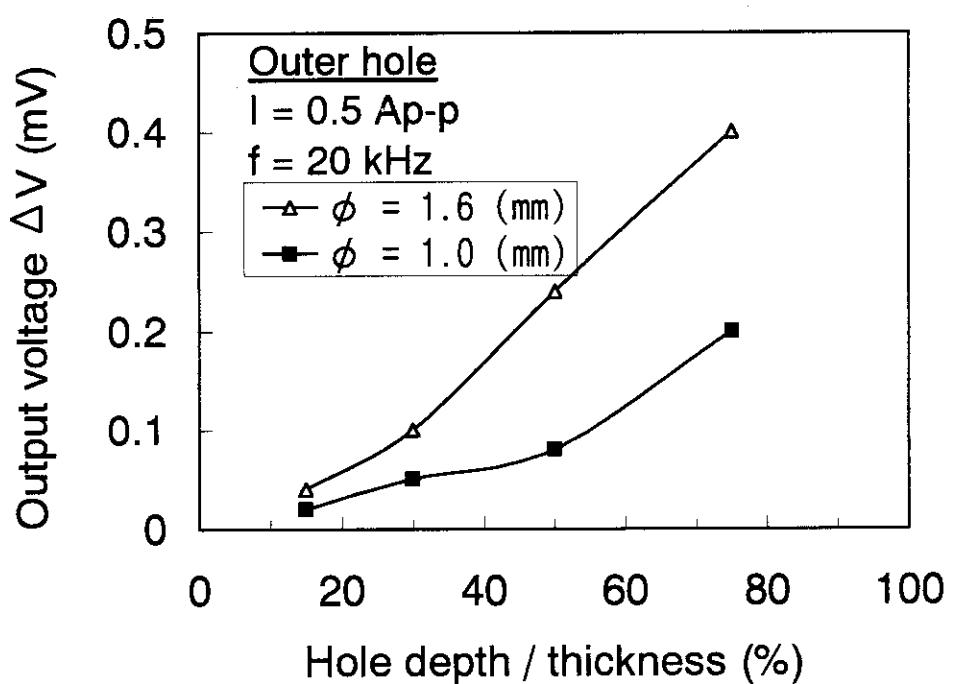


図24 外面欠陥の深さによる検出電圧変化