

学術論文

## 回転渦電流を利用した渦流探傷プローブ

Eddy Current Testing Probe using Rotating Direction Eddy Current

星川 洋 (日本大学生産工学部)      小山 潔 (日本大学生産工学部)

Hiroshi HOSHIKAWA, Member of JSAEM, Nihon University, 1-2-1 Izumicho,  
Narashino, Chiba  
Kiyoshi KOYAMA, Member of JSAEM, Nihon University

A new ECT probe has been devised by utilizing rotating direction eddy current. The probe comprises of a pick-up coil and a pair of exciting coils which induce uniform rotating direction eddy current. The probe has a self-differential feature which eliminates effects from variations of electromagnetic characteristics and configurations in test material. Consequently, the feature can make the probe applicable to the inspection of tubing with support plates and welded parts in metal products. The self-differential feature makes the probe lift-off noise free and also provides it a self-nulling characteristics which eliminates the bridge circuit and its balance procedures. Thus the new probe can be more suitable for QNDE than conventional ECT probes.

**Key Words :** Eddy Current Nondestructive Testing, ECT Probe, Rotating Direction Eddy Current

### 1 はじめに

渦電流を利用した渦流探傷試験は、非接触で高速度で探傷できる特徴があるため、棒、線、管、板などの一様な形状の金属製品等の非破壊試験法として利用されている。しかし、渦流探傷試験は、試験体の電磁気特性や形状寸法の変化、試験コイルと試験体との相対位置（リフトオフ）の変化など、数多くの因子によって影響を受けるため、それらの影響を極力小さくできるかどうか探傷の成否に関わる。このように、渦流探傷試験では、試験体におけるきず以外の因子の影響を除くことが大きな問題であり、このため多重周波数を利用するなどの信号処理を採用したり、またきず以外の因子の影響を受けにくいプローブを設計することが必要となる。

渦流探傷試験によって微小なきずを検出するためには、局所的な磁気変化に対して感度を高くするために、小さな検出コイルを用いなければならない。従来からプローブとして用いられている自己誘導形の小さなコイルを用いると、試験体に誘導される渦電流の浸透深さが小さくなり、試験体の裏面におけるきずの検出が困難となる [1]。さらにはリフトオフの変化による雑音が大きく、試験体の材質および形状の変化の影響も受け易いという問題が生ずる。これらの欠点を克服す

るために、種々の形態の試験コイルや相互誘導形試験コイルなどの開発研究が行われている [2-10]。

渦流探傷試験は、放射線や超音波を用いた非破壊試験法に比べると、きずの定量的評価が困難という欠点があるといわれている。従来、渦流探傷試験では、きず信号の振幅と位相の2つの情報からきずを評価する方法が採用されているが、渦流探傷試験によって得られる、試験体上の1点におけるきず信号の振幅と位相の情報だけから、二次元的な形状のきずを定量的に評価することは本来できないと、筆者らは考える。超音波探傷と同等にプローブを精細に走査して、きずに関する二次元的な情報を利用することにより、割れのような二次元的な形状を定量的に評価することができる。すなわち、きずの定量的な評価のためには、超音波探傷と同等に精細な渦流探傷プローブの走査が不可欠である。

筆者らは、試験体上を精細に走査することを前提とし、より性能の高い渦流探傷試験を指向して、回転渦電流を利用したプローブ（以下、星プローブと呼ぶ）を考えた。星プローブは、試験体における比較的大きな領域に互って渦電流を誘導するため、薄板状の試験体における裏面の小さなきずを検出できる可能性がある。また、原理的に自己差動特性を有するため、試験体における材質や形状などの一様な変化の影響が小さ

く、例えば配管の保守検査においては支持板部の探傷や平板の溶接部の探傷に適用できる可能性がある。さらに、リフトオフ変化による雑音が発生しない利点があり、自己平衡特性を有するために探傷器のブリッジが不要となる可能性がある。今回は、星プローブの基礎的な特性の考察とその基礎実験を行い、基本的探傷特性の確認を行ったので報告する。

## 2 星プローブの構造

渦流探傷試験は、試験体に誘導された渦電流のきずによる変化を検出して探傷する方法であるから、きずが渦電流を変化させなければ、探傷することはできない。すなわち、微小な割れきずが渦電流の流れと同じ方向であれば、このきずは検出されず、一方きずの方向が渦電流の流れに対して直角な方向のときに高感度で検出される。したがって、筆者らは、任意の方向の微小な割れを検出するために有効な方法として、試験体に誘導される渦電流の方向を回転させ、小さなパンケーキコイルを用いて渦電流の変化を検出するプローブを考えた。

Fig. 1 には、回転渦電流を利用した星プローブの構成を示す。星プローブは矩形に巻かれた1対のコイルをサイコロ状に組み合わせた励磁コイルと、小形のパンケーキ状検出コイルとから成る。2個の励磁コイルに90度位相の異なる交流電流を流して回転磁界を発生させ、方向が回転する一様な渦電流を試験体に誘導する。試験体にきずがあると、回転渦電流が変化して回転磁界が局所的に変化するので、この磁界の変化を検出コイルの起電力変化として検出することにより探傷できる。きずの方向が一定である場合には、検出用の円形パンケーキコイルを、矩形コイルまたは菱形コイルに置き換えることもできる。

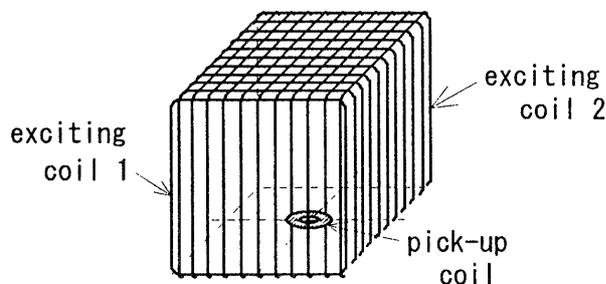


Fig.1 Structure of Hoshi-probe

## 3 星プローブにより誘導される渦電流

渦流探傷試験に用いられる一般的な円形パンケーキコイルによって試験体に誘導される渦電流は、Fig. 2 (a) に示すように、円形状に流れる。これに対して、星プローブによって試験体に誘導される渦電流は、励磁コイルの正弦波交流電流による回転磁界に同期して、Fig. 2 (b) に示すように回転する。さらに、従来のプローブによる渦電流と異なる点は、星プローブ直下の渦電流が一様に同じ方向に流れることである。

星プローブの回転磁界によって試験体内に誘導される Fig. 2 に示した渦電流の解析及び検出コイルの起電力の解析のためには、回転磁界に伴う速度項を含む次の支配方程式を解くコードが必要となる。

$$\nabla \times (1/\mu) \nabla \times A \\ = J - \sigma (\partial A / \partial t + \nabla \phi) + \sigma V \times (\nabla \times A)$$

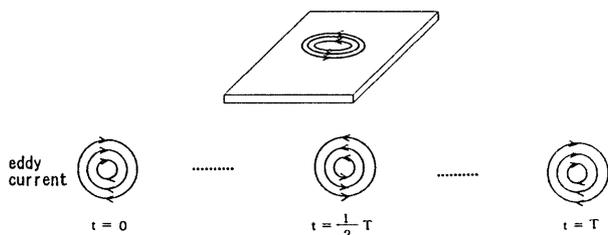
ここに、各記号は以下のようである。

A:磁気ベクトルポテンシャル,

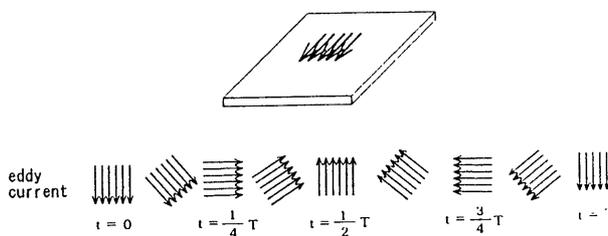
$\phi$ :電気スカラーポテンシャル,

J:電流, V:速度, t:時間,  $\mu$ :透磁率,  $\sigma$ :導電率

上式の三次元電磁界解析コードの開発は、今後の課題である。



(a) conventional probe



(b) Hoshi-probe

Fig.2 Eddy Current Induced in Conductor

## 4 星プローブの基本的特性

### 4.1 全ての方向のきずの検出

電流はその流れと直角な方向に磁界を発生し、一方磁界の変化はそれと直角方向に起電力を誘導する。したがって、検出コイルの巻線の微小な各部分は、その部分と平行な渦電流成分だけを検出し、垂直な渦電流成分は検出しない。この結果、微小な割れきずについて考えると、検出コイル巻線における微小な各部分は、各微小部分に垂直なきずを高感度で検出することになる。

プローブを精細に走査すれば、検出コイル巻線のきずに対して垂直方向である微小部分が通過したときに、きずは検出される。回転渦電流であるから、渦電流は全ての方向に誘導され、一方円形検出コイルでは接続方向が全ての方向を向く。したがって、星プローブを精細に走査することにより全ての方向のきずを検出できることになる。

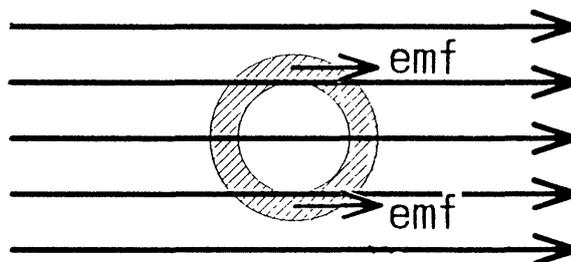
星プローブでは試験体における比較的大きな領域に互って渦電流を誘導するため、薄い試験体における裏側の小さなきずを検出できる可能性がある。小さなきずを検出するために、従来の小さな自己誘導形コイルを用いると、リフトオフや材質および形状の変化による影響が大きく、また浸透深さが小さくなるので試験体裏側の小さなきずの検出が困難であった。試験体に対する星プローブの位置を回転させて探傷すると、例えば管の内部から管外面の小さなきずを検出できる可能性がある。

### 4.2 自己平衡特性

一般の渦流探傷プローブでは、きずのないときにも定常的な起電力が発生しており、微小なきず信号を検出するためには、この定常的な起電力を消去するための平衡回路が必要となる。さらに探傷現場では、この平衡操作が探傷作業を複雑にしている。

Fig. 3 に示すように、星プローブの直下では一様な渦電流が誘導される。ここで、渦電流と同じ方向で、円形検出コイルの中心を通る軸を考え、この軸に関して互に対称な対をなすコイル巻線の微小部分を考える。一様な渦電流のために電磁誘導によって検出コイル巻線の微小部分の対に誘導される起電力は、コイルの巻線方向に関して逆向きとなり、互いに打ち消し合う。この結果、一様な渦電流の場合には、検出コイルに起電力は発生しない。このように、きずの無いときには信号が発生せず、きずのあるときだけ信号が発生

するので、星プローブは自己平衡特性を有することになる。小さなきずによって、渦電流が局所的に変化したときにだけ、検出コイルには起電力が発生する。このため、星プローブを用いれば、ブリッジ平衡操作は不要となって、探傷器の構成及び探傷の手順と操作が簡単になる。



### eddy current

Fig.3 Self-nulling Characteristics and Self-differential Characteristics of Hoshi-probe

### 4.3 自己差動特性

いま、深さが一様で、検出コイルに比べて長いスリット状のきずが渦電流に対して垂直方向である場合を考える。このきずが検出コイル巻線部分の下に近づくとき、検出コイルの下の渦電流は局所的に変化して、前項の自己平衡状態が崩れて検出コイルに起電力が発生し、きず信号が発生する。きずの位置が進んで検出コイルの中心を貫いている場合には、渦電流はきずの向きに垂直な軸に関して対称となるので、検出コイルの起電力は打ち消し合い、きず信号は発生しないことになる。きずの位置がさらに進んで検出コイルの反対側の巻線部分の下に位置すると、巻線方向が逆向きとなるから、最初とは逆極性のきず信号が発生する。このように、星プローブは試験体の性状検出において自己差動特性を有する。

以上の結果、長いスリット状きずの場合には、きずが検出コイルの下に入るとき、検出コイルから出て行くときに逆極性の信号が発生し、一方きずが検出コイルの中央に位置するときには、きず信号は発生しないので、渦流探傷特有の差動信号を発生する。因に、短いきずは、2カ所の巻線部分を通過するときに、差動特性により正と負の信号を発生する。

### 4.4 雑音除去特性

一般に渦流探傷試験では、プローブと試験体間のリフトオフの変化が大きな雑音が発生して、探傷の妨げとなる。星プローブでは、リフトオフが変化しても、プローブと試験体とが軸対称を保つ限りにおいて、自

己平衡特性のために検出コイルに起電力は発生しない。したがって、原理的にリフトオフ雑音がなく、SN比の高いプローブとなる。実際には、プローブにおける励磁コイルと検出コイル並びに試験体を軸対称に保つことが困難であるために、リフトオフが変化すると小さなリフトオフ雑音が発生することになると考えられるが、従来の試験コイルに比べると遥かに小さくなるものと期待できる。このように、星プローブはリフトオフ雑音の小さな、性能の良いプローブである。

支持板下の配管の内側に星プローブを当てた場合を考えると、支持板は検出コイルを横切るから、前述の自己差動特性により支持板の信号は発生しない。このため、従来は多重周波数による信号処理を採用しないと検出が困難とされていた支持板直下のきずを、星プローブは検出できることになる。さらに、星プローブは自己差動特性によって、試験体における材質や形状などの緩やかな変化の影響が原理的に小さくなる。

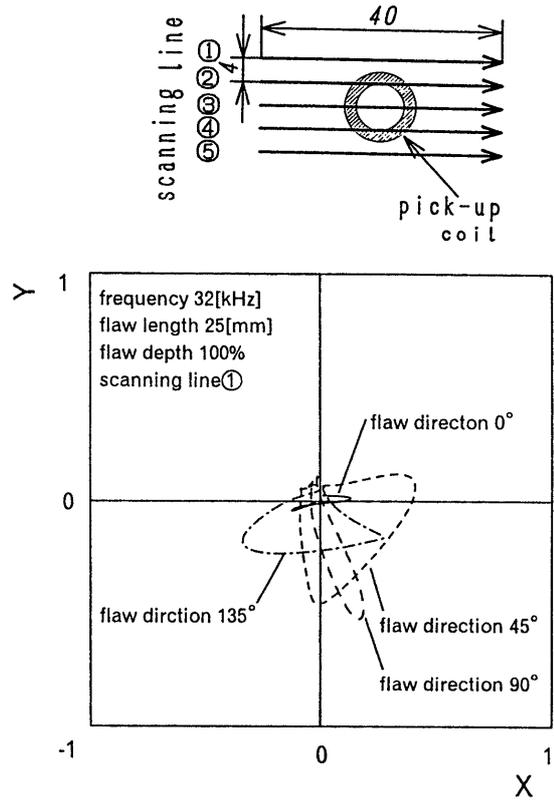
以上のように、星プローブは、従来の試験コイルでは探傷の妨げとなっていた多くの因子による影響を抑圧して、きずをSN比高く安定に検出できるという優れた特性を有するものと期待できる。

4.5 きず性状の検出特性

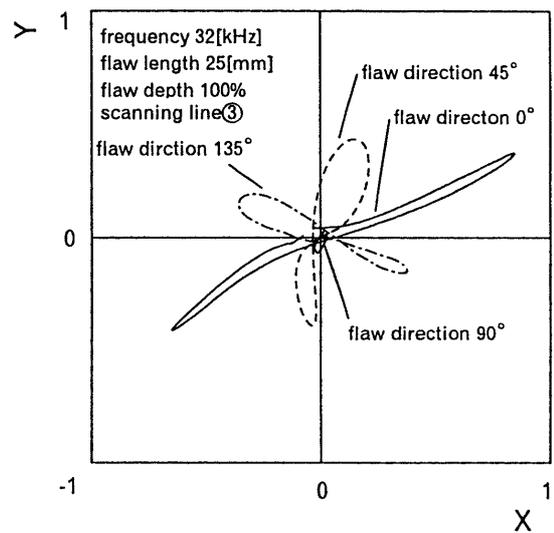
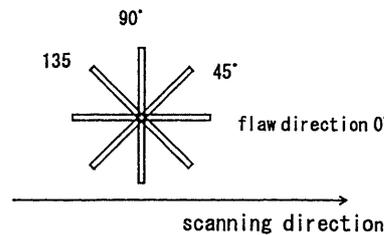
試験体上の1点におけるきず信号の振幅と位相のデータからきずの性状を推定する従来の方法は、信頼性がないと考える。すなわち、定量的なきずの評価のためには、超音波探傷と同等に精細なプローブ走査に基づく二次元的なきず信号に基づいてきずの性状を評価しなければならない。しかしながら、従来のプローブでは、きずの性状が異なっても、きず信号はほとんど変化がなかった。

以下に、星プローブによるきず性状の検出特性について考察する。いま、試験体におけるきずはスリット状として考えると、星プローブを精細に走査した場合、きず信号が最大となった検出コイルの位置からきずの方向を知ることができる。すなわち、三次元表示したきず信号の最大値が発生した2点を結ぶことによってきずの方向が特定できる。また、きずの長さはこれら2点の位置から推定が可能である。

一方、回転渦電流は励磁コイルの交流電流に同期して誘導されるから、励磁コイルの電流に対する渦電流の位相は渦電流の方向によって定まることになる。その結果、きずの方向によってきず信号の位相が異なるので、きず信号の位相からもきずの方向を推定できる



(a) scanning line



(b) scanning line

Fig. 4 Flaw Signal Pattern

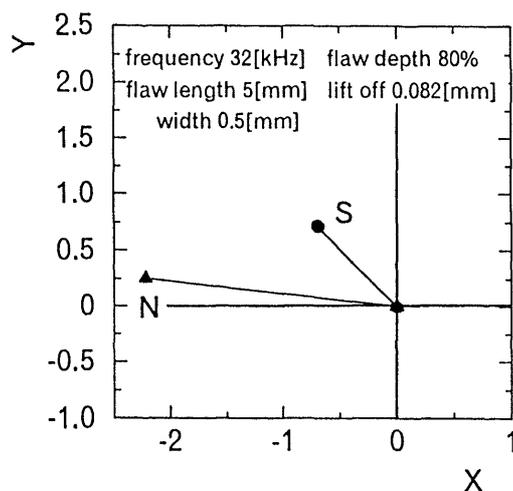
ことになる。さらに表面と裏面のきずとできず信号の位相が異なるが、上記の信号最大位置と組み合わせることにより、きずの判別は可能である。

### 5 基礎特性の実験方法及び実験結果

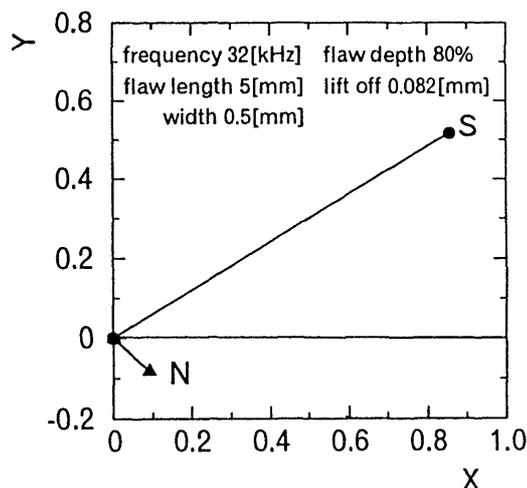
前項で述べた星プローブの基本的特性を確認するために、以下の実験を行った。励磁コイルは Fig. 1 に示したように、一辺の長さが 50mm のサイコロ状に交差して巻かれた 1 対のコイルとした。検出コイルとしては直径 10mm でパンケーキ状の円形コイルを励磁コイルの直下に配置した。試験体には  $160 \times 160 \times 5\text{mm}^3$  の真鍮平板に、長さ 25mm、幅 0.5mm の貫通スリットを加工したものと、 $160 \times 160 \times 1\text{mm}^3$  の真鍮平板に長さ 5mm、幅 0.5mm、深さ 0.8mm のスリットきずを加工したものをを用いた。

貫通スリットに対する星プローブの走査によって得られた探傷信号パターンを Fig. 4 に示す。この図では、横軸 X が励磁電流と同相成分、縦軸 Y が 90 度進相成分を表す。きずの方向はプローブの走査方向を 0 度としている。きずが検出コイルの巻線に接して走査した同図 (a) の場合には巻線部分と同じ方向のきず角度 0 度の信号がほとんど発生していない。きずが検出コイルの巻線の中央を走査する同図 (b) の場合には、星プローブの自己差動特性のため、0 度方向のきずに対して正と負の信号が発生し、また 90 度方向のきずに対しては信号が発生しないことがわかる。これらの結果は星プローブの自己差動特性を明確に示している。

Fig. 5 には自己誘導形上置コイルと星プローブについて、きず信号とリフトオフ雑音を示す。図中における S は長さ 5mm、深さ 0.8mm のスリットきず信号を、また N はプローブと試験体との間にスペーサを挟んで 0.082mm のリフトオフを与えたときに発生した雑音である。比較のために、同図では S の大きさで縦軸と横軸の目盛りを正規化して表示した。図より、星プローブはリフトオフ変化による雑音が非常に小さいことがわかる。なお、星プローブでは軸対称が保たれる限りにおいてリフトオフ雑音が原理的に発生しないが、実験ではリフトオフによってプローブと試験体との軸対称が維持されなかったためにリフトオフ雑音が発生していると考えられる。SN比を求めると、同図 (a) では 0.42 であり、同図 (b) では 13.5 であった。以上の結果はリフトオフ雑音の除去特性を明確に示している。



(a) conventional probe



(b) Hoshi-probe

Fig. 5 Flaw Signal and Lift-off Noise

配管の保守検査において支持板による信号を抑圧して探傷することを模擬して、Fig. 6 に示すように試験体の裏側に長さ 150mm、幅 30mm、厚さ 18mm の磁性体材料を置き、探傷における磁性体材料の影響について検討を行った。

Fig. 7 に自己誘導形コイルによる探傷信号を、Fig. 8 に星プローブによる探傷信号を 3 次元表示で示す。それぞれの図の (a) は磁性体材料がない場合、また (b) は試験体の裏面に磁性体材料がある場合である。自己誘導形コイルの場合は、磁性体材料の影響を受けてきず信号が磁性体材料による信号に埋もれており、きずの検出が困難である。星プローブの場合は、磁性体材料の影響をほとんど受けることなく裏面の探傷が可能であることがわかる。以上のように、配管の保守検

査において、支持板部のように、探傷が容易でなかった部分の試験が可能であることが確認された。

Fig. 9 には、従来の自己誘導形コイルを用いた場合と星プローブの場合について、試験体の表面きずと裏面きずの探傷信号を示す。同図より、従来の場合にはきず信号からきずの表裏を識別することは困難であ

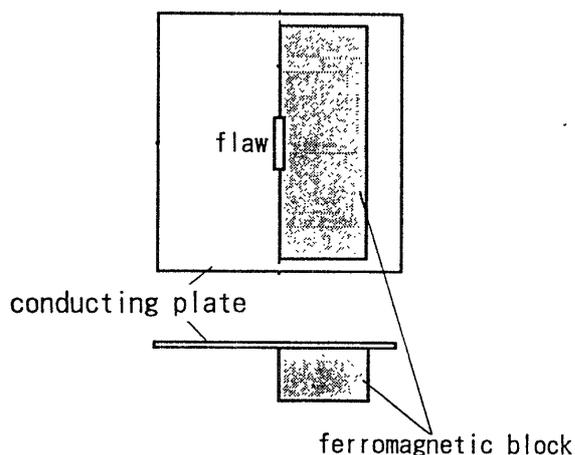
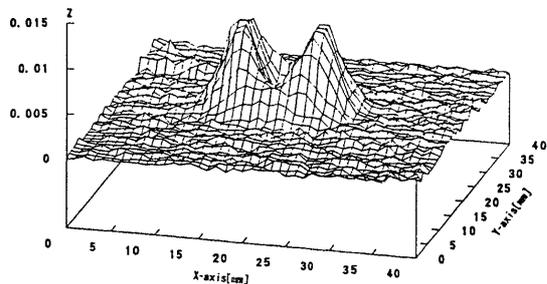
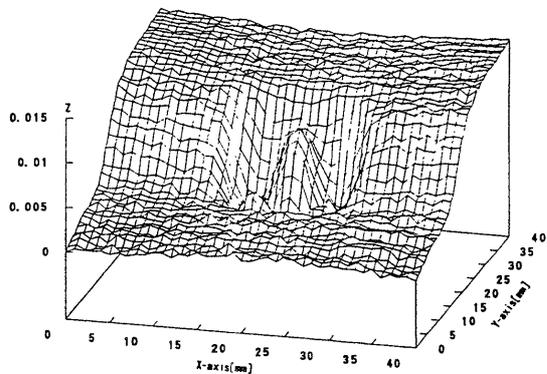


Fig. 6 Ferromagnetic Block behind the Conducting Plate



(a) without ferromagnetic block

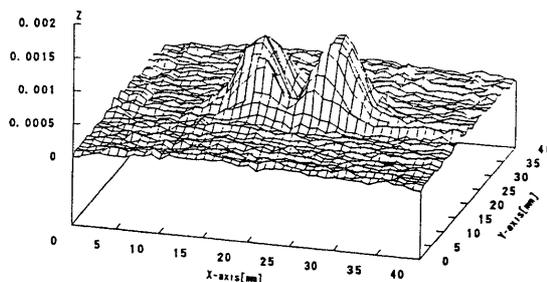


(b) with ferromagnetic block

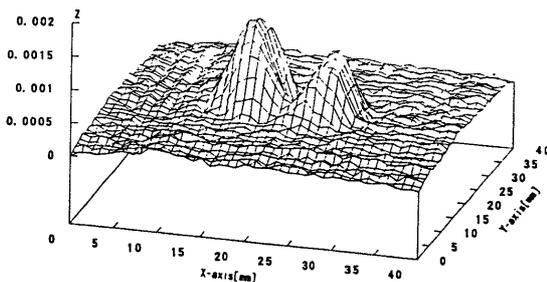
Fig. 7 Three Dimensional Display of Flaw Signals from a Conventional Surface Probe

る。一方、星プローブの場合には、きず信号の位相から表裏のきずを明確に判別できることがわかる。

以上のように、星プローブを用いれば、きず信号の三次元表示及び振幅と位相を組み合わせることにより、従来に比べてきずに関する多くの情報が得られるので、よりきずの定量評価の可能性が高くなるものと考えられる。

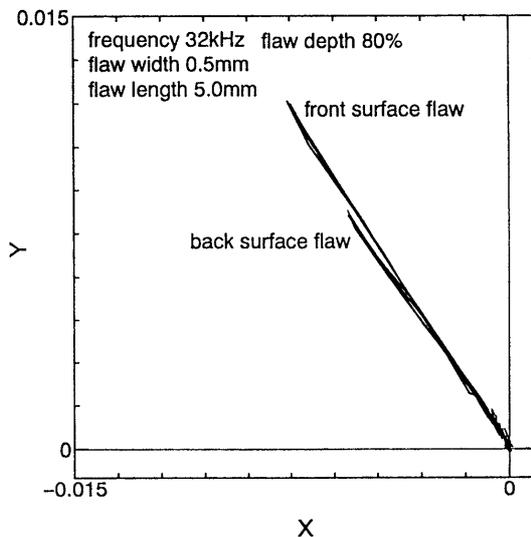


(a) without ferromagnetic block

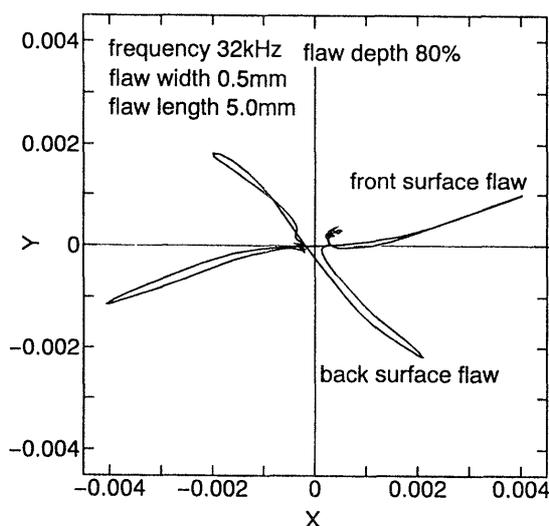


(b) with ferromagnetic block

Fig. 8 Three Dimensional Display of Flaw Signals from a Hoshi-probe



(a) conventional surface probe



(b) Hoshi-probe

Fig. 9 Front-surface Flaw and Back-surface Flaw Signal Patterns

## 6 おわりに

回転渦電流を利用した星プローブについて、基本的動作の考察を行うと共に、基礎特性の確認実験を行った。その結果、星プローブは、自己差動特性を有し、リフトオフ変化による雑音が小さいという優れた特性を有することを確認した。さらに、試験体裏側の磁性体材料の影響を受けることなく試験体裏側のきずの検出ができることから、支持板下の配管の探傷ができる可能性があることなどがわかった。また、真鍮平板の表面きずと裏面きずによるきず信号の位相が異なることから、表面きずと裏面きずを識別検出できる可能性がある。以上のように、従来に無い特性の渦流探傷プローブが開発できたと考える。

(1995年4月27日受付)

## 参考文献

- [1] 星川・小山・小井戸・石橋, 上置コイルによって平板状導体に誘導される渦電流, 非破壊検査, 37巻9号, (1988) pp722-729
- [2] Cecco, V.S. and Sharp, F.L., Probes to Overcome Eddy Current Limitations, CSNDT Journal, Vol.9(3), (1988), pp30-36

- [3] Treece, J.C., and Sabbagh, H.A., A Linear Eddy-Current Array Driven by a Whip Excitation, Review progress of QNDE, Vol.11, (1992), pp1129-1136
- [4] Hurley, D.C., Hendengren, K.H., and Young, J. D., Eddy Current Array for Defect Detection, Review progress of QNDE, Vol.11, (1992), pp1137-1144
- [5] Clark, W.G., Multiple-Element Eddy Current Probes for Enhanced Inspection, Materials Evaluation, Vol.51(6), (1993), pp794-802
- [6] Enokizono, M., Todaka, T., Akita, M. and Nagata, S., Rotational Magnetic Flux Sensor with Neural Network for Nondestructive Testing, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.29(6), (1993), pp3195-3197
- [7] Wincheski, B., Fulton, J.P., Nath, S., Namkung, M. and Simpson, J.W., Self-Nulling Eddy Current Probe for Surface and Subsurface Flaw Detection, Materials Evaluation, Vol.52(1), (1994), pp22-26
- [8] Shyamsunder, M.T., Rao, B.P.C., Rao, C.B., Bhattacharya, D.K., and Raj, B., A New Tandem Probe Design for Phased-array Eddy Current Testing, INSIGHT, Vol.36(6), (1994), pp434-436
- [9] Uesaka, M., Nakanishi, T., and Miya, K., Flaw Reconstruction by Micro ECT Probe, Review progress of QNDE, Vol.13, (1994), pp327-334
- [10] Wincheski, B., Fulton, J.P., Nath, S., and Namkung, M., New Eddy Current Probe for Thickness Gauging of Conducting Materials, Review progress of QNDE, Vol.13, (1994), pp1939-1946