

# プロジェクト1

## 渦流探傷及び電磁誘導式電位差法による亀裂の推定

星川 洋、小山 潔 (電気電子工学科)

### 1. はじめに

ヘルスマニタリングのための非破壊試験技術の確立を目的として、導電性試験体のきず深さ測定法である電位差法における、新しい考え方の電磁誘導式電位差プローブの開発研究を行った、その研究経過を報告する。

非破壊試験は、材料や製品、構造物を分離、破壊することなしにその性能や安全性を検査する試験技術である。近年、非破壊試験では、きずの定量的な評価が求められている。金属表面のきず深さを試験する方法として電位差法がある 1)。電位差法は、他の金属表面の試験法に比べて、きず深さの定量的な指示が得られる特徴を有す。電位差法に関して、電磁誘導を利用して試験体に渦電流を誘導する方法が検討されている 2)~4)。電磁誘導を利用した方法では、きずによる電位を計測する探触子の検出端がループを成し、励磁コイルなどからの直接的な誘導の影響を受けることが問題となっている。

本研究では、電磁誘導に関して理論的な考察を行い、電位と渦電流の関係について明らかにする。この考察から、きずに沿った電位分布を検出することで、コイルからの直接的な誘導の影響を受けないことを見出した。この考察に基づき、新しい考え方の電磁誘導式電位差プローブを提案し、新型プローブの基礎的なきず検出特性について報告する。

### 2. 電磁誘導における渦電流と電位

磁束密度  $B$  が変化すると電磁誘導によって電界  $E$  が発生する。

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \quad (1)$$

また、 $B$  は磁気ベクトルポテンシャル  $A$  によって次のように表される。

$$B = \nabla \times A \quad (2)$$

よって、式(1)と式(2)より電界  $E$  は、次のようになる。

$$\nabla \times E = \nabla \times (-\partial A / \partial t) \quad (3)$$

したがって、式(3)より式(4)を得る。

$$E = -\partial A / \partial t - \nabla \phi \quad (4)$$

ただし、 $\phi$  は電位である。電界  $E$  によって、導体内には渦電流  $J$  が誘導される。

$$J = \sigma \cdot E = \sigma(-\partial A / \partial t - \nabla \phi) \quad (5)$$

ただし、 $\sigma$  は導電率を表す。渦電流の大きさと方向は、誘導電界と電位勾配のベクトル合成で決まる。一方、導体内に渦電流が流れると、オームの法則に基づき電位降下の勾配  $\rho \cdot J$  が発生する。

$$\rho \cdot J = -\partial A / \partial t - \nabla \phi \quad (6)$$

ただし、 $\rho = 1/\sigma$  は抵抗率を表す。渦電流は、電位降下の勾配が誘導電界と電位勾配の差に等しくなるように誘導される。逆に、電位勾配  $\nabla \phi$  は、誘導電界と電位降下の勾配との差により発生する。

$$\nabla \phi = -\partial A / \partial t - \rho \cdot J \quad (7)$$

電位勾配の積分値として、導体内に電位  $\phi$  が発生する。

$$\phi = \int \nabla \phi \cdot dl = \int \{-\partial A / \partial t - \rho \cdot J\} dl \quad (8)$$

$\phi$  の勾配がきずの周囲にも渦電流を誘導し、渦電流の連続性を満足させるのである。

### 3. 新型の電磁誘導式電位差プローブ

従来の電磁誘導式電位差プローブは、渦電流を誘導するコイルとコイルの巻線に平行な方

向に配置した2本の探触子から構成され、きず深さの計測が行われている。しかし、従来のプローブでは、励磁コイルの巻線方向ときずによって発生した同方向の電位差を検出するため、ループを成した探触子の検出端が、励磁コイルによる直接的な誘導の影響を受ける問題がある。

そこで、直接的な誘導の影響のない新型の電磁誘導式電位差プローブを考えた。Figure 1に示す矩形の励磁コイルによってきずのない場合には、Figure 2 (a)に示すように励磁コイルの巻線方向に渦電流が誘導される。一方、矩形の励磁コイルに直交してきずがある場合には、Figure 2 (b)に示すように励磁コイルに直交して、きずに平行な方向に電位差が発生する。この電位差によってきずに沿って渦電流が流れる。このきずに平行な方向の電位差を検出するように探触子を配置すれば、ループを成す探触子の検出部は、励磁コイルの巻線方向と直交するので、直接的な誘導の影響なくきず深さの計測ができる。また、きずが深くなれば、きずに平行な方向の電位差が大きくなる。すなわち、きずに平行な電位からきずの深さを推定できる可能性がある。

Figure 3には、提案する新型の電磁誘導式電位差プローブの原理的構造を示す。図に示すように2本1組の探触子の出力信号を差動増幅することにより、スリットの中心位置に対するプローブの位置の変化による影響を小さくできると考えた。提案するプローブは、矩形の励磁コイルと励磁コイルと直交してループを成す2本1組の4本の探触子から構成される。

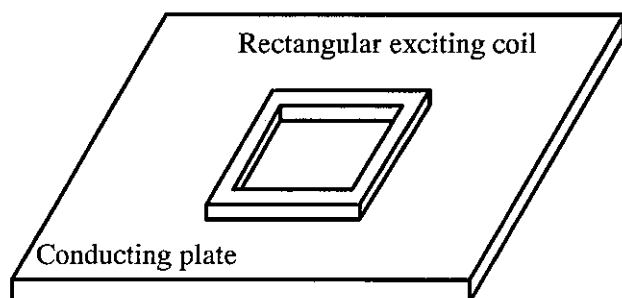
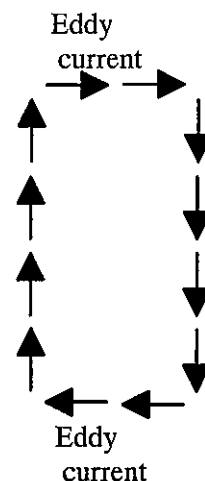
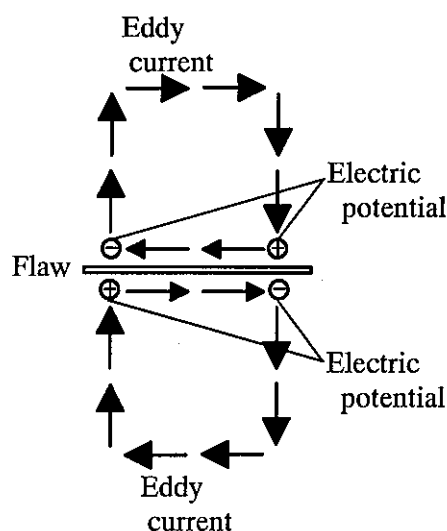


図1 矩形の励磁コイル



(a) きずがない場合の渦電流の流れと電位



(b) きずがある場合の渦電流の流れと電位

図2 矩形の励磁コイルによって誘導される渦電流と電位

#### 4. 試験体に誘導される電位分布と渦電流

下記の解析条件の下で、磁気ベクトルポテンシャル  $A$  と電気スカラーポテンシャル  $\phi$  に基づく3次元有限要素解析を行った。試験体の寸法を  $160 \times 160 \times 1.5 \text{ mm}^3$ 、導電率を  $\sigma = 1.3 \times 10^7 \text{ [S/m]}$ 、比透磁率を  $\mu_r = 1.0$  とした。試験体におけるきずは、長さ25mm、幅0.5mm、深さ板厚の20%、40%、60%、80%のスリットとした。電磁誘導式電位差法における提案する新型プローブの励磁コイルの寸法は、長さ23mm、幅

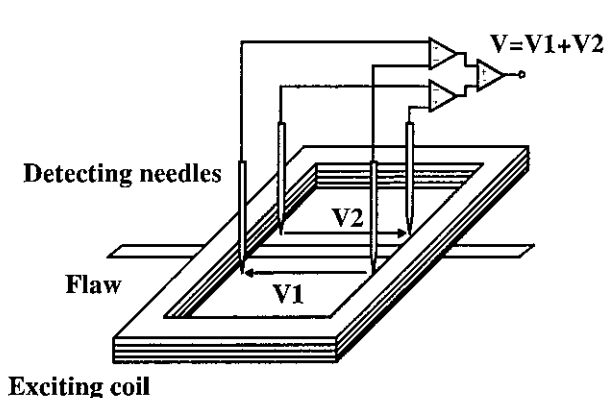


図3 開発した新型の電磁誘導式  
電位差プローブ

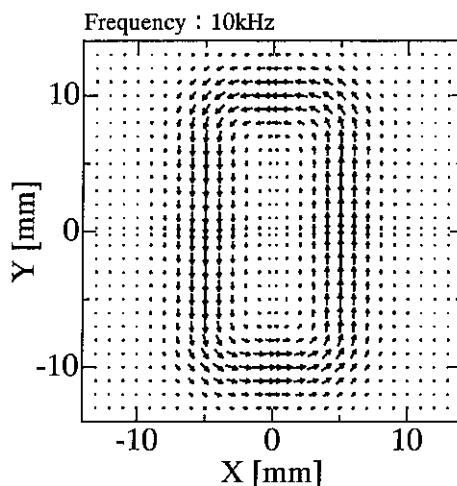
13mm、巻線断面積  $3 \times 3\text{mm}^2$  とし、探触子の間隔は、2mm とした。また、電流密度は、 $J_0 = 0.3 \times 10^7 \text{A/m}^2$  とし、試験周波数は、渦電流の標準浸透深さが板厚と等しくなる 10kHz とした。

Figure 4 には、試験体にきずがない場合の試験体表面の渦電流の流れと電位分布を示す。図より、矩形の励磁コイルの巻線に沿って渦電流が誘導され、また、電位はほとんど発生しないことがわかる。Figure 5 には、励磁コイルに直交してスリットきずがある場合の試験体表面の渦電流の流れと電位分布を示す。図より、きずの両側にきずに平行な方向に電位差が発生し、この電位差によりきずに平行な方向にも渦電流が流れることがわかる。きずが深くなればきずの下を流れる渦電流が小さくなり、きずに平行に流れる渦電流が大きくなる。すなわち、きずが深くなると、きずに平行な方向の電位差が大きくなるので、きずに平行な方向の電位差からきずの深さを推定できる可能性がある。

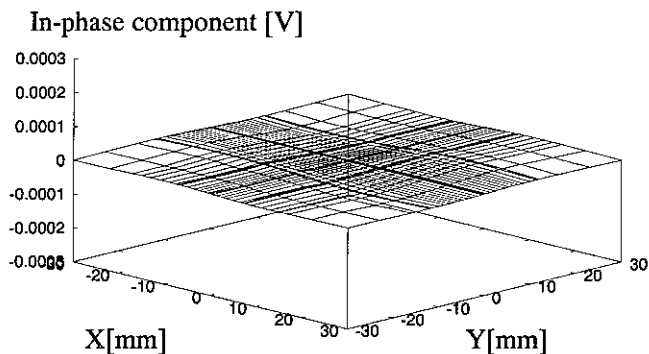
### 5. 新型プローブのきず検出特性

提案する新型プローブを製作し、きず検出特性を実験により検討した。Figure 6 には、プローブの位置がきず中心位置から  $\pm 0.5\text{mm}$  変化したときのきず信号の変化を示す。プローブがきず中心位置より前後してもきず信号の変化は小さいことがわかる。

Figure 7 には、きず深さに対するきず信号振幅の変化を示す。図中の○印の範囲は、Figure 6 に示したプローブの位置がきず中心位置より  $\pm 0.5\text{mm}$  変化したときのきず信号振幅の変化の範囲を示す。きず深さに対応してきず信号振幅が変化することがわかる。



(a) 渦電流の流れ

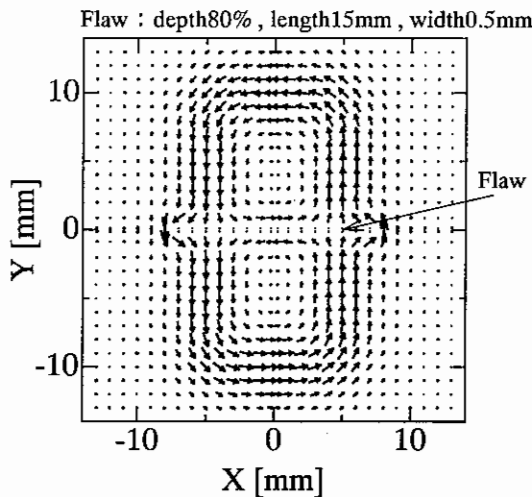


(b) 電位分布

図4 導体表面にきずがない場合の  
渦電流の流れと電位分布

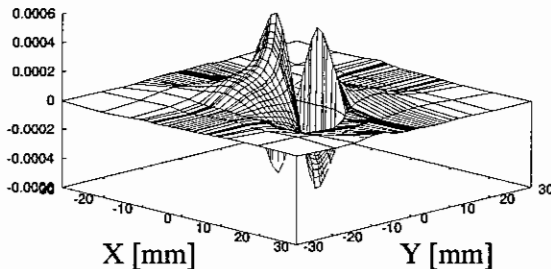
### 6. まとめ

ヘルスマonitoringのための非破壊試験技術の確立の一環として、電磁誘導式電位差法における新しい考え方に基づく新型のプローブを提案し、その基礎的なきず検出特性について検討を行い、以下の知見を得た。



(a) 渦電流の流れ

In-phase  
component [V]



(b) 電位分布

図5 導体表面にきずのある場合の渦電流の流れと電位分布

- (1) 電磁誘導に関して考察を行い、きずに沿って流れる渦電流を発生させるのは、電位であることを明確とした。
- (2) 励磁コイルからの直接的な誘導の影響を受けない、新型のプローブを提案した。
- (3) きず深さに対してプローブの検出信号は、対応して変化することを確認した。今後、試験周波数が異なる場合や種々のきず形状について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会編：非破壊検査便覧、pp776-796 日刊工業新聞

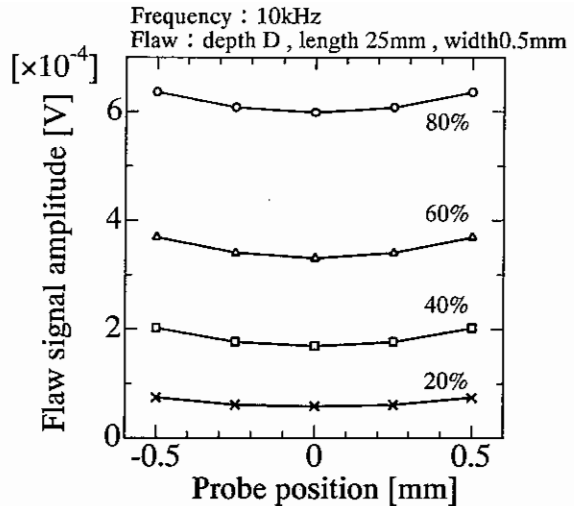


図6 探触子が±0.5mm 変化した場合のきず信号

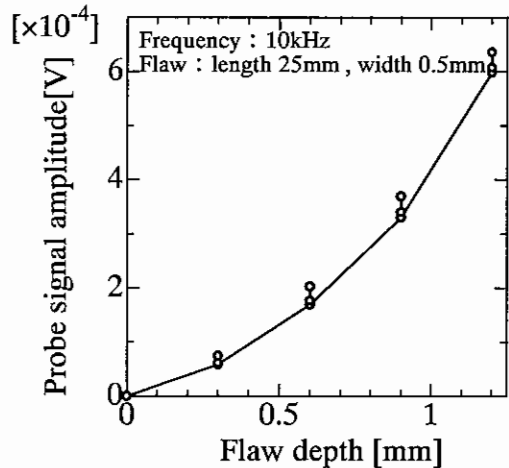


図7 きず深さに対する検出信号振幅の変化

- 2) 庄子哲雄他：集中誘導型交流電位差法による SUS316R 鋼におけるクリープ疲労損傷の非破壊計測・評価、非破壊検査 Vol.48 No.12 pp853-861 (1999)
- 3) 金他：集中誘導型交流電位差法における傾斜欠陥の評価、非破壊検査 Vol.44 No.9 pp730-735 (1995)
- 4) S.H.H.Sadeghi et. al. : Induction Coil Shape and Size Considerations in Magnetic Field Measurement with Spatiality Fast Varying Distribution, Review of Progress in QNDE, Vol. 15 pp.2203-2210 (1996)