

# 矩形励磁 4 探針プローブを用いた電磁誘導式電位差法に関する検討

日大生産工 (院) ○田山 陽司  
日大生産工 小山 潔、星川 洋

## 1. はじめに

非破壊試験とは、材料や製品、構造物を分離したり、あるいは破壊したりすることなしに、その性能や安全性を検査する方法である。非破壊試験では、きずの有無を知ることだけでなく、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の評価を行う方法として電位差法がある。電位差法は、電流を試験体に印加し、きずの存在による電流経路の変化を電位差の変化として探針で検出する方法である。電位差法には、電磁誘導を利用して、励磁コイルで試験体に渦電流を誘導する方法がある<sup>1)</sup>。矩形縦置き励磁コイルを用いる場合、2本の探針がきずを跨いで配置される。この場合、探針が試験体に接触することで、電位差検出回路はループを成し、励磁コイルからの磁界により誘導起電力を発生する。すなわち、この場合のプローブの検出信号には、探針で検出される電位差だけでなく、励磁コイルからの誘導起電力も含まれる。電位差はきず深さに対応して変化するが、励磁コイルからの誘導起電力は、きず深さと直接的な関係性がない。そのため、励磁コイルからの誘導起電力を含むプローブの検出信号では、きず深さの正確な定量的評価が困難となる。

そこで、きず深さの評価精度を高めるため、励磁コイルからの誘導起電力の発生を回避する電磁誘導式電位差プローブを提案した<sup>2)</sup>。このプローブは、矩形の励磁コイルと、4本の探針で構成される。きずを跨いで電位差を検出するのではなく、きずに沿った電位差を検出することで、励磁コイルからの誘導起電力の発生を避けられる。今回、この電磁誘導式電位差プローブを用いることで、きず深さの定量的評価が可能であることを確認した。

## 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り電界  $E$  が発生する。

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

また、磁気ベクトルポテンシャル  $A$  により磁束密度  $B$  は次のように表される。

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

式(1)、式(2)より  $E$  は次のようになる。

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

電位を  $\phi$  とすると、ベクトル恒等式

$$\nabla \times \nabla \phi \equiv 0 \quad (4)$$

が成り立つため、式(3)から  $E$  は次のように求められる。

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

ただし、 $\phi$  は電位を表す。式(5)は磁束の変化による誘導電界 ( $-\partial A / \partial t$ ) と電荷による電位勾配  $\nabla \phi$  との2種類の電界が導体内に存在することを示している。 $E$  により、導電率  $\sigma$  の導体内に発生する渦電流密度  $J$  は、

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

で与えられる。式(5)は渦電流の大きさと向きが、誘導電界と電位勾配のベクトル合成で決まることを示す。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  $\rho \cdot J$  が発生する。

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

ただし、 $\rho = 1/\sigma$  は抵抗率を表す。式(7)は渦電流による電位降下が、誘導電界と電位勾配との差に等しくなるように渦電流が発生することを示す。式(7)から  $\nabla \phi$  を求めると、

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

となる。式(8)より、電位勾配  $\nabla \phi$  は誘導電界 ( $-\partial A / \partial t$ ) と渦電流による電位降下  $\rho \cdot J$  との差で発生することがわかる。きずによる遮断などで渦電流  $J$  が小さくなると、誘導電界よりも電位降下が小さくなるため、電位勾配が発生する。

導体内に発生する電位差  $\Delta \phi$  は、電位勾配の任意の経路に関する積分値として、

$$\Delta \phi = \int_b^a \nabla \phi \cdot dl = \int_b^a (-\partial A / \partial t - \rho \cdot J) \cdot dl \quad (9)$$

で与えられる。すなわち、きずにより渦電流が小さくなることで、誘導電界と電位降下との間に差が生じ、電位差  $\Delta \phi$  が発生する。

## 3. 矩形励磁 4 探針プローブ

励磁コイルからの誘導起電力の影響を受ける電磁誘導式電位差プローブは、渦電流を誘導する矩形縦置き励磁コイルと、それに平行な方

Investigation of a Four-Needles Potential Difference Probe  
With Oblong Exciting Coil Using Electromagnetic Induction

Youji TAYAMA, Kiyoshi KOYAMA and Hiroshi HOSHIKAWA

向に配置した2本の探針から構成される。このプローブは、きずを跨いで、巻線と同方向に発生する電位差を検出する。そのため、ループを成した電位差検出回路に、励磁コイルからの磁界による誘導起電力が発生する。すなわち、このプローブの検出信号には、きず深さと直接的な関係性のない励磁コイルからの誘導起電力が含まれてしまう。

そこで、提案するプローブは、励磁コイルからの誘導起電力を回避するために、矩形平面励磁コイルを用いて、きずに沿って発生する電位差を検出する構造とした。図1(a)には、きずのない試験体に誘導される渦電流を示す。この場合、誘導電界により渦電流が励磁コイルの巻線方向に様に流れるため、電位差は生じない。一方、図1(b)には、試験体にきずがある場合に誘導される渦電流と、発生する電位を示す。矩形平面励磁コイルを用いることで、きずに沿った電位差を発生させることができる。このきずに沿った電位差を検出するように探針を配置すれば、ループを成した電位差検出回路は、励磁コイルからの磁界と鎖交せず、誘導起電力の発生を回避できる。

図2には、矩形平面励磁コイルを用いた電磁誘導式電位差プローブの原理的構造を示す。きずにより発生する電位は、きず付近で最大となり、きずから離れるにしたがって減少する。そのため、きずの片側でそれぞれ発生する、きずに沿った電位差  $V_1$  または  $V_2$  のみを検出すると、プローブがきずに対して垂直方向(図中の  $y$  軸方向)に位置ずれを起こした場合、検出信号が変化し、定量的な評価が困難となる。そこで、提案するプローブでは、探針を4本とし、きずに沿った電位差  $V_1$  と  $V_2$  をそれぞれ検出し、差動増幅 ( $V=V_1+V_2$ ) する。それにより、きずに対するプローブの位置ずれによる、検出信号の変化を小さくできると考えた。きずに沿った電位差は、きず深さに応じて変化する。そのため、探針が検出する電位差で、きず深さの評価ができる可能性がある。

一方で、この電位差は、きずに沿った方向に渦電流を流し、この渦電流のつくる磁界が、ループを成した電位差検出回路と鎖交する。すなわち、提案するプローブの電位差検出回路には、励磁コイルからの誘導起電力はほとんど生じないが、きずに沿って流れる渦電流による誘導起電力が生じる。この渦電流による誘導起電力は、電位差と同様に、きず深さに応じて変化する。そのため、電位差と渦電流による誘導起電力の合成であるプローブの検出信号により、きず深さの評価ができる可能性がある。

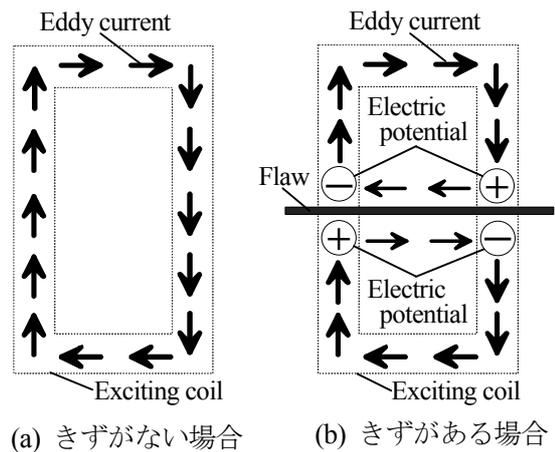


図1 試験体に誘導される渦電流と電位

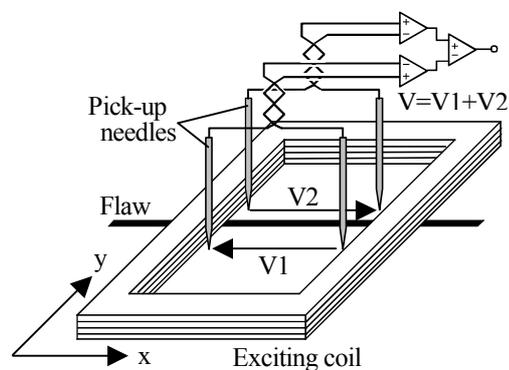


図2 矩形励磁4探針プローブ

#### 4. 解析と実験条件

A- $\phi$ 法の3次元有限要素解析を以下の条件で行った。励磁コイルの寸法を、長さ23mm、幅13mm、巻き線断面積 $3 \times 3\text{mm}^2$ とし、電流密度 $J_0$ を $0.3 \times 10^7\text{A/m}^2$ 、試験周波数を40kHzとした。きずと平行方向の探針の間隔は6mm、きずと垂直方向の探針の間隔は2mmとした。試験体は厚さ5mmの真鍮とし、その導電率 $\sigma$ を $1.3 \times 10^7\text{S/m}$ 、比透磁率 $\mu_r$ を1.0とした。きず形状は長さ25mm、幅0.5mm、深さ1mm、2mm、3mm、4mmのスリット状とした。実験での試験周波数、励磁コイルの寸法、探針の間隔、及びきず形状は、解析で定めた値とした。

#### 5. 試験体に誘導される渦電流と電位分布

以下は有限要素解析による結果である。図3には、試験体にきずがない場合の試験体表面における渦電流分布(図3(a))と、電位分布(図3(b))を示す。きずがない場合、矩形平面励磁コイルの巻線に沿って渦電流が誘導され、電位はほとんど発生しないことがわかる。図4には、試験体にきずがある場合の試験体表面における渦電流分布(図4(a))と、電位分布(図4(b))を示す。

きずがある場合、渦電流はきずに沿った方向にも流れている。これは、きずに沿った方向に電位差が生じているためである。また、きずにより発生する電位は、きずから離れるにしたがって小さくなっている。このことから、きずの片側での電位差の検出では、プローブの位置ずれにより、検出信号が変化することがわかる。

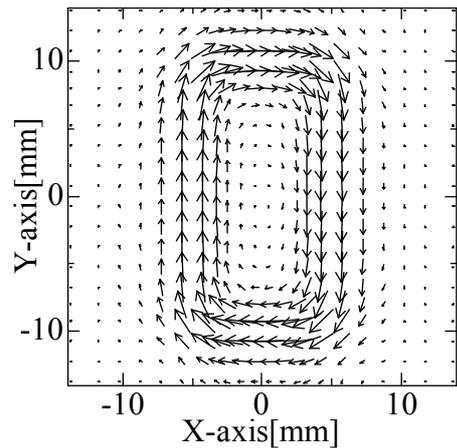
きずが深くなれば、きずの下側に潜り込んで流れる渦電流が小さくなり、きずに沿って流れる渦電流が大きくなる。すなわち、きずが深くなると、きずに平行な方向の電位差が大きくなる。そのため、きずに沿った電位差からきず深さの評価ができる可能性がある。

### 6. 検出信号によるきず深さの評価

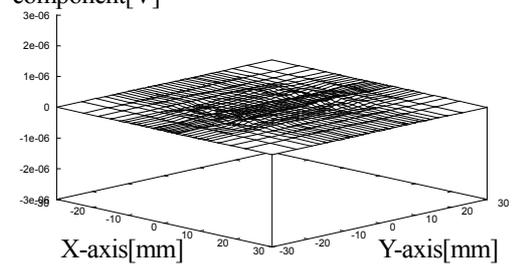
以下は有限要素解析による結果である。図5には、プローブの位置がきずに対して垂直方向に最大で±0.5mmずれたときの、きずの両側でそれぞれ検出される電位差(V1とV2)と、その差動信号Vの変化を示す。V1とV2はプローブの位置ずれに対して変化が大きい。このことは、図4(b)に示した試験体にきずがある場合の電位分布からも確認できる。一方、V1とV2を差動増幅した信号Vはプローブの位置ずれに対して変化が小さいことがわかる。図6には、きず深さが異なる場合のプローブの位置ずれに対する差動増幅した信号Vの変化を示す。きず深さによらず、Vはプローブの位置ずれに対して変化が小さいことがわかる。したがって、4本の探針でV1とV2を検出し、それを差動増幅することで、プローブの位置ずれによる信号の変化を抑えることができる。

図7には、きず深さに対する電位差の変化を示す。図中のプロットの範囲は図6で示したプローブの位置ずれによる電位差の変化分を示す。プロットの範囲は小さく、プローブの位置ずれによる信号の変化が抑えられていることがわかる。また、電位差はきずが深くなるにつれて大きくなる。このことから、きずに沿った電位差を検出することで、きず深さの評価が可能であることがわかる。

実際には、電位差を検出する際に、電位差検出回路には、きずに沿って流れる渦電流による誘導起電力が生じる。図8には、きず深さに対する電位差と、渦電流による誘導起電力、及び、プローブの検出信号を示す。渦電流による誘導起電力は、電位差と同様に、きず深さに対応して変化していることがわかる。プローブの検出信号は電位差と、渦電流による誘導起電力の合成である。渦電流による誘導起電力は、電位差に比べると小さい。そのため、プローブの検出

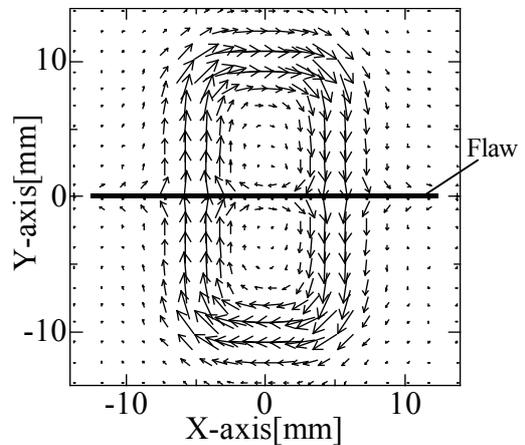


(a) 渦電流分布

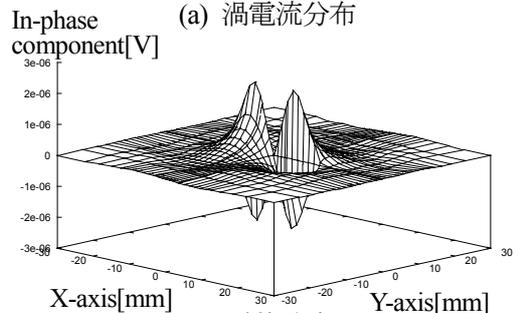


(b) 電位分布

図3 試験体にきずがない場合の渦電流および電位分布



(a) 渦電流分布



(b) 電位分布

図4 試験体にきずがある場合の渦電流および電位分布

信号は、ほとんど電位差と同じ値であることがわかる。さらに、プローブの検出信号は、きず深さに対応して変化していることがわかる。

図9には、実験で得られた、きず深さに対する検出信号の変化を示す。この検出信号は、増幅器を含む探傷器により出力された信号である。これに対して、図8に示した解析によるプローブの検出信号は、探針だけで検出される信号である。そのため、両者は単純に絶対値として比較できない。しかし、図9の信号は、図8に示したプローブの検出信号と同様に、きず深さに対応して変化していることが確認できる。

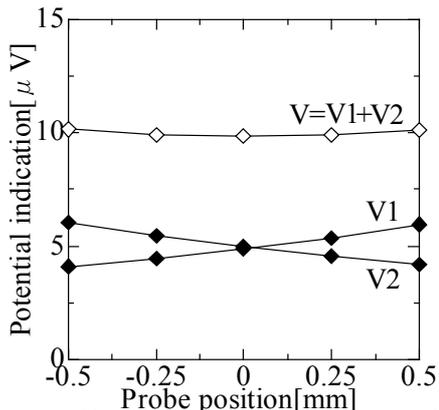


図5 きず深さ4mmの場合のプローブの位置ずれに対する電位差(解析)

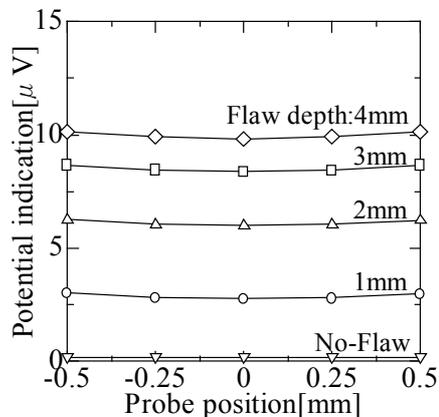


図6 異なるきず深さにおけるプローブの位置ずれに対する電位差(解析)

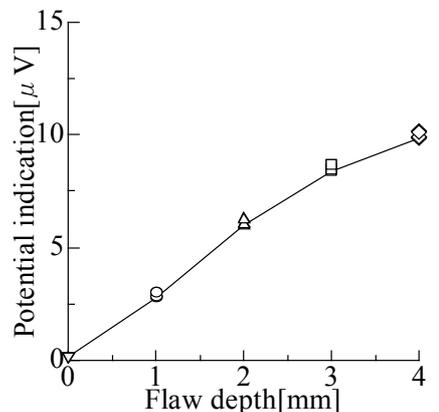


図7 きず深さに対する電位差(解析)

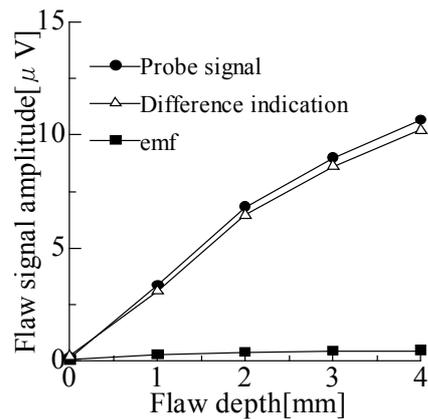


図8 きず深さに対する信号振幅の変化(解析)

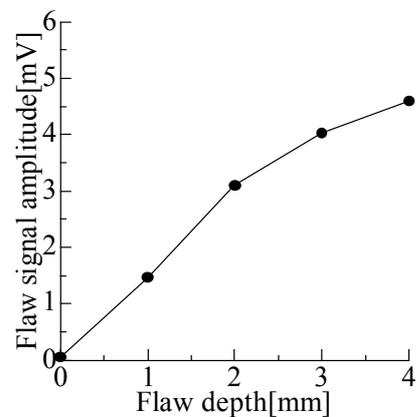


図9 きず深さに対する探傷器の出力信号(実験)

## 7. まとめ

きずに沿って生じる電位差を4本の探針を用いて検出する電磁誘導式電位差プローブにおける、きず深さの評価の可能性について検討を行った。プローブの検出信号は、電位差と渦電流による誘導起電力の合成であり、きず深さに応じて変化することから、プローブの検出信号によるきず深さの定量的評価が可能であることを確認した。

今後は、種々のきず形状におけるきず信号特性と、詳細なプローブ設計値について検討を行う予定である。

## 8. 参考文献

- 1) 佐藤康元他：電位差法による裏面応力腐食割れのモニタリング、非破壊検査第55巻11号、pp563-566(2006)
- 2) 武井大輔：電磁誘導指揮電位差法における矩形4探針検出プローブのきず検出特性の検討、JSNDI H13 秋大会概要集、pp27-28(2001)