

電磁誘導式4探針電位差プローブによる表面キズ深さの評価

星川 洋 (日大生産工・教授)
小山 潔 (日大生産工・教授)

1 まえがき

構造材料に表面キズが存在すると応力集中のために破壊につながる恐れがあるから、安全性を確保するために、表面キズが検出されたときには、その深さを評価する非破壊検査法が必要となる。目視では評価できない表面キズの深さ評価法として、直接通電による電位差法¹⁻²⁾の他に、近年は電磁誘導による電位差を利用した評価法の研究が行われている³⁻⁵⁾。これらの電磁誘導を用いた方法では、電位差を検出する探針が増幅回路の入力端子とループを構成するために、励磁コイルからの直接的な磁界により発生する誘導起電力の影響を受けて評価精度が低下する問題点がある。

筆者らは電磁誘導を利用した電位差法理論を明確にすると共に、表面キズの深さを精度高く評価できるプローブの開発を目指している。本報告では、電磁誘導による電位差発生現象を理論的に示す⁶⁻⁷⁾と共に、従来のもよりも評価精度の高い電磁誘導式4探針電位差プローブを提案する。このプローブは、矩形の平面励磁コイルと2本1組とした2対の探針とを組み合わせている。キズに沿った電位差を4本の探針で検出することにより、励磁コイルからの直接的な誘導起電力の影響を受けず、またキズに対するプローブの位置ずれの影響をほとんど受けずに、表面キズ深さを評価できることを報告する。

2 電流の変化による電荷と電位の発現

電磁誘導は時間と共に変化する磁界が誘導電界を発生し、導体内に渦電流を誘導する現象である。誘導電界は交流発電機や変圧器などにおける発電として利用されるものであり、導体内の電荷を動かして電流を流し、電荷を集積させて電位差/電圧を発生させる作用を行う。

電荷保存の法則に基づいて、電荷は正と負との対として発生/消滅する以外には、正/負の電荷が単独で発生/消滅することはない。電荷保存の法則は電位の源である電荷密度 \mathbf{q} [C/m³]と磁界の源である電流密度 \mathbf{J} [A/m²]とを関係付ける式

$$\nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = -\partial \mathbf{q}(\mathbf{r}, t) / \partial t \quad (1)$$

によって表わされる⁸⁾。ここで、 \mathbf{r} [m]は位置、 t [s]は時間を表す。式(1)は導体内で電荷を運ぶ電流密度 \mathbf{J} が位置と共に変化する領域では、電荷密度 \mathbf{q} が時間と共に変化することを意味している。位置に対して変化なく一様な電流が流れる領域では、電荷の出入りは等しいから電荷密度は不変である。すなわち、電流が一様に流れる領域では、電流が流れても電荷は姿を現わすことはない。一方、キズなどの不連続のために電流が位置と共に変化する領域では、電流が流れ出れば電荷が減少して電荷密度は時間と共に低下し、電流が流れ込めば電荷が増加して電荷密度は時間と共に上昇するから、正ま

Study on Eddy Current Testing of Weld over Anti-Corrosion Painting

Hiroshi HOSHIKAWA, Kiyoshi KOYAMA and Youji TAYAMA

たは負の電荷が発現する。ただし、電荷保存の法則に則って、ある領域に正電荷が発生すれば、必ず対となって、他の領域に負電荷が発生する。

電位はクーロンの法則に基づく斥力に抗して電荷を運ぶ仕事と定義される。言い換えれば、電位は集積分布した電荷密度が蓄えた電気エネルギーを表す。キズなどの不連続によって電流の流れが滞ることで電荷が発現すれば、分布電荷として蓄えられた電気エネルギーである電位が発生する。誘電率を ϵ [F/m]としたとき、電荷 q [C]により発生する電位 ϕ [V]はポアソンの方程式

$$\nabla^2 \phi(r,t) = -q(r,t)/\epsilon \quad (2)$$

で与えられる⁹⁾。式(2)は電位が電荷密度に比例することを表す。クーロン斥力に基づく電界($-\nabla\phi$)は、導体内で電荷密度/電位の高い所から低い所に向かって電流を流し、電流の連続性を保つ役割を担う。

3 電磁誘導式4探針電位差プローブ

従来の電磁誘導式電位差プローブは縦置励磁コイルを用い、表面キズに対して垂直となるように渦電流を誘導し、キズを跨いだ両側に配置した2つの探針で電位差を検出して表面キズ深さを評価するものである。この方式のプローブでは渦電流を誘導する励磁コイルからの磁束による誘導を避けることが出来ず、リフトオフ変化によってプローブの指示値が変わるためにキズ深さを信頼性高く評価することは困難である。

筆者らは励磁コイルからの直接的電磁誘導の影響を受けないプローブの構造として、キズ長さに沿った方向の電位差を検出するプローブを考えた。さらに、キズに対してプローブを設置するに際して、設置位置の僅かな差異がプローブの指示値に大きな影響を与えることから、プローブ位置ずれによる影響を小さくする必要がある。そこで、図1に示すように矩形平置励磁コイルにより渦電流を誘導し、キズ長さ方向に沿って発生した電位差を、励磁コイルの中

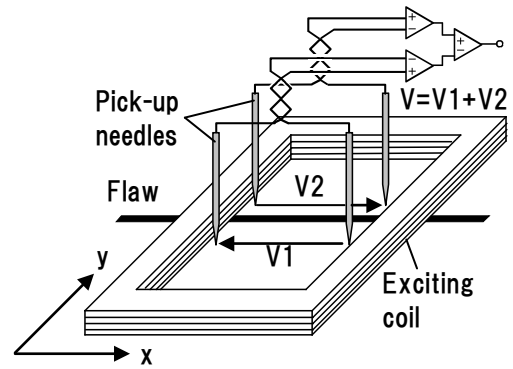


図1 電磁誘導式4探針プローブ

心に2本1組の探針をキズの両側で対として配置する4探針電位差プローブを考案した。

矩形平置励磁コイルは試験体表面近傍に巻線に沿って閉路を成すように渦電流を誘導するから、試験体にキズが無いときには渦電流の滞りは無く、電位差はほとんど発生しない。試験体に表面キズがあると、キズによって渦電流が妨げられてキズの周囲には電荷が集積して電位差が発生する。表面キズが深いほど渦電流は大きく妨げられて大きな電位差が発生するから、電位差を検出することによって表面キズの深さを評価することが可能である。

探針を含む電位差検出回路が励磁コイルからの磁界による直接的な誘導起電力の影響を抑える方法として、電位差を検出する2つの探針はキズに沿った方向の電位差を検出するように配置することとした。また、キズに対する探針の設置位置の差異がプローブの信号に影響を与えないようにする必要がある。そこで、図1に示したように矩形の平面励磁コイルと4本の探針から構成される電磁誘導式電位差プローブとした。キズに沿った電位差 V_1 , V_2 を2組の2探針で検出し、それらの信号を差動増幅($V=V_1+V_2$)する。プローブの信号を V とすることにより、キズに対するプローブの垂直方向(図中の y 軸方向)の位置変化による、検出される電位差の変化を小さくできると考えた。キズに沿った方向の電位差はキズ深さに応じて変化するため、プローブの検出信号はキズの深さに応じて変化することになる。

4 解析及び実験の方法

A- ϕ 法による3次元有限要素解析¹⁰⁾を以下の条件で行った。試験体は厚さ5mmの真鍮板とし、その導電率 σ を 1.3×10^7 S/m、比透磁率 μ_r を1.0とした。キズはスリット状とし、長さ25mm、幅0.5mm、深さ1mm、2mm、3mm、4mmとした。励磁コイルは矩形として、長さ23mm、幅13mm、巻き線断面積 3×3 mm²とした。励磁電流の密度 J_0 は 0.3×10^7 A/m²とし、試験周波数は40kHz（標準浸透深さが0.7mm）とした。キズと平行方向の2探針の間隔は6mm、キズに対して垂直方向の両側に配置された2組の探針の間隔は2mmとした。

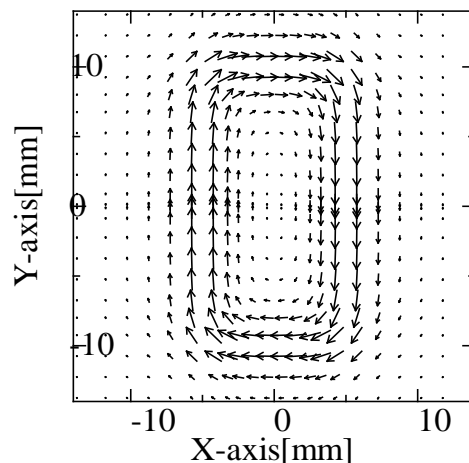
実験では、5mmの厚さ真鍮板を試験体として、解析を行った寸法の表面キズを放電加工した。励磁コイルの寸法と4本の探針間隔、及び試験周波数は解析と同じ値として、渦電流探傷器を用いて実験を行った。

5 解析及び実験の結果

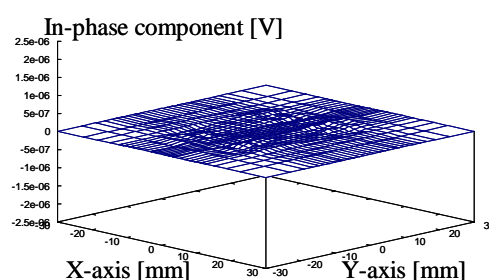
図2は試験体にキズがない場合について、試験体表面の渦電流と電位を有限要素解析によって求めた結果を示す。なお、同図における渦電流と電位は正弦波交流であり、励磁コイルの電流に対して90度進相成分を示す。渦電流は励磁コイルの巻線に沿って閉路を成して一様に誘導されるから、電荷が滞留して集積することはほとんど無く、試験体に電位差はほとんど現れないことがわかる。

図3は試験体の表面にスリットキズがある場合について、試験体表面における渦電流と電位を示す。渦電流は表面キズによって流れが妨げられ、キズの近傍に正と負の電荷が滞留して集積する結果として、キズを挟んだ両側に正と負の電位が対として発生することが分かる。図3と図4のマックスウェルの方程式に基づく解析結果は、電磁誘導によって導体内に電位差が生起すること明確に示している。

図4、キズ深さに対する4探針プローブの信号の解析結果を示す。同図から電位差信号に比べて渦電流による起電力emfは小さ

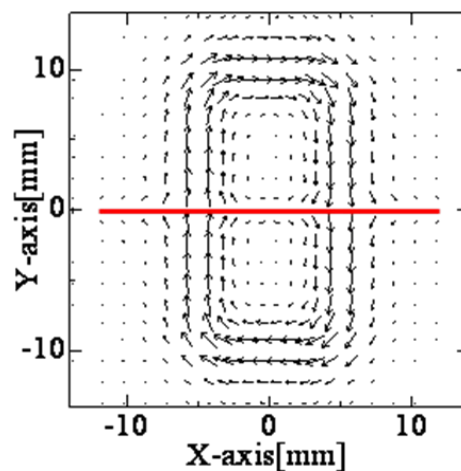


(a) 渦電流

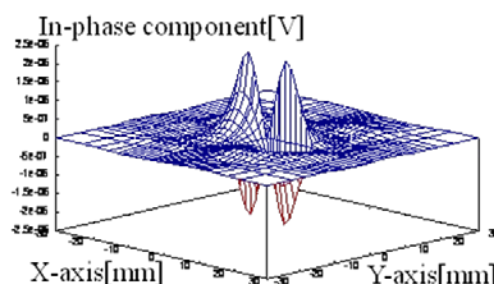


(b) 電位

図2 渦電流と電位（キズ無し）



(a) 渦電流



(b) 電位

図3 渦電流と電位（キズあり）

く、プローブの信号はほとんど電位差によって発生することがわかる。また、プローブの電位差信号は、キズの深さに対応して変化することがわかる。

図5はキズ深さに対する4探針プローブの検出信号の実験結果を示す。同図の検出信号は、増幅器を含む渦電流探傷器で得られた信号であるため、解析で得られたプローブの検出信号に対する絶対値の比較できないが、キズ深さに対応してほとんど同様に変化することを示している。

6 おわりに

電磁誘導式4探針電位差プローブはキズ長さ方向の電位差を検出し、励磁コイルからの直接的誘導起電力の影響を受けず、さらにキズに対するプローブの位置ずれの影響が小さいので、キズの深さを精度高く検出できる。本プローブにより金属の表面キズを簡便に評価できるものとする。なお、実用に当たっては試験体の電磁気特性と形状寸法に対応して4探針プローブの探針間隔と試験周波数を適切に設定することが必要である。

参考文献

- 1) 浜田晴一, 早川学:「火力発電設備に対する電位差法の応用における最近の進展」, 非破壊検査, 55 巻9 号, pp. 473-477 (2006)
- 2) 燈明泰成:「近接端子直流電位差法による表面き裂の定量的非破壊評価」, 非破壊検査, 55 巻11 号, pp567-570 (2006)
- 3) 村山稔, 庄子哲雄, 渡辺豊, 佐藤康元:「集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の非破壊評価」, 日本機械学会論文集(A編), 63(609), pp. 1119-1125, (1997)
- 4) 庄子哲雄, 川原鉄士, 栗野真和, 佐藤康元:「集中誘導型交流電位差法によるSUS316FR 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, 48(12), pp. 853-861, (1999)

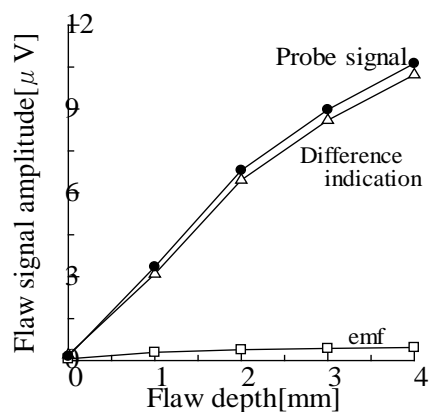


図4 キズ深さと信号 (解析)

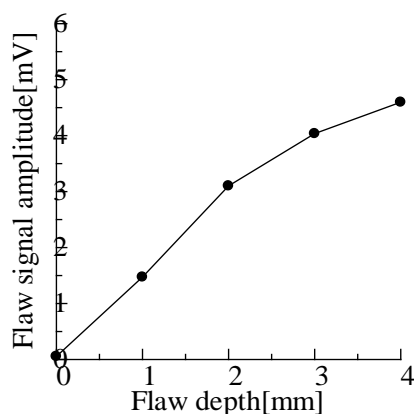


図4 キズ深さと信号 (実験)

- 5) 佐藤康元, 渥美健夫, 庄子哲雄:「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, 55 巻11 号, pp563-566 (2006)
- 6) H. Hoshikawa, K. Koyama, M. Maeda: “Electric Potential in Eddy Current Testing”, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.22A, pp375-382 (2003)
- 7) H. Hoshikawa, K. Koyama: “Electric Potential Diverts Eddy Current away from Discontinuities”, Materials Evaluation, Vol.64, No.8, pp809-814 (2006)
- 8) 熊谷信昭:「電磁理論」, コロナ社, p. 50, (1990)
- 9) 文献7), p. 116
- 10) 坪井始, 内藤督: 実践数値電磁界解析法, 養賢堂, p57, (1995)