

# 電磁逆解析に基づく複雑形状部材中の表面欠陥評価

## Evaluation of Surface Defect on Complex Shaped Component Based on Electromagnetic Inverse Analysis

産業技術総合研究所 中住 昭吾 Shogo NAKASUMI Member  
産業技術総合研究所 鈴木 隆之 Takayuki SUZUKI Member

Defect in a stud bolt was evaluated by using fluxgate (FG) magnetic sensor. In order to analyze defect shape and size quantitatively, the relationship between magnetic flux densities and magnetic dipole moment on the defect plane was formulated in cylindrical coordinate system. Periodicity was observed along longitudinal direction in magnetic flux density distribution measured by fluxgate magnetic sensor. The inverse analysis based on Tikhonov regularization technique was performed by using magnetic flux densities around the defect. The shape and size of reconstructed defect obtained by the inverse analysis were almost consistent to the original one.

**Keywords:** fluxgate magnetic sensor, non-destructive evaluation, defect, magnetic flux leakage technique, inverse analysis, Tikhonov regularization technique

### 1. 緒言

産業機器や構造物は主に強磁性体で構成されているため、漏洩磁束法等の電磁気的手法を用いた非破壊損傷評価法が有効である。

著者らはフラックスゲートセンサ (FG センサ) を用いて、強磁性材料である SS400 の平板に設けた様々な欠陥形状について測定を行い、従来よりも大きなリフトオフで欠陥検知が可能であることを示し [1]、また、測定より得られた欠陥近傍の漏洩磁束密度分布に対して Tikhonov の正則化法 [4] や L-curve 法等の逆解析手法を適用することにより、欠陥の具体的な形状を復元させ、寸法も評価可能であることを示した [2]。さらにはこの手法を円筒形状部材へ適用した [3]。

本研究では、円筒形状部材の拡張として、これらの手法をボルト部材に適用し、FG センサで測定したねじ部の欠陥近傍の漏洩磁束密度分布から欠陥断面形状および寸法を求め、実際の欠陥と比較した。

### 2. 磁気双極子モーメントと磁束密度の関係定式化

Fig.1 に示す円筒座標系  $(r, \theta, z)$  と直交座標系  $(x, y, z)$  の間に  $x = r \cos \theta$ ,  $y = r \sin \theta$  の関係が成り立つことから、空間上の任意点の位置ベクトルを  $\mathbf{a} = \mathbf{a}(x, y, z)$  と表記する。このとき、円筒表面から

一定のリフトオフを保持する曲面上の磁束密度  $\mathbf{B}(\mathbf{a})$  の  $z$  軸方向成分  $B_z(\mathbf{a})$  と、欠陥断面  $\mathbf{a}' = \mathbf{a}'(x', y', z')$  上に分布する磁気双極子モーメントベクトル (以下、磁気双極子と呼ぶ)  $\mathbf{m} = \mathbf{m}(\mathbf{a}')$  の間には式(1)の関係が成り立つ。ここで  $F(\mathbf{a})$  は応答関数と呼ばれ、式(2)で示される。式(1)を離散化して式(3)を得る。

$$\mathbf{B}_z(\mathbf{a}) = \int F(\mathbf{a} - \mathbf{a}') \mathbf{m}(\mathbf{a}') d\mathbf{a}' \quad (1)$$

$$F(\mathbf{a}) = \mu_0 (x^2 - 2y^2 + z^2) / \left\{ 4\pi (x^2 + y^2 + z^2)^{5/2} \right\} \quad (2)$$

$$\mathbf{B}_z = F\mathbf{m} \quad (3)$$

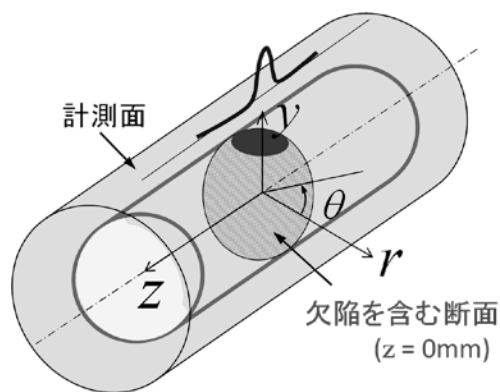


Fig.1 Coordinate system

### 3. FG センサによる磁束密度測定と可視化

試験片を Fig.2 に示す。試験片は S45C のボルト材であり、外形寸法は  $\phi 16.0 \times 100.0\text{mm}$  である。試験

連絡先: 中住昭吾

〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1

産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門

E-mail: nakasumi.shogo@aist.go.jp

片表面から最大深さ 3.0mm、幅 0.3mm となるように、半円状の欠陥を加工した。試験片は加工後に消磁を行い、ネオジム磁石を用いて長手方向（z 軸方向）に着磁したのち、漏洩磁束密度を測定した。

漏洩磁束密度の測定に用いた磁気センサは約 1.0×3.0mm の FG センサであり、磁束密度測定範囲は±5.0×10<sup>-4</sup>T、分解能は 1.0×10<sup>-7</sup>T である。測定範囲は、周方向に 360°、z 軸方向に欠陥断面を中心とする±20.0mm とした。また測定間隔は、周方向に 4.0°、z 軸方向に 0.2mm とした。リフトオフは 1.0mm である。

測定した漏洩磁束密度を、ボルト材の z 軸方向及び周方向にプロットした分布を Fig.3 に示す。欠陥に起因する漏洩磁束密度分布の隆起が中央部に観察されている。一方、ボルトのネジ溝に起因する磁束密度の周期的な繰り返しが z 軸方向に生じていることがわかる。

#### 4. 逆解析による欠陥形状の復元

Fig.3 の磁束密度分から欠陥面上の磁化分布を求めることは、式(3)の  $B_z$  から  $m$  を求めることに対応する。しかし  $m$  を直接求めようとするとその解は振動解となりやすいため、式(4)で表される Tikhonov の正則化法に基づく逆解析[4]を Fig.3 の漏洩磁束密度分布に対して行った。また、L-Curve 法を用いて、その折れ曲がり位置付近に位置する適切な正則化パラメータ  $\alpha$  を求めることにより、振動を抑制させつつ、過度に平滑化されていない解  $m$  を得ることができる。

$$m = (F^T F + \alpha I)^{-1} F^T B_z \quad (4)$$

なお、磁気双極子の配置はボルト材の中心軸から外表面に向かうにつれて計算点を周方向に増加させ、表面近傍に多くの計算点が配置されるようにした。このように表面部を密に、中心部を疎にするような粗密付けを計算点配置に設けることで、高精度と高効率を両立した解析が可能となる。

逆解析の結果得られた磁気双極子の分布を Fig.4 に示す。点線が実際の欠陥の境界である。特に表面部分では欠陥の形状を精度よく得られていることがわかる。

#### 5. 結言

ネジ溝に半円型欠陥部を有するボルト材を用いて非破壊検査を行った。漏洩磁束密度はフラックスゲートセンサで測定し、ボルト長手方向及び周方向角度に対して磁束密度分布をプロットしたところ、ボルトのネジ溝に起因する磁束密度の周期的な繰り返しが観察された。Tikhonov の適切化法を用いて逆解析を行い、欠陥形状を適切に評価することができた。

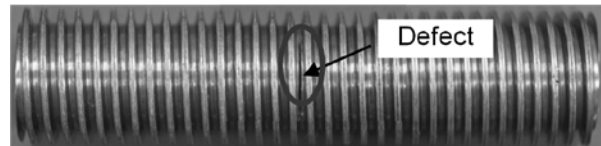


Fig.2 Specimen of stud bolt

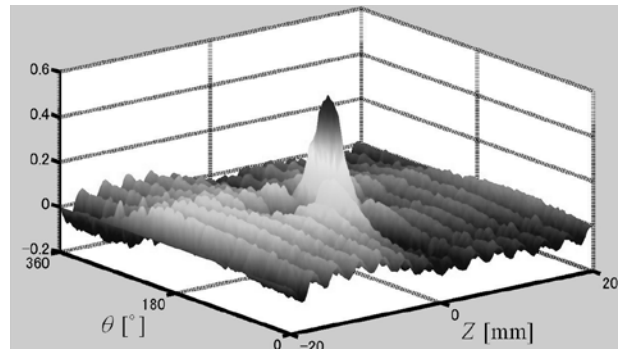


Fig.3 Magnetic flux density distribution of bolt

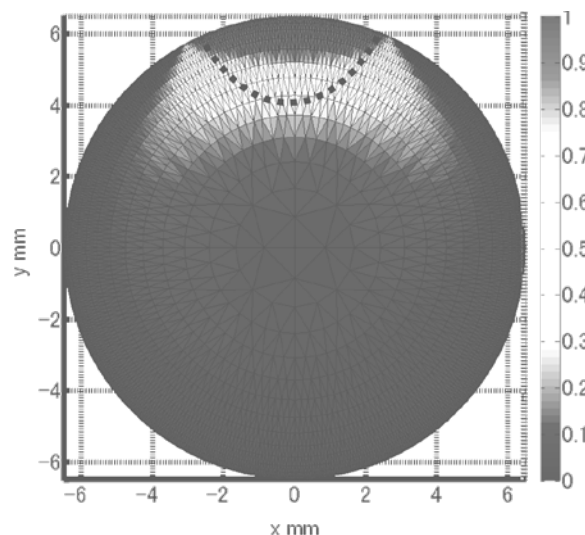


Fig.4 Magnetic dipole moment distribution obtained by inverse analysis from measured magnetic flux density

#### 参考文献

- [1] 鈴木、寺崎、笹本、西村、寺本、“FG センサを用いた磁性構造材料の損傷評価”、第 16 回 MAGDA コンファレンス in 日立講演論文集、2007、pp.331-334.
- [2] 鈴木、蓮見、黒田、寺本、“フラックスゲートセンサを用いた SS400 の欠陥断面形状の解析・評価”、日本 AEM 学会誌、Vol.19, No.2、2011、pp.342-347.
- [3] 鈴木、蓮見、中住、寺本、“フラックスゲートセンサを用いた S45C 円筒材の欠陥断面形状の評価”、日本保全学会第 8 回学術講演会要旨集、2011、pp.114-116.
- [4] C. Hansen, “Analysis of Discrete Ill-Posed Problems by Means of the L-Curve”, Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol.34, No.4, 1992, pp.561-580.