

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

Evaluation of Cross-section Shape of Defect in Cylindrical Component by Using Fluxgate Magnetic Sensor

産業技術総合研究所	鈴木 隆之	Takayuki SUZUKI	Member
筑波大学大学院 [学]	蓮見 清章	Kiyoaki HASUMI	Student Member
産業技術総合研究所	中住 昭吾	Shogo NAKASUMI	Member
筑波大学大学院	寺本 徳郎	Tokuo TERAMOTO	Member

Defect in S45C cylindrical component was evaluated by using fluxgate (FG) magnetic sensor, which could measure the order of 10^{-7} T magnetic flux density. Changes in magnetic flux densities were measured around a defect in a plain cylinder component. In order to analyze defect shape and size quantitatively, the relationship between magnetic flux densities and magnetic dipole moment of the defect plane in cylindrical component was formulated. And the inverse analysis of Tikhonov regularization technique was performed by using magnetic flux densities around the defect. The shape and size of reconstructed defect by the inverse analysis were almost consistent with the original ones. Then it was found that the defect could be evaluated by measuring magnetic flux densities using FG magnetic sensor and by applying the inverse analysis of Tikhonov regularization technique.

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。

その磁気センサとして、近年ではフラックスゲート(FG)センサ等の高感度磁気センサが用いられている。著者らは 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(試料-センサ間距離)での欠陥検知が可能あることを示した[1]。さらに、FG センサの測定より得られた欠陥近傍の漏洩磁束密度分布に Tikhonov の手法を用いた逆解析を行うことにより、欠陥の具体的な形状・寸法が評価可能であることを示した[2]。

本研究では、これらの手法を円筒形状の部材に拡張した。まず、模擬欠陥を有する円筒材を対象に、欠陥と漏洩磁束密度との関係を定式化し、Tikhonov の手法を用いた逆解析により欠陥断面形状を求めた。さらに、FG センサで測定した場合においても、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

連絡先: 鈴木 隆之、〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1、産業技術総合研究所 つくば東事業所
先進製造プロセス研究部門、
E-mail: suzuki-takayuki@aist.go.jp

法を求め、実際の欠陥と比較した。

2. 模擬欠陥による順・逆解析

2.1 解析モデルおよび条件

解析モデルを Fig.1 に示す。欠陥を有する試験片の外形は $\phi 16.0\text{mm}$ であり、模擬欠陥の断面形状は最大深さ 2.0mm の半円状とした。模擬漏洩磁束密度は、 z 軸方向(円筒長手方向)に $\pm 15.0\text{mm}$ 、円周方向に 360° の範囲として解析した。また、それぞれの間隔は 0.2mm 、 4.0° とし、リフトオフは 3.0mm とした。

2.2 磁気双極子モーメントと漏洩磁束密度の関係の定式化

Fig.1 に示す円筒座標系(r, θ, 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 $m(\mathbf{a}')$ の間には式(1)に示す関係が成り立つ。ここで、 F は応答関数と呼ばれ、式(2)のようになる。この式(1)を離散化して式(3)を得る。

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

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

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

2.3 順解析結果

式(3)の離散化された磁気双極子モーメントの計算点の位置を Fig.2 に示す。円筒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。計算点配置にこのような粗密を設けることで、高精度を維持しつつ計算量の低減が図れる。また、Fig.2 の実線によって示される欠陥断面形状の領域内に、面密度一定となる磁気双極子モーメントが分布するものと仮定した。これより、式(3)の各計算点で定義される磁気双極子モーメントの値は、その計算点に結合する各三角形要素の面積の $1/3$ に密度を乗じた値の総和とする。

この方式で求めた磁気双極子モーメント分布に対し、式(3)による順解析を行った。さらに、実際の測定における環境磁場等の影響を模擬するため、最大 $\pm 3.0\%$ の一様乱数となるノイズを順解析結果に加え、Fig.3 に示す模擬漏洩磁束密度分布を得た。

2.4 逆解析結果

Tikhonov の正則化法による逆解析を Fig.3 の模擬漏洩磁束密度分布に対して行った。式(3)から直接、解 $[\mathbf{m}]$ を得ようとするとその解は振動解となりやすい。そこで、式(4)の Tikhonov の正則化法を用いることで解 $[\mathbf{m}]$ の振動を抑制させた。ここで、 \mathbf{I} は単位行列であり、 α は正則化パラメータである[3]。

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

この正則化パラメータ α の最適な値は、Fig.4 に示す L-Curve の折れ曲がり位置付近の値に対応している[4]。これより、最適と判断された $\alpha = 1.0 \times 10^{-3}$ の場合の逆解析結果を Fig.5 に示す。模擬欠陥の断面形状と寸法が良く一致する磁気双極子モーメント分布が得られていた。したがって、適切な正則化パラメータ α を使用した磁気双極子モーメント分布を逆解析で求めることにより、定量的な欠陥断面形状の評価が可能であることがわかった。

3. FG センサによる測定

3.1 試験片

実際の試験片に対する漏洩磁束密度の測定を行った。試験片は S45C の円筒材であり、外形寸法は $\phi 16.0 \times 100.0\text{mm}$ である。試験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。試験片形状を Fig.6 に示す。試験片は加工後に消磁を行い、ネオジム磁石を用いて z 軸方向に

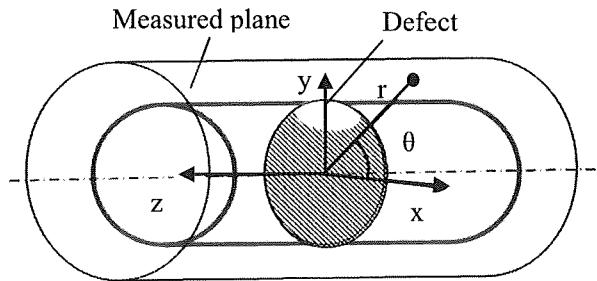


Fig.1 Simulated cross section of defect ($\phi 16.0\text{mm}$)

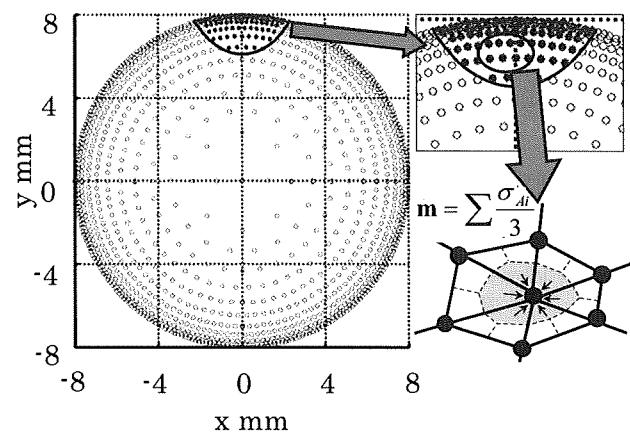


Fig.2 Distribution of magnetic dipole moment

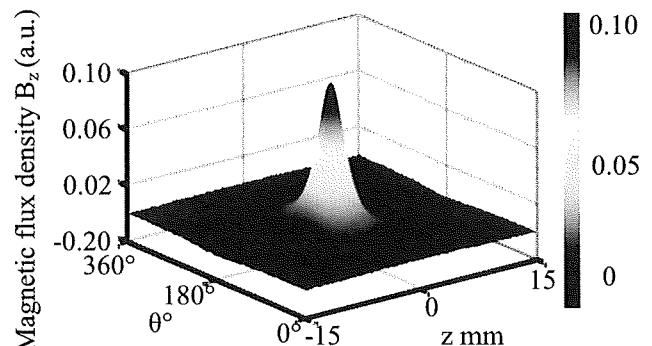


Fig.3 Simulated magnetic flux density distribution B_z with noise of 3% maximum

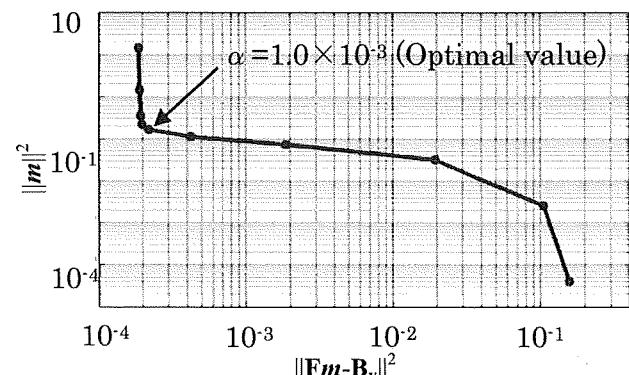


Fig.4 L-Curve in the inverse analysis of Tikhonov regularization

着磁したのち、漏洩磁束密度測定に供した。

3.2 測定方法

漏洩磁束密度の測定に用いた磁気センサは約 $1.0 \times 3.0\text{mm}$ の FG センサであり、磁束密度測定範囲は $\pm 5.0 \times 10^{-4}\text{T}$ 、分解能は $1.0 \times 10^{-7}\text{T}$ である。z 軸方向の測定範囲は、欠陥断面を中心として $\pm 20.0\text{mm}$ 、測定間隔は 0.2mm とした。各々の測定位置で 4.0° ずつ周方向回転させた。リフトオフは 1.0mm である。

3.3 測定結果に基づく漏洩磁束密度分布

円筒材試験片に対する測定結果を Fig.7 に示す。欠陥に起因した明確な漏洩磁束密度分布を得ることができた。FG センサを漏洩磁束密度測定に用いることで、円筒材の欠陥検知が可能であることがわかる。

4. 測定データを用いた逆解析

Fig.7 に示す漏洩磁束密度分布に対して 2 節で示した Tikhonov の逆解析を適用した。結果を Fig.8 に示す。測定環境の磁気ノイズ等の影響から、FG センサを用いて測定した円筒材の漏洩磁束密度分布には多くのノイズが含まれていた。しかし、本手法を用いることにより、欠陥形状および寸法まで良好に求めることができた。これより、実際の測定データに対しても FG センサによる漏洩磁束密度測定と Tikhonov の逆解析手法とを用いることにより、円筒材の欠陥を定量的に求めことが可能である。

5. 結言

FG センサによる欠陥を施した円筒材の測定データを用いて逆解析を行った結果、欠陥の断面形状とその寸法を良好に求めることができた。したがって、本手法を適用することにより、円筒材に生じた欠陥の定量的な評価が可能である。

参考文献

- [1] 鈴木、寺崎、笠本、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] A. N. Tikhonov and V. Y. Arseine, “Solutions of Ill-Posed Problems”, 1977, Halsted Press.
- [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.

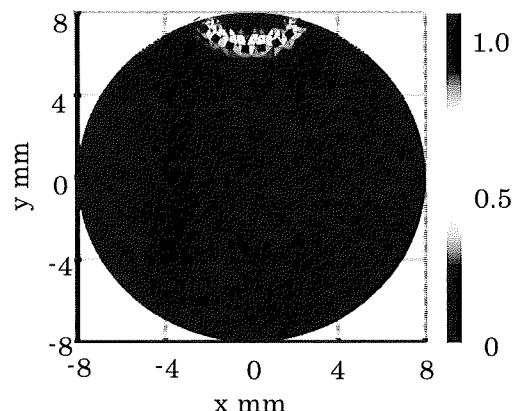


Fig.5 Magnetic dipole moment distribution by inverse analysis from simulated magnetic flux density

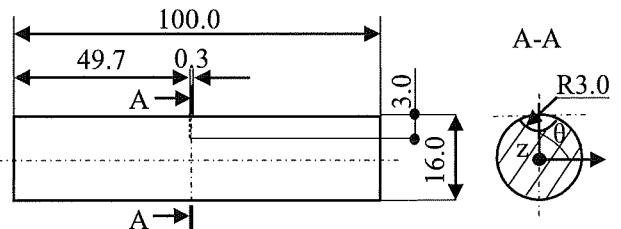


Fig.6 Shape and dimensions cylindrical specimen

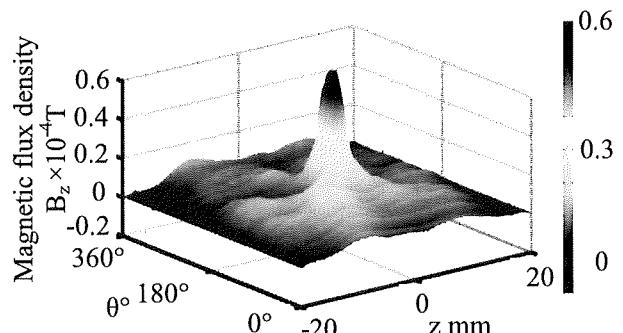


Fig.7 Changes in magnetic flux density B_z around defect for cylindrical specimen

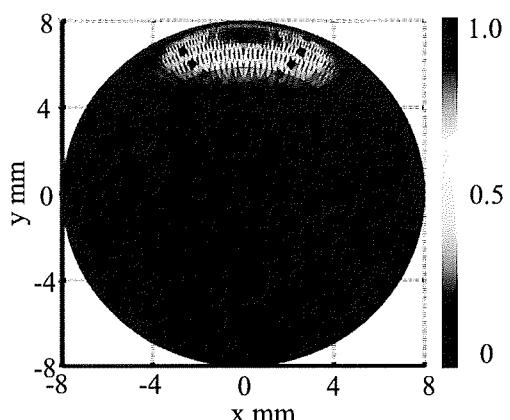


Fig.8 Magnetic dipole moment distribution by inverse analysis from measured magnetic flux density ($\alpha = 10$)