

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560097

研究課題名（和文） 先進磁気センサを用いた複雑形状き裂の非破壊評価・解析システムの構築

研究課題名（英文） Development of nondestructive evaluation and analysis system for complicated defects by using advanced magnetic sensors

研究代表者

鈴木 隆之（SUZUKI TAKAYUKI）

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・研究グループ長

研究者番号：40357299

研究成果の概要（和文）：

複雑形状き裂、欠陥の定量的な評価を行うために、フラックスゲートセンサのような先進磁気センサを用いて、様々な欠陥近傍の漏洩磁束密度分布の測定を行った。また、得られた漏洩磁束密度分布と欠陥に生じる磁荷、磁気双極子モーメントとの関係を定式化し、漏洩磁束密度分布から複雑形状欠陥の欠陥幅や欠陥断面形状を求める電磁逆解析を行った。さらに、先進磁気センサを用いた漏洩磁束密度測定と電磁逆解析とを統合することにより、複雑形状き裂、欠陥に適用可能な非破壊評価・解析システムを構築した。

研究成果の概要（英文）：

In order to establish quantitative nondestructive evaluation of complicated defects or cracks, magnetic flux leakage distribution around defects was measured using advanced magnetic sensor of fluxgate sensor. And the relationship between magnetic flux leakage distribution and magnetic dipole moment of defect was formulated. By using inverse analysis technique such as Tikhonov regularization, magnetic dipole moment could be obtained and the width, shape and size of complicated defects were evaluated. It was concluded that nondestructive evaluation and analysis system for complicated cracks or defects was constructed by using advanced magnetic sensor measurement and magnetic inverse analysis technique.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械材料・材料力学

キーワード：機械材料・材料力学、磁性、長寿命化、非破壊検査、欠陥

1. 研究開始当初の背景

近年、機器・構造物のき裂や欠陥等の損傷に起因する多くの重大事故が生じており、その安全性、信頼性に対する要求が高まってきている。また、環境保全の観点からも長期間に亘り、十分に安全性、信頼性を確保する高

精度の非破壊評価技術が求められてきている。

代表的な非破壊評価技術として、電磁気を用いた漏洩磁束法や渦流探傷法が挙げられる。これらの方法ではき裂や欠陥により生じる漏洩磁束や渦電流を磁気センサにより測

定する。形状が単純な貫通き裂であれば、その位置や寸法を測定結果より推定することが可能であり、すでに実施されてきている。しかしながら、実際の産業機器では、貫通き裂のみならず、製造過程中や使用過程中において表面き裂のような複雑形状き裂が生じる。これらの複雑形状き裂は、磁気センサの測定結果からだけでは形状、寸法を推定することは困難である。加えて、定量的な非破壊評価技術が十分には構築されてしていないため、最終的な破断の起点となる場合も多く、学術的な知見に基づく非破壊評価・解析システムの構築が早急に求められている背景にある。

2. 研究の目的

- (1) 表面き裂等の複雑形状き裂の定量的な評価を行うために、従来のホール素子等の磁気センサよりも高感度であるフラックスゲートセンサ (FG センサ) を用いて、様々な欠陥幅、断面形状の欠陥近傍の漏洩磁束密度を測定し、先進磁気センサを用いた高精度の非破壊評価技術を構築する。
- (2) 漏洩磁束密度分布から欠陥に生じる磁荷、磁気双極子モーメントを求める電磁逆解析を行い、複雑形状欠陥へ適用する。
- (3) これらの成果を統合し、複雑形状き裂の定量的評価が可能な「先進磁気センサを用いた複雑形状き裂の非破壊評価・解析システム」を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 先進磁気センサを用いた非破壊評価システム
整備・開発した非破壊評価システムは、磁気センサ、X-Y ステージ、コントローラー、パソコン等から構成されている。磁気センサは約 3x1mm の形状をしたフラックスゲートセンサ (FG センサ) であり、測定範囲は $\pm 5 \times 10^{-4} \text{T}$ 、分解能は $1 \times 10^{-7} \text{T}$ である。X-Y ステージにはレーザー変位計を装着することができ、試験片が所定の箇所に達したときに測定を開始することが可能である。
- (2) 試験材料、試験片
試験材料には、一般構造用圧延鋼材 SS400 を用いた。100.0x(20.0 ~ 35.0)x5.0mm 程度の板状に加工した後、放電加工により、様々な形状の欠陥を設けた。ネオジム磁石を用いて着磁した後、欠陥近傍の長手方向の残留磁束密度 B_y を測定した。

4. 研究成果

- (1) 欠陥幅の定量評価
欠陥幅近傍の漏洩磁束密度分布
図 1 のような試験片 (欠陥幅: 3.0mm) を用いて、リフトオフ 3.0mm にて漏洩磁束密度分

布 B_y を測定した結果を図 2 に示す。欠陥近傍において漏洩磁束密度の変化が明瞭に得られていることがわかる。

他の欠陥幅の試験片の測定結果も合わせて B_y より求めた半値幅と欠陥幅との関係を図 3 に示す。欠陥幅の増加に対応して、半値幅も増加していく傾向が確認できる。したがって、予めこの関係を取得しておくことにより、半値幅から欠陥幅を推定することが可能である。

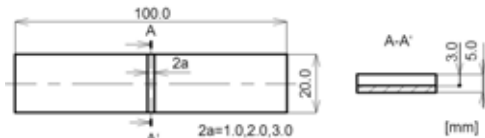


図 1 欠陥幅評価用の試験片形状 (SS400)

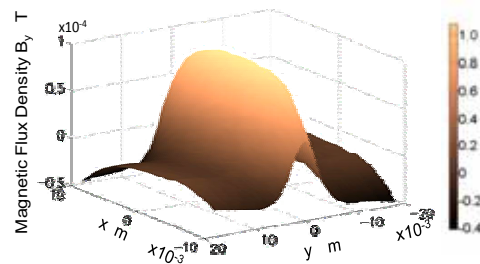


図 2 欠陥近傍の漏洩磁束密度分布 B_y (SS400、欠陥幅 3.0mm、リフトオフ 3.0mm)

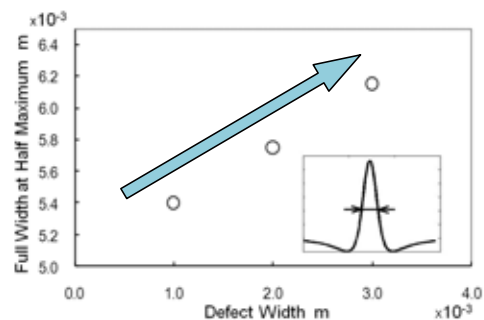


図 3 半値幅と欠陥幅との関係 (SS400、欠陥幅 1.0 ~ 3.0mm)

逆解析による欠陥幅の定量化

- (i) 漏洩磁束密度分布と磁荷との関係の定式化
より定量的に欠陥幅の評価を行うため、欠陥近傍の漏洩磁束密度分布と、着磁により欠陥に生じる磁荷との関係を定式化した。試験片上の磁荷分布を $m(x, y)$ 、長手方向の漏洩磁束密度分布を $B_y(x, y)$ 、試験片の各位置と原点との距離を $r'(x, y, z)$ とすると、測定点 $r(x, y, z)$ における磁束密度 $B_y(r)$ は、

$$B_y(r) = \int F(r - r')m(r')dr' \quad (1)$$

となる。F は応答関数であり、次式で表わされる。

$$F(r) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{y}{\{x^2 + y^2 + (z + u)^2\}^{3/2}} \quad (2)$$

ここで、 μ_0 は真空透磁率である。

(ii) Tikhonov の正則化法

(1)、(2)式を離散化すると、

$$[B_y] = [F][m] \quad (3)$$

となる。(3)式より、漏洩磁束密度分布 B_y から磁荷分布 m を求めることにより、欠陥幅を求めることができ、 m は

$$J_1 = \|Fm - B_y\|^2 \quad (4)$$

を最小とする解となる。

しかしながら、(4)式より求められる m は、測定データ B_y に含まれる誤差と F の性質により振動解となる場合が多い。解の振動を防ぎ、 F を適切化するために、Tikhonov の正則化法、特異値分解法、周波数領域法等が用いられる。ここでは、Tikhonov の正則化法を用いて(4)式を適切化した。具体的には(4)式の代わりに次式を最小とする m を求めた。

$$J_2 = \|Fm - B_y\|^2 + \alpha S[m] \quad (5)$$

ここで、 α は正則化パラメータ、 S は正則化項である。

$$S[m] = m^T [I]m \quad (6)$$

(5)、(6)式より m は次式のようになる。

$$m = (F^T F + \alpha I)^{-1} F^T B_y \quad (7)$$

(iii) 模擬欠陥を用いたシミュレーション

Tikhonov の正則化法を用いて、模擬欠陥を仮定したシミュレーションを行った。模擬欠陥のモデルは図 1 (欠陥幅 3.0mm)を用いた。欠陥幅の位置に磁荷を仮定し、リフトオフ 3.0mm における漏洩磁束密度を(1)、(2)式により求めるとともに、最大 5%のランダムな誤差を加え、図 4 のような欠陥近傍の模擬漏洩磁束密度分布を得た。

この模擬漏洩磁束密度分布に対し、(7)式を用いて逆解析を行った。正則化パラメータは $\alpha=1.0 \times 10^{-5}$ 、0.10、100 とした。それらの結果を図 5 に示す。(a)の $\alpha=1.0 \times 10^{-5}$ の場合には、磁荷の分布は極値が得られておらず、振動解となっている。また、(c)の $\alpha=100$ の場合には解が平滑化され、仮定した磁荷の分布とは傾向が異なっている。一方、(b)の $\alpha=0.10$ においては仮定した磁荷の分布のような極値が表れており、その位置は欠陥幅の端部と一致している。したがって、正確に正則化パラメータ α を決定することができれば、欠陥幅を求めることが可能である。

(iv) 正則化パラメータの選択

ここで、正則化パラメータの選択に L-curve 法の適用を検討した。(5)式の $\|Fm - B_y\|^2$ を横軸に $\|m\|^2$ を縦軸にとり、 α を $1.0 \times 10^{-9} \sim 100$ の範囲で 12 通りに変化させ L-curve を描いた結果を図 6 に示す。(iii)において適切な解が得られた $\alpha=0.10$ は図 6 の

L-curve の折れ曲がり点となっている。したがって、L-curve より適切な正則化パラメータ α を決定することが可能であり、それに基づき、欠陥近傍の磁荷分布、さらには欠陥幅を同定することができる。

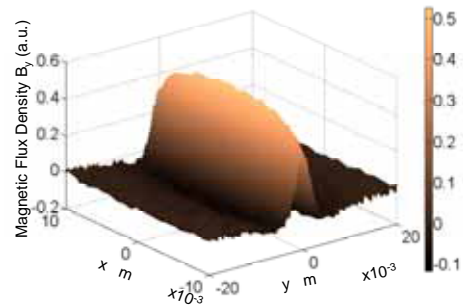
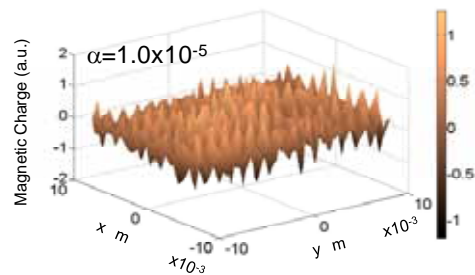
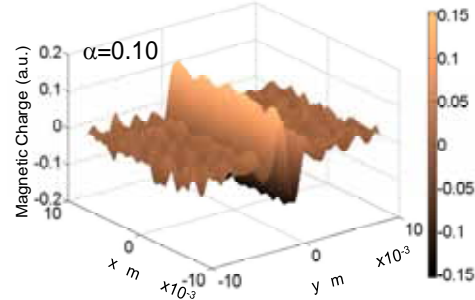


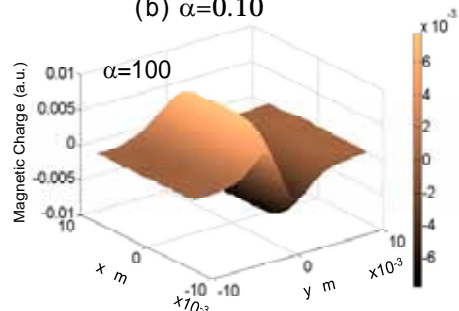
図 4 模擬漏洩磁束密度分布 (欠陥幅 3.0mm、リフトオフ 3.0mm)



(a) $\alpha=1.0 \times 10^{-5}$



(b) $\alpha=0.10$



(c) $\alpha=100$

図 5 Tikhonov の正則化法による磁荷分布の逆解析結果(欠陥幅 3.0mm、リフトオフ 3.0mm)

(v) 測定データを用いた逆解析

実際に図 2 の測定データを用いて、Tikhonov の正則化法、L-curve 法を用いて逆解析を行った。その際の正則化パラメータ α は $\alpha=0.01$ である。図 7 に逆解析結果(試験片

表面中央：x=0、z=0mm)を示す。おおよそ、欠陥幅に対応する位置に極値が存在している。したがって、本手法を用いることにより、実際の測定データから欠陥幅を同定することが可能であることが確認できた。

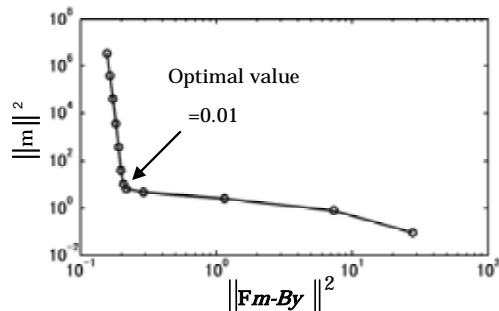


図6 正則化パラメータ α の L-curve に及ぼす影響

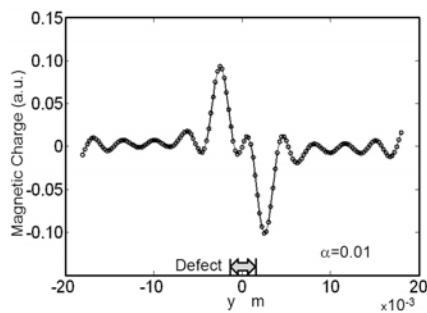


図7 漏洩磁束密度の測定データを用いた場合の逆解析結果 (SS400、欠陥幅 3.0mm、リフトオフ 3.0mm、 $\alpha=0.01$)

(2)欠陥断面形状の定量評価

表面欠陥近傍の漏洩磁束密度分布

表1、図8のような欠陥を対象に、様々な表面欠陥近傍の漏洩磁束密度分布の測定を行った結果を図9に示す。(a)の三角形断面形状の欠陥(Specimen 1)と(b)の四角形断面形状の欠陥(Specimen 2)の測定結果とを比較すると、いずれの場合も欠陥近傍で大きな変化が認められるが、欠陥断面が大きく着磁により磁気双極子モーメントが生じた面積が大きい(b)の方が大きな漏洩磁束密度が測定されていることがわかる。また、三角形断面形状である(a)の Specimen 1 と(c)の Specimen 3 とを比較すると、同様に欠陥断面が大きい Specimen 1の方が大きい。したがって、表面欠陥形状を反映して、漏洩磁束密度分布は差を生じる。しかしながら、漏洩磁束密度分布の測定からだけでは、定量的に欠陥寸法や形状を推定することは困難であることがわかる。

欠陥断面形状の定量評価

(i) 磁気双極子モーメントと漏洩磁束密度の定式化

図10には図9(a)で示した Specimen 1の測定面(z=3.0mm)における漏洩磁束密度分布 B_y

表1 表面欠陥の寸法、形状

Specimen No.	Length mm	Width mm	Depth mm	Cross Section Shape
Specimen 1	7.0	0.5	3.5	Triangle
Specimen 2	7.0	0.5	3.5	Rectangle
Specimen 3	7.0	0.5	2.0	Triangle

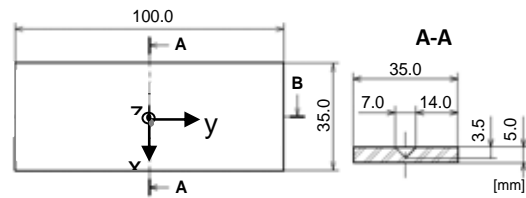
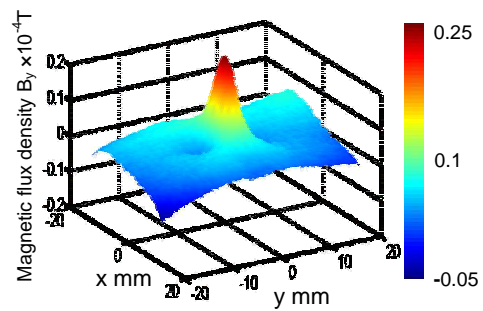
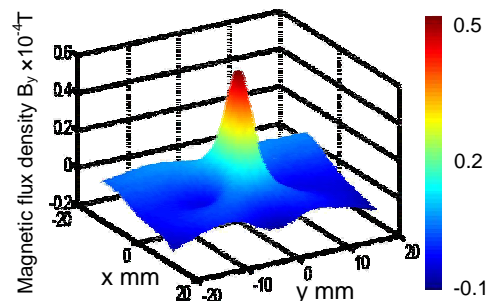


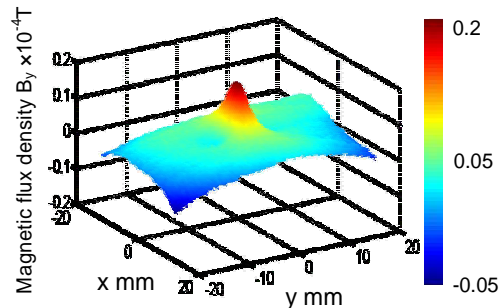
図8 欠陥断面形状評価用の試験片形状 (SS400)



(a) Specimen 1



(b) Specimen 2



(c) Specimen 3

図9 表面欠陥近傍の漏洩磁束密度分布 B_y の測定結果 (SS400、リフトオフ 3.0mm)

を示す。欠陥を有する断面である。y=0mmの面上でB_yは最大値を示している。他の試験片の場合においても同様に、欠陥を有する断面においてB_yは最大値を示した。したがって、漏洩磁束密度分布B_yを測定することにより、欠陥を有する断面を決定することができることがわかる。

次に、図11に示すように、漏洩磁束密度B_yと欠陥断面上の磁気双極子モーメントmとの関係を求める。試験片長手方向に着磁した場合、欠陥断面上の磁気双極子モーメントをm(x,y,z)、漏洩磁束密度B_y(x,y,z)、y=0mmの断面上の点をr'(x,y,z)、測定点をr(x,y,z)とすると、B_y(r)とm(x,y,z)との関係は、4. (i)と同様に(7)、(8)式のように表わすことができる。

$$B_y(r) = \int F(r-r')m(r')dr' \quad (8)$$

$$F(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\{x^2 - 2y^2 + z^2\}}{\{x^2 + y^2 + z^2\}^{5/2}} \quad (9)$$

(8)、(9)式を離散化し、磁気双極子モーメントmを求めることにより、欠陥断面形状を求めることができる。ここでは、4. (i)と同様にTikhonovの正則化法を用いるとともに、その正則化パラメータαの決定にはL-curve法を用いた。

(ii)漏洩磁束密度データを用いた解析

実際にFGセンサにより測定された漏洩磁束密度分布にTikhonovの手法およびL-Curve法を適用した。図9(a)、(b)で示したSpecimen 1、Specimen 2の欠陥近傍をFGセンサで測定した漏洩磁束密度分布を用いた。逆解析により求めた磁気双極子モーメント分布の結果を図12(a)、(b)にそれぞれ示す。実際の漏洩磁束密度分布には周辺の磁気ノイズの他にも様々な誤差を含むと思われるが、逆解析により求めた磁気双極子モーメント分布はそれぞれの試験片の欠陥断面形状と比較的良好一致した結果を得た。したがって、Tikhonovの正則化とL-Curve法を用いた逆解析は実際の測定データにおいても適用が可能であることがわかる。

(3)まとめ

以上のように、(1)、(2)に示すようにFGセンサのような高感度磁気センサを用いた漏洩磁束密度測定とTikhonovの正則化法、L-Curve法とを用いることにより、欠陥近傍の微小な漏洩磁束密度から欠陥幅や断面形状の定量的な評価・解析が可能であることがわかった。

このように、先進磁気センサを用いた漏洩磁束密度測定と電磁逆解析の結果とを統合することにより、複雑形状き裂、欠陥に適用可能な非破壊評価・解析システムを構築する

ことができた。

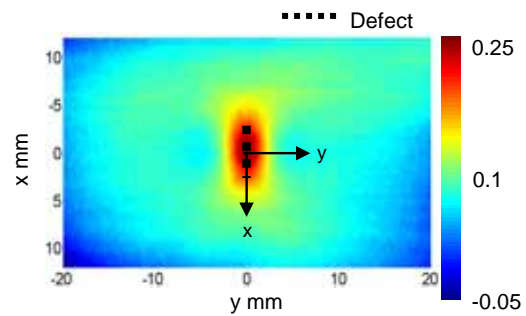


図10 欠陥近傍の漏洩磁束密度分布 (Specimen 1、z=3.0mm)

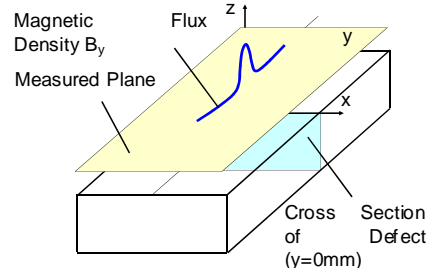
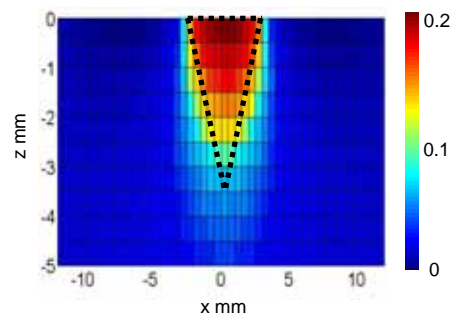
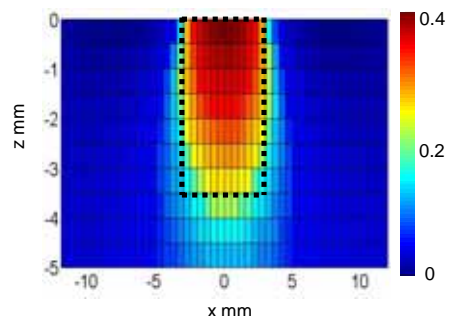


図11 漏洩磁束密度測定面と欠陥断面



(a) Specimen 1(α=0.25)



(b) Specimen 2(α=0.5)

図12 欠陥断面形状の電磁逆解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

鈴木隆之、蓮見清章、黒田匠、寺本徳郎、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、査読有、Vol.19、No.2、2011(掲載決定)

鈴木隆之、蓮見清章、黒田匠、寺本徳郎、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、第 19 回 MAGDA コンファレンス in 札幌 電磁現象および電磁力に関するコンファレンス講演論文集、査読無、2010、pp.245-250

鈴木隆之、高島尚之、笹本明、西村良弘、寺本徳郎、FG センサと特異値分解による逆解析を用いた欠陥評価、第 18 回茨城講演会講演論文集(日本機械学会関東支部) 査読無、100-2、2010、pp.175-176

鈴木隆之、黒田匠、笹本明、西村良弘、寺本徳郎、電磁気的手法を用いたエネルギー機器用構造材料の劣化損傷評価、日本保全学会第 7 回学術講演会要旨集、査読無、2010、pp.242-244

鈴木隆之、黒田匠、笹本明、西村良弘、寺本徳郎、フラックスゲートセンサを用いた SS400 の欠陥の定量評価、第 18 回 MAGDA コンファレンス in 東京 電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス講演論文集、査読無、2010、pp.264-267

鈴木隆之、黒田匠、寺本徳郎、フラックスゲートセンサを用いた磁性構造材料の欠陥幅の評価、日本機械学会関東支部ブロック合同講演会-2009 前橋-講演論文集、査読無、090-3、2009、pp.145~146

鈴木隆之、黒田匠、笹本明、西村良弘、寺本徳郎、FG センサを用いた磁性構造材料の欠陥形状の非破壊評価、茨城講演会(日本機械学会関東支部) 査読無、90-2、2009、pp.31-32

[学会発表](計 9 件)

鈴木隆之、蓮見清章、黒田匠、寺本徳郎、Tikhonov の正則化法を用いた電磁逆解析による複雑形状欠陥の解析・評価、TX テクノロジーショーケース in つくば 2011、平成 22 年 12 月 24 日、つくば国際会議場

鈴木隆之、蓮見清章、黒田匠、寺本徳郎、フラックスゲートセンサを用いた SS400 の欠陥段片形状の解析・評価、第 19 回 MAGDA コンファレンス in 札幌 電磁現象および電磁力に関するコンファレンス、平成 22 年 11 月 22 日、北海道大学

鈴木隆之、高島尚之、笹本明、西村良弘、寺本徳郎、FG センサと特異値分解による逆解析を用いた欠陥評価、平成 22 年 8 月 27 日、茨城大学

鈴木隆之、黒田匠、寺本徳郎、フラックスゲートセンサを用いた磁性構造材料の欠陥形状の評価、TX テクノロジーショーケース in つくば 2010、平成 22 年 1 月 22 日、筑波大学

鈴木隆之、黒田匠、笹本明、西村良弘、寺本徳郎、フラックスゲートセンサを用いた SS400 の欠陥の定量評価、第 18 回 MAGDA コンファレンス in 東京 電磁および電磁力に関するコンファレンス、平成 21 年 11 月 19 日、東京都市大学

黒田匠、鈴木隆之、寺本徳郎、Tikhonov の正則化法を用いた電磁逆解析による欠陥の評価、日本材料学会関東支部学生研究交流会、平成 21 年 10 月 17 日、東京理科大学

鈴木隆之、黒田匠、寺本徳郎、フラックスゲートセンサを用いた磁性構造材料の欠陥幅の評価、日本機械学会関東支部ブロック合同講演会 - 2009 前橋-、平成 21 年 9 月 26 日、群馬高専

鈴木隆之、黒田匠、笹本明、西村良弘、寺本徳郎、FG センサを用いた磁性構造材料の欠陥形状の非破壊評価、日本機械学会茨城講演会、平成 21 年 8 月 25 日、筑波大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 隆之 (SUZUKI TAKAYUKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・研究グループ長

研究者番号：40357299

(2) 研究分担者

西村 良弘 (NISHIMURA YOSHIHIRO)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員

研究者番号：90357723

笹本 明 (SASAMOTO AKIRA)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員

研究者番号：90357129