

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560889

研究課題名(和文) 立体形状をした強磁性体の高精度非破壊検査技術の開発と傷の定量的評価手法の検討

研究課題名(英文) Development of high performance NDE technique for ferromagnet of three dimensional shape and quantitative evaluation technique of crack shape

研究代表者

福岡 克弘 (Fukuoka, Katsuhiro)

滋賀県立大学・工学部・准教授

研究者番号：40512778

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)： 立体的な形状をした被検査対象物を高精度に非破壊検査する技術の確立を目的とし、磁粉探傷試験と渦電流探傷試験を組み合わせたハイブリッド電磁非破壊検査システムの確立を検討した。

具体的には、磁粉探傷試験と渦電流探傷試験において、立体的な形状の強磁性体を探傷するため、三次元空間に均一かつ簡単に磁界を発生できる回転磁界型磁化装置の開発を行った。渦電流探傷試験により極微小な傷を探傷可能とするため、高感度な渦電流プローブを開発し、その特性を評価した。磁粉探傷試験により得られた探傷結果から、傷形状を定量的に評価する手法の確立を目的に、傷の形状と付着磁粉量および傷からの漏洩磁束密度の関係について評価した。

研究成果の概要(英文)： The technique that inspected the ferromagnet of three dimensional shape in high accuracy was developed. The establishment of a hybrid electromagnetic nondestructive inspection system by the combination of the magnetic particle testing and the eddy current testing was considered. In addition, the technique for quantitatively evaluating the crack shape from flaw detection results was developed.

In this research, the development of the magnetizer that generated a uniform rotating field in the three dimensional space was attempted. The magnetization condition was considered by evaluating the distributions of the rotating magnetic flux density with FEM analysis. The eddy current testing probe that was able to detect a microcrack was developed. The technique for quantitatively evaluating the microcrack from the magnetic-particle pattern in the magnetic-particle testing was considered.

研究分野：電磁非破壊検査

キーワード：非破壊検査 磁粉探傷試験 渦電流探傷試験 定量的評価 回転磁界

1. 研究開始当初の背景

トラックのハブの破損により車輪が脱落し歩行者に直撃した死亡事故、遊戯施設の乗り物が車軸損傷により脱輪し乗客がフェンスに挟まれ死亡した事故、高速道路でトラックの車輪のボルトが折損しタイヤが対向車線のバスに直撃し運転手が死亡した事故など、我々の身近に存在する運輸機械に関する重大事故が数多く発生している。安心・安全な社会を実現するには運輸機械の構成部品(鉄鋼部品)を対象とした高精度な非破壊検査技術の開発は喫緊の課題である。運輸機械の構成部品には数多くの種類が存在し、立体的な3次元形状をしている場合が一般的であるため、その非破壊検査を難しくしている。しかし、立体的に複雑な形状をした箇所においては応力集中により傷が生じる可能性が高いため、立体形状部を精度よく非破壊検査する技術の確立は重要課題である。

2. 研究の目的

本研究では、立体的な形状をした被検査対象物(強磁性体)を、高精度に非破壊検査する技術の確立を目的とし、“磁粉探傷試験”と“渦電流探傷試験”を組み合わせたハイブリッド電磁非破壊検査システムの確立を検討した。

(1) 3次元回転磁界を発生する磁化器の開発

磁粉探傷試験では、傷に対して直角方向に磁化を与えた場合に傷部分での漏洩磁束が多くなり、磁粉模様が鮮明に現れる。試験対象物が平板や丸棒のようなシンプルな形状であれば、予測される傷の方向を考慮して、適切な磁化方法を選択し、磁化の方向をコントロールできるが、被検査材が立体的な3次元形状をしている場合、磁化方法を一意に決定することが困難となる。そこで本研究では、立体的な形状部を磁化するため、3次元立体空間に回転磁界を発生可能な磁化システムの開発を試みた。

(2) 磁粉探傷試験による傷形状の定量的評価

磁粉探傷試験では、強磁性体中の極微小な傷を検出することはできるが、探傷結果から傷の形状(傷の深、長さおよび幅)を定量的に評価する手法は未だ確立されていない。そこで本研究では、磁粉付着過程の動画像計測を行い、傷の形状と傷に付着する磁粉量の関係を明らかにした。また、傷からの漏洩磁束密度計測、および数値解析を行い、傷形状と傷からの漏洩磁束密度分布の関係を評価した。これらにより、磁粉探傷試験における傷の定量的評価手法の確立を検討した。

(3) 渦電流探傷試験での微小傷の高感度探傷

磁粉探傷試験において、自然傷のような複雑な傷の定量的評価を実現することは困難である。そこで、傷の定量的評価手法の確立が比較的進んでいる渦電流探傷試験についても検討した。本研究で対象としている被試

験材は、強磁性体である鉄鋼材である。そこで、強磁性体である試験鋼材を磁化し、磁気飽和状態での探傷を行うことで、高いS/Nの探傷信号が得られる渦電流探傷試験システムを検討した。また、一般的に渦電流探傷試験において対象となる傷は、磁粉探傷試験よりも大きな傷である。したがって、磁粉探傷試験で検出可能な微小傷をも渦電流探傷試験で検出可能とするためには、渦電流探傷プローブの感度向上が必須である。そこで、傷深さ数十 μm 程度の微小傷を探傷可能な高感度プローブの開発を検討した。

3. 研究の方法

(1) 3次元回転磁界を発生する磁化器の開発

立体的な形状の強磁性体を磁化するため、3次元方向に回転磁界を発生する磁化装置の開発を検討した。図1のように、3極コイル型磁化器を2台対向させ、磁化器間に3次元回転磁界を発生させる。この解析モデルにおいて、有限要素法解析を実施し、両磁化器間に設置した試験鋼材の各面における回転磁束密度分布を評価した。3極コイル型磁化器の各コイル(R, S, T)の巻き回数は270で、3つの各コイルには $8.06\text{A}_{0\text{-peak}}$ の3相正弦波電流を印加する。周波数は50Hzとし、各コイルの励磁電流の位相差は 120° とした。

(2) 磁粉探傷試験による傷形状の定量的評価

① 付着磁粉量の動画像計測

傷の形状と付着磁粉量の関係を明らかにするため、傷に磁粉が付着する過程を動画像計測した。動画像計測は高速度ビデオカメラ(キーエンス:VW-6000)を用いた。試験鋼材は、冷間圧延鋼板SPCC(300mm \times 400mm \times 1mm)の表面に、放電加工により傷を加工した。傷の長さを6mm、幅を $100\mu\text{m}$ 一定とし、深さをパラメータにした8体の試験体を作製し、傷深さと付着磁粉量の関係を評価した。傷に付着する磁粉を上面と側面からそれぞれ観察し、磁粉の幅と高さを計測することで、付着磁粉量を評価した。

② 漏洩磁束密度分布の評価

磁粉探傷試験において、磁粉は傷からの漏洩磁束による磁気力(吸引力)を起因として、傷周辺部に付着する。この磁気力は、漏洩磁束密度の強度および分布(傾き)により決定

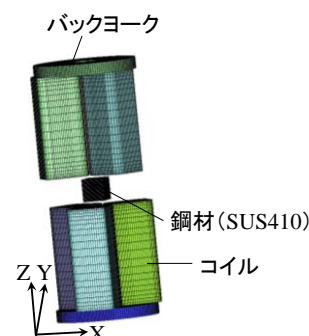


図1 数値解析モデル

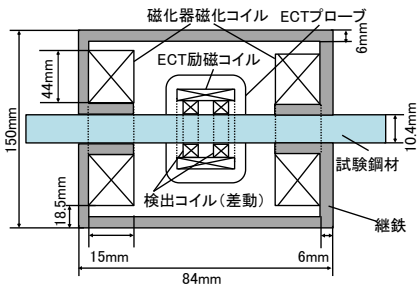


図2 磁気飽和型 ECT システム

されるため、傷の形状によりそれらが変化すると、付着磁粉量も変化する。そこで、傷周辺部における漏洩磁束密度の3方向成分 (B_x , B_y , B_z) の評価を試みた。

傷からの漏洩磁束密度の3方向成分をホール素子により計測したが、プローブの構成上、水平方向を測定するホール素子を鋼板表面近傍に配置することは難しく、微小傷からの微量な漏洩磁束密度 (水平方向成分: B_x , B_y) を計測することは困難であった。そこで、有限要素法を用いた数値解析により、微量な漏洩磁束密度の強度と分布を、詳細に評価することを検討した。これらの結果より、傷に付着する磁粉量と漏洩磁束密度の関係を明らかにした。

(3) 渦電流探傷試験での微小傷の高感度探傷

図2に、ばね鋼材を検査対象とした磁気飽和型渦電流探傷試験 (ECT: Eddy Current Testing) システムを示す。探傷システムは磁化器の2個の磁化励磁コイルが ECT プローブを挟む形で構成されている。磁化コイルに流す電流は直流とし、直流磁化した。

ECT プローブは、相互誘導形の貫通プローブを採用した。励磁コイルの形状は、検出コイルの位置する箇所において一様な方向に均一な渦電流を流すために、検出コイルに対して十分に大きく設計した。

4. 研究成果

(1) 3次元回転磁界を発生する磁化器の開発

対向する磁化器の配置条件を変化させ、試験体各面における回転磁束密度分布を比較評価した。2個の磁化器の R,S,T 相の各コイルをお互いに対向させて配置し、コイルに流す電流の位相を逆位相としたときの配置を 0° とし、片方の磁化器の配置角度を $60^\circ \sim 300^\circ$ 右に回転させた。この両磁化器の間に立体形状 (立方体) をした試験体 (SUS410) を配置し、試験体各面における回転磁束密度分布を評価した。試験体の XY, YZ, ZX 各面における磁束密度のコンター図 (配置角度: $0, 60, 180^\circ$) と、各面の中心位置における磁束密度のリサージュ曲線の解析結果を図3に示す。XY 面に着目すると、各磁極の配置角度において回転磁束密度が得られるが、その強度は磁極の配置角度で異なる。一方、YZ 面および ZX 面における磁束密度は、回転磁束密度は得られず、一方向の磁束密度分布と

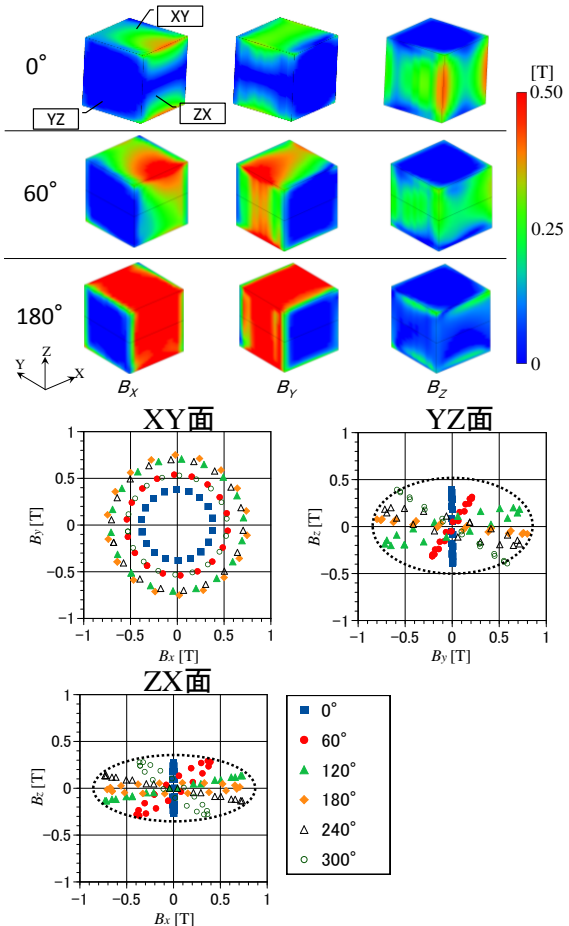


図3 試験体各面における回転磁束密度分布

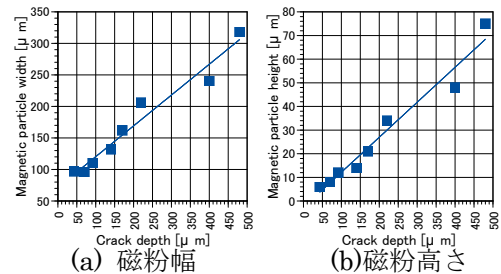


図4 傷深さと付着磁粉量の関係

なることが判る。しかし、磁極の配置角度を変えると、磁束の分布する角度が変わる。つまり、探傷試験実施中 (磁粉を適用中) に片方の磁化器の配置を回転させることで、X,Y,Z の全方向を探傷可能な磁粉探傷試験システムを実現できることを確認した。

(2) 磁粉探傷試験による傷形状の定量的評価

① 付着磁粉量の動画像計測

磁粉探傷試験の検査液の流れが止まった後の 20 秒時点において、傷深さと付着磁粉量 (磁粉の幅と高さ) の関係を評価した結果を図4に示す。傷が深くなると、磁粉の幅と高さはともに比例関係で増加することが判る。そこで、傷深さを D 、磁粉幅を W 、磁粉高さを H とし、傷深さと付着磁粉量の関係式を求めた。傷深さと磁粉幅の関係は $D=1.9W-132$ となり、傷深さと磁粉高さの関係は $D=6.5H+25$ と表せる。この両式をまとめる

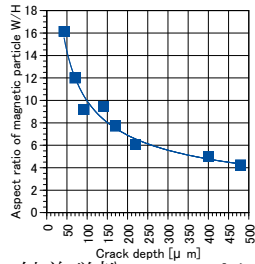


図5 付着磁粉のアスペクト比

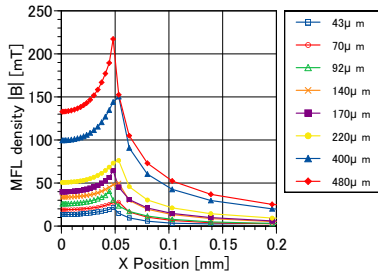


図6 傷からの漏洩磁束密度の絶対値

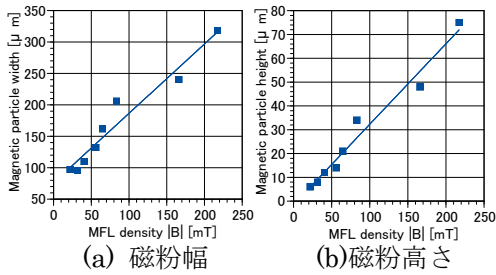


図7 漏洩磁束密度の強度と付着磁粉量

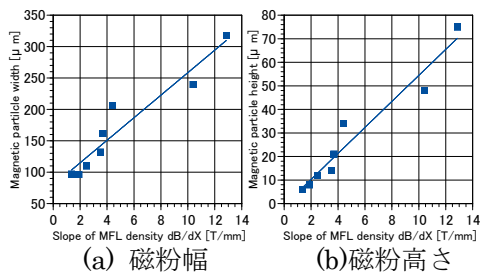


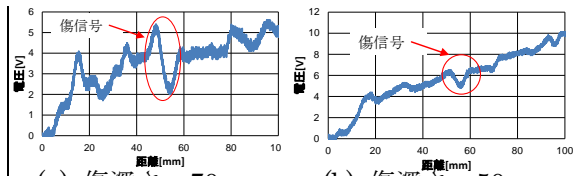
図8 漏洩磁束密度の傾きと付着磁粉量

と $D = \{(1.9W - 132) + (6.5H + 25)\} \div 2$ となり、磁粉の幅と高さの測定値から、傷の深さを推定することができる。

各傷における付着磁粉の幅と高さの割合 W/H (アスペクト比と呼ぶ) を図5に示す。傷の深さにより、アスペクト比が異なることが判る。つまり、浅い傷では磁粉は低く付着し、傷が深くなるほど高さ方向に付着する磁粉の割合が増えることが確認される。

② 漏洩磁束密度分布の評価

傷の深さを 43, 70, 92, 140, 170, 220, 400, 480 μm と変化させ解析した漏洩磁束密度の線分布を、図6に示す。ここで示す漏洩磁束密度は、 B_x , B_y , B_z の3方向成分の絶対値 $|B|$ である。鋼板直上のリフトオフ 5 μm を評価位置とした。この分布から $|B|$ のピーク値を読み取り、漏洩磁束密度の強度と付着磁粉量との関係を考察し図7に示す。また、磁粉が傷に付着する際の磁気力は、漏洩磁束密度の



(a) 傷深さ: 70 μm (b) 傷深さ: 50 μm

図9 渦電流探傷試験結果

強度に加え、その傾きにも影響を受ける。そこで、図6の $|B|$ の線分布から傾きを求め、付着磁粉量との関係を評価した結果を図8に示す。漏洩磁束密度の傾きは、最も急峻な傾きとなるピーク値の右側近傍で評価した。傷が深くなると、漏洩磁束密度の強度と傾きは、図6に示すように増加し(比例)、磁粉に働く磁気力が増える。そのため、漏洩磁束密度の強度および傾きと、付着磁粉量は比例する(図7,8)。よって、前述の傷深さと付着磁粉量が比例する結果の妥当性が確認される。

(3) 渦電流探傷試験での微小傷の高感度探傷

数値解析および試験鋼材(SUP190、焼き入れ材)内部の磁束を計測することにより、試験鋼材内部の磁化状態を詳細に把握した。さらに、検出コイルのインダクタンスの変化率を評価することで、試験鋼材に適用する最適な磁化の励磁電流値を決定した。これらの評価により得られた最適な磁化条件で、試験体を磁化した際の渦電流探傷試験結果を図9に示す。この結果より、傷深さ 70 μm の微小傷を、S/N比が2.5以上で渦電流探傷可能であることが確認された。しかし、深さ 50 μm の傷ではS/N比が1.1程度であり、十分な感度で探傷できているとは言えなかった。本研究では検出コイルを貫通コイルとしたが、今後パンケーキコイルに変更する、探傷周波数を高くする、ECTプローブの励磁電流を上げること等により、更なるプローブの感度向上を検討する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9件)

① 福岡克弘、川越一平、尾崎智裕、岩田成弘、桑田昌彦、及川芳朗、広範囲に均一な回転磁界を発生する磁粉探傷磁化器の開発、日本AEM学会誌、査読有、Vol. 23, No. 1、2015、118-124

② 福岡克弘、小林正樹、尾崎智裕、及川芳朗、立体形状をした試験体の全方向傷の探傷が可能な磁粉探傷用磁化器の検討、電気学会、マグネティックス研究会、資料番号(MAG-15-26)、査読無、2015、69-73

③ 福岡克弘、川越一平、磁粉探傷試験におけるき裂の定量的評価に向けた付着磁粉の動画像計測と漏洩磁束密度の評価、日本AEM学会誌、査読有、Vol. 22, No. 2、2014、176-182
DOI :10.14243/jsaem.22.176

- ④ N. Kasai, A. Takada and K. Fukuoka, Analytical study of a standard test shim for yoke method of magnetic particle testing, The Fifth US-Japan NDT Symposium Paper Summaries, 査読無、2014、92-96
- ⑤ 福岡克弘、川越一平、尾崎智裕、岩田成弘、糸田昌彦、及川芳朗、全方向き裂の磁粉探傷試験を目的としたマルチコイル型磁化器の開発、電気学会、マグネティックス研究会、資料番号(MAG-14-045)、査読無、2014、85-90
- ⑥ K. Fukuoka and I. Kawagoe, Evaluation of Magnetic Particle Amount and Leakage Flux Density for Quantitative Evaluation of Crack Shape in Magnetic Particle Testing, Abstract Book of the 16th edition of the International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (proc. of ISEM2013)、査読無、2013、263-264
- ⑦ 福岡克弘、回転磁界を用いた磁粉探傷試験による非破壊検査、静電気学会誌、査読無、Vol. 37, No. 5、2013、79-84
- ⑧ K. Fukuoka and M. Hashimoto, Flaw detection in three-dimensional shape portion using uniform eddy current multiprobe, *Int. J. of Appl. Electromagn. Mech.*、査読有、Vol. 39, No. 1-4、2012、311-317
DOI :10.3233/JAE-2012-1476
- ⑨ 福岡克弘、櫻木健太、強磁性鋼材中の微小き裂探傷用渦電流プローブの開発、電気学会、マグネティックス研究会、資料番号(MAG-12-095)、査読無、2012、73-77

[学会発表] (計 25 件)

- ① 福岡克弘、川越一平、野間翔太、小林正樹、尾崎智裕、及川芳朗、「立体形状試験体の全面で全方向傷の磁粉探傷試験が可能な磁化システムの開発」、第 27 回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム、pp. 197-198 (2015)
- ② 八木俊文、福岡克弘、作田健、「SQUID 検査システムのための感度補正に関する検討」、電気学会、平成 27 年電気学会全国大会、No. 2、p. 149 (2015)
- ③ 堀池翔、福岡克弘、作田健、「回転磁界を用いた極間法における磁束の鋼板表面への拡がりや裏面への回り込み評価」、日本非破壊検査協会、第 18 回表面探傷シンポジウム、pp. 7-10 (2015)
- ④ 野間翔太、福岡克弘、作田健、小林正樹、尾崎智裕、及川芳朗、「立体形状試験体の全面および全方向磁化の検討」、日本非破壊検査協会、第 18 回表面探傷シンポジウム、pp. 1-4 (2015)
- ⑤ 福岡克弘、「3D 空間に回転磁界の生じる磁粉探傷用磁化器の検討」、日本 AEM 学会、第 23 回 MAGDA コンファレンス、pp. 169-172 (2014)
- ⑥ 福岡克弘、川越一平、尾崎智裕、岩田成弘、糸田昌彦、及川芳朗、「広範囲に均一な回転磁界を発生する磁粉探傷磁化器の開発」、第

- 26 回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム、pp. 424-429 (2014)
- ⑦ 福岡克弘、川越一平、尾崎智裕、岩田成弘、糸田昌彦、及川芳朗、「全方向き裂が探傷可能な回転磁界型磁粉探傷磁化器の検討」、電気学会、平成 26 年電気学会全国大会、No. 2、p. 155 (2014)
- ⑧ 福岡克弘、川越一平、「磁粉探傷試験におけるき裂の定量的評価に向けた付着磁粉の動画像計測と漏洩磁束密度の評価」、日本 AEM 学会、第 22 回 MAGDA コンファレンス、pp. 185-190 (2013)
- ⑨ 川越一平、福岡克弘、及川芳朗、糸田昌彦、岩田成弘、尾崎智裕、「励磁コイルをマルチにした磁粉探傷装置による均一な回転磁界の発生」、日本非破壊検査協会、平成 25 年度秋季講演大会、pp. 103-104 (2013)
- ⑩ 福岡克弘、川越一平、作田健、「磁粉探傷試験の各種磁化法における磁束および電流分布の評価」、日本非破壊検査協会、平成 25 年度第 2 回表面 3 部門合同研究集会、pp. 27-30 (2013)
- ⑪ 木村慎太郎、福岡克弘、作田健、「磁気による微小欠陥検出における 1 入力のアクティブノイズコントロールシステムの検討」、電気学会、平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会、pp. 1907-1908 (2013)
- ⑫ 櫻木健太、福岡克弘、作田健、「ECT 信号を用いた強磁性体の材料判別」、日本非破壊検査協会、平成 25 年度第 1 回表面 3 部門合同研究集会、pp. 17-20 (2013)
- ⑬ 福岡克弘、川越一平、「磁粉探傷試験での傷形状に対する磁粉付着量および漏洩磁束密度の関係評価」、第 25 回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム、pp. 242-243 (2013)
- ⑭ 櫻木健太、福岡克弘、作田健、「ECT による強磁性材料中の微小欠陥の検出」、日本非破壊検査協会、第 16 回表面探傷シンポジウム、pp. 89-94 (2013)
- ⑮ 川越一平、福岡克弘、作田健、「磁粉探傷試験におけるき裂形状をパラメータにした磁粉付着量の計測と漏洩磁束密度の評価」、日本非破壊検査協会、第 16 回表面探傷シンポジウム、pp. 63-68 (2013)
- ⑯ 川越一平、福岡克弘、及川芳朗、糸田昌彦、岩田成弘、尾崎智裕、「回転磁界型磁粉探傷磁化器のヨーク分割による均一な回転磁界の発生」、日本 AEM 学会、第 21 回 MAGDA コンファレンス、pp. 489-492 (2012)
- ⑰ 櫻木健太、福岡克弘、「渦電流探傷試験を用いた強磁性鋼材中における微小き裂の検出」、日本 AEM 学会、第 21 回 MAGDA コンファレンス、pp. 419-422 (2012)
- ⑱ 福岡克弘、櫻木健太、「差動貫通コイルを用いたばね鋼材の渦電流探傷」、日本非破壊検査協会、平成 24 年度第 2 回表面 3 部門合同研究集会、pp. 23-27 (2012)
- ⑲ 川越一平、福岡克弘、及川芳朗、糸田昌彦、岩田成弘、尾崎智裕、「回転磁界型磁粉探傷装置における発生回転磁界範囲の拡大」、日

本非破壊検査協会、平成 24 年度秋季講演大会、pp. 167-168 (2012)

⑳福岡克弘、川越一平、「磁粉探傷試験におけるき裂定量評価の検討」、電気学会、平成 24 年基礎・材料・共通部門大会、p. 231 (2012)

㉑櫻木健太、福岡克弘、作田健、宝田隼、「渦電流探傷試験を用いたばね鋼材中の微小き裂検出の検討」、電気学会、平成 24 年基礎・材料・共通部門大会、p. 230 (2012)

㉒福岡克弘、川越一平、及川芳朗、桑田昌彦、岩田成弘、尾崎智裕、「回転磁界型磁粉探傷磁化器におけるヨーク分割の検討」、日本非破壊検査協会、平成 24 年度第 1 回表面 3 部門合同研究集会、pp. 19-24 (2012)

㉓川越一平、福岡克弘、作田健、「磁粉探傷試験における欠陥形状の定量的評価手法の検討」、日本非破壊検査協会、平成 24 年度春季講演大会、pp. 65-66 (2012)

㉔櫻木健太、福岡克弘、作田健、「渦電流探傷試験によるばね鋼材の微小き裂検出に関する研究」、日本非破壊検査協会、平成 24 年度春季講演大会、pp. 61-62 (2012)

㉕福岡克弘、櫻木健太、「ばね鋼材の微小き裂に対する渦電流探傷試験の検討」、第 24 回電磁力関連のダイナミックシンポジウム、pp. 273-276 (2012)

〔図書〕(計 1 件)

①福岡克弘、共立出版、現代講座・磁気工学・5 巻、2015、300

〔産業財産権〕

○出願状況(計 3 件)

名称：被検査体の磁化装置の調整方法

発明者：福岡克弘、及川芳朗、桑田昌彦、赤松里志

権利者：電子磁気工業(株)

種類：特許

番号：特願 2013-127879

出願年月日：2013 年 6 月 18 日

国内外の別：国内

名称：マルチヨーク型磁化器

発明者：福岡克弘、及川芳朗、桑田昌彦、岩田成弘、尾崎智裕

権利者：電子磁気工業(株)

種類：特許

番号：特願 2012-205512

出願年月日：2012 年 9 月 19 日

国内外の別：国内

名称：被検査体の磁化方法、被検査体の磁化装置、磁粉探傷装置

発明者：福岡克弘、及川芳朗、桑田昌彦、岩田成弘、尾崎智裕

権利者：電子磁気工業(株)

種類：特許

番号：特願 2013-217507

出願年月日：2013 年 10 月 26 日

国内外の別：国内

○取得状況(計 3 件)

名称：被検査体の磁化装置、磁粉探傷装置、被検査体の磁化装置の調整方法

発明者：福岡克弘、及川芳朗、桑田昌彦、赤松里志

権利者：電子磁気工業(株)

種類：特許

番号：特許 5403828

出願年月日：2011 年 3 月 22 日

取得年月日：2013 年 11 月 8 日

国内外の別：国内

名称：分割型ヨーク磁化器

発明者：福岡克弘、及川芳朗、桑田昌彦

権利者：電子磁気工業(株)

種類：特許

番号：特許 5401528

出願年月日：2011 年 11 月 21 日

取得年月日：2013 年 11 月 1 日

国内外の別：国内

名称：被検査体の磁化装置の調整方法

発明者：福岡克弘、及川芳朗、桑田昌彦、赤松里志

権利者：電子磁気工業(株)

種類：特許

番号：特許 5465803

出願年月日：2013 年 6 月 18 日

取得年月日：2014 年 01 月 31 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

http://db.spins.usp.ac.jp/html/233_ja.html?k=%E7%A6%8F%E5%B2%A1+%E5%85%8B%E5%BC%98

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福岡 克弘 (FUKUOKA Katsuhiko)

滋賀県立大学・工学部・准教授

研究者番号：40512778

(2) 連携研究者

高木 敏行 (TAKAGI Toshiyuki)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：20197065

小島 史男 (KOJIMA Fumio)

神戸大学・システム情報科学研究科・教授

研究者番号：70234763

相山 英明 (AIYAMA Hideaki)

地方独立行政法人北海道立総合研究機構・産業技術研究本部・研究員

研究者番号：90503003

(3) 研究協力者

橋本 光男 (HASHIMOTO Mitsuo)