

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 26 日現在

機関番号：24201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：平成 21 年度 ～ 平成 23 年度

課題番号：21760590

研究課題名（和文） 磁粉探傷試験の磁粉模様から微小欠陥のサイジングが可能な高精度非破壊検査手法の開発

研究課題名（英文） Development of quantitative evaluation technique of microcrack from magnetic-particle pattern in magnetic-particle testing

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

研究成果の概要（和文）：

近年、トラックのハブの破損により車輪が脱落し母子が死亡した事故、遊園地のジェットコースターにおける車軸損傷による乗客死亡事故など、日常生活における安全・安心が脅かされるような重大事故が発生している。このような重大事故の発生を未然に防ぐため、欠陥を高精度に探傷・評価する技術を確立することは、我が国はもとより世界的にも緊急の課題となっている。本研究では、磁粉探傷試験で得られた探傷結果から、欠陥形状を正確にサイジングする手法の開発を行った。これにより、欠陥の危険度を判定し、重大事故の発生を未然に防ぐことのできる高精度磁粉探傷試験システムの確立を目的とした。

研究成果の概要（英文）：

Serious accidents from which safety and security are threatened in daily life are generated. It is necessary to develop the high-precision non-destructive inspection technique to forestall the serious accidents being generated. The technique for quantitatively evaluating the microcrack from the magnetic-particle pattern in the magnetic-particle testing was developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：非破壊検査、電気計測、電磁気学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：磁粉探傷試験、非破壊検査、欠陥サイジング、定量評価

1. 研究開始当初の背景

工業製品や構造物を使用するうえでは、応力や疲労など種々の要因によって欠陥が生じる可能性がある。そこで、欠陥を非破壊的に検査する各種技術が考案され、実際の現場において検査診断が実施されている。さらに、非破壊検査試験においては、欠陥を検出できることはもとより、欠陥が検出された場合、その欠陥が構造強度に影響するものかどうか

かを判断するため、欠陥形状を正確にサイジング（欠陥形状の三次元的な推定）する技術の確立が、近年における重要な研究課題になっている。

非破壊検査手法の一つである磁粉探傷試験は、微小な欠陥をも検出することができるため、現在多種多様な実現場において広く採用されている。本研究では、磁粉探傷試験で得られた探傷結果から、欠陥形状を正確にサ

イジングする手法の開発を検討した。これにより、欠陥の危険度を判定し、重大事故の発生を未然に防ぐことのできる次世代の高精度な磁粉探傷試験システムの確立を目指した。

2. 研究の目的

被検査鋼材に磁界を加え磁化したとき、鋼材に割れやブローホールなどの欠陥が存在すると、磁束は欠陥を迂回して分布する。これにより一部の磁束は欠陥部から外部空間に漏洩する。ここに磁粉（鉄粉）液を散布すると、漏洩磁束により磁粉が磁化し、欠陥部に生じた磁極に磁粉が付着し、磁粉模様形成される。磁粉探傷試験ではこの磁粉模様を観察することにより欠陥の有無を判別する。また、磁粉模様は欠陥の幅より広い範囲に形成されるため、肉眼で観測できない非常に微小な欠陥をも発見することができる。しかし、現在の磁粉探傷試験では、欠陥の有無の判別と欠陥の大きな二次元分布を把握することに留まっており、欠陥のサイジングを行い、欠陥形状および深さに関して三次元的に詳細に把握する手法は確立されていないのが現状である。

非破壊検査により検出された欠陥が、構造上において問題があるのかどうかを確実に判断するためには、欠陥の形状、深さ、幅に関して三次元的な詳細情報を得ることが必要不可欠である。そこで本研究では、次の内容について検討した。

(1) 漏洩磁束密度の計測と磁粉模様を画像処理することにより、漏洩磁束密度と磁粉模様の相関を明らかにする。

(2) 欠陥形状をパラメータにした有限要素法解析を行い、欠陥形状と漏洩磁束密度の相関を明らかにする。

この (1) と (2) の結果を統合して、磁粉模様から欠陥形状を正確的にサイジングする手法を確立し、重大事故の発生を未然に防ぐことのできる次世代の高精度な磁粉探傷試験システムの開発を目的とした。

3. 研究の方法

磁粉探傷試験の結果から欠陥形状を三次元的にサイジングする手法を開発し、被検査鋼材に欠陥が含まれる場合は、それを使用し続けるのに耐え得るかどうかの判断も可能な欠陥サイジング手法の開発を検討した。本研究における研究内容の全体構成図を図1に示す。

(1) 高速度カメラによる磁粉付着過程の動画像計測

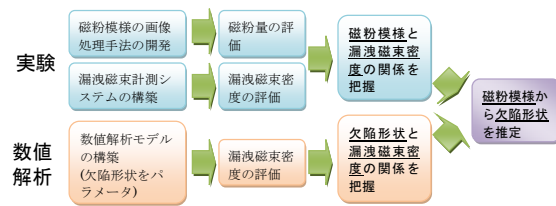


図1 研究内容のフローチャート



図2 試験鋼材の設置



図3 極間型磁化器の配置

高速度カメラを用いて欠陥周辺部に付着していく磁粉の動画像計測を行った。動画像計測システムは、動き解析マイクロSCOPE（キーエンス：VW-6000）、長距離高性能ズームレンズ（キーエンス：VH-Z50L、50-500倍）から構成されている。本報告書では、鉄鋼材 SPCC（熱処理なし、300mm×400mm×1mm^φ）に A 形標準試験片（A1 30/50、15/100、60/100）を貼り付け被試験体とした結果について示す。A 形標準試験片は、欠陥が付いた面を SPCC 側（欠陥面を裏面）にしてメンディングテープを用いて固定した。図2に示すように、傾斜角度 20° のスロープ上に試験鋼

材をネジにより固定し、チュービングポンプ（アズワン：RPU-1）を用いて磁粉液を適用



図4 側面観測用レンズアダプタ

することにより、磁粉液の流量と流速を一定にした。その際の流量は約 100ml/min、流速は 0.1~0.2m/s（動画像での気泡の流速により計測）であった。使用した磁粉液は、粒度 1~3 μm の非蛍光磁粉（黒色磁粉）で、磁粉濃度は 2g/l として水に分散した。

磁粉探傷試験法は極間法で、磁化器は電子磁気工業製 Um-5BF を使用した。電源は直接コンセントから取り商用電圧 100V とした。試験鋼材の直上にカメラを設置するため、図3のように磁化器ヨークに 45° 交換脚を取り付け、磁化器を試験鋼材上面に寝かせた状態にて実験を行った。A 形標準試験片が磁化器ヨーク脚の中間部に位置するように磁化器を配置した。動画像計測は、欠陥の直上に高速度カメラを設置して磁粉付着部分の上面と側面から観察を行った。側面観測では、図4の側面観測用のレンズアダプタを設計・製作し、ミラーにより映像を反射させることで撮影した。上面観測より磁粉の幅、側面観測より磁粉の高さを評価した。

(2) 有限要素法を用いた磁束密度分布の数値解析

欠陥の幅と深さをそれぞれパラメータ（幅：10~100 μm 、深さ：50~500 μm 、長さ：6mm 一定）にした数値解析モデルを製作し、漏洩磁束密度と欠陥形状の相関を明らかにした。本報告書では、解析での欠陥は A 形標準試験片ではなく、試験鋼材に直接欠陥を設けたモデルでの結果を示す。欠陥は磁化器両脚の中間部に作製した。対象とした鉄鋼材料は、SPCC（熱処理なし）である。鋼材および磁化器ヨーク材の B-H 曲線を考慮し、周波数応答解析を行った。SPCC の導電率は 6 $\times 10^6\text{S/m}$ とした。磁化器コイルに供給する電流は、周波数 60Hz、実効値 3.3A の交流と

した。磁化器と試験鋼材との間には、その接触状況を考慮して 0.1mm のギャップを設けた。解析モデルは 1/4 形状のモデルとした。

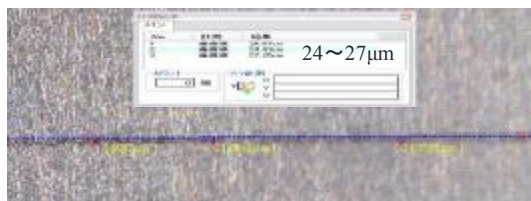
(3) 欠陥からの漏洩磁束密度の計測

試験鋼板欠陥部からの漏洩磁束密度を、テスラメータ（電子磁気工業：GM-5307）を用いて計測した。テスラメータで使用するホール素子プローブは、試験鋼材表面にできる限り近い位置での磁束密度が計測できるように、ホール素子の配置とプローブの形状を決定して製作した。漏洩磁束密度は x,y,z 方向の 3 方向成分を計測した。

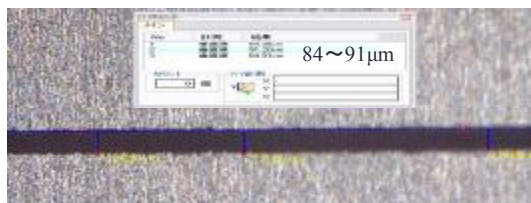
4. 研究成果

(1) 高速度カメラによる磁粉付着過程の動画像計測

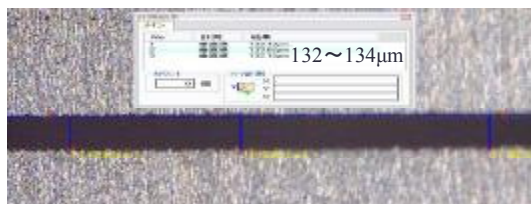
本報告書の紙面では、動画像を示すことができないため、代表的な測定時点における静止画像を抽出して結果を示す。図5は、磁化器から磁界を発生させた後、試験体に磁粉液を適用した際、A 形標準試験片に付着する磁粉模様の時間変化を撮影した画像である。これらは、欠陥の上面から欠陥中央部をズーム撮影した画像である。レンズの倍率は 30 倍、カメラのシャッタースピードは 1/2000 秒、フレームレートは 500fps とした。(a)の磁粉適用直後においては約 25 μm の幅で磁粉が付着する（この時間を 0sec とする）。時間の経過と共に、磁粉模様が太くなる様子が観測される。9 秒後に磁粉の適用を止め、その時の磁粉の付着幅は約 130 μm である。走査型電子顕微鏡 SEM（キーエンス：VE-9800）



(a) 電源投入直後 (0sec)



(b) 電源投入後 3.0sec



(c) 電源投入後 9.0sec

図5 磁粉附着過程の観察
(A1 30/50、欠陥上面からの撮影)

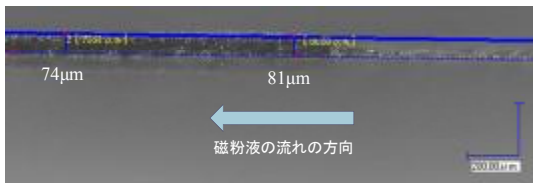


図6 磁粉附着の側面観測 (A1 30/50)

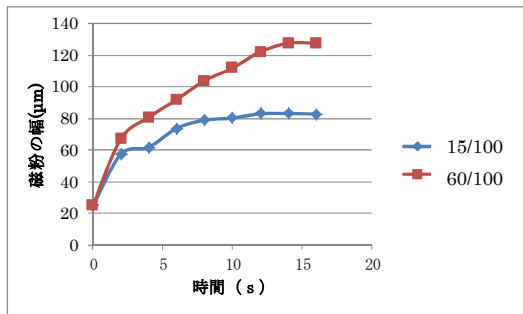


図7 欠陥深さの違いによる磁粉量の比較
(A1 15/100, A1 60/100)

を用いて A 形標準試験片の欠陥を観測した結果、実際の欠陥幅は $84 \mu\text{m}$ であった。したがって、磁粉は実際の欠陥幅よりも広い範囲に附着することが判った。

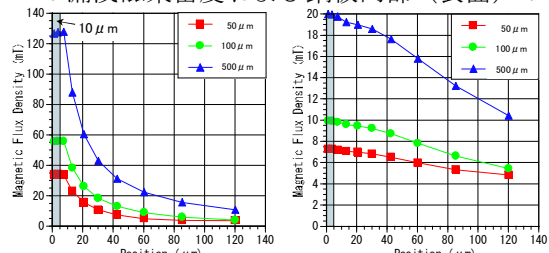
図6に示すのは、レンズに側面観測用のレンズアダプタを取り付け側面から撮影することにより、附着した磁粉の高さを計測した結果である。レンズの倍率は150倍、撮影角度は試験体表面から 5.1° である。測定可能な撮影角度は、鋼板表面に対して 5.1° よりも浅く設定すると、ピントが定まらず撮影不可能となった。本研究では、この角度からの側面観測を限界角度とした。観測点は欠陥の中央部で、磁粉液を試験鋼材に適用した後、磁化器の電源を OFF にした状態での静止画である。この結果より、磁粉の附着高さは $70 \sim 80 \mu\text{m}$ であることが判る。図5より磁粉適用後の磁粉附着幅は $130 \mu\text{m}$ であった。したがって、欠陥部に附着する磁粉の断面形状はほぼ半円状であると判断できる。

図7に欠陥深さの違う A 形標準試験片を用いて、欠陥深さの違いによる磁粉附着量を評価した。A1 15/100 は欠陥の深さが $15 \mu\text{m}$ 、60/100 は $60 \mu\text{m}$ である。磁粉を適用した直後は両者の差は少ないが、磁粉の適用時間の経過と共にその差が大きくなることを確認される。側面観測から磁粉の高さを評価すると、A1 15/100 は磁粉の高さが $31 \mu\text{m}$ 、60/100 は $60 \mu\text{m}$ であった。したがって、欠陥が深いほど磁粉の幅および高さ共に大きくなる(附着磁粉量が多くなる)ことが判る。

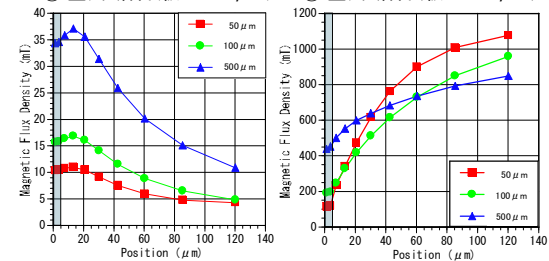
(2) 有限要素法を用いた磁束密度分布の数

値解析

図8に欠陥の深さをパラメータにした空間への漏洩磁束密度および鋼板内部(表面)の

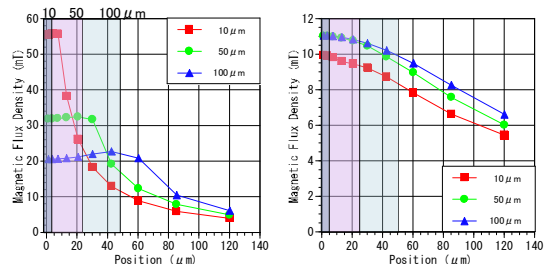


① 空気1層目(板上11.2 μm) ③ 空気3層目(板上77.2 μm)

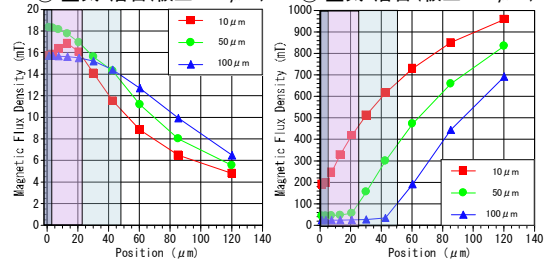


② 空気2層目(板上38.4 μm) ④ 鋼板表面(8.3 μm)

図8 欠陥周辺部の磁束密度分布
(深さ: パラメータ、幅: $10 \mu\text{m}$ 一定)



① 空気1層目(板上11.2 μm) ③ 空気3層目(板上77.2 μm)



② 空気2層目(板上38.4 μm) ④ 鋼板表面(8.3 μm)

図9 欠陥周辺部の磁束密度分布
(深さ: $100 \mu\text{m}$ 一定、幅: パラメータ)

磁束密度の線分布を示す。ここで示す磁束密度は、 x, y, z 方向成分の絶対値で、各ポジションにおける最大値(強度分布)を示す。横軸 $0 \mu\text{m}$ の位置が欠陥幅方向の中心部である。これらの図より、欠陥の深さが深くなるほど空間への漏洩磁束密度が大きくなり、またその分布範囲が広がる様子が確認できる。ここで、漏洩磁束密度の鋼板表面に対して垂直な成分 B_z は、欠陥のエッジで最大となり、欠陥中央でゼロとなる。一方、水平成分 B_x は欠陥の中心で最大となる。ここで、 B_z は鋼板表面から離れるほど、欠陥エッジより遠い位置で最大となる。したがって、鋼板に近い①空

気1層目では欠陥エッジ部であるポジション $5\mu\text{m}$ 近傍で、②空気2層目では $15\mu\text{m}$ で磁束密度のピークが観測される。③空気3層目

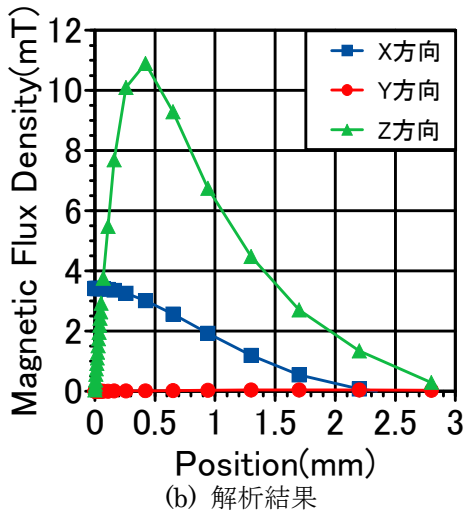
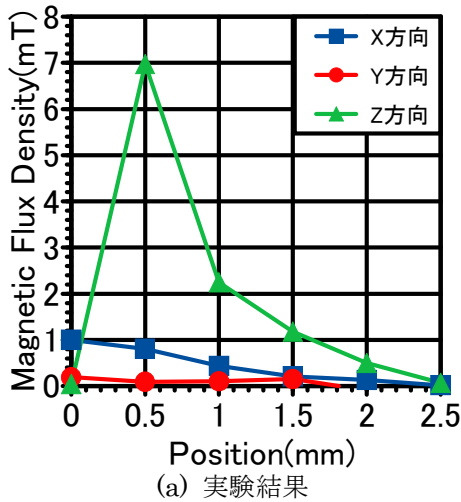


図10 欠陥からの漏洩磁束密度

では B_x が支配的となり、ピークは観測されない。次に、鋼板表面の磁束密度に着目すると、欠陥の深さが深い場合は、欠陥からより遠い位置から鋼板の板厚方向へと磁束が浸透する。また、漏洩磁束も欠陥から遠い位置から発生する。そのため、欠陥より離れた位置から欠陥近傍における磁束密度の変化量は少ない。

図9に欠陥の幅をパラメータにした空間への漏洩磁束密度および鋼材内部(表面)の磁束密度の線分布を示す。欠陥の幅が広がると漏洩磁束密度が発生する領域は広がる。鋼板に近い①空気1層目および②空気2層目では、欠陥の幅が広いほど各欠陥上における漏洩磁束密度は小さくなる。一方、③空気3層目では1層目と逆の傾向が見られ、欠陥の幅が広いほど漏洩磁束密度は大きくなる。つまり、欠陥の幅が広いほど、鋼材の表面に対してより高い空間に漏洩磁束が拡

がる。鋼材表面に着目すると、欠陥の幅が広いほど鋼材の板厚方向に浸透する(欠陥の下に分布する)磁束が多くなるため、表面の磁束密度は減少することが確認される。

(3) 欠陥からの漏洩磁束密度の計測

試験鋼材(SPCC)にエンドミル加工により欠陥(幅 $100\mu\text{m}$ 、深さ $500\mu\text{m}$ 、長さ 6mm)を設け、欠陥から空間に漏洩する磁束密度をホール素子により計測した。x,y,z方向の3方向成分の漏洩磁束密度を計測した結果を、数値解析結果と比較して図10に示す。横軸が 0mm の位置に、欠陥幅方向の中心が存在する。前述のように、x方向(鋼板に対して水平方向)の漏洩磁束密度は、欠陥の中央で最大となり、z方向(鋼板に対して垂直方向)の漏洩磁束密度は、欠陥のエッジで最大となる。実験と解析の結果を比較すると、漏洩磁束密度分布は上述のようになっており、両者の傾向は一致する。しかし、漏洩磁束密度の値が解析結果の方が大きくなった。これらの原因は、作製した試験鋼材の欠陥の深さが、目標値 $500\mu\text{m}$ よりも浅く加工されていることが考えられる。今後、実際の欠陥のプロファイルを計測し、それに合わせた解析モデルを構築することにより、漏洩磁束密度を再評価する予定である。

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 7件)

① K.Fukuoka and M.Hashimoto, Flaw Detection on Three-dimensional Shape Portion using Uniform Eddy Current Multi-probe, Int. J. of Appl. Electromagn. Mech., 査読有、(in press)

② N.Kasai, A.Takada, K.Fukuoka, H.Aiyama and M.Hashimoto, Quantitative investigation of a standard test shim for magnetic particle testing, NDT&E International, 査読有、44、2011、421-426

③ K.Fukuoka and M.Hashimoto, Flaw Detection on Three-dimensional Shape Portion using Uniform Eddy Current Multi-probe, JSAEM Studies in Appl. Electromagn. and Mech., 査読無、14、2011、303-304

④ 福岡克弘、橋本光男、赤松里志、及川芳朗、三相交流を用いた回転磁界型磁粉探傷試験における磁束密度分布の評価、非破壊検査、査読有、Vol. 58、No. 3、2009、102-107

⑤ 福岡克弘、橋本光男、湾曲した形状を探傷するマルチ様渦電流プローブの開発とき裂形状の評価、非破壊検査、査読有、Vol. 58、

No. 4, 2009, 159-164

⑥ K.Fukuoka, M.Hashimoto, S.Yoshimoto and K.Sakuta, Evaluation of frequency characteristics of transformer with bulk HTSs shielding, Physica C, 査読有、Vol.469、2009、1274-1277

⑦ 福岡克弘、橋本光男、マルチ様渦電流プローブの立体形状への適用と欠陥評価、電気学会、マグネティックス研究会、資料番号(MAG-09-238)、査読無、2009、1-5

[学会発表] (計 16 件)

① 福岡克弘、磁粉付着過程の動画像計測と裂形状による漏洩磁束密度分布の評価、日本非破壊検査協会、第 15 回 磁粉・浸透・目視部門・電磁気応用部門・漏れ試験部門合同シンポジウム、2012 年 2 月 20 日、東京都城南地域中小企業振興センター

② 相山英明、コイル法における磁界と標準試験片の磁粉模様について、日本非破壊検査協会、平成 23 年度秋季講演大会、2011 年 10 月 18 日、兵庫県立淡路夢舞台国際会議場

③ 福岡克弘、高速度カメラを用いた磁粉付着過程観測と漏洩磁束密度解析、日本非破壊検査協会、平成 23 年度第 2 回表面 3 部門合同研究集会、2011 年 9 月 30 日、室蘭市中小企業センター

④ K.Fukuoka, Flaw Detection on Three-dimensional Shape Portion using Uniform Eddy Current Multi-probe, 15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2011)、2011 年 9 月 8 日、Royal Continental hotel, Napoli, Italy

⑤ 福岡克弘、原子力プラント炉内構造物における渦電流探傷プローブの開発、日本材料学会、第 136 回破壊力学部門委員会、2011 年 3 月 24 日、神戸大学

⑥ 福岡克弘、「回転磁界磁粉探傷試験の回転磁界分布評価」、日本 AEM 学会、第 19 回 MAGDA コンファレンス、2010 年 11 月 22 日、北海道大学

⑦ 赤松里志、磁粉探傷試験における磁束密度分布の評価、第 15 回神奈川県非破壊試験技術交流会・技術発表会、2010 年 10 月 30 日、神奈川県産業技術センター

⑧ 福岡克弘、磁粉探傷試験における磁粉付着過程の観測と漏洩磁束密度の評価、日本非破壊検査協会、平成 22 年度秋季講演大会、2010 年 10 月 28 日、沖縄県市町村自治会館

⑨ 福岡克弘、回転磁界を用いた磁粉探傷試験における磁化器外側領域の磁粉観察と磁束密度評価、電気学会、平成 22 年基礎・材料・共通部門大会、2010 年 9 月 14 日、琉球大学

⑩ 笠井尚哉、極間法における A 形標準試験片の有効性に関する研究、日本非破壊検査協

会、平成 22 年度春季講演大会、2010 年 5 月 25 日、東京ファッションタウン(TFT)ビル

⑪ 福岡克弘、3 極コイルを用いた磁粉探傷試験における回転磁束密度計測と数値解析評価、第 22 回電磁力関連のダイナミックシンポジウム、2010 年 5 月 20 日、門司港ホテル

⑫ 福岡克弘、立体形状部への一様渦電流プローブの適用とき裂形状評価、日本 AEM 学会、第 18 回 MAGDA コンファレンス、2009 年 11 月 20 日、東京都市大学

⑬ 高田明、極間法磁粉探傷試験における磁化器周辺の磁束密度評価、日本非破壊検査協会、平成 21 年度第 2 回表面探傷分科会、2009 年 10 月 30 日、青森職業能力開発短期大学校

⑭ 福岡克弘、回転磁界型磁粉探傷試験における回転磁束密度計測と数値解析評価、電気学会、平成 21 年基礎・材料・共通部門大会、2009 年 9 月 11 日、静岡大学

⑮ 福岡克弘、回転磁界を用いた磁粉探傷試験における発生磁界の評価、日本保全学会、第 6 回学術講演会、2009 年 8 月 5 日、ホテルニューオータニ札幌

⑯ 高田明、極間法における漏洩磁界と試験体の磁束密度分布に関する研究、日本非破壊検査協会、平成 21 年度春季講演大会、2009 年 5 月 19 日、アルカディア市ヶ谷

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

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：特願 2011-254078

出願年月日：2011 年 11 月 21 日

国内外の別：国内

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：特願 2011-061993

出願年月日：2011 年 3 月 22 日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<http://db.spins.usp.ac.jp/view?l=ja&u=233&f1=G&f2=51&sm=field&sl=ja&sp=1>

6. 研究組織

(1) 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