

平成 23 年 6 月 3 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20360416

研究課題名（和文）照射ナノ損傷組織と磁壁とのダイナミクス研究

研究課題名（英文）Study on dynamics between domain wall and irradiation damage

研究代表者

越後谷 淳一（ECHIGOYA JYUNICHI）

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：00005539

研究成果の概要：中性子照射材・模擬材について、動的磁気特性を計測し、ナノ欠陥と磁壁挙動との関係について考察を行うとともに、照射析出による溶質元素の濃度変化評価を目的としたモデル化と定量的解析を行った。また、ローレンツ電子顕微鏡や磁気光学カー効果顕微鏡により、照射モデル材・シミュレーション照射材の格子欠陥と磁壁とのマイクロレベルでの相互作用挙動を調べ、欠陥と磁壁とのダイナミクスを解明するとともに、マクロ領域における照射損傷組織と磁壁との相互作用について検討した。

研究成果の概要（英文）：Dynamic magnetic properties on neutron irradiated Fe and Fe-Cu model alloy and those materials simulated for neutron irradiation were evaluated. Based on those measurements, dynamics between domain walls and irradiation damages were investigated. Also, interactions between lattice defects and domain walls on the ferromagnetic materials simulated for irradiation damage were clarified in both micro and macro scale by domain observation using Lorentz TEM and Kerr effect microscopy.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2009 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	12,800,000	3,840,000	16,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：格子欠陥，磁壁，照射損傷

1. 研究開始当初の背景

近年、各種社会基盤構造物の高経年化に伴い、機器構造物の健全性評価に関する技術開発が求められている。原子力発電プラントにおいては圧力容器鋼の中性子照射脆化の進行が懸念される。脆化の進行を的確に予測する上で脆化メカニズムの解明が重要課題となっている。実際の商業炉での健全性評価では、運転開始時に装荷した監視試験片を用い

て定期的に衝撃試験（破壊試験）を実施してきたが、原発の長期利用による試験片の不足問題が生じている。その代替技術の一つとして非破壊評価法の開発が期待されている。

脆化の原因にCuリッチ析出物や転位ループ等の照射ナノ欠陥の形成があげられる。岩大・保全センターでは照射中の連続磁気計測から、照射欠陥が転位近傍に形成することを

提唱し、電顕観察からそれを確認した。この結果は、従来の損傷モデル（カスケード損傷により一様に形成した欠陥の密度に着目）では脆化機構の説明として不十分で、転位近傍の欠陥による固着効果を考慮する必要性を示唆する。これまでの研究で「転位近傍の欠陥形成」の評価という新しい観点から磁気計測の有用性が検証できたが、実際の脆化評価に応用するには定量的評価と予測性が必要となる。磁気パラメータの変化挙動の定性的評価やデータベース化のような従来型研究でなく、「転位近傍の照射欠陥と磁壁とのダイナミクス」を直接的に解明した上での、機構論に裏付けされた脆化評価法の構築が必要である。

2. 研究の目的

圧力容器鋼照射材・模擬材について、磁気バルクハウゼンノイズや透磁率を計測し、ナノ欠陥と磁壁挙動との関係についてモデル化と定量的解析を目指すとともに、動的ヒステリシス曲線を計測し、照射析出による溶質元素の濃度変化評価を目的としたモデル化と定量的解析を行う。また、ローレンツ電子顕微鏡観察により、照射モデル材・シミュレーション照射材の格子欠陥と磁壁とのミクロレベルでの相互作用挙動を調べ、欠陥と磁壁とのダイナミクスを解明するとともに、マクロ領域の観察が可能な磁気光学カー効果顕微鏡を用いた磁区観察を行い、照射損傷組織と磁壁相互作用を調べ、計測可能な巨視的磁気特性との対応を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 照射模擬材の準備

① Fe-Cu 合金の熱時効材

照射脆化の要因として Cu リッチ析出物の形成が挙げられる。それらを模擬するため、Fe-1wt.%Cu モデル合金を測定試料として用いた。Fe-Cu 合金試料は 1123 K で 5 時間溶体化処理を行い、過飽和固溶体とした。その後、試料をそのままの状態保持したものと 5 - 40 % の圧延率で冷間圧延した試料を準備した。冷間圧延の目的は試料に転位を導入するためである。

② 鉄単結晶の重イオン照射材

分子線エピタキシー法により、高品位な鉄単結晶膜を作製した。タンデム型加速器（九州大学応用力学研究所共同利用）を用いて重イオン照射（3.2MeV Ni³⁺、室温照射）した。SRIM コードを用いて損傷量を計算し、照射前後での電気抵抗率測定（10K～室温）と VSM による磁化測定を行った。さらに TEM 観察により照射欠陥評価を行った。一部の試

料については、イオン照射時に Al 箔で試料表面をマスクングして同一試料内に照射・未照射域を作り、カー効果顕微鏡による磁区観察を行った。

③ 鉄多結晶の超高压電子線照射材

多結晶鉄の TEM 観察用ディスク型試料のエッジ部について、超高压電子顕微鏡を用いて電子線照射し、転位ループを導入した（200℃, 0.15dpa）。その後、ローレンツ TEM で磁壁移動の様子を観察した。

(2) 中性子照射材の準備

純鉄、Fe-Cu 合金（圧延・未圧延材を含む）および圧力容器鋼の薄板型試料（20×6×0.4 mm）について、東北大学金研大洗研究施設の共同利用研究の枠組みで中性子照射を行った。ベルギー BR2 炉を用いて中性子照射を行った（照射温度：290-300℃、照射量：1.0×10²⁴n/m²）。照射後試料のマイクロビッカース硬度及び磁気特性（ヒステリシス曲線、バルクハウゼンノイズ、インピーダンス）を調べた。大洗研究施設のホットラボに、専用の磁気計測装置を持ち込み、照射材の磁気特性を調べた。

(3) 動的磁気特性評価

① 動的磁気ヒステリシス測定

Fe-Cu 合金のリング状試料（外形 18mm 内径 12mm 厚さ 2mm）に励磁・検出コイルを巻き、励磁コイルにバイポーラ電源から三角波電流を流し、磁界を発生させた。最大磁界を 2.8kA/m に固定し、励磁周波数を 0.05 から 1Hz まで変化させた。検出信号をアンプ（60dB）・ローパスフィルタ（40Hz）・AD ボードを通して、PC に取り込んだ。LabVIEW 上で検出信号を積分することで磁束密度を求め、磁界強度データと合わせることで磁気ヒステリシス曲線を得た。その励磁周波数依存性を調べた。

② 磁気バルクハウゼンノイズ（MBN）計測

時効材については磁気ヨークを試料上に配置し、磁気ヨークに巻いた励磁コイルに周波数 1 Hz、振幅 1 A の三角波電流を印加して試料を励磁した。空芯コイルを試料表面に配置し、MBN 信号を計測した。また、照射材については試験片を磁気ヨークで挟み込み、試験片の周囲に巻いたコイルの出力を検出した。コイルに誘起された電圧は増幅し、100 - 200 kHz のバンドパスフィルタを通して、AD コンバータによりパソコンに取り込んだ。評価には、出力電圧の 2 乗値を 1 周期分積分した MBN エネルギーを用いた。

③ 磁気ヨークのインピーダンス計測

時効材については磁気ヨークにインピーダンス計測用のコイルを巻き、磁気ヨークを試料上に配置して計測した。照射材は、空芯コ

イルを作製し、その内部に試験片を挿入した状態でコイルのインピーダンスを計測した。インピーダンスの測定には LCR メータ (HIOKI 3522-50) を用いた。インピーダンス測定時に通電する電流値は 10 mA とし、1 Hz - 1 kHz の周波数範囲で計測した。試料のインピーダンス Z は実部である抵抗分 R と虚部のインダクタンス分 L に分けられ、 $Z = R + j2\pi fL$ と表される。ここで、 f は測定周波数である。 R, L はそれぞれ、測定試料の複素透磁率の虚部、実部の変化を反映する。

(4) 磁区観察

① カー効果顕微鏡による観察

初年度導入した、ネオアーク社製ドメインスコープ (カー効果顕微鏡) を用いて磁区観察を行った。顕微鏡に自作のヘルムホルツコイルを設置し、バイポーラ電源と接続した。電源に送る励磁信号と CCD 撮影を同期させることで、磁化過程における磁区の連続観察を実施した。

② ローレンツ TEM による観察

Philips 社 Tecnai30 (岩手大既存装置) のローレンツモード機能を活用して、TEM 用試料の磁区観察を行った。ミニコンデンサレンズを用いて磁場印加し、照射格子欠陥による磁壁のピン止めの様子を観察した。

4. 研究成果

(1) 熱時効した Fe-Cu 合金の動的磁気特性

① 磁気ヒステリシス特性

熱時効過程では Cu 析出物形成に加えてマトリックスの組織変化 (固溶 Cu 原子の濃度減少) が生じる。非破壊評価法として応用する上で、磁気特性に与える両者の効果を知る必要がある。磁化曲線の励磁周波数依存性を調べ、簡単な解析モデルに基づき析出物と固溶原子の効果を分離し、模擬材の磁気特性に与えるそれらの影響について調べた。

下記の式のように、ヒステリシス損失を周波数非依存項 (静的損失) と依存項 (動的損失) とに分け、さらに後者が導電率 σ と仮想的な透磁率 μ の積で表されるとする。さらに静的損失項と透磁率項を、固溶体成分と析出物成分の和で近似した。5 種類の Cu 濃度 (0.3~1.2%) の Fe-Cu 過飽和固溶体のヒステリシス損失の励磁周波数依存性データに対して非線形フィットを行い、解析で必要となる係数を決定した。

$$W = W_{Static} + W_{Dynamic} \cdot f^n = W_{Static} + C\sigma\mu^2 \cdot f^n$$

$$= w_0 + \Delta w_{solute} + \Delta w_{prec.}$$

$$+ C\sigma(\mu_0 + \Delta\mu_{solute} + \Delta\mu_{prec.})^2 \cdot f^n$$

図 1 に熱時効過程で測定したヒステリシス

損失 (Fe-1%Cu, 500°C 時効) の周波数依存性を解析した結果を示す。時効による変化量を明確にするため、固溶体成分については、初期値からの変化量である、 $\Delta\mu'_{solute}$ と $\Delta w'_{solute}$ とで整理した。それら固溶体成分の変化挙動は、時効に伴い固溶 Cu 原子濃度が減少しマトリックス状態が純鉄に近づき磁化しやすくなったことを反映している。本研究では、動的磁気特性計測とその解析をもとに、固溶状態・析出物の組織変化が磁気特性に与える影響を分離できることを示したが、転位の組織変化が及ぼす影響を考慮に入れるなど、さ

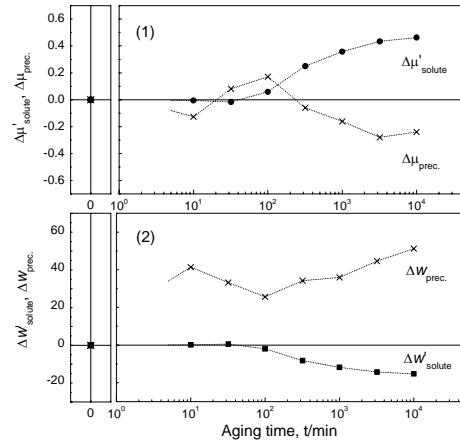


図 1 $\Delta\mu$ と Δw の時効時間依存性

らに検討が必要である。

② バルクハウゼンノイズ特性

図 2 は時効時間に対する MBN エネルギーの変化を示したものである。未圧延試料 (圧延率 0%) については、MBN エネルギーは時効時間 30 分まではほぼ一定であり、その後 10^3 分までは減少し、 10^3 分以上ではわずかながら増加する。圧延材に関しては、MBN エネルギーは熱時効時間に対して 10^3 分までは減少し、その後増加した。圧延率が大きい試料ほど、時効初期における MBN エネルギーの低下する割合が大きい。

③ 磁気インピーダンス測定

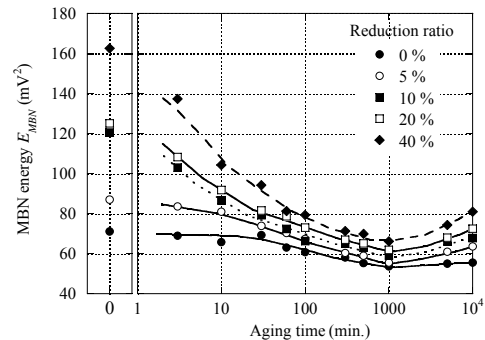


図 2 MBN エネルギーの時効時間依存性

図 3 には時効時間に対するインピーダンスの変化を各圧延率の試料に対して示した。た

だし、1 Hz におけるインダクタンスの値である。未圧延試料のインダクタンスは時効初期に減少し、10 分付近で極小値を取った後 10³ 分まで増加した。さらにその後減少した。冷間圧延した試料では、インダクタンスは 10³ 分までは増加し、その後減少した。

(2) イオン照射材の磁気特性

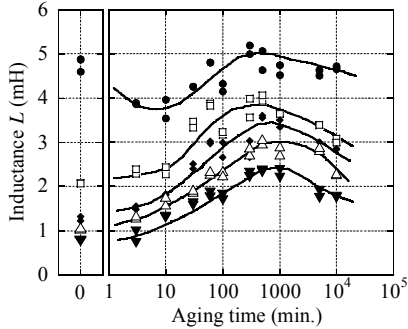


図3 インピーダンスの熱時効依存性

鉄薄膜（厚さ 30 nm）の残留抵抗率は、イオン照射（損傷度は 30 nm 深さで 0.3 dpa）により $0.9 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ 増加した。これにより照射欠陥が導入されたことを確認した。図4にVSMにより測定した照射前後での磁化曲線（磁化は飽和磁化で規格化）を示す。(a) が[100], (b) が[110]方向に磁場を印加したものである。単結晶薄膜の結晶磁気異方性はバルクの異方性と同様であり、さらにイオン照射前後で磁気異方性や保磁力に顕著な違いは見られなかった。

Eldrup らは、0.2 dpa, 70°Cでの中性子照射試

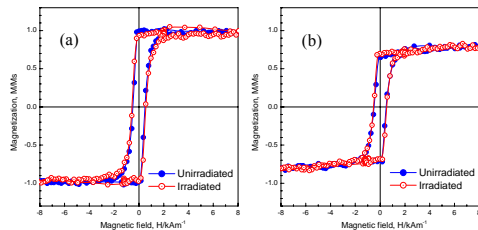


図4 イオン照射前後での磁化曲線の変化
磁場印加方向 (a) [100] (b) [110]

料について、陽電子消滅法によるサブナノサイズの高密度空孔クラスター (10^{24}m^{-3} オーダー) と TEM 観察による数ナノサイズの低密度転位ループの形成を確認している (JNM 2002)。さらに電気抵抗率の増加 ($\Delta\rho = 1.8 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$) が、高密度空孔クラスターの形成によると報告している。本実験の抵抗率の増加量のオーダーはこれと同じであり、イオン照射材でもサブナノサイズの高密度な空孔クラスターが形成していると考えられる。そのような照射欠陥は磁気特性に大きな影響を及ぼさないことを示している。

(3) 中性子照射材の磁気特性

① 動的ヒステリシス特性

保磁力については、未圧延材では純鉄を除き、ほとんど変化しないか若干減少する傾向が見られた。一方、圧延材ではすべての試料で大きく減少した。初期転位状態の照射による変化に敏感であることがわかった。

② バルクハウゼンノイズ特性

図5には、未圧延及び圧延した純鉄及び Fe-Cu 合金の MBN エネルギーを中性子照射前後でまとめた図を示した。未圧延材については純鉄及び Fe-Cu 合金のどちらにおいても大きな変化は見られなかった。一方、圧延材においては、照射後に MBN エネルギーの減少が確認された。

③ 磁気インピーダンス測定

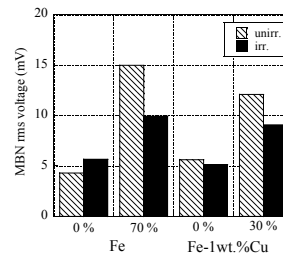


図5 照射前後の MBN エネルギー

図6は、未圧延及び圧延した純鉄及び Fe-Cu 合金のインピーダンスを中性子照射前後でまとめたものである。未圧延材については純鉄及び Fe-Cu 合金のどちらにおいても大きな変化は見られなかった。一方、圧延材においては、照射後にインピーダンスの増加が確認された。すなわち、透磁率が増加し、磁気特性がソフト化している。

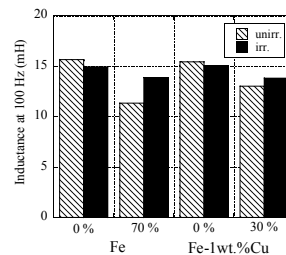


図6 照射前後のインピーダンス

(4) 磁区観察

① 鉄単結晶の重イオン照射材

微細加工により $150 \times 1000 \mu\text{m}$ のストライプ状の厚さ 30 nm 鉄単結晶薄膜を作製し、右上半分をマスクして照射した試料について、カー効果顕微鏡で磁区観察を行った (図7. 数字は印加磁場 [Oe]). 長手方向が Fe の [110] 方向で、磁化容易方向に磁場印加したところ、磁化反転過程で、照射・未照射域境界で逆磁区の形成が見られた。照射・未照射域内では

磁区構造に顕著な違いは見られなかった。後者の挙動は先に示した磁化測定の結果と一致しており、高密度なサブナノサイズ空孔クラスターは磁化過程に顕著な影響を及ぼさないことがわかった。

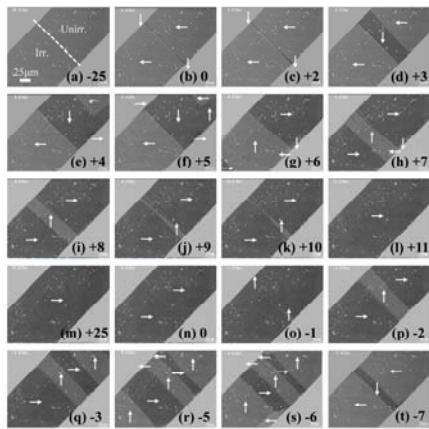


図7 イオン照射した Fe 薄膜の磁区

②鉄多結晶の超高压電子線照射材

電解研磨により薄片化した鉄多結晶のエッジ付近において、電子線を照射した領域で大きな転位ループコロニーの形成が確認できた。印加磁場を連続的に変えながらローレンツ TEM で磁壁移動を観察したところ、個々の転位ループに磁壁がピン止めされる様子を初めて確認できた(図8)。100 nm以下の転位ループサイズでもピン止め効果が認められており、先に報告している中性子照射中の純鉄の保磁力増加(基盤研究Sの研究成果)が、転位ループによる磁壁のピン止め効果に起因することを明らかにした。

(5) 成果のまとめ

中性子照射した純鉄, Fe-Cuモデル合金(未圧延材, 圧延材)のヒステリシスループ, バルクハウゼンノイズ(MBN), インピーダンスの測定を行い、動的磁気特性の照射による振る舞いを明らかにした。また、同様にイオン照射したFe, 熱時効したFe-Cuモデル合金の動的磁気特性の振る舞いを明らかにした。

照射模擬材の組織観察や磁気特性変化計測の結果に基づいて、照射損傷と磁気特性変化との相関について検討した。照射により導入

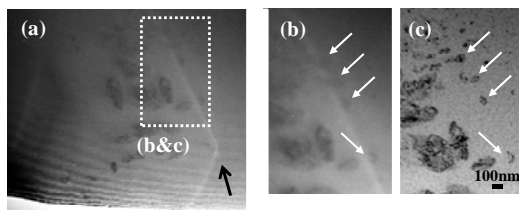


図8 転位ループによる磁壁のピン止め
(a)(b) defocus, (c) just focus 写真

される転位ループや銅析出物などの格子欠陥

そのものと磁壁との相互作用は必ずしも大きくないことが明らかとなった。一方、未照射時に転位を多く含む試料では、転位ループ、銅析出以外に照射により誘起される磁壁挙動に影響を及ぼす組織変化が生じることが示唆された。

磁気光学カー効果顕微鏡及びローレンツ電子顕微鏡を用いてイオン照射した鉄単結晶及び熱時効したFe-Cuモデル合金の動的磁区観察を行い、磁界印加時における磁壁の挙動を明らかにした。ただし、Fe-Cu合金における磁壁と格子欠陥の相互作用についての定量的モデル化については今後課題を残した。

以上、原子炉圧力容器の磁気的非破壊評価技術開発の進展に資する中性子照射材の動的磁気特性変化の実験データ及び磁性変化と照射欠陥との相関に関する基礎データを蓄積できた。

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6件)

① Y. Kamada, H. Watanabe, S. Mitani, J. Echigoya, J. N. Mohapatra, H. Kikuchi, S. Kobayashi and K. Takanashi, Magnetic Properties of Ion Irradiated Epitaxial Fe Films, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 266, pp. 012035/1-5, 2011, 査読有。

② H. Kikuchi, T. Takahashi, K. Ara, Y. Kamada, S. Kobayashi, J. Echigoya, Analysis of Barkhausen noise activity and hysteresis loop on cold-rolled and thermally aged Fe-Cu model alloy Conference, Proceedings/8th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, 2010, 査読なし。

③ Y. Kamada, S. Takahashi, H. Kikuchi, S. Kobayashi, K. Ara, J. Echigoya, Y. Tozawa, K. Watanabe, Effect of pre-deformation on the precipitation process and magnetic properties of Fe-Cu model alloys, J. Mater. Sci., Vol. 44, 949-953, 2009, 査読有。

④ 鎌田康寛, 登澤雄介, 菊池弘昭, 小林悟, 荒克之, 越後谷淳一, 照射脆化を模擬したFe-Cuモデル合金の動的磁気ヒステリシス特性- ヒステリシス損失の周波数依存性の解析による影響因子の分離 -, 日本AEM学会誌, Vol. 17, 291-296, 2009, 査読有。

⑤ Y. Kamada, H. Watanabe, S. Mitani, J. Echigoya, H. Kikuchi, S. Kobayashi, N. Yoshida, and K. Takanashi, Effects of Room Temperature Heavy-Ion Irradiation on Magnetic and Electrical Properties of a Single Crystalline Iron Thin Film, Trans. Mater., Vol. 50, 2134-2138, 2009, 査読有。

⑥ H. Kikuchi, F. Sato, K. Ara, Y. Kamada and S. Kobayashi, Magnetic NDE for Cold-rolled and

Thermally Aged FeCu Alloy using Impedance Measurement, Electromagnetic Nondestructive Evaluation(XII), 255-260, 2009, 査読有.

〔学会発表〕(計 13 件)

① Y. Kamada, H. Kikuchi, S. Kobayashi, J. Echigoya, K. Ara, S. Takahashi, H. Watanabe, N. Yoshida, N. Nakamura, H. Ogi, T. Ohtani, N. Ebine and M. Suzuki, Magnetic Properties of Ion-Irradiated Single Crystalline Iron and Iron-Chromium Thin Films, The 16th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, 2011年3月11日, チェンナイ, インド.

② Y. Kamada, H. Watanabe, S. Mitani, J. Echigoya, J. N. Mohapatra, H. Kikuchi, S. Kobayashi and K. Takanashi, Kerr Microscope Investigation of Ion-Irradiated Single Crystalline Iron Films, International Conference of AUMS, 2010年12月8日, 済州島, 韓国.

③ Y. Kamada, H. Watanabe, S. Mitani, J. Echigoya, J. Mohapatra, H. Kikuchi, S. Kobayashi, K. Takanashi, Magnetic Properties of Ion Irradiated Epitaxial Fe Films, The 2nd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, 2010年7月14日, 仙台国際センター.

④ 鎌田康寛, 越後谷淳一, 菊池弘昭, 小林悟, 渡辺英雄, 吉田直亮, 三谷誠司, 高梨弘毅, 重イオン照射した鉄単結晶薄膜の磁性, 日本金属学会 2010年春期講演大会, 2010年3月29日, 筑波大学.

⑤ H. Kikuchi, T. Takahashi, K. Ara, Y. Kamada, S. Kobayashi, J. Echigoya, Analysis of Barkhausen noise activity and hysteresis loop on cold-rolled and thermally aged Fe-Cu model alloy 8th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, 2010年2月11日, チェンナイ, インド.

⑥ 福田誠, 鎌田康寛, 越後谷淳一, 菊池弘昭, 小林悟, 西村文仁, Fe-Cu 固溶合金の磁気特性と熱時効の影響, 第8回日本金属学会東北支部研究発表大会, 2009年12月5日, 岩手大学.

⑦ 細井三蔵, 鎌田康寛, 越後谷淳一, 菊池弘昭, 小林悟, 渡辺英雄, 吉田直亮, 三谷誠司, 高梨弘毅, 重イオン照射した単結晶鉄薄膜の磁化測定と磁区観察, 第8回日本金属学会東北支部研究発表大会, 2009年12月5日, 岩手大学.

⑧ Y. Kamada, Y. Tozawa, H. Kikuchi, S. Kobayashi, K. Ara and J. Echigoya, Static and dynamic magnetic hysteresis

properties of thermally aged Fe-Cu model alloys, The 13th Asia-Pacific Conference on Non-destructive Testing, 2009年11月11日, パシフィコ横浜.

⑨ 菊池弘昭, 橋達治, 鎌田康寛, 小林悟, 荒克之, 越後谷淳一, 照射脆化を模擬した Fe-Cu モデル合金のバルクハウゼンノイズ解析, 電気学会マグネティクス研究会, 2009年9月25日, 自動車会館(東京都).

⑩ 菊池弘昭, 高橋達治, 鎌田康寛, 小林悟, 荒克之, 越後谷淳一, 時効した Fe-Cu モデル合金の磁気特性挙動, 日本磁気学会第33回学術講演会, 2009年9月14日, 長崎大学.

⑪ 鎌田康寛, 越後谷淳一, 菊池弘昭, 小林悟, 渡辺英雄, 吉田直亮, 三谷誠司, 高梨弘毅, 室温でイオン照射した鉄単結晶薄膜の磁気・伝導特性, 日本金属学会第144回春期講演大会, 2009年3月30日, 東京工業大学.

⑫ 鎌田康寛, 登澤雄介, 菊池弘昭, 小林悟, 荒克之, 越後谷淳一, 照射脆化を模擬した Fe-Cu モデル合金の動的磁気ヒステリシス特性・ヒステリシス損失の周波数依存性の解析による影響因子の分離, 第17回 MAGDA コンファレンス, 2008年11月21日, 日立シビックセンター.

⑬ H. Kikuchi, T. Takahashi, Y. Kamada, K. Ara, S. Kobayashi, Barkhausen noise characteristics on cold-rolled and thermally aged Fe-Cu alloy, Joint European Magnetic Symposia(JEMS'08), 2008年9月15日, Trinity College, Dublin, Ireland.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

越後谷 淳一 (ECHIGOYA JYUNICHI)
岩手大学・工学部・教授
研究者番号:00005539

(2) 研究分担者

菊池 弘昭 (KIKUCHI HIROAKI)
岩手大学・工学部・准教授
研究者番号:30344617

鎌田 康寛 (KAMADA YASUHIRO)
岩手大学・工学部・准教授
研究者番号:00294025

小林 悟 (KOBAYASHI SATORU)
岩手大学・工学部・助教
研究者番号:30396410

村上 武 (MURAKAMI TAKESHI)
岩手大学・工学部・技術職員
研究者番号:60466513