

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 25 年 6 月 2 日現在

機関番号: 11201

研究種目: 若手研究(A)

研究期間: 2010~2012

課題番号: 22686087

研究課題名(和文) マルチ磁気パラメータを用いた圧力容器鋼の非接触・非破壊照射脆化評価技術の確立

研究課題名(英文) Development of non-contact and nondestructive evaluation of reactor pressure vessel steel using multi magnetic parameters

研究代表者

菊池 弘昭(KIKUCHI HIROAKI)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号: 30344617

研究成果の概要(和文): 試料と磁気ヨークの間の空隙幅が変化する場合のヒステリシスループ計測, 磁気ヨークを用いたインピーダンス計測, レーザー変位計を用いた変位計測について, その振る舞いを実験的に明らかにし, 非接触・非破壊磁気的・非破壊評価の可能性を実証した。続いて, その手法を用いて中性子照射材を評価し, マクロ領域における照射損傷組織と磁気物理量との相互作用について検討した。

研究成果の概要(英文): The behavior of hysteresis loop, impedance measurement using magnetic single-yoke and displacement measurement by laser technique were clarified experimentally, when magnetically gap exists between a specimen and a magnetic yoke. Consequently, the potential of non-contact and nondestructive evaluation method using magnetic measurement was performed. Then, the developed method was applied to evaluation of neutron irradiated materials, and relation between irradiation damage and magnetic properties was investigated.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2011年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	9,700,000	2,910,000	12,610,000

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: 磁気, 非接触, 非破壊評価, 照射脆化

1. 研究開始当初の背景

地球環境問題の深刻化に伴い, 環境負荷低減のため各種プラント, インフラストラクチャ等の大型構造物の新規市場規模は縮小傾向にある。その結果, 各種社会基盤構造物が継続利用され構造物の老朽化・高経年化対策が重要課題となっており, 機器構造物の健全性評価技術開発が強く求められている。原油価格高騰や地球温暖化問題などで, 原子力発電の重要性が再認識される中, 2010年に運転開

始40年を越す高経年化プラントが生じた。原発の心臓部にあたる圧力容器の中性子照射脆化は原発機器構造物の重大な経年化である。現状では, 運転開始時に装荷した監視試験片を用いて衝撃試験により圧力容器の健全性を評価しているが, 破壊試験のため原発の長期運転に伴う試験片の不足が懸念されている。また, 圧力容器そのものの健全性評価ではなく, それらを解決する技術として非破壊照射脆化評価法の開発が期待される。

2. 研究の目的

本研究では、計測プローブと測定対象物を接触させることなく磁気物理量の評価が可能な非破壊評価法について検討する。開発した評価手法を用いてホットラボにて、中性子照射した鉄系材料の非接触磁気計測を実施する。測定した複数の磁気物理量に基づいて、中性子照射脆化による組織変化と磁気物理量との間の相関について考察することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 非接触磁気的破壊評価手法の検討

複数の磁気パラメータを用いるため、ヒステリシス計測、インピーダンス計測を行った。インピーダンス計測では、材料の透磁率を評価する。また、レーザー変位計を利用して試料の保磁力を反映するパラメータも評価に用いた。いずれの測定においてもケイ素鋼板を用いて作製した U 字型磁気ヨークを用い、ヨークと試料により閉磁路を構成することで反磁界の影響を低減させた。また、磁気的な非接触を実現するため磁気ヨーク・試料間に空隙 (0.01 mm~0.5 mm) を設けた。

① ヒステリシス計測

U 字型ヨークの励磁コイルに電流を印加することで試料を励磁し、ピックアップコイルの電圧を積分することで磁束を算出し、ヒステリシスループを計測した。励磁周波数は 0.05 Hz で励磁電圧は 0.5 V とした。

② インピーダンス計測

インピーダンスの計測には LCR メータ (HIOKI 2250) を用いた。LCR メーターから交流電流を発生させ、電流 $I|e^{j(\alpha\theta)}$ と電位差 $|I|e^{j\theta}$ との比よりインピーダンスを算出している。ピックアップコイルに印加する電流は振幅 10 mA とし、周波数は 1 Hz~100 kHz とした。

③ レーザー変位計による計測

図 1 はレーザー変位計を用いた変位計測の測定系を示したものである。試料を磁気ヨークにより励磁して、レーザー変位計 (キーエンス LK-HD-5000) を用いて試料中心部の変形量を計測した。励磁周波数は 1 Hz で励磁電圧は 0.1 V とした。10 V で 100 μ m の変位となるように条件を設定した。

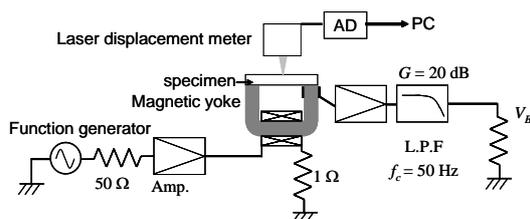


図 1 レーザー変位計を用いた計測の測定系

(2) 測定試料

① 冷間圧延材

非接触磁気的破壊評価手法についての検討において試料には低炭素鋼 S15C を使用した。試料は、未圧延材と 5, 20, 40% で冷間圧延し、圧延方向が試料長手となるように、15×25×2 mm³ の板状に放電加工により切り出した。

② 照射材試料

試料には純鉄及び Fe-1wt.% Cu 合金を使用した。未圧延及び圧延した各々の試料を、6×20×0.4 mm³ の板状に放電加工により切り出した。圧延は純鉄で圧延率 70%, Fe-Cu 合金で 30% とした。圧延試料においては試料長手方向と圧延方向が一致するようにした。これらの試料に対し、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°C, 照射量: 1.0×10²⁴n/m²)。照射後に東北大学金研大洗研究施設のホットラボにて照射材の磁気特性を測定した。

4. 研究成果

(1) 非接触磁気的破壊評価技術開発

① ヒステリシス計測

図 2 は磁気ヨーク・試料間に 0 ~ 0.5 mm の空隙幅がある場合のヒステリシスループを測定した結果である。(a) は未圧延試料、(b) は圧延率 40% の場合を示した。横軸は起磁力 NI 、縦軸は磁気回路内の磁束 Φ を示している。圧延率が増加すると、ループは傾いていき、保磁力は増加する。ここでの保磁力は磁束がゼロになるときの起磁力あるいは磁界強度と定義する。圧延率が増加していくと透磁率が減少し、磁気回路全体の磁気抵抗が増加する。よって、圧延率の低い場合と比較して同じ磁束を得るのにより大きな起磁力を必要とするため、ループは傾いていく。一方、空隙が増大するにつれてループは傾いていき、磁気回路に流れる磁束は減少した。これは空隙が増大するにつれて磁気回路全体の磁気抵抗が増加することにより空隙のない場合と同じ磁束を得るのにより大きな起磁力を必要とするためである。図 3 は各圧延率の試料における保磁力の空隙幅依存性を示した図である。いずれの圧延率に対しても空隙幅の増加とともに、保磁力は低下していくことが分かる。また、同じ空隙長で比較した場合、圧延率が増加するとともに保磁力は増加している。空隙が 0 mm の時と 0.5 mm の時とを比較するとすべての圧延率で約 50% 程度保磁力が減少している。ヒステリシスループ計測の結果から、空隙幅が 0.5 mm の時でも圧延率の違いによる磁気特性の違いを確認することが出来る。

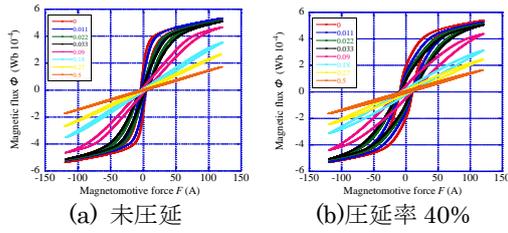


図2 ヒステリシス曲線

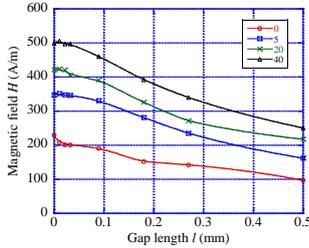


図3 保磁力の空隙依存性

②インピーダンス計測

図4は未圧延試料における0 mm~0.5 mmの空隙幅がある場合のインピーダンス測定の結果を示したものである。インダクタンスは周波数の増加とともに低下していることがわかる。また、周波数の増加とともに抵抗値の増加が確認された。これらは渦電流の影響によるものである。インダクタンスは低周波の領域で、また、抵抗は100 Hz付近で空隙幅によって違いが顕著に表れたため1 Hzにおけるインダクタンスと100 Hzにおける抵抗の空隙幅依存性についてまとめた結果を図5、図6に示す。各圧延率の試料における結果を示している。空隙幅の増加とともにインダクタンス、抵抗ともに低下し、空隙幅が小さいところでそれぞれの値は大きく減少している事が分かる。

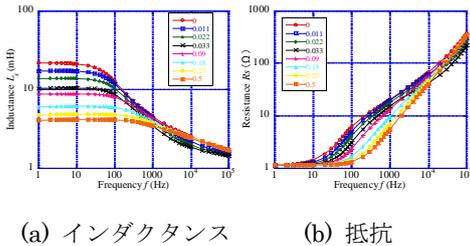


図4 インピーダンスの周波数特性

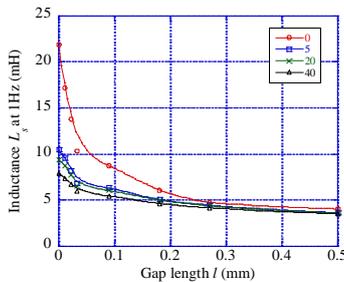


図5 インダクタンス(1 Hz)の空隙長依存性

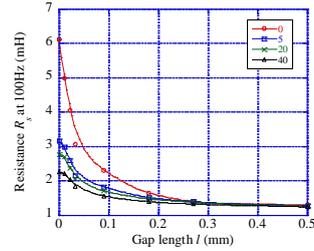


図6 抵抗(100 Hz)の空隙長依存性

③レーザー変位計を用いた計測

図7は(a)未圧延試料、(b)圧延率40%の場合における試料の変位を励磁磁界に対して示した図である。空隙は0 mm ~ 0.5 mmの範囲で変化させ、周波数は1 Hz、励磁電圧は0.1 Vとした。それぞれの結果において、空隙幅を変化させてもピークを取る位置には顕著な差が見られなかった。変位の絶対値は、空隙幅が0.033 mmにおいて大きな値を示した。本研究では変位の絶対値ではなく、変位のピークを取る磁場の値に着目した。

図8は変位のピークを取る磁場の空隙幅依存性を示した図である。いずれの圧延率においても空隙幅の増加とともに変位がピークを取る磁場は低下していくことが分かる。ここでの変位のピークを取る磁場の値は保磁力に対応する値と考えられる。

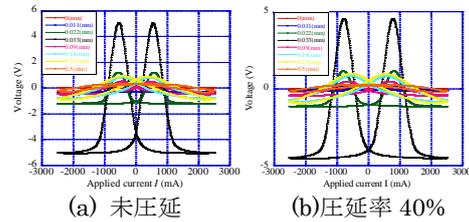


図7 変位の外部磁界依存性

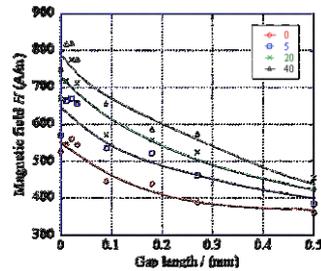


図8 変位の空隙長依存性

以上の結果から、磁気ヨークと試料間に空隙がある、すなわち、磁氣的に非接触な場合でも、圧延率の増加とともに保磁力や変位のピークを取る時の磁場の増大、インピーダンスの減少が確認され、空隙長が一定あれば、それらパラメータの圧延率に対する変化は接触時と同様の傾向で変化することが示された。圧延率は硬度と相関を持つため、空隙が存在する場合でも硬度等の機械特性の磁氣的非破壊評価が可能であることを示している。

(2) 照射材計測への適用

照射材に対して磁気的に非接触な手法で磁気計測を実施した。ヒステリシス測定は 0.1 Hz, 変位計測は 1 Hz で行った。いずれのパラメータ計測でも測定時に試料, ヨーク間に 10 mm の空隙を設けた。

① ヒステリシス計測

図 9 はヒステリシス曲線の測定結果に基づき, 照射前後での保磁力の変化を示した図である。未圧延材では純鉄, Fe-1wt.%Cu どちらの場合も照射前後で変化は見られない。一方, 圧延材では照射後に保磁力が減少した。

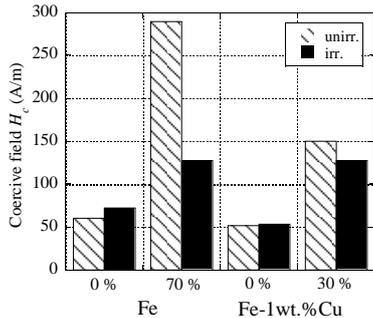
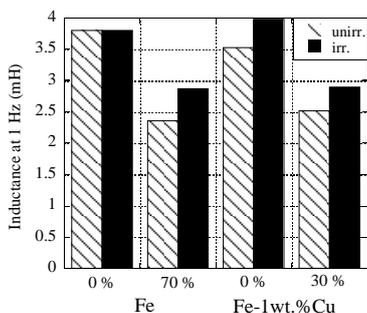


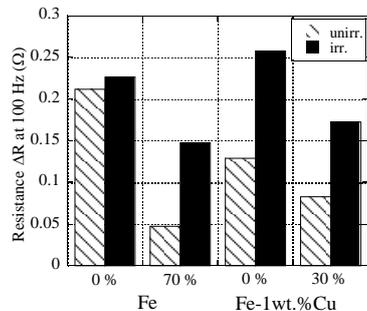
図 9 照射前後の保磁力変化

② インピーダンス計測

図 10 は 1 Hz のインダクタンス及び 100 Hz での抵抗変化分の照射前後の変化を示した図である。いずれのパラメータも純鉄の未照射材では変化が見られない。また, 圧延材においては純鉄, Fe-Cu いずれもインダクタンス, 抵抗分ともに照射後に増加している。これは磁氣的に軟化したことを示している。加えて, 未圧延材の Fe-Cu においても照射後にインピーダンスの増加が観察された。



(a) インダクタンス分 (1 Hz)



(b) 抵抗分 (100 Hz)

図 10 照射前後のインピーダンス変化

③ 変位変化

図 11 はレーザー変位計によって計測した変位が最大となるときの励磁磁界の照射前後における変化を示した図である。純鉄の未圧延材については照射前後で変化は見られない。一方, 圧延材においては純鉄, Fe-Cu どちらでも照射後に大幅な磁界強度低下が見られた。また, Fe-Cu の未圧延材についてもパラメータの低下が見られた。

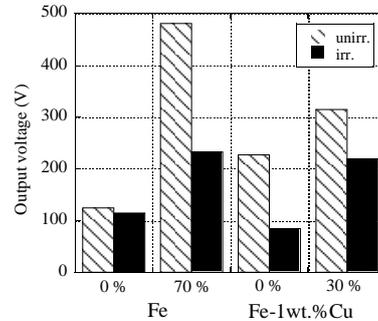


図 11 照射前後における変位の変化

④ 内部組織変化との関連

純鉄の未圧延材においては, 中性子照射により微小な空孔クラスタや転位ループが形成されるが, これらは磁壁のピンニングサイトとしては機能せず, 磁気特性への影響を及ぼさない。また, 圧延材については純鉄の場合, 大幅に磁気特性の軟化が確認されるので, 照射前に導入されていた転位が中性子照射により回復する等の変化が生じている可能性がある。硬度計測においては圧延材については照射によりわずかな硬度の減少が確認されている。Fe-Cu については圧延材では転位の回復あるいは転位近傍での銅析出物の形成により磁気特性が軟化するものと考えられる。マトリックス中に形成される銅析出物はサイズが非常に小さいので磁壁のピンニングサイトにならない。Fe-Cu 合金の未圧延材については一部の磁気特性に照射後軟化が見られた。

以上の結果は従来の接触型の磁気計測の結果と比較すると概ね一致する傾向が得られ, このことは試料表面状態に依存せずに磁気的な非破壊評価が可能であることを示している。ただし, Fe-Cu の未圧延材において一部従来と異なった傾向を示しており, この点は課題として残された。磁気的非接触による磁気計測評価は可能ではあるが, その結果は空隙長に依存するので, その制御が重要となる。今回の照射材の計測ではこの点が十分制御できていなかったことが従来と結果が異なるひとつの要因として考えられる。

(3) 成果のまとめ

① 冷間圧延した低炭素鋼を用いて, 試料と磁気ヨークの空隙幅を変化させた場合につ

いて磁気的非接触・非破壊評価技術の検討を行った。パラメータとしてヒステリシスループから得られる保磁力、インピーダンス計測から得られる透磁率変化を用いた。空隙幅の増加とともに各パラメータの信号変化量は減衰するが、空隙幅を制御すれば、非接触の計測を用いても各磁気パラメータが圧延率の変化と相関を持つことを明らかにした。

② 磁気ヨークと試料から構成される回路において磁界印加時の試料の変位をレーザー変位計により計測し、その振る舞いを実験的に明らかにした。変位が最大になるときの磁界強度がヒステリシスループにおける保磁力と対応しており、非接触磁気計測の有効なパラメータであることが示された。

③ 非接触型の計測手法を用いて、照射材の磁気計測を行った。照射脆化模擬材として未圧延あるいは圧延した純鉄及びFe-Cu合金を用いた。圧延材においては照射によりパラメータの増減が見られ、磁気特性の軟化が示された。未圧延材においては、純鉄で顕著な変化は観測されなかったが、Fe-Cu合金では、一部のパラメータにおいて銅析出を反映した信号変化が見られた。

以上、原子炉圧力容器の磁気的非接触・非破壊評価に適用可能な計測技術についてその有用性を示すことができた。ただし、実用化のためには、より詳細な脆化メカニズムの解明とそれらに基づいた脆化評価式の構築が課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① H. Kikuchi, T. Kasamizukami, Y. Sato, Orientation dependence of magnetic properties on plastically deformed low carbon steel, *Studies in Applied Electromagnetism and Mechanics, Electromagnetics Nondestructive Evaluation*, IOS Press, 2013, in press, 査読有.
- ② 菊池弘昭, 笠水上剛, 佐藤悠貴, 冷間圧延した低炭素鋼の磁気特性における方向依存性, 第21回 MAGDA コンファレンス 2012 講演論文集, pp. 187-190, 2012, 査読無.
- ③ H. Kikuchi, Y. Kamada, S. Kobayashi, J. Echigoya, H. Watanabe, Characteristics of Barkhausen Noise and Permeability on Neutron Irradiated Pure Fe and Fe-Cu Alloy, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Volume 39 (1-4), pp. 609-614, 2012, 査読有.
- ④ 菊池弘昭, 鋼材の欠陥・劣化非破壊評価のための磁気利用センシングシステム, 平成24年電気学会全国大会講演集, Vol. 2, 2-S2(33)-(36), 2012, 査読無.
- ⑤ 菊池弘昭, 磁気利用センシングによる材質劣化・機械特性の非破壊評価, 第3回

検査・評価・保全に関する連携講演会資料, pp. 203-206, 2011, 査読無.

〔学会発表〕(計7件)

- ① 菊池弘昭, 笠水上剛, 佐藤悠貴, 冷間圧延した低炭素鋼の磁気特性における方向依存性, 第21回 MAGDA コンファレンス, 2012年11月21日, 東北大学, 宮城県.
- ② Y. Sato, H. Kikuchi, Magnetic NDE based on magnetostriction using laser displacement meter, *International Conference of AUMS(ICAUMS) 2012*, 2012年10月3日, 奈良県新公会堂, 奈良県.
- ③ H. Kikuchi, T. Kasamizukami, Y. Sato, Orientation Dependence of Magnetic Properties on Cold-rolled Low Carbon Steel, *The 17th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation 2012*, 2012年7月29日, Windsor Atlantica Hotel, Rio de Janeiro, Brazil.
- ④ 菊池弘昭, 鋼材の欠陥・劣化非破壊評価のための磁気利用センシングシステム, 平成24年電気学会全国大会, 2012年3月21日, 広島工業大学, 広島県.
- ⑤ 菊池弘昭, 磁気利用センシングによる材質劣化・機械特性の非破壊評価, 第3回 検査・評価・保全に関する連携講演会, 2011年12月16日, 大阪市立大学, 大阪府.
- ⑥ 菊池弘昭, 鎌田康寛, 小林悟, 越後谷淳一, 渡辺英雄, 中性子照射した Fe 及び Fe-Cu 合金の磁気特性, 第35回日本磁気学会学術講演会, 2011年9月27日-30日, 新潟コンベンションセンター, 新潟県, 27pD-19.
- ⑦ H. Kikuchi, Y. Kamada, S. Kobayashi and J. Echigoya, Characteristics of Barkhausen Noise and Permeability on Neutron Irradiated Pure Fe and Fe-Cu Alloy, *15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2011年9月7日-9日, Royal Continental hotel, Naples, Italy, PS1.69.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 弘昭 (KIKUCHI HIROAKI)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号: 30344617