

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 5 月 20 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(c)

研究期間：2009 年度～2011 年度

課題番号：21560448

研究課題名（和文）磁気センシングとシミュレーションによる材料経年劣化診断システムに関する研究

研究課題名（英文）Material Aging Diagnosis System using Magnetic sensing and Simulation

研究代表者

小島 史男 (KOJIMA FUMIO)

神戸大学・自然科学系先端融合研究環重点研究部・教授

研究者番号：70234763

研究成果の概要（和文）：

強磁性材料の磁気特性は、材料の内部組織や応力状態の変化に極めて敏感に反応することが知られている。本研究においては、強磁性材料の磁気計測によって経年劣化傾向監視を行う非破壊評価システムの研究開発を実施した。炭素鋼で作成された応力負荷試験材料のバルクハウゼンノイズ(BHN)と保磁力を測定し、材料の経時変化と磁気特性の相関関係を導出した。BHN 出力と保磁力の経年変化に関する特性曲線を導出し、その特徴抽出をファジィルールによって記述し、実験データを用いて経年劣化診断の有効性が確認できた。この成果により、従来から知られていた劣化事象と磁性の特性変化を磁気計測技術により取得し、計算知能にもとづくシミュレーション技術を援用することで劣化の傾向監視の可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：

It is well known that the magnetism of strong magnetic materials is extremely sensitive with respect to the change of microstructure and to the residual-stress variation. In this study, a non-destructiveness evaluation system for aging properties was developed based on magnetic measurements of the ferromagnetic materials. The coercive force and Barkhausen noise (BHN) were evaluated using carbon steel sample specimens of stress loading. The characteristic curves were then derived by the measured magnetic properties. A fuzzy expert system related to magnetic properties was consequently developed with the decision rules of material aging process. The efficacy and validity of the proposed system were shown in the experimental works

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測工学, 信号解析, 非破壊検査, 磁性, システム工学, 状態監視

1. 研究開始当初の背景

我が国においては平成 17 年度に第 3 期の科学技術基本計画が定められ「安全・安心な社会の構築」に向けた技術基盤の整備が重点項目に含まれている。世界でも有数の地震国である日本では、原子力発電プラントをはじめとして、鉄道や道路等の高架建造物、トンネル、橋梁、高層ビルに関する保守技術の高度化は今後いっそう重要になってくると考えられる。これらの社会インフラ設備に使用される材料システムの多くは鉄鋼材料を基本構造に持っており、鉄鋼材料の劣化はシステムの安全に直接関わってくる。これまで建造物の診断は目視検査や超音波探傷法をはじめとするさまざまな非破壊検査法により行われているが、今後建造物の高経年化が進んでいくと、検査対象は増加していく一方で検査者の不足が深刻な問題となってくる。また現在の大規模建造物においては、検査箇所へのアプローチが困難な場面が増えてくることが予想される。したがって、材料システムの経年劣化による状態変動・異常情報をモニタリングし、危険事象の予防に努めるいわゆる予防保全技術の確立が望まれる。このことを実現可能にするには、建造物に多数のセンサを配置し、遠隔的に建造物の材料組成の変形を検知して、予測不可能な地震の揺れによって発生する材料内部の変形や、材料の経年劣化による金属疲労等のレベル評価が可能な診断システムの構築が必要と考える。

2. 研究の目的

磁気センサの配置と材料組成の感度を計る電磁場非破壊評価計算シミュレータを実時間で結合し、人間に具備している多数の感覚器と神経網および脳との連携による「痛みのわかる」神経網に相当するネットワーク型材料劣化予測診断システムの構築をはかる。提案する研究においては、基盤研究(C)平成 17 年度～20 年度「電磁場逆問題解析による材料劣化予測診断システムに関する研究」(研究代表者)において得られた研究成果の垂直展開をはかる。

3. 研究の方法

オンサイトでの磁気測定が可能な磁気センサによって、鉄鋼材料の経年劣化事象と磁化過程の相関関係の定量的評価を行う状態監視技術の確立に向けた試験的研究を以下の方法で実施した。

(1) 研究初年度の実施方法

マイナーループによる磁気特性評価と材料の劣化事象との関連性を実証試験で確認し、オンサイトで実現可能な材料評価法の確立に向けた新技術の確立と実施に向けた技術課題

の抽出のために以下の手順で研究を実施した。

- ① 鉄鋼材料試験片による材料劣化進展と磁気的特性変化の相関性の確認
- ② 劣化事象の時間進展定量評価法の構築を目的とした劣化診断データベースの構築
- ③ 小型磁気センサネットワークによる材料劣化経時変化の状態監視技術への適用可能性の検証

(2) 研究次年度の実施方法

欠陥発生箇所の状況推定と変化の予測診断を行なうシステムの構築への準備として下記の手順で研究を実施した。

- ① 統計量にもとづく磁気材料経年劣化評価法の計算的検討
- ② 疲労試験材料に対する磁気異方性の検出感度の実験的検討
- ③ 遠隔監視のためのセンサネットワーク構築の準備調査

(3) 研究最終年度の実施方法

研究最終年度においては、鉄鋼材料の経年劣化評価においては常時監視を行うことで過去の検査履歴と現在の測定値の変化を調べる傾向監視を行うことを目的として、応力を付加して歪みを発生させた材料(SS400)のBHNと保磁力の測定データから、ファジィ推論エンジンを用いることで劣化レベルの評価を行うことで劣化レベルの傾向監視を実現する方策について検討した。

4. 研究成果

(1) 材料の経年劣化に敏感な磁気特性

磁化曲線から得られる強磁性材料の磁気的性質が残留応力等による材料内部の微細構造変化と密接な関係があることはよく知られている。図 1 は圧延率の異なる試験体での保磁力の変化を測定したものである。保磁力は転位密度の大きい領域で飽和することから、き裂発生直前の情報としては精度が低いことや、精度の高い磁化率を得るためには材料を飽和磁化させる大きな磁界が必要となることから、保磁力や磁化率を単一で材料の劣化指標として利用するのは困難である。そこで本研究では、保磁力に加え、強磁性材料の微細構造変化に非常によく反応し、転位の増加と共に増加することが知られているバルクハウゼンノイズを用いた経年劣化評価を併せて用いることとした。バルクハウゼンノイズは強磁性体構造用鋼の特性解析や非破壊検査の手段として広く使われている。強磁性材料が磁化する際、磁壁が結晶粒境界や含有物、転位とい

った微細構造の障害物によって滑らかに移動することができず、不連続に移動するとき、図2に示すようなバルクハウゼンノイズ(BHN)と呼ばれる磁気ノイズが発生する。

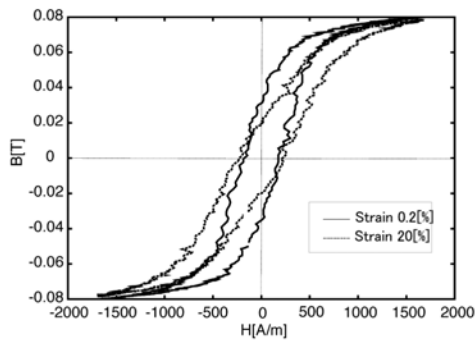


図1 圧延材料試験体の保磁力

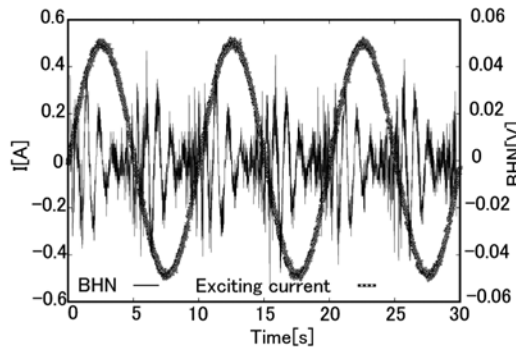


図2 バルクハウゼンノイズ

(3) 研究室実験：経年劣化試験体の磁気計測

①磁気センサと試験体

実験で用いた磁気ヨーク型プローブの概要を図3に示す。用いた磁気ヨークは珪素鋼で、直径0.26mmのエナメル線を350回巻いたものを励磁コイルとした。また直径0.26mmのエナメル線を100回巻いたものを保磁力用検出コイルとし、直径4.47mmのフェライトコアコイルに直径0.1mmのエナメル線150回巻いたものをバルクハウゼンノイズ用検出コイルとした。試験片は引張り試験により歪みを付与した7種類のSS400であり、引張り方向と平行に測定した。

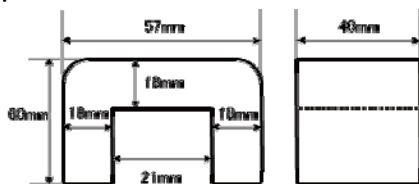


図3 磁気ヨークの寸法

② 保磁力の測定

非破壊検査を想定して、検出コイルを磁気ヨーク端部に巻いて測定を実施し、これと直巻きコイルにより測定した保磁力を基準デー

タとして、非破壊検査による保磁力の精度を確認した。図4は切り出し検査と非破壊検査による保磁力を比較したグラフを図示したものである。この結果から双方とも歪みの増加に伴い、保磁力が増加している傾向が見られる。

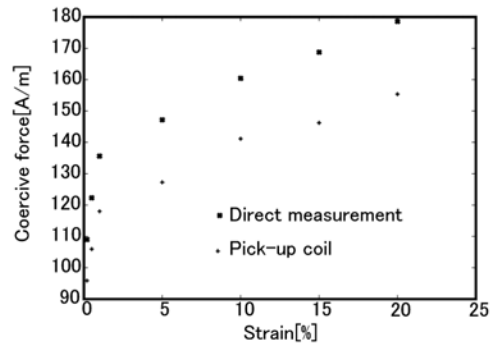


図4 劣化試験体と保磁力の関係

③ バルクハウゼンノイズの測定

バルクハウゼンノイズは非常に微弱な信号であることを考慮して、測定実験においては、ピックアップコイルにより誘起された起電力を増幅し、低周波を除去することで信号検出を行った。図5に測定した結果得られたBHNを示す。この結果から、BHN出力は最初増加するが、歪み0.5%以降急激に減少し、歪みの増加に伴いなだらかに減少する傾向にあることがわかった。

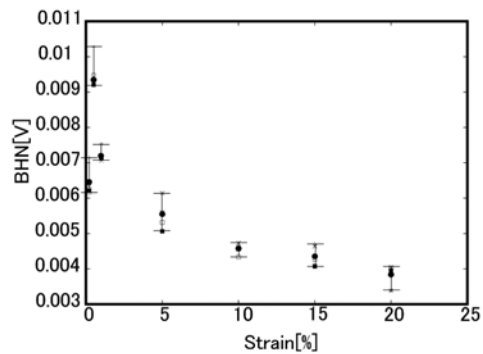


図5 劣化試験体とBHNの関係

(4) 材料経年劣化診断システムの開発

これまでの成果を通じて、バルクハウゼンノイズ(BHN)や保磁力などの磁気特性の定量的な評価によって応力と材質両方の情報を同時に測定しうる総合的かつ実用的な非破壊評価が可能であることが明らかとなった。この結果をふまえて、ファジイエキスパートシステムに基づく診断法の開発を行い、実機適用試験を実施した。

① ファジィルールの作成

それぞれの磁気特性が材料劣化をどの程度示しているかは未だ解明されていないこと、また、被試験体によって受ける力や環境が様々であるため、定量評価を行うことが難しいことから、正確な対象とする集合の境界が明確でない場合に用いるファジィ集合の概念を劣化診断システムに導入する。経年劣化試験体の磁気測定結果から、経年劣化に関わる特徴抽出のための特性曲線を作成し、作成した特性曲線からファジィルールを設定し、劣化レベルの診断を行うことで、経年劣化評価を行う。作成するファジィエキスパートシステムは、入力を保磁力とBHN、出力を劣化レベルとするシステムである。

特徴抽出のための特性曲線を作成し、作成した特性曲線からファジィルールを設定し、歪みによるファジィルールの抽出と同じ手続きで劣化度の診断を行った。求めた特性曲線から、定検期間当たりのBHN出力の減少量が小さいと劣化が進行すること、また、保磁力の増加量が小さいと劣化が進行していることが明らかになった。このことから、歪みに応じた劣化度評価の3つの知識に加えて、時間経過に応じた磁気特性の傾向についてさらに2つの知識を加え適用可能性を検証した。

図6および図7は保磁力・BHN測定により得られた結果から作成した特性曲線を示している。BHN出力が増加傾向なら劣化は初期段階であり、その後BHN出力が減少傾向になると、BHN出力が小さくなればなるほど劣化が進行していくことがわかる。一方、保磁力は劣化に伴い増加する傾向にある。これらの知識より、ファジィIF-THENルールを作成できる。図8および図9はここで用いたメンバーシップ関数である。それぞれのしきい値は実験によって得た知見から考えられ得る値を仮定した。

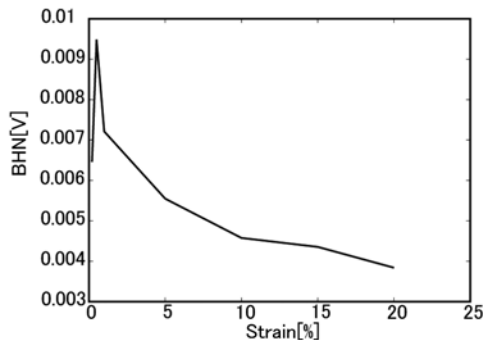


図6 劣化に関するBHN特性曲線

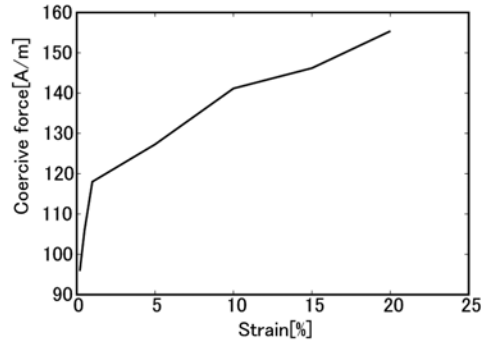


図7 劣化に関する保磁力特性曲線

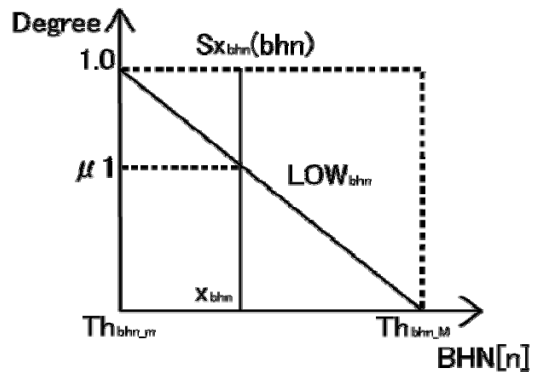


図8 BHNに関するメンバーシップ関数

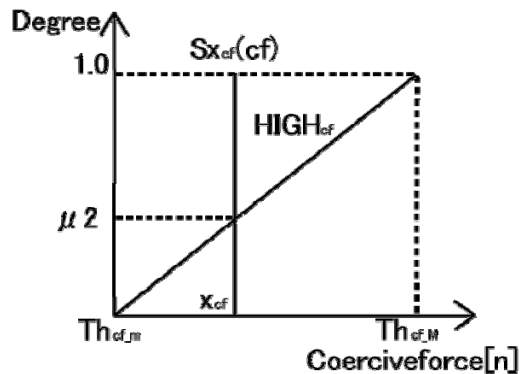


図9 保磁力に関するメンバーシップ関数

② 検証実験とその結果

経年劣化診断においては、長期の常時監視を想定しているため、定期検査データを用いて磁気特性の経年変化による評価指標が得られると考えられる。そのため、定期点検時毎の歪みの変化を調べることができれば、よりの確な劣化レベルの診断が可能になると考えられる。ここでは歪みの増加にもとづく劣化度診断システムの方法を定期点検にもとづく診断システムへの適用を試みた。診断システムの開発には、長期にわたる材料の経時変化に関するデータが必要となる。本研究においては、材料データベースサイトMatNavi

(<http://mits.nims.go.jp/>)による劣データシートでの低サイクル疲労における応力変化とSS400の公称応力-公称歪み曲線から、時間経過による歪みの変化のデータを作成した。基準データの歪みとその劣化レベル、劣化同定による劣化レベルに応じた歪みの比較結果を表1に示す。また図10は劣化レベルに応じた基準データの歪みと同定した歪みの比較結果を示したものである。劣化中期での誤差は大きくなったが、それぞれの劣化レベルにおける点で、次の段階の劣化レベル時の歪みを超えることはなかったため、作成したファジィエキスパートシステムの経年劣化レベル診断への適用可能性が確認できた。

表 1

Strain[%]	$\mu_{degradation}$	Identified strain[%]	Error[%]
2.000	0.164	2.003	0.172
4.000	0.207	4.004	0.096
6.000	0.310	6.327	5.453
8.000	0.362	9.080	13.501
10.000	0.419	11.868	18.684
12.000	0.447	13.447	12.061
14.000	0.465	14.497	3.553
16.000	0.494	15.956	0.290
18.000	0.532	18.838	0.899
20.000	0.573	19.767	1.167

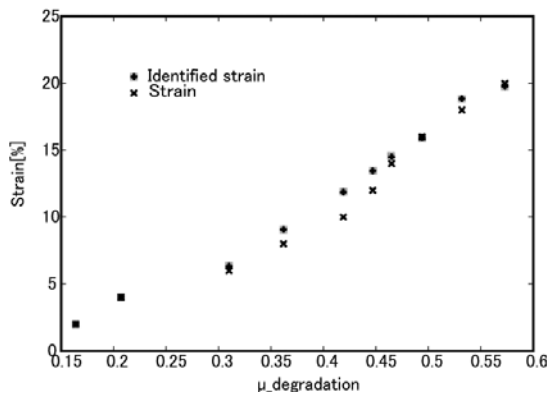


図 10 基準データと同定結果の比較

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 10 件) (総計 21 件)

- ① 小坂大吾・小島史男・梅谷浩介, 配管厚さ測定への電磁超音波探触子の適用, 日本保全学会論文集, 査読有, 10 巻, 2012, 37-44
- ② Fumio Kojima and J. S. Knopp, Inverse

problem for electromagnetic propagation in a dielectric medium using Markov Chain Monte Carlo method, International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC), 査読有, Vol. 8, 2012, 2339-2346

- ③ 田川明広, 小島史男, ハイブリッド計測による配管ヘルスマニタリング法の研究, 日本保全学会論文集, 査読有, 9 巻, 1 号, 2010, 45-50
- ④ Thanh Duong Nguyen・小島史男, データベースと Greedy 探索を用いた渦電流探傷法における欠陥同定, システム制御情報学会論文誌, 査読有, 23 巻, 2010, 74-82
- ⑤ Akira Tagawa, Koichi Fujiki, and Fumio Kojima, Investigation of an on-line pipe wall defect monitoring sensor, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, 33 巻, 2010, 639-647
- ⑥ Thanh Duong Nguyen and Fumio Kojima, Identification of sub-surface defect parameters in plates using electromagnetic acoustic interaction, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, 33 巻, 2010, 1009-1015
- ⑦ Daigo Kosaka, Fumio Kojima, and Hiroshi Yamaguchi, Quantitative evaluation of wall thinning in pipe wall using electromagnetic acoustic transducer, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, 33 巻, 2010, 1195-1200
- ⑧ Kenichi Ohshima and Fumio Kojima, Evaluation of geometrical shape in fatigue cracking, 査読有, 33 巻, 2010, 1211-1218
- ⑨ Daigo Kosaka, Fumio Kojima, Hiroshi Yamaguchi, and Kousuke Umetani, Monitoring system for pipe wall thinning management using electromagnetic acoustic transducer, E-Journal of Advanced Maintenance, 査読有, 2 巻, 1 号, 2010, 34-42 (2011 年度保全学会論文賞受賞論文)
- ⑩ Thanh Duong Nguyen and Fumio Kojima, Forward method for crack profiles identification using reduced order decomposition techniques arising in eddy current testing, SICE Journal of Control, Measurement and System Integration, 査読有, 2 巻, 6 号, 2009, 401-407

〔学会発表〕(計 12 件)(総計 49 件)

- ① Fumio Kojima, Inverse methodologies for structural monitoring using electromagnetic measurements, International Workshop on Simulation and Modeling related to Computational Science and Robotics Technology (SiMCRT2011), 2011.11.2, Kobe
- ② 小島史男・大平拓, 配管検査技術に関する知見適用化の取り組み, 日本機械学会 2011 年度年次大会 先端技術フォーラム, 2011 年 9 月 14 日, 東京
- ③ Fumio Kojima, Recent trends on condition monitoring using electromagnetic measurements, The 15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2011), 2011.9.7, Napoli, Italy (基調講演)
- ④ 小島史男・小坂大吾・田中里香, ファジイ推論を用いた材料経年劣化に関する電磁非破壊評価法, 第 21 回インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN2011), 2011 年 9 月 1 日, 神戸
- ⑤ 小島史男, 運転中モニタリングとハイブリッドセンシング, 日本鉄鋼協会 計測・制御・システム工学部会シンポジウム「センサ情報の高度処理技術」, 2011 年 6 月 8 日, 福山 (特別講演)
- ⑥ Kenichi Ohshima and Fumio Kojima, Evaluation of subsurface shape of fatigue crack with eddy current signals, The 16th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE2011), 2011.3.11, Chennai, India
- ⑦ Fumio Kojima, Smart condition monitoring techniques for implementing reliability centered maintenance in nuclear power plants, The 2010 International Symposium on Intelligent Systems (iFAN2010), 2010.9.26, Tokyo (招待講演)
- ⑧ 小島史男・小坂大吾・梅谷浩介, 配管減肉予測および検査技術の高度化 (17) 電磁超音波法による配管減肉定量評価法の有効性検証, 日本原子力学会 2010 年秋の大会, 2010 年 9 月 16 日, 札幌
- ⑨ Fumio Kojima, Thanh Duong Nguyen, and Hiroishi Yamaguchi, Shape identification on pipe-wall thinning using electromagnetic acoustic transducer, The 37th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2010.7.19, San Diego, USA
- ⑩ 小島史男, 電磁非破壊試験と逆問題解析の統合化による材料欠陥寸法計測, 日本

鉄鋼協会第 159 回春季講演大会, 2010 年 3 月 29 日

- ⑪ Fumio Kojima, Sizing methodology for structured materials of NPPs using electromagnetic non-destructive testing, The 20th Memorial Annual Conference of Indian Nuclear Society (INSAC-2000), 2010.1.6, Chennai, India (基調講演)
- ⑫ Fumio Kojima, New trends in inverse analysis using data assimilation and application to electromagnetic non-destructive evaluation, The 14th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM' 2009), 2009.9.22, Xian, China (招待講演)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小島 史男 (KOJIMA FUMIO)
神戸大学・自然科学系先端融合研究環重点
研究部・教授
研究者番号: 7 0 2 3 4 7 6 3

(2) 研究分担者

小林 太 (KOBAYASHI FUTOSHI)
神戸大学・大学院システム情報学研究科・
准教授
研究者番号: 5 0 3 1 4 0 4 2

(3) 連携研究者

菊池 弘昭 (KIKUCI HIROAKI)
岩手大学・工学部・准教授
研究者番号: 3 0 3 4 4 6 1 7
(H21)