

平成21年6月1日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17560373
 研究課題名（和文） 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
 研究課題名（英文） Studies on Nondestructive Evaluation System for Material Degradation Using Electromagnetic Inverse Analysis
 研究代表者
 小島 史男 (KOJIMA FUMIO)
 神戸大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：70234763

研究成果の概要：材料システムの外面的な変化が進む以前の微細構造の変化から材料の余寿命を予測する非破壊評価技術を確立する。劣化のメカニズムに関する理論的・実験的根拠にもとづき、構造物で使用される金属材料の経年劣化に伴う疲労の蓄積を磁化過程における磁束密度の経時変化から捕捉し、モデルにもとづく逆問題解析技術を援用して、材料の局所的な劣化進展評価を可能とする、高精度非破壊診断システムの開発をめざす。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	2,000,000	0	2,000,000
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	100,000	30,000	130,000
年度			
総計	3,500,000	180,000	3,680,000

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、解析・評価、磁性、格子欠陥、原子力エネルギー、非破壊検査、有限要素法、信号解析

1. 研究開始当初の背景

原子炉、橋梁、鉄道施設、船舶等の鉄鋼構造物の経年劣化が、社会システムの安全、安心を確保するうえで重要な問題となってきた。これら既存施設の長期運用の必要性も増大してきており、施設の安全な運用を確保するうえで、鉄鋼構造物の材料劣化診断システムの開発が急務となってきた。しかしながら現状の非破壊検査は材料の減肉、応力腐食割れ、疲労き裂など、欠陥の存在を調べることに主眼がおかれ、欠陥の発生を予知できる一般的な技術は見あたらない。このよう

な状況で、われわれはこれまでフランス、ドイツ、アメリカと連携して毎年「電磁非破壊評価に関する国際ワークショップ」(eNDE)を開催し、電磁現象を利用した非破壊評価技術の検証とベンチマーク問題等の研究情報を交換してきた。2003年には本研究主担当者が実行委員長として表記の第7回の国際ワークショップ(eNDE-Kobe)を開催し、「材料劣化評価に関する新しい動向」と題した特別セッションを設けた。さらに本研究分担者は、2006年には、「電磁現象と劣化評価技術」をテーマにして、第11回国際ワークショップを開催し

た(eNDE-Morioka)。これら一連の研究活動において、本研究プロジェクト提案の担当者は電磁場に関する非破壊評価技術に逆問題解析と呼ばれる新しい信号処理技術を組み合わせ、高度な診断技術を構築する研究開発を進めている。一方、分担者は磁性材料の転位密度の変化と磁性パラメータの強い相関にはやくから着目し、材料劣化に鋭敏な磁性パラメータの存在を理論・実験の両面から確認しており、非破壊評価や材料システムの品証への応用が現在試みられている。このような経緯のもとで、担当者と分担者とが協力することにより、新しい磁性パラメータを効率的に検出できるセンサの開発、および逆問題解析による高度な信号処理技術とを統合化することにより、新しい構造物の劣化診断技術の可能性がでてきた。

2. 研究の目的

提案する材料の劣化診断とは、材料システムの外面的な変化が進む以前の材料の微細構造の変化を高感度な磁気センサで検知し、材料の余寿命を予測する革新的な非破壊評価技術を確立することにある。従来の劣化診断技術では、シャルピー衝撃試験の評価など、材料の表層の機械的性質から間接的に診断する方法がおもに用いられてきた。提案する研究は、劣化のメカニズムに関する理論的・実験的根拠にもとづく、新しい非破壊検査技術の実用化をめざすところに学術的な特徴がある。金属は外部からの力によって、時間とともに内部に「転位の堆積」が起こる。この現象を一般に“金属疲労”と呼び、構造物の経年劣化にはこの金属疲労の蓄積を何らかの方法で測る必要がある。研究分担者らは、金属材料の劣化の指標である「転位」と「磁性」との間には密接な相関関係があることをすでに明らかにしている。この両者の関係と劣化のメカニズムの関連性から、金属材料の磁性を計測する事によって材料内部の劣化レベルを調べることが期待できる。提案する新しい非破壊評価技術は、このような劣化と磁性の相関性に関する理論的・実験的知見を直接工学に応用することを目的としている。材料の磁化過程における磁束密度の変化を材料の表層に密着されたピックアップコイルにより検出し、このデータを逆問題解析技術により、材料内部の局所的な磁気パラメータの経時変化を高モニタリングすることにより材料劣化診断を実施する。検査機器が検査材料表面を移動することにより取得される2次元の磁束密度のイメージは、新たに開発する検査シミュレータと連動して、材料の劣化の進行度評価デー

タに処理・変換され、検査者に迅速精確な診断情報を提供することをめざす。

3. 研究の方法

(1) 電磁場逆解析モデルおよび数値解析コードの整備

磁気ヒステリシスループと鋼材における金属疲労に関して相関を用いて、磁性パラメータを取り込んだ磁性材料の磁化過程の解析モデルの開発、およびその数値解析コードを整備する。有限要素法による非線形オイラー方程式による解析コードを作成する。次に研究分担者から提供を受けた測定データによる解析モデルの改良を行う。劣化に鋭敏な磁性パラメータに関連して、検査のための入出力応答試験を実施し、非破壊評価解析モデルに埋め込む応答性能のよい指標を求め、数値コードの改良を行う。

(2) 材料劣化評価のための検査システムのプロトタイプ構築

磁気ヨークとバイポーラ電源、フィルタより構成された非破壊検査テストベッドを用いて、鉄鋼材料の結晶異方性と磁気特性の相関関係を調べる。鉄鋼の加工工程である冷間圧延によって材料内部の転位密度が増加する事に着目し、開発した検査システムにより冷間圧延各工程における鉄鋼材料のマイナーループ計測を行い、シミュレータの性能評価および材料劣化評価のための磁性パラメータの感度を調査する。冷間圧延各工程の試験材によるマイナーループ磁気計測データの特徴量を抽出し、材料劣化関係データベースの作成を行う。

(3) 材料の経年劣化非破壊評価システムの有効性検証

マイナーループ磁気特性と材料劣化の相関関係データベースから磁性パラメータによる材料の経年劣化評価のための検査方式の検討を行う。開発した非破壊検査テストベッドと非破壊検査シミュレータとを統合化し、磁気計測から得られたデータとシミュレーションによって得られたデータを比較することで、材料劣化パラメータを推定する計算アルゴリズムを構築し、材料劣化モニタリングのための検査技術・計算技法を提案する。提案手法により実システムにおける材料劣化モニタリング技術への適用可能性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 非線形電磁場逆解析による強磁性材料の劣化評価パラメータ分布推定

強磁性材料の劣化評価を行うには、保磁力より精度が良く、飽和漸近領域における磁化率より測定しやすい磁氣的物理量から、転位密度に関係する劣化評価パラメータを定義す

る必要がある。ここでは

$$c = \frac{1}{M_s^2} \left(\frac{\partial E_\sigma}{\partial \theta} \right)^2 \quad (1)$$

を材料劣化の指標パラメータとする。ただし、 M_s は自発磁化の大きさ、 E_σ は転位による磁気異方性エネルギー、 θ は転位周りの磁気モーメントの方向を表す。このとき保磁力付近の磁化率 χ_c は劣化評価パラメータ c を用いて

$$\chi_c = \left(\frac{\partial M}{\partial H} \right) = \frac{c}{H^3} \quad (2)$$

と記述できる。ここで、材料劣化に伴う転位密度と磁化率の相関関係から、転位密度と劣化評価パラメータ c の間にも相関関係が成り立つと言える。よって、強磁性体の磁束密度 B と磁場 H の関係は、劣化評価パラメータ c と磁場 H の非線形関数 $M(c, H)$ を用いて

$$B(c, H) = \mu_0 H + M(c, H) \quad (3)$$

と記述できる。 μ_0 は真空透磁率である。材料の劣化が進行するに伴って c パラメータも増加することが実験的に確認できている。図1に示すように2種類のB-H曲線の実測データをもとに、 c パラメータの増加に伴うB-H曲線の推移を補間する近似B-H関数曲線を導入する。簡単のため空間二次元で検査環境のモデリングを行う。磁気ベクトルポテンシャル A により検査システムは検査環境の境界条件のもとで、次の二次元直交座標系での静磁場方程式により記述できる。

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x_2} \right) = -J \quad (4)$$

磁気抵抗率 ν は材料劣化評価パラメータ c と磁気ベクトルポテンシャル A の関数でつぎのように与えられる。

$$\nu = \begin{cases} \nu(c; |\nabla \times A|^2) & \text{in sample} \\ \nu_{yoke}(c; |\nabla \times A|^2) & \text{in yoke} \\ 1/\mu_0 & \text{in air} \end{cases} \quad (5)$$

ヨーク端部に配したピックアップコイルからコイル内部を鉛直方向に鎖交する磁束密度を検出することができるので、観測モデルは

$$Y(c) = H \left(-\frac{\partial A}{\partial x_1} \right) \quad (6)$$

で記述できる。検査領域における c パラメータの分布を図2のように階段関数で与えたとき、観測データと検査システムのモデルから

劣化評価の推定値を求めることが可能となる。図3は最小自乗法により求めた劣化評価の分布の1例である。なお計算実験においては、シミュレーションデータを用い、Powell法にもとづく計算推定アルゴリズムを用いている。

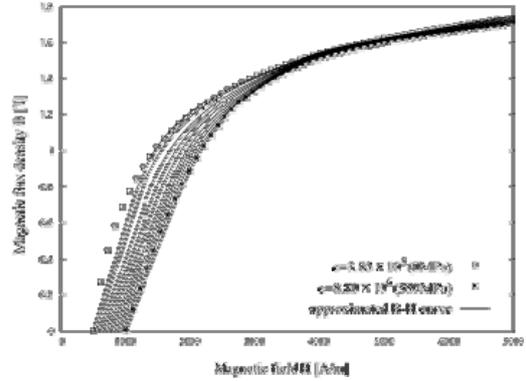


図1 B-H曲線と c パラメータ

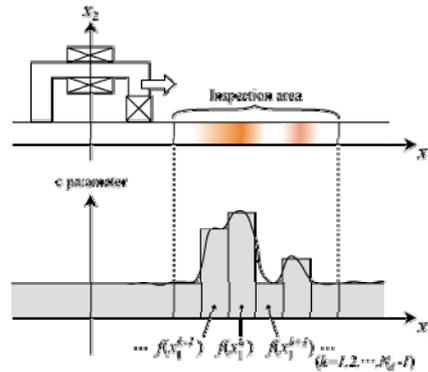
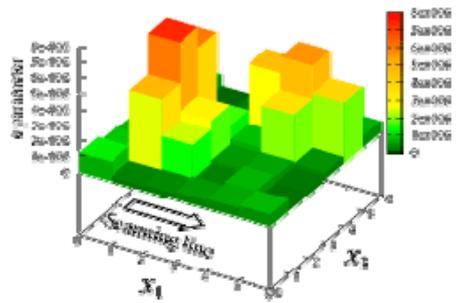
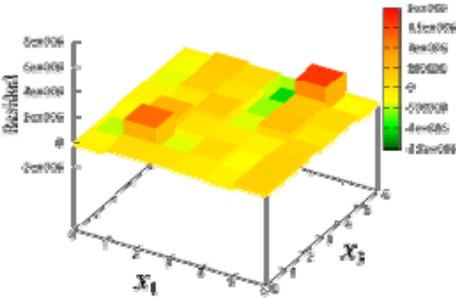


図2 劣化評価のパラメータ表示



(a) 推定分布(1%ノイズ)



(b) 残差

図3 計算実験1

(2) マイナーループを用いた非線形電磁場逆解析法による強磁性材料の劣化推定

原子炉圧力容器の低合金鉄鋼を用いた磁化曲線測定に関して、ヒステリシス曲線の特徴づける c パラメータにもとづくパラメータ推定を提案し良好な推定結果が得られた。しかしながら、実システムでの劣化評価への適用には、多くの技術課題が存在する。一般的に検査の対象とする構造物においては磁気ヒステリシスをとることは困難な場合が多い。最近マイナーヒステリシス曲線により劣化評価関を行うことでこの課題を解決する研究が注目されている。本研究では磁気センサを用いて得られた磁場情報からマイナーヒステリシス曲線の特徴づける磁気パラメータを推定し、低磁場領域における高感度な材料劣化の推定を目指すこととした。図4に示すようなマイナーループのパラメータ群のうち感度の高いパラメータにより

$$Deg = 0.5 \left(\frac{B_a^* - B_a^-}{B_a^+ - B_a^-} + \frac{\chi_a^* - \chi_a^-}{\chi_a^+ - \chi_a^-} \right) \quad (7)$$

で劣化の進行度を評価する。ここで、 B_a^+ および χ_a^+ はそれぞれ得られた劣化進行後の最大印加磁場における磁束密度及びその時の磁場増加方向に対する傾き、 B_a^- と χ_a^- はそれぞれ得られた劣化進行以前の材料健全状態における最大印加磁場の磁束密度及びその時の磁場増加方向に対する傾きである。劣化進行度(7)は0から1の範囲を示し、0であれば材料健全状態を表し、1は材料劣化が十分に進行した状態を意味する。図5に劣化進行度の評価を実施するのに用いたマイナーループモデルと実験データの比較を示す。このようなマイナーループの情報を用いて、前節と同様の非破壊検査シミュレータを用いて材料の劣化進行度を評価した。マイナーループでは調整すべきパラメータが増加したので、パラメータ最適化についてはTabuサーチを用いた。図6に計算実験結果の1例を示す。

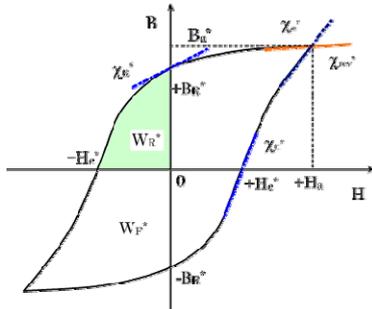


図4 マイナーループと劣化パラメータ群

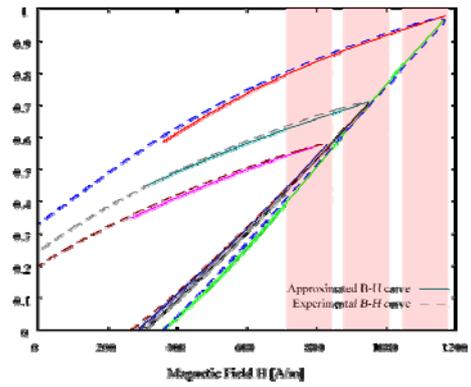
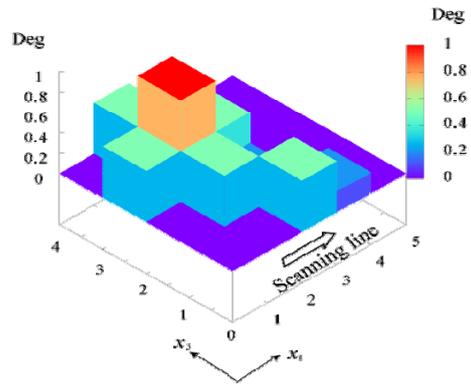
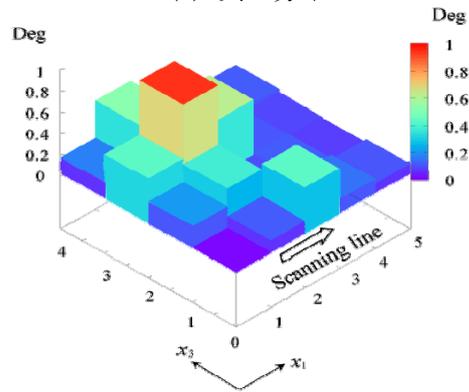


図5 マイナーループの比較



(a) 真の分布



(b) 推定分布 (5%ノイズ)

図6 計算実験2

(3) 磁気計測と非線形電磁場解析の統合化による磁性材料のモニタリング

図7に測定の概要、図8に回路構成を示す。磁気プローブは磁気ヨーク、励磁コイル、受信コイルで構成されている。磁気ヨークはケイ素鋼でできており、励磁コイルには直径0.4mmの銅線で、巻き数は1000回とした。またピックアップコイルには直径0.26mmの銅線を用い、巻き数は50回とした。試験材料としては強磁性体のS15Cを使用し、冷間圧延の圧延率が5%、20%、40%の状態及び圧延無しの状態の4種類の試験材料に対して測定

を行った。図9に実験で用いたプローブと試験材料を示す。また、得られた電圧データと磁化曲線の例を図10および図11に示す。圧延率が高くなるにつれ出力電圧のピーク値が減少し、磁化曲線が傾斜していく様子がわかる。最後に鉄鋼の加工工程である冷間圧延

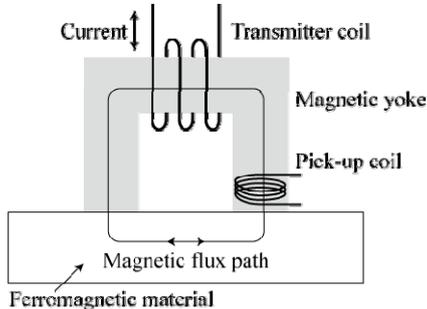


図7 測定の概要

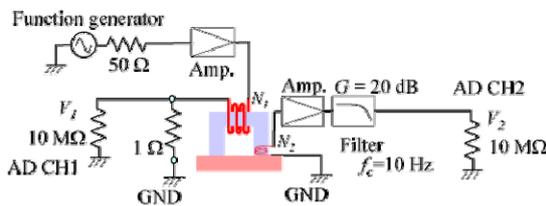


図8 回路構成



図9 磁気プローブと試験体 (S15C)

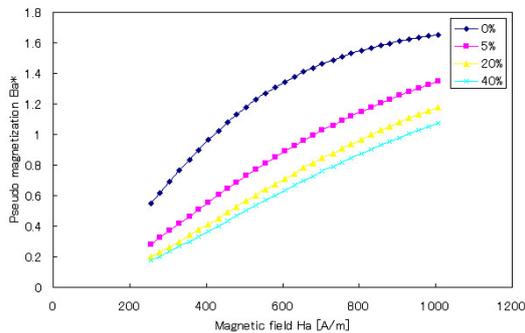


図10 擬残留磁束密度 B_a^* と圧延率

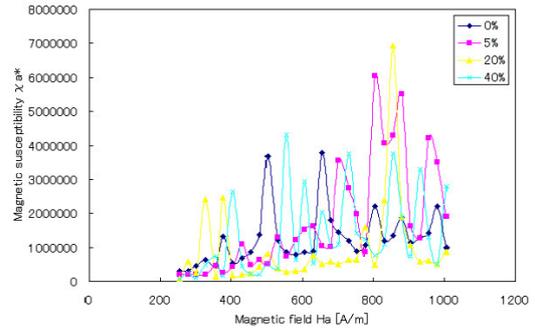


図11 擬磁化率 χ_a^* と圧延率

によって、材料内部の転位密度が増加する事に着目し、冷間圧延各工程の試験材によるマイナーループ磁気計測データの特徴量を抽出し、材料劣化関係データベースの作成を行った。材料劣化データベースから磁性パラメータによる材料の経年劣化評価のための検査方式の検討を行い、最後に開発した非破壊検査テストベッドと非破壊検査シミュレータとを統合化し、有効性検証のための実験を行った。以上の方法により、従来は困難であった「その場計測による磁気特性評価」を確実なものとし、提案手法により実システムにおける材料劣化モニタリング技術への適用可能性が明らかになった。

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11件)

- ① F. Kojima and T. D. Nguyen, Crack Profiles Identification using Reduced Order Computational Method Based on ECT Signals, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 30, 2009, 印刷中 査読有
- ② K. Ohshima and F. Kojima, Three Dimensional Shape Recovery of Fatigue Crack using Eddy Current Testing Signals, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 30, 2009, 印刷中 査読有
- ③ A. Ausri and F. Kojima, Estimation Technique for Characterizing Inhomogeneous Conducting Zone related to Eddy Current Testing, Transaction of JASCOME, Vol.7, 2008, 213-218 査読有
- ④ S. Kobayashi, H. Kikuchi, S. Takahashi, K. Ara, and Y. Kamata, Investigation of Neutron Radiation Effects on Fe Model Alloys by Minor Hysteresis Loop Analysis, Studies in Applied

- Electromagnetics and Mechanics, Vol. 28, 2007, 217-224 査読有
- ⑤ S. Takahashi, S. Kobayashi, Y. Kamada, H. Kikuchi, and K. Ara, NDE Method using Minor Hysteresis Loops in Ferromagnetic Materials, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 28, 2007, 209-216 査読有
- ⑥ A. Ausri and F. Kojima, Computational Method for Estimating Deep-lying Profiles of Stress Corrosion Cracking arising in Eddy Current Testing, Transaction of JASCOME, Vol. 7, 2007, 85-90 査読有
- ⑦ F. Kojima and A. Ausri, Identification of Stress Corrosion Cracking of SUS Samples arising in Electromagnetic Nondestructive Testing, Journal of Inverse and Ill-posed Problems, Vol. 15, 2007, 799-812 査読有
- ⑧ F. Kojima and R. Nishiyama, Nondestructive Evaluation for Material Degradation of Steel Sample using Minor Hysteresis Loop Observation, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 28, 2007, 243-250 査読有
- ⑨ F. Kojima and T. Fujioka, Quantitative Evaluation of Material Degradation Parameters using Nonlinear Magnetic Inverse Problems, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 25, 2007, 157-163 査読有
- ⑩ 小島史男, 依藤大輔, 伊東一文, L-Curve法と適応正則化併用法による磁気画像の形状識別同定法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 42-7, 2006, 705-711 査読有
- ⑪ F. Kojima, H. Yabuki, and N. Kubota, Identification of Multiple Cracks for SQUID-based NDE Systems using Virus-Evolutionary Computation, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 26, 2006, 128-135 査読有
- [学会発表] (計 8 件)
- ① F. Kojima, Condition Monitoring for Static Apparatus of NPPs: Role of Modeling and Simulation, The Asian Workshop on Maintenance Technology for Nuclear Power Plant, Sendai, January 20, 2009.
- ② 菊池弘昭・荒克之・鎌田康寛・小林悟、磁気ヨークを用いた非破壊評価におけるインピーダンス解析、第17回「電磁現象

- および電磁力に関するコンフェレンス」、日立、2008年11月20日
- ③ K. Ohshima and F. Kojima, Characterization of Deep-lying Fatigue Cracking Arising in Eddy Current Testing, SICE Annual Conference 2008, Chofu, August 21, 2008.
- ④ F. Kojima and Y. Soen, Crack Sizing Methodologies using Trust Region Method Arising in Eddy Current Testing, SICE Annual Conference 2008, Chofu, August 20, 2008
- ⑤ 小島史男, 計測とシミュレーション技術を統合化したプラント状態監視技術の高度化について, 日本鉄鋼協会第139回制御技術部会大会・特別講演, 鹿島、2008年6月13日
- ⑥ 小島史男, 逆問題解析の原子力プラント非破壊検査技術への応用, 日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会シンポジウム「安全、設備保全の考え方の新潮流」・招待講演, 倉敷、2007年11月9日
- ⑦ F. Kojima and T. D. Nguyen, ECT Database and Greedy-Search Inverse Analysis for Crack Shape Recovery Arising in Eddy Current Testing, Proceedings of SICE-ICASE Joint International Conference 2006, Busan, October 20, 2006
- ⑧ 小島史男 磁気計測データの逆解析による欠陥部定量評価の研究、日本鉄鋼協会第151春期講演大会、東京、2006年3月22日
- [図書] (計 1 件)
- ① F. Kojima and D. V. Phong, Science and Technology Publishing House, Applied Electromagnetics and Mechanics, 2006 559 頁
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
小島 史男 (KOJIMA FUMIO)
 神戸大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：70234763
- (2) 研究分担者
小林 太 (KOBAYASHI FUTOSHI)
 神戸大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：50314042
高橋 正氣 (TAKAHASHI SEIKI)
 岩手大学・工学部・教授
 研究者番号：5003851
菊池 弘昭 (KIKUCHI HIROAKI)
 岩手大学・工学部・准教授
 研究者番号：30344617
- (3) 連携研究者
 なし