

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14607

研究課題名（和文）機械学習を援用したバルクハウゼンノイズ分析による磁歪材料の組織構造解析

研究課題名（英文）Machine learning-assisted microstructure design by magnetic Barkhausen noise analysis

研究代表者

山崎 貴大（Yamazaki, Takahiro）

東京理科大学・研究推進機構総合研究院・助教

研究者番号：40847240

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、磁歪材料の高性能化のために磁気バルクハウゼンノイズに着目した機械学習を用いた組織特性の相関関係の解明手法を構築した。まず、高い磁歪量および感度を有するFe系ナノ結晶合金を提案し、添加元素や熱処理条件の影響を検討した。次に、バルクハウゼンノイズの特徴量抽出とLightBGMによる回帰分析、SHAPによる解釈性分析により組織構造や内部応力との関係を明らかにした。この手法により、高磁歪化のための組織構造モデルの構築が可能であることを示した。本研究は、振動エネルギーハーベスタや力学センサなどの応用に向けた新規機能性材料とその評価技術の開発に貢献すると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

膨大な数のIoTデバイスの応用展開が進む中で、身の回りの振動エネルギーから発電可能な振動発電技術が注目を集めている。しかしながら、その発電出力性能を決定する機能材料の開発およびその設計指針の確立は未だ課題として残っている。本研究では、機械学習を利用した磁気バルクハウゼンノイズの分析手法を提案し、高磁歪を示す磁性材料とその組織構造の関係を明らかにすることで、高出力が期待できる組織構造を逆解析的に予測する解析手法を確立した。これにより、本研究は微小磁気ノイズに関する学術的知見を磁歪材料において獲得しただけでなく、振動エネルギーハーベスタや力学センサの高性能化が可能となることを示した。

研究成果の概要（英文）：This study aims to clarify the correlation between the organizational structure and magnetostrictive effects in magnetostrictive materials. This is a solution to the problem that has been difficult to analyze the multi-scale structure for high magnetostriction due to the complexity and diversity of the organizational structure. Specifically, we introduce a new method of magnetic Barkhausen Noise analysis utilizing machine learning, and use this to unilaterally analyze the correlation between the multi-scale structure and magnetostrictive effects. Moreover, magnetic characteristic evaluation of the newly created magnetostrictive material was conducted for clarifying the relationship between the alloy composition showing high magnetostriction and its amorphous/ nanocrystalline structure. This achievement represents a significant step towards the development of new energy harvesting technologies and the enhancement of magnetostrictive material performance.

研究分野：材料工学

キーワード：磁歪材料 機械学習 組織制御 バルクハウゼンノイズ 振動発電

1. 研究開始当初の背景

IoT 進展に伴うエネルギー利用の多様化を背景に、従来の電力供給システムの抜本的な見直し
が求められている。その解決技術の一つとして、未利用環境エネルギーである振動から電力を回
生する振動エネルギーハーベスタが挙げられ、膨大な数のセンサ端末の自立電源化が期待され
ている。

これまでの振動エネルギーハーベスタには圧電材料やエレクトレット等が用いられてきた。一方
近年では、力学的過酷環境が想定される産業分野への応用展開に向け、強くしなやかな磁歪材
料の逆磁歪効果(ひずみに由来する磁束密度変化)を利用した発電素子の開発が期待されてい
る。この発電素子の高効率化には、磁歪材料の軟磁気特性と磁歪特性の向上が必須である。しか
し、多元系合金である磁歪材料は、その組成の組合せだけでも膨大であり、さらには、複雑で多元
な組織構造との相互作用により発現する磁歪効果の影響は未だ明らかになっていない。

このような学術的課題を打破するため、申請者はこれまで、バルクハウゼンノイズ(BHN)に着眼
した磁歪材料とその評価手法の開発に取り組んできた¹⁾。BHNとは、磁性材料の磁化過程におい
て生じる微小かつ不連続な磁気ノイズであり、材料中の磁気エネルギーと組織構造(粒界や析出
物等)の相互作用に起因する。特に、高磁歪化を達成するためには、磁歪効果のミクロな発現メカ
ニズムである磁区構造の変化、すなわち、BHNの発生挙動の解明が必要不可欠である。さらに近
年では、BHNスペクトル分析による構造解析を用いて、磁歪材料における組織構造とBHNの発生
周波数領域の相関関係を見出し、その評価手法を提案してきた²⁾。

しかし、これまでの研究成果は未だ定性評価に留まり、BHN波形と磁気・磁歪特性の相関分析
に関して定量的な議論が可能な十分なデータ量とその精度を得られていない。そこで、機械学習
を用いたBHNの一元的な解析に基づく磁歪材料の合金組織の逆解析やBHN発生メカニズムまで
踏み込んだ議論には未だ課題が残っている。

2. 研究の目的

本研究では、振動エネルギーハーベスタ応用の磁歪材料開発に向けて、磁気物理と情報科学
に基づく新しい組織構解析手法を確立することを目的とした。具体的には、系統的な材料創製とプ
ロセス条件探索が可能なシンプルな合金系を選定し、解釈性の高い機械学習の利用したBHN解
析技術の構築を目指した。特に、以下の2点の研究課題に取り組んだ。

(1) 高磁歪定数を示す磁性複相材料の創製

多結晶組織やナノコンポジットを対象とした元素添加やプロセス条件に着目し、磁歪材料の組織
構造がその磁気・磁歪特性にどのような影響を与えるか調査することで、構造特性の相関関係
を明らかにする。

(2) 機械学習を用いた組織解析手法の確立

機械学習を利用した解釈性の高いバルクハウゼンノイズの分析手法を検討し、材料の結晶粒径や
内部応力の予測モデルを構築することで、磁歪材料の構造特性の相関分析手法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 高磁歪定数を示す磁歪複相材料の創製

高効率なエネルギー変換が期待できる新しい磁歪材料を創製するために、Fe系ナノ結晶合金
をベースとした磁歪複相材料を考案した。Fe系ナノ結晶合金とは、アモルファス母相中にFeナ
ノ結晶が分散析出したコンポジット材料であり、各相における磁歪の相殺とランダム磁気異方性モ
デルに基づき、優れた軟磁気特性を示すことで近年注目される。具体的には、まず、混合エンタルピー
や原子半径を参考に、Feナノ結晶に固溶可能な添加元素や最適なナノ組織化のための熱処理
条件を選定した。次に、RFスパッタ法によりSi₃N₄基板上に成膜した薄膜試料を対象に、熱物性分析
によるナノ結晶化学挙動の評価や電子顕微鏡を用いた組織観察を実施することで、目標とする添加
元素量と熱処理条件の範囲を検討した。続けて、光てこ法により計測した磁場中でのひずみ量と
その変化率から磁歪定数を算出した。最後に、磁性薄膜における組織構造と磁歪特性を比較検
討することで、ナノ構造特性の相関分析を実施した。

(2) 機械学習を用いた組織解析手法の確立

多結晶FeCo磁歪合金を対象とした熱処理制御により、結晶粒径の異なるサンプル群を用意し
た。組織構造は電子後方散乱回折(EBSD)を用いて定量化した。また、薄膜試料への荷重変化に
より、内部応力を系統的に変化させた。BHNは研究代表者がこれまで独自に構築したBHN計測シ
ステムにより高時間分解能(10 μs)で測定し、その周波数スペクトル波形を取得した。前処理として、
時間軸波形及びスペクトル波形のスージング処理を実施し、その波形から10種の統計量(平均

値や最大強度、歪み度等)を算出した。機械学習モデルには、LightGBM と SHAP(SHapley Additive exPlanations)を実施した。LightGBM とは決定木アルゴリズムに基づいた勾配ブースティング (Gradient Boosting)の機械学習フレームワークであり、高い予測精度と低い計算コストでの予測計算が可能である。また、SHAP は、BHN の各特徴量が予測性能に及ぼす影響を定量的に算出することができる手法である。これらの手法を組み合わせることで BHN の波形特性から、結晶粒径および内部応力の予測モデルを構築し、その解釈性を考察した。

4. 研究成果

(1) 高磁歪定数を示す磁歪複相材料の創製

Fe 系ナノ結晶材料として、NANOMET® (Fe-Si-P-B-Cu-C 合金)をベースに、アモルファス合金中に析出する α -Fe ナノ結晶に固溶可能な元素として Al と Ga を選定し、添加元素と熱処理条件が磁歪特性に及ぼす影響を調査した (図 1)。その結果、添加元素 Al はわずかに磁歪定数を向上 (2 倍程度)させた一方で、Ga は大きく向上させることを確認した。特に、Ga 添加量の微小添加領域において、狙いとする磁歪定数の増大 (6-10 倍)を確認することができた。TEM 観察の結果、両材料において最適な熱処理でのナノ結晶とアモルファス相の複相ナノ組織の形成を確認できた。さらに、Al はアモルファス相へ、Ga は Fe ナノ結晶相へ移動 (固溶・拡散)されることを明らかにした。

これらの結果から、ナノ組織を実現する添加元素の範囲とその最適な熱処理条件を把握することで、目標とするナノ組織の精密制御が可能であることが分かった。さらに、ナノ結晶の磁歪増大が磁歪複相材料全体の磁歪定数増大につながることを明らかにした。このように、優れた軟磁性材料を示すナノ複相構造を形成させることで、微小元素添加により高磁歪化が実現することを明らかにした。これらの新しい磁歪複相材料は、高い発電効率を持つ振動発電の実用化が期待できる。

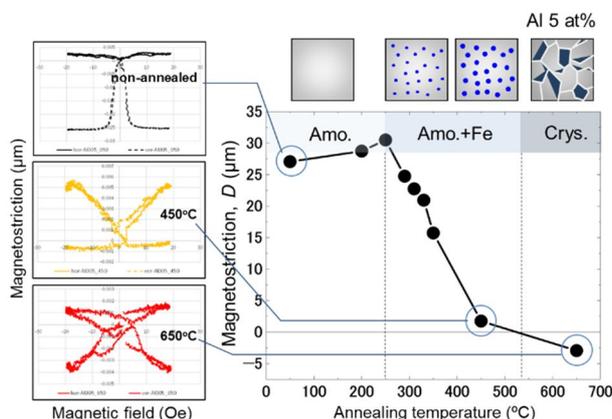


Figure 1 Magnetostrictive behavior and the schematic images of nanocrystalline magnetic thin films with Al 5 at. %.

(2) 機械学習を用いた組織解析手法の確立

熱処理温度の異なる真空高温熱処理 (420 から 1020)を施した FeCo 合金細線を対象に、EBSD により取得した結晶粒径データを目的変数に、BHN 測定により取得した BHN スペクトルの特徴量を説明変数として学習モデルを作成した。同様に、治具を用いた荷重負荷により内部応力を系統的に変化させた FeCo 合金薄膜に対して内部応力を予測可能な学習モデルを作成した。

図 2 に、結晶粒径の予測モデルと、SHAP 分析による予測性能への寄与度ランキングを示した。これらの結果から、FeCo 合金の結晶粒径を高精度 ($R^2=0.81$) で予測することが可能であり、BHN スペクトルにおけるピーク強度の平均値、歪み度、標準偏差が大きく予測性能に影響を与えることを明らかにした。特に、スペクトル波形の歪み度と結晶粒径との相関を見ることにより、高周波で発生するバルクハウゼンノイズが結晶粒界でのピン止めに起因していることが示唆される。

同様に、内部応力についても、BHN 解析から高精度で予測できることが明らかとなり、BHN のピーク強度や標準偏差が大きく寄与していることを示すことができた。本研究では、組織構造や内部応力と、BHN の特徴量や発生因子の相互接続に取り組んだが、過去報告される BHN と磁気特性、磁歪特性との相関を本モデルに組み込むことで、機械学習を用いた BHN 解析による特性評価が実現すると考えられる。さらに、内部応力等の物性変化を検出することで、センシングへの応用展開も期待できる。

以上、本研究では磁歪材料の高性能化のために磁気バルクハウゼンノイズに着目した機械学習を用いた組織-特性の相関関係の解明手法を構築した。本研究は、振動エネルギーハーベスタなどの応用に向けた新規機能性材料とその評価技術の開発に貢献すると期待される。

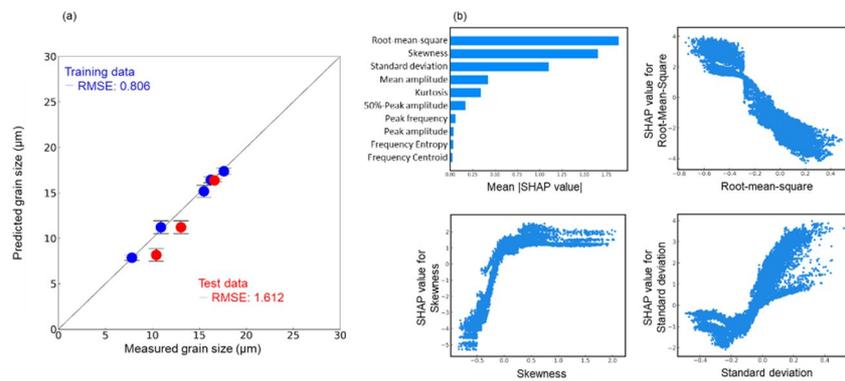


Figure 2 (a) The predicted vs. measured grain size for the LightGBM regression model.

(b) SHAP value analysis: each Figure shows MBN feature importance calculated by the mean SHAP value. The dependence of SHAP value on the top-3 feature importance for the standardized value of Root-Mean-Square, skewness, standard deviation.

< 引用文献 >

- 1) T. Yamazaki et al., Mech. Eng. J. 5, 2 (2018), 17-00569.
- 2) T. Yamazaki et al., J. Magn. Magn. Mater. 475, (2019), 240-248.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 S. Inoue, T. Yamazaki, C. Oka, S. Hata, J. Sakurai	4. 巻 -
2. 論文標題 Combinatorial search for Ti-Ni-Hf high formable shape memory alloys	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac6a97	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 F. Haga, T. Yamazaki, C. Oka S. Hata Y. Hoshino, J. Sakurai	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of structural relaxation at bellow crystallization temperature on internal stress of Ni-Nb-Zr thin-film amorphous alloys diaphragm for Micro electromechanical systems sensors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac5d12	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 T. Yamazaki, Y. Furuya, S. Hata, W. Nakao	4. 巻 58, 1
2. 論文標題 Stress-driven magnetic Barkhausen noise generation in FeCo magnetostrictive alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2021.3126898	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Nambara, T. Yamazaki, C. Oka, S. Hata, J. Sakurai	4. 巻 141, 9
2. 論文標題 Fabrication and Evaluation of Actuators for Reaction Force Variable Passive-type Tactile Displays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines	6. 最初と最後の頁 304-309
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejsmas.141.304	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 D. Yamada, S. Hori, S. Abe, Y. Kumeno, T. Yamazaki, C. Oka, J. Sakurai, S. Hata	4. 巻 MED-21-1022
2. 論文標題 Examination of Mechanical Properties and Photoelastic Properties of Gel Material for Blood Vessel Mimics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Medical Devices	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4051516	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahiro Yamazaki, Tatsuya Tomita, Katsutoshi Uji, Hidenori Kuwata, Kohya Sano, Chiemi Oka, Junpei Sakurai, Seiichi Hata	4. 巻 563
2. 論文標題 Combinatorial synthesis of nanocrystalline FeSiBPCuC-N-(Nb,Mo) soft magnetic alloys with high corrosion resistance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Non-Crystalline Solids	6. 最初と最後の頁 120808
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnoncrysol.2021.120808	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryo Morisaki, Takahiro Yamazaki, Chiemi Oka, Junpei Sakurai, Takami Hirai, Tomonori Takahashi, Hiroyuki Tsuji, Noriyasu Ohno, Seiichi Hata	4. 巻 60
2. 論文標題 Particle-in-cell-Monte Carlo collision simulation and experimental measurement of Ar plasma in a fast atom beam source for surface-activated bonding	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCB01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abe683	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Takase, T. Yamazaki, C. Oka, J. Sakurai, S. HATA	4. 巻 10
2. 論文標題 Novel measurement method of internal stress in thin films using micro spring structure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 23-00074
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/mej.23-00074	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Yamazaki, A. L. Montagnoli, M. L. Young, and I. Takeuchi	4. 巻 5
2. 論文標題 Tuning the Temperature Range of Superelastic Ni-Ti Alloys for Elastocaloric Cooling via Thermal Processing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Energy	6. 最初と最後の頁 24020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2515-7655/accd21	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計8件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 T. Yamazaki, K. Sano, and S. Hata
2. 発表標題 Design of large and sensitive magnetostrictive composites for vibration energy harvesters
3. 学会等名 2022 Integrated Nanocomposites for Thermal and Kinetic Energy Harvesting (INTAKE Seminar 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Montagnoli, T. Yamazaki, M. L. Young, and I. Takeuchi
2. 発表標題 Transformation Tuning of Shape Memory Alloys for Thermoelastic Active Regenerators with Giant T
3. 学会等名 19th U.S. National Congress on Theoretical and Applied Mechanics (USNC/TAM 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河崎 崇広、山崎 貴大、Foggiatto Lira Alexandre、遠山 諒、Varun K. Kushwaha、桜庭 裕弥、岩崎 悠真、小谷 佳範、大河内 拓雄、小嗣 真人
2. 発表標題 磁気円二色性(MCD)を用いた高飽和磁化Fe ₃ Co-Ir合金における磁気モーメントの起源の解析
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷 春菜、山崎 貴大、Alexandre Lira Foggiatto、三俣 千春、小嗣 真人
2. 発表標題 計算と実験による積層型ナノコンポジット軟磁性薄膜の磁化過程解析
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Sano, T. Tomita, C. Oka, J. Sakurai, S. Hata, T. Yamazaki
2. 発表標題 New soft magnetostrictive materials design based on nanocrystalline/amorphous mixed-phase structure
3. 学会等名 The Eighth International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Omae, C. Oka, J. Sakurai, S. Hata, T. Yamazaki
2. 発表標題 Simpler Microstructural Estimation Using Machine Learning-assisted Magnetic Barkhausen Noise Analysis
3. 学会等名 The Eighth International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野 光哉、山崎 貴大、岡 智絵美、櫻井 淳平、秦 誠一
2. 発表標題 高磁歪・高磁化率を両立した複相磁性材料の創製に向けた検討
3. 学会等名 第29回機械材料・材料加工技術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野 光哉, 富田 龍也, 岡 智絵美, 櫻井 淳平, 山崎 貴大, 秦 誠一
2. 発表標題 ナノ結晶軟磁性材料の高磁歪化に向けた合金設計
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

個人ホームページ（研究業績有り） https://tyamazaki.com

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	メリーランド大学	ノーステキサス大学	