

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14107

研究課題名(和文)大伸縮する永久磁石エラストマーの磁気レオロジー調査と環境振動発電への応用

研究課題名(英文) Magnetorheology of mechanically-soft and magnetically-hard magnetorheological elastomer and application for energy harvesting

研究代表者

岩本 悠宏 (Iwamoto, Yuhiro)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30707162

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、3次元的に大伸縮する(非常に柔らかい)永久磁石、すなわち永久磁石エラストマーの創生とその磁気特性と機械的特性を明らかにするため、分散するネオジウム粒子の粒子径や濃度、3次元CTスキャンや磁気力顕微鏡、自作した磁場検出型レオメーターを用いて、実験的・理論的に研究を行った。その結果、高保磁力と高残留磁化を有する磁性エラストマーの作製に成功した。また、振動エネルギーハーベスタを試作し、その機能を検証した。直径18mm、高さ18mmの円柱型永久磁石エラストマーを用いて、低振動数～10Hzかつ大振幅～5mmで、約2.3Vの発電に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現代の産業機器の発展において、永久磁石は必要不可欠な材料である。本研究では、大伸縮する永久磁石という新たな材料の開発という工学的に極めて重要な提案を行った。また、本研究はその機械的性質や磁気特性を材料の内部構造から実験的・解析的なアプローチにより解明するという新たな学術的な取り組みを行った。本研究は、実施した電磁誘導による振動発電に限らず、3次元センシング、3次元アクチュエータ、人工筋肉、免振技術、薄膜永久磁石の開発、MEMSへの応用などへの展開も期待でき、材料科学、エネルギー工学にとどまらない他の分野を含めた学術・産業における横断的・学際的な分野の開拓が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a mechanically-soft permanent magnet, so-called a permanent magnet elastomer, the effect of the particle size and concentration of dispersed neodymium particles has been investigated. Its inner structure has been observed using a three-dimensional CT scan and a magnetic force microscope. Consequently, a permanent magnet elastomer with high coercive force and high remanence has been realized. A prototyped energy harvester using a cylindrical permanent magnet elastomer with a diameter of 18 mm and a height of 18 mm was assembled, and 2.3 V at low frequency ~10 Hz and large amplitude ~5 mm was confirmed.

研究分野：流体工学

キーワード：永久磁石エラストマー エラストマー 永久磁石 ネオジウム レオロジー 環境振動発電 エネルギーハーベスタ 逆磁歪効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、産業機器において用いられている固体材料や流体に機能性を付加することにより、より高性能・高効率な産業機器や新しい技術を創生したいという技術ニーズが高まっている。特に永久磁石材料は、電気自動車や電気モーターなどの発展に大きく貢献し、現代の産業機器において必要不可欠なものである。一方で、従来の永久磁石は固体材料であり、3次元的に大伸縮するものは存在しない。永久磁石に大伸縮という機能性を付加した材料が開発されれば、より高性能・高効率な産業機器や新しい技術の誕生につながる。

研究代表者は、強磁場を磁性微粒子に印加することで残留磁化を発生させることが可能であるという現象に着目し、残留磁化を有する磁気粘弾性体およびその製造方法を確立している(特開216-152337)。これは、磁性微粒子を粘弾性体に一様分散させ、加熱成形後、高パルス外部磁場の印加により試料を着磁することで、3次元的に大伸縮する永久磁石の作製を可能とするものである。研究代表者は、この製造方法を基に、磁性微粒子として高い残留磁化と保磁力を有するネオジムを用い、また粘弾性体として伸縮に対して可逆性を有するエラストマーを用いることで、3次元のかつ可逆的に大伸縮する永久磁石エラストマーの創生と、それを用いた電磁誘導による振動発電装置を企図した。

2. 研究の目的

本研究では、形状・組成の異なる永久磁石エラストマーを作製し、その機械的性質と磁気特性を内部構造の視点から明らかにすることを目的とする。また、得られた知見を基に永久磁石エラストマーの形状・組成を最適化し、振動エネルギーハーベストへの工学的応用を目指す。具体的には、以下の内容を実施する。

- (1) 粒子径・濃度の異なるネオジム微粒子を用いた永久磁石エラストマーの作製
- (2) 磁気異方性の静的・動的な機械的性質と磁気特性への影響調査
- (3) 伸縮過程における内部構造の実験的可視化
- (4) 伸縮過程における内部構造の数値解析技術の確立と機械的性質と磁気特性への影響解明
- (5) 振動エネルギー変換の機能確認と設計指針の確立

3. 研究の方法

研究目的で述べた(1)～(5)を明らかにするため、以下の研究を実施した。

(1),(2): 粒子径・濃度の異なるネオジム微粒子を分散した種々の永久磁石エラストマーを作製し、新たに試作した磁場検出型レオロジー計測装置やパルス励磁型磁気特性計測装置を用いて、試料の機械的性質と磁気特性を調査した。

(3),(4): 3次元CTスキャンや磁気力顕微鏡を用いて着磁過程における内部構造を可視化し、内部構造の視点から(1),(2)の影響を明らかにした。

(5):(1)～(4)の知見を基に、永久磁石エラストマーの形状・組成を最適化し、振動エネルギーハーベストへの工学的応用の設計指針を確立した。

4. 研究成果

(1) 粒子径・濃度の異なるネオジム微粒子を用いた永久磁石エラストマーの作製

3次元的に大伸縮しかつ高い残留磁化をもつ永久磁石エラストマーを創生するため、粒子径および濃度の異なるネオジム微粒子を分散した永久磁石エラストマーを試作した。平均粒子 $5\mu\text{m}$ と $100\mu\text{m}$ のネオジム粒子を $0\sim 30\text{vol.}\%$ の体積濃度で分散した永久磁石エラストマーを作製した。ネオジム粒子とエラストマーの密度差により $100\mu\text{m}$ のネオジム微粒子の場合、粒子の沈降が課題となった。一方で、 $5\mu\text{m}$ の磁性微粒子では安定的な粒子分散を確認した。さらに磁気特性の向上を意図して、一様磁場下で磁性微粒子を配向・整列させ、その後着磁を行った構造異方性を有する永久磁石エラストマーの作製を提案した。主に円柱形状の試料を作製し、着磁により形状が変化する特異な現象も発見した。結果、図1に示すような、高い保磁力と残留磁化を有する非常に柔らかい永久磁石(永久磁石エラストマー)の作製に成功した。

(2) 磁気異方性の静的・動的な機械的性質と磁気特性への影響調査

静的な磁気特性については、作製した試料の磁気異方性を磁化磁場曲線を計測することで評価した。その結果、ネオジム微粒子の濃度が増加するに



大きく変形 永久磁石の性質

図1 永久磁石エラストマー

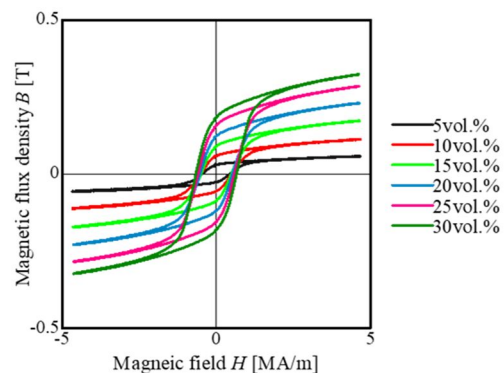


図2 磁化 磁場曲線

に伴い残留磁化および保磁力が増加することを明らかにした(図2参照)。さらに構造異方性を永久磁石エラストマー内部に誘起させた構造異方性永久磁石エラストマーの磁化 磁場曲線評価することで、保磁力および残留磁化が粒子が一様分散した永久磁石エラストマーよりも大きくなることを明らかにした。

動的な磁気特性および機械的特性については、変形時の表面磁束変化の測定を実施し、表面磁束の劇的な変化(広義の逆磁歪効果)を確認した(図3参照)。さらに、永久磁石エラストマーの最大の特徴は、磁気異方性を有し、かつ可逆的な大伸縮を可能とする粘弾性体である点である。そこで、その動的な機械的性質(貯蔵弾性率と損失弾性率)と磁気特性を同時に計測し得る磁場検出型レオメーターを自作し、無磁場下において粒子の体積濃度および着磁の有無が動的な機械的性質(貯蔵弾性率と損失弾性率)に与える影響を明らかにした。

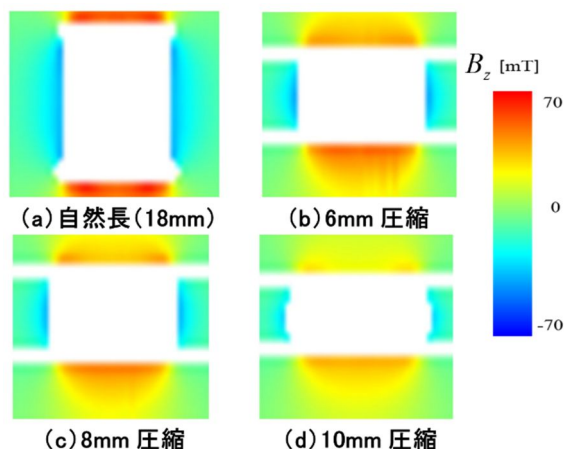


図3 変形による磁束分布変化

(3) 伸縮過程における内部構造の実験的可視化

当初計画では暗視野顕微鏡により可視化を実施する予定であったが、当該装置では2次元的可視化しかできない点、またより高精度な可視化を実現するため、3次元CTスキャンによる可視化に変更し、永久磁石エラストマー着磁前後の内部構造を明らかにした(図4参照)。着磁前はネオジウム粒子は安定的にエラストマー内部に分散するのに対し、着磁後は粒子同士の磁気双極子作用力により引力が作用し、ネットワーク構造を形成することを明らかにした。また、パルス励磁型磁気特性計測装置を用いて、試料を着磁し、その効果を磁気力顕微鏡により可視化し、着磁を確認した(図5参照)。

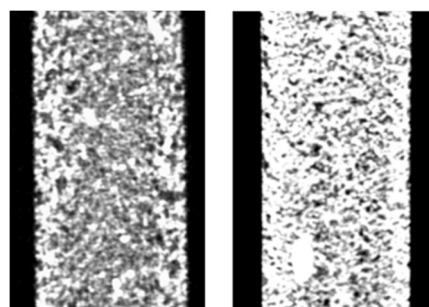


図4 3次元CTスキャンによる着磁前後の内部構造の様子。(左:着磁前,右:着磁後)

(4) 伸縮過程における内部構造の数値解析技術の確立と機械的性質と磁気特性への影響解明

ガウルメーターを用いることで変形時の表面磁束を計測した。その結果、試料を圧縮することで表面磁束が劇的に減少する(広義の逆磁歪効果)を確認した。また、圧縮過程の磁気特性の変化を理論的に考察するため、ピオサバールの法則に基づく理論解析を行い、上記逆磁歪効果は、圧縮に伴い着磁されたネオジウム微粒子が並進・回転することに起因することを明らかにした。

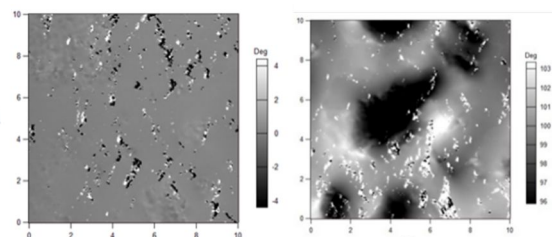


図5 磁気力顕微鏡による磁区構造の可視化結果(左:着磁前,右:着磁後)

(5) 振動エネルギー変換の機能確認と設計指針の確立

上記、広義の逆磁歪効果を有効利用することで、ファラデーの電磁誘導の原理により振動エネルギーを電気エネルギーに変換することが可能となる。本研究では、永久磁石エラストマーを用いた振動エネルギーハーベスターを試作し、その機能を検証した。結果、直径18mm、高さ18mmの円柱型永久磁石エラストマーを用いて、低振動数~10Hzかつ大振幅~5mmの条件で約2.3Vもの発電に成功し、LEDの点灯に成功した(図6参照)。

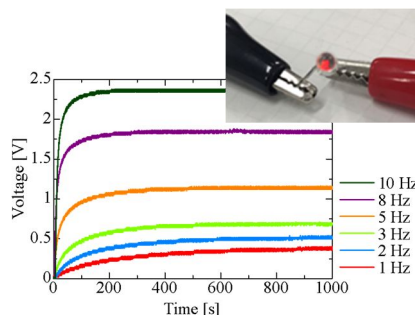


図6 発電実験結果とLEDの点灯

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Y. Ido, Y. Iwamoto, K. Sato, T. Deguchi, Y. Fujii, H. Yamaguchi
2. 発表標題 State-of the art Kinetic Energy Harvesting using Permanent Magnet Elastomer
3. 学会等名 10th KIFEE Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小坂翔, 岩本悠宏, 井門康司, 出口朋枝, 藤井泰久
2. 発表標題 磁石エラストマーを用いた振動発電に対するコイル位置の影響
3. 学会等名 平成30年度磁性流体連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤圭輔, 石川宗, 岩本悠宏, 井門康司, 出口朋枝, 藤井泰久
2. 発表標題 球形永久磁石エラストマーを用いた振動発電装置の試作
3. 学会等名 第30回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ido, Y. Iwamoto, K. Sato, J. Takeuchi, T. Deguchi, Y. Fujii, H. Yamaguchi
2. 発表標題 Magnetic and Mechanical Properties of Magnetic Elastomer Having Permanent Magnet Particles
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Mechanics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Takeuchi, K. Sato, Y. Iwamoto, Y. Ido, T. Deguchi, Y. Fujii, H. Yamasaki, H. Yamaguchi
2. 発表標題 Kinetic Energy Harvesting using Permanent Magnet Elastomer with Anisotropic Structure
3. 学会等名 Taiwan-Japan International Conference on Magnetic Fluids 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Iwamoto, J. Takeuchi, K. Sato, Y. Ido, T. Deguchi, Y. Fujii, H. Yamasaki, H. Yamaguchi
2. 発表標題 Fundamental Study on Permanent Magnet Elastomer and its Application for Kinetic Energy Harvesting
3. 学会等名 Taiwan-Japan International Conference on Magnetic Fluids 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤圭輔, 竹内淳哉, 岩本悠宏, 井門康司, 出口朋枝, 藤井泰久, 山崎晴彦, 山口博司
2. 発表標題 永久磁石エラストマーの磁気特性調査と環境振動発電への応用
3. 学会等名 平成29年度磁性流体連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤圭輔, 竹内淳哉, 岩本悠宏, 出口朋枝, 井門康司, 藤井泰久, 山崎晴彦, 山口博司
2. 発表標題 ネオジウム粒子分散系エラストマーを用いた低周波振動発電に関する研究
3. 学会等名 第29回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内淳哉, 佐藤圭輔, 岩本悠宏, 出口朋枝, 井門康司, 藤井泰久, 山崎晴彦, 山口博司
2. 発表標題 構造異方性を有する永久磁石エラストマーの環境振動発電
3. 学会等名 第26回MAGDAカンファレンス
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 発電デバイス 磁氣的硬質粘弾性材料の製造方法及び発電デバイスの使用方法	発明者 藤井 泰久, 出口 朋枝, 山本 日登志, 井門 康司, 岩本 悠宏	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-136364	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----