

令和 4 年 9 月 2 日現在

機関番号：24506
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：19K04533
研究課題名（和文）磁気反発力による衝撃方向変換機構を用いた無指向性振動型MEMSエナジーハーベスタ
研究課題名（英文）Omni-directional Vibrating MEMS Energy Harvester with Shock Direction Conversion Mechanism by Magnetic Repulsive Force
研究代表者
藤田 孝之（Fujita, Takayuki）
兵庫県立大学・工学研究科・准教授
研究者番号：50336830
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）：本研究の目的は、高性能振動型MEMSエナジーハーベスタの動作に必要な単方向の振動を、磁気反発力による非接触変向機構で方向転換をさせ、面外方向の外部振動から面内発電振動に変換・発電する低背ハーベスタを実現するものである。また、変向機構の構造最適化により、無指向性の外部振動によって単方向発電デバイスを動作させる無指向性振動型エナジーハーベスタの可能性も模索する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力を完全に自給自足する省エネ技術のための超小型発電デバイスを、MEMS技術で実現する振動型エナジーハーベスタの研究が注目されている。一般にMEMSエナジーハーベスタは、高性能化のために平板状デバイスの内部でマス（おもり）が面内方向（長手方向）に振動することで発電するため、発電に必要な衝撃（加速度）の方向を面内方向に一致させる必要があり、デバイスの固定方法、設置方向や応用分野に大きな制限をもたらしていた。本研究では、独自の磁性体加工技術で振動方向を転換することにより、設置場所を選ばない振動型エナジーハーベスタの性能向上、応用範囲の拡大に取り組んだ。

研究成果の概要（英文）：This study aims to realize a low-profile harvester that converts out-of-plane external vibrations into in-plane power generation vibrations and generates electricity by redirecting the unidirectional vibrations required for operation of a high-performance vibration-type MEMS energy harvester by a non-contact redirection mechanism using magnetic repulsive force. By optimizing the structure of the redirection mechanism, we will also explore the possibility of an omnidirectional vibration-type energy harvester that operates a unidirectional power generation device by omni-directional external vibration. This will dramatically increase the degree of freedom in the direction of vibration application and the location of installation of the vibrating energy harvester, thereby improving its performance and expanding its range of applications.

研究分野：MEMS

キーワード：エナジーハーベスティング MEMS 磁性薄膜

1. 研究開始当初の背景

近年注目されている AI (人工知能) 技術の発展には、膨大な量のデータが必要とされる。これから日本が直面する喫緊の課題として、例えば建造物インフラの老朽化予測では、建造物の温度、湿度、振動などの長期的な情報を収集する必要がある。また、TPMS (Tire Pressure Monitoring System: タイヤ空気圧モニタシステム) をはじめとする自動車への応用、個人の健康管理や幼児・老人の見守りなど、膨大なデータ収集には無数のセンサが意識されることなく稼働する超分散型システム社会が必要となってくる。これらデータを自動的に測定・収集し続ける技術としての IoT (Internet of Things: モノのインターネット) は、かつて WSN (ワイヤレスセンサネットワーク) と呼ばれたように、市場に多く出回っている高性能、極低消費電力の MEMS センサ、特定用途向けの極低消費電力 MPU (マイクロプロセッサ)、そして無線モジュールの進歩に裏付けられた技術である。これら電力エネルギーを使う側に対して、エネルギーの供給源としては旧来のバッテリー・小型電池に頼っており、交換の人的コストや使用済電池の廃棄による環境への影響が懸念され、IoT 普及の足かせとなっている。このため完全自給自足の電源としての自立型発電デバイス (エナジーハーベスタ) が盛んに研究されている。

エナジーハーベスタは種々の方法が提案されているが、なかでも振動型は他方式に比べて適用可能なエネルギー源の範囲が広く、論文・学会等でも発表件数が最も多い研究分野である。環境振動から効率よくエネルギーを取り出すため、対象となる振動の周波数に共振点をあわせた高い機械的 Q 値の共振構造を設計するのが一般的であったが、対象とする周波数の多様性や、わずかな共振周波数のずれで十分な電力が得られなくなるため、近年はインパルス衝撃による減衰振動発電が主流になりつつある。振動型エナジーハーベスタには、主な方式別に静電型、圧電型、電磁型があるが、いずれも外部からの加速度・衝撃によってデバイスのマス (おもり) を振動させ電力に変換する構造である。振動を用いるため、共振周波数と発電に必要な振動方向が重要な設計ファクターとなる。IoT のための安価・大量生産可能な MEMS プロセスを用いる場合、圧電型では面外振動、静電および電磁型では面内振動の構造が圧倒的な主流となっている。

平板状のデバイスを使用する際、平たい面を固定する低背構造は、設置の容易さと信頼性の向上に非常に重要である。例えば応用例として期待されている TPMS 向けハーベスタ (imec, オランダ) では、タイヤ接地時の衝撃で減衰振動して発電するため、約 2 cm 角、厚さ 2 mm の平板状デバイスをタイヤ内に立てて設置する必要がある。さらに、多くのハーベスタは振動方向を特化して、共振時に大きな振幅、すなわち高い発電量が得られるよう設計されているため、振動方向が定まらない人体運動からの発電には不向きとされていた。学会発表では多方向からの振動での発電構造も提案されているが、総合的にみると単位体積あたりの発電電力が低下し、決定打とは言えない状態であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高性能振動型 MEMS エナジーハーベスタの動作に必要な単方向の振動を、磁気反発力による非接触変向機構で方向転換をさせ、面外方向の外部振動から面内発電振動に変換・発電する低背ハーベスタを実現するものである。また、変向機構の構造最適化により、無指向性の外部振動によって単方向発電デバイスを動作させる無指向性振動型エナジーハーベスタの可能性も模索する。これにより振動型エナジーハーベスタの振動印加方向ひいては設置箇所の自由度を飛躍的に高め、性能向上、応用範囲の拡大を目指す挑戦的な研究課題である。本研究の核となる磁性体は、MEMS との融合が一般的に困難であり、先行研究においてもバルク磁石や磁性微粒子を MEMS 構造体へ接着することが標準的であり、本申請のように NdFeB スパッタ磁性膜を直接 MEMS 構造と組み合わせた研究は他に類を見ない。また、薄膜磁石特有の反磁界 (薄膜磁石は膜の両面が N, S 極となり、極間の距離が近いことから互いに磁力を減衰させて磁性体膜の縁部のみ磁性を示す現象) を回避するために考案した凹凸形状の磁性体は、面外方向への強い磁気反発力のみならず、形状に依存した面内方向への磁気反発力を示すことが、予備実験で明らかになっており、磁気反発力を用いた非接触変向機構は高い独自性を持つと考えられる。

MEMS エナジーハーベスタにおいて非接触の振動変向機構が実現すれば、任意の方向からの衝撃・加速度を、単方向振動型エナジーハーベスタの発電方向に無駄なく変換できるだけでなく、非線形バネなどより複雑な機構との組み合わせも視野にいった創造性の高い研究への発展が期待できる。例えば、申請者が共同研究中のサヴォア・モンブラン大学 (フランス) ではシリコン両持ち梁をバックリング (座屈) させたバネにより、人体の動きのようなゆっくりした加速度でもスナップスルー (バネの跳躍) することを報告しており、同技術と本研究を結びつければ不安定な人体の動きから単方向振動に変換し十分な発電量も期待できる。

3. 研究の方法

本研究では主に、どのような磁性体形状と付随するバネ構造を設計すれば効率よく衝撃を変向できるかを明らかにし、その成果をもとに低背構造の面外衝撃から面内減衰振動するエナジ

ーハーベスタ，さらに多方向からの衝撃を単方向に変換する無指向性エナジーハーベスタ構造設計指針を明らかにする。MEMS 技術は主材料であるシリコンを超精密に加工できる技術であり，設計値と試作した実デバイスの測定値は比較的良好に一致することが知られている。このため，構造解析（応力，固有振動モードなど）によく使われる汎用有限要素解析ソフト（ANSYS）と3次元リアルタイム磁場解析ソルバシステム（Qm）を組み合わせることで，設計した磁性体構造のノードに発生する磁界による力ベクトルを ANSYS ノードの力ベクトルに変換して，ハーベスタとしての構造・運動解析を行なうことで設計指針の概要がつかめる。その後，設計寸法での評価サンプルを試作・評価し，結果を設計にフィードバックする。評価に関して最も重要な衝撃に対する応答は解析から得ることが困難なため，統計的手法で判断可能な十分な下図の実測結果を用いる。現有の簡易落下試験装置では評価が難しいため，試験サンプルを任意角度で固定できる小型3軸ステージを組み合わせた振り子式の衝撃試験機を新たに作製する。最終的に，申請者が先行研究で開発中のエレクトレット静電型エナジーハーベスタと組み合わせ，まずは面外への衝撃加速度を面内方向に変換する低背振動型エナジーハーベスタを実現する。

4. 研究成果

磁性体形状と付随するバネ構造を設計すれば効率よく衝撃を変向できるかを明らかにし，その成果をもとに低背構造の面外衝撃から面内減衰振動するエナジーハーベスタ，さらに多方向からの衝撃を単方向に変換する無指向性エナジーハーベスタ構造設計指針を明らかにするため，まず薄膜磁石を Si スリット構造上にスパッタ成膜することで，磁束密度を向上させた先行研究の実験において，面外方向（z 方向）への力が面内方向（x 方向）に変向される現象を，定量的に評価するための基礎研究を行った。

NdFeB 薄膜磁石を上下に正対させた状態から，片方の薄膜磁石を面内方向へとオフセットした状態で面外ギャップを変化させ，面内・面外方向への磁気反発力を積分要素法解析ソフトによって解析的に求めた。構造体をギャップ 15 μm で対向させて，面内方向にオフセットした場合，初期位置で面外方向の磁気反発力 F_z が最大の 400 mN となり，面内方向右向きの力 F_x は 0 となる。オフセット 25 μm において， F_z が 0， F_x が最大値の 390 mN となることを解析的に明らかにした。

実験的に解析結果を評価するため，微細磁石配列の磁気力評価のため MEMS デバイスを製作した。スリット形状マスを x 軸方向にのみ可動域をもつ微細ばねで支持し，マスの変位を光学および電氣的（くし歯電極による静電容量変化）に計測する。残念ながらスパッタ材料の都合により，磁性体の成膜には至っていないが，MEMS 櫛歯構造の初期評価まで完了した。

磁性体から得られる磁気反発力により衝撃・加速度の方向転換機構の詳細を明らかにするため，単純な片持はりバネとマス構造をシリコン MEMS 技術で作製し，磁性体薄膜と組み合わせたサンプルの評価を行った。梁の振動特性は通常バネ定数とマスで定義されるが，磁気反発力がバネ定数に重畳されることにより非線形な振動特性が得られることを用い，磁気反発力にて定量的な評価に取り組んだ。梁長さ 3 mm，マス長さ 5 mm，幅 5 mm の片持ち梁構造を SOI ウェハ（活性層: 30 μm，支持層: 400 μm）上に形成した。片持ち梁の機械特性測定のため，薄膜磁石に着磁処理を行わず加振測定を行ない，駆動周波数の上昇 (up sweep) と下降 (down sweep) を別々に測定し，ヒステリシスについても検証した。測定条件は，0.05 G から 0.5 G までの印加加速度において，周波数を 100 Hz から 200 Hz までスイープさせた。片持ち梁の共振周波数は 125 Hz，機械的 Q 値 15.6 が算出でき，共振特性には変位最大点が低周波側に傾いたソフトスプリング効果が見られた。同じデバイスを着磁後に同様の評価を行った結果，着磁前後で明らかに異なる特性が確認でき，磁気反発力が振動に影響していることが確認できた。残念ながらスパッタ材料の都合により，成膜された磁性膜が十分な磁束密度を保持していなかったため，リワークに時間を要し，十分な評価には至らなかった。

衝撃に対する応答，SRS（ショック・レスポンス・スペクトラム）解析で，面外方向への衝撃でどの程度，面内方向への励振が得られるのか，有限要素解析ソフトだけでなく，磁気モーメント法ソフトも活用して，動解析にも取り組んだ。先行研究では面外（Z 方向）から面内（X 方向）への方向転換機構については，解析を行ってきたが，複数の磁性体を交互に配置し直交面内（Y 方向）からの衝撃も同じく X 方向に変換できる斜め 45 度の変向が可能な形状を設計，解析し，3D プリンタを用いたラージモデルで動作検証を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fujita Takayuki, Fujibe Kohei, Uchida Hiroki, Yamamoto Koki, Badel Adrien, Formosa Fabien, Kanda Kensuke, Maenaka Kazusuke	4. 巻 321
2. 論文標題 Variable load resistance by using CdS analog linear optical coupler for automated measurement of capacitive energy harvester	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 112399 ~ 112399
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sna.2020.112399	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 該当する

1. 著者名 Yamamoto Koki, Fujita Takayuki, Badel Adrien, Formosa Fabien, Kanda Kensuke, Maenaka Kazusuke	4. 巻 32
2. 論文標題 Experimental Evaluation of Bipolar Surface Potential with Corona Charging for Electret Activation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 2493 ~ 2493
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2020.2901	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 松本和馬、藤邊康平、藤田孝之、神田健介、前中一介
2. 発表標題 低寄生容量CdSフォトカプラによるリアルタイム負荷特性評価システム
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉野 裕輝, 福永 彬人, 藤田 孝之, 神田 健介, 前中 一介
2. 発表標題 NdFeB 薄膜磁石の磁気反発力を用いた非接触 面外面内振動変向機構の基礎研究
3. 学会等名 第36回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤本 匠 , 福永 彬人, 藤田 孝之, 神田 健介, 前中 一介
2. 発表標題 NdFeB 薄膜磁石と磁界による振動型ワイヤレス電力伝送の基礎的考察
3. 学会等名 第36回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Uchida, Koki Yamamoto, Takayuki Fujita, Adrien Badel, Fabien Formosa, Kensuke Kanda, Kazusuke Maenaka
2. 発表標題 Start-up Acceleration Reduction of Electrostatic Vibration Energy Harvester with Narrow Air-gap Structure
3. 学会等名 The 19th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Fujibe, Takayuki Fujita, Hiroki Uchida, Koki Yamamoto, Adrien Badel, Fabien Formosa, Kensuke Kanda, Kazusuke Maenaka
2. 発表標題 Variable Load Resistance by Using CdS Analog Linear Optical Coupler for Automated Measurement of Capacitive Energy Harvester
3. 学会等名 The 19th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 鈴木 雄二、秋永 広幸、神野 伊策、篠原 真毅、竹内 敬治、八馬 弘邦、舟橋 良次、宮崎 康次	4. 発行年 2021年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 528
3. 書名 環境発電ハンドブック 第2版	

1. 著者名 Akinobu Yamaguchi (編集), Atsufumi Hirohata (編集), Bethanie Stadler (編集)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 812
3. 書名 Nanomagnetic Materials: Fabrication, Characterization and Application (Micro and Nano Technologies)	

〔産業財産権〕

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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