

称号及び氏名 博士（工学） 荒牧 正明

学位授与の日付 平成 31 年 3 月 31 日

論文名 「Realization of High-performance Piezoelectric MEMS
Vibration Energy Harvester
(高性能圧電 MEMS 振動発電素子の実現)」

論文審査委員 主査 藤村 紀文

副査 秋田 成司

副査 平井 義彦

論文要旨

現在、インターネットを介してデータを取得し、モノをインテリジェント化するモノのインターネット(IoT)に注目が集まっている。IoT 社会の構築には、データを取得するための無数のセンサが必要であり、2022 年頃にセンサ需要は年間 1 兆個以上になると予測されている。このような数のセンサを電池で駆動することは現実的でなく、また系統電源を利用する場合は、センサを設置できる場所が制約されるため、IoT におけるセンサノードには自立型電力源が求められている。センサの消費電力は 100 μ W 程度であるため、環境中に存在する光や熱などの微小なエネルギーから電力を取り出す環境発電技術の利用が検討されている。本研究では多くの場所に存在し、比較的安定にエネルギーが得られる振動エネルギーに注目した。振動発電には電磁誘導式や静電式などいくつかの方式がある。圧電方式は、線形の電気機械変換であり共振現象の利用が容易、機械的エネルギーを電気的エネルギーに直接変換できるため小型化に有利であるなどの特徴を有しており、活発に研究されている。

圧電振動発電素子の多くは先端に錘を有する片持ち梁構造を採用しており、共振周波数で最大の電力が得られる。理論的には、線形な共振特性を有する圧電振動発電素子

の出力電力は錘の質量、素子の機械的 Q 値、電気機械結合係数(K^2)、振動加速度の 2 乗に比例する。しかし 1G 程度以上(1G: 9.8 m/s²)の大きな振動加速度を印加した際の実際の出力電力は、理論出力よりも低下する結果が多く報告されている。これは素子の機械的特性の非線形性で説明されているが、実験結果を正確に再現できるモデルは提案されておらず、詳しい原因は未解明であった。また IoT で利用する振動発電素子には 100 μ W/cm² 程度の出力電力が期待されているが、環境中に多く存在する 0.1G 程度以下の振動加速度では、そのような出力を得ることは難しいということが研究の過程で明らかになった。この問題の解決は、振動発電素子を自立電源として広く利用するためには、極めて重要である。

一方、振動発電応用において圧電薄膜には、高い有効電気機械結合係数 $k^2_{31,f}$ を有することが求められる。Pb(Zr,Ti)O₃ 薄膜は最も高い $k^2_{31,f}$ を持つことで知られているが、鉛は人体に有害であるため、環境中に分散させて使う振動発電応用には適さない。(K,Na)NbO₃ や AlN などの非鉛圧電薄膜を用いた圧電振動発電素子がいくつも報告されているが、Pb(Zr,Ti)O₃ を用いた素子の特性にはまだ及んでいない。 $k^2_{31,f}$ は圧電特性 $e_{31,f}$ 定数の 2 乗、および誘電率の逆数に比例することから、本研究では 100 程度の低い比誘電率と約 100 μ C/cm² と大きな自発分極を有する BiFeO₃ 薄膜に着目した。すでに K. Kariya らによって BiFeO₃ 薄膜を用いた圧電 MEMS 発電素子が試作され、理論限界の 80%に相当する出力特性が示されている。しかし、先に述べた高加速度領域での性能低下の問題により、実際の最大出力電力は 0.4G において 14 μ W/cm² 以下であった。

このような背景を踏まえて、本研究では IoT 応用に向け、圧電 MEMS 振動発電素子に非鉛圧電体薄膜を用いて、環境中に多く存在する 0.1G 程度以下の加速度において 100 μ W/cm² 以上の出力特性を実現するための要素技術の開発に取り組んだ。まず、有限要素法を用いて機械的な非線形性を低減させた素子の設計を行い、実際に Pb(Zr,Ti)O₃ 薄膜を用いて圧電 MEMS 振動発電素子を試作した。出力電力の印加加速度依存性の結果を、よく記述できる理論モデルを構築し、非線形効果の解析に取り組んだ。また、作製した MEMS 振動発電素子は 0.2G 程度の大きな加速度領域まで高い線形性と理論限界の 90%に相当する出力特性を示したが、0.1G での出力電力は 10 μ W/cm² 未満であった。そこで新しい機構を用いて MEMS 振動発電素子に印加される加速度を増幅する方法を着想した。MEMS 素子に質点とバネを加えることで 2 自由度系とすることができ、素子の錘と加えた錘の連成振動の効果により、MEMS 素子に

はより大きな加速度が印加されるようになる。2自由度構造を有する振動発電素子のモデルを作成し、素子の基本的な特性を調べた。その結果を基に MEMS 素子と金属板からなる 2 自由度振動発電素子を作製し、その出力特性を調べた。さらに、非鉛材料を用いた高出力な圧電 MEMS 振動発電素子の実現に向けて、スパッタリング法を用いて Si 基板上への BiFeO_3 薄膜の作製とその圧電特性の向上に取り組んだ。得られた BiFeO_3 薄膜を用いて圧電 MEMS 振動発電素子を作製し、電気機械的特性を評価した。

本論文は全 5 章から構成されており、以下に各章の概要を述べる。

第 1 章では、本研究の背景、目的および内容について概略を示し、本論文の構成について述べた。

第 2 章では 0.1G 以上の大きな加速度領域でも出力特性が低下しない圧電 MEMS 振動発電素子を設計し、その開発に取り組んだ。先行研究において、出力低下の要因は振動発電素子の片持ち梁が有する非線形なバネ特性にあることが指摘されていたので、有限要素法を用いて非線形バネ特性を低減した片持ち梁構造の素子を設計した。その結果に基づいて $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ 薄膜を用いて圧電 MEMS 振動発電素子を作製し、その電気機械特性を調べた。出力電圧と、レーザー変位計で測定した錘の変位の共振カーブの負荷抵抗依存性を測定し、その結果を解析することで素子の電気機械結合係数 K^2 や機械的 Q 値を決定した。0.024G の加速度領域では、電気機械特性は従来理論とよく一致しており、出力電力密度は理論限界の 90%に相当する $560 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{G}^{-2}$ となった。0.2G の印加加速度では出力電力密度は $370 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{G}^{-2}$ となり、高加速度領域で特性が低下した。従来の非線形バネに基づいたモデルでは実験結果を説明することができなかったが、減衰係数に非線形性を導入することでこの問題を解決することができた。減衰係数の非線形性の要因としては空気抵抗が考えられ、さらに高い加速度領域まで線形領域を広げるには、バネ特性の非線形性と空気抵抗の両方を考慮した設計が必要であることを明らかにした。

第 3 章では 0.1G 程度の低加速度領域において大きな出力電力を得ることを目的とした検討を行った。2 つずつの錘とバネで構成された 2 自由度系では、連成振動の効果によって錘の振動振幅を増大できる条件がある。この原理を振動発電に応用するため、まず理論モデルの構築を行った。計算の結果、10 倍以上の出力電力の向上が期待できることを明らかにした。2 章で作製した MEMS 振動発電素子と金属板を利用して 2 自由度構造の連成振動を実現するには、金属板の実効的な錘の重さは 1g 以下、金属板のバネ定数は 300~500 N/m にする必要があることが分かった。その条件を満たす金属片

持ち梁を Al を用いて作製し、その先端に MEMS 振動発電素子を取り付けることで 2 自由度構造の素子とした。その電気機械特性を調べたところ、印加加速度 0.1G において 3.4 μW の出力電力が得られた。これは、MEMS 素子単体の 17 倍に相当する特性であった。さらに実験と計算の両方から、金属片持ち梁のばね定数を変化させると連成振動の効果により MEMS 素子の共振周波数を変調できるということも明らかにした。この結果は、同じ共振周波数を持つ MEMS 振動発電素子であっても、2 自由系に組み込むことでその共振周波数を目的の周波数に変調できるということを示している。

第 4 章では非鉛強誘電体を用いた高出力圧電 MEMS 振動発電素子の実現に取り組んだ。まず、スパッタリング法を用いて高い $k^2_{31,f}$ を有する BiFeO_3 薄膜を Si 基板上に成長させる検討を行った。エピタキシャル成長した BiFeO_3 薄膜では、(001)方向に成長させることで最も大きな $e_{31,f}$ 定数が得られると報告されている。そこで、 BiFeO_3 薄膜を Si 基板上に(001)配向成長させるため、シード層および下部電極として Si 基板上に自己配向成長する LaNiO_3 薄膜を用いた。その上に、450 $^{\circ}\text{C}$ ~650 $^{\circ}\text{C}$ で BiFeO_3 薄膜を作製し、X 線回折による結晶構造解析を行った。全ての試料において BiFeO_3 が(001)配向成長しているものの、高温で製膜した試料では Bi が再蒸発し、 Fe_2O_3 が形成されていることが明らかになった。誘電率の周波数依存性を調べると、 Fe_2O_3 が析出している試料では 100 Hz 付近において誘電分散による誘電率の上昇がみられた。これは Fe_2O_3 と BiFeO_3 との間に界面分極が発生したことが原因と考えられる。さらに高い基板温度で作製した試料ほど結晶性が改善し、 $e_{31,f}$ 定数も高くなるという結果が得られたが、上述の誘電率の増大により $k^2_{31,f}$ は低下することが明らかになった。様々な検討の結果、高温製膜における Fe_2O_3 の析出は製膜中の酸素導入量を減らすことで低減できることが分かった。また、異なる圧電特性を有する BiFeO_3 薄膜の誘電特性を詳細に調べたところ、誘電率の共振電圧依存性が大きいほど $e_{31,f}$ 定数が高いという結果が得られた。圧電応答は単位格子の伸縮によるミクロな内因的效果とドメイン壁の運動などのマクロな外因的效果の両方に起因するが、この結果は高い $e_{31,f}$ 定数を有する BiFeO_3 薄膜は大きな外因的效果を持つということを示している。本研究で作製した Si 基板上に成長した(001)配向 BiFeO_3 薄膜の $k^2_{31,f}$ の最高値は 6%であり、これは(001) BiFeO_3 エピタキシャル薄膜に匹敵する結果である。得られた BiFeO_3 薄膜を用いて圧電 MEMS 振動発電素子の作製を行い、その電気機械的特性を評価した。線形共振領域における出力電力は理論限界値の 80%に相当する 910 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{G}^{-2}$ であった。また、加速度 0.3G において最大 40 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の出力電力が得られた。これらの結果は $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ 薄膜を

用いた素子の特性よりも高い。したがって、 BiFeO_3 薄膜の特性の改善と高い線形性を有する構造の採用により、高性能な圧電 MEMS 振動発電素子が実現できると考えられる。

第 5 章では、本研究で得られた研究成果を総括した。

本研究では、電気機械システムと材料物性の双方の視点で、圧電 MEMS 振動発電素子の高出力化に取り組んだ。大きな加速度領域での非線形共振の影響、低加速度の振動を増幅する 2 自由度構造の開発、非鉛強誘電体を用いた高出力圧電 MEMS 振動発電素子という成果が得られており、これらを統合することで IoT 応用の要件を満足する圧電振動発電素子を実現できると考えられる。

審査結果の要旨

本論文は、振動発電素子の課題である低加速度領域での高出力化を目的として研究を行ったものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 本研究では 2 つの錘の連成振動の効果を利用することで、低加速度領域での高出力化を目指した。このような機構は 2 自由度構造と呼ばれ、その発電を担う圧電素子には線形性の高い出力特性が要求される。そこで、有限要素法を用いて非線形バネ効果を低減した素子の設計を行った後、鉛系圧電体薄膜と MEMS プロセスを用いて発電素子を作製した。その結果、0.2G の印加加速度で 0.89 μ W の最大出力を得ることができた。さらにその特性を詳細に解析することで、圧電 MEMS 振動発電素子の出力特性には、非線形バネ効果に加えて空気抵抗に起因する減衰の非線形効果も影響を及ぼすことを明らかにし、新しい圧電振動発電素子の理論計算モデルを開発した。
- (2) 2 自由度構造を有する圧電振動発電素子の電気機械特性について調べた。まず、理論モデルを用いた計算より、2 つの振動子の共振周波数と、それぞれの錘の重さを接近させることで、連成振動の効果により出力電力密度が向上することを明らかにした。この結果に基づき、(1)で作製した圧電 MEMS 素子を用いて 2 自由度構造を有する振動発電素子を作製した。環境振動に近い 0.1G の印加加速度で、2.9 μ W の出力電力が得られ、2 自由度構造の採用により 10 倍以上の出力電力の増大を確認した。また、2 自由度振動発電素子の共振周波数は容易に調整が可能という実用化の観点で有用な知見も得ることができた。
- (3) 圧電振動発電素子の社会実装に向けて、低環境負荷の圧電材料の開発が求められている。本研究では、非鉛強誘電体である BiFeO₃ 薄膜を採用して、(1)で作製した鉛系圧電体薄膜を用いた素子と同等以上の出力特性を持つ圧電 MEMS 振動発電素子の開発に取り組んだ。BiFeO₃ 薄膜の誘電率の印加交流電界依存性、および圧電応答顕微鏡を用いた微構造の観察結果から、その圧電特性の向上には分極ドメイン壁の寄与の増大が有効であることを明らかにした。圧電特性を向上させた BiFeO₃ 薄膜を用いて素子を作製したところ、0.3G の印加加速度で 2.4 μ W の最大出力を得ることに成功した。線形領域での出力は理論最大値の 80%に達しており、非鉛材料を用いて高出力な圧電 MEMS 振動発電素子を実現した。

以上の諸成果は、高出力の圧電振動発電素子の開発における基本指針を示すものであり、本分野の学術的および産業的な発展に大きく貢献するものである。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。