

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03936

研究課題名(和文)反磁性磁気浮上を用いた極低損失非線形振動子による高出力広帯域振動発電

研究課題名(英文)High-power broadband vibration energy harvesting by a low-loss nonlinear oscillator using diamagnetic levitation

研究代表者

増田 新(Masuda, Arata)

京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号：90252543

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：環境振動発電は、環境中に遍在する振動エネルギーを収穫し、電力に変換する技術である。本研究では、この技術を社会実装に近いレベルまで高めることを目指し、高出力広帯域な振動発電デバイスを実現するための技術開発を行った。まず非線形振動子を用いた広帯域振動発電デバイスの設計論を確立し、その応用として帯域内で発電パワーが平坦な振動子の設計方法を構築した。次に、反磁性体による受動的磁気浮上技術の損失低減の方法を提案、低損失非線形振動子の実現に向けた設計論を検討した。さらに、外乱下で高エネルギー応答を維持するための応答安定化制御のエネルギー収支について検討し、セルフパワー化を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

さまざまなモノに取り付けた無線センサを介して得られる大量の情報をインターネットを通して活用するIoTネットワークでは、大量のセンサへの電源供給手段とその保守コストが重要な問題になる。特に少子高齢化が進み労働人口が減少していく我が国では、これらの知的情報インフラの維持管理にコストを掛けることができない。その解決策の一つとして、センサ周辺の環境振動の力学的エネルギーを利用する振動発電技術がある。本研究における成果は、振動発電の社会実装を妨げている幾つかの課題の解決をもたらすものであり、持続可能でレジリエントな社会・産業における知的情報ネットワーク基盤の確立に資する。

研究成果の概要(英文)：Vibration energy harvesting is a technology that captures vibration energy ubiquitous in the environment and converts it to electric power. Aiming to raise this technology to a social implementation level, this study presented several technologies for realizing high and broadband power generation performance. First, a design methodology for broadband vibration energy harvesting devices using nonlinear resonators was established, and as an application of this methodology, a procedure for designing resonators with flat power generation within their bandwidth was developed. Next, a method to reduce losses in passive magnetic levitation technology using diamagnetic materials was proposed, and design theory for realizing low-loss nonlinear oscillators was investigated. Finally, the response stabilization control to maintain stable high energy response of nonlinear broadband vibration energy harvesters was theoretically investigated, and its self-powered operation was achieved.

研究分野：機械力学および計測制御、特に構造や材料の非線形力学を利用した知的構造システムの創成

キーワード：環境振動発電 非線形振動 反磁性 磁気浮上 電力 制御 安定化

1. 研究開始当初の背景

未利用のまま環境中に廃棄されているエネルギーを回収して微小電力源として用いるエネルギーハーベスティング技術が注目されて久しい。特に振動エネルギーは自然環境・人工物環境を問わず遍在していることから、IoT デバイスのための局所エネルギー源として最有望視されるものの一つであるが、十分な発電電力と帯域を持ち長期間動作に耐える信頼性を持った振動発電デバイスが未だ登場していないことから、広範な実用には至っていない。

これに対して研究代表者は、非線形復元力を有する非線形振動子と自励発振回路を用いた広帯域振動発電の原理を提案した。これは、共振型振動発電デバイスにおいて最大の技術的課題である電力・帯域トレードオフを解消するために、非線形振動子の共振ピークが高周波側または低周波側へ「折れ曲がる」こと、および、自励振動子の強制引き込みによる高エネルギー応答軌道の大域的安定化という、二つの非線形現象の巧みな利用によって、高出力と広帯域を両立させたものである。しかしこれまでのところ、高エネルギー応答の大域的安定化制御（以下、応答安定化制御）のセルフパワー化、すなわち制御に要する電力を自分自身が発電した電力のみで賄うためには $1G_{rms}$ 以上の振動加速度入力が必要であり、実用性を欠いていた。

実用的な動作条件下で応答安定化制御のセルフパワー化を達成し、高出力広帯域な振動発電デバイスを実現するには、制御効率の向上を図るとともに、発電性能をこれまでより一桁向上させる必要がある。発電電力の理論的な上限は、振動子の質量、ストローク、振動源の加速度振幅、周波数の積で決まるため、振動子質量を可能な限り大きくしつつ、機械的損失を抑制して幅広い周波数で振動子が大きく振動するように設計する必要がある。そのために大ストローク・低損失、かつ広帯域動作のための顕著な非線形復元力特性を兼ね備えた非線形振動子を実現する必要があった。

2. 研究の目的

本研究は、非線形振動子を用いた広帯域振動発電デバイスを社会実装に迫るレベルに引き上げることを目的とするものである。そのために、①非線形振動子を用いた広帯域振動発電デバイスの設計論の確立と深化；②永久磁石を用いた非線形磁気ばね振動子に反磁性体による受動的磁気浮上技術を組み合わせた低損失非線形振動子の開発；③非線形振動子を用いた広帯域振動発電デバイスにおける高エネルギー応答の大域的安定化制御技術にかかるエネルギーの自給自足化（セルフパワー化）の達成、を目指す。本研究によって実用的な動作条件下でのセルフパワー化応答安定化制御を実現することができれば、振動発電技術の広範な実用を妨げている電力・帯域のトレードオフが解消され、高出力広帯域振動発電デバイス実用化への道が開けると期待される。

3. 研究の方法

上述のような広帯域非線形振動発電システムの実現を目指して、本研究では三つの目標を設定して研究を行った。

- (1) 【非線形振動子を用いた広帯域振動発電デバイスの設計論の確立と深化】非線形復元力を有する振動子を用いて振動発電デバイスを広帯域化するための設計論について、特に、パワー性能と帯域性能を両立させるための設計理論を構築した。まず対称ハードニング振動子について、パワー帯域性能を評価するための見通しのよい図式解法を提案、次いで、それを非対称ハードニング振動子および対称ソフトニング振動子へ拡張した。対称ソフトニング振動子が広帯域でパワー平坦な発電デバイスを実現することを示し、所望のパワー帯域特性を実現する非線形ばね特性をシンセシスする設計方法を提案した。さらに、対称ハードニング振動子について、複数次解が共存する帯域における高エネルギー応答解のベイスン安定性の解析を行った。
- (2) 【永久磁石を用いた非線形磁気ばね振動子に反磁性体による受動的磁気浮上技術を組み合わせた低損失非線形振動子の開発】反磁性材料である熱分解グラファイトを用いた磁気浮上磁気ばね振動子において、グラファイトは導電材料であるため浮上磁石に対して渦電流損失が発生する。これを低減するために、圧電セラミックス複合材料の作成に用いられる dice and fill 法を応用して、熱分解グラファイト板を細片化し、間をエポキシ樹脂で充填した反磁性複合材料板の作成プロセスを確立した。これを用いた磁気浮上水平振動子を作成し、100 以上の Q 値を持つ振動子を実現した。次に、この反磁性複合材料板を管壁として用いた角筒に磁石を封入し、それを別の固定磁石により軸方向に浮上支持した磁気浮上振動子の安定解析を有限要素法を用いて行い、当初目標の実現の可否について検討を行った。
- (3) 【応答安定化制御のセルフパワー化の達成】非線形振動子を用いた広帯域振動発電デバイスにおける高エネルギー応答の大域的安定化を実現するための応答安定化制御について、発電エネルギーと制御に要するエネルギーの収支解析を行った。制御動作中および待機中のエネルギー収支成立条件を導出し、整流回路における昇圧比がクリティカルな設計パラ

メータであることを明らかにするとともに、Cockcroft-Walton 整流回路を用いた回路設計を行った。小型のハードニング型振動発電デバイスを設計製作し、マイコンおよびスイッチング回路以外の電力を自己給電する応答安定化制御を実現し、連続動作が可能であることを示した。

4. 研究成果

(1) 【非線形振動子を用いた広帯域振動発電デバイスの設計論の確立と深化】

① 対称ハードニング振動子を用いた振動発電デバイスにおけるパワー帯域性能最適化

本研究では、1自由度対称ハードニング振動子を用いた振動発電デバイスの設計論を提案した。その際に、振動源の加速度振幅および周波数の変動範囲(それぞれの上限值と下限値)を考慮し、変動範囲内において高エネルギー応答解の存在を保証するための設計手順を確立した[1]。

まず、対称ハードニング振動子を用いた1自由度振動発電デバイスの運動方程式から出発する。振動子は電磁誘導による電気機械トランスデューサを内蔵しており、加速度振幅一定の定常加振力を受けるとする。平均法を用いた定常応答解析により、振動子の変位振幅-周波数特性の式を得る。この式から、変位-周波数平面における変位の最大点(共振点)が、二つの曲線(C1およびC2)の交点として得られることが導かれる(図1)。

$$C1: \quad \omega = \sqrt{\frac{K_{eq}(a)}{m}}, \quad C2: \quad a\omega = \frac{mu_a}{c_t}$$

ここで、 $a, \omega, m, u_a, c_t, K_{eq}$ は変位振幅、周波数、振動子の可動部質量、振動源の加速度振幅、振動子の減衰(機械減衰と電気減衰の和)、振動子のばねの等価剛性である。C1はいわゆる背骨曲線であり、振動子の可動部質量とばねの復元力特性のみで決まる。いっぽうC2は振動源の特性(加速度振幅と振動数)および振動子の可動部質量と機械減衰、回路の電気減衰で決まる双曲線(減衰曲線と称する)である。この図式的理解は、振動子の設計に明快な見通しを与える。

この知見に基づき、本研究では、振動源特性(加速度振幅と周波数)の変動範囲が所与のとき、加速度振幅の下限值に対する減衰曲線C2と周波数の上限値の交点をcritical resonance point (CRP)と称して、背骨曲線C1がCRPを通るように設計することで、振動源の変動範囲内で高エネルギー応答解の存在を保証できることを示した。さらに、変位-周波数平面内での等パワー曲線(変位と周波数が反比例する双曲線)C3を定義することで、帯域最大化設計のための方策を導いた。帯域は背骨曲線C1が減衰曲線C2と等パワー曲線C3に挟まれる周波数範囲として定義されるため、C1がC3を上回った後、水平に近く折れ曲がるような急峻な非線形性を持つことが、帯域最大化のためには望ましい。

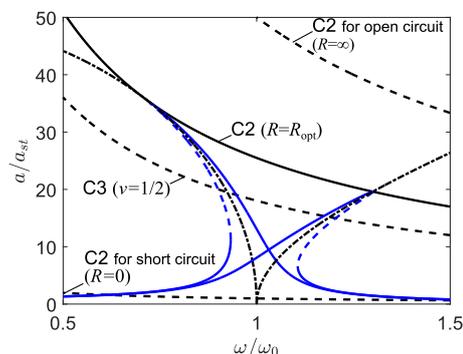


図1 対称ハードニング振動子と対称ソフトニング振動子の変位-周波数線図(共振曲線)

② 非対称ハードニング振動子を用いた振動発電デバイスにおけるパワー帯域性能

①の設計理論は非線形復元力が正負の変位に対して奇対称であることを仮定している。実際の振動子では、特に振動方向が鉛直方向である場合、重力によって平衡点がシフトするため、実質的には非対称の復元力を想定しなければならない。そこで、既に発表済みの文献[2]で提案した、非対称ハードニング振動子の近似解析手法に対して、3次の非線形復元力と重力等の一定外力の存在を仮定して、定常応答解および過渡応答解の近似精度の検討を行った。この場合も、定常応答解は、背骨曲線と減衰曲線の交点に共振点を持つため、①の設計理論が適用できる。ただし、背骨曲線は応答振幅の増加とともに、いったん低周波数側に折れ曲がった後、高周波数側に折れ曲がる、ソフト・ハードニング特性を示すことが特徴である。精度評価の結果、定常応答解は実用上十分な精度を有するのに対して、過渡応答には位相誤差が生じることがわかった。この誤差は動作周波数と背骨曲線が離れるほど顕著になる。

③ 対称ソフトニング振動子を用いた振動発電デバイスにおけるパワー帯域性能

①の設計理論は非線形復元力がソフトニング特性を持つ場合にも有効である。しかもこの場合には、図1に示唆されるように、背骨曲線C1が減衰曲線C2と等パワー曲線C3の間に沿って延長していくことで、理論上、帯域を制限なく拡大していくことが可能である。このアイデアに基づき、共振帯域内で発電パワーが平坦な振動発電デバイスの設計手法を提案した[3]。まず、所望の帯域特性を持つ背骨曲線C1を設定する。このとき、背骨曲線がC2とC3の間の領域に沿うように、理想的には、背骨曲線がC3に一致するように設定することで、パワー特性が平坦になる。次に、所望の背骨曲線を持つような復元力特性を特定する。ここでは、復元力特性を基底関数で展開表現し、L2正則化された最小二乗法を用いて展開係数を求める手法を採った(Ridge回帰)。

さらに、具体的なばね機構として、磁気ばねを用いる手法を提案・検討した。可動部質量をばねによって懸架された円柱磁石とし、これに非線形復元力を与えるために、円柱磁石の外側に小さな円柱磁石をリング状に配置したものを複数用いる。そして、これらリングの直径と軸方向の位置および極性を、磁気力による復元力が所望の特性になるように決定する問題として定式化した。リングの直径と位置の候補を離散格子として定義し、所望の復元力との差の二乗を誤差として、L1 正則化により誤差が最小となるスパースな重みを決定し (Lasso 回帰)、得られた重みを実現するよう、リング状に配置する小磁石の数と極性を決定した。設計した磁気ばねを実際に製作したが、残念ながら、期待した復元力を得ることができなかった。原因については十分な分析が及んでいないが、装置の組み立てに使用したネジの磁性や小磁石同士の相互の減磁作用を考慮できていないためと考えられる。今後はこれらを十分検討し、最適化問題の定式化や求解法を見直すことで、実現に近づけると期待される。

④ 対称ハードニング振動子における高エネルギー応答解のベイスン安定性の解析

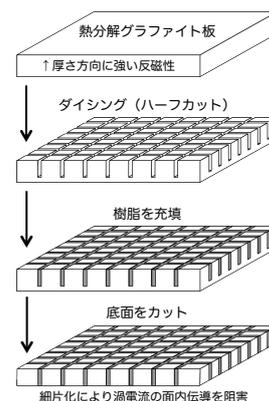
非線形振動子の定常応答解は、図 1 にも示されているとおり、共振ピーク近傍において複数の安定解を持つという特徴がある。これを「解の共存」といい、いずれの解に収束するかは初期条件依存であるため、非線形振動子を用いた広帯域振動発電デバイスにおいては、如何にして最大のエネルギーを持つ応答解を維持するかが問題となる。研究代表者はこの問題に対して、発電で得たエネルギーを振動子に再注入することで応答を最大エネルギー解に拘束する「応答安定化制御」を提案しており、本研究課題においてもそのセルフパワード化を最終目標としている。

応答安定化制御におけるエネルギー再注入は、振動子の応答が最大エネルギー解の吸引領域 (ベイスン) を逸脱したときに発動するため、ベイスンの面積 (ベイスン安定性) が大きいほどセルフパワード化の観点から有利である。そこで本研究では、ベイスン安定性の数値解析、ベイスン安定性を予測するための近似式の導出、ベイスン安定性と非線形性の強度との関係について分析を行った。その結果、ベイスン安定性は背骨曲線の折れ曲がり之急峻なほど低下することがわかった。背骨曲線の折れ曲がり之急峻さは帯域幅の拡大に繋がるため、この結論は、帯域幅とベイスン安定性がトレードオフの関係にあることを示唆する。

(2) 【反磁性体磁気浮上を用いた低損失非線形振動子の開発】

① 渦電流損失を低減する反磁性複合材料板の開発

反磁性材料である熱分解グラファイト板は導電材料であるため、磁気浮上磁気ばね振動子において浮上磁石が振動すると大きな渦電流損失が発生する。これを低減するためには渦電流の面内伝導を阻害する必要がある。そこで、圧電セラミックス複合材料の作成に用いられる **dice and fill** 法を応用して、熱分解グラファイト板を細片化し、間をエポキシ樹脂で充填した反磁性複合材料板の作成プロセス (図 2) を確立した。作成した複合材料板を上下平行に配置し上方に固定磁石、板間の空隙に浮上磁石を配置した水平振動子において、バルクの反磁性体板に対して約 10 倍高い、100 以上の Q 値が得られることを実験的に確認した[4]。



② 反磁性複合材料板を管壁とする角筒に永久磁石を封入した浮上振動子の検討

①で開発した反磁性複合材料板を管壁として用いた多角形筒に磁石を封入し、それを別の固定磁石により軸方向に浮上支持した縦型磁気浮上振動子を安定化するための設計論を確立すべく、有限要素法を用いて網羅的なパラメータスタディを行った。しかし実用的に有用な $40\text{Hz}-80\text{Hz}$ 程度の共振帯域を持ち、管壁と非接触で浮上可能、かつ顕著な非線形性を有する振動子の設計を見出すことはできなかった。浮上振動子の固有振動数は、磁石および反磁性材料の形状と配置、磁石の密度と磁束密度、および反磁性材料の負の磁化率で決定されるが、材料物性から決まる固有振動数の上限値が存在するものと推察された。



そこで、理論的考察に立ち戻るべく文献調査を含めて再検討を行ったところ、文献[5]における、べき展開近似を用いた安定解析に基づいた考察により、安定磁気浮上振動子の平衡点において、鉛直方向の保持剛性と水平方向の保持剛性にトレードオフが存在する、具体的には両者の線形和の上限が、負の磁化率の絶対値等で決定される一定値で押さえられることを見出した。これは、垂直方向の固有振動数と水平方向の固有振動数のパレートフロントが $1/4$ 楕円形状になることを意味している。なお、本研究の範囲では非接触浮上を実現できなかったものの、反磁性複合材料板の導入により、管壁との接触による摩擦減衰を 10%程度低減する効果があったことを実験的に確認している。

図 2 Dice and fill 法によって作成した反磁性体複合材料板と水平浮上振動子

なお、本研究の範囲では非接触浮上を実現できなかったものの、反磁性複合材料板の導入により、管壁との接触による摩擦減衰を 10%程度低減する効果があったことを実験的に確認している。

(3) 【応答安定化制御のセルフパワード化の達成】

① 応答安定化制御のエネルギー収支の解析

非線形振動子を用いた広帯域振動発電デバイスでは、複数解が共存する共振帯域において高エネルギー分枝上での応答を安定維持するための応答安定化制御が必要である。この制御にかかるエネルギーは自ら発電して蓄積したエネルギーで自給自足する必要がある。そこで、制御動作中および待機中のエネルギー収支成立条件を導出した。まず、外乱モデルを導入して、振動子の過渡的挙動を平均法解析によるスローダイナミクスとして位相平面内の流れ場上の軌道として表現し、実験結果と比較した。振動子の過渡的挙動が応答安定化制御の消費エネルギーに与える影響を考察し、excitation mode への切り替え回数が消費エネルギーの増加に大きく影響すること、消費エネルギーが高エネルギー解と低エネルギー解の力学的エネルギーの差によって近似的に算出できることを示した。充電回路として Cockcroft-Walton 整流回路 (CW 回路) を想定し、振動発電によって獲得されるエネルギーと、応答安定化制御のために消費されるエネルギーの収支をプラスにしながら、制御回路が有効に動作するための条件式およびそれを満たすための CW 回路の最小段数を導出した。

② セルフパワード応答安定化制御の実験的検証

(1)①で示した設計理論に基づき、小型のハードニング型振動発電デバイスを設計製作し、(3)①で行ったエネルギー収支解析に基づいて、マイコンおよびスイッチング回路以外の電力を自己給電する応答安定化制御を実現し、連続動作が可能であることを示した。実施した実験のうち、振動源の加速度振幅が $0.5G_{rms}$ の場合の結果を図 3 に示す。図にプロットしたのは CW 回路の充電コンデンサ電圧である。コンデンサが空の状態からスタートして 6 分後に最初の外乱が入力され、その後 2 分おきに外乱が入力されているが、毎回、応答安定化制御により応答を高エネルギー解に拘束できていること、その際に使用したエネルギーを 2 分間の間に回復できていることがわかる。

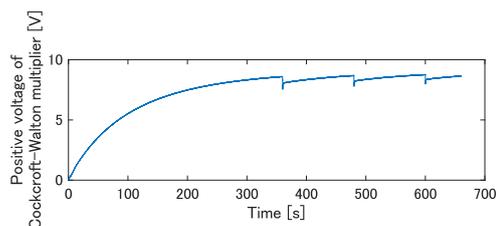


図 3 間欠的に入力される衝撃外乱に対して応答安定化制御を行った際の CW 回路の充電電圧の推移 (加速度振幅: $0.5G_{rms}$)

引用文献

- [1] A. Masuda, Analysis and design of power and bandwidth of nonlinear vibration energy harvesters with hardening restoring forces, *Journal of Sound and Vibration*, 553, 117575, 2023, pp.1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.117575>
- [2] A. Masuda, Y. Miyata, S. Ushiki, F. Zhao, Wideband operation of a nonlinear vibration energy harvester with asymmetric restoring force, *Proc. SPIE 10967*, 109670N, 2019, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1117/12.2515423>
- [3] Y. Yoshida, M. Hiraga, N. Miura and A. Masuda, An ideal softening resonator for nonlinear Vibration energy harvesting with flat power characteristics, 2023 IEEE 22nd International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS), 2023, pp. 106-109. <https://doi.org/10.1109/PowerMEMS59329.2023.10417557>
- [4] S. Kimura, A. Masuda and N. Miura, Reduction of eddy current loss of diamagnetically-levitated resonators by dice-and-fill processing, 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022), 2022, pp. 1-2.
- [5] M. D. Simon, L. O. Heflinger and A. K. Geim, Diamagnetically stabilized magnet levitation, *Am. J. Phys.* 69, 2001, pp. 702-713. <https://doi.org/10.1119/1.1375157>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Masuda Arata	4. 巻 553
2. 論文標題 Analysis and design of power and bandwidth of nonlinear vibration energy harvesters with hardening restoring forces	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 117575-117575
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jsv.2023.117575	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 Yoshida Yu, Hiraga Motoaki, Miura Nanako, Masuda Arata	4. 巻 1
2. 論文標題 An Ideal Softening Resonator for Nonlinear Vibration Energy Harvesting with Flat Power Characteristics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of PowerMEMS 2023	6. 最初と最後の頁 106-109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/PowerMEMS59329.2023.10417557	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Sota Kimura
2. 発表標題 Reduction of eddy current loss of diamagnetically-levitated resonators by dice-and-fill processing
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田 新
2. 発表標題 非線形広帯域振動エネルギーハーベスタのセルフパワー応答安定化条件
3. 学会等名 日本機械学会 IIP2022 情報・知能・精密機器部門講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔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
---------	---------