

機関番号：14303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656157

研究課題名(和文) 衝突自励振動系による広帯域・高出力な環境振動発電

研究課題名(英文) Wideband and high-power vibration energy harvesting by a self-excited impact oscillator

研究代表者

増田 新 (Masuda, Arata)

京都工芸繊維大学・工学科学研究科・准教授

研究者番号：90252543

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円、(間接経費) 660,000円

研究成果の概要(和文)：未利用のまま環境中に廃棄されている力学的エネルギーを回収して微小電力源として用いる振動エネルギーハーベスティング技術が注目されている。本研究では、衝突振動子や双安定振動子などハードニング性を有する非線形振動子に機電変換器を組み込み自励発振制御を行うことにより、広帯域で高出力を発揮することのできる新しい振動発電デバイスを実現する。これによって既存のデバイスの実用を妨げる最大の問題である帯域-出力トレードオフを、周期的振動源の場合について改善し、さらに低周波入力に対する高出力化に繋がる新たな着想も得ることができ、振動発電技術の幅広い実用に繋がる成果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：Vibration energy harvesting is a technology that aims to collect unused or wasted mechanical energy from the environment and convert it to electric energy. It has attracted increasing attention in the last decade as a local and decentralized power source for embedded systems. In this research, a novel class of wide-band and high-power-efficiency energy harvesting devices is realized by combining a nonlinear hardening oscillator such as impact oscillator and bistable oscillator with a self-excitation circuit. As a consequence, the power-bandwidth trade-off, one of the most significant problems that impede the practical use of the vibration harvesting devices, has been resolved for the case of the periodic excitation. Furthermore, a new idea which can lead to high power regeneration from a low frequency vibration source has been suggested by pursuing the improvement of the power conversion efficiency from the mechanical input energy to the retrieved electric energy.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：エネルギーハーベスティング 振動発電 非線形振動 引き込み 双安定

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ナジーハーベスティング技術が注目されている。特に振動エネルギーは自然・人工環境を問わず遍在していることからユビキタスなエネルギー源として有望視されている。

このような振動発電デバイスのなかで、振動物体への後付けが可能な共振型デバイスでは、高Q値の振動子に機電変換器を組み込んだものを振動源と共振させることによって振動源の微小な振動からできるだけ大きな出力を取り出すことを狙う。このため振動源の振動数に変動が生じると出力が大幅に低下するという出力帯域のトレードオフがある。これは機電変換方式を問わず共通の問題であり、実用上の最大の課題となっている。

我々は2010年にハードニングばねを有する非線形振動子と自励発振回路を用いた振動発電の原理を提案した。これは、出力帯域のトレードオフを解消するために、ハードニング振動子の共振ピークが高周波側に「折れ曲がる」こと、及び、自励振動子の引き込み現象による大振幅応答へのロッキングという二つの非線形現象を利用することによって広帯域と高出力を両立させることを狙ったものである。ハードニングばねとして磁気ばねを用いることを想定し、簡易モデルによるシミュレーションによって、線形振動子の10倍程度の広帯域で大振幅応答を維持できることを確認しているが、磁気ばねを用いているため小型化が難しいこと、制御パラメータと引き込み条件の関係が不明であること、引き込みまでの整定時間が長くかかりエネルギー効率が悪いこと、実証モデルによる実験ができていないことなど、実用に向けての課題が山積していた。

2. 研究の目的

衝突振動子などハードニング性を有する非線形振動子に機電変換器を組み込み自励発振制御を行うことにより、広帯域で高出力を発揮することのできる新しい振動発電デバイスを実現する。これによって既存のデバイスの実用を妨げる最大の問題である帯域-出力トレードオフを解決し、振動発電技術の幅広い実用貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

当初研究計画ではハードニング振動子として衝突振動子のみを用いる計画であったが、研究実施途中で双安定振動子を含む広いクラスのハードニング振動子の豊かな可能性への認識を持つに至り、さらに低周波入力に対する高出力化に繋がる着想も得たため、これらの検討を含めて研究を行った。

- (1) 衝突振動系をハードニング振動子として用い、非線形力学解析により振動子-回路系の応答解の挙動を子細に調べることに

よって、引き込み挙動の詳細を明らかにする。

- (2) 振動子の応答を環境振動に効率よくロックするための仕組みを確立するために、位相縮約モデルに基づく自励発振回路の制御アルゴリズムを開発する。
- (3) 片持ちばり振動子の両側にストッパを設置することによってハードニング特性を付与した衝突振動子に、振動子のポテンシャル形状の整形の自由度を拡大するために永久磁石を追加して双安定化を行う。正弦波掃引による応答解析および実験によってポテンシャル形状と発電性能の関係について検討する。
- (4) 双安定ポテンシャルの利用をさらに展開して、永久磁石による機械的スイッチング機構の導入を行い、低周波入力に対するエネルギー変換効率の改善について検討を行う。

4. 研究成果

(1) 図1に示すハードニング振動系に正負負荷切替回路を接続した自励振動系を考える。図でNICと表示されている部分が負性抵抗回路であり、エネルギーを振動子に還流することにより振動子の運動を加速する働きを持つ。回路を正の負荷抵抗側に固定したとき、この振動子は図2のような変位応答を持つ。ばねのハードニング特性によって共振曲線は広域側に折れ曲がり、共振帯域を拡大するが、共振峰付近で解が多価性を持つようになる。どちらの解が発現するかは初期条件によるため、確実に高エネルギー解に収束させる仕組みが必要になる。

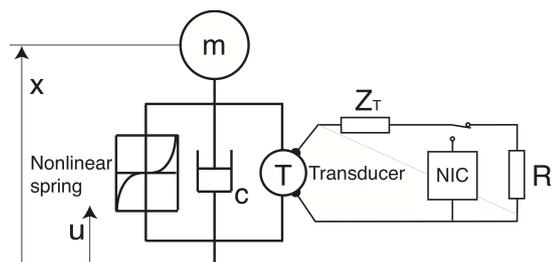


図1 ハードニング振動子に不可切替回路を接続した自励振動系

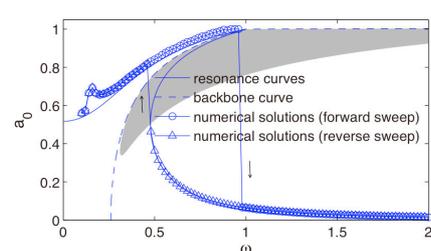


図2 ハードニング振動子の変位応答

この振動子について、

- 変位応答振幅としきい値との大小関係によって回路切替を行う方法
- 変位と速度の瞬時値が相平面上に設定した領域の内外いずれにあるかによって回路切替を行う方法

の二種類の負荷切替則を適用した場合の求解を平均法および数値解析によって行い、加振振動数、加振振幅としきい値に対する高エネルギー解の大域的安定性の依存性について解析した。

結果の例として前者の切替方法による場合を図3に示す。実線で示されているのが平均法による解、シンボルが数値計算による解である。グレー領域は解が不安定になる領域である。平均法で予想された帯域において高エネルギー解が安定に存在しているが、共振峰先端付近においては概周期解と共存する帯域がある。解が共存するということは、外乱によって高エネルギー解が概周期解に遷移する可能性があるということであり、高エネルギー解は大域的安定ではない。

しかしここで図4のようにしきい値を大きくすると、共振峰先端においても解は大域的安定性を示すようになる。すなわち、入力周波数に依存してしきい値を調整することにより、解の大域的安定性を保証することができることがわかり、しきい値の適応的制御が必要であることが示唆された。

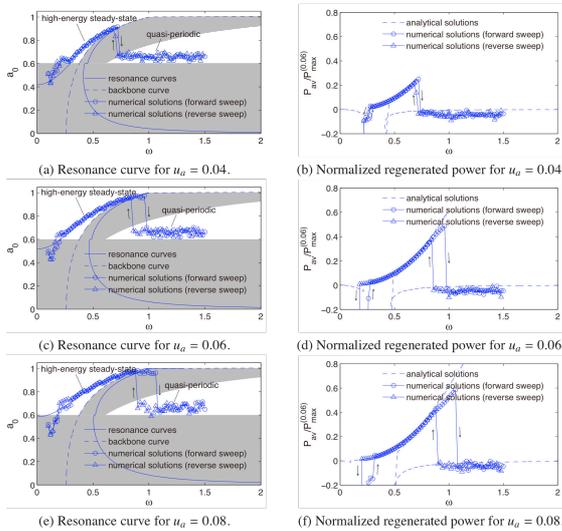


図3 振動子変位 (左) と発電パワー (右)

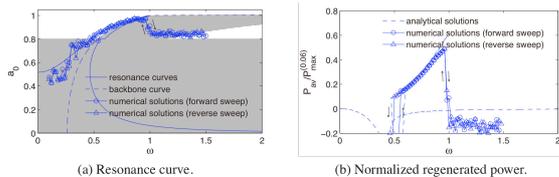


図4 振動子変位と発電パワー (しきい値大, 図3(c)(d)と同入力)

(2) 負荷切替による自励発振回路の開発を行い、磁気ばねを用いた電磁型のハードニング振動発電装置に適用して、自励発振による

高エネルギー応答への引き込み制御の効果を実験的に評価した。実験機の外観を図5に示す。

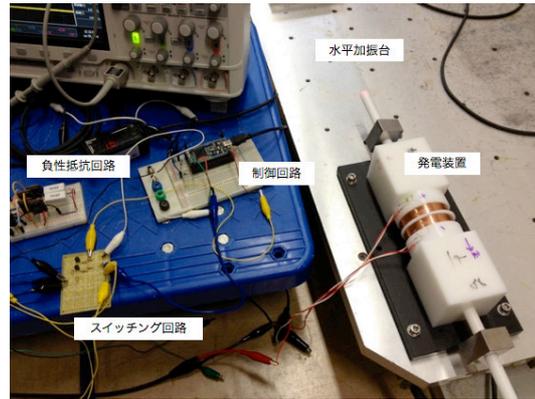


図5 実験機外観 (電磁型)

その中で、振動子の状態によっては外力への引き込みが迅速に行われず、せっかく発電したエネルギーを外力へのロックインに多く費やしてしまうケースがあることがわかった。そこで、少量のエネルギー消費で外部環境振動に確実に迅速にロックインすることを目指すために、振動源からのパワーフローに注目した制御アルゴリズムの検討を行った。その結果、しきい値の適応的調節とは異なるアプローチ、すなわち振動子の位相を明示的に制御して加振源からのパワーフローを促進することが有効であることが示唆された。さらに位相縮約理論による引き込み解析および数値解析を併用してより効率的な引き込み方法の検討を行い、状態量に応じて正負の抵抗値をきめ細かく切り替える新しい制御アルゴリズムを提案した。その結果、引き込みまでに要するエネルギー消費量を最大で40%程度削減することができた。(図6)

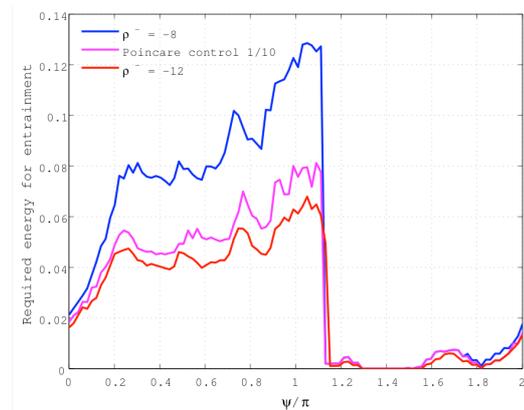


図6 引き込み完了までに要するエネルギー

図6で横軸は外力に対する振動子の初期位相差、縦軸は引き込みに要するエネルギーである。ピンクの実線は提案手法、青と赤の実線は負性抵抗値を固定した場合を表

す. この例では赤のケースが最も優れているが, 引き込み帯域が狭いという欠点がある. 提案手法であればエネルギー削減と引き込み帯域の確保を両立できる.

(3) 片持ちはり振動子の両側にストッパを設置することによってハードニング特性を付与した衝突振動子に, 振動子のポテンシャル形状の整形の自由度を拡大するために永久磁石を追加して双安定化を行った. 図7に振動子の構成, 図8に実験装置の外観を示す.

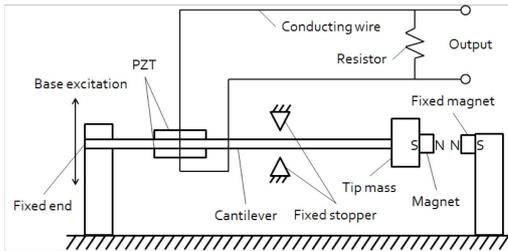


図7 双安定衝突振動子の構成

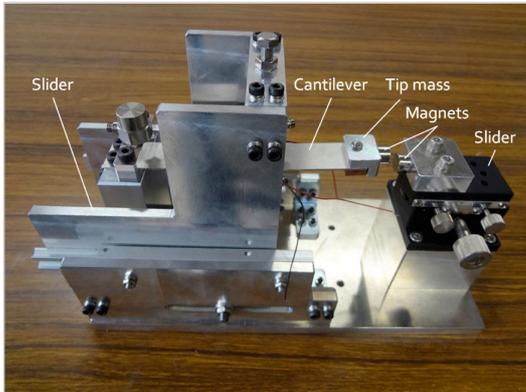


図8 実験機外観 (双安定圧電型)

ストッパ衝突による境界条件変化を考慮した圧電素子積層はりの数学モデルを作成し, モード展開による低次元化を行って平均法による定常応答解を求解した. 導いた数学モデルにおける振動子のポテンシャル形状の磁石間距離 s による変化を図9に示す.

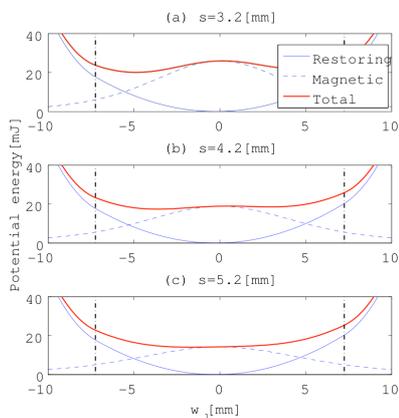


図9 振動子のポテンシャル形状

正弦波掃引による応答解析および実験によってポテンシャル形状と発電性能の関係の整理と物理的考察を行い, 高エネルギー解の広帯域化の観点から最適なポテンシャル形状を導いた. そもそも当初は高エネルギー応答を得るための新たな受動的方策として双安定振動子の導入を検討したが, 双安定振動子は低周波数側の帯域を拡大する作用を持つが解の多価性を解消するものではない. したがって外乱作用下における高出力応答の維持のためには(1)(2)の引き込み制御の適用が必要であり, これについては継続して検討中である.

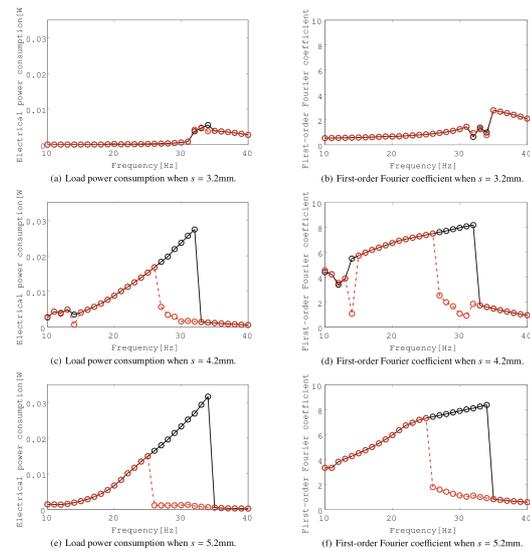


図10 発電パワー (左) と変位応答 (右)

(4) (3)で述べた双安定ポテンシャルの利用をさらに展開して永久磁石によるプラッキングの利用を検討した. この着想では, 機械的な着脱機構 (図11においては爪で表現) の導入によって, 負荷過程で振動子に入力されたエネルギーの大半を電気エネルギーに変換しようとするものである.

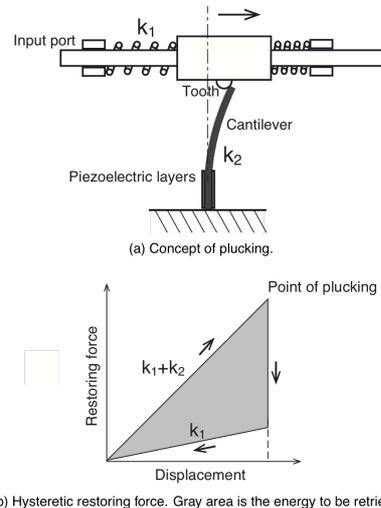


図11 プラッキング (つま弾き) による低周波入力からの高效率発電

さらに、回路切替技術である SSHI (synchronized switching harvesting on inductor) の併用によって、低周波入力に対するエネルギー変換効率を大幅に改善できる見通しを示した(図12)。図12の横軸は圧電素子を貼付した振動子の電気機械結合係数を、縦軸は負荷過程に振動子に入力された機械エネルギーに対して負荷抵抗で消費された電気エネルギーの比である。ブラッキングと SSHI の導入によって縦軸のエネルギー変換効率が大きく向上していることがわかる。

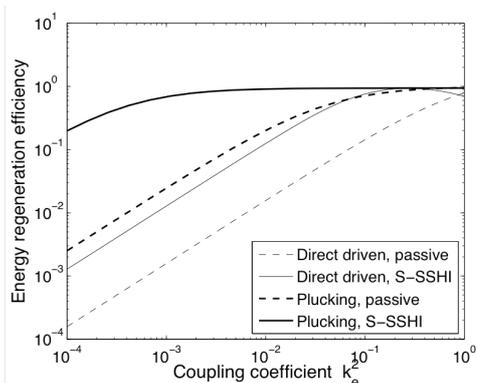


図12 プラッキングと SSHI の併用による低周波入力からの高効率振動発電

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① A. Masuda, Y. Hiraki, K. Yamane and A. Sone, A piezoelectric regenerative damper for low-frequency application, Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2014-28856, 2014, 1-6.
- ② A. Masuda, A. Senda, T. Sanada, A. Sone, Global stabilization of high-energy response for a Duffing-type wideband nonlinear energy harvester via self-excitation and entrainment, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013, 1598-1612.
DOI: 10.1177/1045389X13479183

[学会発表] (計6件)

- ① 増田新, スマート構造技術を用いた小型海洋波発電装置 - 圧電材料を用いた低周波用発電デバイスの設計, 第23回日本MRS年次大会, 2013年12月09日~2013年12月11日, 横浜市
- ② 平木康裕, 増田新, スマート構造技術を用いた小型海洋波発電装置 - 設計方針と発電量の検討, 日本機械学会2013年度年次大会, 2013年09月08日~2013年09月11日, 岡山市

- ③ 道下淳, 増田新, 自励発振特性を付与した Duffing 型振動子による非線形振動発電装置の引き込み特性の解析, 日本機械学会 第13回運動と振動の制御シンポジウム, 2013年08月26日~2013年08月30日, 九州工業大学, 福岡市
- ④ 増田新, 山根光希, Duffing 型双安定振動子を用いた非線形振動発電の研究, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2013, 2013年08月26日~2013年08月30日, 九州工業大学, 福岡市
- ⑤ 増田新, Duffing 型非線形自励振動子を用いた広帯域振動発電, 日本機械学会第11回評価・診断に関するシンポジウム, 2012年12月10日~2012年12月11日, 川崎市産業振興会館, 川崎市
- ⑥ 増田新, 真田辰哉, 負荷抵抗切替による広帯域型非線形振動発電, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2012, 2012年09月18日~2012年09月21日, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 横浜市

[図書] (計0件)

なし

[産業財産権]

なし

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 新 (MASUDA, Arata)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授

研究者番号: 90252543

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし