

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630176

研究課題名(和文) 広帯域の振動エネルギーをハーベスティング可能な非線形振動子と変換回路の開発

研究課題名(英文) Development of Nonlinear Oscillator and Power Converter for Energy Harvesting from Mechanical Vibration with Wide Band Frequency

研究代表者

引原 隆士(Hikihara, Takashi)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：70198985

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)：本研究は自然界に偏在する流体の流れ、構造系などの振動から、微小な力学エネルギーを回収する技術に関する基礎研究である。従来振動に関するエネルギーハーベスティングは、線形振動子の外部励振による共振を利用するものが大半であった。本研究は、自然界に存在する波動・振動が広帯域に拡散したパワースペクトル有することに着目し、周波数スペクトルの広帯域のエネルギーが吸収できる非線形振動子、およびその結合振動子を設計・製作し、同期、確率共鳴の現象によってもエネルギーの回収が可能となることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This project is a fundamental research focusing on harvesting the minute dynamical energy which was spread in loavid flow or structural vibration. The conventional studies have almost adopted the resonance excited by the external force. On the other hand, this research designed a new coupled pendulums and the proto type was made for scavenging the energy from the wide band spectrum in the natural waves and vibrations. Finally, it was also found that the synchronization of coupled system and the stochastic resonance can be a candidate of physical phenomena for harvesting energy from waves and vibrations.

研究分野：非線形力学の工学的応用

キーワード：エネルギーハーベスティング 非線形振動子 乱流 同期現象 確率共鳴 ワイドバンドギャップ半導体

## 1. 研究開始当初の背景

自然界に偏在する流体の流れや構造の振動を用いて発電し、小型電子機器の駆動に供するための技術(エネルギーハーベスティング)に興味もたれ、研究が進められている。これらは人間の生活機器の駆動に必要な電力を供することは難しいが、その寿命に限界がある電池と併用することにより、分散した測定器の長期間の駆動を実現し、さらにはその測定情報を無線により伝送し、空間的に自由な配置でセンサネットワークを構築できる可能性が高いことから着目されている。このような背景から、様々なデバイスの開発が進められている。例えば昆虫の羽ばたきを用いて発電させ、昆虫に付着させた電子回路を駆動させ、生態調査等に資する情報を収集する研究が検討されている(例えば、E. Aktakka, et al., J. Micromech. Microeng. 21 (2011) 095016)。しかしながら、これらの回路の消費電力を押さえると同時に電力供給能力を上げるためには、可能な限り多くのエネルギー源を利用する必要がある。基本となる構造の振動を用いた発電素子は、広帯域のパワースペクトルを有する流体の乱流や、種々の非線形媒体に由来し、共存するエネルギー源、伝搬系から広帯域のパワースペクトルの振動を受けているが、目的周波数以外のエネルギーも合わせて効率的に回収するデバイスは未だ見出されていない。特定周波数の振動エネルギーの回収に、共振のメカニズムが着目されてきた。このメカニズムにより得た共振は振動電圧変換すると、弾性振動と吸収振動に分けられ、吸収振動が有効電力、弾性振動が無効電力となる。申請者らは、同一メカニズムが外部振動と振動子の同期現象に存在することを明らかにした。これは広帯域のスペクトルを持つカオス振動においても存在する(M. Kubota, T. Hikiyama, NOLTA2012, Oct.22-26, Majorca, Spain (2012))。さらに、非線形振動子の確率共鳴のメカニズムは、微弱エネルギーの外乱を集中化し、効率的なハーベスティングの手段となり得る。これらの、基礎的な非線形力学の視点に立ったエネルギーハーベスティングは研究されたことが無く、まずはその原理の有効性を確認することが不可欠である。

## 2. 研究の目的

本研究は自然界に偏在する流体、構造系などの広帯域の連続パワースペクトルを有する流れ、振動から、微小な力学エネルギーを回収する技術に関する基礎研究である。従来振動に関するエネルギーハーベスティングは、線形振動子が外部励振により共振する振舞いを利用するものが大半であった。本研究は、自然界に存在する波動・振動が特定周波数だけではない点に着目し、広帯域に拡散したパワースペクトルからエネルギーの回収

の実現を図ることを目的としている。特に、周波数スペクトルの広帯域のエネルギーが回収できる非線形振動子、およびその結合振動子を設計し、そのパワースペクトルから圧電素子等により電気出力に変換すると共に、オン抵抗の小さいワイドバンドギャップ(GaN, SiC)半導体を適用した高周波高効率変換回路を検討する。

## 3. 研究の方法

本申請の研究実施期間において、乱流等の自然界に偏在する広帯域のスペクトルを有する振動からエネルギーハーベスティングを実現するため、主として実験的観点から次の点に着目して研究を推進する。

(1) 広帯域のパワースペクトルを有する外部振動と振動子との同期および確率共鳴を実現するため、適切な非線形特性を有する振動子を開発すると同時に、それらを結合した振動子を設計し、エネルギー回収の特性を測定する。

(2) 開発した振動子に圧電フィルムもしくはMEMS デバイスを実装し、広帯域の振動エネルギー収集を実証する。なおこの実験の一部はThe Univ. of Alberta (Canada) で実施する。

(3) ワイドバンドギャップ半導体(GaN, SiC)のデバイスを利用した、受動変換回路を設計・製作し、そのデバイス定格条件を検討する。

## 4. 研究成果

本研究はまず、共振を用いた振動エネルギーの回収に関しては、振動子に非線形特性を付与し、非線形振動の同期の現象もしくは確率共鳴を利用した原理の適用を図った。非線形振動子は、外部励振に対して連続スペクトルを有する非線形振動を生じる。またこの振動子は、外部の同じクラスの力学系から得る非線形励振に対して、同期する特性もある。本研究ではそのような非線形振動子の製作を行った。次に確率共鳴の利用を検討した。確率共鳴は微弱なノイズにより共振同様にエネルギーが集中する現象であって、共振同様に利用できる可能性がある。本研究は、これらの原理について理論及び数値計算により可能性を検討している。これは、従来エネルギーハーベスティングにおいて、廃棄されて来た線形振動子の固有周波数以外のスペクトルの振動エネルギーを、工学的に利用することができることを示した。

一般に収集エネルギーは、圧電素子を用いた回路等による電圧から収集する。これらのエネルギーを利用するためには必ず電力変換回路を用いなければならない。しかしながら、微小エネルギーの変換に、外部の電力で増幅するような回路は適用できず、受動回路のみから成る新しい変換回路が不可欠となる。これに対して、GaN, SiC などのワイド

バンドギャップ半導体の適用を試みた．これらのデバイスの耐圧および低オン抵抗の特性は小容量の Si 素子よりも優れ，複数の回路による損失が影響するハーベスティングの分野では大きな意味を持つことが予想された．しかしながら，市販の素子は大容量のものが多く，本研究課題の目的には適さないことが明らかとなった．そこで，圧電素子の利用は取りやめ，磁石とコイルによる電磁式に誘導発電方式を用いた検討に切り替え，GaN MOSFET の同期整流回路による変換の可能性を検討した．

共振を用いた振動エネルギーハーベスティングに関して，振動子に非線形特性を付与し，非線形振動の同期，および確率共鳴が利用できる可能性の検討を行った．非線形振動子は，外部励振に対して連続スペクトルを有する非線形振動を生じる．またこの振動子は，外部の同じクラスの力学系から得る非線形振動に対して同期する特性もある．本研究では，そのような非線形振動子の設計・製作を行った．

数値実験として，二個の Duffing 型非線形振動子：

$$\text{Oscillator 1 : } \ddot{u}_1 = -\gamma \dot{u}_1 + f_1(u_1) + F_{21} + Ku_0$$

$$\text{Oscillator 2 : } \ddot{u}_2 = -\gamma \dot{u}_2 + f_2(u_2) + F_{12} + Ku_0.$$

に関してその結合を

$$F_{12} = \xi (a_1 u_1 + b_1 u_1^3 - a_2 u_2 - b_2 u_2^3) \\ = \xi f_1(u_1) - \xi f_2(u_2),$$

で与え，励振を

$$\ddot{u}_0 = -\gamma_0 \dot{u}_0 - (a_0 u_0 + b_0 u_0^3) + A \cos \omega t,$$

で生成される別の振動子の振動から与えた．この時，振動子間のエネルギー吸収が図1のように求まった．これより，非線形振動子のエネルギー授受が結合係数で支配されるが，明らかに特定の結合において最大のエネルギー吸収を生じる関係があることが明らかとなった．

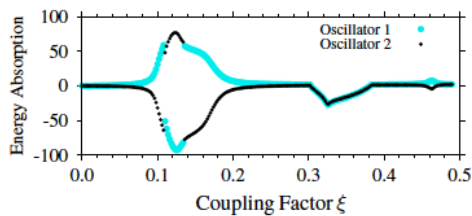


図1 二個の振動子間の結合係数とエネルギー授受の関係

次に非線形共鳴の利用を検討した．確率共鳴は微弱なノイズにより共振同様にエネルギーが集中する現象であって，共振同様にエネルギーハーベスティングに利用できる可能性がある．本研究では，これらの物理現象が利用できる可能性について，理論および数

値計算により検討した．

$$m \frac{dx}{dt} = -m\gamma \dot{x} - \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} + R(t), \\ -\frac{\partial V(x, t)}{\partial x} = -\frac{dU(x)}{dx} + h \cos \Omega t \\ = -(x^3 - x) + h \cos \Omega t$$

その結果，外力として Gauss ノイズを与え，そのノイズに対するエネルギーの吸収を評価した．その吸収には，振動パワーの有効成分と無効成分が関与し，3つのパワー成分：

$$P_1 = -\frac{1}{\gamma m} \left\langle \frac{\partial V}{\partial x} \right\rangle h \cos \Omega t, \quad P_2 = \frac{1}{\gamma m} \left\langle \frac{\partial V}{\partial x} \right\rangle^2, \quad P_3 = \gamma k T.$$

を評価したところ，図2のようになった．図2は，確率共鳴が生じる時点で  $P_1$  の平均値が僅かながらピークを示すことを明らかにした．従来，ノイズに対して確率共鳴下においてもエネルギーの九州は生じず，平均は0と理解されてきた．それに対して，共振と同じく，確率共鳴が生じる状態であれば，ノイズからエネルギーが吸収できる可能性が与えられた．

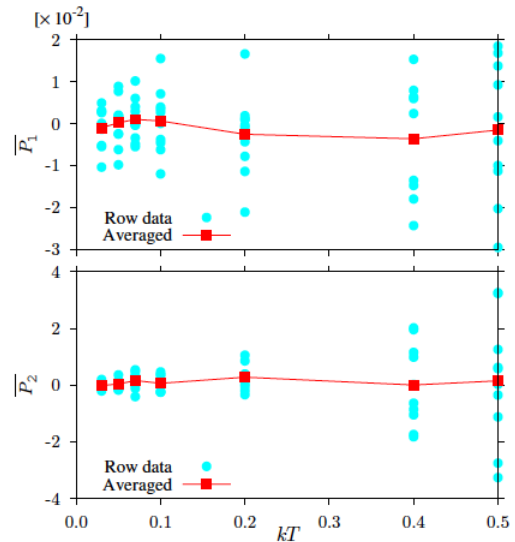


図2 確率共鳴とパワー成分

以上の考察を経て，カナダ国アルバータ大学との共同で図3の振動子を製作し，周期的な外乱，ノイズによる振動子のエネルギー吸収を実験的に確認した．その結果，非線形振動子による振動周波数の集中化とエネルギーハーベスティングの可能性が得られた．本結果は現在論文投稿中である．

微小エネルギーの変換には，外部の電力で増幅するような回路は適用できないため，受動回路のみからなる新しい変換回路が不可欠となる．これに対して，ワイドバンドギャップ半導体である GaN の適用を試み GaN FET を用いた同期整流回路の適用の可能性を検討した．

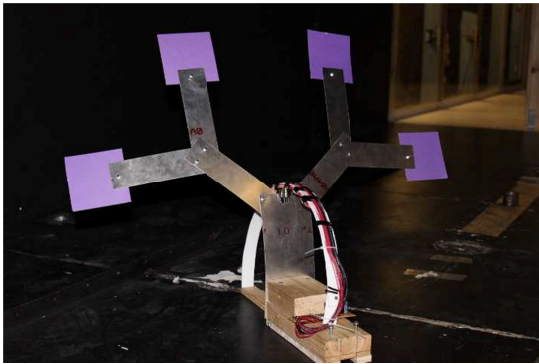


図3 樹状振動子

図3の樹状振動子は、数値計算により確率共鳴によりエネルギー吸収が生じる可能性を得た。また実験により、この結果に対応する結果を得ており、今後その結果についても論文として発表する予定である。

さらに微小なエネルギーからのハーベスティングの可能性を検討するため、結合非線形共振器として図4のMEMS共振器を用いることを検討した。MEMS共振器への外部振動として微弱な電界の揺らぎを想定し、電界の微小揺らぎにより非線形共振器が大きく振動振幅を変えることから、それらを結合した系の間の結合によるエネルギーハーベスティングの可能性について検討した。その結果、ノイズレベル毎に振動振幅のジャンプをする振動子の数が増加することを確認した。このような特性をエネルギーハーベスティングの周波数領域の拡大につなげられることを示した。

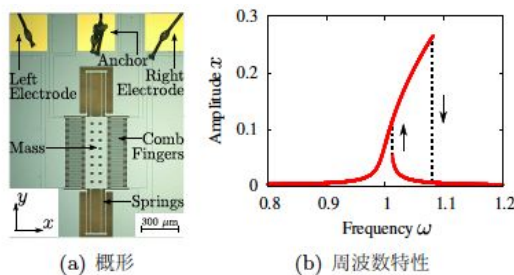


図4 MEMS共振器と応答特性

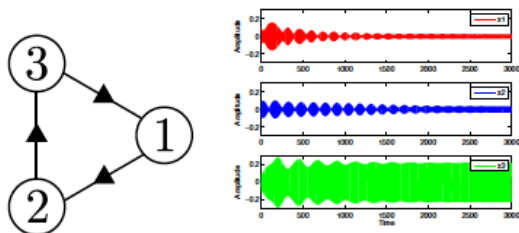


図5 結合MEMS共振器

以上のように、本研究で当初目的とした広帯域の振動エネルギーのハーベスティングに関して、これまで検討されてこなかった新しい物理およびそのメカニズムが利用できることを初めて明らかにした。今後はこれらの効率を高める検討が必要になる。

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)

M. Kubota, V. Putkradze, T. Hikiyara, Energy absorption at synchronization in phase between coupled Duffing systems, International Journal of Dynamics and Control DOI:10.1007/s40435-014-0124-3

M. Kubota, R. Takahashi, T. Hikiyara Active and reactive power in stochastic resonance for energy harvesting IEICE Transactions 98-A(7): 1537-1539 (2015).

[学会発表](計5件)

Madoka Kubota, Morris Flynn, Takashi Hikiyara, Vakhtang Putkradze TREE-LIKE RESONATORS ASSEMBLY FOR BROADBAND ENERGY HARVESTING ASME 2014 International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Controlcal Conferences 2014年08月17日~2014年08月20日 Buffalo, USA

小野愛実, 引原隆士, GaN HEMT を用いたフライバックコンバータの高周波駆動の挙動に関する一検討, 平成27年電気関係学会関西支部連合大会 2015年11月14日 摂南大学

Madoka Kubota, Ryo Takahashi, Takashi Hikiyara Possibility of Energy Extraction from Noise under Stochastic Resonance ICTAM2016 2016年8月21日~8月26日 Montreal, Canada

李文堯, 引原隆士, 非線形MEMS共振器による電界強度測定に関する一検討, 平成28年電気関係学会関西支部連合大会 2016年11月23日 大阪府立大学

李文堯, 引原隆士, 結合非線形MEMS共振器による電界強度測定に関する一検討, 電子情報通信学会総合大会

2017年3月22日～25日  
名城大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：発電システム

発明者：引原隆士，プトゥクラゼ ヴァク  
タン，フリン モリス，ニユーウェンヒュー  
ロシエル，木村真之

権利者：京都大学

種類：特願

番号：2014-094500

出願年月日：2014年5月1日

国内外の別：国内

取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

引原 隆士 (HIKIHARA, Takashi)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70198985

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

Vakhtang, Putkradze (Univ. of Alberta)

木村真之 (京都大学)