

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：32410

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03938

研究課題名（和文）連続型確率共振の増幅効果を活かす大スケール振動発電とその基盤技術に関する研究

研究課題名（英文）Research on large-scale vibration power generation and fundamental technologies using the amplification effect of continuous stochastic resonance

研究代表者

趙 希祿 (ZHAO, XILU)

埼玉工業大学・工学部・教授

研究者番号：30610307

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）：自然界に存在するランダムな振動源を再生可能エネルギーとして有効に開発し利用するために、従来のtwo-well potentialベースの双安定振動システムを基本とした確率共振に関する研究開発を行い、初めてmulti-well potentialベースの多安定振動システムに発展できた。提案した多安定振動システムによる連続型確率共振の増幅範囲に対する制限はなく、振動時間が経過すると共に振動範囲も徐々に広げて行く新しい増幅特性を得ることが検証できた。さらに、連続型確率共振の発生条件をはじめ、multi-well potentialベースの解析理論を新たに確立することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新たに提案する回転型多安定振動モデルのmulti-well potential特性を検討して、大スケール振動発電の効率向上を実現するために、連続型確率共振現象の発生条件などの基礎的な理論問題を明らかになった。本研究の提案した多安定振動システムは、振動区域の限界をなくして、確率共振が生じる時に複数のポテンシャルエネルギーバリアピークを飛び越える連続型確率共振が生じることによって、今までにない大幅な増幅効果が得られ、ランダム振動環境に適用する振動発電システムの効率向上に大きく寄与できる。

研究成果の概要（英文）：In order to effectively develop and utilize the random vibration sources that exist in nature as renewable energy, we conducted research and development into stochastic resonance based on the conventional two-well potential-based bi-stable vibration system, which has been newly developed into a multi-well potential-based multi-stable vibration system. It was verified that there is no limit to the amplification range of continuous stochastic resonance using the proposed multi-stable oscillation system, and that a new amplification characteristic can be obtained in which the oscillation range gradually expands as the oscillation time passes. Furthermore, we were able to establish a new analytical theory based on the multi-well potential, including the conditions for the occurrence of continuous stochastic resonance.

研究分野：機械振動工学

キーワード：多安定振動システム 確率共振 振動発電技術

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年来、自然界のランダムな振動環境における非線形振動システムの振幅を格別大きくする確率共振現象を利用した振動発電システムに関する研究開発は注目され重要な課題となっている。確率共振現象とは、非線形振動システムに対してランダムな加振信号と微弱な周期的な刺激信号を同時に加えることによって、ある確率の下で振動系の応答信号が大幅に増幅する物理現象である。

既往の研究では、機械系の確率共振現象を発生させるために、先端に質量ブロックを付いた片持ち梁を利用した双安定振動モデルは最も多く見受けられるが、その振動発電に利用できる振幅が小さいため、それを実用化するには困難と指摘されている。申請者グループは斜め支持のばねマス型大スケール双安定振動モデルを提案して、大スケール双安定振動による確率共振現象が再現できている。ただし、その双安定振動系のポテンシャルエネルギー分布には **two-well potential** の特性を持つことで、質量ブロックは振動区域の両端に到達した時、必ず一度速度がゼロまでに減速して、それから逆方向に沿って運動を継続するため、そのエネルギーロスが生じる問題は依然として存在する。よって、新たな振動システムを提案し引き続き研究を行う必要がある。

本研究では、既往の双安定振動システムの確率共振に関する研究を高度化することを実施したうえで、新たな大スケール多安定振動システムを提案して、それを利用した確率共振効果および振動発電の効率向上について詳細な検討を実施する。

2. 研究の目的

(1) 従来の **two-well potential** ベースの双安定振動システムを基本とした確率共振に関する研究開発をベースにして、新たな **multi-well potential** ベースの多安定振動システムに提案することによって、新たな研究分野が切り拓けることを目指す。

(2) 既往の双安定振動発電システムに関する研究開発では、確率共振による増幅効果は **potential-well** 幅の2倍程度に限界となっている。本研究の提案する多安定振動システムによる連続型確率共振の増幅範囲に対する制限はなく、初めて振動時間が経過すると共に振動範囲も徐々に広げて行く新しい増幅特性を得ることが見込まれるため、それに関する詳細な検討を実施する。

(3) 従来の **two-well potential** ベースの検討成果を用いて、新しい **multi-well potential** モデル及び連続型確率共振現象を数式的に解明し、連続型確率共振の発生条件をはじめ、**multi-well potential** ベースの解析理論を新たに確立することを目指す。

3. 研究の方法

まず、理論解析の角度から、次の3つの課題を中心に検討し明らかにする。

(1) 今まで **two-well potential** ベースで検討されてきた確率共振が生じる **Kramer's rate** 予測式を修正し、**multi-well potential** に適用する連続型確率共振の発生条件として新たな予測式を確立させる。さらに予測式の物理的な意味と主要パラメータとの依存関係を明らかにすることで、最大限に振動エネルギーを利用するための基礎的な研究成果をまとめる。

(2) 多安定振動特性の支配的なファクター構成を分析して、質量ブロック、弾性ばね、粘性減衰および楕円形レールの形状パラメータより多安定振動特性に及ぼす影響を定量的に明らかにして、多安定振動モデルを開発するための基礎的な研究成果をまとめる。

(3) 連続型確率共振による大スケール増幅効果の実用化を実現するため、電磁誘導式とピエゾ圧電式の2種類の振動発電法をそれぞれ多安定振動モデルに組み合わせる時、機械系と発電系の連成効果を考慮した最適なパラメータ構成を明らかにすることで、大スケール多安定振動発電システム開発のための基礎技術をまとめる。

次に、実験検証の角度から、実際に回転型多安定振動発電システムの実験装置を開発して、次の2つの課題を検討し明らかにする。

(1) 自然環境を模擬するランダムな振動と確率共振を引き起こすための周期的振動を加える条件下で、多安定振動システムの連続型確率共振現象とそれによる増幅効果を計測実験で再現して、本申請プロジェクトの提案する新しい多安定振動システム及び連続型確率共振の発生条件式などの理論的な検討結果の妥当性を検証して、連続型確率共振の実用化に向けた問題点と解決案を明らかにする。

(2) 電磁誘導式とピエゾ圧電式を利用した2種類の回転型多安定振動発電システムの実験装置を開発して、実際に連続型確率共振による振動発電の効率向上効果を検証して、大スケール振動発電システムの開発に向けた問題点と解決案を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 倒立片持ち梁型双安定振動発電システム

再生可能エネルギーの有効利用を目指し、ランダム波浪環境に適用する振動エネルギーハーベスティングシステムを提案した。図1に示すように先端に集中質量を有する倒立片持ち梁で構成した双安定振動モデルを利用し、さらに片持ち梁の表面にピエゾ圧電素子を貼り付けて振動発電を実現している。提案する振動モデルの双安定振動特性について理論的な検討を行い、確率共振が最も発生しやすい加振周波数の予測式を与えた。水槽や加振装置などを利用した検証装置を開発し、実験室においてランダム波浪環境での確率共振現象を再現したうえで、各条件下で測定を行い、ランダム波浪環境における確率共振の増幅効果および振動発電特性への影響について検証したが、双安定振動に伴う確率共振現象が発生した場合のほうが、ランダム信号と周期的信号を別々に加振した場合より多くの振動発電力が得られることが確認できた。

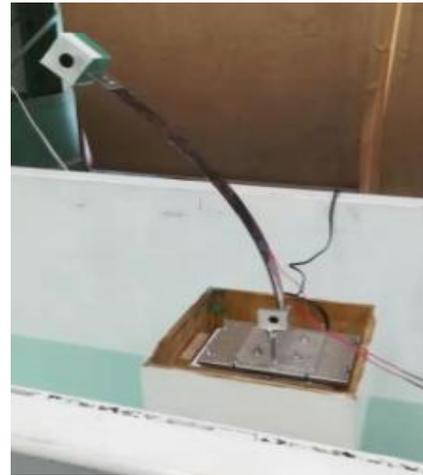


図1. 倒立片持ち梁双安定振動モデル

(2) 斜め支持型双安定振動発電システム

新たに斜め支持ばねマス型双安定振動エネルギーハーベスティングシステム（図2）を提案して、実際の測定実験の結果を用い、確率共振による増幅効果と振動発電の特性について詳細な検討を行った。双安定振動モデルを実用化するために必要な設計ファクターとなる確率共振が最も発生しやすい加振周波数の予測問題に対して、質量ブロックが平衡位置における一次固有振動数を加振周波数として用いる方法を提案した。実際に開発した実験装置と計測システムを用いてランダムな振動環境を模擬した加振実験を行い、質量ブロックの応答振動が単一安定振動から双安定振動に確実に変わる確率共振現象を確認し、それによる増幅効果もかなり大きいことが確認できた。



図2. 斜め支持双安定振動モデル

(3) 水平対向型双安定振動発電システム

水平型双安定運動エネルギーハーベスティングシステム（図3）を提案した。磁石とコイルによる振動発電ユニットを利用して、ランダムな振動環境に適用するエネルギーハーベスティングシステムを開発した。ばねの弾性力と電磁誘導のロレンツ力と同時に考慮した連立支配方程式を立て、運動の全範囲に渡る双安定運動特性を持つことが証明できた。確率共振発生のために加える周期的信号の適切な周波数範囲について、Kramer's rateを用い、確率共振が発生しやすい周期的信号の周波数範囲の予測式を導出した。提案する双安定運動エネルギーハーベスティングシステムは確実に確率共振を発生することにより、大幅な振動増幅効果と振動発電性能を向上する効果があることを確認できた。

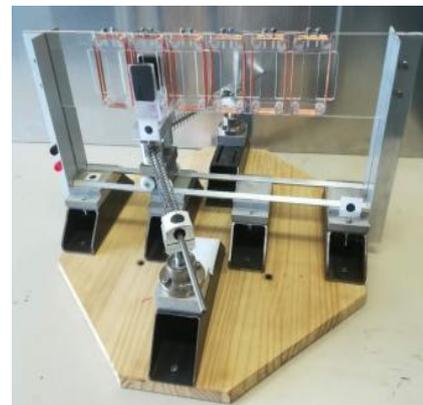


図3. 水平対向型双安定振動モデル

(4) 電磁誘導式双安定振動発電システム

Duffing型双安定振動モデルと電磁モーターを利用した振動エネルギーハーベスティングシステム（図4）を開発した。提案した双安定振動モデルの運動方程式を作成し、振動の広範囲にわたり双安定振動特性を持つことが確認できた。実際に自然環境を模擬するランダム加振信号と周期的な加振信号を与えて、双安定振動モデルの確率共振現象について検討を行い、確実に確率共振現象が発生でき、入力信号を直接に受ける支持点の振動応答に対して数倍以上の振幅拡大効果を得ることが実現できた。

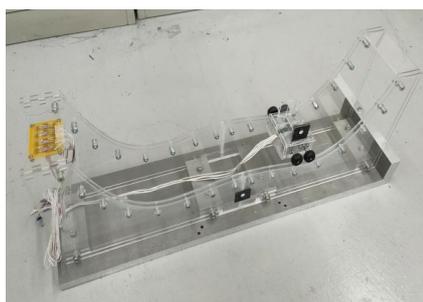


図4. 電磁誘導式双安定振動モデル

(5) 回転多安定振動発電システム

磁石とコイルからなる発電ユニットを用いた回転多安定振動発電システムを提案する。従来の双安定振動モデルと違い、外部から加振される時、振動体は複数のポテンシャルエネルギーのピークを飛び移しながら増幅される特徴がある。実際に検証実験装置を開発して、計測実験で検証した結果、複数のポテンシャルエネルギーの山を飛び越える多安定運動現象が再現でき、質量ブロックの角運動幅が大幅に拡大され、それによる運動発電効率を向上することが確認できた。実際の計測実験結果により、ランダムと周期的な信号の最大角度加振幅は $\pm 26.73^\circ$ と $\pm 13.79^\circ$ である場合、60秒のサンプル計測時間の中で、振動体の応答角変位範囲は $[0^\circ, 630^\circ]$ に拡大でき、さらに加振し続ければ、応答角変位範囲が無限大へ拡大することが推測できる。運動発電により得た平均電力を比較して、ランダム信号では17.33 mW、運動応答が一番大きい周期的信号0.8Hzでは45.40 mW、2つの信号で共同加振の場合77.99 mWの結果がそれぞれ得られ、共同加振し得た平均電力は別々に加振し得たの和より高い結果によって、提案した回転多安定振動発電システムの発電効率向上効果が確認できた。

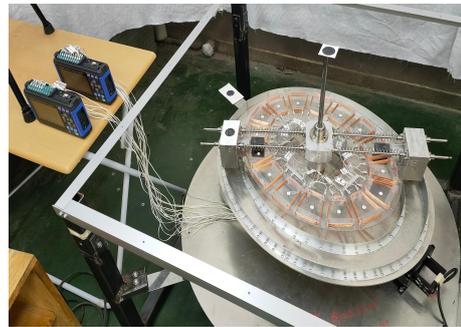


図 5. 電磁誘導式双安定振動モデル

学術誌に掲載された主な研究論文【計 10 篇】

- (1) W. Zhao, R. Zheng, X. Yin, X. Zhao, K. Nakano, An Electromagnetic Energy Harvester of Large-Scale Bistable Motion by Application of Stochastic Resonance, *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol.144, No.011007, Jun.2021. [doi:10.1115/1.4051265]
- (2) W. Zhao, K. Nakano, X. Zhao, R. Zheng, An elliptical rail-mass-spring mechanism to realize multi-stable circulation motion for electromagnetic-energy harvesting, *AIP Advances*, Vol.11, No.105213, Oct.2021. [doi.org/10.1063/5.0062961]
- (3) 張旭光, 趙巍, 廉杰, 周施杰, 向井竜二, 趙希祿, ランダム波浪環境における倒立片持ち梁型双安定振動エネルギーハーベスターの設計開発, *設計工学*, Vol.57, No.2, 2022年2月。 [doi:10.14953/jjsde.2021.2932]
- (4) 張旭光, 趙巍, 尹相然, 河田直樹, 趙希祿, 斜め支持ばねマス型双安定振動モデルを用いたエネルギーハーベスターの設計開発, *設計工学*, Vol.57, No.3, 2022年3月。 [doi:10.14953/jjsde.2021.2940]
- (5) 趙巍, 中野公彦, 鄭仁成, 趙希祿, 回転多安定エネルギーハーベスティングシステム、*日本機械学会論文集*, Vol.88, No.908, 2022年4月。 [doi:10.1299/transjsme.21-00319]
- (6) W. Zhao, X. Zhang, N. Kawada, X. Zhao, A Magnet-Coil-Type Bistable Vibration Energy Harvester for Random Wave Environment, *Shock and Vibration*, No.3552941, Apr. 2022. [doi.org/10.1155/2022/3552941]
- (7) L. Guo, W. Zhao, J. Guan, N. Gomi, X. Zhao, Horizontal Bi-Stable Vibration Energy Harvesting Using Electromagnetic Induction and Power Generation Efficiency Improvement via Stochastic Resonance, *Machines*, Vol.10, No.899, Oct. 2022. [doi.org/10.3390/machines10100899]
- (8) L. Guo, W. Zhao, N. Gomi, J. Guan, X. Zhao, Development of an Opposed Mass-Spring Type Bi-Stable Vibration Energy Harvesting System Using Stochastic Resonance, *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, Vol.10, No.6, Oct. 2022. [doi:10.11648/j.ijmea.20221006.11]
- (9) X. Zhang, W. Zhao, J. Guan, A. B. Fukuchi, X. Zhao, Development of Bi-Stable Vibration Energy Harvesting System Using Duffing-Type Motion Model, *Engineering and Applied Sciences*, Vol.8, No.5, Mar. 2023. [doi:10.11648/j.eas.20230801.12]
- (10) W. Zhao, Y. Fujiwara, J. Guan, A. B. Fukuchi, X. Zhao, Bi-Stable Vibration Power Generation System Using Electromagnetic Motor and Efficiency Improvement by Stochastic Resonance, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol.16, No.3, Aug. 2023. [doi:10.3844/ajeassp.2023.76.91]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Xuguang Zhang, Wei Zhao, Jingchao Guan, Apollo B. Fukuchi, Xilu Zhao	4. 巻 8
2. 論文標題 Development of Bi-Stable Vibration Energy Harvesting System Using Duffing-Type Motion Model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Engineering and Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 5-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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
1. 著者名 Guo Linshi, Zhao Wei, Guan Jingchao, Gomi Nobuyuki, Zhao Xilu	4. 巻 10
2. 論文標題 Horizontal Bi-Stable Vibration Energy Harvesting Using Electromagnetic Induction and Power Generation Efficiency Improvement via Stochastic Resonance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Machines	6. 最初と最後の頁 899 ~ 899
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/machines10100899	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
1. 著者名 Linshi Guo, Wei Zhao, Nobuyuki Gomi, Jingchao Guan, Xilu Zhao	4. 巻 10
2. 論文標題 Development of an Opposed Mass-Spring Type Bi-Stable Vibration Energy Harvesting System Using Stochastic Resonance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Engineering and Applications	6. 最初と最後の頁 123-134
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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
1. 著者名 Zhao Wei, Nakano Kimihiko, Zhao Xilu, Zheng Rencheng	4. 巻 11
2. 論文標題 An elliptical rail-mass-spring mechanism to realize multi-stable circulation motion for electromagnetic-energy harvesting	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 105213 ~ 105213
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0062961	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

1. 著者名 Zhao Wei, Zheng Rencheng, Yin Xiangran, Zhao Xilu, Nakano Kimihiko	4. 巻 144
2. 論文標題 An Electromagnetic Energy Harvester of Large-Scale Bistable Motion by Application of Stochastic Resonance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Vibration and Acoustics	6. 最初と最後の頁 1-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4051265	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

1. 著者名 ZHAO Wei, NAKANO Kimihiko, ZHENG Rencheng, ZHAO Xilu	4. 巻 88
2. 論文標題 A rotational multi-stable vibration energy harvesting system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 1~16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.21-00319	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

1. 著者名 Zhao Wei, Zhang Xuguang, Kawada Naoki, Zhao Xilu	4. 巻 2022
2. 論文標題 A Magnet-Coil-Type Bistable Vibration Energy Harvester for Random Wave Environment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Shock and Vibration	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2022/3552941	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 -

1. 著者名 張 旭光、趙 巍、尹 相然、河田 直樹、趙 希祿	4. 巻 57
2. 論文標題 斜め支持ばねマス型双安定振動モデルを用いたエネルギーハーベスターの設計開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 139~152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14953/jjsde.2021.2940	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 -

1. 著者名 張 旭光、趙 巍、廉 杰、周 施杰、向井 竜二、趙 希祿	4. 巻 57
2. 論文標題 ランダム波浪環境における倒立片持ち梁型双安定振動エネルギーハーベスターの設計開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 95 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14953/jjsde.2021.2932	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 -

1. 著者名 Zhao Wei、Fujiwara Yoshiro、Guan Jingchao、Fukuchi Apollo B.、Zhao Xilu	4. 巻 16
2. 論文標題 Bi-Stable Vibration Power Generation System Using Electromagnetic Motor and Efficiency Improvement by Stochastic Resonance<sup />	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 American Journal of Engineering and Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 76 ~ 91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3844/ajeassp.2023.76.91	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------