

2024 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	室蘭工業大学 大学院工学研究科
職 位 または 役 職	准教授
氏 名	佐藤 孝洋

1. 研究題目

確率共振を活用する可変界磁波力発電機

2. 研究目的

再生可能エネルギーの大量導入に向け、四方を海に囲まれた日本では波力の活用が有望である。中でも波で発電機を直接揺らして発電するリニア型方式は、機械的機構が少なく堅牢である。ただしリニア型はバネ系の共振を利用するため、波の周期と共振しなければ十分な出力が得られない。そこで電磁力によって系を非線形化しその電磁力を可変界磁で調節する。これにより共振点以外でも発電可能なシステムを実現する。

3. 研究内容及び成果

＜界磁電流による非線形性の適切な制御方法＞

助成 1～2 年目にかけて、「確率共振可変界磁型の波力発電機(図 1)」の基本的な形を検討し、試作機を通して非線形振動の効果を検証した。そして、磁氣的構造や、バネ定数などの機械的パラメータをどのように設計すべきかの基礎的な指針を明らかにした。これらの成果により、適切に設計すれば、非線形振動を活用することで、発電可能な波条件を拡大出来ることを確認してきた。

非線形振動を活用することで、発電できる波条件が広がることを確認したが、実際の波は複雑で、状況も時々刻々と変化するため、あらゆる条件に対応するには、非線形性の制御を組み込む必要がある。そこで助成 3 年目である今年度は、そのための新しい方策について検討した。特に、提案してきた非線形型の発電機は、界磁電流を調整することで非線形性(すなわち変位に対して非線

形な磁気吸引力)のコントロールが可能であるように設計している。そこで、海況に合わせて動的に界磁電流を制御することで、発電出力・発電可能帯域をさらに改善する方法を検討した。

本研究では、界磁電流を制御する新たな方法を検討する。図 1 に、提案済みの発電機モデルを示す。上下に2つの界磁巻線がある。この巻線それぞれに適切な電流を与えれば、電磁力が変化することで非線形性が変化する。波の状況に応じ、揺れやすい方向に電流を流せば、発電機の挙動が改善すると考えられる。この界磁巻線に流す電流を御するための方法として、「モデル予測制御」と呼ばれる制御方法を導入することを検討した。モデル予測制御とは、制御問題を最適化問題として定式化し、都度最適化問題を解いて適切な制御量を決定する方法である。一般的な制御方法と比べて、制御量を決定するための計算負荷が重いという欠点があるが、複雑な制御方法が必要な場合に有効である。今回の場合、「①波は数秒周期で変化することから、制御量の計算に必要な時間間隔がそこまで高速ではなくても許されること」、「②波に応じた制御方法を、一般的な方法で定式化することが困難なこと」から、モデル予測制御が適していると考えられる。

数値シミュレーションを用いて、モデル予測制御の検証を行った。波力発電機は、発電機の振動速度を最大化することで発電出力が増加するため、最適化問題として「速度の最大化」を与え、指定した時間間隔での速度の2乗の総和を目的関数として設定し、それを最大化する電流を決定する問題を定義した。これを進化計算で求解し、求まった電流を界磁巻線に与えて制御する。提案方法を開発済みの挙動解析シミュレーションで実施し、制御の有無に応じて、振動特性がどのように変化するかを分析した。結果を図 2 に示す。制御を用いることで、特に 1Hz 以下付近の振動が増加しており、制御を用いることで出力が改善することが示唆された。(なお、この計算では入力と出力の電力を比較しておらず、出力より入力の方が勝っている可能性もある。この分析は今後の課題である)

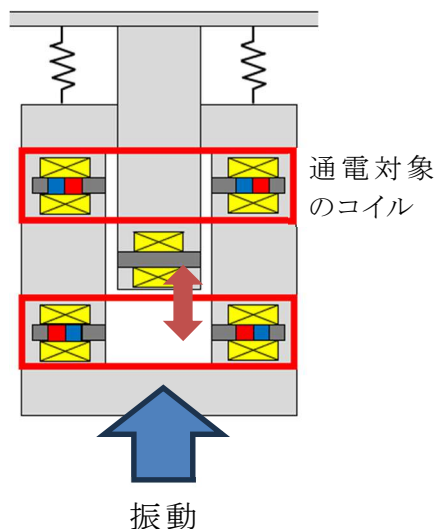


図 1 提案発電機 (概略図)

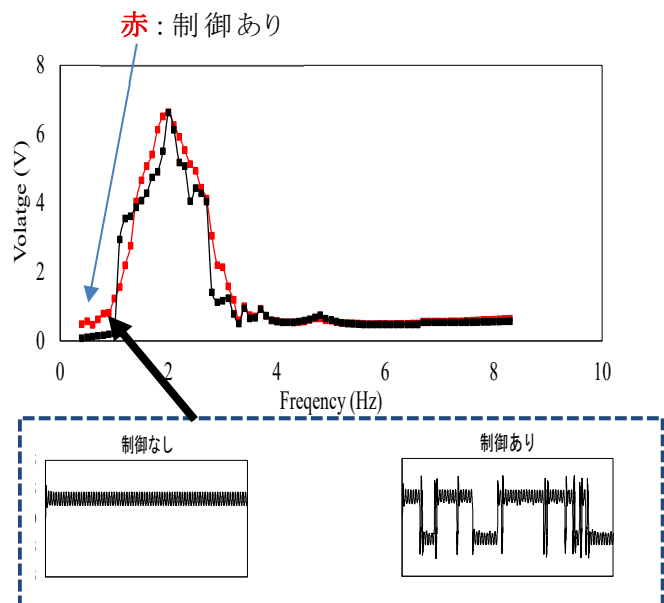


図 2 提案制御による特性の変化
(シミュレーション結果)

<試験検証に向けた実機制作>

これまで試作してきた発電機を、図 1 のように界磁電流によって電磁力を上下に可変できるように改造し、実機制作した。外観図を図 3 に示す。これを、製作済みの低周波振動を起こせるリニアアクチュエータに設置し、加振試験を行うことができるようにセットアップした。

このシステムを動作させたところ、例えば図 4 に示すような非線形な振動が発揮されることを確認し、提案発電機の非線形性を確認している。今後はこの発電機に、提案したモデル予測制御を適用し、振動特性がどのように改善するかを、試験を通して明らかにしていく予定である。

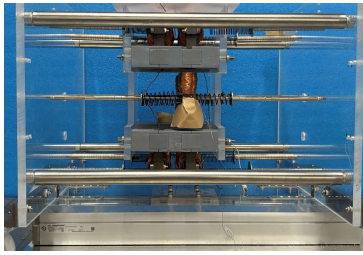


図 3 試作機の概略

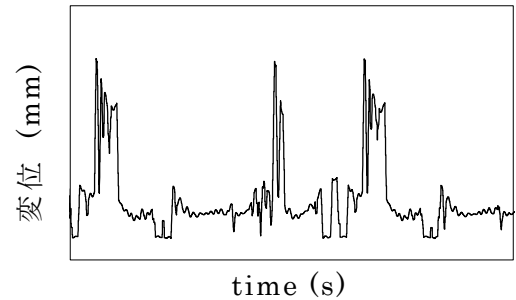


図 4 試作時の振動波形の一例

4. 今後の研究の見通し

本助成期間内において、非線形性を有する波力発電機を開発し、また、その特性を改善するための制御方法について検証した。また、いくつかの発電機を試作して、非線形性の有効性を検証してきた。これらの研究を通して、可変界磁非線形波力発電機の基本的な検討を行うことができた。

今後は、提案した発電機や制御システムの有効性を、試験を通して実証していき、その有効性をさらに明らかにしていく。また、加振試験での実証に加えて、発電機を浮体に搭載し、実際に波を起こして発電させるための水槽試験環境の構築を進めていく予定である。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

【学術論文(査読付き)】

- Takahiro Sato, "A Coupled Analysis of Nonlinear Vibration Energy Harvester Based on Predictor-Corrector Approach," IEEJ Journal of Industry Applications, vol. 14 巻, no. 6, pp. 789-795, 2025.

【国際会議(査読あり)】

- H. Miyazaki, T. Sato, The 2026 International Power Electronics Conference, 2026. (発表申込済み)

【国内会議(査読なし)】

- 宮崎英寿, 佐藤孝洋, 「サンプルベースモデル予測制御を用いた可変界磁波力発電機の発電量最大化」, 第 38 回計算力学講演会, OS12-4, 2025
- 宮崎 英寿, 山本 幹太, 小澤 友希, 佐藤 孝洋, 「複数の界磁巻線を有する可変界磁確率共振波力発電機の連成解析による性能評価」, 第 29 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 2025
- 山本 幹太, 宮崎 英寿, 小澤 友希, 佐藤 孝洋, 「可変界磁確率共振波力発電機の試作と試験結果」, 第 29 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 2025