

2022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

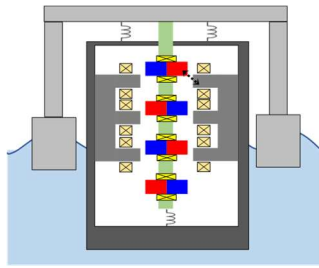
再生可能エネルギーの大量導入に向け、四方を海に囲まれた日本では波力の活用が有望である。中でも波で発電機を直接揺らして発電するリニア型方式は、機械的機構が少なく堅牢である。ただしリニア型はバネ系の共振を利用するため、波の周期と共振しなければ十分な出力が得られない。そこで電磁力によって系を非線形化しその電磁力を可変界磁で調節する。これにより共振点以外でも発電可能なシステムを実現する。

3. 研究内容及び成果

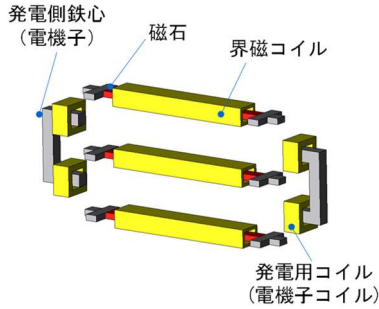
リニア型波力発電機のシステムを非線形化するため、以下のような開発方針を考えた。

- 波と共振したときしか十分な出力が得られない → 変位に対し非線形な電磁力を付与する
- 波の状況が、時々刻々と変化する → 可変界磁機能による電磁力の調節

上記を実現するため、図1に示すような波力発電機の構造を新たに提案した。この発電機では、可動体に設置した磁石が波により振動し発電する。このとき、磁石と固定子鉄心の間に、磁気的な吸引力が働くが、これは図2のように、変位に対して非線形である。この電磁力と可動体のバネ定数(=波の復元力)を適切に調整すると、この系のポテンシャルエネルギーは図3のような2つの谷を持つ形をとる。この系では、可動体が複雑な振動を示し、谷を移動する(エネルギーの山を越えうる)振動が加わると共振点以外でも大きく可動する。この系は確率共振系とも呼ばれ、発電可能な入力条件を拡大できる。図3のようなポテンシャルエネルギーを持つ構造では、通常時はいずれかの



(a) 全体イメージ図



(b) 磁気的部分抜粋

図 1 提案波力発電機

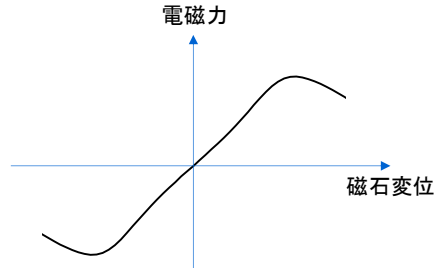


図 2 非線形電磁力

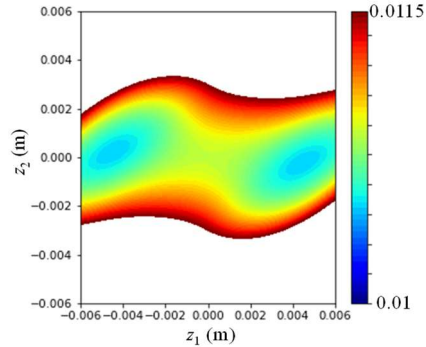


図 3 確率共振系のポテンシャルエネルギー

谷に相当する位置で静止し、大きな振動が加わると山を越えて振動する。そのため、波が穏やかな日は入力エネルギーが小さく、山を越えるだけのエネルギーが得られず、発電できない恐れがある。そこで、可動体に磁石と逆向きの磁力を生じる界磁巻線を設置する。界磁電流によって界磁磁束を可変できるため、状況に応じて磁気吸引力を調整することができる。

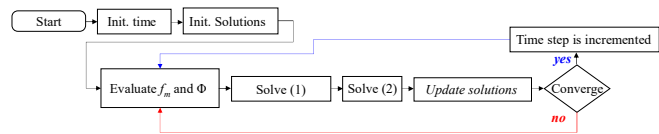
上述した機能がこの発電機構造で実現できるかを確認するため、まずは数値シミュレーションにより、発電機の基本特性を評価する。そこで、本発電機システム向けの数値シミュレーション手法を提案した。この方法は、「浮体の振動(2自由度のバネ-マス系)」と、「発電機の負荷回路」の、2つの系を強連成して解くことができる(図4)。

この方法を用いて、図1に示す発電機の周波数特性を解析した結果、図5のように、システムが線形の場合と比較して、非線形な本システムでは特に低周波領域での応答が改善していることが確認できた。また、界磁電流を通電したときの性能を解析したところ、界磁電流が0Aのとときと比べて、本システムでは図6のように、周波数特性が大きく変化していることが確認できる。すなわち、この結果から、界磁電流によって状況に応じて系の特性を変化出来ることが確認できた。以上より、本数値シミュレーション結果から、上述した機能は本発電機構造で実現しうることを確認した。

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_{12} & -c_{12} \\ -c_{12} & c_2 + c_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_{12} & -k_{12} \\ -k_{12} & k_2 + k_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1 \ddot{x}_0 + F_m(z_1, z_2, i_s, i_f) \\ -m_2 \ddot{x}_0 - F_m(z_1, z_2, i_s, i_f) \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\Phi(z_1, z_2, i_s, i_f)}{dt} + Ri_s = 0$$

(a) 支配方程式



(b) 解析法フローチャート(抜粋)

図 4 連成解析手法の概要

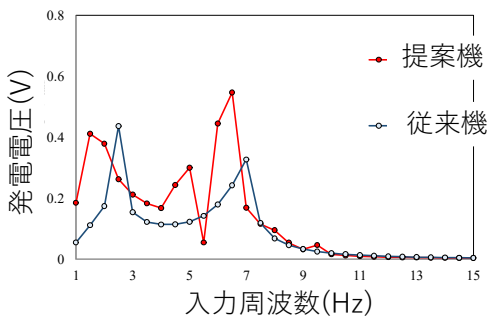


図 5 提案機の周波数特性

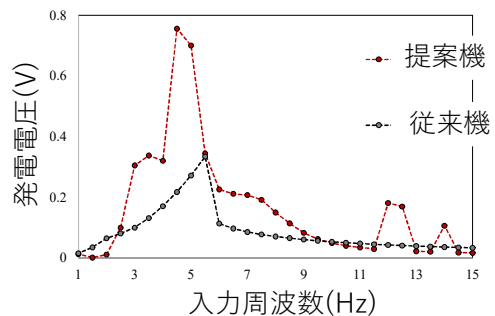


図 6 提案機の周波数特性(界磁変更時)

シミュレーションの結果が実際に再現されるかを確認するため、プロトタイプとして発電機を図 7 のように試作した。本発電機を加振装置に設置して加振試験を行ったところ、共振点以外でも振動し、発電することを確認した。したがって数値シミュレーションの結果は一定程度確からしいことが確認できた。ただし、プロトタイプゆえに製造誤差が大きく、シミュレーションの結果と完全に一致はしなかった。より精密に発電機を試作してその性能を試験することは今後の課題である。

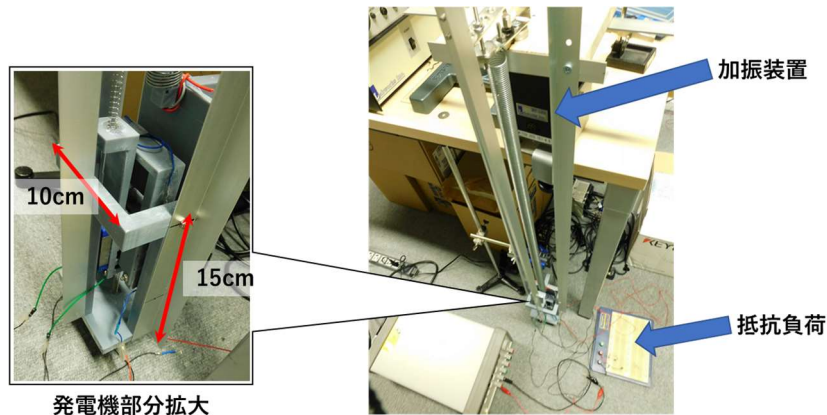


図 7 提案発電機プロトタイプ機

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の基本特性を評価するシミュレーション方法を開発し、さらに発電機を試作して実験し、基本的な動作原理が実現しうることを確認した。ただし、より精密な試験体での評価は今後の課題である。また、今回の試験では、実際の海の波に想定される「大振幅・極低周波(1Hz 以下)」の振動を再現する加振器を利用できず、低周波側での評価が難しいことが分かった。市販の加振器では極低周波領域には対応していないか、高価な製品しかないため、本発電機用の低周波用加振装置の開発も課題である。

今後は、リアサーボモータを用いて、低周波用の加振装置を試作するとともに、より精密に発電機を試作して、より詳細な実験を行っていく予定である。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

- 佐藤孝洋, "確率共振系を利用した浮体式波力発電機に関する基礎検討," 令和5年電気学会全国大会, 243-B2, Mar., 2023.
- 佐藤孝洋, "2 質量系カオス振動発電機の電磁界解析による性能評価," 日本機械学会第36回計算力学講演会, OS-1708, Oct., 2023.
- Takahiro Sato, "NUMERICAL SIMULATION OF WAVE ENERGY CONVERTER BASED ON STOCHASTIC RESONANCE AND VARIABLE MAGNETIZATION," 21st International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, OA-A1:4, Nov., 2023.
- (投稿予定) "NUMERICAL SIMULATION OF WAVE ENERGY CONVERTER BASED ON STOCHASTIC RESONANCE AND VARIABLE MAGNETIZATION," International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. (上記国際会議で発表内容を学術雑誌に投稿予定)
- 試作したプロトタイプの試験結果を、令和6年電気学会全国大会にて報告予定。