

再生可能エネルギーを活用するための小型振り子発電装置の開発*

秋田大学大学院理工学研究科 齋藤 憲寿

秋田大学大学院理工学研究科 高橋 圭太

秋田大学工学部 西脇 遼

秋田大学大学院理工学研究科 渡辺 一也

1. はじめに

近年、光や熱など周囲環境に存在する微小なエネルギーを電力へ変換する技術（エネルギーハーベスティング）が注目されている。エネルギーハーベスティングと呼ばれるのは、小型電子機器の自立電源となり得る、数 W 程度の出力のエネルギー変換技術である。これまで小規模な発電は用途が限られていたが、電子機器の省電力化技術の進歩に伴い用途が広がっている¹⁾。例えば、 $1 \mu\text{W}$ ~数 W 程度の発電量があればセンサーで測定したデータを間欠的に無線送信することが可能であり²⁾、エナジーハーベスティングと無線センサー技術を組み合わせると、電池の使用量削減、メンテナンス性の向上、配線重量の軽減、配線コストの低減、設計上の自由度増大などの様々なメリットが考えられる³⁾。

我が国は河川や海洋などの再生可能エネルギーを豊富に有しており、福島原発事故以降、新たなエネルギーとして注目されている⁴⁾。特に、排他的経済水域を含めると世界第 6 位の海洋面積を誇り、日本の沿岸域に到来する平均的な波エネルギー輸送量は少なくとも 3500 万 kW⁵⁾と見積もられ、日本の総発電容量の 3 割に相当する。これらをマイクロ水力発電のエネルギー源とすることで、センサーモジュールや通信モジュール等に対する長期間供給可能な電源や、災害時における非常用電源として活用することが期待できる。

そこで、本研究では波エネルギーを対象とした再生可能エネルギーを活用する手法の一つとして、小型振り子発電装置を開発した。そして、水理実験を実施する前段階として陸上で基礎的な発電実験を行った。

2. 発電機構の選定および振り子発電の仕組み

波エネルギーを利用する技術は、越波型、可動物体型、振動水柱型の 3 種類に分類できる。本研究では可動物体型の一つとして、倒立振り子の流力振動を用いた発電⁶⁾を参考に、振り子運動を発電に用いた。また、発電方法としてワンウェイクラッチを取り組んだギアボックス⁷⁾により発電機を回転させる方法や、弾性圧電デバイス⁸⁾、柔軟発電デバイス⁹⁾、圧電素子^{10), 11)}などさまざまな発電デバイスがあるが、本研究では汎用性の高い圧電素子を用いた。写真 1 に小型振り子発電装置の概要を示す。中空の円柱でばねや歯車を必要としないため、極めてシンプルな構造である。まず、下端を回転自由にした発電装置を水中へ設置する。そして、波が発電装置に衝突すると、衝撃力により発電装置が傾斜するが、浮力による復元力によって傾斜が

* Development of a compact pendulum power generator to utilize renewable energy by Noritoshi SAITO, Keita TAKAHASHI, Ryo NISHIWAKI and Kazuya WATANABE

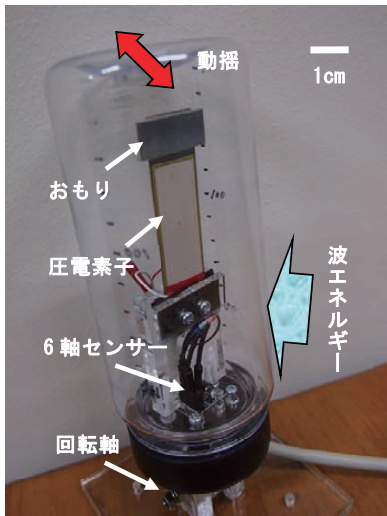


写真1 小型振り子発電装置

戻るため、振り子のように動揺する。そこで、圧電素子を用いて動揺（運動エネルギー）を電気エネルギーへ変換する。

発電装置は本体の高さ 240 mm、直径 65 mm であり、円筒部分の容積は 400 ml に相当する。また、円筒内部には圧電素子、圧電素子の変位調整おもり 6.9 g、角度、角速度および角加速度を計測するための 6 軸センサーを搭載している。

3. 圧電素子の電気的特性

表 1 に本研究で用いた圧電素子の電気的特性を示す。圧電素子は市販されているものを使用し、長さ 75 mm、幅 20 mm、厚さ 0.43 mm である。また、最大の出力電圧±80 V、出力電流 100 μA である。ここで、圧電素子の変位による出力電圧を確認するため、圧電素子の下部を固定し、おもりを付けない状態で上部を水平方向に変位させ、オシロスコープを用いて出力電圧を計測した。

図 1 に圧電素子の出力電圧波形、図 2 に圧電素子の変位と出力電圧の最大値の関係を示す。圧電素子の変位が無い場合、出力電圧は 0 V であるが、外力により変位が生じた瞬間に出力電圧は大きくなり、その後減衰して 0 V へ戻る。また、出力電圧は変位に対して直線的に近似しており、5.00 mm の変位に対して出力電圧の最大値は 31.70 V であった。

表 1 圧電素子の電気的特性

Size(mm)	75×20×0.43
Rezonant Frequency(Hz)	3300
Rezonant Resistance(Ω)	300
Electrostatic Capacitance(nF)	110
Output Voltage(Vpp)	80
Output Current(μA)	100

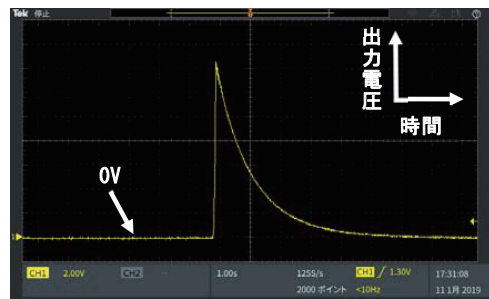


図 1 圧電素子の出力電圧波形

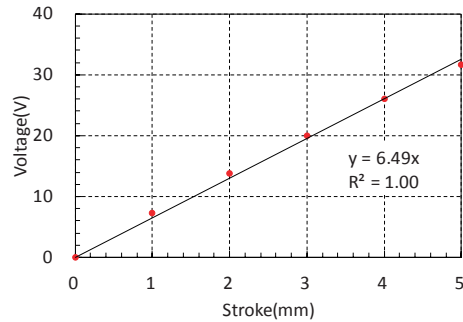


図 2 圧電素子の変位と出力電圧の関係

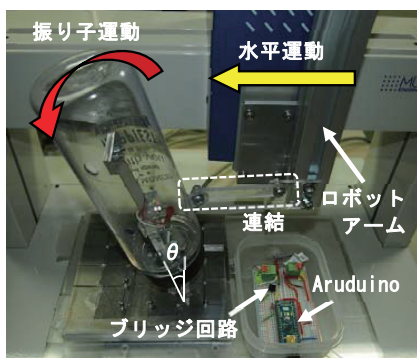


写真 2 発電実験の様子

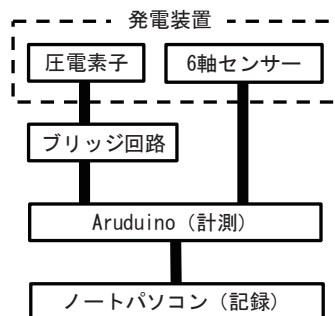


図 3 計測の概要

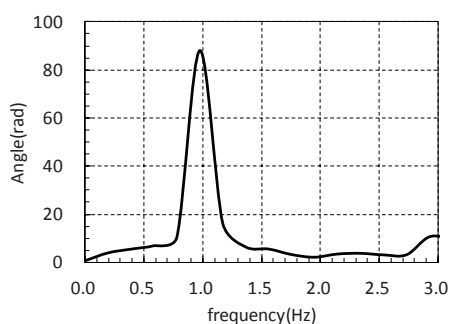


図 4 振り子運動の周波数解析

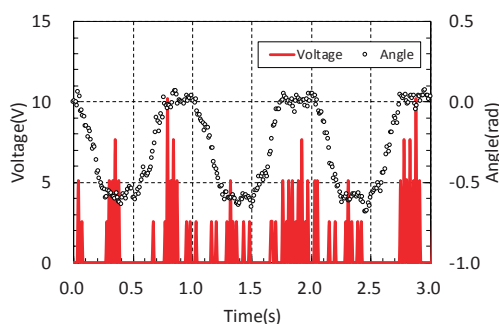


図 5 時間と出力電圧および角度の関係

4. 実験概要

写真 2 に発電実験の様子，図 3 に計測の概要を示す。発電装置を 2 軸（上下左右）方向に制御可能なロボットアームへ設置し，ロボットアームの水平運動を振り子運動に変換して発電実験を行った。発電装置に搭載している圧電素子および 6 軸センサーはワンボードマイコンの一種である Arduino に接続している。予備実験としてデータ処理速度について検討した結果，サンプリング可能な最小単位である 10 ms 毎に出力電圧，角度，角速度および角加速度を計測し，ノートパソコンを用いてデータの記録を行った。なお，角度，角速度および角加速度の計測対象は発電装置本体であり，圧電素子の変位を対象とした計測は行っていない。また，圧電素子の電圧は交流で出力されるが，ブリッジ回路により整流することで出力電圧はすべて正の値となっている。

設定条件は既往の研究⁸⁾を参考に，周期 1 s の規則波と同等となるようにロボットアームの水平移動速度 250 mm/s，振り子の角度 $\theta=0.60$ rad とした。図 4 に振り子運動の周波数解析結果，図 5 に振り子運動の時間と出力電圧および角度の関係を示す。周波数解析の結果，振り子運動は 1 サイクルあたり 0.98 Hz，すなわち 1 サイクルに要する時間は 1.02 s であった。また，発電

装置の動きを見ると、垂直である 0.00 rad から 0.26 s で 0.60 rad 傾き、 0.25 s 停止すると 0.26 s で垂直に戻り、 0.25 s 停止する。これらの動きを繰り返し行っている。

5. 実験結果および考察

図 5 を見ると、出力電圧は最高で 10.22 V であり発電を確認できるが、振り子運動の角度によって発電している箇所と発電していない箇所がそれぞれ見られた。また、圧電素子の変位量について図 1 のおもりを用いていない状態における圧電素子の変位と出力電圧の関係を見ると、おもり 6.90 g 用いた実験では圧電素子が最大で 1.57 mm 程度変位していたと考えられる。

図 6 に振り子運動の角度と出力電圧の関係を示す。広範囲の角度で 2.54 V 以上の発電が確認できるが、発電装置が垂直である 0.00 rad または最も傾いている -0.60 rad 付近では出力電圧が高くなる傾向が見られた。しかし、図 5 における発電の状況を見ると、同じ 0.00 rad または -0.60 rad であっても、発電装置の傾きが止まる瞬間は発電が見られるが、傾き始める瞬間は発電が見られなかった。

図 7 に振り子運動の時間と角速度および角度の関係を示す。発電装置は $-0.08 \sim 0.10 \text{ rad/s}$ の範囲で振り子運動を行っており、角速度の最大値は -0.52 rad および -0.07 rad 付近に集中している。これはロボットアームの加速によるものと考えられる。また、角速度は加速し始めてから 0.10 s でピークに達し、その後 0.10 s かけて減速している。そして、発電装置の動きが停止した直後 (0.00 rad または -0.60 rad 付近) は角速度の正負が交互に生じており、これはロボットアームの減速および停止に伴う慣性力が影響していると考えられる。

図 8 に振り子運動の角速度と出力電圧の関係を示す。図 6 と同様に広範囲において発電が確認できるが、 0.05 rad/s 以上では発電は見られなかった。また、角速度が 0.00 rad/s に近づくほど出力電圧が高くなる傾向を示し、本研究で出力電圧の最大値が見られたのは -0.03 rad/s およ

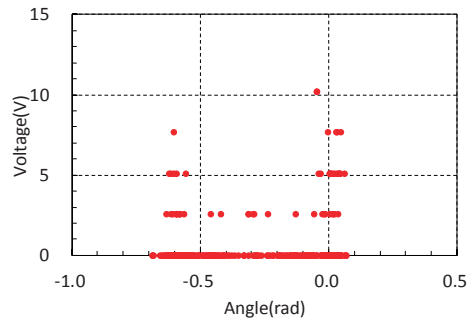


図 6 角度と出力電圧の関係

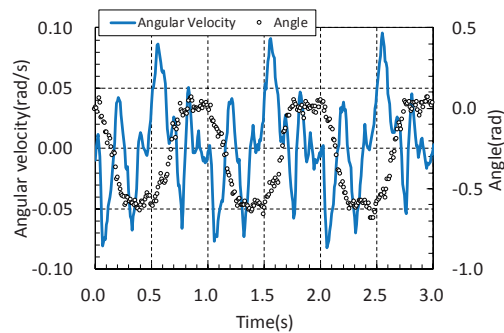


図 7 時間と角速度および角度の関係

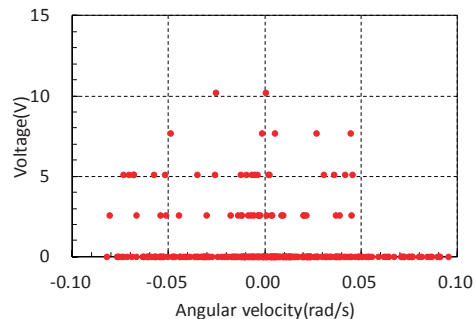


図 8 角速度と出力電圧の関係

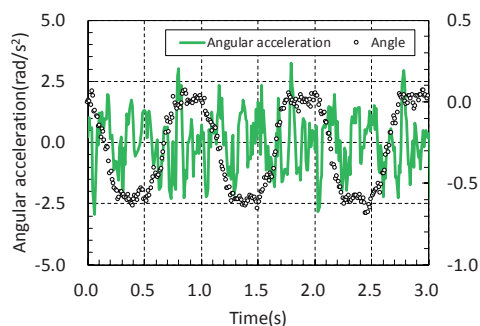


図9 時間と角加速度および角度の関係

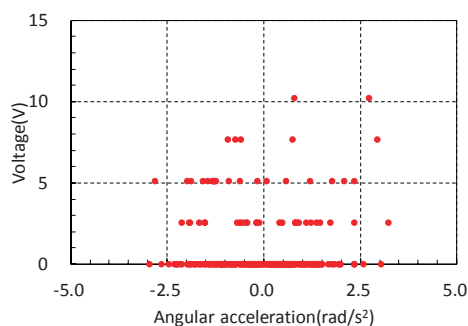


図10 角加速度と出力電圧の関係

び 0.00 rad/s であった。したがって、ロボットアームの減速または停止に起因する発電装置本体の動揺（慣性力）を圧電素子が吸収し、電気エネルギーへ変換していたと考えられる。

図9に振り子運動の時間と角加速度および角度の関係を示す。発電装置は $-2.96 \sim 3.24 \text{ rad/s}^2$ の範囲で振り子運動を行っており、角度に関係なく正負が交互に生じていることから、ロボットアームの加速、減速または停止が繰り返されることで発電装置が常に動揺していると考えられる。また、角加速度が 2.50 rad/s^2 以上になるのは発電装置が垂直で停止した瞬間であり、 -2.50 rad/s^2 以下になるのは発電装置が垂直から傾き始めた瞬間であった。この状態について図7と比較すると、角度 0 rad （角速度 0 rad/s ）付近のときに角加速度は最大値である 3.24 rad/s^2 であったことから、ロボットアームの停止に伴う発電装置本体の慣性力が最も大きいと考えられる。

図10に振り子運動の角速度と出力電圧の関係を示す。図6および図8と同様に広範囲において 2.54 V 以上の発電が確認できるが、本研究の出力電圧の最大値が見られたのは 0.80 rad/s^2 および 2.72 rad/s^2 と明確な傾向が得られなかった。これは計測機器の分解能が 2.54 V であり、角加速度の微細な変化を出力電圧の変化として計測できなかったことが要因と考えられるため、計測機器の分解能を高め、詳細に検証することが今後の課題である。

6. まとめ

本研究は、小型振り子発電装置を開発し、陸上で基礎的な発電実験を実施することにより以下の知見を得た。

- 1) 圧電素子を用いて振り子運動から発電できることを確認した。また、得られた出力電圧は最大で 10.22 V であった。
- 2) 発電装置が垂直 (0.00 rad) または最も傾いている状態 (-0.60 rad) 付近では出力電圧が大きくなる傾向が見られた。しかし、同じ 0.00 rad または -0.60 rad であっても、ロボットアームが動き始めた瞬間は発電が見られなかった。
- 3) ロボットアームの減速または停止に起因する発電装置本体の動揺（慣性力）を圧電素子が吸収し、電気エネルギーへ変換していると考えられる。
- 4) ロボットアームが $0.10 \sim 0.25 \text{ s}$ 間隔で加速、減速、停止を繰り返すことで発電装置本体が動

揺しやすい状況にあり，その結果，広範囲の角度で 2.54 V 以上の発電を確認できた。

- 5) 今後は可傾斜造波循環水路を用いた水理実験を実施し，波エネルギーによる発電が可能か検証していく予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり，秋田大学大学院理工学研究科技術部 谷口智行技術長から貴重なご助言を頂きました。ここに記して，謝意を表します。

参考文献

- 1) 竹内敬治：エネルギーハーベスティングの最新動向，表面技術，Vol.67, No.7, pp.334-338, 2016.
- 2) Ottoman, G, Holfmann, H., Bhatt, A., and Lesieutre, G. : Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.17, No.5, pp.669-676, 2002.
- 3) 山田昇，加藤洋平：圧電素子による沸騰減少からのエナジーハーベスティングに関する実験研究，日本機学会論文集（B編），Vol.79, No.804, pp.229-241, 2013.
- 4) 日本学術会議：再生可能エネルギー利用の長期展望，pp.1-40, 2017.
- 5) 高橋重雄，安藤崇：日本周辺の波パワーとその利用に関する一考察，海岸工学論文集，第 36 巻，pp.874-878, 1989.
- 6) 比江島慎二，岡圭人，林健一，井上浩男：倒立振り子の流力振動を用いた発電のための基礎的実験，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.69, No.1, pp.12-21, 2013.
- 7) 石田啓，高地健，大貝秀司：振り子式波力エネルギー吸収装置による圧縮空気発生と消波特性に関する実験的研究，海洋開発論文集，第 16 巻，pp.105-110, 2000.
- 8) 陸田秀実，川上健太，黒川剛幸，土井康明，田中義和：弾性圧電デバイスを用いた波エネルギー利用技術の開発，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.B2-65, No.1, pp.1296-1300, 2009.
- 9) 陸田秀実，大竹基喜，森崎健一，田中義和，土井康明，改森信吾，菅原潤，山中明：圧縮型柔軟発電デバイスを用いた波エネルギー発電技術の開発，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.70, No.2, pp.1316-1320, 2014.
- 10) 藤本大道，村井基彦，藤田修：圧電素子を用いた波力発電に関する小型水槽実験，日本船舶海洋工学会講演論文集，第 9E 号，pp.191-194, 2009.
- 11) 朝倉壘，高橋智幸：カルマン渦列を利用した小型水力発電装置の開発と基礎的検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66, No.1, pp.1286-1290, 2010.