

IoT センサの駆動を想定した振動発電デバイスによる マイクロ水力発電*

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

秋田大学大学院理工学研究科 渡辺 一也

1. はじめに

あらゆる「モノ」がインターネットに接続される IoT 社会の実現には電源の確保が重要な課題の一つとして挙げられており、天候や昼夜を問わず電力を供給し、電池のように交換を必要としない代替電源技術である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は光や熱、振動、電波など様々な形態で環境中に存在するエネルギーを電力へ変換する技術であり、これまで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⁾。また、エネルギーハーベスティングと無線センサ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²⁾。

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、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³⁾。例えば、従来の包蔵水力に含まれない既設構造物（水路）を対象とした未利用落差発電の未開発地点は全国に 418 箇所あり、エネルギーに換算すると出力 2 万 1,000 kW、発電電力量 1 億 7,000 万 kWh に相当⁴⁾することから、これらを長期間だけではなく非常用の電源としても活用できるマイクロ水力発電への期待が高まっている。

著者ら⁵⁾は振動発電デバイスを用いたマイクロ水力発電装置を開発して基礎的な陸上実験を行っており、本研究では河川や水路等で使用する IoT センサの駆動や通信に必要な自立電源への適用を想定し、水理実験を行った。

2. 発電装置

マイクロ水力発電は出力変動が少なく、昼夜を通じて安定した発電が可能である。本研究では倒立振り子の流力振動を用いた発電⁶⁾を参考に、振り子運動を発電機構として用いた。また、発電方法は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⁾および振動発電デバイス¹⁰⁾¹¹⁾など様々なあるが、本研究では振動発電デバイスを用いた。図 1 に示す発電装置の下端に回転軸を取り付けて水中へ設置すると、浮力が復元力となり倒立振り子として機能する。そこ



図 1 発電装置

* Micro hydroelectric power generation by the vibration generating electricity device which assumed drive of a IoT sensor by Noritoshi SAITO, Keita TAKAHASHI and Kazuya WATANABE

表 1 振動発電デバイスの電気的特性

共振周波数(Hz)	3300
共振抵抗(Ω)	300
静電容量(nF)	110
出力電圧(V _{pp})	80
出力電流(μ A)	100

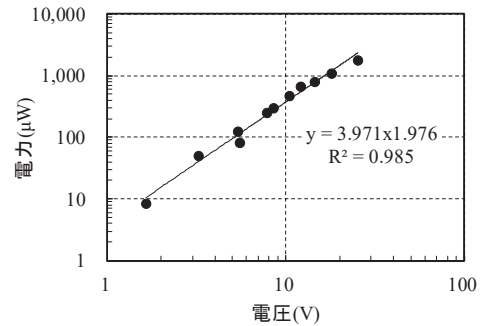


図 2 振動発電デバイスの電圧と電力の関係

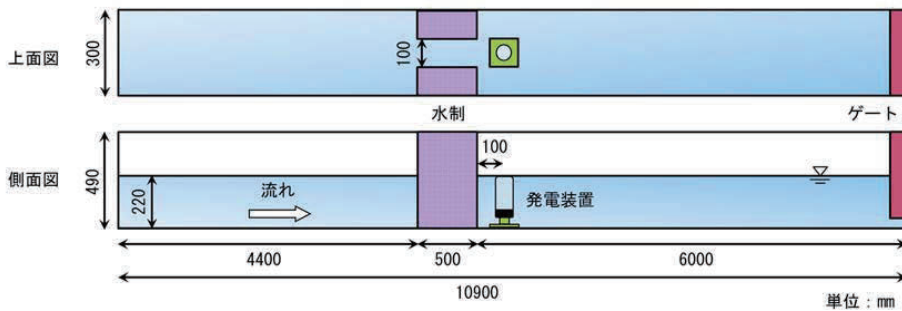


図 3 実験概要

へ水流が発電装置に衝突すると、円柱から発生するカルマン渦列により水流と直角方向に振り子運動が行われるため、振動発電デバイスがその振動を吸収して変形し、運動エネルギーを電気エネルギーへ変換する。発電装置は直径 65 mm、高さ 165 mm の円筒であり、内部の容積は 400 ml に相当する。内部には発電装置の角度、角速度および角加速度を計測するための 6 軸センサ、振動発電デバイスおよび振動調整用おもり 47.7 g を搭載している。

表 1 に本研究で用いた振動発電デバイス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、定格出力 4 mW である。ここで、振動発電デバイスの変位による電力を確認するため、振動発電デバイスを垂直にした状態で下部を固定し、上部を水平方向へ変位させた。図 2 に振動発電デバイスの電圧と電力の関係を示す。電圧が増加することによって電力が大きくなり、近似式の相関係数は 0.985 と高い。そこで、本研究では振動発電デバイスの電圧および電流を計測し、近似式を用いて電力を算出した。

3. 実験概要

図 3 に実験概要を示す。長さ 10.90 m、幅 0.30 m、高さ 0.49 m の可傾斜造波循環水路の中央付近に水路幅 0.10 m となる水制を設置した。さらに、水制の後方 0.10 m に発電装置を設置し、水深 0.22 m、水制内の流速が 0.29~0.44 m/s となる定常流を流した。データの取得は図 4 に示すワンボードマイコンの一種である Arduino を用いて 20 ms 毎に 30 s 間、図 1 中の 6 軸センサを

用いて発電装置の角度、角速度および角加速度を計測した。また、電圧センサおよびマルチテスタを用いて振動発電デバイスの電圧および電流を計測し、電力を算出した。なお、振動発電デバイス自体の変位による角度等の計測は行っておらず、電圧は整流回路によりすべて正の値として計測している。

4. 実験結果および考察

(1) 流速0.36 m/s時の振り子運動における発電装置および振動圧電デバイスの挙動

図5に時間と角速度および角度の関係を示す。1周期に相当する1.04~2.39 sに注目すると、発電装置がマイナス側の端部からプラス側の端部へ傾き始めるとともに角速度は増加し、 -0.17 rad/s で最大となるが、その後角速度は減少してプラス側の端部へ達すると 0 rad/s となる。また、発電装置がプラス側の端部からマイナス側の端部へ傾き始めるとともに角速度は増加し、 0.09 rad/s で最大となるが、その後角速度は減少してマイナス側の端部に達すると 0 rad/s となる。したがって、振り子運動の際に発電装置は加速と減速を繰り返しており、 0 rad （垂直）付近で最大となることが明らかとなった。

図6に時間と角加速度および角度の関係を示す。1周期に相当する1.04~2.39 sに注目すると、発電装置がマイナス側の端部からプラス側の端部へ傾き始めると角加速度は正負を交互しながら増加し、 -0.13 rad で最大となるが、その後はプラス側の端部へ達するまで減少していく。また、発電装置がプラス側の端部からマイナス側の端部へ傾き始めると角加速度は再び正負を交互しながら増加し、 0.10 rad で最大となるが、その後はマイナス側の端部へ達するまで減少していく。そのため、角加速度は角速度と同様に 0 rad （垂直）付近で最大となることが明らかとなった。

図7に時間と振動発電デバイスの電力および振り子運動の角度の関係を示す。1周期に相当

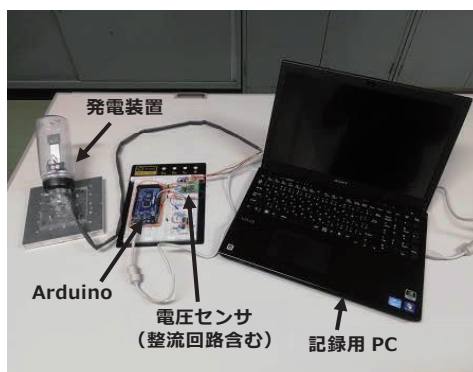


図4 計測システム

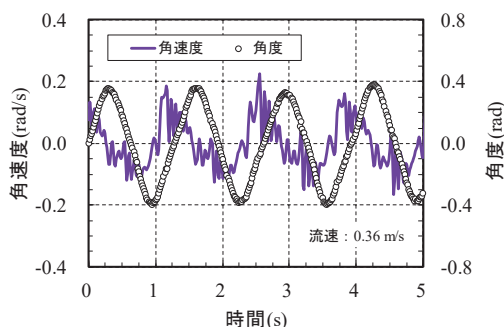


図5 時間と振り子運動の角速度および角度の関係

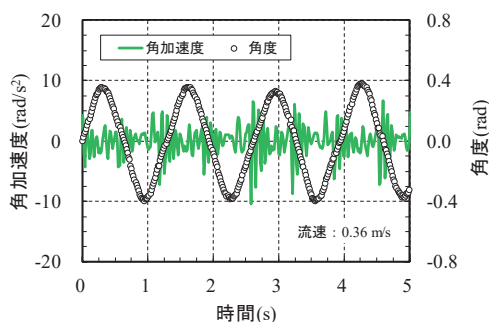


図6 流速と振り子運動の角加速度および角度の関係

する 1.04~2.39 s に注目すると、発電のピークが 4 つ生じていることがわかる。1 つ目のピークはマイナス側の端部から 0 rad (垂直) へ傾く場合、2 つ目の発電は 0 rad (垂直) からプラス側の端部へ傾く場合によって生じている。また、3 つ目のピークはプラス側の端部から 0 rad (垂直) へ傾く場合、4 つ目の発電は 0 rad (垂直) からマイナス側の端部へ傾く場合によって生じており、電力は端部から垂直へ傾く場合よりも垂直から端部へ傾く場合が大きい。これは、図 5 に示す角速度や図 6 に示す角加速度が最も大きくなる箇所と振動発電デバイスが発電し始める箇所がおよそ一致していることから、振り子運動と発電は関係しており、カルマン渦列や浮力による復元力に伴う発電装置の振動を慣性力¹²⁾として圧電素子が吸収し、電気エネルギーへ変換していたと考えられる。

(2) 流速の違いによる振り子運動および振動圧電デバイスへの影響

フーリエ解析により振り子運動の角度のスペクトルから各流速における周波数のピークを算出した。図 8 に流速と振り子運動の周波数のピークおよび最大角度の関係を示す。流速が増加するとカルマン渦列の影響により振り子運動の周波数のピークや角度は大きくなるが、流速が 0.39 m/s 以上になると周波数のピーク 0.83 Hz、最大角度 0.85 rad と一定であった。

図 9 に流速と振り子運動の最大角速度の関係を示す。流速の増加に伴い最大角速度が大きくなる傾向であるが、流速 0.29 m/s の最大角速度は 0.03 rad/s と 0.32 m/s 以上の最大角速度と比べて非常に小さい。この要因として、図 8 より流速 0.29 m/s の最大角度が 0.07 rad と発電装置がほぼ垂直で小刻みに揺れている程度であり、振り子運動が行われていないと考えられる。

図 10 に流速と振り子運動の最大角速度および定常流の運動エネルギーの関係を示す。なお、

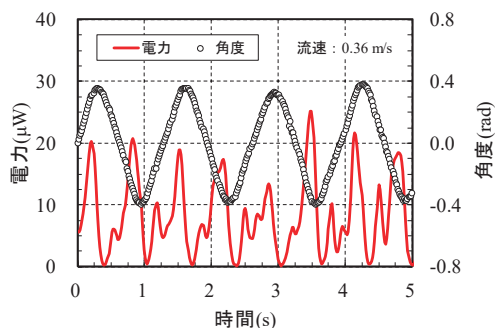


図 7 時間と振動発電デバイスの電力および振り子運動の角度の関係

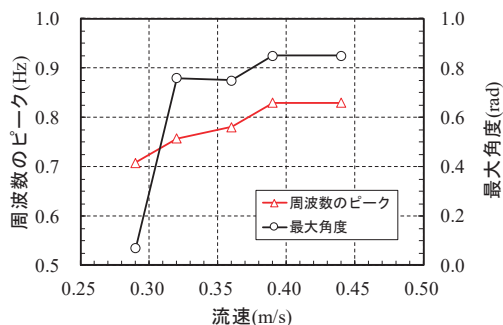


図 8 流速と振り子運動の周波数のピークおよび最大角度の関係

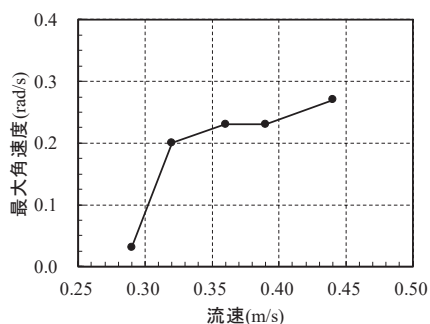


図 9 流速と振り子運動の最大角速度の関係

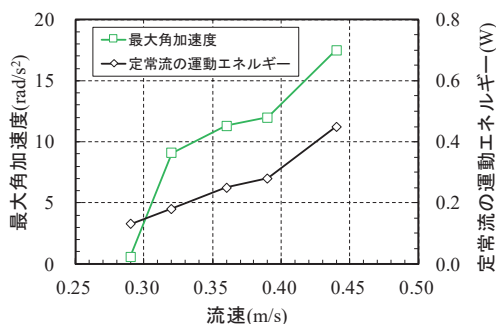


図 10 流速と振り子運動の最大角加速度および定常流の運動エネルギーの関係

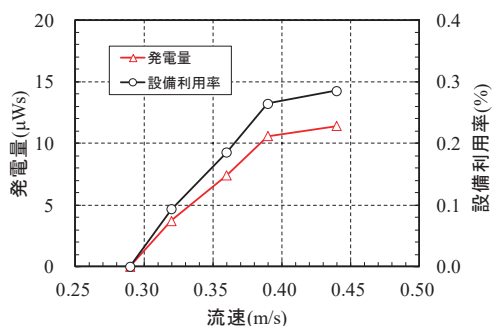


図 11 流速と振動発電デバイスの発電量および設備利用率の関係

流れ方向から見た発電装置の投影面積 A に単位時間 (m^2) に流入する運動エネルギー P を式(1)に示す。ここで、 ρ は水密度 (kg/m^3)、 v は流速 (m) である。

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

定常流の運動エネルギーは流速の影響が顕著であることからカルマン渦列も大きくなるため、流速が大きくなるほど振り子運動の最大角加速度は大きくなる傾向である。しかし、図 8 を見ると流速 0.39 m/s 以上では周波数のピークや最大角度が一定となっていることから、振り子運動の可動域は円筒部分の浮力や水位が影響していると考えられるため、今後はパラメータを変えて検討する必要がある。

図 11 に流速と 1s あたりの振動発電デバイスの発電量および設備利用率の関係を示す。ここで、設備利用率とは設備 (振動発電デバイス) が 100 % の出力で発電した場合の発電量想定に対して実際の発電量の割合がどの程度であることを示した数値であり、式(2)で算定する。

$$\text{設備利用率} = \frac{\text{発電量}}{\text{定格出力} \times \text{時間}} \times 100 \quad (2)$$

流速 0.29m/s では発電量および利用設備率がどちらもほぼ 0 であったが、流速の増加に伴い大きくなる。ここで、近年の VLSI の低消費電力化や無線技術の発達により、10 μ W 程度の発電量があれば IoT センサを間欠的に動かすことが可能となってきた¹³⁾ことから、本研究の範囲内では発電を確認できた 0.32 m/s 以上において、振動発電デバイスを用いたマイクロ水力発電を自立電源へ適用できる可能性が示唆された。

5. まとめ

本研究では河川や水路等で使用する IoT センサの駆動や通信に必要な不可欠な自立電源への

適用を想定し、水理実験を行ったことにより以下の知見を得た。

- 1) 振り子運動の際に発電装置は加速と減速を繰り返しており、角加速度や角速度は 0 rad (垂直) 付近で最大となる。
- 2) 流速の増加に伴い発電装置の角速度や角加速度は大きくなるが、 0.39 m/s 以上になると周波数のピークや最大角度が一定となる。
- 3) 流速 0.29 m/s の発電量および利用設備率はほぼ 0 であったが、流速の増加に伴いどちらも大きくなる傾向であった。また、本研究の範囲内では発電を確認できた 0.32 m/s 以上において、振動発電デバイスを用いたマイクロ水力発電を自立電源へ適用できる可能性が示唆された。

謝辞：発電装置の開発において秋田大学大学院理工学研究科技術部特別研修の補助を受けた。記して感謝申し上げます。

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) 山田昇，加藤洋平：圧電素子による沸騰現象からのエナジーハーベスティングに関する実験研究，日本機械学会論文集（B編），Vol.79, No.804, pp.229-241, 2013.
- 3) 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.
- 4) 財団法人新エネルギー財団：平成 20 年度中小水力開発促進指導事業基礎調査報告書，p.1-9, 2009.
- 5) 齋藤憲寿，高橋圭太，渡辺一也：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，東北地域災害科学研究，No.55, pp.197-202, 2019.
- 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：波力水車とリニアクランク気筒による海中エアレーション装置の開発，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.
- 12) 齋藤憲寿，高橋圭太，西脇遼，渡辺一也：圧電素子を用いた小型振り子発電による波エネルギーの活用に関する研究，平成 30 年度土木学東北支部技術研究発表会講演概要集，II-67, 2019.
- 13) 鈴木雄二：環境発電技術の展望，日本 AEM 学会誌，Vol.22, No.3, pp.339-342, 2014.