

令和元年6月22日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K01000

研究課題名(和文) もったいないエネルギーによるピコ発電システムの開発

研究課題名(英文) Investigation of Hydro-power systems using "Mottainai" energy.

研究代表者

山田 洋 (YAMADA, Hiroshi)

仙台高等専門学校・総合工学科・教授

研究者番号：80302230

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、身の回りに存在するが見逃して捨てているエネルギー、特に水の流れの持つエネルギーを活用し、持続可能な開発に寄与することを目的とする。ここでは、コアレス構造アキシアルギャップ型発電機を基に、開渠水路を対象とした螺旋水車による検討及び、軸封水を担保するマグネットカップリングを反映したハイブリッド型発電機の検討を行った。

その結果、解析的・実験的手法を通じ、開渠水路と螺旋水車との組み合わせで十分な出力が得られること、及びハイブリッド型発電機が水圧管路においても十分稼動する可能性を持つことを明らかにした。今後は十分なトルクと回転数が得られる水車を適用し評価・解析が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は商業的に未利用領域であり活用せず捨てている水のエネルギーを対象とした小型水力発電システムの開発であり、エネルギーハーベスティングや持続可能な開発目標に資する内容である。社会基盤エネルギー資源の乏しい日本や、電力設備の不十分な国において、このシステムを活用できれば、将来にわたる電気エネルギー利用の持続性を可能とすることが期待される。また、産業的に十分な規模が得られなくても、省エネルギー及び創エネルギーについて社会的に啓蒙することが可能である。これは電気電子分野の工学領域と環境分野の人文科学領域との融合を生み、学術的意義や社会的意義を有すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：A small hydro-power systems using "Mottainai" energy, that exists around us but is missed and thrown away, were discussed. Mainly, two experiments were performed in this study. One is an experiment using a spiral water turbine and an axial-gap-type generator, and the other is an evaluation and experiment using the axial-gap-type generator having a structure similar to a magnet-coupling, that is called a hybrid-type generator (Torque-transfer-characteristics and Power-generate-characteristics). The performances of the system with spiral water turbines and the generator were obtained. And good performances of torque-transfer and power-generate were obtained. The small hydro-power systems are suitable for utilization of the unused energy area of the industry.

研究分野：複合領域

キーワード：ピコ水力発電 小水力 持続可能性 アキシアルギャップ型発電機 マグネットカップリング

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、社会基盤エネルギーの8割以上が化石燃料に依存しているが、化石燃料は、地球温暖化や大気汚染などの環境問題、そのほとんどを輸入に頼る入手経路の問題、および将来起こりうる資源枯渇問題への対策が重要視されている。したがって、持続発展可能な社会を実現するためには、化石燃料を利用しないクリーンかつ再生可能なエネルギーの利活用が強く求められる。クリーンな発電方式といえば太陽光発電・風力発電・水力発電などが主に挙げられるが、本研究では、天候や時間帯に左右されずに安定した発電が期待できる水力発電に着目した。

### 2. 研究の目的

本研究はクリーンかつ再生可能なエネルギーとして水力エネルギー、その中でも、身の回りに存在するが普段見過ごして捨ててしまっている小規模の「もったいない」エネルギーを対象とする。これらは流れの末端でエネルギー規模が小さく、商業的に未利用領域にあった。そのエネルギーを活用することは、産業的な裾野の拡張だけでなく、省エネ・創エネの啓蒙活動にも貢献できると考えられる。本研究では、未利用エネルギーの利活用として、数100W以下の電力生成を対象とするピコ水力発電の研究を目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は、これまで研究を進めている発電機（弱い水の流れでも十分回転し出力することが可能なコアレス構造、扁平構造かつ設計や試作・改善が容易なアキシヤルギャップ型）を用い、未利用領域である身の回りの様々な水流を対象とした研究を実施する。対象とする水流は、(1)工場トレンチや河川、開渠水路などの無圧水路で、低落差であるが比較的流量が期待できるもの、(2)水道管などの水圧管路で軸封水を考慮する必要があるもの、の二通りとする。

#### (1) の方法：

本研究では、らせん水車、発電機、水路、ポンプ等からなる実験環境を構成した。水路の傾斜は $30^\circ$ に設定し、そこにらせん水車を固定した。らせん水車は、軸に羽根を取り外し可能な構造になっており、長さ240mm、羽根間隔60mm、高さ45mmの3枚羽根を取り付けて実験を行った。

ポンプで水路に水を循環させ、らせん水車を回転させると、らせん水車に接続した発電機によって電圧が発生する。その時の発電機の出力を測定し、電力を算出した。負荷抵抗（三相負荷）は $10\sim 330\ \Omega$ の範囲で変化させ、流量や羽根数を変えた時の、負荷特性の流量依存性・羽根数依存性を求めた。ここで、流量は最大（約450 L/min）、最小（約150 L/min）の2パターン、羽根は3個、2個、1個（上段）、1個（下段）の4パターン（軸長方向に直列）で測定をした。

#### (2) の方法：

本研究では、水圧管路中の水車を対象とし、水中と大気中を遮る隔壁を通じて動力伝達を行う際の軸封水として、非接触トルク伝達可能なマグネットカップリングの活用とその応用を検討した。マグネットカップリングの構造は、そのギャップ部にコイルを配置することでアキシヤルギャップ型発電機と等価な構造となる。これはトルク伝達と電力生成を同時に行うことが期待でき、本稿ではハイブリッド発電機と呼ぶ。最初に実機の測定・評価装置を試作し、マグネットカップリングを発電機に適用したもの、及びアキシヤルギャップ型コアレス発電機をマグネットカップリングに適用したものの二通りの実験を実施する。電磁界解析には有限要素法電磁界シミュレータ

（JSOL製 JMAG-Designer）を使用した。実験及び解析は、マグネットカップリングは市販製品（外径100mm、10極、別途コイル9個試作）を、アキシヤルギャップ型発電機は試作機（外径約130mm、16極、コイル12個）を使用した。負荷特性測定には、デルタ結線対称三相負荷を用いた。

### 4. 研究成果

#### (1) の成果：

図1(a)、(b)に、羽根数3個で実験を行った負荷特性の流量依存性を示す。(a)より、負荷抵抗が小さいほど負荷が重くなり、回転速度は遅くなっていることが分かる。また、(b)より、負荷抵抗が $30\sim 50\ \Omega$ 付近で最も大きくなることが分かる。450 L/minの時は発生電力が最大で約4.98 W、その時の回転速度が390 rpmである。それに対して150 L/minの時は発生電力が最大で0.91 W、その時の回転速度が165 rpmであるため、発生電力は約5.47倍、回転速度は約2.36倍の差が生じている。ここで発電機の誘導起電力は回転速度に比例することから、発生電力は回転速度の2乗に比例することが分かる。そのため、回転速度が遅い150 L/minの時は発電量が小さくなったと考えられる。

流量が450 L/minの時の負荷特性の羽根数依存性を図2に示す。図2より、最大発生電力は羽根1個（上段）の時に最も大きく5.81 W、次いで1個（下段）の時に5.52 W、2個の時と3個の時は5.0 Wという結果になった。羽の個数を増やしていくと、水から

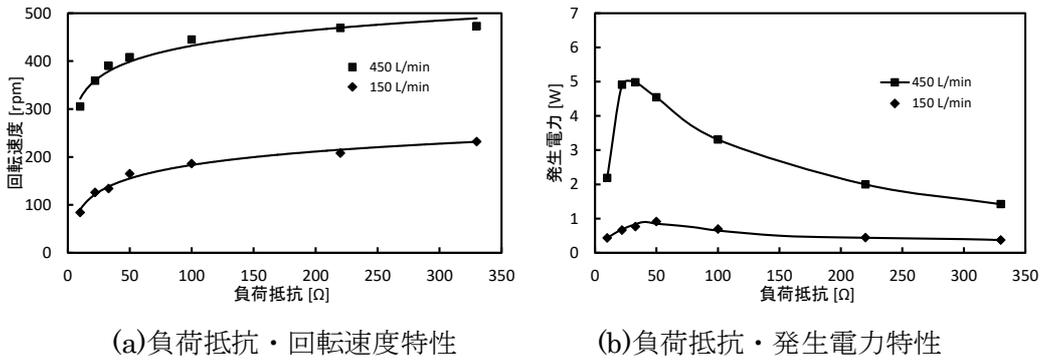


図1 負荷特性の流量依存性 (羽根数 3 個)

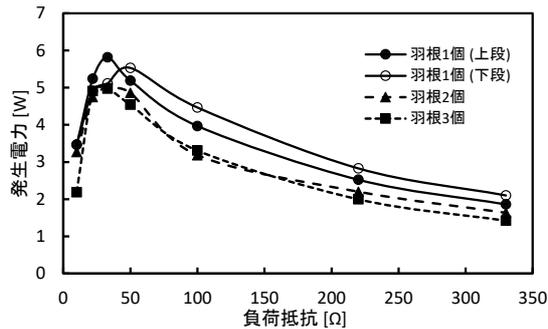


図2 負荷特性の羽根数依存性 (450 L/min)

受けるエネルギーは増加するが、同時に水車全体の質量が大きくなり、回転するための力が大きくなるため、個数を増やすにつれ発生電量は小さくなったと推察される。次に、1個(上段)と1個(下段)では、個数は同じでも上段と下段で発生電力に差がある。実験では、ポンプで水を汲み上げ流入する方式をとったが、上段ではポンプによる水圧から開放された直後の水のエネルギーを受け、下段では水路を流れてくる水のエネルギーを受けて回転している。この違いが発生電力に影響していると推察される。

以上、らせん水車の流量依存性・羽根数依存性について測定し検討した。結果、3枚羽根を上段に1個取り付け、流量を450 L/minにした時に、最大で約5.8W発生することが確認できた。また、最大発生電力は流量を3倍にした時、約5.5倍になったが、羽根の個数を増やすと発生電力は減少する傾向にあることが確認できた。このことから、羽根数よりも流量の変化の方が、発生電力に大きく影響している事が分かった。また、流量の増加に伴い発生電力がさらに増加することが期待できる。

(2) の成果：

① マグネットカップリングのハイブリッド発電基礎検討

マグネットカップリングを用いたハイブリッド発電の可能性を探るため、ギャップ間に導体を挿入した場合のトルク特性 (図3(a)) および電圧の速度依存性 (図3(b)) を、ギャップ長を変化させて測定した。トルク特性より、ギャップ間の導体有無に関わらず大きな差異が認められず、またコイル挿入により誘導起電力が得られたことより、ハイブリッド発電の可能性を示唆する結果を得た。

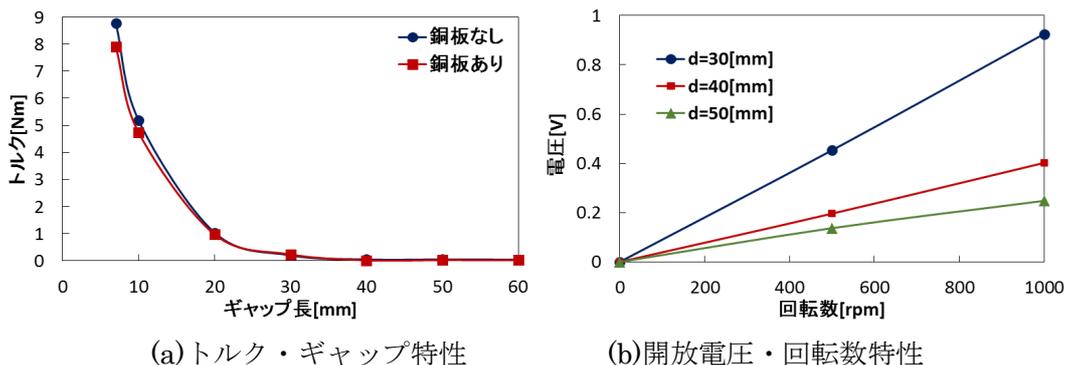


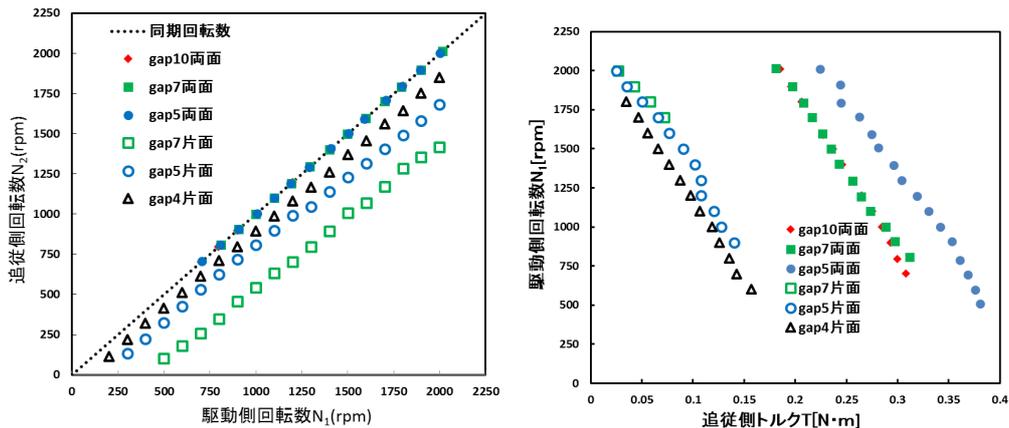
図3 マグネットカップリングによるハイブリッド発電特性の基礎検討

②アキシアルギャップ型コアレス発電機のハイブリッド発電検討

アキシアルギャップ型発電機は磁石がコイルをはさむ状態且つこれらの磁石が回転軸に固定された構造である。この両磁石を各々独立した回転軸に固定し、非接触で磁氣的に結合したマグネットカップリングと等価な構造として検討を行った。ここで、アキシアルギャップ型発電機は、コイルをはさむ片面にのみ永久磁石を配置した片面磁石構造と、コイルの両面に永久磁石を配置した両面磁石構造の二通りを用いた。後者がマグネットカップリングと等価な構造である。両者において磁石のある側にモータを接続した駆動側とし、他方は追従側とした。ここで、いずれの磁石も軟鉄板（軟磁性バックヨーク）に固定されており、片面の他方は軟鉄板のみとなる。

図4(a)は、駆動側と従属側の回転数を比較した結果である。片側磁石の場合、追従側の回転速度は駆動側より遅く、ギャップ長を拡げるにつれその傾向は大きくなった。これは、追従側の回転が駆動側に同期せず滑りが生じていることを示す。すなわち片面磁石は従属側軟鉄板に磁束の時間変化が生じることから渦電流が発生し、鉄損の影響が懸念される。一方、両面磁石は追従側の回転が駆動側に同期していることを示唆する結果が得られ、両面磁石が回転軸で接続されている従来型の発電機と同じ運転であることが確認された。図3(b)は駆動側の回転数を2000 rpmと設定した後、追従側の軸に負荷トルクを付与した場合における、駆動側の回転数を示したものである。片面磁石に比べ両面磁石は約0.2 Nm 高いトルクを示した。いずれの場合も追従側の負荷トルクが増加するに伴い駆動側の回転数が単調に減少している様子が確認された。この傾向は駆動側に接続したモータの特性を反映したものであり、トルクの小さな水車の場合は負荷の影響を受けやすくなり、回転数の低減すなわち発電量が低下することが推察される。

図5は両者の発電機における、発電量の負荷依存性を測定した結果である。ここでギャップ長を5 mmとした。いずれの特性も抵抗値50 Ω付近でピークをとっているが、これは巻線抵抗値と同等であることから、最大電力の法則を示唆する結果といえる。



(a) 駆動側回転数・追従側回転数

(b) 追従側トルク・駆動側回転数

図4 ハイブリッド発電機の回転数・トルク特性

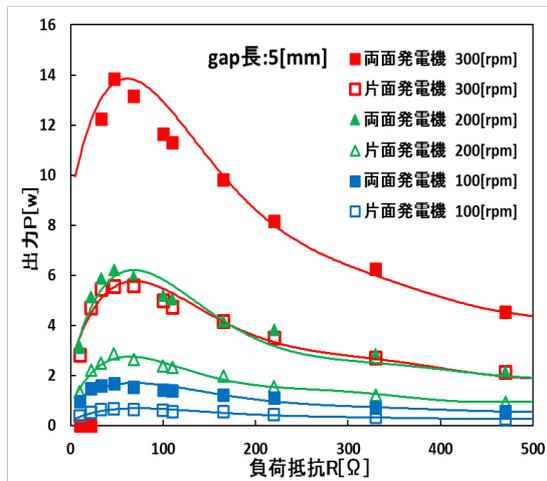


図5 ハイブリッド発電機の負荷特性

これらの結果は有限要素法電磁界解析結果と良い一致を示しており、妥当な結果が得られたものと考えられる。同じ回転数において、片面磁石と両面磁石の出力を比較すると、両面は片面の約2倍の電力であった。これは電磁界解析結果より得られた、コイル部の磁束密度の違いを反映するものである。したがって、マグネットカップリングと等価な構造を持つハイブリッド発電機は、従来型のアキシアルギャップ型発電機と同様の出力特性を得ることができ、軸封水の影響のない水力発電の新しい形として期待できる。

図6に、駆動側に接続する水車のトルクが低い場合と高い場合を想定した実験結果を示す。最初に無負荷状態の駆動側のモータを1500rpmに設定し、追従側の負荷トルクを増加させる。次に無負荷状態の回転速度を低減させて同様の実験を行う。図6(a)はモータの電流値を減少させることにより回転速度を低減させた実験結果(低トルク水車想定)、図6(b)はモータの電圧を減少させることにより回転速度を低減させた実験(高トルク水車想定)である。その結果、低トルク想定は負荷トルク増加に伴い回転数の減少が顕著であるが、高トルク想定はあるトルクまで回転速度を維持する傾向が認められた。以上の結果より、水車のトルク特性の向上が回転数を維持し、発電量増加に寄与することが推察される。

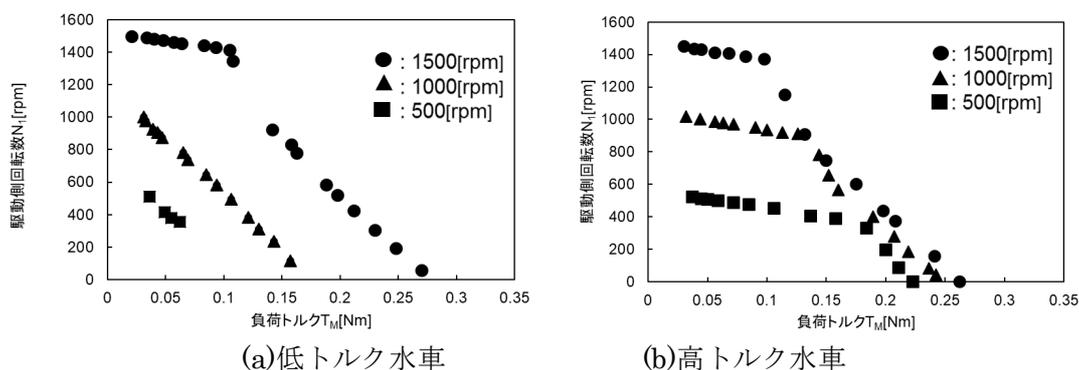


図6 トルク伝達特性 (ギャップ長 8mm)

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕 (計 1 1 件)

### 1) ハイブリッド型ピコ水力発電システムの基礎検討

○吉田 迅汰, 安部 圭亮, 山田 洋 (仙台高等専門学校)  
平成 31 年東北地区若手研究者研究発表会, YS-17-P6, 2019.

### 2) マグネットカップリングを用いたハイブリッド発電システムの基礎検討

○安部 圭亮, 東山 大樹, 水間 大樹, 山田 洋 (仙台高専)  
第 24 回 高専シンポジウム in Oyama, PF-07, 2019.

### 3) ハイブリッド発電システムの検討 ~実験的手法~

○高橋 佑介, 小山内 寅泰, 小野 寺克之, 村上 湧士, 山田 洋 (仙台高専)  
平成 30 年東北地区若手研究者研究発表会, YS30-P-1-3, 2018.

### 4) ハイブリッド発電システムの検討 ~シミュレーション的手法~

○小野 寺克之, 高橋 佑介, 小山内 寅泰, 村上 湧士, 山田 洋 (仙台高専)  
平成 30 年東北地区若手研究者研究発表会, YS30-P-1-2, 2018.

### 5) マグネットカップリングを用いたハイブリッド発電システムの研究

○岩 渕 篤, 田中 颯 希, 山田 洋 (仙台高専)  
平成 29 年東北地区若手研究者研究発表会, YS29-P-1-4, pp. 115-116, 2017.

### 6) SRM のトルクリプル低減に向けた基礎検討

○山崎 泰晴, 山田 洋 (仙台高等専門学校)  
平成 29 年東北地区若手研究者研究発表会, YS29-2-1-1, pp. 37-38, 2017.

### 7) らせん水車を用いたピコ水力発電の基礎検討

○長内史也, 山田洋 (仙台高等専門学校), 四戸大希, 浦啓裕, 佐藤勲征 (宮城県産業技術総合センター), 吉田忠雄 (明治合成) 板垣篤 (凌和電子)  
平成 28 年度電気関係学会東北支部連合大会, 1F17, 2016.

8) 逆磁歪効果を利用した機能磁気デバイスの基礎検討

○佐藤拓人, 相沢 廉, 山田 洋 (仙台大専)  
第 21 回高専シンポジウム in 香川, Pb-021, 2016.

9) 磁石を用いた振動発電の基礎検討

○相沢 廉, 佐藤拓人, 山田 洋 (仙台大専)  
第 21 回高専シンポジウム in 香川, Pb-020, 2016.

10) らせん水車を用いた小水力発電 ～羽根数依存性～

○小池脩太, 長内史也, 山田 洋 (仙台大専), 四戸大希, 浦 啓祐, 佐藤勲征 (宮城県産業技術センター), 吉田忠雄 (明治合成株), 板垣 篤 (凌和電子株)  
第 21 回高専シンポジウム in 香川, Pb-016, 2016.

11) らせん水車を用いた小水力発電 ～流量依存性～

○長内史也, 小池脩太, 山田 洋 (仙台大専), 四戸大希, 浦 啓祐, 佐藤勲征 (宮城県産業技術センター), 吉田忠雄 (明治合成株), 板垣 篤 (凌和電子株)  
第 21 回高専シンポジウム in 香川, Pb-015, 2016.

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。