

サイフォン式導水路による大学内小水力発電実験

THE SMALL-SCALE-HYDROPOWER EXPERIMENT IN AN N.I.T. CAMPUS BY A SIPHON TYPE RACEWAY

高城 実^{*1}・熊本 圭佑^{*2}・野中 智博^{*3}

Minoru TAKAJO^{*1}, Keisuke KUMAMOTO^{*2} and Tomohiro NONAKA^{*3}

This research reports the improvement method of the power generation electric power of a practical small power generation system. The siphon raceway made from a vinyl chloride pipe is set by an effective head, the length of a waterway, and the inclination of a place, and it can build at low cost. It is not necessary to install a generating facility into a waterway or running water. Therefore, a risk of a generating facility being destroyed at the time of rise of water of a river decreases sharply. The purpose here is to build a hydraulic power production plant within the campus. As a result, the same power generation experiment as a river floodgate can be conducted now. Power generation electric power aims at more than 100W with one generating facility. Since this power generation electric power can be used as local-supply-and-local-consumption energy of an area, it is expected from many people.

Key words : 再生可能エネルギー, サイフォン式導水路, インナーロータ型ディスク発電機
renewable energy, siphon type raceway, Inner rotor type disk dynamo

1. はじめに

日本国内の2015年の発電量は東日本大震災(2011年3月11日)以降、脱・原発依存を主張する声(世論)が震災後に増えたこともあり、原子力発電は現在も9割以上が停止しており、全体の発電量のわずか0.9%である¹⁾。再稼動には、原子力規制委員会の安全審査の合格や自治体の同意等が必要であり、使用済みの核燃料再処理(プルトニウムの分離・回収)施設の稼動の目途も立っていない。また、採算性から廃炉を決めた原発も10基を越える。このため、地球温暖化に逆行する石炭、天然ガスおよび石油が全体の発電量の約8割を占めており、世界に逆行している²⁾。このような現状を踏まえると、今後、再生可能エネルギーの占める割合を将来的に増やすことが望まれる。

温暖効果ガスの削減はわが国の環境政策の重要課題で、運転中にCO₂等の温室効果ガスを発生しない水力発電は、今後の地球温暖化政策に貢献する最も好ましいエネルギーの一つと言える。水力発電は石油や石炭などの各種発電方式に比べてCO₂を発生しないクリーンな再生可能エネルギーである。その中でも、ダムを必要としない身近な水資源を有効活用する小水力発電は、環境にやさしい「地域分散エネルギー」として、各地でその取り組みが始まっている³⁾。この

小さなエネルギーが社会を変える大きな力になる。

筆者らは、地域と連携して小水力発電で起こした電気を地域で消費する「地産地消エネルギー」としての可能性を検証してきた。例えば、2013年福岡県豊前市において市内を流れる岩岳川の下流域の河川堰⁴⁾(農業用水路)にて、2014年では豊前市南部の犬ヶ岳を源流とする岩岳川上流域の求菩提(くぼて)山麓の堰で、最大で46Wの発電出力が得られている⁵⁾。2015年には、福岡県みやこ町犀川内垣にて、下掛け木製水車で発電出力約35Wが得られ⁶⁾。同年9月には、みやこ町上伊良原にて、上掛け木製及び金属製上掛け2連水車発電システムを使用して、それぞれ最高88W、180Wの発電に成功し、蓄電や小動力として使用できる可能性が出てきている⁷⁾。

九州内の佐賀県では落差、流量の少ない約2000箇所のクリーク(小規模な河川、川、水路、小川等)があり、危ない所はロープ、柵が設置されている。さらに、特に危ないところでは夜間はLED安全灯等が必要であり、クリークでの小水力発電を利用した防犯灯、安全灯等の実用化および常設が望まれている。

ここでは、本学が平成26年度文部科学省から採択された「地(知)の拠点整備事業(大学COC事業)」の地域志向教育の継続したエネルギー・環境教育の一環として、小型実験用水車を用いた「サイフォン式小水力発電設備」を大学内の噴水施設設備の一角に構築した。学内の発電実験を通して、「地産自立エネルギー」として利用する実用的な発電システムの発電電力の向上実験の結果について報告する。

*¹ 西日本工業大学工学部総合システム工学科電気情報工学系教授

*² 工学部総合システム工学科電気電子工学系学部生

*³ 工学部総合システム工学科機械工学系機械設計コース教授

2. これまでの実験場所と大学内での発電設備構築



(a)



(b)

図-1 小原地区河川堰と小水力発電の景観

最近の小水力発電実験の実施場所を図-1(a)(b)に示す。福岡県築上郡築上町小原地区の改修河川堰(有効落差1.26m)で、H28年12月まで実施してきた。H29年5月以降、雨が少なく現地での発電試験が困難な状況となった。現地実験では装置の搬入・実験・片付けまで多くの時間が必要となる。

そこで、大学COC事業の一環として、大学内で発電実験設備の構築を考えた。大学内ならば、発電実験準備が容易なり、様々な角度から小水力発電実験を実施できる。

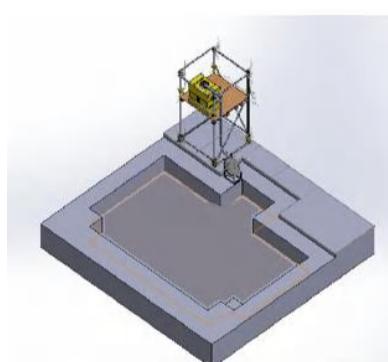
2.1 実験目標および学内発電実験場について

ここでは、以下のような目標を掲げて大学内に小水力実験場を構築した。

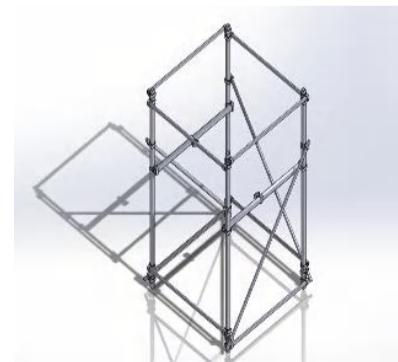
- (1) 河川堰と同様な小水力発電実験ができるように大学に許可をもらい、大学構内に発電実験場を構築する。
- (2) 発電システム1台で、3桁(100 W)以上の発電電力が得られ、同時に発電装置の負荷試験を実施する。
- (3) サイフォン式導水路や発電装置(直径60cmの金属製水車を利用)を工夫して発電電力の向上を図る。

サイフォン式小水力発電⁸⁾のメリットは、パイプ導水路(水路長、勾配、有効落差等)を発電場所に合わせて自由に設計できる点にある。また、発電装置を水路や流水中に設置する必要がないので、河川等の増水時も装置が流されるリスクが減少する。ここでは、COC事業の一環として、小型実験用水車を用いたサイフォン式小水力発電設備を大学内に構築し、学内での発電実験を通して、「地産自立エネルギー」として利用可能な実用的な発電システムの開発を目指した。

学内の噴水施設の一角に貯水タンク櫓(高さ3 m×横2 m×奥行2 m)に導水路やエンジンポンプ等を組み入れて完成した発電設備の3Dイメージ図を図-2(a)に、貯水タンク支持櫓の拡大図を図-2(b)に示す。また、主な発電設備(サイフォン式導水路利用)の構成部品と写真をそれぞれ図-3に示す。



(a)



(b)

図-2 発電装置の3Dイメージ図(a)および櫓拡大図(b)

60角パイプ3m	4本
60角パイプ2m	2本
50丸パイプ2m	8本
50丸パイプ3m	4本
角-角ジョイント(固定タイプ)	4個
角-丸ジョイント(固定タイプ)	16個
角-丸ジョイント(フリータイプ)	8個
農業用タンク 500ℓ	1個
ホンダエンジンポンプ	2台(2200ℓ/min)



図-3 発電設備の構成部品

- ホンダエンジンポンプ2台 (2200 ℓ/min)
- 農業用タンク (500 ℓ)
- 塩ビパイプ: (VU-100A・125A)
- 有効落差: 1.88~2.38 m, 流量: 0.025~0.049 m³/s
- 発電機: インナーロータ型ディスク発電機, 外転型発電機 (明和製作所製, ORG-1000)



(a)



(b)



(c)



(d)

図-4 発電設備の組み立ておよび追加部品

発電設備は、最初に図-4(a),(b)に示すように、学内の噴水設備の近傍で櫓を組み立てた。給水タンク支持台の高さを1.88 mにしたが、予備発電実験の段階で、目標の100 Wの発電電力に達しなかったため、支持台高さを2.38 m(50 cm増加)まで上げた。これに伴い、図-4(c),(d)に示したエンジンポンプ台(高さ450 mm)および追加パイプ(長さ515 mm)を作製した。50 cm上げる前の発電設備と完成した学内発電設備を図-5(a),(b)に示す。



(a)



(b)

図-5 学内発電実験場の構築

2.2 大学内での小水力実験場の水量計算

次に、小原地区の改修河川堰と同様な小水力発電実験が可能か、供給水量を検討した結果を以下に示す。

1) エンジンポンプ吐出量

$$\begin{aligned} \text{①ホンダエンジンポンプ 口径3インチ (76.2 mm)} \\ \times 2\text{台}, \text{最高吐出流量} &= 2200 \text{ l/min (0.0366 m}^3/\text{s} \\ &= 36.6 \text{ l/s} \end{aligned}$$

2) サイフォン導水路流量

$$\begin{aligned} \text{① 塩ビパイプ 直径 } &0.1 \text{ m} \\ \text{② 有効落差 } &0.5 \text{ m(タンク内水面から吸入口中心)} \\ \text{③ 流速(導水路入口流速)} \\ V = \sqrt{2gh} &= 3.13 \text{ m/s} \\ \text{④ パイプ断面積(} &0.00785 \text{ m}^2 \text{)} \\ \text{流量は } &0.00785 \text{ m}^2 \times 3.13 \text{ m/s} = 0.0235 \text{ m}^3/\text{s} \\ \text{⑤ タンク出口からの流量} \\ 0.0235 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{損失係数 } &0.8 = 0.0188 \text{ m}^3/\text{s} \\ (\text{1秒間に}) &18.8 \text{ l/s} \end{aligned}$$

サイフォン導水路全長が約5.4 mあるので、損失係数を少し大きく0.8に設定した。以上の計算から、エンジンポンプ2台で小原地区河川堰の流量15.5 l/s以上での流量で実験が可能であることが判明した。

2.3 サイフォン導水路内の流速分布について

複数のサイフォン導水路を実際に製作、設置して実験するのは大変なため、3次元CADソフトウェアSolidWorksのFlow Simulation機能⁹⁾を利用し、小水力発電の発電実験前に有利な情報を得て、発電実験を円滑にした。そこで、大学内で実際に構築した「サイフォン式導水路のモデリング」を行い、予め、導水路内部流速分布および出口流速等を把握した。給水タンク支持台高さが1.88 m、さらに50 cm上げた2.38 mのときのFlow Simulationの初期条件を設定して、測定が困難なパイプ導水路内部の流速分布をそれぞれ解析した結果を図-6に示す。

サイフォン導水路全長は4865 mmおよび5365 mmである。導水路の曲部は大きく3箇所ある。導水路入口(T型2箇所)流速の設定条件はトリチエリの定理で求めた値の半分1.57 m/sとした。図-6の縦軸の流速値はパイプ中心の値である。曲部では同図に示すように流速の増加、減少が生じるが、垂直部では、両者ともにほぼ一定の流速値を示す。パイプ出口の流速は前者が2.65m/sで後者が2.89m/sとなり、全長が長い分、始点と終点における液面の高さの差が重力による位置エネルギーの差となり、出口流速は約9%増加する。

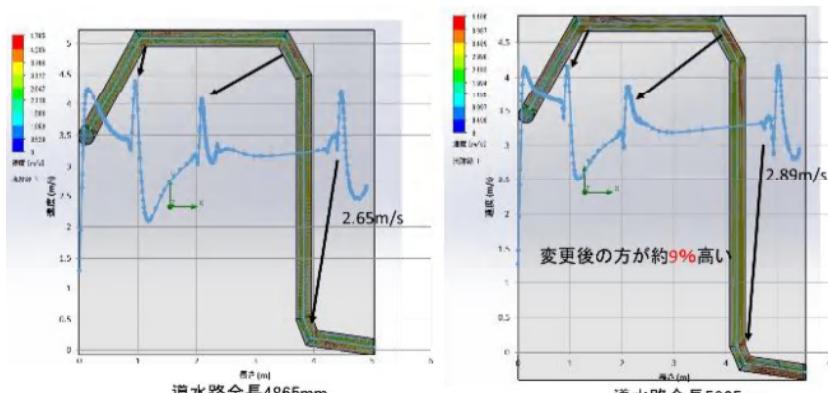


図-6 導水路高さ1.88mと2.38mでの流速分布の比較(125mm φ)

学内でのサイフォン式小水力発電において、発電用に使用する小型発電機の選定は重要である。ここでは、市販の外転型永久磁石発電機(明和製作所製 OGR-1000)および本学研究室で自作したインナーロータ型ディスク発電機を使用した。小水力用発電機の仕様の比較は文献¹⁰⁾を参照されたい。

3. 実験結果と考察

3.1 大学内発電設備での小水力発電特性

給水タンク支持台の高さが1.88 mおよび2.38 mのときの小水力発電特性を図-7に示す。支持台を50 cm上げることで、発電電力は82 Wから目標の3桁の107 Wが得られ、31.1 %増加した。発電電力は負荷抵抗の減少(電球の点灯個数増加に相当)で、発電電力は同図のように減少する。水の有する運動エネルギーが一定なので、消費電力が増加すると発電電力は減少する。よって、発電システムは、発電電力が最大値を示す負荷状態で稼動することが望ましい。

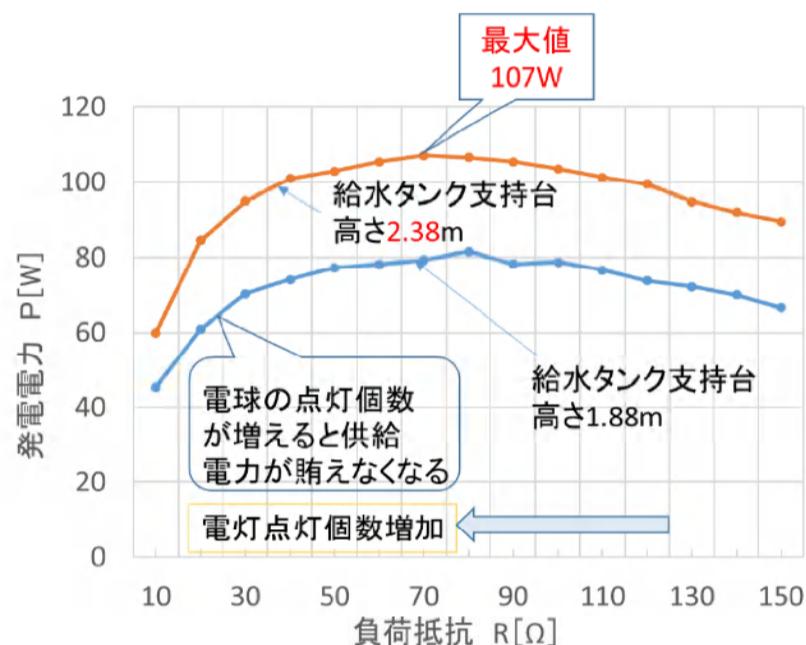


図-7 学内初めての発電試験結果

次に、発電機の違いによる総合効率を比較した結果を図-8に示す。導水路の直径は100 mmで、流量Qは0.0248 m³/s、理論発電出力P(発電効率は100 %で計算)は578 Wである。

水車と発電機および動力伝達効率はそれぞれ個別に求めるのは容易ではないので、ここでは、発電システムの効率を総合効率で評価した。総合効率の定義は水車、発電機および動力伝達効率それぞれの積となる。

同じ実験条件の下で、外転型発電機とインナーロータ型の総合効率は以下に示す18.4および18.6 %であり、ほぼ同じ値となった。小水力発電システムの増速率としては、前者が2倍、後者は10倍と違うが、水の有する運動エネルギーが同じなので、総合効率もほぼ同じになると推測される。



図-8 発電機の違いによる総合効率の比較

以下に、発電電力の向上策を3点示す。

- 対策 1) 導水路出口にアダプターを装着し、水流を水車の羽根板と底板に確実に当て、最大発電電力を得る。
 2) 導水路出口の高さ(地面から出口パイプ中心)を微調整して最大電力が得られる条件を把握する。
 3) 導水路パイプ直径の増大(100→125 mm)および発電機を2台連結して発電電力の向上を図る。

対策1では、導水路出口に装着するアダプターを3Dプリンタで作製(図-9参照)した。アダプターの内径は100 mm ϕ とし、出口幅は190×53 mmである。アダプターの先端は、絞り有と無いものを二通り作製して、発電電力への影響を比較した。また、アダプターを装着しない直径100mmのマル型塩ビパイプも発電実験の比較対象とした。

三者の導水路出口の水流が水車羽根板にどのように当たっているか確認したのが、図-10である。アダプター絞り有(a)、マル型塩ビパイプ(b)、アダプター絞り無(c)のそれぞれの場合の、導水路出口から出る水流が上掛け金属水車の羽根板へ当たる状況が確認できる。アダプター絞り無では、出口水流が拡散、散水するが、アダプター先端を絞ることで、水車羽根板の幅280 mmに水流が収まっているのがわかる。同図(b)では、出口流水の散水が著しいが、羽根板の下側にも、衝撃力を与えていることがわかる。

出口アダプターの発電電力に与える影響は図-11に示すように同条件でも、大きな差が現れる。アダプター絞り有にすることで、発電電力が出口塩ビ丸より27%増加し、アダプター・絞り無より66%増加することを確認した。

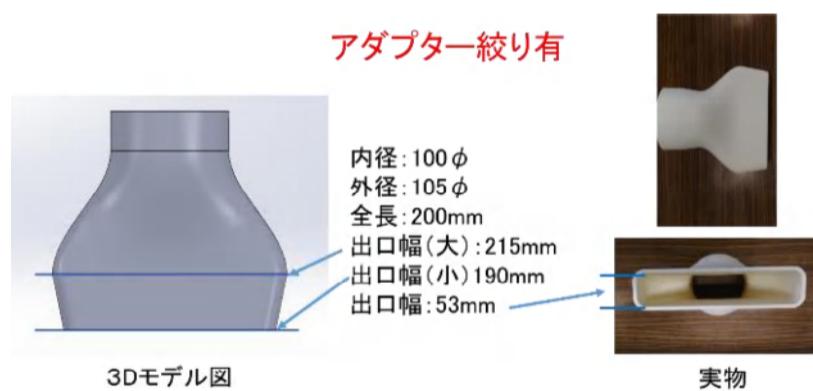


図-9 3Dプリンタによる出口アダプターの作製

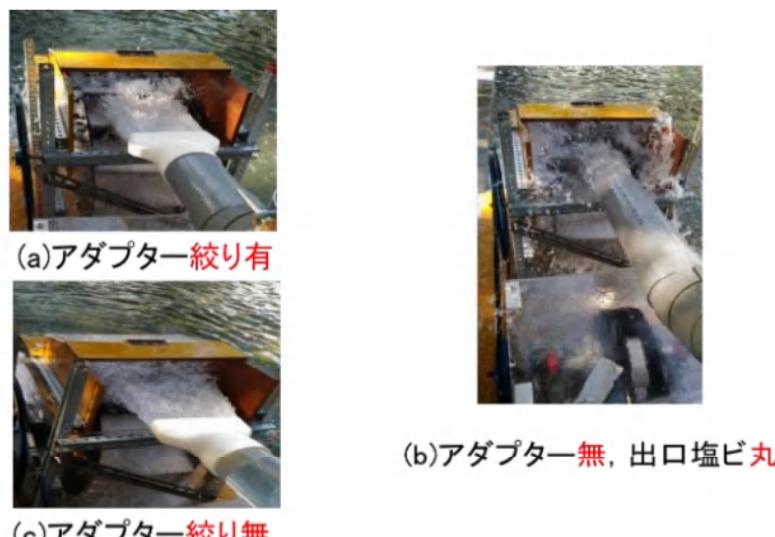


図-10 導水路出口アダプター有無の発電比較実験

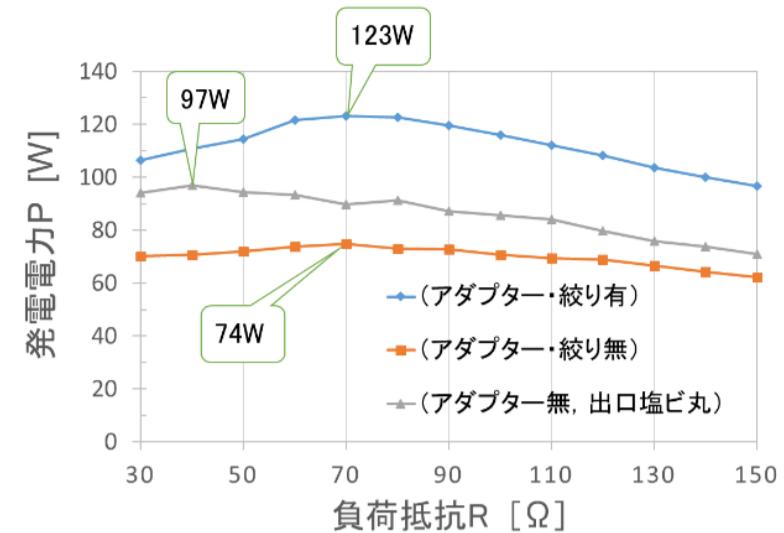


図-11 発電電力の比較結果

対策2の導水路の高さを微調整した発電実験では、水流が水車羽根板と底板に最大の衝撃力を与えている状態を調べる目的で実施した。水流が最も水車へ衝撃力を与える条件では、発電電力は最大値を示すことになる。



図-12 導水路の高さを調整した発電実験

導水路の高さの変化は図-12の○印の箇所で行った。右の拡大図のようにジャッキにより高さ(図中に示す地面から出口パイプ中心までの距離)の範囲は64~66.5 cmである。

実験は、出口アダプター絞り有で実施した。結果は、図-13に示すように高さ64 cmのとき最大となり、発電電力は123 Wを記録した。64 cmから0.5 cmずつ66.5 cmまで導水路の高さ上昇させると、発電電力は123 Wから100 W近くまで次第に減少する。以上より、64cmのときに導水路出口アダプターから出た水流が、羽根板間に入り、底板に大きな衝撃力を与えていると考えられる。

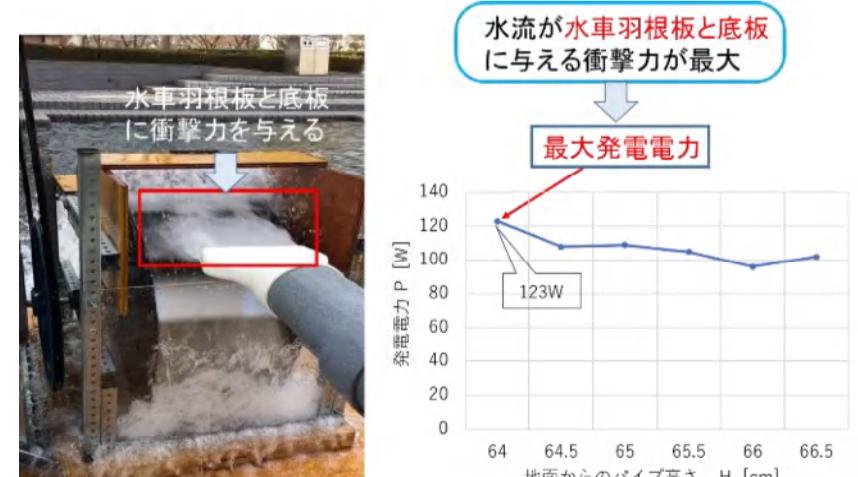


図-13 発電電力の比較結果(高さ微調整)

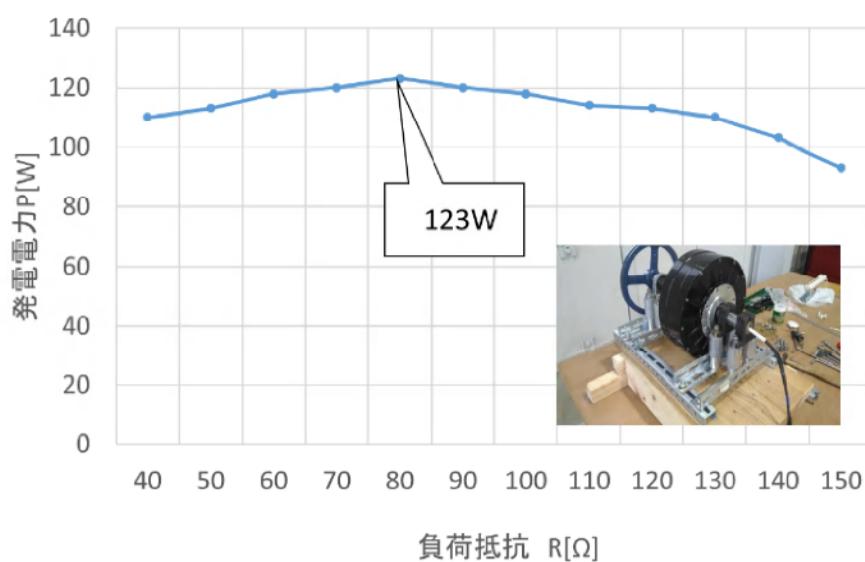


図-14 最大電力のときの発電特性（アダプター絞り有, アウトロータ型, 高さ64cm）

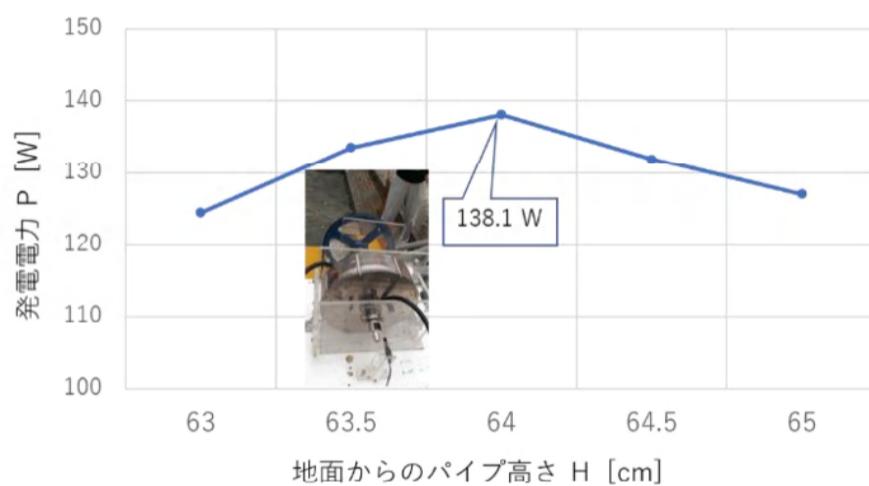


図-15 導水路の高さ変化したときの発電特性（アダプター絞り有, インナーロータ型）

導水路出口にアダプターを付けた絞り有の条件で、最大電力を記録した高さ 64 cm のときの発電負荷特性を図-14 に示す。図-7 の初めての発電実験(パイプ直径 100mm)に比べ、水流が羽根板間にほどよく注入されるため、負荷抵抗が 80Ω 以下の場合でも発電電力の低下が少ない特徴を有する。

以下に示す同様な発電条件において、インナーロータ型での導水路の高さを 63~65 cm まで高さを微調整した発電電力への影響を図-15 に示す。この場合も同様に、地面からパイプ中心までの高さが 64 cm のとき、最大発電電力 138.1 W を記録し、総合効率は 23.9 % を示した。導水路出口の高さの微調整は図-15 から発電電力へ及ぼす影響が顕著であることが確認でき、水車への水流を供給するときの重要な要素であることが再認識できた。

流量 : 0.0248 m³/s

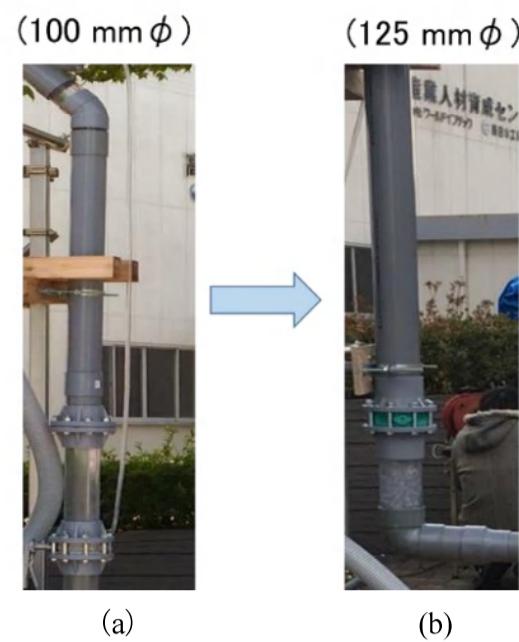
有効落差 : 2.38 m

理論発電出力: 578 W (パイプ直径100 mm)

インナーロータ型：最大138W, 総合効率 23.9 %

アウトロータ型: 最大 123W, 総合効率 21.3 %

次に、対策 3 の導水路パイプ直径の増大(100→125 mm)およびインナーロータ型ディスク発電機2 台を同軸中心上で連結した場合の発電特性について述べる。



(a) (b)

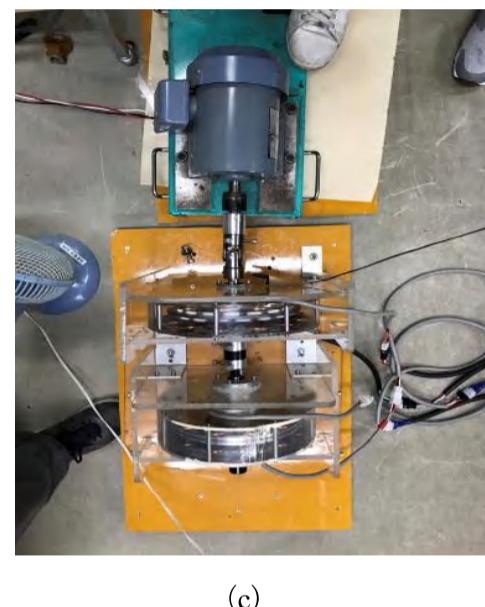


図-16 導水路パイプ径増加と発電機2台連結

導水路のパイプ径を 25 % 増加したサイフォン導水路の景観を図-16(b)に示す。ただし、出口先端は絞ると出口流速が増加するので直径 100 mm とした。変更後のパイプ出口の流速は 3.16 m/s から 4.01 m/s と 27 % 増加した。これに伴い、出口流量も 0.025 から 0.049 m³/s と 96 % 増加するので、発電電力の増加が期待できる。

インナーロータ型ディスク発電機は、薄型で汎用モータのようにマル型ではないので、複数台連結が容易にできる。発電機の中心軸に 2 台連結し、インバータ駆動したモータに直結した外観を図-16(c)に示す。

予備実験として、研究室にて発電特性を測定した結果を図-17 に示す。実験条件として、モータの回転数を 550 rpm 一定(発電実験とほぼ同等の回転数)で負荷特性を調べた。

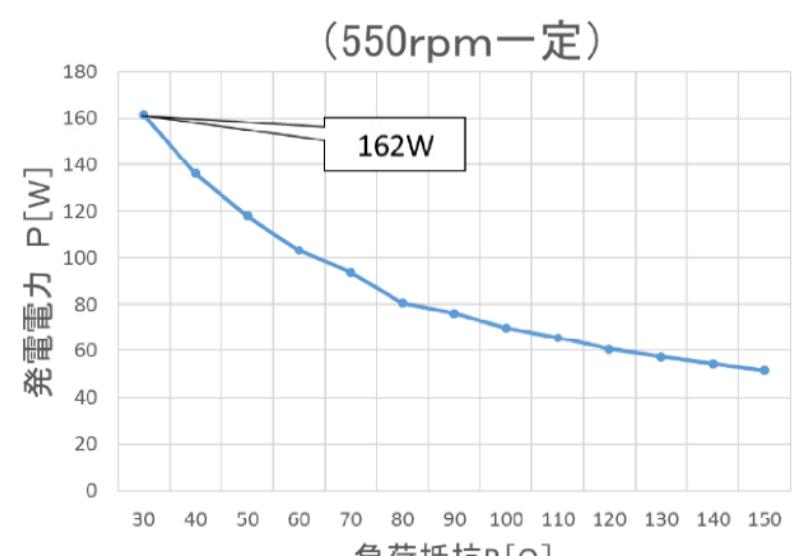
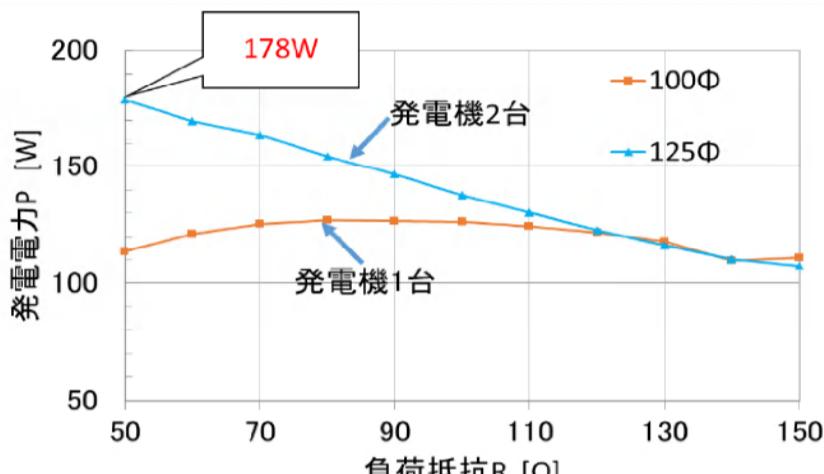


図-17 研究室での発電機2台連結した発電特性



(a)



(b)

図-18 発電機2台連結したときの発電実験の様子

次に、実際に発電実験場にて、発電機2台連結した場合の発電実験をはじめて試みた。そのときの実験の様子および発電特性を図-18(a),(b)にそれぞれ示す。発電機2台連結では、增速率8.6倍、パイプ直径125mmでアダプター絞り有、導水路高さ65cmに調整している。また、発電特性を発電機1台の場合と比較したのが、図-18(b)である。

2台を連結すると、最大発電電力178Wを記録した。発電機1台では、負荷抵抗が80Ω以下では、発電電力は次第に減少するが、発電機2台の連結では、同図(b)に示すよう80Ω以下でも直線的に増加することがわかる。このように、2台連結することで、負荷変化に対する発電電力の上昇および負荷耐性の向上が顕著であることが確認できた。

4. まとめ

サイフォン導水路による大学内小水力発電実験の結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 導水路出口に整流用のアダプターを装着することで、最大発電電力を30%程度増加させることができる。
- (2) 導水路パイプ直径の増大およびインナーロータ型ディスク発電機を2台連結することで、3軸の最大発電電力178W(有効落差2.38m)が得られた。
- (3) 小規模の小水力発電エネルギーであるが「地産自立エネルギー」としての有効性を検証できた。

今後、この小さなエネルギーが社会を変える大きな力になることを期待して、サイフォン式の小水力発電システムを適切な場所を選定して常時設置予定である。その後、短期・長期のフィールドテストを実施したいと考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり、地域連携でご支援いただいた福岡県築上町小原地区、農業組合長丸山義博氏、水利組合長出口忠雄氏並びに水利組合長補佐桑野智也氏に深く感謝申し上げます。また、小原地区と連携し水車発電実験に始終協力していただいた地域連携アドバイザー原正法氏、熱心に実験に取り組んだ高城研究室の卒研生の皆さんに心より御礼申し上げます。本研究は平成29年度の学長査定COC事業費の援助によることを付記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 特定非営利活動法人環境エネルギー政策研究所より抜粋
- 2) 日経産業新聞：1月17日, 2018
- 3) 福岡県：地域で取り組む再エネ・省エネセミナー, 2016
- 4) 末廣・高城・池森・野瀬：オルタネータを用いた水車発電システムの基礎研究, 日本機械学会講演論文集, pp. 53, 2011.
- 5) 椎野・高城・池森・野瀬：岩岳川上流域での公開水車発電実験, 日本機械学会講演論文集, pp. 7, 2014.
- 6) 茂上・高城・野中・池森・野瀬：地域を志向した小水力発電技術者育成プログラム, 日本機械学会講演論文集, pp. 7, 2015.
- 7) 椎野・高城・野中・池森・野瀬：地域と連携した小水力発電の実験的検討, 日本機械学会講演論文集, pp. 5, 2015.
- 8) 茂上・吉武・高城・野中：地域と連携したサイフォン式小規模水力発電実験, 日本機械学会講演論文集, pp. 47, 2016.
- 9) Matsson : An Introduction to SolidWorks Flow Simulation 2014 SDCPublications 2014.
- 10) 茂上・高城・野中：地域と連携したサイフォン式小規模発電実験, 西日本工業大学紀要, pp.14(2017)

(2018. 3. 31受付)

ここでは、COC事業の一環として、小型実験用水車を用いたサイフォン式小水力発電設備を大学内で構築し、学内での発電実験を通して、「地産自立エネルギー」として利用する実用的な発電装置の発電電力向上策について報告した。サイフォン導水路式小水力発電のメリットは、パイプ導水路（水路長、勾配、有効落差等）を発電場所に合わせて自由に設計可能な点にある。発電装置を水路や流水中に設置する必要がないので、河川等の増水時も装置が流されるリスクが大幅に減少する。発電電力は1台の装置で3軸の100W以上を目指している。