

## 可搬可能な FRP 製水車発電システム

水本 巖 (富山高等専門学校 電子情報工学科, mizumoto@nc-toyama.ac.jp)  
 小熊 博 (富山高等専門学校 電子情報工学科, oguma@nc-toyama.ac.jp)  
 山本 桂一郎 (富山高等専門学校 専攻科, keichiro@nc-toyama.ac.jp)  
 早川 幸弘 (富山高等専門学校 技術室, hayakawa@nc-toyama.ac.jp)  
 飯田 祐也 (富山高等専門学校 技術室, iida@nc-toyama.ac.jp)  
 運上 和也 (富山高等専門学校 技術室, unjou@nc-toyama.ac.jp)  
 高田 賢治 (株式会社ハウステック SPA 事業部, ken-takata@housetec.co.jp)  
 鈴木 弥志雄 (株式会社ハウステック SPA 事業部, yashio-suzuki@housetec.co.jp)

### Portable FRP water turbine generator system for pico hydro

Iwao Mizumoto (Department of Computer Engineering, Toyama National College of Technology, Japan)  
 Hiroshi Oguma (Department of Computer Engineering, Toyama National College of Technology, Japan)  
 Keiichiro Yamamoto (Advanced course, Toyama National College of Technology, Japan)  
 Yukihiro Hayakawa (Technical Office, Toyama National College of Technology, Japan)  
 Yuuya Iida (Technical Office, Toyama National College of Technology, Japan)  
 Kazuya Unjou (Technical Office, Toyama National College of Technology, Japan)  
 Kenji Takada (SPA Department, Housetec Co., Japan)  
 Yoshio Suzuki (SPA Department, Housetec Co., Japan)

#### 要約

クレーンなどの重機を使わずに、また、河川工事無しで設置・除去できる可搬型FRP製水車発電システムを構築した。農業用水路での使用を想定し、流量が十分に得られない地域での運用に対する発電機の発電電力見積もりおよび最適負荷についての知見を得る実験を行った。その結果、流量と回転数の関係および発電機のトルク特性と発電電力から、流量に対する発電電力と最適負荷を見積もることができた。発電した電力を実際に夜間照明として使用し、地元住民の防犯、交通事故防止に役立った。

#### キーワード

可搬型, FRP 製水車, 農業用水路, ピコ発電, 鉛蓄電池充電

#### 1. はじめに

東日本大震災や福島原発事故以来、原子力発電に代わり、太陽光発電や風力発電などの再生可能なエネルギーが注目されている(平田他, 2013; 安田, 2013; 近藤, 2013)。これらのエネルギー源の一つとして、日本は水資源が豊富であり、ダムによる水力発電や河川を利用した水車発電は昔から盛んに行われている。一方、農業用水路(幅75 cm、深さ60 cm以内)のように比較的流量の少ない利用は未開拓地である。これらは、災害非常時の発電、農業支援、町おこしイベント等に活用できるため、有意義なものと推察される。

タイ・東南アジア諸国やネパール、パキスタン等の海外では、必ずしも流量には恵まれていないため、従来型の水力発電での運用では困難である。そのため、重機を使わなくても設置でき、また洪水時には簡単に撤去できるFRP製水車発電システムの開発を行った。kW級の発電システムは、従来の発電データを転用できるが、数10W級発電システムの資料は殆ど見当たらない(全国土地改良事業団体連合会, 2013)。また、小水力では発電機を定格で回せるほど水量が無く、水車の回転数が高くないため、発電機本来のスペックでは使えない場合も想定される。FRP製水車は低流量でも回転を得ることができるが、鉄製と比べて軽量であるため負荷変動に弱く、過負荷では水車の回転が止まり水を堰き止めること

もある。そのため負荷の最適化が難しく、流量変化に対してシステムの安定が難しい。そのためバッテリーの充電率や使用する負荷の種類によっては、安定した発電電力が得られない。そこで農業用水路において、数10Wで安定した発電量を得るため、あらためて発電システムの特性パラメータを取得検討した。

#### 2. 可搬型 FRP 製水車発電システム

##### 2.1 発電システム概要

製作した可搬型発電システムのシステム概要を図1に示す。FRP製水車タービンから得られた回転力を増速機で増速し発

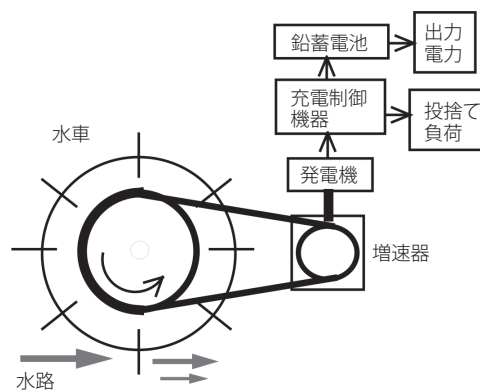


図1：可搬型水車発電システムの概要

電機を廻す。発電した電力は過充電および過放電防止機能を備えた充電制御機器を介して、鉛蓄電池に蓄電する。鉛蓄電池の過放電時には出力負荷への接続を断ち、過充電時には発生している電力を投げ捨て負荷（抵抗）に流す。蓄積された電力はインバーターを通してAC100Vに変換して使用する。

## 2.2 FRP製水車の形状

本研究で用いたFRP製水車の外観を図2に示す。FRP製一体型加工水車は(株)ハウステックが製作した。農業用水路での使用を前提としたため、直径1.2 m、パドル18枚、パドル幅を0.5 mにし、円盤とパドルを一体成形とすることで製造工程の簡略化を図った。それにより製造・保守においてコストの削減を目指した。

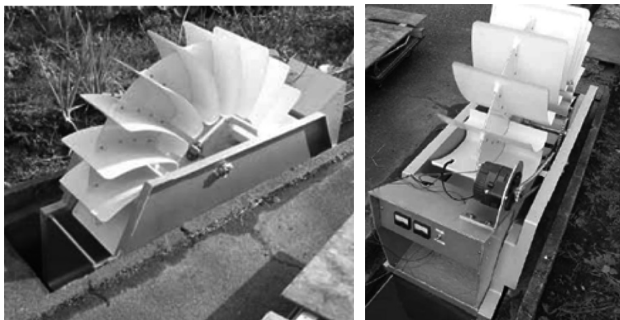


図2：FRP製水車の外観

## 3. 流量から発電電力を算出するための基礎特性試験

流量から出力電力を算出するために充電制御機器を外した水車発電システムの実験ブロック図を図3に示す。流量から得られる回転エネルギーを、増速機を通した後のトルク $T$ と回転数 $\omega$ を使って換算する。次に、バッテリーの充電率や接続する負荷によってトルクと回転数は影響を受けるので、 $T$ （流量から発電機を回すトルク）から $T'$ （負荷によって減衰するトルク）を差し引くことで、発電機に繋いだ際の有効トルクと回転数が求まる。最後に、各発電機の実験表より、流量からトルクと回転数を割り出し、発電電力を算出する。

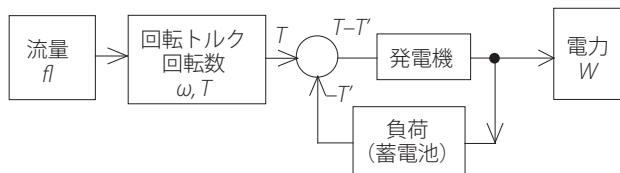


図3：水車発電システムのブロック図

### 3.1 流量からトルク $T$ の回転数 $\omega$ の算出

流量を可変できる水槽実験装置にて、流量からトルクと回転数を求めるために予備実験を行った。水車に接続したスプロケットを介して増速機に繋ぎ、増速機にトルク計をカップリングにより接続して実験を行った。なお発電機は農業用水路でも使用可能なように、最大発電出力200 W以下の小形発電機を想定した。FRP製水車はφ1200 mm、チェーンとス

プロケットを使用して9.2倍増速した。途中で10倍の増速機（TSUBAKI GRTA020-18L10）を用いた。そのため回転数は10×9.2倍の92倍になっている。トルク計はONOSOKKI（SSシリーズ）を用いた。実験では水位を変化させ水路幅（0.5 mで一定）で流速を測定し流量を求めた。その時の流量の変化から、水車回転数および水車トルクを測定した。また、増速機を繋いだ際にかかるトルクは、トルク計を用いて測定し、水車回転数からそれぞれ計92倍とした。発電機の軸心にかかる出力トルクは機械損を含め、以下の計算式で求めた。

$$\text{軸心回転トルク} = \frac{\text{水車回転トルク} - \text{増速機回転トルク}}{(\text{増速回転数}) / (\text{水車回転数})} \quad (1)$$

増速機単体を回す際に必要な回転トルクは、回転数に応じて変化する。そのトルクを求めるため、流量によって発電機の軸心にかかる出力トルクを算出した。

### 3.2 流量の変化と回転トルクおよび回転数

上記で述べたチェーン・スプロケットと、増速機のみを用いて（合計92倍増速）発電機等の負荷を繋がずに実験を行った。流量の変化から、発電機の軸心にかかる出力トルク（図4）と回転数の関係を求めた（図5）。

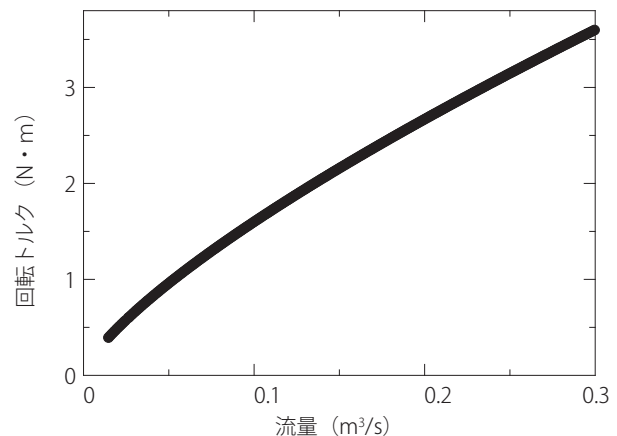


図4：流量と出力トルクの推移

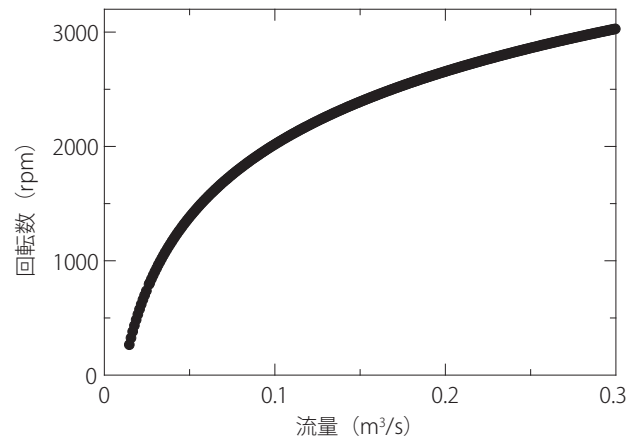


図5：流量と回転数の推移

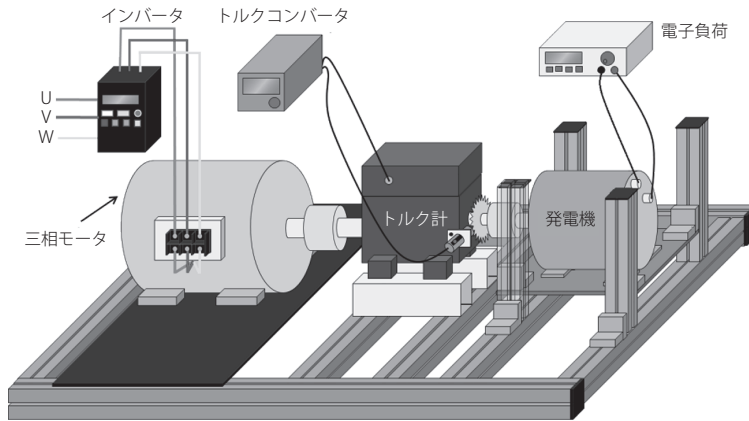


図6：模擬水車実験装置のブロック図

なお増速機を用いて回転数を上げた後、実際に発電機を繋いだ場合軸心にかかるトルクは、当初の増速機単体のみに掛かるトルクの約50%に減衰して伝達する。すなわち発電に寄与する有効トルクは半減する。

### 3.3 発電機の実験測定

発電機の回転数および軸心トルクと発電電力の関係を評価するため、水車の代わりに三相モータを回転動力源として用いた。トルク計を回転動力と発電機の間につなぎ、電子負荷を可変にして模擬水車実験を行った。実験装置のブロック図を図6に示す。

水車動力の代替として三相交流モータ (TOSHIBA, FB-KA21-4P-1.5kW)、トルク計はONOSOKKI (SSシリーズ)、発電機は渡辺精密製 (三相同期発電機PMS045-M)、電子負荷装置 (ARRAY 3711A)を用いた。発電機、トルク計、モータの回転軸をカップリングにより接続し、モータの回転力を発電機に伝達した。また、動力源のモータの駆動には回転数を制御するためにインバータ制御を用いた。発電した電力を鉛蓄電池に充電し、充電率によって負荷変動することを想定して、電子負荷装置を使用した。電子負荷装置は定抵抗モードでを使用した。定抵抗モードで動作させた場合、負荷抵抗の値が大きいと発電機から流れる電流が少ないので、回転負荷としては軽くなる。一方、定抵抗モードの負荷抵抗が小さいと流れる電流が大きくなるので、回転負荷としては重くなる。発電

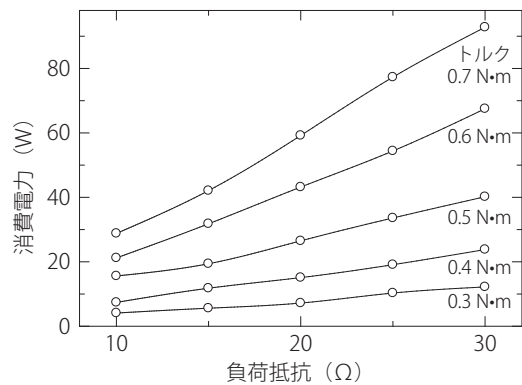


図8：負荷抵抗と消費電力の関係

機 (PMS045-M) の負荷抵抗と回転数の実験結果を図7に、負荷抵抗と定抵抗モードの電子負荷による消費電力の関係を図8にそれぞれ示す。

この二つのグラフを組み合わせ、トルクと回転数の関係を図9に示す。このグラフから、回転数と回転に必要なトルク、その時の発電電力の関係が明らかになった。

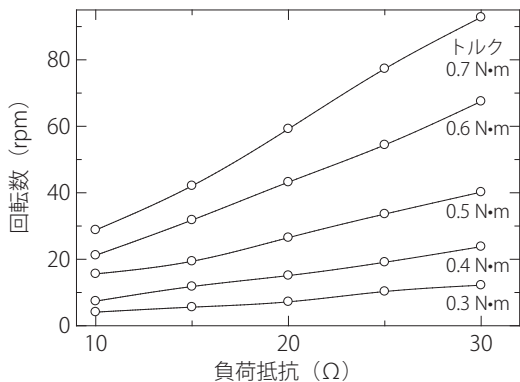


図7：負荷抵抗と回転数の関係

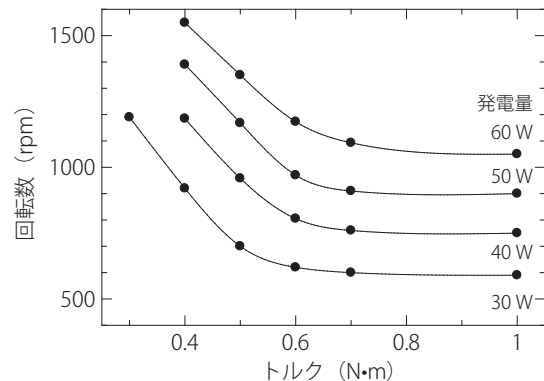


図9：発電機の実験特性図 (渡辺精密製 (PMS045-M))

## 4. 実地試験

富山市富山空港近くの農業用水路で、農閑期初冬の小雨もしくははみぞれが降る時期、比較的水量が豊富な時に実地試験

を行った。使用した装置は、FRP製水車:φ1200、チェーン9.2倍増速と増速機10倍増速(TSUBAKI GRTA020-18L10)、発電機:渡辺精密製発電機(三相同期発電機(PMS045-M))で、負荷としてLED電灯3灯(13W×3灯=39W相当)を用いた。

#### 4.1 実地試験結果

発電電力の時間推移を図10に示す。流速は、0.86 (m/s)、水位は0.35 m、水路幅は0.5 mで、流量は0.15 m<sup>3</sup>/sにおいて、出力電力約40 Wを得た。図10より約40 Wの出力電力で安定していることが分かる。また、LED電灯の公称消費電力が13 Wで、この電灯が3灯が点灯していたことから、約40 W相当の電力が出力されていることが分かった。

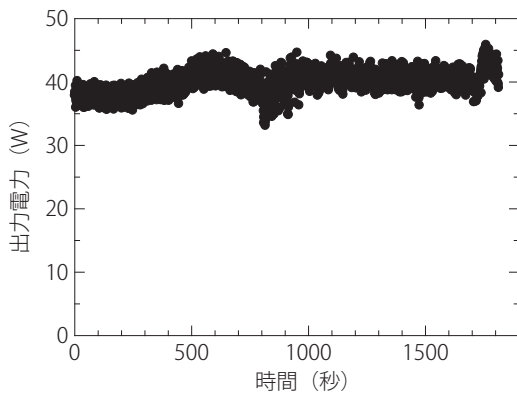


図10：発電電力の時間推移

#### 4.2 発電電力の見積もり

図4および図5で流量(0.15 m<sup>3</sup>/s)から、トルクと回転数がそれぞれ求まる。トルクは1.28 N・mで発電機の軸心にかかるトルクは、増速機を通した後は約50%の出力トルクに減衰することから、トルクはその半分の0.64 N・mとなる。その時の回転数は図4より約852 rpmであり、これらのデータを発電機特性表(図9)で換算すると、トルク0.64 N・m、回転数852 rpmから約40 Wという結果になり、基礎実験から求めた予測発電電力とほぼ同じ値になる(図11)。

また実地試験の発電電力が40 Wだったことから、この発電機特性表とほぼ一致していることが分かる。次に実際に

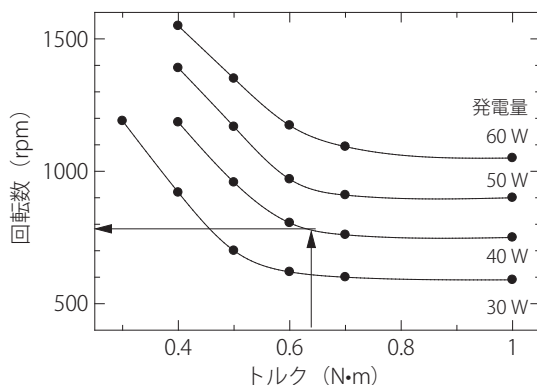


図11：発電機特性表(PMS045-M)



図12：水車発電による防犯灯点灯の様子

防犯等を点灯させた写真を示す(図12)。発電電力と照明負荷消費電力がほぼ同じだったので、直接発電による点灯で電力は賅えたが、昼間に鉛蓄電池に電力備蓄をすることで、更に大きな負荷の利用も可能であると考えられる。

なお、発電している際の映像や随時発電電力は、中距離インテリジェンス環境情報取得システムおよびインターネット経由で遠隔からも観測可能なシステムになっている。そのため実際には、農作物の育成状況、気候観測などの環境計測用電源および情報伝送システムとしての活用が可能である。

### 5. 最適な電力負荷の見積もり

発電機特性試験と実地試験の比較等により、流量から発電電力の予測が可能となった。これより、満充電に至る前の鉛蓄電池接続後において、発電電力が最大効率となるように最適負荷を求める。

#### 5.1 接続する鉛蓄電池の相当負荷

発電機から得られる電力を鉛蓄電池に充電しDC・ACコンバータで商用電源AC100 Vに変換して用いる。FRP製水車は全体の重量が軽いことが特長であるが、水車タービンの回転慣性が小さく、負荷変動の影響を受け易い。一方で、FRP製水車で発電した電力をDC/DCコンバータを介して鉛蓄電池に繋いだ場合、充電率に伴い負荷が変化する。そのため充電率によってN<sub>1</sub>～N<sub>4</sub>で等価負荷を仮定した。

表1：鉛蓄電池の等価負荷

等価負荷条件	鉛蓄電池の充電率	負荷抵抗
N <sub>1</sub>	0～40%	10 Ω
N <sub>2</sub>	40～70%	15 Ω
N <sub>3</sub>	70～90%	20 Ω
N <sub>4</sub>	90～100%	30 Ω

#### 5.2 最適負荷

充電率が高ければ、発電機にとっては負荷が小さくなる場合について検討する。実地試験において、負荷抵抗値を変え

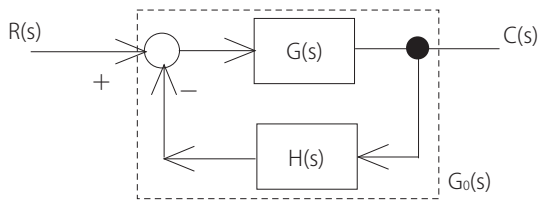


図13：水車発電システムの伝達関数

た時の消費電力の変化を測定した。図3のシステムブロック図を、制御系の伝達関数に置き換えると以下のような伝達関数になる(図13)。

一般的にこのフィードバック閉ループの伝達関数は、(2)式で与えられる。

$$G_0(s) = \frac{k}{(s+a)(s+b)} \quad (2)$$

この式で与えられるステップ応答は、一定の値でピークを持つ応答関数になることが知られている。水流をステップ応答と考えて、各負荷抵抗値による発電電力を求める実験を行った。なお本実地試験を行った時期は、秋口に掛けての農閑期であり水量があまり多くない時期に行ったため最大発電

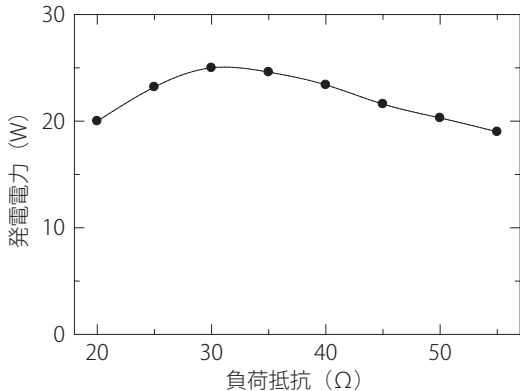


図14：負荷抵抗値と発電電力の推移

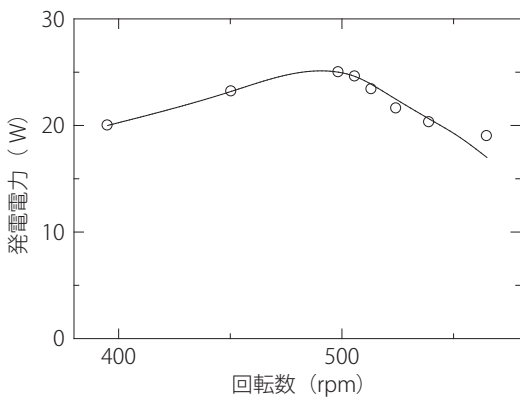


図15：回転数変化による発電電力の推移

電力が25 Wであった。電子負荷を用いて負荷変化による発電出力を実験的に求めた結果を図14、回転数と発電電力の関係を図15に示す。

一定流量から得られる発電電力は、無負荷の場合は一定である。定抵抗モードで運用している電子負荷の抵抗値を上げると、すなわち負荷を少なくすると発電機の出力端電圧は上がり、負荷に流れる電流値は下がる。その結果発電機の逆起電力が下がり回転数は上がる。逆に負荷抵抗値が小さ過ぎると負荷に電流が多く流れ、水車の回転に対してブレーキがかかるため、水車の回転が遅くなる。図14より消費電力が最大となるような最適な負荷抵抗の値は30 Ωであった。図15のグラフにおいても、負荷抵抗値を上げる(負荷を少なくする)と、回転数は上がり続けるが負荷に流れる電流も少ないので、発電電力としては下がっていくことが分かる。最大出力電力が25 Wの時、30 Ωが最適負荷であることがわかる。これより、今回の流量(0.059 m³/s)においては、出力負荷として抵抗30 Ωで電力が25 Wより、498 rpm(その時のトルクは、0.69 N・m)が最適な回転数と考えられる。

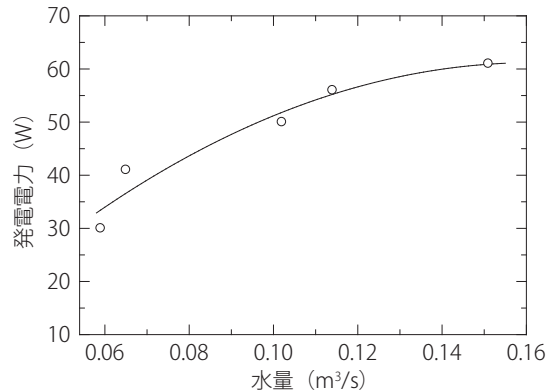


図16：流量と発電電力(渡邊精密製PMS045-M)

これを鉛蓄電池の充電率から考えると、2.3節において仮定したように鉛蓄電池の充電率が90～100%の状態の場合、鉛蓄電池の見かけ上の抵抗は30 Ωであるので、発電機からは最大25 Wの電力が得られることになる。実際に鉛蓄電池に充電し使用すると仮定するならば、70%放電の場合は20 Ωであるので、図13より約20 Wの電力が得られると考えられる。

以上、流量と発電電力との関係を図16に示す。図中○は実際に実験で得た値である。0.16 m³/s以上に水量が増えても、水車上部もしくは脇から水が溢れ出て回転力には寄与しない光景が見受けられたので、水車径1.2 mの発電システムは最大約60 W前後が発電電力の上限と考えられる。

## 6. まとめと考察

数10 Wの安定した電力を得るために、発電能力の最適負荷特性予測の検討を行った。流量変化による電力予測、および発電機の特性を得るため、水槽実験室にてFRP製水車を使用した2つの条件下で実験を行った。また、水車の回転力の代わりに三相モータを用い模擬水車を駆動することで各発電機の特性格果を得た。流量を変化させた時の発電機を繋いだ

---

際の軸心にかかるトルクと回転数の関係を実験的に見出し、そのトルクと回転数を用いて、発電機の特長表より発電電力を算出した。次に実地試験において、実際に水車を設置した時に得られる最大電力を測定した。流量から得られる発電電力を予測するため、特性試験による換算グラフと実地試験の結果を用いて、電力比較を行った。比較した結果、換算グラフと実地での電力値が一致したことより、流量から発電電力を見積もれるようになった。

次に、バッテリー接続後の最適な負荷電力の見積もりを行うため、実地試験による出力負荷に電子負荷を用いて、負荷抵抗値を変えた時の消費電力の変化を測定した。適切な負荷の場合、発電電力は最大にすることができる。

#### 謝辞

水車設置にあたり本校技術室 空浩技術長、坂口克彦技術職員、機器製作には、島政司技術職員、鉛蓄電池の特性試験では本校臨海実習場 金田泰三技術専門職員、発電機の特長測定においては本校専攻科海事システム工学専攻 阿部秀也君、制御情報システム工学専攻 柳田郁馬君、牧啓士郎君にお世話になりました。ここに深謝致します。また本研究成果の一部はJSPS 科研費 24651182 の助成を活用したものです。

#### 引用文献

- 平田祥人・加藤政一・合原一幸 (2013). 再生可能エネルギー出力の時系列予測とそれを利用した制御・最適化技術の要請. 電気学会研究会資料, MES 2013 (1-6・8・9・11-25), 129-132.
- 近藤潤次 (2013). 系統内で集合化した風力発電のkW価値の評価. 電気学会研究会資料, MES 2013 (1-6・8・9・11-25), 51-56.
- 安田陽・近藤潤次 (2013). 再生可能エネルギー大量導入のための日本の系統柔軟性評価. 電気学会研究会資料, MES 2013 (1-6・8・9・11-25), 79-84.
- 全国土地改良事業団体連合会 (2013). 水土里ネット情報「とやま水土里フォーラム・農業用水小水力発電推進全国大会」を開催—土地改良施設の維持管理活動と小水力発電の推進をPR—. 全国水土里ネット情報, No. 835, 13-19.

(受稿：2014年2月3日 受理：2014年4月12日)