

第 3 章 動力源

マイクロ水車の開発

クラスター型小型風車の開発

マイクロ水車の開発

—小水路に適した水車の開発—

Development of a micro waterwheel

- Development of a waterwheel for small waterway -

株式会社中川水力 穴戸 俊一 ・ 杉内 隆一郎

京都議定書の批准に伴い、エネルギー発電分野において地球温暖化ガス排出量の一層の削減が必要となっている。しかし、日本のエネルギーに対する水力利用の割合は極めて少ないのが現状である。環境負荷を低減する事からも新しい発電システムの開発が必要である。

この新エネルギー発電システムは、送電線がない地域、山間部や過疎地域での町興しへの利用、農地での利用、公園や山小屋の電源、住宅の補助電源等としての利用を目指すものである。その中でクリーンエネルギーとして水力発電で、設置が安易で安価な小型水車を開発する。

1. 緒言

昔から、水はエネルギーを機械的エネルギーに変換し、利用されてきた。水のエネルギーは莫大なエネルギーを有しており、且つクリーンな自然エネルギーである。その有効利用を図ることは、環境・エネルギー



図1 水車イメージ図

問題を考える上で特に重要である。
20世紀中頃より、水力発電は大型化、大容量化の全盛期を迎え、火力発電所、原子力発電所の建設に伴い、火主水従の時代でもあった。
水車は自然のエネルギーを活用することにより、今日まで発展してきているが、その反面、経済的に利用しうる開発地点は先進国では少なくなっている。国土の狭い我が国においては特にその傾向が強く、人工的に開発地点を選定できるポンプ水車を除き、水車産業は中小水力の活用が大きく様変わりしてきている。

マイクロ水車は、落差や流量等の要素から、安易に設置することが難しく、普及が遅れている。

これまでの様に、効率だけに着目した水車選定では今までの水車と変わりなく、数kW～数十kWの水車を普及させることは難しい。

そこで、羽根車（ランナ）に水を流入させ、水の位置エネルギーと水の運動エネルギーを効率よく動力に変換させる下掛け、胸掛けに着目した。さらに、流れが2次元であるため、羽根に作用する速度三角形は一義的に決まるため、1種類の高効率なモデルで羽根形状は変えずにランナー幅を変えることにより流量が選定できるメリットがある。

そのことにより、市販化した場合には流量ごとのラインナップ化が可能であり、コスト面で有利となる。

2. 開発プロジェクトの内容

2. 1. 開発プロジェクトを実施する背景

日本における、エネルギーに対する水力利用の割合は極めて少ないのが現状である。

しかし、近年水力発電、とりわけ小水力発電が注目されている。代表的な型式としては、チューブラ水車、クロスフロー水車等が挙げられる。但し、これらは低落差であっても2m以上必要とし、本研究の開始時点では、それ以下はほとんど見られなかった。

水車の歴史は古く、3000年もの歴史を持っているが、19世紀初めより各種形式の水車が開発された。

その代表的な水車は、

高落差用に ベルトン水車、

高・中落差用に フランシス水車、

低落差用に カプラン、プロペラ水車が使用されている。

中・小容量水車として、

クロスフロー水車；ターゴインパルス水車

マイクロ水車として、

標準型チューブラ水車、

開放型水車（上掛け、下掛け）がある。

従来、水車は「衝動水車」と「反動水車」の2種類とされているが、戦後の復興期に発行された文献には、「重力水車」も見られた。「重力水車」は昔、日本の全土で製粉や製材等の動力として使用されていた水車であるが、近年、超低落差領域のマイクロ水力の水車として復活した。

2. 2. 開発プロジェクトの目的

水車は河川に設けるため、導水路、発電所、送電路の建設費用が高く、マイクロ発電設備のネックとなっている。そこで、新エネルギーの更なる普及を進めるため、身近にありながらも動力源としての価値が見出されていない地点でも発電が可能な水車を開発する。

3. 問題点とネックとなる技術

3. 1. 經濟性

水力発電はダム、導水路等の初期建設費が多いため、経済性に難点がある。特に、50kW以下のマイクロ水車設備は、初期建設費の回収に懸念がある。

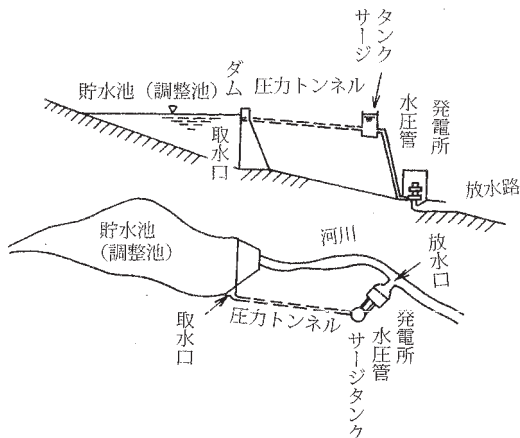


図2 ダム式発電所の例

図2の様にダム式発電所においては、導水路、水圧鉄管、放水路、発電所建屋等の土木工事が多い。そこで、これらの初期建設が必要ない地点において発電を行う水車を研究する。

3. 2. 低発電量

未開発地点は、落差が低く、流量も少ない地点である。そのため、水のエネルギーも当然少なく、動力源としても小さい。ただし、これは山間部の過疎地帯における農業への動力、暖房、公園の照明等の独立電源としての需要であれば充分である。

さらに、照明等に使用する負荷装置も、省エネルギーとして今日注目されているLEDと組み合わせれば、機能は十分期待できる。

3. 3. 発電量の変化

河川水量には変動があり、特に太平洋側では大きな流量変化がある。水車は、流量が変化すると回転数、トルクも変化する。負荷が大きすぎると回転が遅くなり、さらに負荷を大きくしていけば、水車は止まってしまう。逆に、負荷が小さいと回転は速くなる。よって、水車と発電機の効率が高いところで簡易に流量変化に追従できるシステムが必要となる。

3. 4. 弊社マイクロ水車について

発電設備の経済性について、ネックとなる事項の一つに導水路等の土木工事費用が挙げられる。それを抑えるために、弊社マイクロ水車は落差工を利用する。

日本の農業用水路の総延長は、水路で約 2 8 0 0 0 km 以上と言われている。その中に、低落差ではあるが、落差工がある。その落差工を利用し、図 3 に示す導水路が不要なマイクロ水車システムを開発した。

本システムは、マイクロ水車ではあるものの、系統

連携するための設備や高効率運転をするための装置等、
 負荷価値の高い仕様となっている。経済性に優れた地
 点では、電力会社線への連携により、売電による発電
 量の増加、CO₂の低減による温暖化防止への貢献が期
 待できるが、落差は最低 2m 以上必要である。

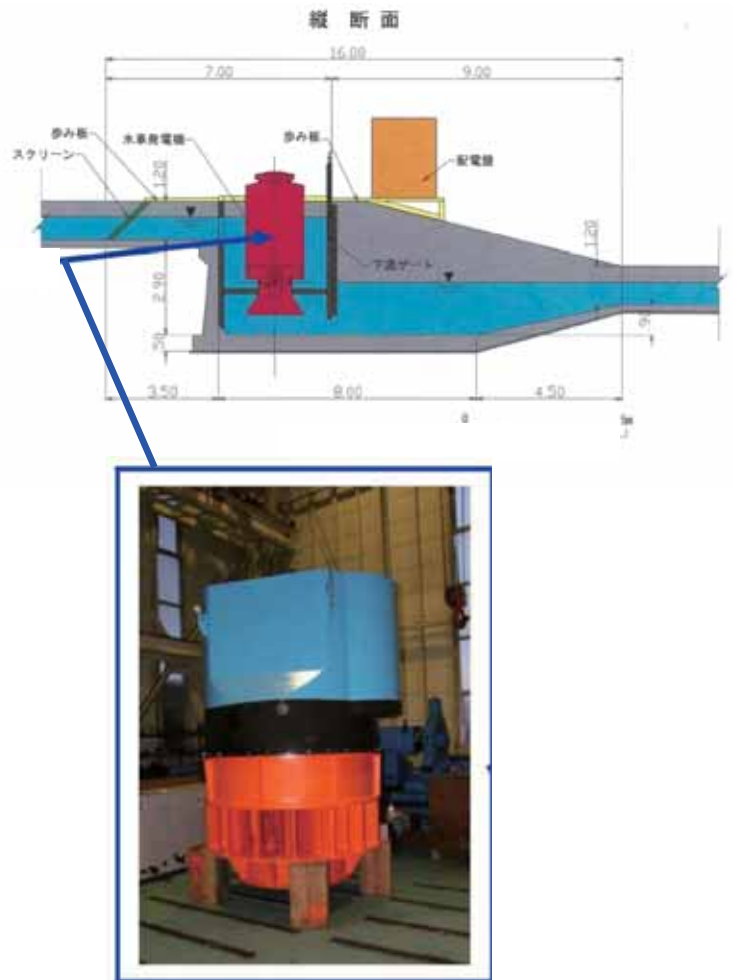


図3 マイクロ水車システム

4. 水車選定

4. 1. 水車の種類

第2項で述べた様に、これまで各種形式の水車が開発されてきた。本実験において、目的に合った水車形式はどれか、調査を行った。水車を廻す事で、水のエネルギーをどの様な力で動力エネルギーに変換するかによって分類した。

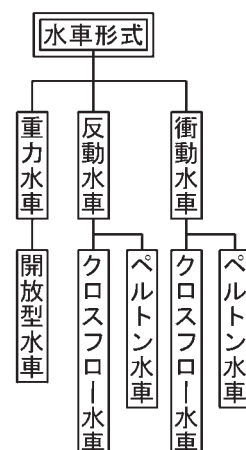


図4 水車の種類

4. 1. 1. 衝動水車

「衝動水車」とは、例えば消防のホースから勢い良く出た水の力で廻る様な水車のことである。つまり、水車が空中で廻っているものである。代表的なものは、ペルトン水車で、他にターゴインパルス水車やクロスフロー水車がある。

4. 1. 2. 反動水車

「反動水車」とは、水の力で水車の羽根を押して廻す水車である。水車は、水の中に浸かって廻る。ちょうど船のスクリューが水の中で廻っているのと同じ様なものである。代表的なものは、フランス水車、プロペラ水車（カプラン水車）である。反動水車の特徴として挙げられるのは、「吸出し管高さ」を利用できるという点である。「吸出し管」とは、水車から放水口までの放水管で、水を吸い出し、下から引っ張る形となる。

4. 1. 3. 重力水車

「重力水車」とは、水の重みで廻る水車である。代表的な水車としては、下掛け水車、上掛け水車等がある。水車の羽根にそっと水を乗せる、そして水の重さで水車を廻す、これが重力水車である。

4. 2. 開放型水車の種類について

開放型水車には、導水路等の初期建設費の低減を図ることができるというメリットがある。また、水車構造が簡単で部品点数が少ないため、製作コストを抑えることが可能である。さらに、流れが二次元であるため、羽根に作用する速度三角形は一義的に決まるため、1種類のモデルが広く適用できる。そして、水が発電をしている様子が直に見えるため、環境意識が高められる。前項の通り、文献によっては、動力水車は水の重みで廻る水車となっている。本研究において、開放型水車を以下の様に定義した。

4. 2. 1. 下掛け水車

羽根車の外周に水流を当て、水の流速によって動力にする。主に羽根の下側に水を当てる。又は、落差を利用し、羽根にかかる水の重さで水車を廻す。

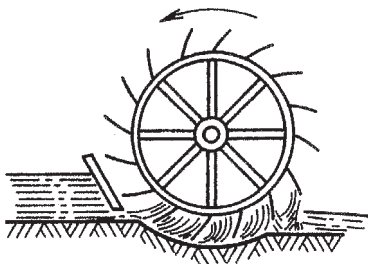


図5 下掛け式

4. 2. 2. 上掛け水車

羽根車に水受けを設け、水の重量によって動力にする。主に羽根の上部に水を当てる。

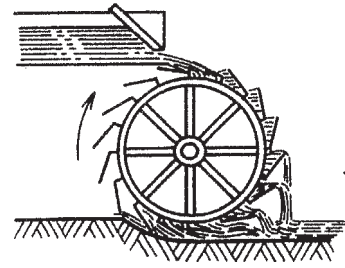


図6 上掛け式

4. 2. 3 胸掛け水車

水車の羽根車の中心付近の水車軸よりも高い位置に流入させ、水の重量と速度エネルギーを利用し動力にする。

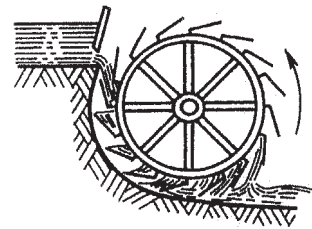


図7 胸掛け式

4. 2. 4. 水エネルギーについて

それぞれの水車により、水のエネルギーを動力に変換している。一般に、水車の水のエネルギー変化は次の式で表される。

$$H = H_z + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$$

① H_z ：水車本体の入口、出口の垂直高さ（m）
（有効落差）

② V_1, V_2 ：流入、流出の速度（m/s）

③ P_1, P_2 ：流入、流出圧力（Pa）

④ ρ ：水の密度

初項が位置エネルギー、第2項が速度エネルギー、第3項が圧力エネルギーである。

このことから、下掛け水車は流入、流出の速度を利用した水車で、衝動水車であると言える。また、落差を利用したものは重量水車となる。上掛け水車は位置エネルギーを利用した水車で、重量水車と言える。胸掛け水車は、衝動と重量を掛け合わせたものと言える。

4. 3. 開発する水車の選定

これまでの通り、水車には様々な特徴がある事がわかった。

本研究における選定のポイントとしては、導水路等初期建設の低減、水車構造の簡略化、水車ランナの高効率と、流量変動による可動範囲の広域化等が挙げられる。

これらのことから、下掛け水車に着目し自社内外の取り組みについて調査を行った。結果、木製水車でモニユメント的な水車はあるものの、発電を目的としたものは数例しか無く、国内メーカーでは製作していない

ことがわかった。そこで、水車ランナを鋼板 (SUS 板) で製作し、流水抵抗の低減を図り、また、製作精度の大幅な向上も目指す事とした。よって、本研究において、目的に合った下掛け水車を選定した。

5. 開放型下掛け水車

5. 1. 開放型下掛け水車について

これは、1～2 m程度の超低落差という領域の水車である。一般的に、この水車は「無落差」で発電できると思われているが、実用機は全て落差を必要としている。通常、この水車は水路の中に置かれるが、発電効率を高めるため、水路の幅は水車ブレード幅とほぼ同じで、隙間はほとんど無い状態となっている。

落差とは、水車の上流と下流の水位差である。水車の直径は、だいたい2～6 m程度と非常に大きく、ブレードの幅は設計流量に比例して大きくなる。

水車の回転速度は非常に遅く、毎分数回転である。このため、発電機への動力伝達には、変速比が大きく取れるギヤなどが使用されている。

下掛け水車の羽根形状については、木製で角度を付けた板が取り付けられており、水の位置エネルギーを有効に使用するため、水重量と流速を受ける様に容器のようになっていいる。尚、文献等を調べてみると、下掛け水車で発電効率は、20～30%が多い事がわかった。

下掛け水車は、クロスフロー水車等と同様にランナーの入口面積が流路部開き角 δ とランナ幅 B_g の積であり2つの変化要素を持っている。

一般的にクロスフロー水車では、流路部開き角 δ を100°程度取り、胸掛け水車では70°～90°程度、下掛けでは50°程度に取るのが多い。

また、ランナー幅を変えることにより（羽根形状は変えず）流量を選定できる為、1種類の高効率なモデルが広く適用できるメリットがある。

また、流れが2次元である為羽根に作用する速度三角形は1義的に決まる。その為、ある一定の範囲において、羽根枚数にあまり関係無く決まる為、小さいランナには枚数を減らし、大きなランナには多くして羽根1枚に作用する応力を少なくすることが出来る。

6. 落差工を想定した試験装置の開発

6. 1. $\phi 600$ モデルランナ

実機製作の前に、試験様水槽、モデルランナを製作した。試験用水槽は農業用水路を想定し、落差を付けた。また、モデルランナは直径を $\phi 600$ とした。

初年度モデル仕様

- | | |
|--------|------------------|
| ①ランナ直径 | $\phi 600$ (mm) |
| ②ランナ幅 | 200 (mm) |
| ③羽根枚数 | 36 (枚) |
| ④落差 | 200 (mm) |
| ⑤流量 | 0～5 (ℓ/s) |



図8 $\phi 600$ モデルランナ

ランナ羽根形状は、文献等を参考にした流水形状とし、ランナ羽根両脇に側板を取り付けた。これによって、今後スケールアップするにあたり、強度上有利となる。

また、導水口に合わせたランナ幅に設計できる場合には開放してもよいが、整備されていない地点においては、ランナに入った水を最下部まで水重量トルクを動力に変換する事ができる。そのことにより効果も上がると考えられる。

また、試験用水槽は上部水槽と下部水槽を備え、下部水槽からラインポンプにて上部水槽に送る装置とした。ポンプ出口には流量調整弁を取り付け、流量を可変出来る様にした。

ポンプは、吐出量550 ℓ/min 、吐出口65 Aを使用した。

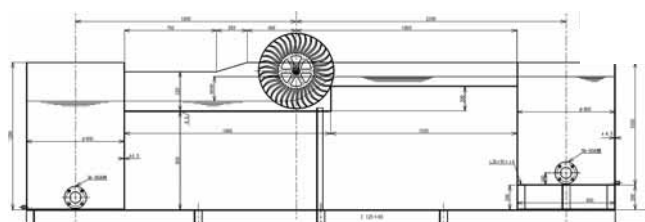


図9 試験用水槽

6. 2. 実験について

モデルランナの実験にあたり、負荷はヒステリシスブレーキを使用し、電圧を調整し、トルクを測定した。トルクメータについては、動力を伝達する軸のねじり角により、伝達トルクに正比例する物理的な量を検出する測定システムとした。試験は、各流量ごとに負荷を調整し、試験を行った。

その結果、発電効率は最高38%であった。これは、文献等にあった効率と同等であった。ただし、ある一定回転数以上になると、水飛沫や騒音が発生した。

7. 落差工の無い場所での実験装置の開発

本研究において、実証実験地の調査を行った。県内数カ所を調査する中で、落差工ではないものの、土木工事の必要性が無く、コンクリートの開水路となっている地点があることがわかった。そこで、落差工が無くとも、ゲートを付け、水位差（ゲートの上流と下流）

を落差としてエネルギーを回収できないか検討した。
実験装置は、落差がゲートによる水位差となるため、羽根内部が観察できるようにアクリル製とした。

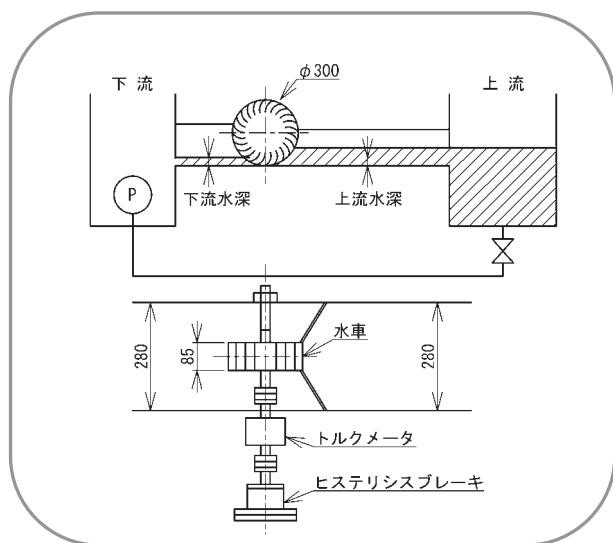


図10 装置概要

前回の実験同様に、流量を一定とし、回転数を合わせた時のトルクを測定した。流量一定時の水車効率の変化を図11に示した。最高効率率は共に20%程度であった。実験装置の水車とゲートとのクリアランスが大きく、漏水が多いため、予想より低い値であった。最高効率点は、流量が多いと回転数も高い位置にある。

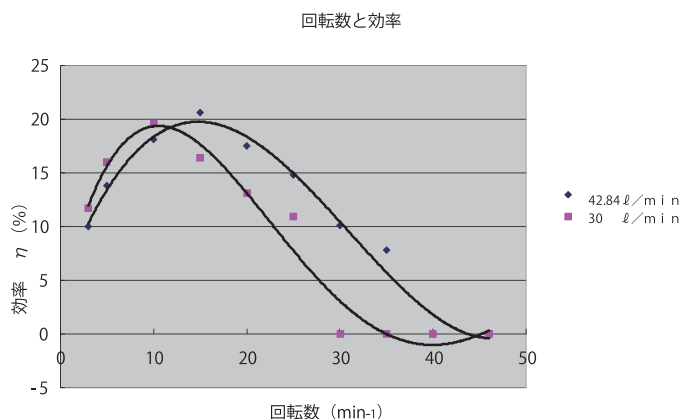


図11 流量一定時の水車効率

今回の実験では、モデルランナの直径が小さいため、ランナと流路とのクリアランスから漏れる流量と全流量との比率が高く、低流量時では測定不可能であった。その中で、30 l/min と 42.8 l/min について考察すると、流量に変化がある時、回転数を変化させれば、水車の最高効率点で使用できることがわかった。

8. φ2000 下掛け水車実験装置の開発

落差があるもの、無いものについて、水車単体での実験を行った。下掛け水車は流量が多くなる程、出力最高点は回転数の高い位置にある事がわかった。また、

流量が変化しても回転数を変速すれば、最高効率で運転できる事も明らかになった。

ただし実際に永久磁石式発電機を使用し運用すると、水車効率を最高効率にし、回転数を可変しても、一定回転数以外では効率変化が大きい。

そこで、発電機と組み合わせ、さらに実機に近い直径のランナで実験を行うことで、測定の信頼性を向上させる必要がある。そのため、φ2000 モデル実験装置を製作した。



図12 φ2000実験装置

モデルランナの直径はφ2000とした。水車幅は400 mmとした。発電機は、風力発電機用永久磁石式アウトロータ型とした。ポンプは最大流量 1100 l/min を使用した。各流量ごとの発電出力を図13に示す。

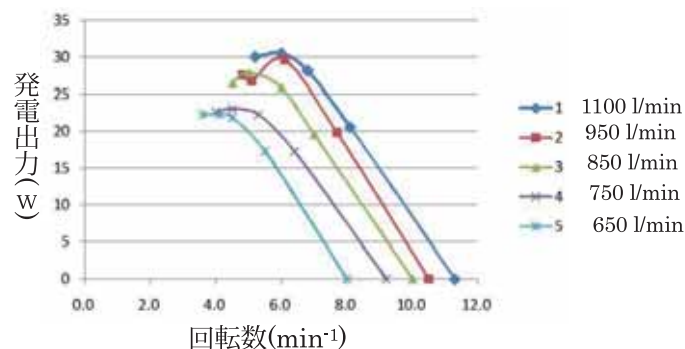


図13 各流量ごとの発電出力

発電出力には、発電機、水車、増速機等の効率全ての損失が含まれている。本実験システムでは、最大14Wの発電が可能であった。

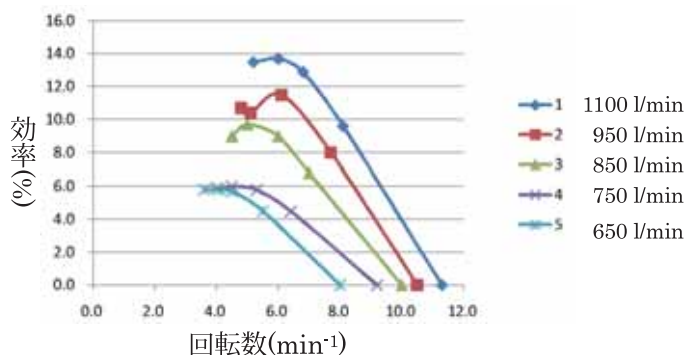


図14 各流量ごとの効率

図14は効率を示すが、流量が増えると最高効率点における回転数が高くなる傾向がある。また、流量が

増えると、最高効率点が上がっている。これは、流量が増えるとさらに上がると予想されるが、逆に、水車幅に対して流量が少ないと言える。

9. 実証実験用水車

9. 1. 実証実験地選定

今回調査を行った中で、喜多方市内にある調整池下を流れる開水路にて実証実験を行う事とした。

選定基準として、実証実験を行う事で、水車を目にした人々がエネルギーについて考え、どのように発電されるのかを見てもらえる事も考慮した。



図15 喜多方市内開水路

9. 2. 実証実験用水車開発

4. 2. 項で述べた通り、下掛け水車は衝動水車としても利用可能で、また、モデル実験等と同じ様に、落差を利用することもできる。そこで、実証実験では一台の水車でどちらも実験できる様にゲートを設け、調整可能な構造とした。

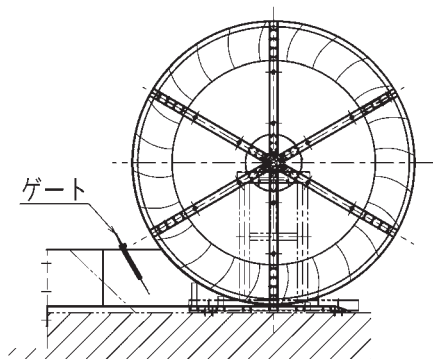


図16 実証実験用水車

9. 3. 水車据付



図17 水車据付状況

水車は設置が容易な構造である事も重要である。そ

のため、水車は導水路と水車架台、ベース全て一体形とした。ラフタークレーンで吊り込み、水車設置は4時間で完了した。

9. 4. 実証実験

流量測定はしていないため、効率は不明であるが、設置時試験において約100W程度の出力を得た。今後、ゲート開度ごとの効率等の実証実験を行い、衝動水車としての下掛け水車と、重力水車としての下掛け水車、両方での実証実験を行う予定である。また、実証実験を通して、可変速の調整を行い、常に最高効率点で運転できるシステムに改良して行く。

10. 結言

今回実証実験を行った地点は、農業用水路である。落差工が無いため、出力は大きくないものの、コンクリートであるため、水車の設置が容易であった。この様に、落差工が無くても周辺の照明等のエネルギー源として、価値が見出せた。

これまで、下掛け水車モデルではφ600、φ200、φ2000共に実験を行い、基礎となるデータを収集できた。これを基に、未利用である水路に水車の構造を合わせる事で、幅広い水力エネルギーの利用が可能である。

参考文献

- 1)『ハイドロタービン』 編者 ターボ機械協会 平成3年6月初版
発行 日本工業出版
- 2)『小型水力発電機製作ガイドブック』
竹尾 敬三 著 パワー社
- 3)『水力学・流体力学』 市川 常雄 著 朝倉書店

クラスター型小型風車の開発

—低風速と高風速に対応した風車の開発—

Development of a small cluster type windmill

- Development of a windmill for low wind speed and high wind speed -

株式会社ジー・エス・ピー 鈴木 実・高藤 恭胤・稲本 勝彦・松本 哲

地球環境と調和しながらエネルギー資源を有効に活用するために風力などを利用した新エネルギー発電が注目されている。風力発電に使用する風車は、スケールメリットを求めて大型化が進んでいるが、どこにでも設置できる小型風車も注目を集めている。小型風車は建設費が安く、どこにでも設置できるのが特徴であるが、風況の悪い場所での使用も考えられる。低風速から高風速まで広い範囲で効率よく回転する小型風車の構造について検討し、改良型 5 枚羽根の水平軸型風車を試作した。

Key words: 小型風車、風力発電、クラスター型風車

1. 緒言

エネルギー資源の枯渇や地球環境の保全のために、風力などの新エネルギー発電が注目を集めている。日本国内でも、ウインドファームと呼ばれる多くの大型風車を建設した風力発電システムの建設が増えている。しかし、国内にはウインドファームを建設する広い平野が少なく、洋上発電に適した遠浅の海も少ないので、ウインドファームの建設適地がほとんどなく、山岳部などへの建設が増加している。

このような状況の中で、設置費用が安く、どこでも利用可能な小型風車の普及も重要であると考えられる。

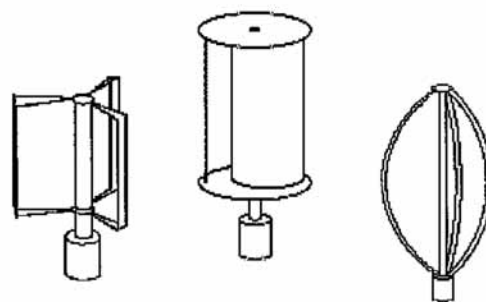
どこにでも設置できる小型風車に要求される条件としては、低風速から高風速の幅広い領域に渡って風力エネルギーを効率よく機械エネルギーに変換することが必要であり、効率のよい回転翼が求められる。

本研究では、送電線がない地域、山間部や過疎地域での町興しへの利用、農地での利用、公園や山小屋の電源、住宅の補助電源などとしての利用を目指す。大型風車では、一般的に 3 枚羽根の風車が使用されているが、低風速領域でも回転可能な 5 枚羽根の小型風車の試作・動作試験を 19 年度から 20 年度の 2 年間に行った。

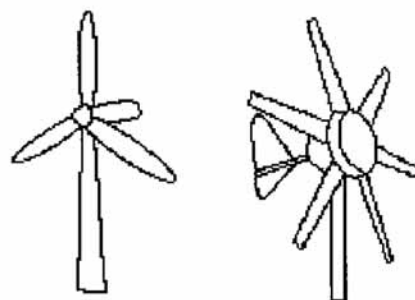
2. マイクロ風車の構造と特性

風車は大きさによって、小型風車、中型風車、大型風車に分類され、さらに小型では、マイクロ風車、ミニ風車、小型風車等に分類される。ロータの直径が 1.5 m 以下のものをマイクロ風車、1.5 m から 5 m のものをミニ風車、5 m から 7.1 m のものを小型風車と呼んでいる。

図 1 に風車の形式を示す。風車の形式には大きく分けて、水平軸型と垂直軸型がある。図 1 の(a)、(b)、(c)は垂直軸型で(d)と(e)の水平軸型のように風向制御を必要としないのが特徴である。風車の動力原理とトルク発生形態から分類すると、風車ブレードに生ずる揚力を利用するものと、抗力を利用するものに分類される。抗力型風車は風の速度以上の周速度で回転することはできないが、揚力型風車は風速の数倍以上の高い周速度で回転することが可能である。



(a)ダリウス型 (b)サボニウス型 (c)ジャイロミル型



(d)3 枚翼プロペラ型 (e)多翼プロペラ型

図 1 風車の形式

風から得られるエネルギーは風の流れが、断面積Aの面を通過して、風速V、空気の密度 ρ のもとで働いているものとする。風の持つ理論的パワー P_{th} は(1)式で与えられる。

$$P_{th} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

風から風車を利用して取り出せるパワーの割合はパワー係数 C_p と呼ばれる。風から風車を利用して取り出すことができるパワー P_e は(2)式で与えられる。

$$P_e = \frac{1}{2} \rho C_p A V^3 \quad (2)$$

$\rho = 0.124$ とすると、風速 10 m/s 時に 1 m^2 の断面を通過する風のパワーは 612.5 W である。パワー係数 $C_p = 0.14$ の風車の出力は、ローター直径 1 m の風車で 191 W 、ローター直径 7.1 m の風車で 9.7 kW である。

3. マイクロ風車の試作

3. 1. ブレードの形状について

本研究では、家庭用の風力発電機の開発を目的としている。出力が数百Wの発電システム用のマイクロ風車では、微風から強風まで風速の変化に迅速に応じて風のエネルギーを効率よく回転力である機械エネルギーに変換することが要求される。

さらに撥水性、耐久性、十分な強度が要求される。

現在、一般に市販されている多翼型の風車の構造は、中心部分で風の抵抗を受け効率の良い回転が得られず尾翼の部分で風向きを正しく検知することができないので、微風の場合に風向きを正しく検知することができない。試作した風車では、風の抵抗を抑えるために、先端部分（スピナー）をドーム型にした。(図2・図3)



図2 ドーム型スピナー試作品

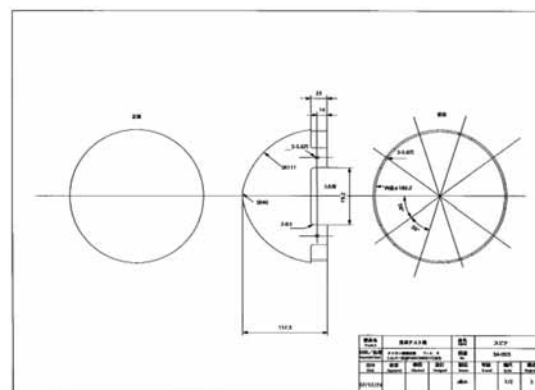


図3 ドーム型スピナー設計図

ブレードについては、風の抵抗を軽減し、効率の良い回転を得るために、ブレードの付け根の両端部分に風を逃がす切り込みを入れたブレード Ver.1 (図4・図5) と、ブレードの片側に切り込みを入れたブレード Ver.2 (図6・図7) を設計製作した。



図4 ブレード Ver. 1 試作品（両側切り込み）

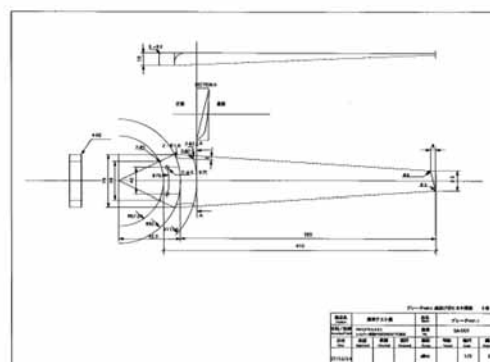


図5 ブレード Ver.1 設計図（両側切り込み）



図6 ブレード Ver.2 試作品（片側切り込み）



図7 ブレード Ver.2 試作品（片側切り込み）

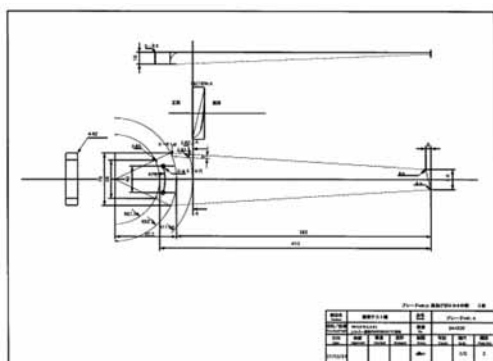


図8 ブレード Ver.2 設計図（片側切り込み）

風車の直径は、955mmで5枚のブレードを取り付けている。（図9・図10・図11）



図9 風車全体試作品



図10 風車全体試作品

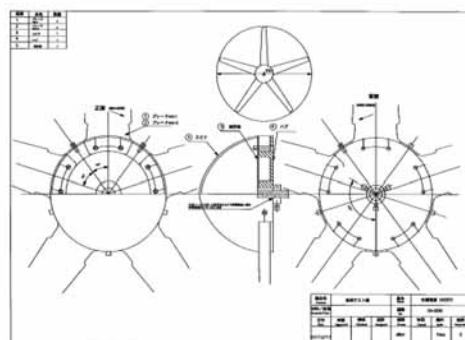


図11 全体組図

3. 2. ブレードの材質について

現在市販されている風力発電用風車のブレードの材質には、ポリアミド（PA）や炭素繊維織布（カーボンファイバー）等が使用されている。

家庭用風力発電機として使われることから、設置場所によっては、風雨、風雪、高温等さまざまな気象条件が想定される。試作した風車では、撥水性があり、耐久性に富み、強度が高く、酸性雨などに対しても強いポリブチレンテレフタレート（PBT）樹脂を使用した。更にガラス繊維を数%入れることによって合成を強化した。

試作器では、ブレード1枚の重量も軽量化され、Ver.1のブレードは、210g Ver.2のブレードは220gとなっている。各部材の仕様書は、表1に示す。

表1 各部材仕様書

品名	材質・仕上げ
ブレード	PBT(ガラス入り) 切削加工
スピナー	ナイロン 積層成形 T=2.5
ハブ	アルミ 切削加工
固定板	SPCC T=2

4. 試作品の性能試験

試作したブレードの性能試験を行い市販品との性能を比較した。市販の5枚羽根で風速5m/sで130Wに対して試作したブレードの試験結果は、下記の通りの結果を出す事が出来た。(表2・図12・図13)

表2 風速による発電量と回転数

風速	発電量	回転数	ワット
1m/s	5.1V	360rpm	43.35W
2m/s	7.8V	500rpm	101.4W
3m/s	8.2V	530rpm	112.6W
4m/s	8.6V	550rpm	123.3W
5m/s	9.5V	600rpm	150.4W

注) 発電機の抵抗は0.6Ω



図12 風速による発電量の実験



図13 風速による発電量の実験

5. 高風速領域におけるプロペラの研究

本研究では、19年度の研究にて低風速でもよく回るプロペラを開発したが、強風速時では回りすぎて、軸や発電機に負荷がかかりすぎ故障の原因となっていた。そこで強風速時には、回転が遅くなることが出来ないかの研究をした。

つまり、ブレードに垂直にぶつかって来る風を低風速では、均等にブレードに分散させ、高風速では、ブレードの根元に風の通り道をつくり、風の通過する時

の負荷を利用して回転を抑制させる。

6. 改良型ブレードの設計及び試作

上記の考えから19年度試作したブレードVer.1の改良型ブレードの設計及び試作を行った。(図14・図15・図16・図17)

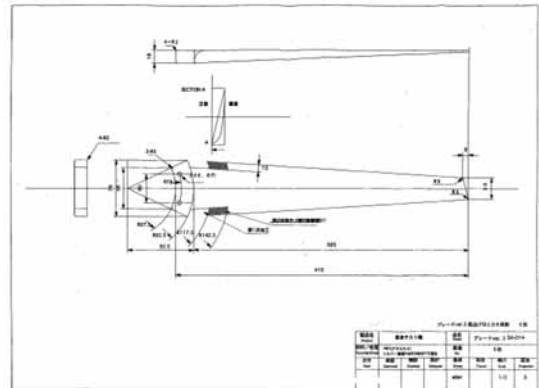


図14 改良型ブレード設計図



図15 改良型ブレード試作品



図16 改良型ブレード試作品



図 17 改良型ブレード試作品

これを自己抑制羽根と称する。しかし、風の通過する穴や溝の形状等々についてさらに研究・分析していかなければならないだろう。

7. 小型風車の筐体の研究・開発について

5 枚羽根の羽根は出来てもこれを入れる筐体が必要である。風力発電には、この筐体の開発がとても重要なファクターなのである。

風が一定方向から吹いてくればいいが、風は気ままである。

時には弱く、時には強く、右かと思えば左から吹いて来る。そのたびにプロペラは向きを変え体制を整えなければならない。

また、風からの贈り物も少なくはない。例えば、紙くず・木々・石油製品のフィルム時には、鳥等々さまざまな物が飛んで来るのである。

強風速時では、支柱は折れてしまうし、土台の施工が悪ければ土台そのものを浮き上げてしまう。

自然の環境を良く考慮した上で設計しなければならないのである。また、ビルの屋上等のデッドスペース等への活用も視野に入れる事とした。

そこで、今回は正六面体の中にプロペラと機器の設置できる空間を創り、あらゆる角度（360度）から吹いてくる風にも対応できるようにした。（図18・図19・図20・図21・図22・図23）

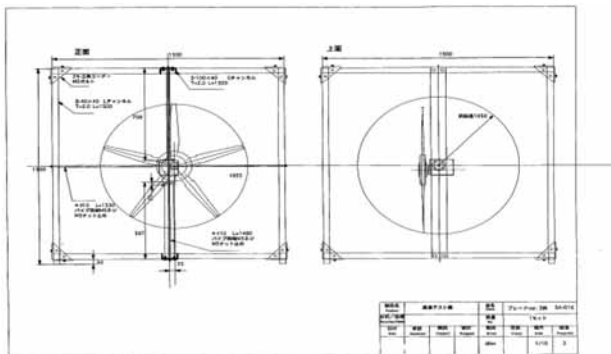


図 18 正六面体図面

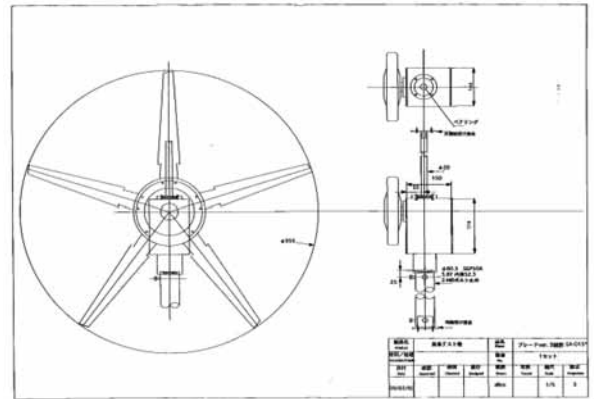


図 19 改良型ブレード組図

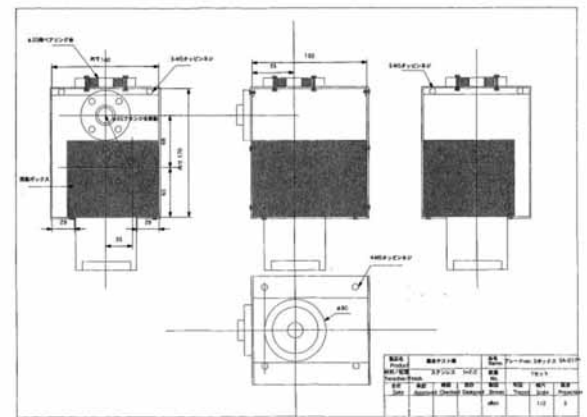


図 20 発電機取付BOX図面



図 21 発電機取付BOX

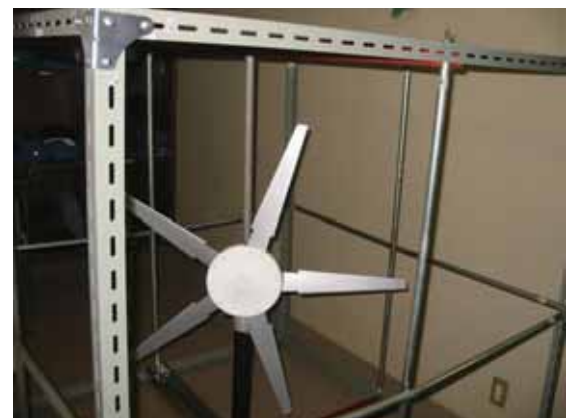


図 22 正六面体及び改良型ブレード



図 2 3 正六面体及び改良型ブレード

8. 結言

本研究のプロジェクトによる研究は、平成 20 年度で終了となった為、プロジェクト研究全体における研究成果は得る事が出来なかったが、平成 19 年度、平成 20 年度の 2 年間の研究において、クラスター型小型風車としては、優れたブレード（羽根）を試作する事が出来た。

筐体に至っては、家庭及び可能なデットスペース等に容易に設置する事の出来るような意匠を含めた筐体の研究開発が今後必要と思われる。

実用化に向けた場合には、全体的に更なる検証及び設置費用等コスト面における検討課題が必要になってくる。

第4章 電力変換器

インバータ制御回路の開発

エネルギー貯蔵機能付きインバータ
の開発

インバータ制御回路の開発

—FPGA を使用したデジタル制御回路の開発—

Development of a control circuit of inverter's

-Development of a Digital control circuit with using a FPGA-

福島県ハイテクプラザ 大内 繁男・遠藤 勝幸

有限会社エイチ・エス・エレクトリック 関本 英雄

従来インバータの制御回路は、アナログ回路で作られてきた。アナログ回路では、制御法の変更が生じた場合には、制御基板そのものを設計し直さなければならず、非常に非効率であり、設計の非効率性は、インバータへのコストアップへとね返ってきていた。

今回、インバータの制御回路の設計効率を上げるため、FPGAを使用したデジタル回路による制御回路の設計を行った。併せて、設計した制御回路上で動作するインバータの制御プログラムの設計も行い、デジタル制御回路によるインバータの制御を実現した。

Key words:新エネルギー、FPGA、インバータ、最大電力点追従

1. 緒言

風力や水力等の自然エネルギーから得られる電力は、電圧値や周波数が一定ではなく変動するため、家電製品に使用するためには、電圧や周波数が一定である電力に変換する電力変換器が必要となる。

従来の電力変換器は、制御回路をアナログ回路で作っていたため、制御対象となる電源が変わるたびに、その都度、制御回路の設計を行う必要があった。

デジタル回路で作った制御回路はプログラムの変更のみで動作を変更することができるため、従来では電力変換器の対象となる電力源が異なるたびに設計を行う必要があった制御回路が、同一の制御回路で対応する事が可能となる。また、従来のアナログ回路では時定数などの回路特性の変更を抵抗やコンデンサなどの部品の付け替えによって行っていたが、デジタル回路ではプログラムの変更によって済みます事が可能である。これらの理由により、制御回路をデジタル化することで、制御回路の共通化（プラットフォーム化）や制御法の変更に対する時間の短縮を図ることができ、開発の効率化を図ることができ、開発にかかるコストを抑えることができる。

また、デジタルによる電力変換器の制御は、上記以外にも、アナログ回路の制御に比べて制御回路の小型化や、調整工程の削減、複雑な制御が可能、制御方式の変更が容易、データ取得が容易という利点がある^[1]。本研究では、電力変換器をデジタル制御する制御ボードを製作し、製作した制御ボードで動作する電力変換器の制御プログラムの開発を行った。

以下、2. では製作した電力変換器の制御ボードについて、3. では電力変換器のそれぞれの制御プログラムについて述べる。

2. 電力変換器用制御回路

本研究で製作した電力変換器のブロック図を図1に示す。電力変換器は、発電機からの出力を整流、DC-DC変換器でDC 180Vに変換し、DC-AC変換器で一般家庭で使用するAC 100Vに変換する。バッテリーに充電した電力により、不足した場合の電力を補い電力供給の安定化を可能とする。発電機からの電力を効率よく利用するために、整流器の後段の昇圧チョップで、後述する最大電力追従を行う。

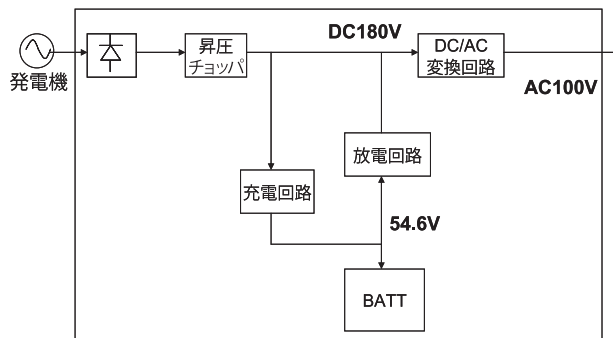


図1 電力変換器の全体ブロック



図2 インバータ制御回路

制御回路は、図 1 に示したそれぞれの変換回路の制御を行わなければならない。制御回路は、演算素子に Altera 社製 FPGA(Field Programmable Gate Array)の stratixII EP2S60F672C5N を使用した。FPGA は回路構成の自由度が高いため、電力変換器内の変換回路に対応する制御回路を FPGA に独立に用意した。電力変換器の電圧・電流センサからのデータは A/D 変換を行い FPGA に取り込む。FPGA で処理したインバータの制御信号は I/O コネクタから電力変換器の主回路へ出力する。

電力変換器用制御ボードには、FPGA 内に構築可能な CPU である NiosII の利用を想定した、電力変換器の運転状態の表示・監視、運転履歴を取得するための回路も搭載した。電力変換器の運転状態と運転履歴は、MMC(Multi Media Card)カードにデータとして出力可能であり、ネットワークデバイスとネットワークコネクタをとおして、ネットワーク上の機器へデータ送信が可能な構成としている。

NiosII へ組み込み用 OS である TOPPERS(Toyohashi Open Platform for Embedded Real-time Systems)を移植に対応するために、NiosII の動作プログラムの格納用に 16 MB の容量を持つ Flash メモリを用意し、汎用メモリとして 2 MB の SSRAM(Synclonous Static RAM)と 32 MB の SDRAM(Synclonous Dynamic RAM)を用意した。運転履歴に必要な時間情報の取得には、リアルタイムクロックを用意した。

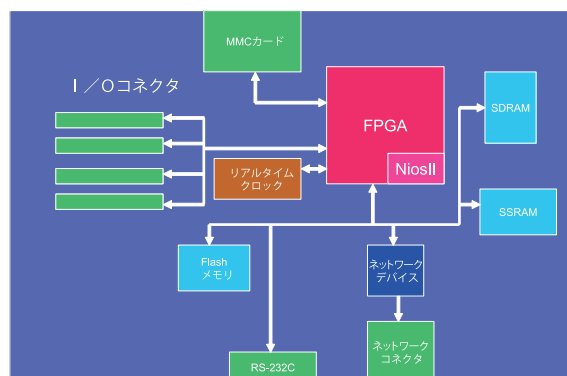


図 3 インバータ制御回路

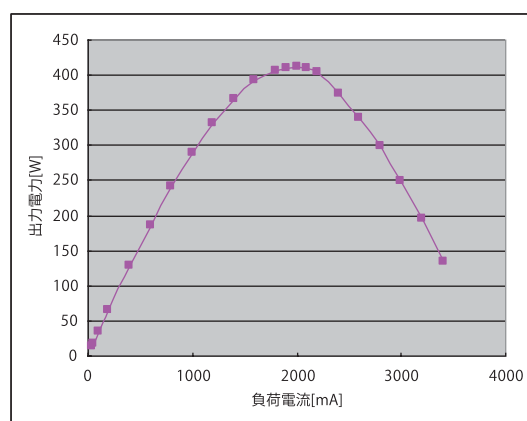


図 4 発電機の負荷特性

3. 電力変換器の制御プログラム

3. 1. 最大電力追従回路

発電機の電力は、図 4 に示すような負荷電流の変化に対して凸型の特性を持つ。発電機から最も効率よく電力を取り出すためには、出力電力が最も大きくなる負荷電流で取り出す必要がある。最大の出力電力を取り出す手法である最大電力点追従法 (MPPT:Maximum-Power-Point Tracking) について検討し昇圧チョップパの制御プログラムを作った。昇圧チョップパの入力端の電圧値は、昇圧チョップパのスイッチングを行っているトランジスタのオン時間 T_{on} とオフ時間 T_{off} のデューティ比 d

$$d = T_{on} / (T_{on} + T_{off}) \quad (1)$$

で決まる。昇圧チョップパのデューティ比を大きくするほど昇圧チョップパの入力電流は高くなり、デューティ比を小さくすると昇圧チョップパの入力電流は低くなる。最大電力追従の手法として、チョップパの入力電流を変化させながら、より高い出力電力を得ることが可能となる昇圧チョップパの入力電流を求めていく「山登り法」を用いた。図 5 で、昇圧チョップパの動作ポイントが P のとき、隣接する動作ポイント a,b のときの電力値と比

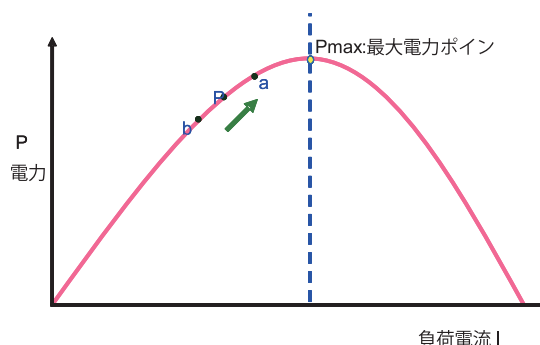


図 5 MPPTの特性

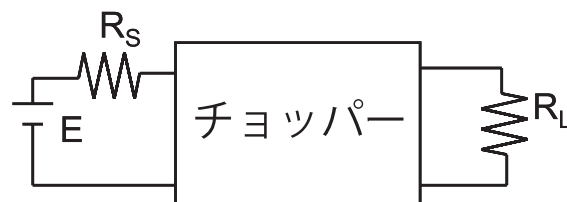


図 6 山登り法による最大電力追従結果

較し、大きな電力値を示す動作ポイントの方向に移動する。この動作を繰り返す事で、最大電力点を見つける事が可能である。

動作ポイントを変更する時間は、入力端の電圧値と電流値を求める A/D コンバータの入力段に入れているフィルタの時定数から決めた。動作ポイントの移行時間とデューティ幅は、パラメータ化し容易に変更できるようにした。

山登り法による最大電力追従を確認するため、図 6 に示すように定電圧電源と昇圧チョッパ回路間に抵抗 R_s を入れ、出力に負荷抵抗 R_L を入れて最大電力追従の動作を確認した。定電圧電源の電圧値:100V、抵抗 R_L :30 Ω とし、負荷抵抗 R_L は 30,50,70,100,200,300,400 Ω でそれぞれデータを取った。抵抗 R_s を定電圧電源の出力インピーダンスとみなせば、昇圧チョッパの入力端から見た昇圧チョッパのインピーダンスが抵抗 R_s の時に最大電力を得る事ができる。つまり、昇圧チョッパの入力端の電圧値が定電圧電源の 1/2 の 50V の時が最大電力点である 83.3W を得る事が出来る。図 10 に実験結果を示す。図 10 から負荷抵抗 R_L を変更した場合でも最大電力を取り出しており、最大電力追従が問題なく動作している事を確認した。

3. 2. バッテリーの充電

製作した電力変換器には、電力を安定に供給するため、電力変換器に蓄電池を入れている。使用している蓄電池は価格を考慮して、鉛蓄電池を使用している。

鉛蓄電池を充電するには、満充電になるまでは定電流で充電し、満充電になった時は定電圧で充電する定電流定電圧充電方式を用いている。図 8 にバッテリーの充電制御ブロック図を示す。充電回路は、降圧チョッパを使用している。降圧チョッパのスイッチング素子である FET を ON/OFF するデューティ比を変えて、定電流、定電圧でバッテリーに充電を行う。

バッテリーの電流値と電圧値は、それぞれの指令値に追従するように PI 制御をかける。PI 制御器の出力を selector 回路に入れ、小さい値の PI 制御器の信号を選択し、PWM 変調し充電回路を制御する。selector 回路で小さな値を選択するのは、電圧値と電流値で指令値に近い方の値を優先することであり、これにより定電流定電圧制御を行っている。

アナログ制御での PI 制御は(2)式に示すような連続系の式であらわされる。

$$MV = K_p \left\{ e + \frac{1}{T_i} \int e dt \right\} \quad (2)$$

ここで、

MV:PI 制御出力

e :偏差

K_p :比例ゲイン

T_i :積分時間

である。

デジタル制御では、一定間隔でデータをサンプリングし制御をかけるため、(2)式を離散系に変換する必要がある。(2)式を差分法により離散化すると(3)式、(4)式の偏差速度型デジタル PI 演算式で表される。

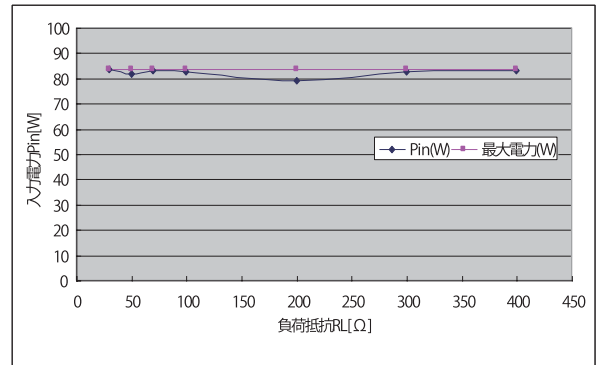


図 7 MPPTの結果

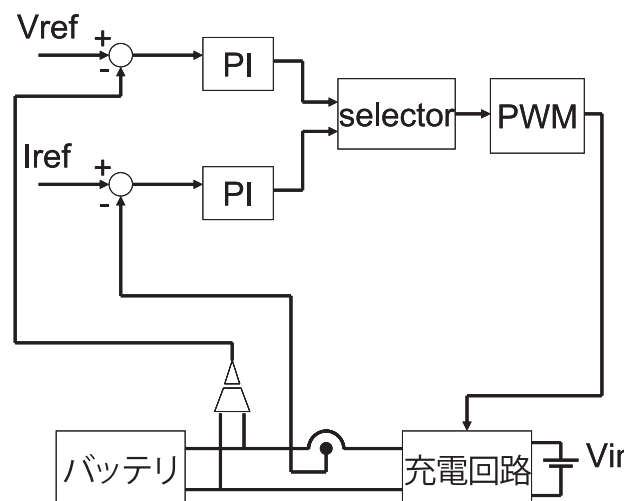


図 8 バッテリーの充電制御ブロック図

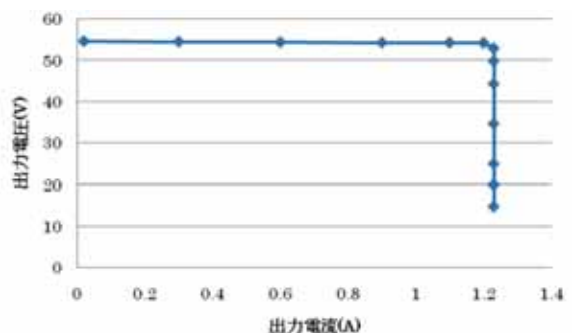


図 9 充電回路の出力特性

$$MV_n = MV_{n-1} + \Delta MV_n \quad (3)$$

$$\Delta MV_n = K_p \{ (e_n - e_{n-1}) + \frac{\Delta t}{T_i} e_n \} \quad (4)$$

ここで、
 Δt : サンプリング時間である。

積分ゲイン K_i は、

$$K_i = K_p \frac{\Delta t}{T_i} \quad (5)$$

と表される。

FPGA 内に組んだ PI 制御回路により、満充電になるまでは定電流値：1.23A で定電流制御を掛け、満充電後は定電圧値：54.6V で定電圧制御を掛けた。図 9 に定電流定電圧制御を掛けた充電回路の出力値を示す。図 9 から、満充電時の電圧である 54.6V に達するまでは、1.23A の定電流が流れており、満充電に達した後は 54.6V の定電圧になっており、定電流定電圧制御が掛かっている事を確認した。

3. 3. 放電回路 DC/AC変換回路

放電回路は、バッテリーの電圧を 180V 一定に昇圧する回路で、回路構成は昇圧回路である。放電回路の制御は、3. 2 で説明した PI 制御回路により指令値の 180V 一定の電圧値になるように行っている。同様に DC/AC 変換回路も、PI 制御回路を使い、指令値である AC100V に出力電圧が追従するように制御している。図 10 に、制御ブロックを示す。図 10 の変換回路が放電回路や DC/AC 変換回路に相当する。DC/AC 変換回路の AC100V の指令値は、Altera 社のサイン波形を生成する IP(Intellectual Property)を利用した。図 11 に

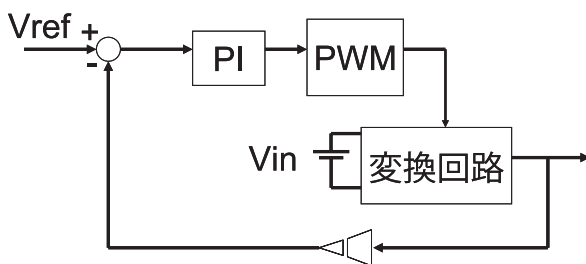


図 10 変換器の制御

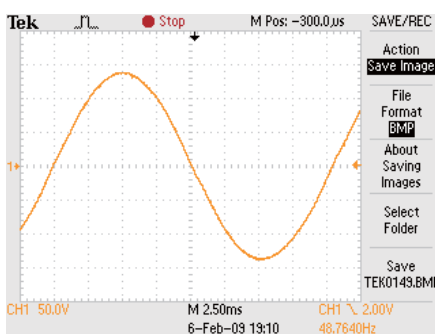


図 11 DC/AC変換回路出力波形

DC/AC 変換回路の出力波形を示す。商用電力と同じ AC100V を出力している。

3. 4. プログラムの IP 化

FPGAに作った制御プログラムは、搬送波出力回路、比較回路、シリアル-パラレル変換回路など小規模なモジュールで作った。それらのモジュールを組み合わせる事により、PWM変調回路やA/Dコンバータのインタフェースを作ると言ったように、再利用性や汎用性を考えた設計を行った。また、モジュールのバス幅などはパラメータ化し、用途によってパラメータを変更するだけで良いように、プログラム自体を変更する必要が無い設計を行った。

4. 結言

電力変換器をデジタル制御するために、FPGAを使用した制御ボードの製作を行った。製作した制御ボードで動作する制御プログラムの開発を行い、電力変換器内の各変換回路をデジタル制御し、AC100Vを出力することを確認した。

制御回路のデジタル化により、制御回路の共通化を可能とした。今回の研究で設計したプログラムは、IP として保存しており、今後同様の開発がある場合には再利用が可能である。また、回路特性の変更や、機能の追加も容易に行える。今後は、今回開発した技術を、電力変換器の開発の効率化に役立てていきたい。

参考文献

- 1) 大内、吉田、関本:”FPGA を使用した古デジタル電力変換器の開発”、平成 19 年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集,p.353,(2007).

エネルギー貯蔵機能付きインバータの開発

Development of a inverter system with energy storage
ディジタル制御回路によるバッテリー内蔵インバータの開発
Development of a inverter system controlled digital circuit with a battery

有限会社エイチ・エス・エレクトリック 関本英雄
福島県ハイテクプラザ
研究開発部システム技術グループ 大内繁男 遠藤勝幸

水力、風力、太陽光等の新エネルギーにより得られる電力を安定した交流電圧に変換するインバータ装置において、導入、設置が容易な小容量機を対象に蓄電池、燃料電池等のエネルギー貯蔵器を備えた小型、低コストのインバータ装置の開発を目的として、3年に亘り研究開発を行った。実際、現地に水車、発電機、インバータを設置したフィールド試験に於いて、期待通りの動作結果を確認した。また、電力変換回路の制御にはFPGAを使用することにより、制御回路の簡素化、高機能化を図った。

Key word: 水力、エネルギー貯蔵、FPGA、インバータ

1. 緒言

近年、環境問題への対策、関心がますます高まるなか、エネルギー政策に於いては、化石エネルギーの代替として太陽光、風力、水力等自然エネルギーの導入が進められている。特に、太陽光発電に関しては公的助成金制度、売電制度拡充などの施策により一般家庭での設置が進んでいる。

一方、水力による電力利用は従来からの電力会社による大規模発電施設であり、風力に関しては、数百kW規模の大型機の設置が近年進んでいるが、美観、騒音、振動などの新たな問題も発生している。

水力発電の設置に関しては、水利権等の許認可手続きが極めて困難であることから、マイクロ水力発電の設置は数例に止まっている。しかしながら、日本の国土、気候を考えた場合、降水量が多く森林山岳地帯が広いこと、さらに、古くから水稲稲作を行ってきた我国においては全国各地に農業用水路が整備されていることから、潜在的な水力資源量は極めて大きくマイクロ水力発電に適していると言える。また、嘗ては製粉などに水車が一般的に利用されていた時期もあり、マイクロ水力利用は身近な存在で

もあった。

このような現状を鑑み、本開発では、導入が進んでいないマイクロ水力発電装置の実用化を目的とする。

用途としては、農業ビニールハウス栽培、キャンプ場、山小屋等のレクリエーション施設、街路灯への使用を想定している。これらは、送電線が通っていない場所での独立電源として使用されることを考慮して、自然エネルギーが得られない時の補助として、蓄電池、燃料電池等のエネルギー貯蔵器を備えることにする。

マイクロ発電により得られる電力は、通常、我々が使用するAC100Vにはならず、電圧値や周波数が変動するため、安定な商用電圧(AC100V)に変換する電力変換装置が必要となる。本研究では、電力変換装置の構成要素であるDC/DCコンバータ、DC/ACインバータ等の回路検討を行い最適なシステムの構成を決めた。これら電力変換装置の制御をFPGAにより行うことで、部品点数の削減、簡素化、高機能化を図り、実証試験にて動作確認を行ったので報告する

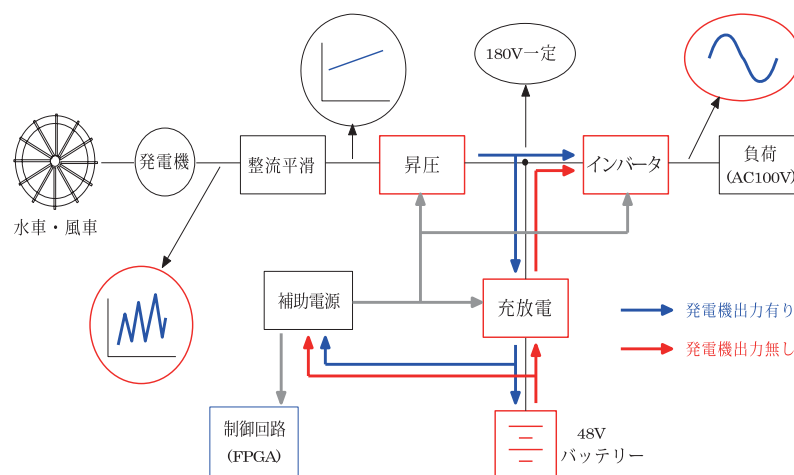


図1 マイクロ発電システムの構成図

2. システム構成

図1に今回試作を行ったマイクロ水力発電システムの構成図を示す。装置の仕様は以下となる。

発電機出力電圧	：最大 300V
動作可能発電機電圧	：20V～180V
発電機出力電流	：最大 5A
動作発電機電流	：0.2A～2A
DCバス電圧	：180V
交流出力	：AC100V
出力電力	：最大 100W

(発電機電圧電流は整流平滑後のDC電圧である)
安定したAC100Vに変換するために、以下の回路構成要素が必要となる。

- ・整流平滑回路
- ・昇圧回路
- ・インバータ回路
- ・充放電回路
- ・バッテリー
- ・補助電源
- ・制御回路(FPGA)

整流平滑回路は、発電機出力電圧に含まれる交流成分を直流に整流し、リップル成分を平滑するものである。以下、各構成要素について詳述する。

2. 1. 昇圧回路

図2に昇圧回路の基本回路を示す。DC/DCコンバータの一つでブースター方式回路と呼ばれる。

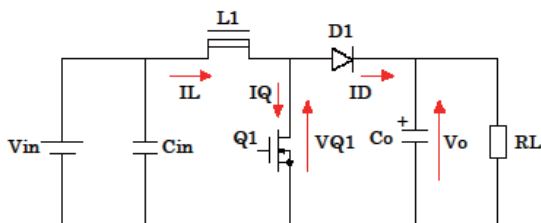


図2 昇圧基本回路

図3に、本昇圧回路の動作原理図を示す。トランジスタQ1がオンしている期間に電圧源Vin、インダクタL1、トランジスタQ1のループが形成され電流IQが流れる。この期間にインダクタL1にエネルギーが蓄積され、負荷にはコンデンサCoから電力が供給される。Q1がオフするとインダクタL1に流れていた電流ILはダイオードD1に転流し、電圧源Vin、インダクタL1、ダイオードD1、負荷RLのループが形成される。この期間にコンデンサCoにエネルギーが蓄積されると共に、負荷にはインダクタL1に蓄積された電力が供給される。この時トランジスタQ1には出力電圧Voが印

加される。入力電圧をVin、出力電圧をVo、トランジスタQ1のオン期間をTon、オフ期間をToff、周期をT、周期に対するオン期間の比率をデューティDとして、次式が成り立つ。

$$D = T_{on} / (T_{on} + T_{off}) = T_{on} / T, \quad 0 \leq D < 1$$

$$V_o = 1 / (1 - D) \times V_{in} \quad (1)$$

デューティD=0の場合は、図2の基本回路において、トランジスタQ1が常にオフの状態を意味しており、出力電圧Voは入力電圧Vinに等しくなる。

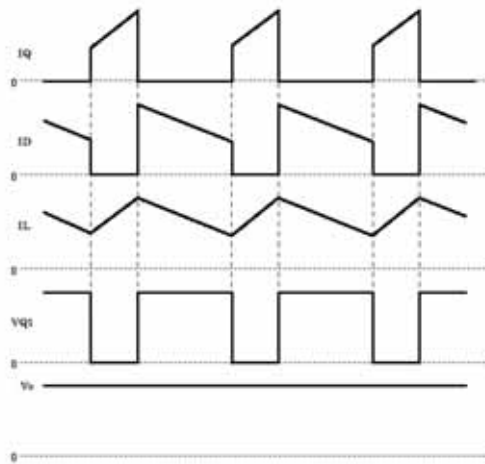


図3 昇圧回路動作原理

また、本昇圧回路には本インバータ装置の重要機能である最大電力追従制御機能を設けている。発電機の出力は、機械入力がある場合、負荷電流が大きくなるに従って、電圧値が減少することから、その出力(負荷)特性は図4のようになる。この特性図が示すように同じ機械的入力を与えても、動作点(電圧、電流値)により電気エネルギーとして取り出せる電力値は変化して、最大となる動作点がある。機械入力に応じ時々刻々と変化する最大動作点に追従させる手法が最大電力追従制御である。本開発に於いてはFPGAを使用したソフトウェア的手法により実現している。本制御の詳細は、別途報告書に委ねる。

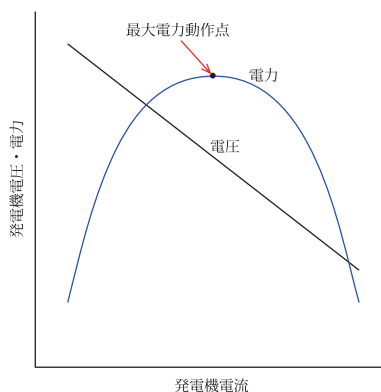
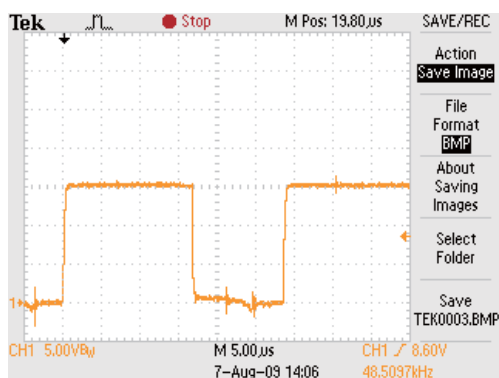


図4 発電機特性

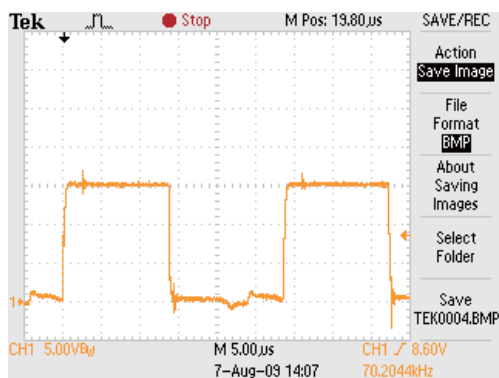


図5 昇圧回路部写真

図5に昇圧回路部の写真を示す。ほぼ図2の基本回路に示す部品から構成された簡単な物である。図6は動作波形例として、MOSFET(図2のQ1)のゲート(PWM)信号を示したものである。波形(a)は入力40V/1A、波形(b)は入力57V/0.7Aの時であり、昇圧回路への入力(発電機出力)電力は共に40Wである。波形(a)と(b)とでは、ハイレベルの期間(デューティ)が違うことが分かる。このことは、図4の発電機特性に於いて、波形(a)の動作は最大動作点の右側にあり、波形(b)は左側に有ることを示している。



(a) 入力：40V/1.0A/40W



(b) 入力：57V/0.7A/40W

図6 昇圧回路動作波形

2. 2. インバータ回路

図7にインバータの基本回路を示す。DC/AC変換と呼ばれるように、直流を交流に変換する機能を有する。図8に動作原理図を示す。図7の基本回路において、4個のスイッチ(S1,S2,S3,S4) (実際にはトランジスタ)の内、S1とS4がオンした時に電圧 $V_{uv} = +E_i$ となり、S2とS3がオンした時に $V_{uv} = -E_i$ となる。また、S1とS3がオン、或いはS2とS4がオンした時に $V_{uv} = 0$ となる。このパルス電圧 V_{uv} をリアクトルCとコンデンサCのフィルタを通すことにより、高周波成分が除去され基本波のみの正弦波 V_{ac} となる。上記、スイッチ(S1,S2,S3,S4)のオン信号を生成するアルゴリズム手法を図9に示す。

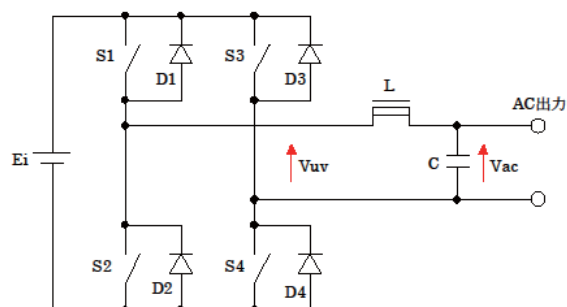


図7 インバータ基本回路

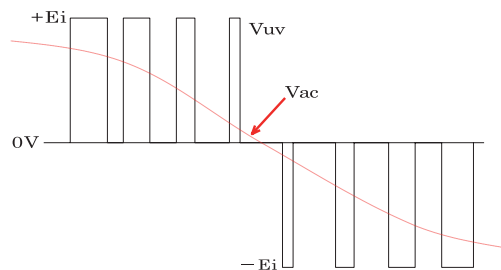


図8 インバータ動作原理

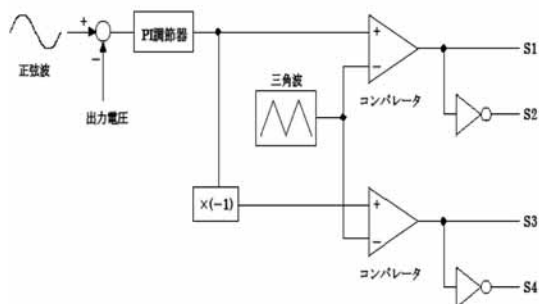


図9 インバータ制御アルゴリズム

出力電圧の基準信号である正弦波と実出力電圧の誤差をP I調節器に入れる。P I調節器の出力であるエラー信号と搬送波(キャリア)と呼ばれる三角波とをコンパレータにて比較してゲート信号 S1 を得る。S1 を反転して S2 とする。同様にエラー信号を反転したものと三角波を比較してゲート信号 S3,S4 を得る。S1 と S2, S3 と S4 が同時にハイレベルになると、図7に示すスイッチ S1 と S2, S3 と S4 が同時にオンして電圧源 E_i を短絡することになる。この状態では、スイッチに過大電流が流れ破壊に至る可能性があるため、実際には、S1 と S2, S3 と S4 が同時にオンしないようデッドタイム(Dead time) と呼ばれる期間を設ける。アナログでの信号処理方法を説明したが、実際にはFPGAによるデジタル処理を行っている。

図10にインバータ回路部写真を示す。中央部上下に細長く見えるのが放熱機で、この放熱機の右側に付いている物がスイッチ(S1～S4)である MOSFETである。プリント基板右端上にフィルターインダクター、その下にフィルターコンデンサがある。

次に、実際の動作結果について述べる。
図11、に図9の制御アルゴリズムによって生成されたゲート信号 S1,S2 を示す。



図10 インバータ回路部写真

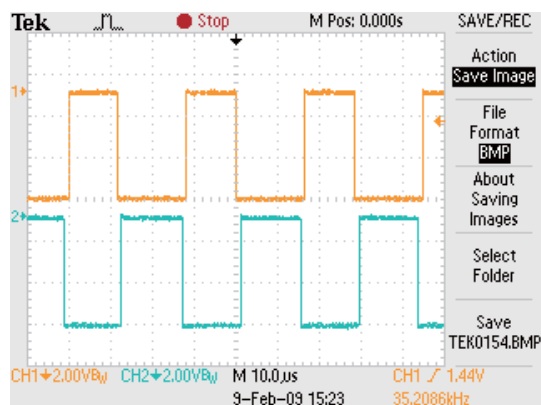


図11 S1,S2 ゲート信号波形

ゲート信号 S1 と S2 は反転しており、同時に High 状態となることがなく、Dead time が設けられていることが分かる。図12に出力100W時のインバータ出力波形(AC100V)を示す。良好な正弦波になっていることが分かる。

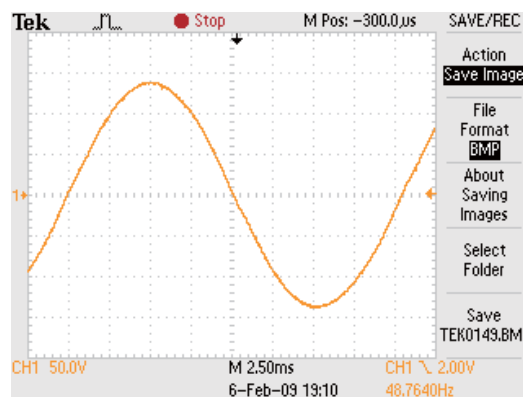


図12 インバータ出力波形

2. 3. 充放電回路及びバッテリー

充放電回路は、バッテリーへの充電、及び、バッテリーからの放電を制御する回路である。

本マイクロ発電システムでは、独立電源としての用途を想定しており系統(AC100V)電源の使用が期待できない。一方、水力、風力等の自然エネルギーは変化するため、安定した電力を保つためにはエネルギー貯蔵器が必要となる。現在、エネルギー貯蔵器として以下の物が有る。

- ・ 2次電池
 - 鉛蓄電池
 - リチウムイオン電池
 - ニッケル水素電池
 - ナトリウム硫黄(NaS)電池
- ・ 燃料電池
- ・ 超電導エネルギー貯蔵(SMES)
- ・ フライホイール
- ・ 電気 2 重層コンデンサ

ニッケル水素、リチウムイオン電池は大容量化が進み、既にハイブリッド車にも使用されている。燃料電池、電気 2 重層コンデンサは性能面で優れているが今後の低コスト化が期待される。今回は、本開発の目的である、実用化、普及を考慮してコスト、入手性の面から鉛蓄電池を採用することとした。

充放電回路は、水力エネルギーによる発電量がある場合は、負荷へ供給すると同時にバッテリーへの充電を行い、自然エネルギーが無い、或いは、不足する場合はバッテリーの放電により負荷へ供給する機能を有する。

鉛蓄電池の充電方法は、一定電流で充電を行い、電圧が指定値まで達したら一定電圧に保持するように行われる。このため、充電回路には定電流制御と定電圧制御機能が求められる。図 13 に充電回路図及び制御ブロック図を示す。DC/DC コンバータ回路の一つでチョッパ回路と呼ばれる。図 14 に動作波形を示す。トランジスタ Q1 がオンしている期間、電圧源 V_{in} 、インダクター L1、負荷 RL、トランジスタ Q1 のループが形成されインダクター電流 I_L 、及びトランジスタ電流 I_Q は直線的に増加する。トランジスタ Q1 がオフすると、インダクター電流 I_L は還流ダイオード D1 に転流して、インダクター L1、負荷 RL、ダイオード D1 のループが形成され、インダクター電流 I_L は直線的に減少する。

定電流制御時には、電流指令値 I_{ref} とバッテリー電流 I_B の誤差を PI 調節器に入れ三角波 PWM 制御を行う。同様に、定電圧制御時には電圧指令値とバッテリー電圧 V_o の誤差を PI 調節器に入れ三角波 PWM を行う。2つの PWM 出力信号はダイオード OR 優先回路を経てトランジスタ Q1 を駆動する。優先回路は、定電流制御または定電圧制御で先に指令値に達した方を優先するように機能する。

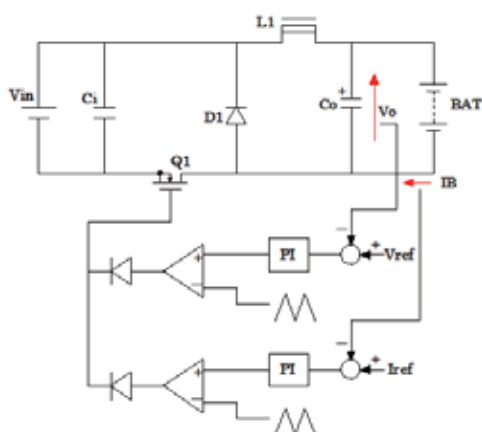


図 13 充電回路及び制御ブロック

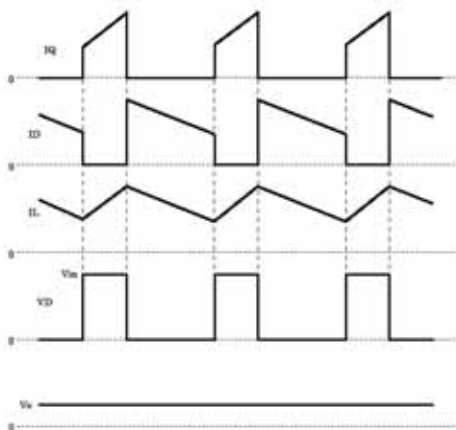


図 14 充電回路動作波形

図 15 に充電電流 1.2A、電圧 54V に設定した時の充電特性を示す。定電流、定電圧制御が良好に行われているのが分かる。図 16 に MOSFET の動作波形例を示す。尚、バッテリーは以下の物を使用した。図 17 にバッテリーの写真をしめす。

メーカー：古河電池
種類：小型制御弁式鉛蓄電池
型式：FPX1275
定格：12V/7.5Ah
構成：4 個直列

図 18 に本装置の外観写真を示す。

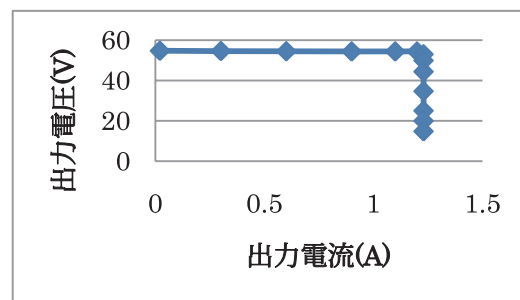
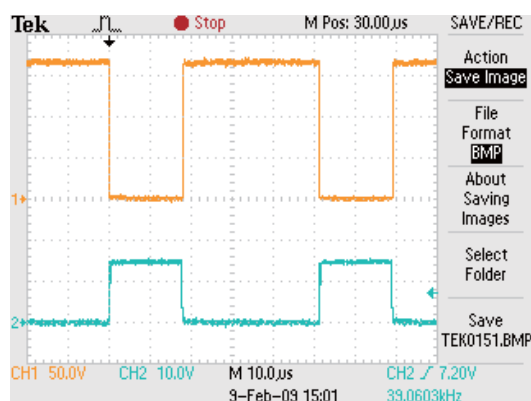


図 15 充電特性



(CH1: ドレイン電圧、CH2: ゲート電圧)

図 16 MOSFET 動作波形 ($V_o=54.3V/I_o=1.20A$)



図 17 バッテリー



図 18 装置外観

3. 実証試験

実証試験の前に、水車の代わりに電動機を使用した試験を行った。以下にその結果を示す。

回転数/発電機電圧/電流/電力
 61rpm/25V/0.5A/13W
 110rpm/44V/1.0A/45W
 151rpm/53V/1.6A/80W
 201rpm/65V/1.84A/110W

発電機特性試験より、この試験値は最大電力動作点であることから、最大電力追従制御が良好に機能していることが分かった。

図 19 に現地に設置した実証試験の様子を写した写真である。水車の左方に設置された箱が本装置であり、写真図 18 の盤をさらに環境対策のため覆っている。

まだ、本稼働に入っていないため、詳細データを取得していないが、以下の結果を得られた。

電力：最大 110W
 電圧：最大 280V
 電流：最大 2.0A



図 19 装置設置風景

4. 結言

水路使用許諾等の手続に時間を要したため実証試験実施が遅れ、設置後 2 週間程度の稼働であるが、基本的な動作の確認が出来た。さらに、今後 1 年間の実証試験の中で、問題点等の洗い出し、改善を行い、実用化へ繋げていく予定である。

最後に、近年の米国、それに続く我が国政府の政策により太陽光発電のさらなる推進がなされている。一方、本県会津地方等雪国地域は太平洋沿岸地域に比べて、かなり日射量(特に、雪期間)が低下する。しかしながら、雪国地域であるが故、雪解け水等の豊富な水資源、マイクロ水力に適した環境が存在する。エネルギー政策に於いても、地産地消的な地域に合った政策を期待したい。

参考文献

- 1) “パワーエレクトロニクス回路”、電気学会 半導体電力変換システム調査専門委員会、2000
- 2) “スイッチング電源ハンドブック”、原田耕介監修、日本工業新聞社、1993
- 3) “スイッチング・レギュレータ設計ノウハウ”、長谷川彰、CQ 出版社、1985
- 4) “SPICE による電子回路設計入門”、松本敏之訳、CQ 出版社、1992

第 5 章 実証試験

小水力発電の実証試験について

小水力発電の実証試験について

Field-test of small hydroelectric power generation

福島県ハイテクプラザ 遠藤勝幸・大内繁男

株式会社中川水力 宍戸俊一

有限会社エイチ・エス・エレクトリック 関本英雄

本事業で開発した水車、発電機、インバータを統合し、屋外における小水力発電の実証試験を行う。実証試験の場所として、喜多方市の道の駅「喜多の郷」に隣接する、農業用水路である八方池の分土工を選択した。河川法 23 条に基づく申請手続きなどを行い、実証試験のための設備を設置した。本設備を用い、平成 22 年から設備の総合性能の検証及びかんがいへの影響等を検証する試験を開始する。

Key words:小水力発電、河川法

1. 緒言

本研究事業「新エネルギー用マイクロ発電システムの開発」では、風力発電と水力発電を想定し、これらに必要な、発電機、インバータ、風車、水車等の要素技術を開発した。

しかし、これらの要素技術が実際の環境において有効に機能するかどうかを、これらを統合した発電システムを構築し、想定する環境に近い環境での動作試験を長期にわたって行い、総合性能として検証することが必要不可欠である。そこで、発電設備の小水量発電に関して実証試験の実施を計画し、その準備を行った。

本実証試験によって得られる知見を、各要素技術にフィードバックし製品開発に活用するとともに、設置と運用によって得られることが期待される各種手続きや設備運営の知見を、今後の小水力発電の普及のための参考として提示することを、実証試験の目的とする。

本報告では、小水力発電の実証試験の計画内容、設置に要した許認可手続き、設置した設備の概要等について述べる。なお、実証試験そのものは平成 22 年から実施を予定しているものであり、その結果について本報告では詳しくは言及しない。

ここで、最大出力 100 kW 以下の水力発電は、NEDO における分類¹⁾等ではマイクロ水力発電と呼ばれることがあり、本実証試験の想定出力(最大 210W)はこれに該当するとも考えられるが、本報告では「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」(RPS 法)および「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」(新エネ法)の分類に従い、「小水力発電」と称することとする。

2. 実証試験場所の選定

本研究で実施を計画している住環境を想定した実証試験を行うため、水車等を設置する場所の選定を行った。選定に当たって考慮したのは、主に以下の 3 点である。

- ・都市部等で多く見られる落差の小さい水路であること

- ・設置工事が容易であること。
- ・想定する発電量(100 W ~ 400 W)のために必要な十分な流量が確保できること。

上記に基づき県内数ヶ所を検討し、喜多方市の道の駅「喜多の郷」に隣接する八方池の分土工(喜多方市松山町鳥見山字山ノ下 46 番地)を選定した。ここは農業用水路の一部であり、押切川から八方頭首工を介して取水しているものである。上流の日中ダムを水源としており、安定した十分な流水が確保できる。十分整備された農業用水路であり、設置工事も容易と考え

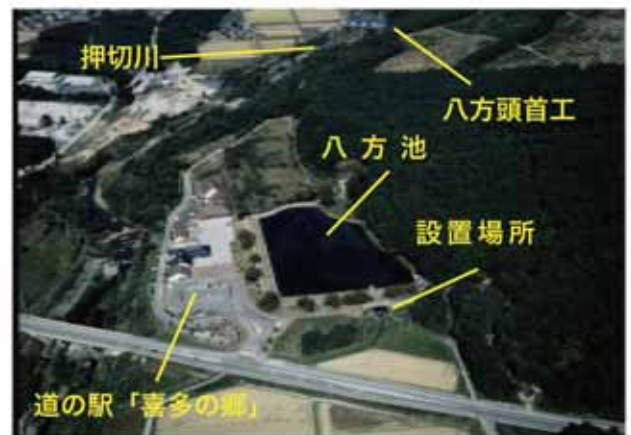


図1 設置場所



図2 分土工

られる。さらに、隣接する道の駅「喜多の郷」は利用客が多く、小水力発電のPRや新エネルギーの啓発にも最適な環境であると考え。選定した喜多の郷の航空写真を図1に、分土工の写真を図2に示す。

3. 実証試験概要

本実証試験は、(株)中川水力の開発した下掛け水車、(有)エイチ・エス・エレクトリックとハイテクプラザの開発したインバータ、および東北大学が開発した永久磁石式リラクタンスジェネレータを組み合わせ、前記八方池の分土工に、これらを設置することによって行う。

実証試験の主な内容は、表1に示すとおりである。

表1の試験期間は、平成22年1月現在の予定であり、実証試験の状況によって変動する。

最大取水量は、別項で述べる河川法23条の許可に付随する水利使用規則によって制限される取水量であり、これを上限に変動することとなる。

想定最大発電量は、最大取水量時の想定される発電量である。実際は、水車や発電機等の効率により、これを下回るものと予想される。実際の値を求めることも、実証試験の目的のひとつである。

採取データの①水位は、分土工に取り付けた量水標をデジタルカメラで定期的に撮影することにより求める。②の水車回転数とトルクは、水車と発電機の間に取り付けられたトルク検出器の出力を、データロガーにより常時サンプリングすることによって求める。③の発電機出力電圧と電流、および④のインバータの出力電圧と電流は、インバータにこれらの値を出力する機能を設け、これをデータロガーにより常時サンプリングすることによって求める。なお、トルク検出器やデータロガー等に必要の電源は、本発電設備の出力によって賄うこととする。⑤の流量は、適宜、流速計等を用いて測定する。

表1 実証試験内容

試験場所	八方池分土工
試験期間	平成22年1月～平成23年3月(予定)
最大取水量	0.320 m ³ /s
想定最大発電量	210 W
採取データ	①水位 ②水車回転数およびトルク ③発電機出力電圧、電流 ④インバータ出力電圧、電流 ⑤流量 ⑥耐久性、水質への影響等
その他	LED照明等を設置

このほか、1年程度の期間における耐久性、水質への影響、下流のかんがい用水の流量への影響などを調

査し、上記各種データと併せ、本小水力発電設備の総合的な能力を検証する。

さらに、LED照明やイルミネーションを設置し、一般への小水力発電の啓発とPRを行う。

4. 水利権

4.1 必要な許認可

一般に、水力発電施設を設置し、運営するためには、河川法や電気事業法など各種法律に基づいた許認可の手続きが必要となる。本実証試験においては、取水する押切川が一級河川阿賀野川水系に属することから、河川法23条に基づく水利使用の許可(いわゆる水利権)を、国土交通省から得る必要がある。

電気事業法に関しては、本実証試験の出力は10kW以下(最大210Wを想定)であるため、一般電気工作物となり、許認可は不要である。

また、系統連携や売電を行う際には、電力会社との契約手続きが必要になるが、本実証試験では系統連携と売電は行わないので、この手続きも不要である。ここでは、本実証試験のために要した河川法23条にかかる手続きの概要について説明する。

4.2 許認可手続き

水利権を得るために要した手続きの概要を図3に示す。図3において、太線の矢印が申請者が行った手続きであり、丸囲いの数字が行った手続きの主な順番である。

詳細は煩雑であるため省略するが、図3に示すように、水利権の許可権が国土交通大臣から委任されている北陸地方整備局長への申請のほかに、本発電が従属するかんがい用水利権を許可されている農林水産省との協議や、水路を管理する会津北部土地改良区と県への申請、および県や市との調整などが必要である。

4.3 申請時の提出資料

河川法23条の申請のため国土交通省北陸地方整備局に提出した資料を表2に示す。これは、河川法施行規則第11条に基づくものである。ただし、本実証試験は「他の水利使用に従属する小水力発電」に該当し、許可申請書に添付する図書のうちいくつかは略される。

農林水産省や、会津北部土地改良区等に提出した資料も、ほぼ同様のものである。

4.4 許可後の手続き

前述の手続きにより許可が得られた後、実証試験設備の設置工事を開始するにあたり、北陸地方整備局宛に、工事着手届けを提出する。

設置工事が終了すると、北陸地方整備局による工事の完成検査を受けるため、検査申請書を提出する。工

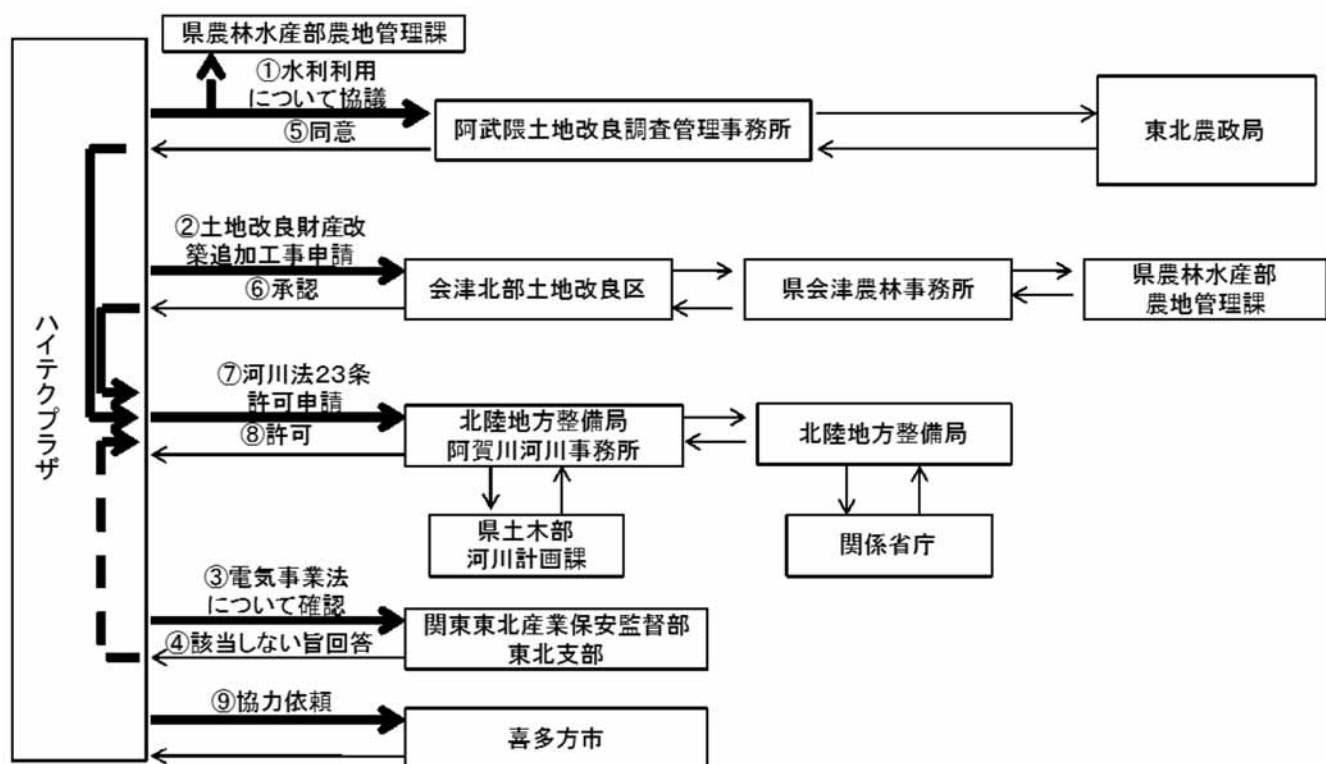


図3 許認可手続き

表2 河川法23条の申請資料

許可申請書本文
水利使用に係る事業の計画の概要
使用水量の算出根拠
諸計算書（使用水量・発電量計算、構造計算）
工程表
概算工事費
添付図面（位置図、航空写真、水利地図、計画用水系統模式図、頭首工別所要水量、平面図、実測平面・縦横断面図、工作物図面）
現況写真
公図
農林水産大臣の同意文書
土地改良財産改築追加工事にかかる会津北部土地改良区理事長および福島県知事の承認書

事が竣工したことは、北陸地方整備局のほか、土地改良区と県にも届け出なければならない。

完成検査が実施され、合格を得た後、発電設備を用いた実証試験が開始できることとなるが、取水開始の前に、県に対する取水届けを提出する。

このほか、水利使用規則に基づき、実証試験中における毎日の使用水量の記録及び提出が必要となる。

5. 実証試験設備

5.1 設備概要

上記実証試験を行うために、八方池分土工に設置した試験設備の設置平面図を図4に示す。

図に示すように、八方池からの水流は、静土工から、堰の切り欠き部に設置した導水路を通して水車に導かれる。水車の回転は、30倍の増速器とトルク検出器

を介して発電機に伝えられ、発電した電力はインバータに入力される。インバータにより100V・50Hzの交流に変換された電力は、測定ボックスの測定器とLED照明、LEDイルミネーション用の電力として使用される。説明用看板の方向から撮影した、設置した試験設備の全景写真を、図5に示す。

5.2 安全対策

本実証試験設備は、観光客の集まる施設に設置しているため、安全対策が必要である。

対策として、水車の周囲を高さ2.5mのフェンスにより囲った。また、電力変換機と測定ボックスの周辺を、立ち入り禁止の鎖により囲った。さらに、説明用看板に注意喚起の説明文を掲載している。

万が一事故がおきたとき、水車を停止させるため、導水路には流水を停止させる板を設置した。なお、この板は、試験中の流量の調整にも用いる。水車への流水を停止させても、八方池からの流水は堰を越水して下流へ流れるため、かんがいへの支障はない。

6. 試験結果の例

設置した設備を用いた実証試験は平成22年からの開始を計画しているが、調整のための試験運転を行い、基本的なデータを採取した。その結果を表3に示す。表3は、水車への入力やインバータの出力を得ておらず、設備の総合的な性能は評価できないが、発電量としては概ね良好な結果が得られていると考えられる。

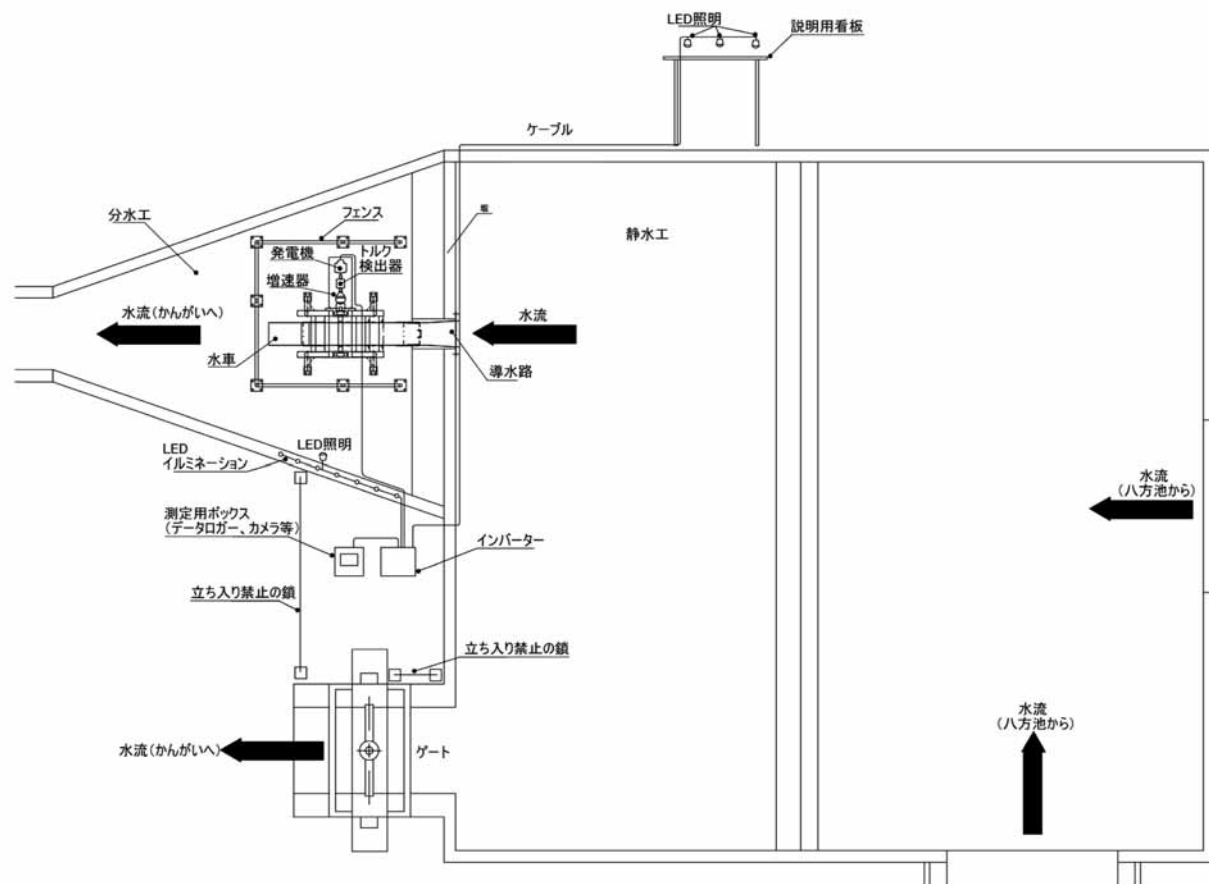


図4 実証試験設置平面図



図5 実証試験設備全景

表3 試験結果例

月 日	12/26	12/28	1/2
水車回転数 (rpm)	5.2	4.1	5.5
発電機回転数 (rpm)	155	123	166
発電機入力トルク (Nm)	6.76	6.80	4.44
発電機機械入力 (W)	110	88	77
インバータ入力電圧 (V)	80	50	85
インバータ入力電流 (A)	0.95	1.5	0.7
インバータ入力電力 (W)	76	75	60
発電機効率 (%)	69	85	77

なお、この結果は、非かんがい期に行ったものであり、取水量が小さいものである。5～6月のかんがい期には、非かんがい期の2.5倍程度の取水となるため、これに応じて出力も増加するものと考えられる。

7. 結言

本事業で開発した水車、発電機、インバータを用いた小水力発電実証試験設備を設置した。平成22年より、本設備を用いた実証試験を開始し、屋外環境下での総合的な性能の検証等を実施する予定である。

なお、本報告で述べた水利権に関する手続きは、あくまで今回の実証試験に必要であったもののみであり、河川事務所等の担当機関からの指導に基づくものである。電気事業法についての許認可が不要であることも、担当機関に確認の上のものである。今後、小水力発電に取り組む場合、それが簡易で短期間のものであっても、設置する水路に応じて必要となる許認可手続きについて、必ず河川事務所等の担当機関に確認の上、しるべき手続きを行うべきである。

参考文献

1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)：マイクロ水力発電導入ガイドブック、p.13

謝辞

本研究開発事業の遂行にあたり、喜多方市様、会津北部土地改良区様、喜多方市ふるさと振興株式会社様には、「喜多の郷」への水力発電システムの設置に関し、多大なるご協力をいただきました。日本大学工学部土木工学科 高橋 迪夫 教授には、水利計算に関するご指導をいただきました。波田町様、都留市様には、水力発電システムの設置、運営に関するご指導をいただきました。NPO 法人環境保全会議あいづ様には、自然エネルギーの活用に関するご指導をいただきました。国土交通省北陸地方整備局阿賀川河川事務所様、東北農政局阿武隈土地改良調査管理事務所様、関東東北産業保安監督部東北支部様には、実証試験にかかる許認可の手続き等に関するご指導をいただきました。東京発電株式会社様には、小水力発電に関するご指導をいただきました。本研究に関する推進会議にご出席いただきましたコーディネータの皆様には、本研究の進め方に関してご指導をいただきました。福島県ハイテクプラザ前所長宮野壯太郎様には、本事業全般に関するご指導をいただきました。

多大なるご協力、ご助言をいただいた皆様に改めて感謝いたします。

福島県ハイテクプラザ研究報告書

Technical Reports of Fukushima Technology Centre

新事業創出プロジェクト研究事業

新エネルギー用マイクロ発電システムの開発

発行

福島県ハイテクプラザ

〒963-0215 福島県郡山市待池台1丁目12番地 郡山西部第2工業団地内

TEL 024-959-1739(直通) FAX 024-959-1761

編集

福島県ハイテクプラザ

技術開発部 プロジェクト研究科

※この研究は、電源立地地域対策交付金により実施した事業です。

