

# スーパーマイクロ水力発電機の製作と性能改善

ーカーボンニュートラルの実現をめざしてー

兵庫県立洲本実業高等学校 電気科 3年

太田 丈一郎 曾我部 拓実 鯛 海玖 橋本 彪雅 吉田 陸人

## 1. はじめに

風力、水力、太陽光といった再生可能エネルギー（再エネ）利用技術の開発は、エネルギーの純国産化につながり、我が国の国益に資するだけではなく、世界中から期待が寄せられるカーボンニュートラルの実現のためにも不可欠な技術である。

本校電気科では、これまで風力発電機の高性能化のために、原動機と発電機の整合化が総合効率を高めるという実験結果を報告した（植野）<sup>1)</sup>。また、プロペラ風車の諸課題を解決するために、新たにマグニウス風力発電機を開発し、総合的なエネルギー回収率の向上をはかるという風車開発のあり方を提案した（岩脇ら）<sup>2)</sup>。さらに、幅広い風速域にわたり有効利用できる横軸風車を新たに提案してきた（田村、谷岡ら）<sup>3~4)</sup>。

さて、小水力利用技術は、設備利用率が70%と極めて高く、太陽光発電と比較して5~8倍の電力量が発電でき、出力変動や系統安定、電力品質に影響を及ぼすことが少なく、加えて経済的であることが知られている。他方、設置場所が限定され、同じ再エネでも、潜在力の高い小水力にも拘わらず一般市民の認知度が低いという欠点がみられる。

そこで、このような課題を少しでも解決するために、低落差、低流量のような環境においても、静かに回転し発電するスーパーマイクロ水力発電機を開発を行った（以下、マイクロと記す）。

本研究では、これまでの水力発電技術のあゆみを踏まえた上で、製作した水車の原動機と発電機の特性を向上させた結果、マイクロ水力発電機の性能が大幅に改善できたので、その内容を報告する。なお、このマイクロ水力発電機は、水車街路灯として、市内の山間部に設置され、学習用教材としても活用されている。

## 2. スーパーマイクロ水力発電機の開発

### 2.1 我が国の水力発電技術のあゆみ

本項では、我が国の近代化に貢献した水力発電技術のあゆみについて述べる。

明治期の第一期では、火主水従で小規模火力が電源の主力である分散電力網で始まり、京都では琵琶湖疎水によるペルトン水車を利用した蹴上発電所が操業した。戦中・戦後期である第二期は、水主火従で大規模水力開発の幕開けとなった佐久間ダム発電所、黒部の太陽でおなじみの黒部川ダム発電所などの大型化が進められ遠距離送電網が張り巡らされた。高度経済成長期の第三期は、火主水従となり原子力発電などの大規模電源が中心となりエネルギーバスターミクスが指摘された。21世紀の第四期では、再生可能エネルギーの普及によりスマートミクスが進められ、電力のネットワーク化が図られている。

図1は、県内で実際に使用されていたペルトン水車のバケットである。内面は鏡面状に研磨され、中央部には鋭い水切りが設けられており、噴流の向きを2方向に変えることで、ジェット前後でぶつかることないように工夫されている。また、先



図1 ペルトン水車のバケット実物  
(2005. 8. 24 撮影)

端部の切り欠き形状により相互干渉が少なくすむように設計している。

このような工夫により、関西電力黒部川第四発電所用 98,400kW 縦軸 6 射ノズル形ペルトン水車模型試験の結果、最高効率 90% を超える性能が得られている(山本)<sup>5)</sup>。なお、この発電所は 2010 年 IEEE マイルストーン賞を国内電力分野で始めて受賞している。

以上、我が国の電力の安定供給を力強く支えるためにも、潜在する小水力を利用する技術と共に地域に貢献できる技術者育成のための工業高校教育への期待が一層高まっている。

## 2. 2 マイクロ水力発電機の開発

本項では、これまでの本校のマイクロ水力発電機開発について述べる。

図 2 に、高さ 370mm×幅 520mm×奥行 380mm のマイクロペルトン水力発電機の全体図を示した(長尾ら)<sup>6)</sup>。ハウジングは、厚さ 10mm のアクリル板を用いた。噴射ノズルは 1 射と 2 射の切り替え可能な方式を採用し、ピッチ径  $\phi 160\text{mm}$ ×バケット数 8 個、 $\phi 180\text{mm}$ ×バケット数 12 個、 $\phi 260\text{mm}$ ×バケット数 16 個の 3 種類のランナで出力特性が比較できるように製作した。なお、バケット数は噴流がうまくバケットに当たると予想される数を各ランナに対して選んだ。発電機には自転車用発電機(6V、2.4W 仕様のハブダイナモ)を 1 つ採用した。



図 2 洲実製マイクロペルトン水力発電機

図 3 に、今回開発した高さ 470mm×幅 600mm×奥行 310mm のマイクロクロスフロー水力発電機を示した。ピッチ径  $\phi 330\text{mm}$ ×ブレード数 12 個のランナで構成している。ブレード形状は、半円形で直径  $\phi 75\text{mm}$ ×全長 340mm、茶色のプラスチック製とし、排水されやすいように傾斜させた。ハウジン

グを設置せず、ハンディタイプの水力発電機としている。発電機には自転車用発電機(6V、2.4W 仕様のハブダイナモ)を 2 つ設置した。



図 3 洲実製マイクロクロスフロー水力発電機

このマイクロ水力発電機の開発については、課題研究(3 単位)にて実施した。「地球温暖化とカーボンニュートラル」、「水力発電技術」、「マイクロ水力発電機の開発」の 3 つで構成した。とくに、原動機サイドの性能改善と発電機サイドでは自作した同期検定灯により位相調整を行い、電気出力を高めることで、総合効率向上を図った。改善内容については、次項で述べる。

## 2. 3 マイクロ水力発電機の性能改善

### (a) 原動機サイドの性能改善

表 1 に、水車の性能改善のための対策案を示す。

表 1 マイクロ水車の課題と対策案

項目	課題	対策案
①	・噴流力の向上	・角度 $\beta$ の最適化 ・バケット加工方法 ・トルク計の自作
②	・相互干渉	・噴流ノズルの設置位置と長さ寸法
③	・噴流ノズル径	・バケット表面積とノズル断面積比の最適化

項目①は、水車のバケットに関わる内容である。図 4 に、製作したバケットと噴流実験の様子を示す。噴流の跳ね返り角  $\beta$  は、通常は 4 から 15 度であるが、加工上の問題から約 45 度となった。理論的には約 15% 程度出力ダウンと試算されたが、これにより、噴流がバケットの当たる前後の干渉はなくなり、かつ直前のバケット背面への跳ね返り噴流が防止され、出力向上につながった。

項目②は、噴流ノズルに関わる内容である。通



図4 マイクロペルトン水車のバケットと噴流実験

常ノズルは、1射目のノズルと2射目のノズルとが近接していることで相互干渉を興すことが報告されている。そこで、左右に相対する位置に設置した。ここで、上部に設置された1射目の噴流水がケーシング内部で排水され降下することで、下部にある2射目の噴流水との間で干渉を興すことが実験で確認できた。水量を増やしたとき顕著にみられた。

そこで、噴流ノズル（AL製）をランナバケットの近くまで延長する設計に変更した。この寸法変更により、全開放（コック全開）時の水車出力が約17%の向上がみられた。

項目③は、噴流ノズルとバケットの関係に関わる内容である。噴流ノズルの内径を大きくすると、ノズルに衝突する流量が多くなるメリットがある。一方で、大きくし過ぎると水圧が低下し流速が低下することも知られている。水道管内径はφ13mmであることから、ノズル内径をφ6mmと約21%に絞り流速を向上させた。また、バケット表面積に対するノズル断面積の比を約0.125倍とし、噴流水拡散現象にも対応できる設計とした。

図5に、マイクロ水車の出力実験結果を示した。縦軸には水車出力とトルクを横軸にはランナ回転数を示す。トルク値は若干の誤差がみられるがほぼ1射、2射とも直線的なデータが得られた。このことから自作したトルク計の有効性も確認できた。実験の結果、水車出力は1射の5.4Wに対して2射では11.9Wが得られた。約2倍以上の出力向上がみられた。このことから、ペルトン水車における多射ノズル構造の有効性が示された。

以上、マイクロ水車の設計改善を行った結果、水車出力実験により、出力向上が測定でき、ハブダイナモとの出力整合が計られていることが確認できた。次に、発電機の性能改善にも取り組んだ。

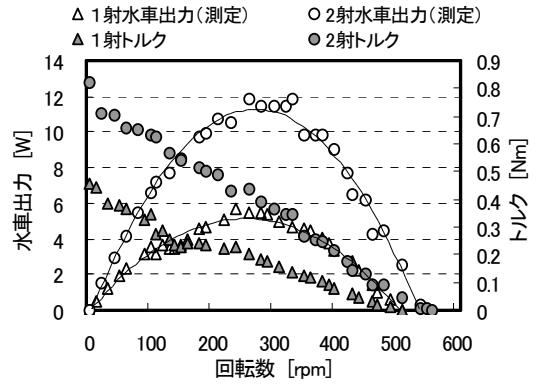


図5 マイクロ水車の出力特性

(b) 発電機サイドの性能改善

並行運転時には、電圧、電圧波形、周波数が等しく、同位相であることが基本条件である。図6に、課題となっている並行運転時の位相特性について示した。このベクトル図は、 $E_a$ と $E_b$ に位相差がある場合で、 $E_a$ 側の遅れ電流が $E_b$ 側に流れ込むことで $E_a$ 機側は位相が遅れ、 $E_b$ 機側は位相が進み、結果として両機の起電力の位相差が同じになることを説明している。この場合、両機は互いに独立した水車などの原動機で運転されているものとする。たとえ差があっても、その差を自然に打ち消しあい、安定させる方向に向かうことは、よくみられる現象でもある。

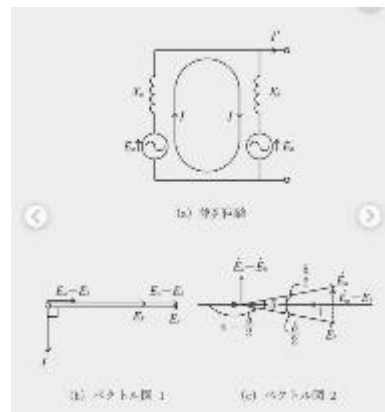


図6 並行運転時の位相特性

表2に、発電機の課題と対策案を示した。

項目①は、発電機のコギングトルクに関する内容である。コギングトルクを小さくしようとする同期が外れ、逆に、2つの発電機の出力整合を優先すればコギングトルクは大きくなる。そのときのトルクをゲージで計測すると、全負荷時約

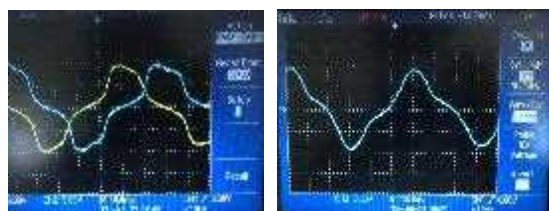
表2 発電機の課題と対策案

項目	課題	対策案
①	・コギングトルク	・始動時は無負荷運転から
②	・並行運転時の同期化	・電圧、周波数、位相 ・同期検定灯の自作

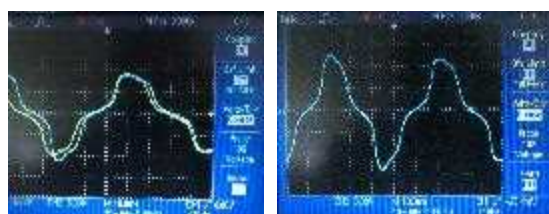
0.38Nmとなったが、無負荷時約0.20Nmとなった。いずれの場合でも前述の水車原動機の最大トルク値よりも低い値であることが確認できた。出力整合を優先し始動をスムーズにするためには無負荷運転からが望ましいと考えられる。

項目②は、並行運転時の同期化に関する内容である。周波数と位相が完全に一致していないと、2つの発電機に接続された自作した同期検定灯の $L_a$ 、 $L_b$ は明るさを変えながら点滅するが、完全に一致すると同じ明るさになる。この検定灯を用いて、発電機の最小ピッチ角 $\pi/9$ [RAD]から、ランナと発電機との固定位置をずらしつつ同期を取る調整ができた。

図7に、一つの水車原動機に接続された場合における並行運転時のオシロスコープによる測定結果を示す。(a)は、同期前の発電機電圧 $E_a$ と発電機電圧 $E_b$ の位相差と並行運転させた時の母線電圧



(a) 同期前の $E_a$ と $E_b$ 位相及び母線電圧の波形



(b) 同期後の $E_a$ と $E_b$ 位相及び母線電圧の波形

図7 並行運転時の同期化

の波形を示す。無負荷状態での位相差と母線電圧波形が確認できた。(b)は、同期後の発電機電圧 $E_a$ と発電機電圧 $E_b$ の位相差と母線電圧の波形である。位相差がなくなることで、母線電圧は安定した波形が得られ、同期前後の母線電圧を比較した

とき、52%(1Ω重負荷時)と著しい向上がみられた。

以上、水車原動機の出力向上と共に発電機の出力向上も図ることができ、負荷特性実験からマイクロ水力発電機として約31%もの性能向上ができた。

### 3. まとめ

マイクロ水車の噴出ノズルやバケット、水車ランナ部などの設計見直しを行った結果、水車原動機の出力改善ができた。さらに、発電機2つを並行運転するために、自作した同期検定灯を用いつつ位相調整したことで発電出力が著しく向上した。すなわち、マイクロ水力発電機の性能が大幅に改善できた。なお、これらのマイクロ水力発電機は、水車街路灯として、市内の山間部などに設置され、学習用教材としても活用されている。

### 参考文献

- 1) 植野裕介;「小型プロペラ型風力発電装置の開発」平成25年度産業教育振興中央会生徒研究文・作文コンクール(2013)
- 2) 岩脇陸斗、除補博之、除補順之、神代瑛介、皿袋雅大、吉田勇樹;「人と環境にやさしいマグニウス風力発電機の開発」平成27年度産業教育振興中央会生徒研究文・作文コンクール(2015)
- 3) 田村銀河、登森慎悟、水田海人、宮尾実里;「人と自然の豊かな関係をきづく社会実現に向けて」平成28年度産業教育振興中央会生徒研究文・作文コンクール(2016)
- 4) 谷岡涼、古岡大輝、松本和太、緑樹宏斗、山本碧;「エネルギー自立社会をめざすマグニウス風力発電機の開発」平成30年度産業教育振興中央会生徒研究文・作文コンクール(2018)
- 5) 山本景彦;「ペルトン水車設計上の諸問題」昭和36年水力発電機特集号第2集、日立評論別冊第41号
- 6) 長尾伸洋、小川武範;「工業高校における効率の概念学習案とその実践」日本産業技術教育学会誌第49巻第3号(2007)