

農業用水を利用したマイクロ水力発電システムの開発

石川県立大学 環境科学科 瀧本 裕士

1. 研究の目的

これまで電力エネルギーは大規模集中型方式で地域への供給が行われてきた。この方式は供給効率の点では良いものの、環境への負荷や莫大なコストが掛かることから新たな開発は困難と思われる。そこで近年、大規模集中型に対して、環境への低負荷および低コストで導入可能な自然エネルギーを利用した地域分散型のシステムが注目されつつある。太陽光や風力に比べ、マイクロレベルの水力はほとんど普及していないのが現状であるが、エネルギー密度が高く安定したエネルギー源を確保できる点で優れている。そのようなことから、CO₂削減に向けた取り組みの一環としても地域に根ざしたマイクロ水力発電システムの導入が期待されている。これまで水力開発の行われなかった平野部において豊富に存在する農業用水を利用し、低流量・低落差の条件下でも効率良く稼働する小型水車を開発することは、マイクロ水力発電システムの核となる重要な課題である。

本研究の目的は、農業用水の落差工に注目し、規模の小さい水力の条件下でも効率よく稼働し、かつ維持管理が容易で耐久性の優れた水車を設計し開発することである。水車は大規模発電に適した形での技術は確立されているが、スケールメリットの得られない小規模発電での技術開発は全く進んでいない。従来の水車を小型化しただけでは使い物にならないことから、新たな技術開発が必要である。

このような課題を踏まえ、本研究では新しいタイプの水車を考案し、低コストかつ高効率のシステムを開発することに成功した。以下にその詳細について述べる。

2. 高効率小型水力発電装置の開発過程

2.1 小型化に伴う発電効率の低下

水力発電装置を開発する際に核となるのは水車である。水車が水のエネルギーを効率よくキャッチし、羽根で得られた動力を安定的に発電

機へ接続することが重要である。

これまで行われてきた大規模水力発電では、発電効率が80%近く得られ、水車効率は90%以上発揮されているものと思われる。この高い効率を誇る実績が水力発電のメリットであり、技術的にも確立されていると言われる理由である。しかしながら、大規模水力発電の技術を小規模レベルで適用してもうまく行かない事例が多いのも事実である。

図1は、全国の事例を基に発電規模と発電効率の関係を調べたものである。ここで発電規模として理論出力を用いることとした。理論出力は、重力加速度を g 、落差を H 、流量を Q としたとき、 gHQ で算出される。これは物理的に発電できる最大量を示す。図1より、発電規模が小さくなるにつれ、発電効率が低下していることがわかる。特に数kWレベルでの発電効率は平均で40%である。この要因として、マイクロ水力発電では流水の変動を受けやすいこと及び発電機とのマッチングが難しいこと等が挙げられる。

本研究では、小規模ながらも効率の高いマイクロ水力発電システムを開発することを目標としており、実用化に向けた技術的課題に取り組んだ。

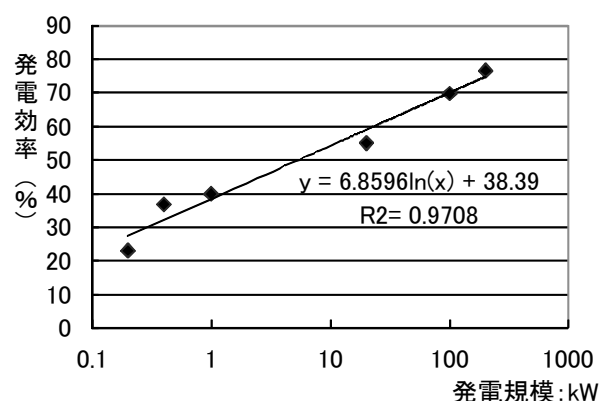


図1 水力発電規模と発電効率の関係(全国60箇所の事例データを整理し、発電レベルに応じてグループ化し発電効率の平均値を算出した。データの出典は、小水力発電事例集2007、全国小水力利用推進協議会)

2.2 らせん水車の特性と問題点

本研究ではまず、富山県の産業遺産であるら

せん水車に着目した（写真1）。らせん水車は、大正時代に砺波市の鍛冶職人によって作られた水車であり、当時は農業用動力源として用いられていた。低流量・低落差の条件下においても安定的に動力が得られることから、全国でも1万台以上普及したと言われている（宮崎 2006）。



写真1 南砺市高屋地区で保存されているらせん水車（羽根の直径90cm、長さ1.8m）

アルキメデスの揚水ポンプと類似したらせん水車は、経験的に作製されたものであり、水利条件に対する動力特性等のメカニズムは明らかにされていない。そこで、株式会社北陸精機では、現物らせん水車の1/2モデルを作製し、富山県立大学と共同で、動力特性の実験を行った。傾斜式開水路にらせん水車を設置し、動力特性および発電特性の計測を行った。まず、動力特性についてであるが、一例として設置勾配25°の状況を図2に示す。

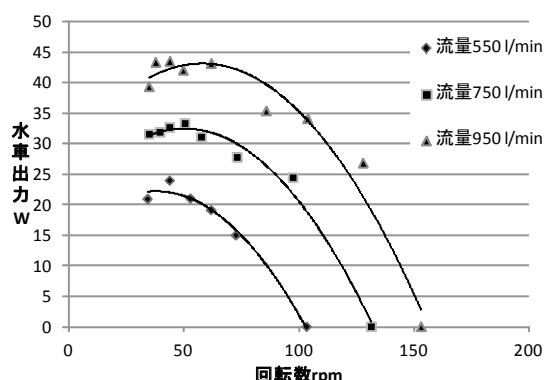


図2 らせん水車の動力特性曲線

流量に比例して出力（＝トルク×回転数）が増加していることがわかる。最大出力は概ね回転数が50rpm付近で発生している。出力ピーク時の曲線勾配はほぼフラットであることから、

水車回転に負荷をかけてもすぐに停止することなく粘り強く回転し続けようとする特性が読み取れる。すなわち粘り強い安定した動力が得られていると言える。水車効率は50%程度であるが、水車稼働中に水漏れが発生しエネルギーロスが見られた（写真2）。

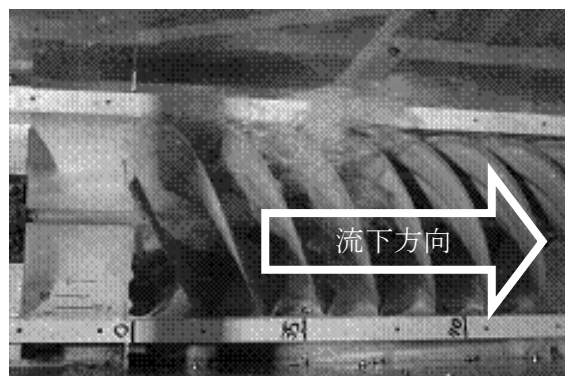


写真2 水漏れの様子

これは水流の運動エネルギーが大きい場合に生じる現象である。写真中、流下方向に対して水車への流入水は勢いを保ったまま羽根を伝わっていき、羽根が一周回転したところ（水車の中央部）で水漏れが発生する。したがって水流制御や水漏れ防止の工夫が必要である。簡便な方法としては、水車外周にカバーを取り付けて水漏れを防止することが考えられる。この方法で実験を行ったところ、急勾配の場合には効率が約8%向上したが、低勾配の場合には逆に効率が低下した。水漏れが水車羽根に対して抵抗として作用したためであると考えられる。水車の動力特性を向上させるためには、水の位置エネルギーを最大限に生かせるような設置法、水車羽根構造の改良が必要である。

次に発電特性を計測するために、増速機と発電機を取り付けて実験を行った（写真3）。

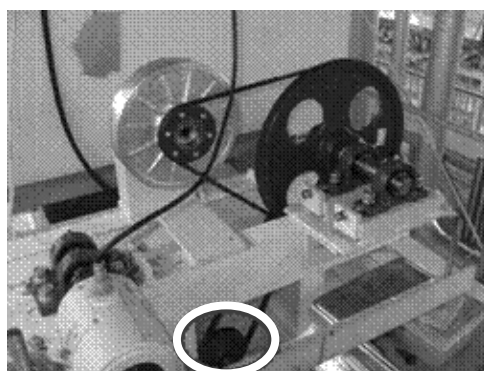


写真3 増速機、発電機の設置

まず、発電可能な最低流量を調べたところ、 $0.05\text{m}^3/\text{s}$ ($3000\text{ l}/\text{min}$) であった。設置勾配が 25° の時、発電出力は 150W であり、発電効率を算出すると 25% 程度である。発電効率の値そのものは低い、水路の摩擦損失、機械損失、増速によるロスエネルギー、発電機によるロスエネルギー等の影響があることから正味の効率はもっと高いと考えられる。なお、本調査では流量と発電出力の関係を求めようとしたが、流量を増加させるとプーリー（写真の白丸部）が水没してしまい、増速機を繋ぐベルトがスリップしてしまった。この影響により多様な流量変化に応じた発電特性を解明することはできなかったが、スリップしないような工夫を施せば、数百Wレベルの発電が可能になると期待できる。

維持管理上、農業用水等の水路を流下するゴミ対策も考えておかなければならない。本実験装置においてペットボトル、空き缶、ひも、布、ビニール、枝、葉を流してみたところ、ほとんど問題なくゴミを流下させることができた。ただし、長いひもや大きなビニールは羽根に絡む傾向にあり、流入時に除去しておくことが必要である。

2.3 鉛直型らせん水車の特徴と問題点

らせん水車は歴史的に傾斜勾配で適用され、効率的に能力を生かすには勾配が $20^\circ \sim 25^\circ$ で設置することが望ましい。しかしながら、勾配をできるだけ大きくとることは、落差を大きく取ることであり、発電ポテンシャルを高めることができる。また近年では、農業用水は整備され、落差工（農業用開水路で流下速度を軽減するために設けられた段差）が多く見られるようになった。落差工でらせん水車を適用する場合には、鉛直型に設置しなければならない。水車を鉛直型に設置することにより増速機や発電機部分が水流に触れない構造となる。すなわちスリップによるエネルギー損失は回避できるという利点がある。そこで、図3に示すような形で水車の性能試験を試みた。その結果、図3のような形では、ほとんど発電に適さないことがわかった。鉛直型では、水流の運動エネルギーと重力エネルギーにより回転トルクを発生させるが、一方で水車内に滞留する水が回転に対して抵抗となり、全体的な水車効率が低下してしまう。したがって、水車効率を向上させるためには水車の構造改良と共に、流水制御についても新しい方法を考えなければならない。

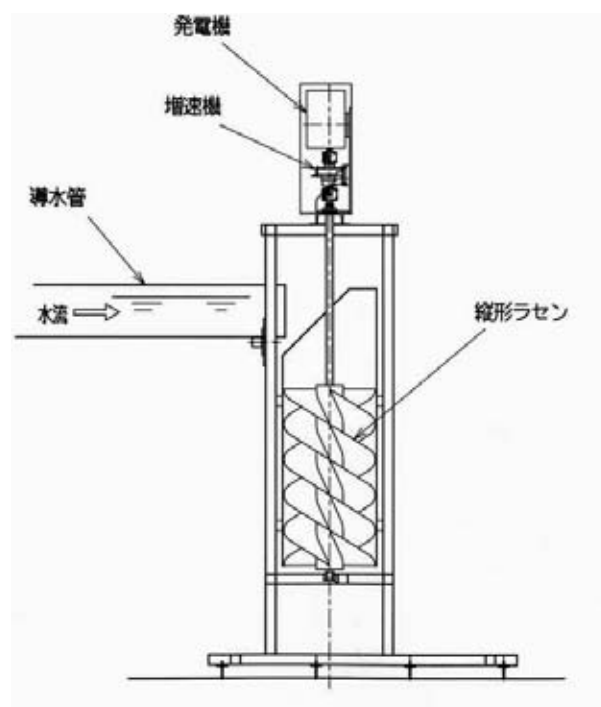


図3 らせん水車を鉛直に設置した例

2.4 改良鉛直型らせん水車

本研究では、これまで述べてきたらせん水車の問題点を踏まえ、新しく高効率の水車を開発しようと試みた。

富山県の扇状地を流れる農業用水では落差工が多く存在している。落差工での水流は滝のように鉛直に落ちることから、水車は位置エネルギーを利用するタイプが望ましい。らせん水車を鉛直に設置することで、増速機や発電機が水流にさらされる危険性がなく、維持管理を行う上でも有利である。しかしながら、ただ単に鉛直に設置しただけでは、先ほど述べたように水車羽根と水流の間に抵抗が生じてしまい、十分な効率を得ることはできない。実際に農業用水で $0.3\text{m}^3/\text{s}$ 、落差 1.5m の条件下で実証試験を行ったところ、 1kW 程度の出力（発電効率 23% ）しか得られなかった。水のエネルギーを水車羽根に効率よく作用させることが重要である。また、らせん水車は回転数が低いという欠点があるので、水車羽根の枚数を少なくして軽量化を図り回転数を増加させる工夫も必要である。そこで、本研究で試作する水車は、図4に示すように整流制御のガイドベーンを設置し、羽根枚数は2枚にするなどの改良を加えた（特許第 4558055号）。水車羽根の直径は 70cm 、全長は 2m である。

図4のシステムを農業用水の落差工に設置し、先述と同じ流況条件で実証試験を行ったところ、

出力 3.1kW，発電効率 70%と目標とする実用レベルにまで達することができた。

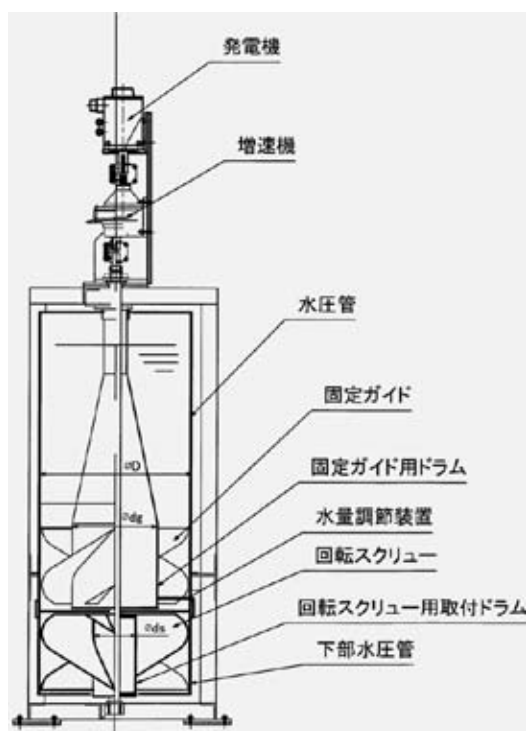


図4 改良鉛直型らせん水車

本研究では、富山県立大学の実験室で図4のシステムを導入し、流量の変化と発電効率の関係を調べることにした。実験室の送水ポンプ容量の関係で流量は $0.05\text{m}^3/\text{s} \sim 0.1\text{m}^3/\text{s}$ の低流量の範囲で実験を行った。実験では、まず三角堰と流路内の流速分布から実測流量を観測した。そして、流量の変化に応じて発電量を計測し発電効率を算出した。発電効率の算定で用いる有効落差は損失水頭の定量評価が困難であったことから実落差の2mとした。また、理論出力(= $9.8 \times Q \times H$)と発電効率の関係を図5に示す。図中の横軸は理論出力、縦軸は発電効率である。実験は低流量の条件下で行わざるを得なかったことから、発電効率は実証試験時に比べ低い値となっている。ただ、流量の増加と共に発電効率は向上する傾向にあり、 $0.1\text{m}^3/\text{s}$ の流量(理論出力で2kW程度)があれば発電効率は50%を超えることができる。なお、図5で理論出力4.41kWに対応する効率もプロットしているが、これは先述の現場実証試験の結果を加えたものである。実験データの外挿上に実証試験の結果が現われている。

らせん水車は水の位置エネルギーを巧みに利用できる水車であるが、流量が増加し図4の水

圧管に水が貯留する状態になれば圧力エネルギーも利用でき、発電効率の向上に繋がると考えられる。

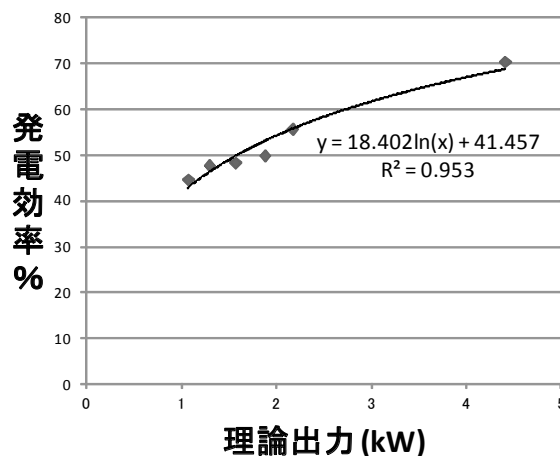


図5 理論出力と発電効率の関係

3. 新たな市場規模と用途開発について

3.1 農業用水落差工における包蔵水力の算定

本研究で開発された新型高効率水車は、多くの地点で活用されると期待できる。しかし実際にどのくらいの市場規模があるかという定量的なデータは無いのが現状である。そこで、石川県の事例を取り上げ、どのくらいの包蔵水力(未開発地域の水力ポテンシャル)があるのかを調査した。

石川県手取川水系の落差工を調査した事例結果を図6に示す。図6中のプロットは落差工の位置である。一つの扇状地に存在する落差工は600箇所以上あり、本開発水車の適用範囲がおおきいことがわかる。また、図6で色の濃い部分の地区ほど包蔵水力が豊富であることを示している。手取川七か用水扇状地の落差工では非灌漑期でも総計で6600kWの包蔵水力があることがわかった。

ところで本研究による開発品の水車発電システムは、既存の水路にそのまま設置できることから土木工事費の軽減が見込まれ、発電原価が1kWh当たり5円～8円と経済的な価格である。したがって、多くの箇所で導入されると期待できる。設置コストは、仮に太陽光発電や風力発電と同等あるいはそれ以下(200万円程度)であったとしても、一つの扇状地で十数億円規模の市場が潜在していることになる。全国的に見ても農業用水は水利用の内、約6割を占めている

ことから、全国的な市場は大規模なものになると期待できる。

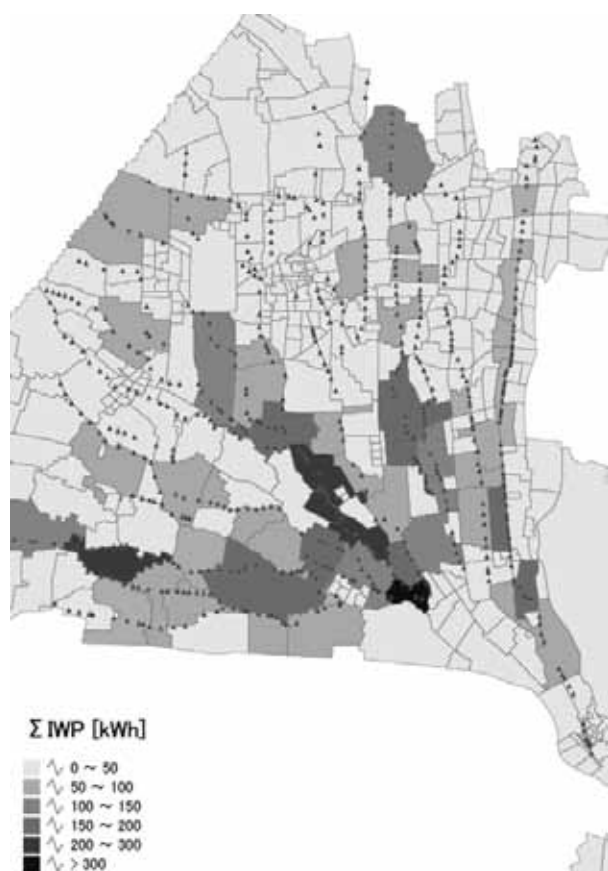


図6 手取川七か用水扇状地の落差工と包蔵水力

3.2 用途開発

エネルギーの地産地消を目指すマイクロ水力発電システムは、地域の特性に応じて多くの利用用途が考えられる。想定する利用用途を列挙すると以下のようになる。

- ・農作業用管理電源（作業小屋の照明、ビニールハウスの電源等）→農業利用
- ・防虫灯、有害動物へのサイレン→農業利用（安全かつ安心な農業生産に寄与）
- ・地域の街灯→自治体、地域住民の安全確保（防犯効果）
- ・自家発電による家庭用電源の確保→一般市民の暮らし
- ・公衆トイレの浄化槽用電源→自治体
- ・災害時の非常用電源→自治体、中山間地域住民
- ・通信用電源→通信関連企業
- ・電気自動車への充電→自動車業界

このようにいろんな活用方法が考えられ、利用用途に応じた発電システムを構築していくこと

が大切である。

現在、本研究では、技術開発のみならず、利用用途まで考慮したパッケージ化を考えている。利用用途を単に考えるだけでなく、実際に形として示すことが重要である。そこで本研究では、開発製品を活用し、写真4に示すように、産学官連携のマイクロ水力発電実証試験場を建設している。



写真4 水車発電実証試験場（手前：新型水車発電機，奥：用途開発のための施設）

このような試験場は全国でも初めての試みであり、社会への普及効果のみならず、更なる技術改良ができる画期的な施設である。

4. 環境対策

本研究による開発品は、環境対策にも力を入れている。まず水車発電システムの小型化を図ることで、用水路の持つ本来の機能を阻害することなく発電が可能になる。さらに、写真5に示すように、水車は流速の速い部分（1m/s以上）に設置すると、用水路の流速が遅い部分（両岸：50cm/s以下）にはスペースが生まれる。このスペースに魚道を設置することもできれば、動植物との共存も可能で、生態系への配慮も行える。



写真 5 水路内の設置イメージ

5. おわりに

本開発研究では、富山県の産業遺産であるらせん水車に着目し、改良と工夫を加えた結果、実用化に耐えうる全く新しい高効率水車を開発することができた。マイクロ水力発電では、現在のところ海外製品が多く、国内での製品は数少ない。そのような中、本研究による開発品は国産である。今後は、実証試験を重ね、より信頼性のあるマイクロ水力発電システムとして社会に展開していく予定である。

【参考文献】

小水力発電事例集，全国小水力利用推進協議会，2007

宮崎平三，螺旋水車で水力発電，現代農業 1 月号，2006