低流速下における垂直軸揚力型水車の利用手法

UTILIZATION OF VERTICAL-AXIS LIFT-TYPE HYDRO TURBINE UNDER A LOW FLOW CONDITION

中矢哲郎¹・桐博英²・安瀬地一作³

Tetsuo NAKAYA, Hirohide KIRI, and Issaku AZETI

¹正会員 農博(独)農研機構 農村工学研究所(〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)

²正会員 農博(独)農研機構 農村工学研究所(〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)

³正会員 農博(独)農研機構 農村工学研究所(〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)

The hydraulic and output characteristics of a vertical-axis lift-type Darrieus water wheel were examined using an experimental hydraulic model to determine effective methods for utilizing hydraulic power under a low velocity flow of about 1 m/s in an irrigation canal. Our results indicate that despite the low velocity of this flow, water wheel efficiency was improved by installation of a spur dike that raised the water level and increased pressure. Moreover, useful energy was effectively obtained by appropriately adjusting the ratio of the total area of a braid to that of the passage feeding the water wheel.

Key Words : Flow energy, Water turbine, Darrieus-type, Small-scale Hydro-power

1. はじめに

農村地域における既存の農業水利施設を利用した小水力発電は、大規模な地形改変を必要としない再生可能エネルギー源として、これまで落差工や急流工に設置されてきた。一方、水路における流水エネルギーはこれまで小水力発電の対象にならず、ほとんど未利用で残されている。その原因として、得られる電力が数kW以下となり、売電収入が見込めないことがあげられる。しかし小規模の電源でも、農村地域においては、1kWhの充電で走行可能な電気自動車や、水路の水管理システムの電源、災害時の非常用電源など多くの使用用途が存在する。よって流水エネルギーを用いた簡便に設置ができ、可搬型でかつ低コストな発電装置の開発が望まれる。

流水エネルギーによる小型水力発電に関して、クロスフロー水車と下掛け水車を組み合わせ、水車内に自由水面を有する開放型の水車や¹⁾、並進翼水車による流水エネルギーの利用に関する研究が進められているが²⁾、どちらも水路幅全体を仕切る為にやや大掛かりになる傾向にある。小規模のものになるとプロペラ式があり³⁾、最大で100Wの出力が得られ普及しているものの、農業用水路が対象とする1m/s程度では低出力となり、農業用水路には不適である。

近年は垂直軸型の発電装置が、風力発電の分野で進んでいる。水力でも潮流を対象に開発が進んでいる。また垂直軸タービンの中で揚力を利用するタイプのものは抗力を利用するものと比較するとかなり効率が良いことが知られており、構造が簡単のためメンテナンスコストが低廉となる。また、垂直軸であるため流向に依存しないなどの利点を有している。このような利点は、農業用水路の流水や超低落差下の利用に適するが、発電にはほとんど利用されていない状況にある。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では、まず農業用水路の平均的な流速である1m/s以下の低流速下における垂直軸水車の出力特性を明らかにする。そして低流速下で水制などの障害物を設置することによる圧力エネルギーの上昇が、流水エネルギーの利用効率に及ぼす影響を明らかにする。

さらに実スケールを想定した発電試験により、流水から実際に得られる電力を算定し、農業用水路を想定した流水下における小水力発電利用としての有効性について検証を行った。

3. 垂直軸水車の出力特性と水理特性

(1) 垂直軸水車の出力特性

垂直軸タービンの開発が進んでいる風車の事例にあてはめて出力特性を検討する．ここで，風車の機能評価で用いられるパワー係数（流体の中から風車を利用して取り出すことのできるパワーの割合）とトルク係数（流体から得られるトルクの割合）を指標に用いる．抗力型風車は単純な仕組みで風が単にロータの羽根や風杯をおすようになっている．パワー係数が小さいが，トルク係数は大きく，自己起動するため揚水や製粉のような機械的な仕事をするのに適している．揚力型風車は駆動力に揚力をもちいる．風車のブレード先端速度と流入流速の比である周速比が大きくなるために，高回転が得られる．ここで周速比は次式で表せる．

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_{\infty}} = \frac{2\pi R n}{V_{\infty}} \quad (1)$$

ここで， R ：ロータ半径（m）， Ω ：ロータの回転角速度（rad/s）， n ：風車回転数， V_{∞} ：流入風速，である．

揚力型風車は，パワー係数は大きい，トルク係数は低く，発電用に適する特性を有している．よって今回は垂直軸水車として揚力型のダリウス水車を選定する．

(2) 垂直軸水車の水理特性

流水利用型の水車は，水平軸の開放型下掛け水車式とダリウス水車などの垂直軸型に分けられる．いずれにおいても，流水エネルギーを効率的に取り出すための工夫がなされている．下掛け水車式については堰上げ効果を利用した流水利用の出力特性について検討されている¹⁾．垂直軸水車のダリウス型に関しては流速エネルギーを有効に取り出すための，集水ダクトにより流速を増加させる方法が検討されている⁴⁾．

実際に流水エネルギーを水頭に換算すると，例えば流速1m/sでも5cm程度であり，圧力エネルギーや位置エネルギーを取り出す方が大きなエネルギーを簡易に得られる．流水エネルギーを取り出す場合，たとえば水位差を10cmとすることで，流速2m/sに相当するエネルギーを取

図-1 垂直軸水車周辺の流れの概要

り出すことが可能になる．よって，今回，水車前後の圧力差を強制的に発生させ，速度エネルギーが得られにくい低流速下でも効率的に揚力型水車により発電を行う手法に関して検討を行う．

この流水中に水位差を強制的に起こす方法として，今回は図-1のように，水路を横断する水制を設置することで強制的に堰上げを行い圧力差を生じさせることを検討する．水制は大掛かりな工事なしに水路への設置が可能である．また，農業用水路においてこうした圧力エネルギーを取り出す場合，通水時の溢水に注意を要するが，余裕高の範囲を活用することで，導入の可能性が高くなる．ここで余裕高とは，一時的に生ずる高水位等に対し，水路の安全を保つために設定される計画水位より上の高さである．この水制による水位の堰上げにより，流水エネルギーだけでなく，圧力エネルギーも有効に取り出すことが可能となる．この圧力差を考慮した水車の出力 P （W）は，次式で表せる．

$$P = \rho g Q H_e \quad (2)$$

ここで， ρ ：水の密度（kg/m³）， Q ：流量（m³/s）， H_e ：有効落差(m)，である．有効落差は図-1より圧力エネルギーの差と速度エネルギーの差の合計となる．

$$H_e = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \quad (3)$$

ここで， $P_1 = \rho g H_1$ ， $P_2 = \rho g H_2$ ，である．下流水深に H_3 ではなく H_2 としたのは， H_3 とすると，跳水によるエネルギー損失を有効落差として見積もり，入力として過小評価することになるためである．また出力効率も次式で算定する．

$$\eta = W_o / P \quad (4)$$

ここで， η ：出力効率， W_o ：水車の軸出力（回転トルク×回転角速度），である．

4. 発電装置の製作

(1) 水車の選定

水車には揚力型の垂直軸水車である，ダリウス型を採用した．ダリウス水車形状の概要を図-2に示す．水車の

図-2 ダリウス水車の形状

写真-1 ダリウス水車の形状（水車径50cm）

規模は90cm水路内に入る大きさで、圧力差を生じさせるための障害物を設置するスペースを確保できる大きさの、50cmと30cmの二種類を設定した、羽根数は4枚に設定した。水車径50cmの場合の水車形状を写真-1に示す。

(2) 羽根形状の設定

羽の断面はNACA0018と呼ばれる、航空機の断面で採用されているものを用いた。羽はABS樹脂で作成した。この断面形状により、垂直軸であっても反転時に大きな逆向きの抗力がはたらかずに、高い水車の周速が得られるようになる。

(3) ソリディティの設定

ソリディティは、風車の掃過面積に対するブレードの全投影面積の比であり、ダリウス型水車の効率に大きく影響を及ぼすパラメータである。ここでの掃過面積は水車回転軸に垂直な面への投影を意味している。この水車のソリディティと周速比も強い相関をもっている。ソリディティと風車効率の関係については、ソリディティが大きい場合は、風車を通過する気流が急激に減速されるために、トルクが低下し効率が落ち、また小さすぎる場合は、ブレード面積が小さくなるために大きなトルクを得ることができず効率が高くないことが知られている⁵⁾。よって、ダリウス水車の効率を上げるには最適なソリディティの値を見つけることが重要になる。

ダリウス型水車のソリディティは次式で算定する。

$$\sigma = \frac{ZC}{2\pi R} \quad (5)$$

ここで、 σ :ソリディティ、 Z :ブレード枚数、 C :ブレード弦長(m)、 R :ロータ半径 (m) , である.

今回は、水車径を0.3m, 0.5mとした2種類のロータを作成したため、それぞれソリディティは、0.42, 0.25となる。ソリディティ値毎の出力係数に及ぼすパラメータは(1)式で表せる周速比 λ である。パワー係数が0.3以上になる周速比の範囲(最適範囲)は、水車径が大きい。

写真-2 発電装置の概要

=0.2の場合、概ね $\lambda=3\sim7$ の範囲で $\lambda=6.0$ 付近にピークがある。水車径が小さい $\sigma=0.4$ では、 $\lambda=2\sim4$ 付近で $\lambda=3.0$ 付近にピークがある⁵⁾。よって高ソリディティの場合(水車径30cm)は、低周速域で高出力が得られる可能性があるがその最適範囲が狭く、低ソリディティの場合(水車径50cm)は出力のピークは高周速比側にあるが、その最適範囲が広いという特徴がある。

(4) 発電装置の製作

発電装置の概要を写真-2に示す。水車に上部まで伸びた軸を設けた。水車の回転は4倍増速機により回転数をあげた後に発電機を回す仕組みである。発電機からは3相交流で出力されたあと、ブリッジダイオードにより直流に変換し出力する。本装置は水車羽部分が約2kg、その他の装置の部分が10kgであり、大人1人で持ち運ぶことが可能である。発電機は、モーター内部に鉄心がなく、トルクの少ない、直径20cm厚さ3cmの小型のコアレスモーターを採用した（株式会社スカイ電子、SKY-HR200）。この発電機は、低回転で大きな出力を得ることができ、低回転の垂直軸水車の発電モーターとして適している。

図-3 実験水路の概要

表-1 実験条件一覧

CASE No.	実験条件				測定項目						
	水車径 (m)	流速 (m/s)	水制	水制幅/ 水路幅	流速	水深	回転 数	トルク	回転 数	電 流	電 圧
1	0.3	0.6	無し				○				
2		0.7					○				
3		0.8					○				
4		0.9					○				
5	ソリディ ティ: 0.42	1.0	無し		○	○	○	○	○	○	○
6			10cm	0.1	○	○	○	○	○	○	○
7			15cm	0.2	○	○	○	○	○	○	○
8	0.5	0.4	無し				○				
9		0.5					○				
10		0.6					○				
11		0.7					○				
12		0.8					○				
13		0.9					○				
14		ソリディ ティ: 0.25	1.0	無し		○	○	○	○	○	○
15				10cm	0.1	○	○	○	○	○	○
16	15cm			0.2	○	○	○	○	○	○	○

5. 水理模型実験の方法

(1) 実験の方法

実験には、農村工学研究所風洞造浪実験棟内の図-3に示す幅90cm、長さ12mの回流水槽を用いた。計測は、図-3にある点において、流速、水位を測定し、農業用水路で想定される流速1m/s以下の流況での水車周辺の流況、水理特性、出力特性を把握した。流速は6割水深点を計測した。ここで設定した流速1m/sは水路内に障害物がない場合に生じる実験水路の最大流速である。

流れの条件としては、流速1m/sから0.1m/s毎で流速を下げて低流速条件を設定した。さらに1.0m/sの流水エネルギーから効率的にエネルギーを得る方法として、図-3に示す水車前面の位置に水制を設置し、流速エネルギーのほかに堰上げにより生じる圧力エネルギーも取り出すことを試みた。水制の設置幅は10cmと15cmの2種類とし、水制高は水面より上の長さとし非越流状態とした。

モーターの回転数の測定には、非接触型ハンディタコメータ（株式会社小野測器 HT-4200）を用いた。電力は直流回路にセメント抵抗を負荷として与え、電流電圧値を測定することで算出した。

図-4 水車近傍の水位 (Case14, 15, 16)

写真-3 水車近傍の流況 (Case16)

(2) 実験条件

実験ケースを表-1に示す。設定する流速は、水路内に障害物がない場合に発生する最大流速値である。2種類の水車径において、水車の回転が始まる流速から0.1m/s毎で1.0m/sまで流速を上げたケースを設定した。更に最大の設定流速である1m/sにおいては水制幅10cm、15cmを設置することで、圧力エネルギーの上昇効果の実験ケースを設定した。発電機の特長から、100rpm以上が最低の回転数であるため、計測の対象とするのは無負荷時で100回転以上を得られた、流速1m/s下で、水制なし、水制幅10cm、水制15cmのCase5～7、およびCase14～16を重点的に行った。

6. 実験結果及び考察

(1) 水車周辺の流況

流速1m/s、水制設置幅15cmで最も高い回転数が得られたCase16の水車周辺の流況を写真-3に示す。水車と水制の抵抗により上流側に堰上げが生じており、水車下流部で水位低下が生じている。さらに下流になると下流端の水位の影響で跳水が生じるため再び水位が上昇している。なお、全ケースで水車はほぼ水没している状況にある。

Case14～16における水車近傍水位の変化を図-4に示す。水制を設置することで上流の堰上げが大きくなり、下流の水位低下が生じ、上下流の水位差が大きくなって

図-5 水車近傍の流速 (Case16)

表-2 水車効率一覧

Case No.	水車径 (m)	水制幅/水路幅	流速 (m/s)	回転数 (rpm)	トルク ($N \cdot m$)	水車出力 W_o	$\rho g H_e Q$ P	出力効率 $\eta (W_o/P)$	発電時回転数 (rpm)	発電機最大出力 W_e
1	0.3		0.6	0	-	-	-	-	-	-
2			0.7	37	-	-	-	-	-	-
3			0.8	56	-	-	-	-	-	-
4			0.9	95	-	-	-	-	-	-
5	ソリディティ:0.42	0.1	1.0	103	0.52	1.40	11.59	0.12	-	-
6				271	0.68	4.82	19.23	0.25	-	-
7				300	0.86	6.75	25.14	0.27	-	-
8	0.5		0.4	0	-	-	-	-	-	-
9			0.5	30以下	-	-	-	-	-	-
10			0.6	30以下	-	-	-	-	-	-
11			0.7	30以下	-	-	-	-	-	-
12			0.8	37	-	-	-	-	-	-
13			0.9	57	-	-	-	-	-	-
14			1.0	340	0.72	6.41	14.97	0.43	280	3.00
15				377	1.04	10.26	29.62	0.35	316	5.12
16				396	1.32	13.68	38.00	0.36	300	6.40

写真-4 流水型水車の発電状況 (Case16, 2W出力のLEDライト)

いる。水制幅が大きくなり、抵抗が大きくなるほどこの水位差は大きくなっており、より多くのエネルギーを得られていることを示している。図-5のCase16における流速の変化を見ると、水車上流は堰上げにより一様に流速は低下している。下流においては水車位置のラインは流速が低下したままであるが、水車周辺では流速が上昇している。このことは水車が速度エネルギーを消費していることを示している。こうした水車上下流の水位差と流速の差から式(2)により有効落差 H_e を算定することが可能となる。

(2) 水車の出力特性

表-2に水車の出力一覧を示す。水車径0.3mのときは回転が始まるのは流速が0.7m/s以上であり、水車径0.5のときは回転が始まるのは0.5m/sであり、水車径が大きくソリディティが小さい方が低流速で高回転が得られてい

る。流速を上げた条件でもソリディティが小さい方が大きな回転数が得られている。なお両水車径において、回転しているにも関わらずトルクが算出できていないのケースは、回転数がトルク計の下限値を下回まわり計測不能であったためである。

流速1m/s時のCase5～7, 14～16を見ると、全て100rpm以上になっており、水制幅を大きくし、堰上げを大きくするほど大きな回転数とトルクを得ることができている。この時の回転数やトルクは水車径50cmでソリディティが小さいケースが大きくなっている。

水車の出力は同じ流速では水車径50cmのケースの方が2倍以上大きくなっている。同じ水理条件であっても、水車径により規定されるソリディティが水車の出力に重要なパラメータであることがわかる。今回は、低ソリディティで掃過面積が小さい方で高い水車出力を得られた。この原因は4-(3)で示した、ソリディティ毎の周速比とパワー係数の関係から推定できる。 $\sigma=0.42$ の場合、低周速比で高出力を得られるが、今回は周速比が低すぎて($\lambda=0.97$)、高出力域に到達できなかったことが考えられる。 $\sigma=0.25$ においても、高出力域に達する周速比は得られていないが($\lambda=2.5$)、周速比に対する高出力域が広いために出力が大きくなったと考えられる。今後、周速比を上げるには、水制設置幅をより大きくし、流速を上げるか、水車の羽根形状や材質などロータそのものの性能を上げ、大きな回転数を得ることが必要である。周速比が上がれば水車径の小さく高ソリディティ下での出力が向上し、より経済的な水車の設計が可能になる。

発電状況を見ると、発電ができたのはCase14～16の出力が大きかった3ケースである。発電時は発電抵抗により回転数が減少するが、最大で6Wの発電ができた。このときの2W出力LEDの発電状況を写真-4に示す。6Wであっても系統電力につなげない場合であれば、水管理システムの供給電源や、堰、ゲート等水利構造物の制御システムの電源など多くの用途が存在するため、小水力発電装置として有効であるといえる。

7. 結論

農業用水路で想定される流速1m/s程度の流況で水力を得るために、垂直軸揚力型のダリウス水車の出力特性、発電状況を水理模型実験より把握した。

その結果、低流速下であっても水制設置による堰上げによる圧力エネルギーの増大により水車効率を上昇させることができることがわかった。

また、今回の水理条件では、低周速域における出力が大きい高ソリディティ（水車の掃過面積に対するブレードの全投影面積の比）値より、低周速比での出力は小さ

いが周速比に対する高出力域が広い低ソリディティ値の場合に有効に流水エネルギーを得ることができた。今後低周速域での出力効率を上げるには、水制設置幅を拡げ流速を上げるか、ダリウス水車の羽根形状や材質などの性能を上げ、水車の回転数を上げる必要がある。

参考文献

- 1) 上田達己, 後藤真宏, 桐博英, 浪平篤, 滝口孝明, 廣瀬裕一: 独立運転するマイクロ水力発電の経済・環境影響評価, 水土の知, No.81(2), pp.97-100, 2013.
- 2) 後藤真宏, 内田隆志, 加藤信介, 岡本将之, 大木啓司, 長谷川大祐, 高木強治, 浪平篤: 緩勾配水路における小水力発電技術の開発, 水土の知, No.78(8), pp.665-668, 2010.
- 3) David Sharman: Generating interest under water, International Water Power & Dam construction, Vol.61-2, pp.919-924, 2009.
- 4) 古川明徳, 大熊九州男: ダリウス形ランナによる超低落差水力の有効利用, ターボ機械, No.30, pp.14-19, 2002.
- 5) 関 和市, 牛山 泉: 垂直軸風車, パワー社, pp.171-174, 2008.

(2014. 9. 30受付)