潮流発電の高効率化のための 新型流向制御板に関する研究

中村 孝幸¹・阿部 洋士²・Firman Husain³・井内 國光⁴

¹正会員 工博 愛媛大学大学院教授 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)
E-mail: nakamura@cee.ehime-u.ac.jp

²愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)
E-mail: abe.hiroshi.08@cee.ehime-u.ac.jp

³愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)
E-mail: firman.husain@cee.ehime-u.ac.jp

⁴正会員 博(工) 愛媛大学大学院准教授 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)
E-mail: inouchi@ehime-u.ac.jp

潮流エネルギー変換装置の代表的なものであるサボニウス式水車は、水車起動のための水流初動速度が小さく回転トルクが大きいなどの利点はあるが、回転速度が遅く結果的にエネルギー変換効率が低くなるなどの欠点もある。

本研究は、基本的な性能に優れる直立型サボニウス式水車に着目して、その変換効率を高めるため新規に水車の周囲に流向制御板を取り付けるなど増速装置を付設する工法を提案すると共にその有効性について明らかにする。既に著者らは、外輪型流向制御板を導入することで、直立型サボニウス式水車による潮流エネルギーの変換効率が有意に改善できることを示した。ここでは、発電用水車の支持構造や実海域を想定した場合などを含め、さらなる潮流エネルギー変換効率の改善工法について検討を加えたので、その成果について紹介する。

Key Words : tidal current power, new guide vane, high energy conversion efficiency, vertical savonius turbine, rotary torque

1. まえがき

潮流エネルギー賦存量の高い海域は、鳴門海峡、来島海峡、明石海峡などの海域狭窄部に限定される面はあるものの、天文潮であるため、水位や流速の時間変動が極めて規則的でほぼ予想可能であることから、風力発電や波力発電などに比較すると発電稼働率が高く維持できることおよび発電計画が立てやすいなどの利点がある。

現在まで、各種の潮流エネルギー変換装置が提案されており、代表的なものとして、水平軸を回転軸とするプロペラ式水車や流向依存性がほとんどない鉛直軸を回転軸とする直立型のダリウス式水車やサボニウス式水車などがある。サボニウス式水車は、揚力型のダリウス式水車に比較して、抗力型であるため水車起動に必要な初動水流速度が小さく回転トルクが大きいなどの利点はあるが、回転速度が遅く結果的にエネルギー変換効率が低くなるなどの欠点もある。

本研究は、海域狭窄部での効率的な潮流発電を実現す

るため、基本的な性能に優れる直立型サボニウス式水車を対象にして、その変換効率を高めることを目的に水車の周囲に流向制御板を取り付ける増速装置付設工法を提案すると共にその有効性について明らかにする。既に著者ら^{1,2)}は、外輪型流向制御板を導入することで、直立型サボニウス式水車による潮流エネルギーの変換効率が有意に改善できることを示した。ここでは、流向制御効果のみならず直立型水車や上部発電装置の支持構造をも兼ね備えた、新型の流向制御増速装置の有効性などについて紹介する。この際、実海域を想定して、潮汐などの水位変化による変換効率への影響や縦横橋方式の潮流発電装置の設置構造を想定して水車2基並列配置時の変換効率などについても付随的に検討する。

2. 実験概要

(1) 実験水槽

図-1 実験水槽

図-3 外輪型流向制御板 (左上: 円弧型, 左下: く字型)

図-4 渦流型流向制御板

本実験には、愛媛大学工学部の造波機付きの回流水槽を用いた。この水路は、図-1に示す規模で、その一端にピストン型造波装置が設置してあり、両端部を大口径パイプで結合してその途中に循環用の直流ポンプ3台が設けてある。このため、水路内では一方向流と波を同時に発生させて、各種の水理実験が行えるようにしてある。

実験は、図中に示すように、水路幅を1/2の50cm程度に狭くするように壁構造物を設け、一方の水路を閉鎖す

図-2 サボニウス水車

ることで、来島海峡での最強潮流速9ノットの模型流速(0.7m/s)を含む、多様な水流速度が実現できるようにした。ただし、一部の実験では隔壁を取り去り、水路幅100cmをそのまま使用し、低流速条件に限定されるが、動力係数などに及ぼす並列配置の影響などについても検討した。潮流のモデル化には、フルードの相似則を適用し、模型スケールは $S=1/40$ 程度を想定した。

(2) 模型水車と流向制御板

本実験で用いた水車は、図-2に示すサボニウス式であり、羽根部分の直径は12cm、その高さは30cmである。

既に著者ら^{1,2)}は、直立型サボニウス式水車による潮流エネルギーの変換効率を向上するため、図-3に示すような円弧型やく字型フィンを円周上に配置した外輪型流向制御板を水車のまわりに設置する工法を提案した。この結果、変換効率は約2倍程度に改善されたが、図-3に示すように、装置全体を支持するために外輪型流向制御板の外側にさらに杭式の支持柱が必要とされるなど構造的に複雑になることが判明した。

このため、流向制御板と支持構造の機能を兼ね備えた新規の流向制御板について開発・検討を進めた結果、一つの候補として、図-4に示すような4枚の鉛直板で構成される比較的簡単な構造の流向制御板が有望であることが判明した。以下、これを渦流型流向制御板と称す。

(3) 実験条件

現地海域としては、来島海峡を想定し、その年間平均潮流速(2~2.5m/s)などを参照して模型での流速条件を設定した。具体的には、0.2~0.5m/sの範囲内の流速条件を採用してサボニウス式水車単独およびその水車の周囲に図-3, 4に示す流向制御板を設置した場合を対象にして実験を行った。この際、水深条件は現地の水深16m程度

図-5 水車および計測器の設置状況

を想定して0.4m程度とした。

(4) 計測方法

実験では、直立型水車を図-5に示すように上下端に設けたボールベアリング軸受けにより支持すると共に上部軸受けに接続する形式でトルクメータに、またその上に発電機の負荷を近似的に与えるための磁気ブレーキへと弾性連結した。そして、流速測定と同時に、この装置により磁気ブレーキによる負荷トルクを各種に変化させることで水車の回転数及び仕事率などを測定した。

3. 実験結果

(1) 渦流型流向制御板の効果

図-6は、水車単独の場合と水車の周囲に流向制御板を設置した場合の動力係数 C_p と周速比 λ の関係の比較を示す。実験では水路幅50cm、主流速は約0.4m/sとしてあり、現地量に換算すると来島海峡の年間平均流速の2.5m/sに匹敵する。動力係数はエネルギー変換効率を表わし、周速比は水車外縁の回転速度を示す指標で主流速で無次元化した量である。これらは、次式の定義による。

$$C_p = \frac{T_t \omega}{0.5 \rho u^3 (Bd)} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{u} \quad (2)$$

ここで、 T_t ：磁気ブレーキで作用させた負荷トルクで、発電機負荷の模擬量、 ω ：水車の回転角速度、 ρ ：流体密度、 u ：主流速、 B ：水車の直径あるいは増速装置の幅、 d ：水車の高さ、 R ：水車の半径である。なお、式(1)による C_p は、流れ方向への増速装置を含む水車全体

の射影面積に流入する流れのパワーを基準量としていることに注意されたい。

この図から、サボニウス水車単独の変換効率率は15%程度と低い、渦流型流向制御板を取り付けることで3倍以上の50%程度に改善され、潮流エネルギーの取得効率が大幅に向上することが分かる。また、外輪型と比較しても渦流型の方が効率的な変換が確認できる。

図-7は、水車単独の場合と水車の周囲に流向制御板を設置した場合のトルク係数 C_T と周速比 λ の関係の比較を示す。 C_T は回転能力の指標であり、次式の定義による。

$$C_T = \frac{T_t}{0.5 \rho u^2 (2Rd)} \quad (3)$$

図-6 流向制御板の有無による動力係数の比較

図-7 流向制御板の有無によるトルク係数の比較

渦流型流向制御板を導入することで、トルク係数は、水車単独の4倍、外輪型流向制御板の2倍の値を示すなど、回転力が有意に向上することが確認される。

(2) 渦流型流向制御板のフィンの傾斜角の効果

図-8 渦流型流向制御板におけるフィンの傾斜角

図-10 フィンの傾斜角による動力係数の比較($h=40\text{cm}$)

渦流型流向制御板において、最も効果的なフィンの傾斜角を数値解析および水理実験により明らかにした。最初に、CFDの範疇に属する数値シミュレーションプログラムであるMIKE3³⁾を用いて、渦流型流向制御板の内部に生起される流れの循環量に着目して検討を行った。ただし、内部には水車がない状況を想定している。検討に用いた鉛直板の傾斜角は、図-8に定義を示す角度で0～90°の範囲内の6種類で、図-4に示すようにこの鉛直板を渦巻状に配置した。

図-9は、渦流型増速装置内の循環量を流向制御板の傾斜角による変化で示すもので、傾斜角が80°付近で循環量が最大となる傾向にある。これは、鉛直板端部からの剥離流れに及ぼす隣接する制御板間の開口率や板長の影響によるものと推測される。

実験では、渦流型流向制御板のフィンはアクリル製の板を使用し、傾斜角0～90°の範囲内で5種類を用いた。このときの水路幅は50cmである。図-10は各傾斜角における周速比に対する動力係数の実験結果を示す。図より、傾斜角45°の場合が最も高い動力係数を示し、数値計算と異なる結果が得られた。これは、数値計算において、流向制御装置内に水車がない状態を想定したことによるものと考えられる。また、傾斜角45°が最も高い変換効

図-9 渦流型流向制御板内の循環量の算定結果

図-11 フィンの傾斜角によるトルク係数の比較($h=40\text{cm}$)

率が得られた理由としては、サボニウス式水車の回転抵抗になる凸側のバケットへの流れを、正の回転力を生み出す凹側のバケットに行くように効率よく制御できたことによるものと推測される。

図-11は各傾斜角における周速比に対するトルク係数の実験結果を示す。トルク係数に関しては、 $\lambda=0.5\sim1.0$ の低回転時には、傾斜角67.5°のケースが最も大きな値を示し、 $\lambda\geq 1.0$ から傾斜角45°のケースが最大となっている。このことから、傾斜角を45～67.5°の範囲内に設定することで回転トルクが大きくなり、回転可能領域の拡大が期待できるものと言えよう。

(3) 水路幅の影響

図-12は渦流型流向制御板を付加したサボニウス式水車の動力係数に及ぼす設置水路幅の影響を示す。設置水路幅は50cm、100cmの2種類を使用した。なお、本実験施設のポンプ能力の限界から主流速は0.2m/s程度とした。水路壁は流体力学的に鏡像効果をもつものができることができ、並列配置された物体の影響を近似的に評価することができる。水路幅が50cm、100cmの2種類は、渦流型流向制御板の幅が24cmであることを考慮すると、並列配置の中心間距離 D と物体径 B の比がそれぞ

図-12 動力係数に及ぼす設置水路幅の影響

れ、約2と4に相当することになる。図-12からわかるように、並列配置の中心間距離と物体径の比が小さいほど、エネルギー変換効率が增大する傾向にあることがわかる。これは、縮流効果による圧力勾配の発生によるものと推測される。しかし、本実験では、ポンプ能力の限界から、低流速しか発生できず、このとき作用流体も低目に現れることから、今回の結果では模型水車の軸受けや測定系が元々有する摩擦抵抗の影響など測定誤差が拡大して現れていることも懸念される。このため、水路幅の影響については、今後ポンプ能力の増強を行うなど、高速

図-13 潮位変化による動力係数の比較

図-15 単独配置と二基並列配置による動力係数の比較

流を利用できるようにして追加検討を行っていきたい。

(4) 実海域を想定した検討

a) 潮位差の影響

来島海峡では、大潮時には3m程度の潮位差があり、満潮時、干潮時などの水位変化によるエネルギー変換効率の変動特性を明らかにする必要がある。水深条件は現地の水深 $h=16\text{m}$ を想定し、実験では $h=20\text{cm}$ 、 25cm (水車が水面から露出した状態)、 32cm (低潮位)、 40cm (平均水位)、 44cm (高潮位)の5種類の水深条件を用いた。このとき、水路幅は 50cm としてある。

図-13は潮位変化による周速比に対する動力係数の実験結果を、図-14は同変化による周速比に対するトルク係数の実験結果を示す。

どの潮位条件でも周速比が1.5近傍で動力係数が最大値を示し、水深 44cm の場合を除けば、水深が深くなるにつれ、その値が増大する傾向にある。トルク係数についても動力係数と同様、水車が突出する状態と比較して、水車が水没した状態の方が優れた結果が得られる。上述の結果の原因として、水車の回転羽根の一部が水面より出ること、流れがもつエネルギーの一部が自由表面に波を発生させるために費やされ、造波抵抗となって水車

図-14 潮位変化によるトルク係数の比較

図-16 単独配置と二基並列配置によるトルク係数の比較

の動力係数を低下させたことが考えられる。また、水深44cmのケースに関しては、水車の回転羽根部分の天端が大幅に水没して、流向制御板上部を水流が通過しやすい状況にあったため、動力係数、トルク係数共に低下したものと推測される。

b) 水車単独配置と二基並列配置の比較

現地では多くの電力を得るため、複数基の水車を縦列、あるいは並列に設置することが一般的に考えられる。ここでは、複数基の水車を並列配置することを想定して、最も簡単な二基並列配置に対して実験を行い、単独配置との比較から、エネルギー変換効率などに及ぼす並列配置の影響を検討した。

実験では、水路幅100cm、主流速0.2m/sの条件下で測定を行った。なお、二基並列配置の実験では、装置数の関係上、隣接する他基の水車には負荷を作用させることなく自由回転の状況で行った。

図-15は、単独配置と二基並列配置による動力係数の比較を、図-16は、単独配置と二基並列配置によるトルク係数の比較を周速比の変化で示す。図より、動力係数に関して、単独配置の場合は0.3程度であるのに対し、二基並列配置の場合は、0.6程度と約2倍に顕著に増大することが分かる。同様に、回転トルクも大幅に増大し、回転可能領域の拡大する傾向にある。

また、二基並列配置では $n=2$ 付近の高速回転域になると急激に動力係数が低くなっている。これは、高速回転域になると、並列した水車と互いに影響しあい、水車内の流れを変化させたことや元々の軸受がもっている摩擦力による影響を流速が小さいため水車が受けやすくなったことが原因と推測される。

4. 結語

(1) 渦流型流向制御板を導入することで、サボニウス式水車による潮流エネルギー変換効率は単独水車の場合の3倍以上の50%程度にまで改善される。このとき、利用可能な回転力も4倍以上と大きくなり、より負荷の大き

い大容量の発電機を利用することが可能となる。

また、従来の外輪型と比較しても変換効率、回転トルクの両者が共に2倍程度に改善され、しかも全体支持構造を含めて、単純化されるため、潮流発電の高効率化において効果的である。

(2) 渦流型流向制御板は、軸対称であるため、上げ潮と下げ潮で流れが逆転する場合でも同一の能力を発揮できる。構成する流向制御板の傾斜角は、鉛直板を隅角頂点から辺中央でかつ円周上に伸びるように設置するときの角度が最適である。

(3) 渦流型流向制御装置を設けたサボニウス式水車による変換効率は、多少ながら潮位の影響を受ける。そして、設置水深は、水車の羽根が水没し、かつ流向制御板の天端を静水面付近に位置するのが望ましい。

(4) 渦流型流向制御装置を設けたサボニウス式水車を並列配置することで、潮流エネルギー変換効率や水車の回転力が有意に増加する。

今後は、並列配置時の水車間距離や干渉効果について、水路幅の影響と併せて検討していきたい。また、渦流型流向制御板は、サボニウス式水車の外周に設置するため、波浪外力や漂流物の衝突力などを緩和する機能が期待できると考えられ、今後さらに作用波力や漂流物の衝突荷重などについて実験を進めていきたい。

参考文献

- 1) 中村孝幸, 青山善行, 浦中光太, 安井孝, 二宮一成: 潮流エネルギー変換のための直立型水車に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.67/No.2, pp.I184-I189, 2011.
- 2) 井内国光, 中村孝幸, 青山善行, 浦中光太: 来島海峡の島まわりを想定した潮流発電用水車の効率的な配置法に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68/No.2, pp.I1281-I1285, 2012.
- 3) DHI: MIKE21&MIKE3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation, DHI Water and Environment, pp.38, 2004.

PERFORMANCE ON A NEW GUIDE VANE OF VERTICAL SAVONIUS TURBINES FOR EFFECTIVE CONVERSION OF TIDAL CURRENT POWER

Takayuki NAKAMURA, Hiroshi ABE, Firman HUSAIN and Kunimitsu INOUCHI

The authors already have shown that the conversion efficiency of tidal current energy by a vertical Savonius water turbine is significantly improved by introducing outer ring type current controlling devices. In order to obtain much higher extraction rate of the tidal current power and also seeking a more simple structural form of guide vanes, a new type of guide vane was examined and proposed. The proposed guide vane in this study is composed of four vertical thin walls in axisymmetrical arrangement. We call it as a vortex-stream like guide vane. It was confirmed that the extraction rate of the tidal current power of a vertical Savonius water turbine becomes more than fifty percents by installing a new guide vane. Also the rotating torque by the turbine is significantly magnified, typically four or five times as large as the case without a guide vane.