潮流エネルギー変換のための 直立型水車に関する研究

PERFORMANCE OF VERTICAL AXIS TURBINES FOR EXTRACTING TIDAL CURRENT ENERGY

中村孝幸¹・青山善行²・浦中光太³・安井孝⁴・二宮一成⁴
Takayuki NAKAMURA, Yoshiyuki AOYAMA, Kouta URANAKA, Takashi YASUI
and Takanori NINOMIYA

¹正会員 工博 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)

² 工博 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)

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)

⁴ 今治市 総合政策部 (〒794-8511 今治市別宮町1丁目4番地1同上)

In order to develop an efficient water turbine for extracting tidal current energy at Kurushima Strait in Imabari, Japan, three different types of turbine, including a Darrieus Turbine and a Savonius Turbine, have been examined experimentally. In this study, considering the multi directional streaming of tidal current at Kurushima Strait, the vertical axis turbine was adopted as a possible energy extraction device. An additional current controlling device was newly proposed to power up the extraction efficiency of the vertical axis turbine. It was found out that the additional current controlling device is very useful to increase the efficiency of the vertical turbine, typically by about three times. For the practical design of vertical axis turbine at Kurushima Strait, tidal current forces and wave forces on the vertical axis turbine were experimentally examined.

Key Words : Tidal current energy, vertical axis turbine, current controlling device, current force, wave force,

1. まえがき

近年、持続可能なエネルギーの利用に対する積極的な取り組みを推進する政策・方針を背景に、国内外で潮流エネルギー利用への注目が高まり、実験および研究の成果が発表されてきた(例えば, Khan他¹⁾, 経塚他²⁾)。水車(タービン)の形態としては、羽根を取りつけた回転軸が流れ方向と平行となるか(平行型)、直交するか(直立型)で大別される。回転軸が流れに直交する直立型としては、サボニウス型あるいはダリウス型と呼ばれる形式が代表的なものである。

本研究では、強潮流として知られている来島海峡を想定して、潮流エネルギーを効率的かつ安定的に取得するための水車構造について主に実験的に検討を行い、トルク特性あるいは動力特性を明らかにする。このとき水車の構造は、来島海峡では局所的な地形の影響を受けて上げ潮と下げ潮で流向が真反対になりにくいことなどを考慮して、流れの方向性の

影響を受けにくい直立型の水車とした。既に木方ら³⁾は、来島海峡において直立型のダリウス型水車を用いた現地実験を行い、小規模ながらも有効な潮流発電が可能になることなどを報告している。

一方、来島海峡は、燧灘や安芸灘など吹送距離の比較的長い海域に挟まれるため、波の影響が無視で

図-1 実験水槽および計測装置の配置

図-2 サボニウス型水車(単位mm)

図-3 弧状3枚羽根型水車(単位mm)

図-4 ダリウス型水車(単位mm)

きないと考えられ、水車の回転能力に及ぼす波の影響についても部分的に検討を加えた。また、水車の構造設計において水車に作用する潮流力および波力の特性の把握は不可欠であり、ここでは、流れ方向への射影面積が大きく、受ける流体力も最大となると予想されるサボニウス型水車を対象にして検討を行った

2. 実験概要

(1) 実験水槽

本実験には、愛媛大学工学部環境建設工学科の造波機付きの回流水槽を用いた。この水路は、図-1に示すように、長さ30m×幅1m×深さ1.25mの規模である。この水路の一端には造波装置が設置してある。水槽の両端部は大口径パイプにより結合してあり、その途中に循環用の直流ポンプ2台が設置してある。このため、水路内では波と流れ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。

水槽内には、水平流速の増加を可能にするため、図中に示すように、水路幅をほぼ1/3の36cm程度に狭くするように壁構造物を設けた。このとき、水路幅を狭くすることで流れが乱されるのを軽減するため、水路幅を順次に2段階にわたり絞り込むように工夫した。水路幅の絞り込みの状況は、図中に示すとおりである。潮流のモデル化には、フルードの相似則を適用し、長さの縮尺はほぼ $S=1/30 \sim 1/50$ を想定した。

(2) 模型水車

本実験で用いた水車は、図-2～4に示すサボニウス型、ダリウス型および弧状3枚羽根型の3種類であり、いずれも水車の外径が12cm、羽根部分の高さが35cmと一定にしてある。サボニウス型および弧状3枚羽根型水車は羽根に作用する抗力を利用して回

図-5 流向制御板(中央部に水車を挿入して使用)

転トルクを得る水車で、ダリウス型水車は羽根に作用する揚力を利用して回転トルクを得る方式である。

また、実験の途中段階において、サボニウス型および弧状3枚羽根型水車については流れに対する相対的な回転数が低くなりやすいことが判明したため、これを増速するため、図-5に示すような流向制御板を考案し、水車の周りを取り付ける試みを実施した。

(3) 実験条件

本実験で用いた水深 h は40cm、30cmの2種類で、流速は0.2m/s～0.6m/sの範囲内で複数の条件を用いた。また、入射波条件としては、現地換算で来島海峡の近辺海域での常時波浪(波高 $H=1$ m, 周期 $T=4$ s)および激浪時の波浪(波高 $H=3.1$ m, 周期 $T=6.5$ s)を想定して、これらを含むように波条件を設定した。

実験ケースは、水車なしの予備ケースを含め、3種類の水車に加え、流向制御板を付加したサボニウス型水車と弧状3枚羽根型水車の計6ケースとした。

図-6 水車の設置状況およびトルクメータおよび負荷装置との連結

このとき、発電機による負荷を近似的に再現した摩擦負荷トルクは、各水車の回転が止まる寸前までの数種類を適宜に選定した。一方、水車なしの場合については、予備実験として、狭水路での流速分布に及ぼす水路幅の絞り込みの影響の検討を行った。

(4) 計測方法

実験では、水車の上部でかさ歯車を介して水車の軸動力を水平方向に変換しトルクメータに連結し、各流速条件の水平流速値に固定して、トルクメータ背後の機械的な摩擦付加装置を利用して回転負荷を各種に変化させて、水車回転数と作用している負荷トルクを同時に測定した。水車とトルクメータの連結状況を図-6に示す。なお、回転方向を鉛直より水平へ変化させるために用いたかさ歯車は、摩擦付加装置に類似した負荷を生起していたため、この歯車による負荷量についても別途に実験を行って把握し、それを考慮したパワーの算出を行った。

また、模型水車に作用する定常流体力（潮流力）と作用波力の測定は、水車の射影面積が流れの方向

図-7 水路内での水平流速の鉛直分布の検討

結果(水深40cm, 平均流速 $u=0.4\text{m/s}$)

に対して最大となるように固定して、片持ち梁形式の流体力計を用いて実施した。流体力計の真横には容量式波高計を設置して、作用波の水面変動と作用

波力との位相関係が判明するようにした。ここで、波力の算定については、モリソン式が適用できるものとした。

各実験で流速は、鉛直断面内の2方向の流速が同時に測定可能な電磁流速計を用いて測定した。

3. 結果および考察

(1) 流速分布

図-7は、予備実験で水平流速がほぼ 0.4m/s のときに測定した水深方向の流速分布の結果の代表例を示す。図中で横軸は各水深位置で測定した流速 u_y を平均流速 u で除した無次元流速を示し、縦軸はそれぞ

れ、水路底面を0とした時の鉛直方向の測定位置 y を水深 h で除した値に相当する。この図より、水深方向の u_y/u は $0.9\sim 1.1$ の間に分布しており、実験水路での水平流速はほぼ水深方向に様な流れになっていることが確認できる。本実験では、水路の幅方向についても同様に水平流速の空間分布を検討しているが、鉛直方向と同様にほぼ様な流速分布になっていたことを確認しており、ここに付記しておく。

図-8 水車回転時の負荷トルクの測定例(サボニウス型水車, $u=0.4\text{m/s}$)

図-9 水車回転時の回転数の測定例(サボニウス型水車, $u=0.4\text{m/s}$)

(2) トルクおよび回転数の代表的な測定結果

図-8, 9は、サボニウス型水車を対象として水深 $h=40\text{cm}$ 、流速 $u=0.4\text{m/s}$ 、設定トルク $16\text{mN}\cdot\text{m}$ の条件

図-10 負荷トルクおよび仕事率(パワー)と回転数との関係の測定結果の例

下でのそれぞれ負荷トルクおよび回転数の時系列波形の測定例を示す。両図より、測定負荷トルクおよび回転数は、時間的に一定でなく、特定の振幅で振動する時間波形になっていることが分かる。これは、回転中の水車の羽根の位置により受ける流体抵抗が異なるためと考えられる。このような傾向は他の水車においても確認出来たが、サボニウス型水車が最も顕著に現れていた。ダリウス型および弧状三枚羽根型水車の翼が3枚であるのに対し、サボニウス型水車の翼は2枚であるため、流体抵抗が変動する周期が長くなったことが原因の一つと考えられる。

図-10はサボニウス型水車の水深 $h=40\text{cm}$ 、流速 $u=0.4\text{m/s}$ の時の水車の回転数に対するトルクと仕事率(パワー)の関係を示す。負荷トルクと回転数は、設定トルクごとに時系列波形より平均を読み取ったもので、仕事率は回転角速度と負荷トルクの積により求めたものである。図より負荷トルクが大きくなると回転数が下がり、仕事率(パワー)については回転数が60~70rpmのときに最大となることがわかる。

(3) 三種類の水車の性能比較

図-11, 12は、水深 $h=40\text{cm}$ のときの3種類の水車の周速比 λ に対する、トルク係数 C_T および動力係数 C_P の変化特性を示す。動力係数 C_P および周速比 λ の定義、またトルク特性に対する無次元量 C_T をあわせて以下の式(1)~(3)に示す。

$$C_P = \frac{T_i \omega}{0.5 \rho u^3 (2Rl)} \quad (1)$$

$$C_T = \frac{T_i}{0.5 \rho u^2 (2Rl) R} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{R \omega}{u} \quad (3)$$

これらの式で、 R :翼の回転半径(水車の半径)、 ω :回転角速度、 l :翼の直立高さ、 u :流速(平均流速)である。また、 T_i :翼で発生する周方向への回転力に基づく総トルクである。

動力係数 C_P は、水車による流れのパワーの取得率あるいは変換効率に相当するもので高い値ほど望ましい。また、トルク係数は、流れにより得られる回転トルクの大きさを示すもので、発電機等の発電負

荷を考えた容量の設定に必要なになる。

3種類の水車では動力係数 C_P の値が最大となる周速比 λ の値が異なり、弧状三枚羽根では $\lambda < 1$ 、サボニウス型では $\lambda \approx 1$ で最大となる。ダリウス型については、一般に λ が2以上の高回転数域で、その能力を発揮すると考えられているが、本実験で製作した水車の形状では十分な高速域での回転を得ることができなかったことによるものか、 C_P に関しては、サボニウス型水車と同程度の性能に留まっている。ダリウス型水車についてはその C_P が最大となる周速比やその絶対値ともに今回の実験では不明であり、今後はより大きい流速値を用いて再検討してみたい。いずれにしても、ダリウス型水車では相当の高速流が得られないと、その回転性能が発揮できないようであり、憩流時のある潮流に対して適するとは言い難い面がある。

図-11 各水車のトルク係数

図-12 各水車の動力係数

(4) 水没型と突出型の比較

図-13はサボニウス型水車の水没時($h=40\text{cm}$)と突出時($h=30\text{cm}$)の動力係数 C_P の比較を示す。水車の直立長は、図-2に示すように35cmである。現地の来島海峡では、最大で3.5m程度の潮位差があり、水車の直立長から考えて有意な潮位差と考えられたため、このような検討を行った。

動力係数 C_P は、突出時に水没時と比べて0.1~0.2程度低い値を示す。このような傾向は、翼の一部が水面より出るため、流れがもつエネルギーの一部が造波抵抗に使用され動力変換効率が低下したと考えられる。

図-13 直立型水車の上端部の空中露出の影響
(サボニウス型水車，直立長35cm)

(5) 波が水車の回転に及ぼす影響

図-14は，水深 $h=40\text{cm}$ ，流速 $u=0.36\text{m/s}$ ，設定トルク $16\text{mN}\cdot\text{m}$ のときのサボニウス型水車に，通常波浪の条件に相当する周期 $T=0.9\text{s}$ ，波高 $H=4\text{cm}$ の波を作用させた時の水車の回転数の時系列波形を示す．図中に示すように波が到達した時点から回転数の変動がわずかに大きくなっている．波による水粒子水平速度は，水面変動と同じ位相で変化することが知られており，波峰が現れる時に定常流に流速が加算されるため回転数が上がり，波谷が現れるときに引き算されるため回転数が下がるなどの影響を受けたと考えられる．

また，図-15は，上記した流れの条件で通常波浪

図-14 定常中の水車に波が作用するときの水車回転数の時間的な変化(サボニウス型水車)

図-15 波高による定常中の水車の回転数の変化
(サボニウス型水車)

から激浪時の波浪を作用させたときの波到達前と到達後の水車の平均回転数を示す．常時波浪のときは，波の到達前と到達後で平均回転数にほとんど変化はないが，激浪時になると到達後の平均回転数が大きくなっている．このことから，波が潮流による水車の回転に悪影響を与えることはないと判定される．

(6) 流向制御板の有無による水車性能の比較

図-16，図-17は，流向制御構造をもつサボニウス型水車における，周速比 λ に対する，トルク係数 C_T および動力係数 C_P の変化特性を示す．水深 $h=40\text{cm}$ であり，流速 $u=0.4, 0.3, 0.2\text{m/s}$ の3種類の流速条件に対して負荷トルクを変化させて回転性能の測定を行った．図中には，先に示した流向制御板なしのサボニウス型水車($u=0.4\text{m/s}$)の結果を併せて示す．図から明らかなように，制御板無しの場合に比べて，トルクは大幅に増加する．また回転可能域も高速領域 $\lambda>2.5$ に拡大する．動力係数 C_P の最大値は， $\lambda\approx 1.5$ の条件で出現し，流向制御がない場合に比べて λ の大きな条件に移動するとともに，その値自体も0.5程度と三倍にも増している．また，両係数の流速への依存度は低く，流向制御板を設置した構造においても，これらの無次元係数が水車の性能評価に有効なパラメータであることがわかる．

(7) 回転翼固定時に水車に作用する潮流力

図-16 流向制御板を取り付けたサボニウス型水車のトルク係数

図-17 流向制御板を取り付けたサボニウス型水車の動力係数

図-18 サボニウス型水車の定常流れの実験から求められた抗力係数:羽根固定時

図-18は潮流のみが作用する条件下でのサボニウス型水車に作用する抗力の測定結果を抗力係数 C_D とレイノルズ数 (uD/ν , ν :動粘性係数) の関係で示す。

図より、直立型のサボニウス型水車の抗力係数 C_D は、2程度の大きさであることが認められる。この抗力係数の値は、半円断面でその円筒部が上流側に向いている場合の抗力係数 $C_D=1.2$ と、それが下流側に向いている場合の $C_D=2.3$ との中間的な値に相当しており、従来の研究成果とほぼ一致するものと考えられる。

(8) 回転翼固定時に水車に作用する潮流力と波力

図-19は、波と流れを受けるときの流体力（波力と潮流力の合算値）の強度を示す。流れの条件は、現地の潮流速に換算して2.5m/sが波の進行方向と同方向に作用するものとしてある。このとき、作用波の波長は、流れの作用により増大することになり、結果的に波高は低下することが知られている。

この図より、波と流れを同時に受けるときの流体力は、極小値のピークが流れの影響を受けて負値にならず、波向き方向に作用する流体力として現れることがわかる。

そして、本研究での検討結果によると、波と流れを同時に受けるときの流体力は、潮流力をベースの力として、これに時間的に変動する波力成分の正ピーク値を付加することで近似的に求められることが確認されている。実際場では流れによる力と波による力を加えた外力を設計に用いる必用があり、概略的には流れのみを受けるときの潮流力と波だけが作用するときの波力の線形和で作用外力が推定できる。

4. 結語

(1) 本研究で対象とした水車の動力係数 C_p の最大値はサボニウス型水車で0.14、ダリウス型水車で0.1、

図-19 波と流れを受けるときの作用流体力:現地換算量 (F+:波峰時流体力, F-:波谷時流体力, 作用波高を用いた波力強度による無次元化)

弧状三枚羽根型水車で0.12程度であることが実験的に確認できた。ただし、ダリウス型水車では、高い動力特性を示すと考えられる周速比 λ が2以上の高速回転状態を再現できておらず、今後さらに検討されるべき余地がある。

(2) 水車が全体的に水没している場合と頂部が水面から突出している場合では、突出している場合の方が、動力係数が低い値を示す。

(3) 流向制御工法として流向制御板を水車の外側に同心円形式で取り付けした場合、トルク係数および動力係数は流向制御板なしの結果と比較して三倍にも増し、また回転可能域も拡大するなど、非常に効果的であることが判明した。

(4) サボニウス型水車を、流れ方向に対して射影面積が最大となる条件で固定した時の抗力係数 C_D は1.7~2.1程度である。

(5) 波と流れが作用するときの直立型水車に作用する流体力は、両者の影響を考慮した推定が必要である。その推定では、近似的に流れのみが作用するときの抗力と波のみが作用するときの波力を線形的に加算する方法を用いることができる。

参考文献

- 1) Khan, N. I., Iqbal, M. T., Hinchey M. and Masek, M. : Performance of Savonius rotors as a water current turbine, The Journal of Ocean Technology, Vol. 4, No. 2, Maritime and Port Security, pp.71-83, 2009.
- 2) 経塚雄策・郡司智博・若濱久敬: 橋脚を利用した潮流発電について, 日本船舶海洋工学会論文集, 第3号, pp.47-52, 2006.
- 3) 木方靖二・塩野光弘: 来島海峡におけるダリウス形水車による潮流発電, 電気学会論文誌, Vol. 112-D, No. 6, 1992.