

潮流発電用ダリウス形水車の流力特性について

正員 経塚 雄 策*
学生員 若濱 久 敬**

尾川 協 一 郎**

Hydrodynamic Characteristics of a Darrieus Water Turbine for Tidal Power Generation

by Yusaku Kyoizuka, Member
Hisanori Wakahama, Student Member

Kyoichiro Ogawa

Summary

The Darrieus turbine is one of the suitable water turbine for tidal power generation, because of the high performance by making use of the lift generated by rotating wings around the vertical axis, therefore, no directivity to tidal current, and the structural simplicity with the straight wings. Torque generated by one, two and three rotating wings was measured by the dynamometer in the circulating water tank. Power coefficients of the turbines with two wing sections of NACA0018 with/without the camber were measured in the experiments. Power coefficient change by the wing attaching angles to the rotor was also studied. Torque around the axis of the Darrieus turbine is estimated by the single stream tube theory and the results of the starting torque are discussed in comparison with measurements.

1. はじめに

数ある自然エネルギーの中でも潮流エネルギーにはいくつかの特徴がある。第一は、その規則性である。潮汐の駆動源は地球と月、太陽などの天体運動によるので、過去および未来にわたって各天体の位置関係は調べられており、時間が指定されればどのような潮汐になるかを知ることができる。従って、エネルギー量は時々刻々変化したとしても、変化が長期にわたって予測可能であるので定常なものと同じように信頼に足るエネルギー源であると言える。また、一般にエネルギー密度が小さいとされている自然エネルギーにあって、潮流エネルギーは場所を選べば高密度であることである。狭い水道や海峡では地形による増速効果によって5ノットを超える潮流も珍しくはない。多くの島からなる我が国では、速い潮流で知られている海域は少なくない¹⁾。

著者らは、現在、長崎県平戸市の生月大橋の橋脚を利用した潮流発電の実証実験を計画しており、平成16年から設置予定海域の海洋観測を行ってきた。現地における潮流観測の結果については既に報告²⁾したが、平成18年11月には直径2 m、高さ3 mのダリウス形水車を実際に設置して1年以上の実海域実験を行う予定である。この実験の大きな目的のひとつ

は、実海域での長期運転に伴う発電性能の経時変化であり、特に付着生物による影響などについて調査することである。

さらに、潮流発電の実用化のためには、潮流エネルギーを高効率で電気エネルギーに変換することが必要であり、そのために設置海域の潮流に合わせた高性能の水車が不可欠である。前報においては、最近の海外における潮流発電のいくつかを紹介したが、その中では風力発電と同様にいわゆる水平軸のプロペラ式水車が多かった。通常、風力発電の場合には、装置は風向に合わせて首振り運動をするが、前報で紹介した潮流発電装置については首振り運動はせず、主流方向に向けて設置しているものであった。これは、強潮流域では地形効果によって潮流の流向は正逆反転するため、主流方向に合わせて設置しておけば逆流時もほぼ同等な性能を発揮することを期待しているためであると思われるが、実際には効率において不利は避けられないであろう。

一方、我が国においては、1980年代に日本大学グループが世界で初めて行った来島海峡における潮流発電実験^{3), 4)}において、3翼のダリウス形水車を採用したこともあってか、ダリウス形水車の研究が進んでおり、これを採用するものが多い^{5), 6), 7)}。ダリウス形水車は鉛直軸を持ち、流れの方向にはよらず、動翼の揚力を利用するものでエネルギー変換効率は一般に高い。ただし、ダリウス形水車は起動特性が悪いことや、動翼が後方に来る時には前方の動翼が発生する渦流中を運動することになるので、翼間の流力干渉が著しくなることが考えられるが、その詳細については現在も不明なことが多い。

* 九州大学大学院総合理工学研究院
** 楠トヨタ自動織機（研究当時、九州大学大学院総合理工学府）
*** 九州大学大学院総合理工学府
原稿受理 平成18年10月10日

著者らも、水車の構造が単純で流れの方向によらずエネルギー変換効率が高いという理由でダリウス形水車を採用し、模型実験を行ってきた。新たにダリウス形水車用の動力計を製作し、回流水槽において水車が発生するトルクを計測した。動翼として2種類の翼形状を選び、2翼および3翼の場合について実験を行うとともに、回転アームとの取付け角を数種類変化させて性能を比較した。特に、定常回転時のエネルギー変換効率（パワー係数）と静止時の起動特性（トルク係数）に注目して性能比較を行った。また、ダリウス形水車の流力特性を理解するために動翼が1枚だけの実験も行い、複数翼の結果と比較して翼間の干渉影響についても考察した。

さらに、理論的な考察として、定常翼の流力特性を用いた準動的な単一流管理論によって実験結果との比較考察を行った。

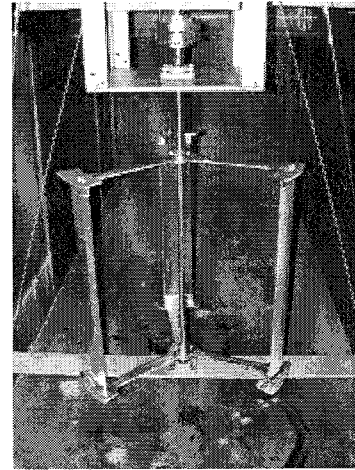


Fig.1 Experimental apparatus in the circulating water channel (B x D=1.5m x 1.2m)

2. 実験装置および実験方法

実験は九州大学応用力学研究所の回流水槽（観測部：長さ4.4m、幅1.5m、深さ1.6m）を借用して行った。Fig. 1は、回流水槽内における直径0.6m、スパン長0.6mの3翼のダリウス形水車の写真である。この写真のように、ここでいうダリウス形水車とは、鉛直軸を中心にして回転する矩形翼の水車のことである。

Fig. 2は、本研究で用いた2種類の動翼の断面形状を示しており、翼弦長が0.08mのNACA0018（以後、対称翼）と翼弦長が0.1mで、対称翼と同じ厚さ分布かつ動翼の運動軌跡と同じ円弧状のキャンバーをつけたもの（以後、円弧翼）の2種類を用いた。それらの主要目をTable 1に示す。ここで、ソリディティ（*Solidity* : σ ）とは

$$\sigma = \frac{n \cdot C}{2\pi \cdot R} \quad (1)$$

ただし、 n は翼数、 C は翼弦長、 R は回転半径であり、ダリウス形では水車効率上重要なパラメータのひとつとなっている。Shiono et al.⁶⁾は、 $\sigma=0.108\sim0.537$ の8種の水車について実験を行い、起動トルクについては σ の大きい方が良好で、水車効率については $\sigma=0.179$ が最良であったと報告している。他方、風車については $\sigma=0.1$ 前後の研究報告が多いが、翼数、翼形状などによってかなり変化しており、現在までのところ σ の最適値がいくらであるかというところまでは確定していない状況である。本研究の対称翼と円弧翼で同じソリディティとなっていないのは、当初からの計画でこれら2翼を考えていた訳ではなく、開発途中で得た情報によって追加したためである。

実験では、回流水槽の流れの中でモーター（定格1.8KW）により水車を強制回転させ、その時に水車が発生するトルク（定格トルク100N・m）を計測した。この動力計においては、流速と回転数によってはモーターは発電機として機能するため、回生電流を放電するための外部抵抗を付加している。

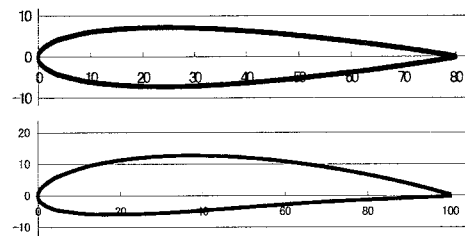


Fig.2 Wing sections (NACA0018 and NACA0018 with circular camber)

Table 1 Dimensions of the blade section

	NACA0018	NACA0018-C
Chord (C) (m)	0.08	0.1
Span (S) (m)	0.6	0.6
Camber	Non	Circular
Solidity (2-Blades)	0.085	0.106
Solidity (3-Blades)	0.127	0.159
material	Wood	Acyl

一様流速は0.5m/secから1.0m/secまで0.1m/sec間隔で変化させた。各流速で水車の回転数 n [rpm]を上げていき、水車の平均トルク Q [N・m]を求める。回転数を ω (rad/s)とするとトルク係数(C_Q)およびパワー係数(C_P)は次式で与えられる。

$$C_Q = \frac{Q}{0.5 \rho U^2 R A_w}, \quad C_P = \frac{Q \omega}{0.5 \rho U^3 A_w} \quad (2)$$

ただし、 $A_w = 2RS$: 水車投影面積

動翼の回転アームへの取付け角は対称翼では1/2弦長、円弧翼では1/4弦長位置で定義し、取付け角(A)を 0° 、 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ とした。 0° と 5° については、回転数を周速比($\lambda = R\omega/U$)が0、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0となるようにして各周速比でのトルク Q [N・m]の変動を計測した。この計

測は対称翼、円弧翼ともに水車翼数が1枚および2枚、3枚の場合について行った。

3. 単一流管理論による水車トルクの推定

単一流管理論⁹⁾とは、2次元翼素理論に基づく近似解法である。Fig. 3において、角速度 ω で回転する水車の流体抵抗を運動量理論によって求める。無限後方における流れの減速率を $2a$ とすれば、水車位置での流速は $U(1-a)$ であるとおけるので、水車の抵抗係数を C_{FX} とすれば

$$a = \frac{1 - \sqrt{1 - C_{FX}}}{2} \quad (3)$$

なる関係式が成立する。

Fig. 4において、回転角 θ の翼素中央における揚力、抗力、時計回りのモーメントを L, D, M とすれば、これによる回転軸周りの反時計回りトルク Q は次式で与えられる。

$$Q = L \times R \sin \alpha - D \times R \cos \alpha - M \quad (4)$$

ただし、 α は翼素の迎角で

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta - \tan^{-1} \frac{\lambda \cos \theta}{1 - a + \lambda \sin \theta} \quad (5)$$

ここで、 λ は周速比で次式で与えられる。

$$\lambda = R\omega / U \quad (6)$$

また、(3)の C_{FX} は水車の平均抵抗 \bar{T} によって

$$C_{FX} = \frac{\bar{T}}{\rho R U^2} \quad (7)$$

である。ただし、

$$\bar{T} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \{L \cos(\alpha + \theta) + D \sin(\alpha + \theta)\} d\theta \quad (8)$$

Fig. 5は、 $a = 0$ として(5)から計算された翼素の見掛けの迎角をいくつかの λ について示した。これを見ると、ダリウス形水車においては、 λ が2を超えると翼の見掛けの迎角は $\pm 30^\circ$ の範囲に入るが、 λ が2以下の場合には翼が一周する間の迎角変化は大きく、 $\lambda = 1$ では $\pm 90^\circ$ の範囲で変化することが分かる。

(3)~(8)によって、水車の軸周りのトルクを計算するためには翼の流力特性が $\pm 180^\circ$ の迎角に対して分かっている必要がある。Fig. 6は、九州大学応用力学研究所の大屋教授グループによる風洞試験によって得られたNACA0018の空力特性⁹⁾であり、レイノルズ数91,000の結果である。今回の実験では標準流速を1m/sとしてレイノルズ数を計算すると約80,000となるが、入手したデータセットのうちで最も近いものとしてこれを選択し、対称翼ダリウス形水車の回転軸周りのトルクを計算した。

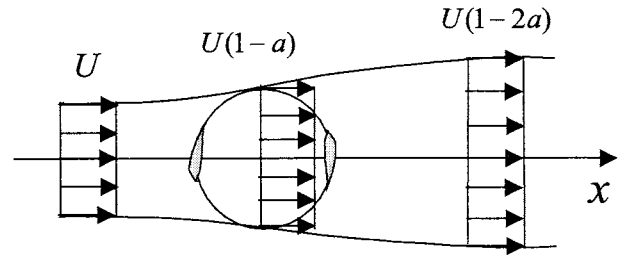


Fig.3 Single stream tube theory for Darrieus turbine

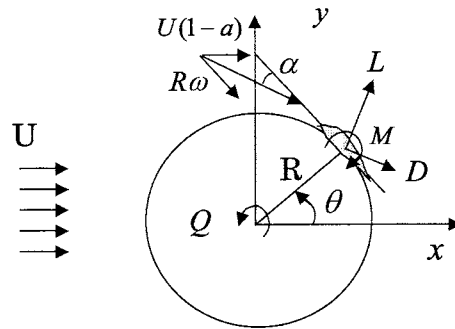


Fig.4 Torque about the origin by a rotating wing

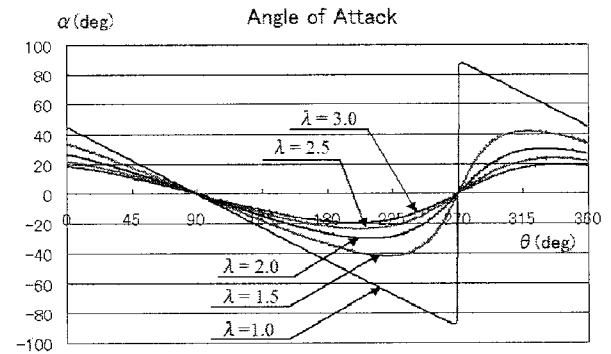


Fig. 5 Angle of attack vs. angle of wing position

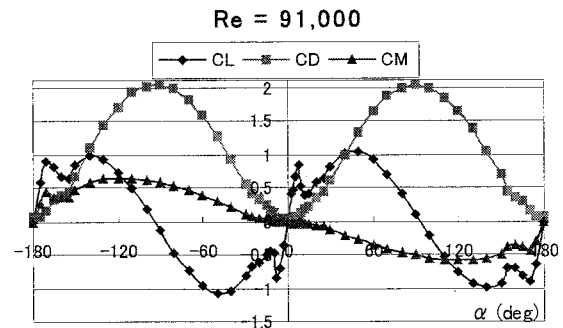


Fig. 6 Lift, drag and moment of NACA0018 at Re=91,000

4. 実験および数値計算結果の比較

4.1 起動トルク特性

ダリウス形水車の欠点のひとつは、静止状態からの起動特性の悪さであり、これをチェックしておくことは重要である。

Fig. 7は、円弧翼が1翼と3翼の場合について、無次元トルクの実験値を翼の角度(θ)に対して比較したものである。1回転を3分程度でゆっくりと定回転し、計測しているのほぼ水車静止時の起動トルクとみなすことができる。翼角度については、翼が 90° を通過するときパルスが発生し、パルス間の時間によって周期と角度を計算した。この結果から、1翼のトルクは 90° 付近で正の鋭いピークが2つ生じること、 135° 付近でやや大きな負の谷となっていること、 315° から 360° において正の安定した山があることなどが分かる。1翼の実験値を位相を 120° および 240° ずらして重ね合わせて、3翼のトルクを推定したものが(1 Wing x 3)である。これを3翼の実験値と比較するとほぼ重なっていることから、起動トルクについては翼間の流力干渉は小さなこと、3翼であっても起動トルクが負あるいはゼロに近い角度が数ヶ所あることなどが分かる。

Fig. 8は、対称翼単翼について、翼角度による回転軸トルクの変化を実験と単一流管理論によって比較した。これによれば、 120° 付近でのトルクの最大値は翼の揚力によるものと思われるが、その範囲は狭い。次のピークは 315° 付近で発生しており、この範囲は広い。この場合には抗力の影響が大きいものと考えられる。実験値と計算値の一致度については、トルク変動の角度にズレがみられるが、定性的には合っていると思われる。

Fig. 9は、対称翼が3翼の場合について、同様に起動トルクを比較した結果である。実験値についても1回転中にほぼ同じ波形が3周期繰り返していることが分かる。理論と実験の一致度は1翼の場合よりも良くなっていると思われる。この結果から、3翼にすると起動トルクは全体として正側にシフトするが、特定の角度ではやはり負となることが分かる。

最後に、Fig. 10は、円弧翼が2翼の場合の実験値とそれを位相を変えて3段にし、6翼とした場合の起動トルクを示した。実海域での実験は、2翼3段の水車を考えている。この結果から、6翼の場合には起動トルクが全周において正となっており、静止状態からのスムーズな起動が期待できる。

4.2 動的トルク特性

Fig. 11は、取付け角 0° の対称翼単翼について周速比によるトルク変動の実験値を比較したものである。 λ が2以下の場合には θ が1, 2象限で負のトルクが生じているが、 λ の増加とともにトルクは正方向にシフトし、トルク変動のピークはより大きな角度にシフトすることが分かる。

Fig. 12は、取付け角 0° の対称翼が3翼の場合について、周速比とトルク変動の実験値を比較したものである。1翼の場合には $\lambda = 2$ 以下で負のトルクが生じていたが、この場合には全周で正となることが分かる。 λ が大きくなるとトルクは

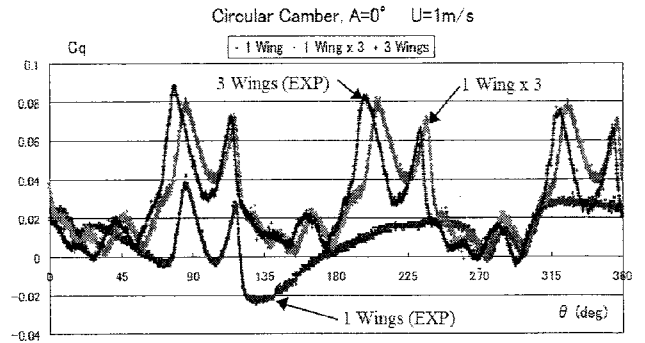


Fig.7 Starting torque of turbine with 1 or 3 blades turbine, combined means estimation of 3 blades from the single blade results

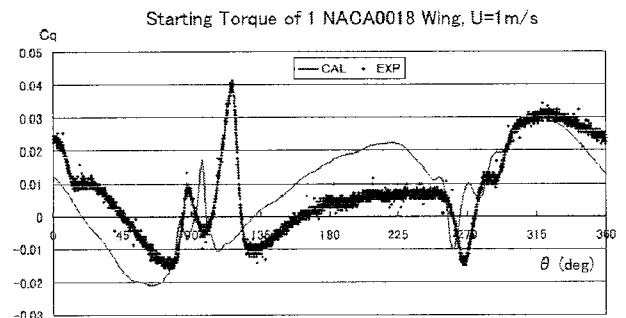


Fig.8 Starting torque of single NACA0018 wing in U=1m/s

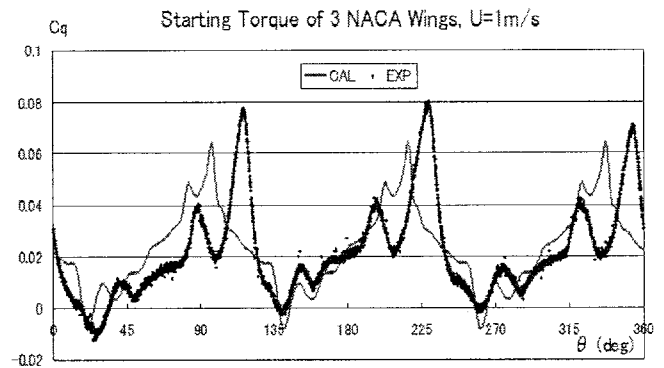


Fig.9 Starting torque of three NACA0018 wings turbine

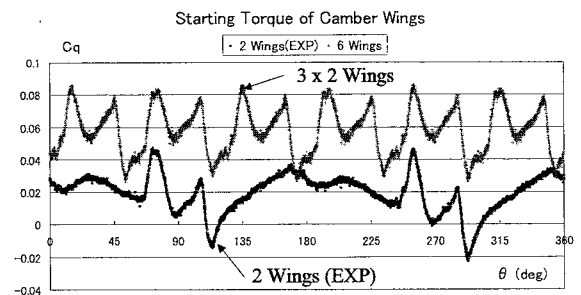


Fig.10 Starting torques of 2 and 3 x 2 wings turbine

正側にシフトし、同時にトルク変動は小さくなる、平均トルクの値は $\lambda = 2.0$ 付近で最大となること分る。

Fig. 13は、Fig. 12の $\lambda = 2.0$ の実験値とFig. 11の単翼の実験値を合成して求めた3翼のトルクの推定値を比較したものである。 $\lambda = 2.0$ では、Fig. 12の結果でも分かるように全周にわたって大きなトルクが発生しており、水車特性が最も良い周速比であるが、単独翼の結果をみると最大トルクは 250° 付近において生じていることが分かる。単独翼の結果から求められたトルク推定値を3翼の実験値と比較するとトルク変動の波形は良く一致しているが、3翼の波形の平均値は推定値のそれの倍くらい大きくなっている。これは、動翼が上流側 ($90^\circ < \theta < 270^\circ$) にあるときに作られる渦流が下流側の動翼の流体力に影響を及ぼし、結果的にトルクが大きくなったためであると考えられるが、その詳細については不明である。現在、厳密な条件を満たす数値シミュレーションを開発中であるので、別途報告したいと考えている。

Fig. 14は、動的トルクの推定に単一流管理論が使えるかどうかをみるために、対称翼が単翼で、 $\lambda = 2.0$ で回転する場合の実験値との比較を示したものである。理論値は減速比をいくつか変化させて比較した。この結果をみると理論と実験との隔たりは大きい。理論値は、揚力が大きく作用したと思われる 100° 付近の狭い範囲を除くと、広い角度範囲でトルクが負となっている。一方、実験値については、 130° から 175° の範囲で負のトルクとなっているが、それ以外は正のトルクとなっており、波形については単調な変化を示している。単一流管理論は、定常翼特性によって動的な問題を考える準理論であり、 $\lambda = 2.0$ 付近において動的トルク推定への適用は難しいものと思われる。

4.3 パワー係数

Fig. 15は、3翼の対称翼水車のパワー係数であり、取付け角(A)を $\pm 10^\circ$ の範囲で変化させた結果を比較した。この結果によれば、パワー係数に対する取付け角の影響は大きい。最適取付け角は 0° あるいは 5° であり、周速比によって変化する。最高効率、取付け角が 5° の水車で $\lambda = 2.3$ において $C_p = 0.41$ に達している。この最高効率、同じ翼形のダリウス形風車に対する風洞実験結果⁸⁾に比較して約3割程度高くなっている、回流水槽の狭水路影響によることが考えられる。

Fig. 16は、3翼の円弧翼水車の同様な結果の比較である。この場合には取付け角 $A = 5^\circ$ の結果が λ の広い範囲で高効率となり、最高効率は $\lambda = 2.0$ において $C_p = 0.42$ となった。また、取付け角によって、最適効率となる周速比が異なることも興味深い。対称翼との比較でいえば、円弧翼の方が広い範囲でパワー係数が高いので、3翼の水車については円弧翼を採用し、取付け角 5° とするのが良いと思われる。

Fig. 17は、円弧翼の2枚翼と3枚翼水車のパワー係数を翼取付け角を 0° と $+5^\circ$ で比較したものである。2枚翼については、取付け角が 0° の方が高性能であり、最高パワー係数は周速比 λ が2.6付近で $C_p = 0.42$ となった。この結果は、

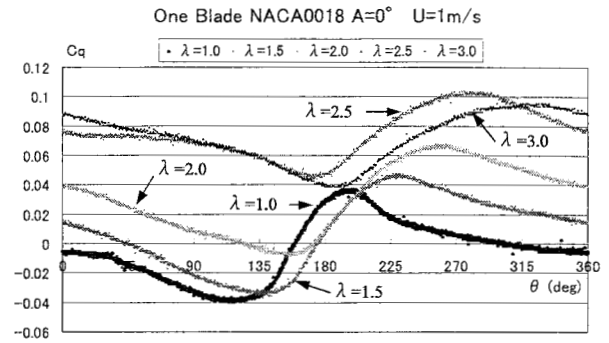


Fig.11 Torque variations of one blade of NACA0018 turbine for several wing velocity ratios

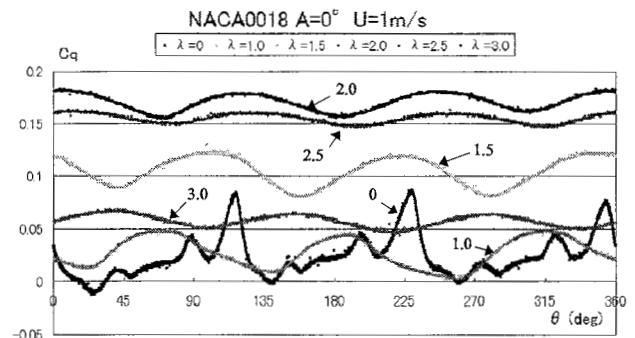


Fig.12 Torque variation of three blades of NACA0018 turbine for several wing velocity ratios

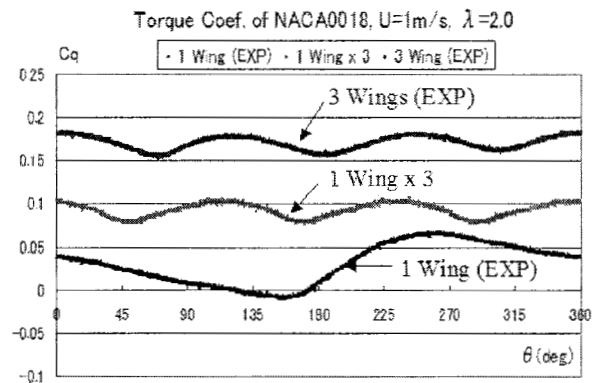


Fig.13 Torque variation of three NACA0018 wing turbine at $\lambda = 2$ in $U = 1\text{m/s}$, compared with the estimation obtained by the torque of one wing turbine

最高パワー係数において3枚翼と同等である。この場合のソリディティは3枚翼の2/3であり、その違いは大きい、取付け角を選ぶことによって同等の性能を発揮しうることになるので、取付け角の重要性はソリディティと同等であると言える。翼数を少なくすることができれば、水車製作費用の点で、また、大きな周速比は発電機の発電効率上でも有利であると思われる。

5. まとめ

潮流発電用のより効率的なダリウス形水車の開発を目的としてダリウス形水車の流力特性に関する実験的な研究を行った結果、以下の結論を得た。

1. ダリウス形水車の単翼、2枚翼および3枚翼の軸トルクを計測し、それらを比較することによって起動トルクおよび動的トルク特性が定性的に理解できた。起動トルクについては単独翼特性の重ね合わせで良く近似可能であるが、動的トルクについては翼間の干渉が大きい。
2. 動翼の断面形状、翼数および翼の取付け角は、水車のパワー係数に及ぼす影響が大きいので高効率となるように慎重に決定する必要がある。今回の実験範囲では、円弧翼の方が広い流速比においてパワー係数が高く、2翼の場合は取付け角が0°、3翼の場合は取付け角が+5°が高性能であった。
3. 単一流管理論は、水車の起動トルクの推定には使えるが、動翼トルクの推定については精度的に無理がある。より高性能な水車の開発設計ツールとしては、今後、流場の動的変化を表現しうる数値モデルの開発が望まれる。

以上を踏まえて、実海域で用いる潮流発電装置として、製造費用も考慮の上で、直径2m、動翼スパン長1mの2枚円弧翼を位相をずらして3段とした全没型水車を製作した。これを平成18年11月に長崎県平戸市の生月大橋の橋脚横に設置し、最低1年間の観測を行い、実海域での発電効率の経時変化などについて調査する予定である。

なお、今回の実験で求めたパワー係数については、同じ形式の風車に対する風洞実験結果よりも3割程度高い結果となっている。この原因として、模型寸法（直径0.6m）に比べて回流水槽幅（1.5m）が狭かったために、水路のブロック影響が現れたことが考えられる。ただし、この影響は各模型に対して同じ様に現れると考えられるので、本実験の定性的な結果については影響がないと考えられる。このことを確認するために、近日中に応用力学研究所の深海水槽（L

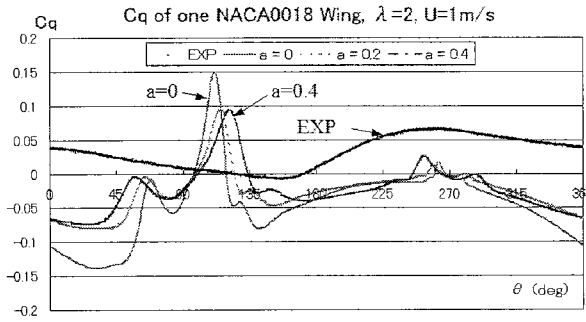


Fig.14 Torque variation of one blade of NACA0018 turbine by the single stream tube theory at $\lambda = 2$ in $U = 1$ m/s

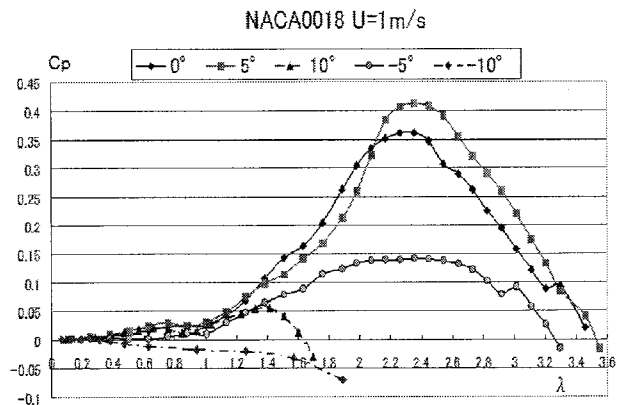


Fig.15 Power coefficients of 3-blades turbine with NACA0018 wing in several attaching angles

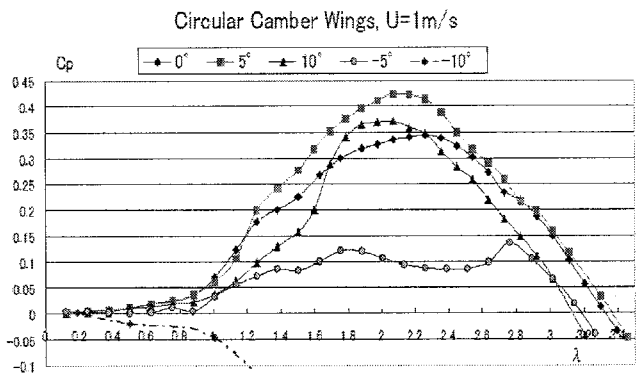


Fig.16 Power coefficients of 3-blades turbine with circular camber wing for several attaching angles

x B x d = 65 m x 5 m x 5 m) において比較実験を予定している。

謝 辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(A)、課題番号 17206087）の補助を受けていることを付記

し、謝意を表します。ダリウス形水車の開発については、九州大学応用力学研究所の大屋裕二教授からNACA0018翼の空力特性データの提供を含め、多くの有益な情報を頂きました。また、同研究所、渡辺公彦技官には動力計の設計、製作について多大なご協力を頂きました。両氏に対し、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 清水幸丸、編著：自然エネルギー利用学（改訂版）、パワー社、(1999).
- 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, 2006, pp.47-52.
- 3) 木方靖二：潮汐・潮流発電、日本エネルギー学会誌、第71巻、第5号、1992、330-337.
- 4) 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、電気学会論文集 D、112巻、6号、1992、pp.530-538.
- 5) 古川明徳、大熊九州男：低落差水力利用に開発されたダリウス形水車の潮汐発電への応用、ターボ機械、第26巻、第6号、1998、pp.34-40.
- 6) Shiono, M., Suzuki, K. and Kiho, S.: An Experimental Study of the Characteristics of a Darrieus Turbine for Tidal Power Generation, *Electrical Engineering in Japan*, Vol.132, No.3, 2000.
- 7) 鳥井正志、大久保寛、山根信、相良啓太、関和市：直線翼鉛直軸型潮流発電システムへの応用、太陽/風力エネルギー講演論文集、2004、pp.73-76.
- 8) 高橋周平：直線翼垂直軸型風車に適した翼形および諸要素の検討と曲面風レンズの適用による出力性能の向上、平成17年度修士論文、九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻、2006.
- 9) 関 和市、大谷 勇：直線翼垂直軸風車の性能、太陽エネルギー、Vol.16, No.3, 1990, pp.31-38.

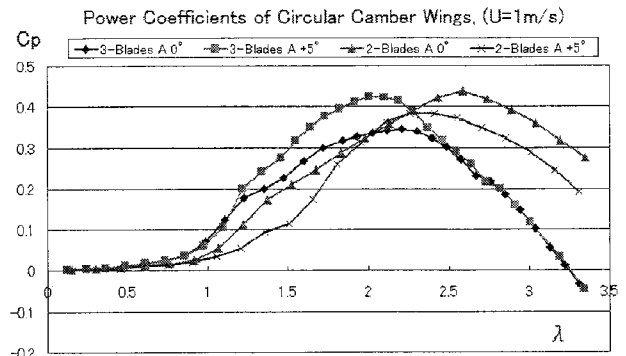


Fig.17 Power coefficients of two- and three-blades turbines with different attaching angles