

潮流発電用ダリウス・サボニウス混合水車の発電特性について*

経塚雄策^{*1}, 明 宏幸^{*2}, 浦方悠一郎^{*3}

Performance of the Darrieus-Savonius Turbine for Tidal Current Power Generation

Yusaku KYOZUKA^{*4}, Hiroyuki AKIRA and Yuichiro URAKATA

^{*4} Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University
6-1 Kasuga Koen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580 Japan

The Darrieus turbine is popular for tidal current power generation in Japan. It is simple in structure with straight wings rotating around a vertical axis, so that it has no directionality against the motion of tidal flow which changes its direction twice a day. However, there is one defect in the Darrieus turbine; its small starting torque. Once it stops, a Darrieus turbine is hard to re-start until a fairly fast current is exerted on it. To improve the starting torque of the Darrieus turbine used for tidal power generation, a hybrid turbine, composed of a Darrieus turbine and a Savonius rotor is proposed. Hydrodynamic characteristics of a semi-circular section used for the Savonius bucket were measured in a wind tunnel. The torque of a two bucket Savonius rotor was measured in a circulating water channel, where four different configurations of the bucket were compared. A combined Darrieus and Savonius turbine was tested in the circulating water channel, where the effect of the attaching angle between Darrieus wing and Savonius rotor was studied. Finally, power generation experiments using a 48 pole electric generator were conducted in a towing tank and the power coefficients were compared with the results of experiments obtained in the circulating water channel.

Key Words : Tidal current power generation, Darrieus-Savonius turbine, Torque coefficient, Power coefficient, Single stream tube theory.

1. 結 言

地球環境問題との関連で自然エネルギー利用促進が求められているが、海洋エネルギーについては潮汐エネルギー以外は実用化に至っていない現状である。潮汐エネルギーについては大きな潮位差が絶対条件であり適地は中緯度地帯の大洋に隣接した内湾に限られるが、潮流エネルギーについては大きな流速が条件であるので海域の地形に強く依存しており、適地の範囲は一般に広い。我が国は島国であり、多くの海峡、瀬戸が存在しており、そこでは一般に潮流が速く、潮流エネルギーには恵まれている。

我々は、2005年から長崎県の辰ノ瀬戸において橋脚を利用した潮流発電の実証実験プロジェクトを実施中[1]であるが、潮流は一定方向を往復的に変化するのでその特性を考慮して水車は鉛直軸のダリウス形を採用した[2]。ダリウス形水車は、動翼の揚力を利用するためエネルギー変換効率はプロペラ形とほぼ同程度であり、動翼に直線翼を用いた水車は構造の単純さから特に日本で採用例が多い。ただし、ダリウス形水車は自己起動性が悪いので、我々のように発電システムが独立電源の場合には起動トルク特性の改良が必要である。

本研究では、ダリウス形水車の起動特性の改善のために抵抗形水車であるサボニウス形水車との混合水車を考え、その流力特性について実験的な研究を行った。まず、サボニウス水車の半円形バケットの流力特性を得るために風洞実験を行った。次に、2枚のバケットの配置を変えた4種類のサボニウス水車に対し、回流水槽において一様流中で水車が発生する軸トルクを計測した。その結果、最も性能が良かったサボニウス水車をダリウス水車と組み合わせ回流水槽において同様な実験を行った。その際、両水車の取付け角によって起動トルクが大きく変化することを4種類の取付け角で確認した。ただし、これらの混合水車が最も効率的に発電可能となる周速比付近では、ダリウス水車単独時よりも3割程度発電効率が悪くなったため、この改善案としてサボニウス水車にラチェット機構を取りつけた実験も行った。

最後に、曳航水槽においてこれらの混合水車による発電実験を行い、水車の起動特性を確認するとともに、パワー係数などを回流水槽実験と比較した。

2 ダリウス・サボニウス混合水車の流力特性

2.1 サボニウス水車のバケットの空力特性

サボニウス水車は、1920年代にサボニウスによって考案されたもので複数の半円形バケットからなる抗力形水車である。特徴としては、形状が単純であり、低速におけるトルクが大きいことである。鉛直の回転軸を持つので、ダリウス水車と組み合わせることが可能であり、低速におけるダリウス水車の弱点を克服することが期待できる。そこで、まずサボニウス水車の流力性能を知るために半円形バケットの流力特性の計測を風洞実験で行った。実験は応用力学研究所の大型境界層風洞（計測部：BxHxL = 1.8m x 2m x 3m）を借用した。

Fig. 1 のように流れの方向を定義し、半円形バケットに働く力を 3 分力計によって計測した。半円バケットは、市販の亚克力パイプを半分に切断し、両端に 0.2m 角のエンドプレートが付けたものを用いた。（LxD = 0.975m x 0.12m）風速は 10m/s, 15m/s, 20m/s としたが、水槽実験で標準流速とした 1m/s と同じレイノルズ数となるのは 15m/s である。

Fig. 2 は、半円形バケットの揚力、抗力、モーメント係数の結果を示す。流れの迎角が 90 度付近において、揚力、抗力係数が大きく変化することがわかる。流速による違いは、モーメント係数に出ているが、揚力、抗力には表れていない。模型の亚克力が薄かったこともあり、風速が大きな場合には風圧で変形した影響がモーメントに表れたかもしれない。ただし、絶対値としては大きなものではない。これらの計測データは、単一流管理論による計算の中で用いられる。

2.2 回流水槽におけるサボニウス水車実験

Fig. 3 において定義されるような 2 枚バケットのサボニウス水車の回転トルクの計測を回流水槽において行った。現実的なサボニウス水車では、これとバケットの角度を 90° 回転させたものをス

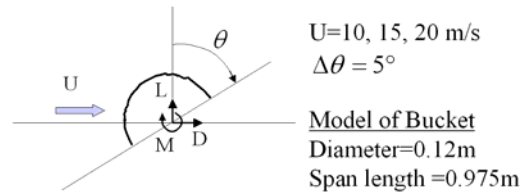


Fig.1 Angle of attack of the model in the wind tunnel tests

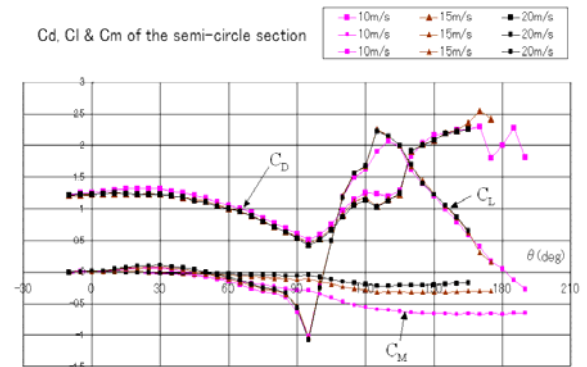


Fig.2 Hydrodynamic coefficients of a semi-circular section in steady wind

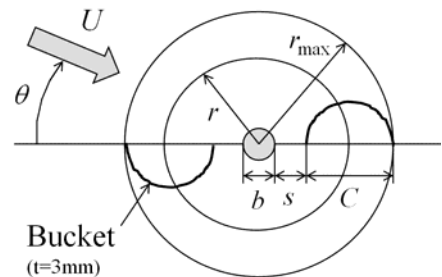


Fig. 3 Definition of Savonius rotor

Table 1 Configuration of bucket of Savonius rotor tested

	S (mm)	Rmax (mm)
Case-1	-36	94
Case-2	-26	104
Case-3	4	134
Case-4	24	154

C: 120mm, b: 20mm

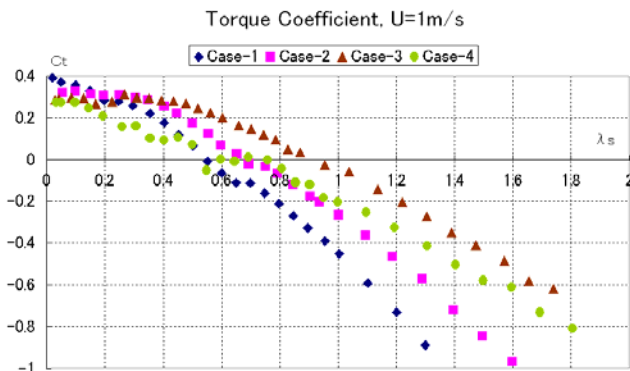


Fig.4 Torque coefficient of Savonius rotors, U=1m/s

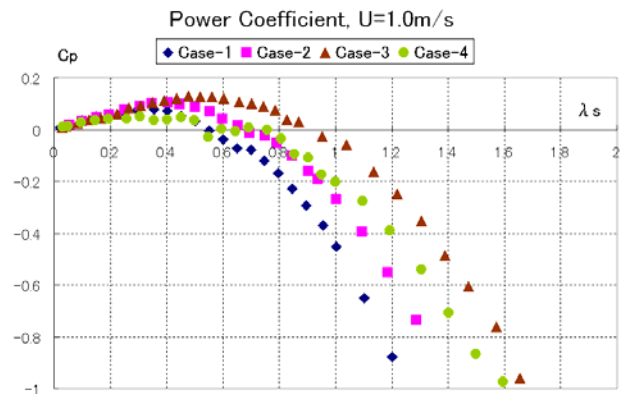


Fig.5 Power coefficient of Savonius rotors, U=1m/s

パン方向に半分ずつ組み合わせるのであるが、本研究では実験の単純化と計測トルクを大きくし、誤差を少なくするために2枚バケットとした。2枚バケットの取り付け位置による回転トルクの違いをみるためにTable 1のような4つの組合せについて実験を行った。

トルクの無次元化は以下の式によって行った。

$$C_t = \frac{Q}{0.5\rho r_{\max} A_S U^2} \quad (1)$$

ただし、 $A_S = 2r_{\max} L_{\text{span}}$ ：水車の最大投影面積

一様流速を $U = 0.6, 0.8, 1.0 \text{ m/s}$ とし、周速比を

$$\lambda_s = \frac{r_{\max} \omega}{U} \quad (2)$$

によって定義した。

Fig. 4は、今回行った4ケースのトルク係数の結果を比較したものである。Case-1は、 $\lambda_s = 0$ 付近におけるトルク係数が大きくて良好な性能であるが、 $\lambda_s = 0.6$ 付近で負のトルクとなっている。一方、Case-3については、 $\lambda_s \leq 0.9$ の範囲でトルクが正となり、他の場合よりも広い周速比範囲で良好な結果となっている。Case-4については λ_s の全範囲でCase-3よりもトルクが小さな結果となっており、回転軸とバケットの隙間の存在は水車の性能を低下させることが分かる。

2.3 単一流管理論によるサボニウス水車の解析

ダリウス水車の流力計算においてしばしば用いられる単一流管理論は、翼素理論と同じであり、物体による流れの乱れは小さい場合に有効であると考えられるが、本研究ではサボニウス水車のトルクの推定にこれを適用してみた。

Fig. 6の座標系において、一様流中で回転するサボニウス水車に働くトルクを求める。水車の抗力係数を C_{FX} とすると運動量理論によって水車位置での流速を $U(1-a)$ とすると、減速率 a (< 0.5)は次式で与えられる。

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

回転するバケットの相対流速および迎角 α に対する揚力、抗力、モーメントを L, D, M とすると回転軸周りのトルクは

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

で与えられる。ただし、迎角は

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

ただし、ここでの周速比は

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

である。また、水車の抗力係数は

$$C_{FX} = \frac{1}{2\rho r U^2} \int_0^{2\pi} \{L \cos(\alpha + \theta) + D \sin(\alpha + \theta)\} d\theta \quad (7)$$

によって求められるので、実際の計算では a を仮定して水車の流体力を計算し、(3)と(7)によって a の収束計算をする。

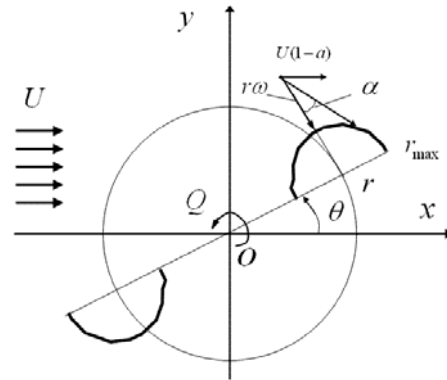


Fig. 6 Coordinate system of the analysis of Savonius turbine

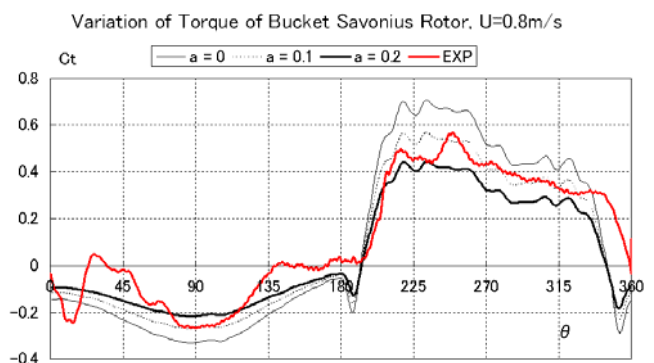


Fig.7 Variation of torque of one bucket Savonius rotor during one cycle, comparison of an experiment with the single stream tube theory

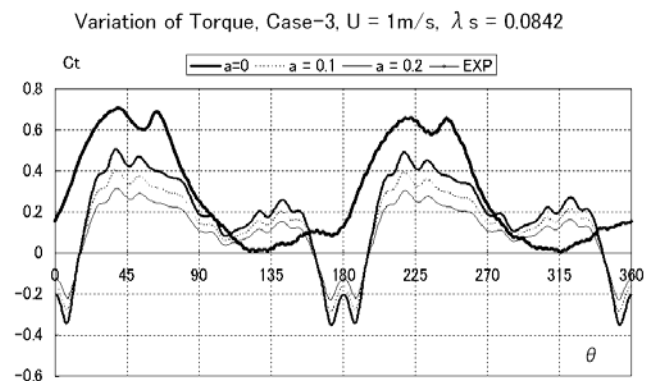


Fig.8 Variation of torque of two bucket Savonius rotor during one cycle, comparison of an experiment with the single stream tube theory

Fig. 7 は、バケット 1 枚時の単一流管理論の計算値と実験値の比較を示す。 λ_s は最大半径で定義した周速比であり、微速回転時であるが、一周間のトルク変動はほぼ予想通りの結果であり、両者の一致も良好である。

Fig. 8 は、2 枚バケットの場合の同様な比較であるが、計算値はバケット間の干渉効果は考慮できないので 1 枚バケットの結果を位相を変えて足し合わせるだけであり、 0° および 180° 付近で負のトルクが生じている。一方、実験値は全周にわたって正のトルクとなっており、バケット間の干渉効果が水車性能を改善していることがわかる。

Fig. 9 は、Case-3 の 1 枚および 2 枚バケットのサボニウス水車のトルク係数を実験および計算で比較したものである。

これを見ると $\lambda_s \approx 0$ の付近を除くと実験値は計算値よりも大きなトルクとなっており、また、トルク係数が 0 となる λ_s は実験値の方が数倍大きくくなっていることが分かる。2 枚バケットの結果については、計算では単純に 1 枚の結果を 2 倍するのに対し、実験では 1 枚の結果を正方向にスライドするように変化しており、バケット間の流力干渉によって性能が良くなっていることが分かる。

これらの結果から、サボニウス水車においては複数のバケットを用いることが大前提であるが、バケット間の流力干渉が結果的に水車のトルクを大きくしており、大きな周速比で正のトルクを発生していること、単一流管理論は翼素理論と同じであり、バケット間の干渉影響を考慮できないため現実的な結果を得ることができず、その適用性は低いこと、などが分かった。

2.4 ダリウス・サボニウス水車のトルク計測実験

前節の結果から、サボニウス水車としては Case-3 を採用して、Fig. 10 のようにダリウス水車との組合せを考えた。実験装置の都合上、スパン長はダリウス水車が 0.6m であるが、サボニウス水車については 0.475m である。両水車の組合せにおいて、特に両水車間の角度 (β) による影響が大きいと予想されたので β を $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ と変えて実験を行い、それらの結果を比較した。

Fig. 11 はダリウス水車の翼断面を示しており、NACA0018 に円弧状のキャンバーを持たせたものであり、円弧翼と呼ぶ。Table 2 にダリウス水車の主要目を示す。円弧翼による 2 翼ダリウス水車である。

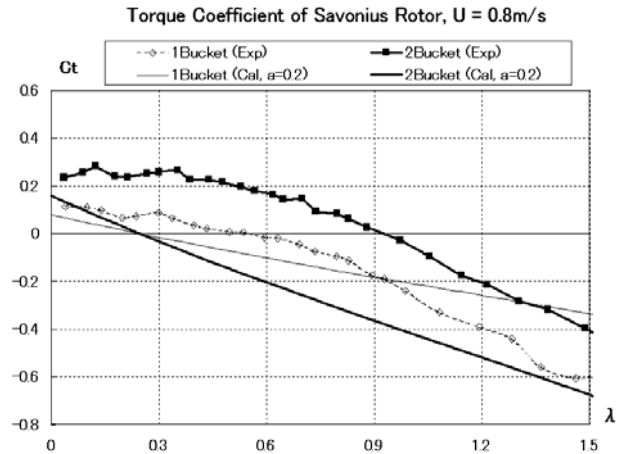


Fig.9 Comparison of torque coefficients of Savonius rotor of Case-3 between the single stream tube theory and experiments

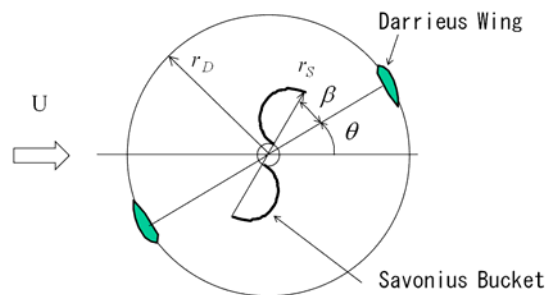


Fig. 10 Configuration of Darrieus wing and Savonius bucket

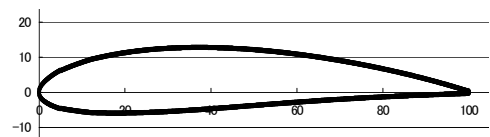


Fig.11 Darrieus blade section (NACA0018 with circular camber)

Table 2 Particulars of the blade of Darrieus turbine

	NACA0018-C
Chord (C) (mm)	100
Span (S) (mm)	600
Camber	Circular
Solidity (2-Blades)	0.106
Material	Aclyl

混合水車の実験については、ダリウス単独時の結果との比較を容易にするために各パラメータは以下によって定義した。

$$\lambda = r_D \omega / U \quad (8)$$

$$C_t = \frac{Q}{0.5 \rho r_D A U^2}, \quad C_p = \frac{Q \omega}{0.5 \rho A U^3} = \lambda \cdot C_t \quad (9)$$

ただし、 r_D はダリウス水車の半径であり、 $A=2r_DL_{span}$

はダリウス水車の正面積である。

Fig. 12 は、ダリウス・サボニウス水車のトルク係数をダリウス単独の場合も含めて比較した。まず、ダリウス単独の結果をみると $\lambda \approx 2.2$ 付近ではトルク係数が他の混合水車よりも断然大きく良好な性能であるが、一方、 $\lambda \approx 0$ 付近における起動トルクは最低となっていることが分かる。この小さな起動トルクの問題を解決するためにサボニウス水車との組合せを考えたわけであるが、この結果をみると起動トルクは全ての混合水車で改善されたことが分かる。ただし、両水車の取付け角による影響は大きく、 β が 90° あるいは 135° が大きな起動トルクを与えるが、 45° ではその効果は小さいことがわかる。一方、潮流発電を行う場合に稼動回転数となる $\lambda \approx 2.2$ 付近では、組合せ水車のトルクは総じてダリウス単独時の 7 割程度に減少する。すなわち、ダリウス水車に今回のサボニウス水車を追加することによって $\lambda \approx 1.4$ 以下では正のトルクを発生するが、 $\lambda \approx 1.4$ 以上では負のトルクを発生すると考えることができる。

この原因をサボニウス水車単独時の結果から考えてみよう。サボニウス水車単独時は $\lambda_s \leq 0.9$ において正のトルクであったので、もし、混合水車がそれぞれの水車特性の重ね合わせで与えられるならば、 λ_s を λ に換算すると $\lambda \leq 2.0$ では正のトルクとなるはずである。ところが、 $\lambda \approx 1.4$ を境にしてトルクが負になっているので、混合水車については両水車の結果を単純に重ね合わせでは表せないことを意味している。つまり、両水車の流力干渉は大きいものと考えられる。

これらの事情を明確にするために、1 周期間のトルク変動波形を比較してみよう。Fig. 13 は、 $\lambda=0.06$ というごく低回転時のダリウス水車単独、および混合水車のトルク変動波形を比較したものである。ダリウス単独時のトルクはほぼ全周にわたって小さくなっていることが分かる。これに対して混合水車については、それぞれ特定の角度において大きなトルクを発生している。トルク係数は、1 周期間の平均トルクによって計算されているので Fig. 12 の結果となることが理解できる。

次に、Fig. 14 は $\lambda = 2.0$ におけるトルク変動を比較したもので、発電機として用いられる周速比に近い。この場合には、 $\theta=180^\circ$ および 360° 付近のトルクのピーク値からも分かるようにダリウス単独時の性能が良い。 $\beta=0^\circ$ の場合には $\theta=120^\circ$ 、 300° 付近で負のトルクが大きくなっており、結果的に平均トルクを小

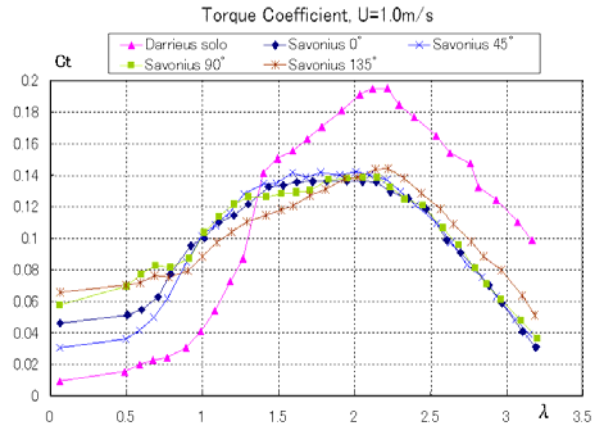


Fig.12 Torque coefficient of Darrieus-Savonius turbine of attachment angle β

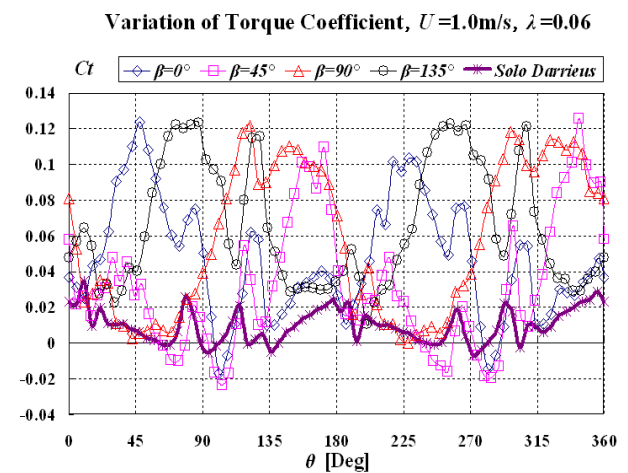


Fig.13 Variation of torque of the turbines during one cycle at $\lambda=0.06$

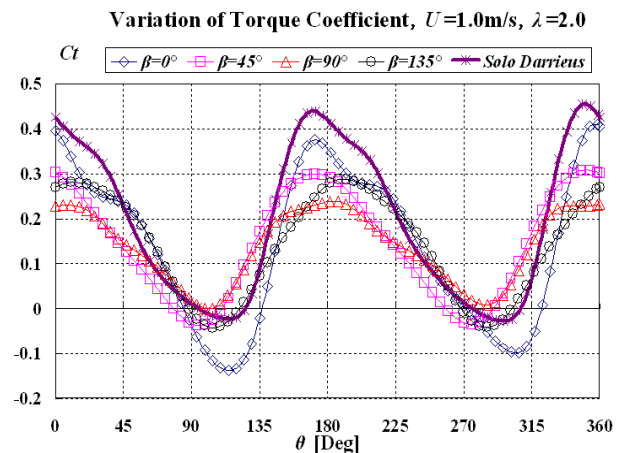


Fig.14 Variation of torque of the turbines during one cycle at $\lambda=2.0$

小さくしていることが分かる。なお、この図から判るようにこの周速比ではトルクの最大値はダリウス翼によってもたらされており、ピーク値は 180° と 360° の手前に存在している。 β によるトルク変動の違いは定性的にはありそうであるが、点数が少ないので明瞭ではない。

Fig. 15 は、以上の結果をパワー係数で比較したものである。ダリウス単独の場合には、最高のパワー係数は $\lambda = 2.2$ で $C_p = 0.43$ であるが、混合水車については3割程度効率が悪くなることが分かる。

2.5 ラチェット機構の検討

前節の結果から、ダリウス・サボニウス混合水車で発電効率がダリウス水車単独時の約7割にしかならないというもので、起動トルクの増大の代償としては大きすぎると思われたので、この改良のためにラチェット機構を導入することを考えた。つまり、 $\lambda = 2.2$ 付近では、ダリウス水車が大きなトルクを発生しているのに対し、サボニウス水車がブレーキとなっているためにトータルのトルクが減少したと思われたからである。もし、そうならばサボニウス水車にラチェット機構を付けることによって負のトルクをゼロとすることができ、ダリウス水車単独時のトルクが維持されることになる。Fig. 16 は、その実験装置の写真であり、水車の回転軸にプーリーを付けてベルトドライブによってサボニウス水車に固定されたワンウェイクラッチと連結している。サボニウス水車が反時計回りにトルクを発生するならば、そのトルクは水車の回転軸に伝えられるが、逆に時計回りのトルクが働けばワンウェイクラッチが遊転して、回転軸にはトルクは伝わらない仕組みになっている。

Fig. 17 は、曳航水槽で行われたラチェット機構付の混合水車と固定角の混合水車のトルク係数を比較したものである。 $\lambda > 1.6$ の範囲でラチェット機構付の結果が最も大きなトルクを発生していることが分かるが、Fig. 12 のダリウス単独時のような結果にはなっていない。このことから、混合水車のトルク係数が λ の大きな範囲において小さくなる原因はサボニウス水車が負のトルクを発生しているからではなく、サボニウス水車の後流がダリウス翼の正のトルクを減じているためだと類推される。また、ラチェット機構を付けるとサボニウス水車とダリウス水車の間の角度は不定であり、起動トルクも不定となってしまう。これらのことから、ラチェット機構付混合水車は水車性能の改善にはつながらないものと判断した。

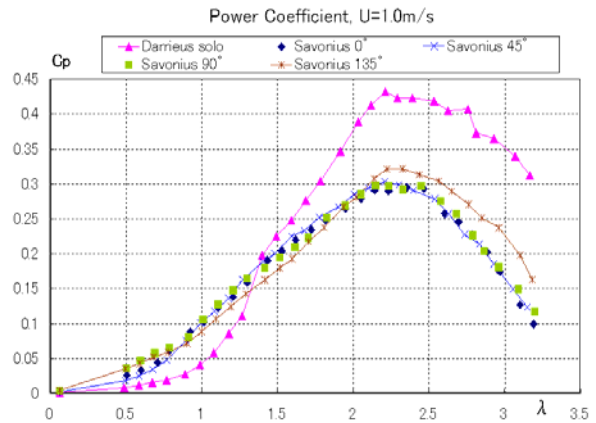


Fig.15 Power coefficient of Darrieus-Savonius turbines of the attachment angle β



Fig. 16 Ratchet mechanism attached on the Savonius rotor

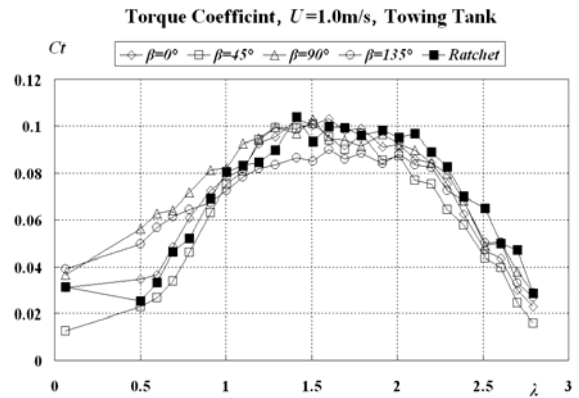


Fig.17 Torque coefficient of Darrieus-Savonius rotors including one with the ratchet mechanism in the towing tank experiments

なお、Fig. 12 と Fig. 17 の結果を比較すると、曳航水槽での実験結果は回流水槽でのそれに比べて約3割ほど水車性能が悪くなることが分かる。この原因については、確認してはいないが、両水槽の流れの乱れの違いによるものと考えている。つまり、回流水槽実験では乱流が十分に発達しているのに対し、曳航水槽実験では層流が支配的となっていることが考えられる。このことは、今後の研究において確認したい。

3 曳航水槽における発電実験

上記の実験によって、ダリウス・サボニウス水車の流力特性は明確となったが、特に水車静止時からの起動特性については、実際に発電実験を行って確認しておきたいという理由から、九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽 (LxBxD=65mx5mx7m) において以下の実験を行った。

前章で用いた動力計のモーターを外し、アウターローターコアレス発電機 (株)スカイ電子製 SKY-HR350 (1 kW) を直結して用いた。この発電機は 48 極であり、100rpm 程度の低回転数でも増速ギア無しで直結して使える特徴がある。発電機の出力は、AC-DC 変換器により直流に変換して計測した。Fig. 18 に実験装置の写真を示す。実験では、水車トルク、回転数、動翼角度検出のためのパルス信号、発電機出力電圧、電流を計測した。発電機の負荷は固定抵抗を 9 段階に切り替えて可変とした。

実験の方法は、曳航電車の発車時には発電機の負荷を無負荷とし、発車後に水車が回転したらスイッチを切り替えて所定の負荷を与えた。このような実験における約 40 秒間の実験記録例を Fig. 19 に示す。上から、トルク、パルスおよび発電電圧である。実験開始から約 10 秒で水車は無負荷で高速回転となるが、約 12 秒で負荷を投入すると回転数が落ちるとともに発電電圧もドロップすることが分かる。

なお、ダリウス・サボニウス水車では、停止時の角度によって起動トルクがゼロあるいは負になることがあり、曳航電車がスタートしても起動しない場合がある。その時には手で翼角度を変更して起動させた。

Fig. 20 は、ダリウス単独とラチェット有のダリウス・サボニウス水車、サボニウスの角度を固定した場合のダリウス・サボニウス水車の発電実験におけるパワー係数を比較したものである。パワー係数は、発電機出力から計算したので発電機の変換効率 (約 70%) の損失も含まれている。この結果をみると、一番効率が良いのはダリウス単独水車であり、ラチェットの効果については無負荷時の周速比は 3 を超えており、ダリウス単独とサボニウス固定の混合水車との中間的な性能であることが分かるが、発電機として稼動する $\lambda \approx 2.2$ では他の混合水車との差異は小さい。

4 結 論

本研究では、潮流発電用ダリウス・サボニウス水車のトルク特性、水車効率などについて実験的な研究を

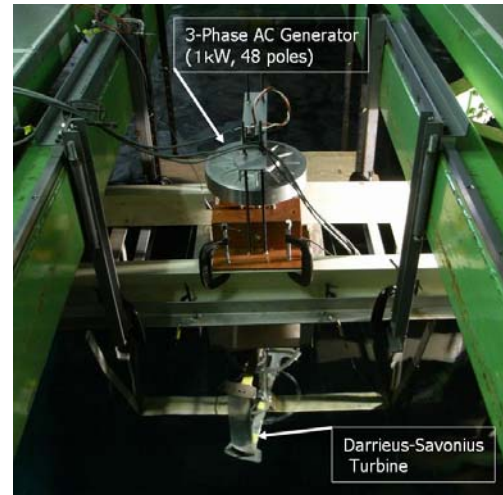


Fig.18 Power generation apparatus on the towing carriage

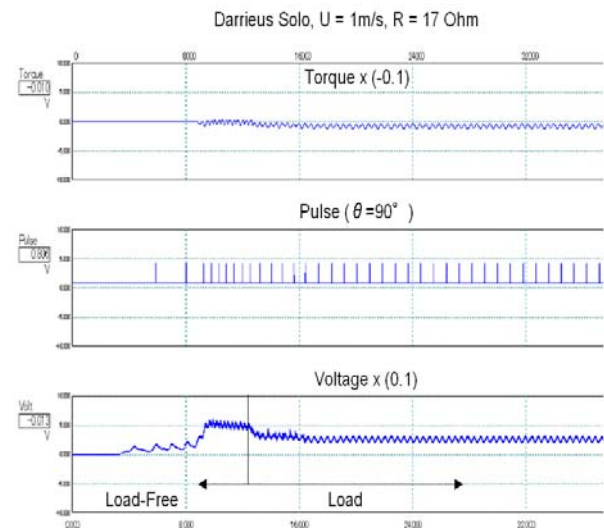


Fig.19 Time series during an experiment, torque of the turbine, the pulse signal at $\theta = 90$ degrees and the output DC voltage

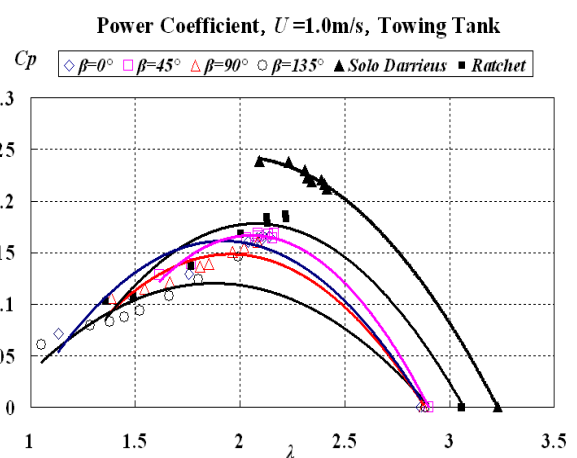


Fig.20 Power coefficients of Darrieus-Savonius turbines and solo Darrieus turbine by the power generation experiments

行った。既存のダリウス水車の回転軸にサボニウス水車を付け加えることによって、ダリウス形水車の弱点である静止時の起動トルクを大きくすることを試みた。そのために、サボニウス水車のバケットの流力特性を風洞実験によって求めるとともに、サボニウス水車単独およびダリウス水車との混合水車についても回流水槽実験を行った。その結果、サボニウス水車を組み合わせると起動トルクは大幅に改善されたが、反面、ダリウス水車単独時に最もトルクが大きくなる周速比 2.2 付近の高速回転時には 7 割程度に減少した。起動トルクはダリウス水車とサボニウス水車の取付け角によって大きな影響を受けるが、高速回転時にはその違いは少ないことなどが分かった。高速回転時のトルク減少を抑えるためにサボニウス水車にラチェット機構を適用することを試みたが、効果的ではなかった。この原因はトルク変動波形の比較によって、サボニウス水車の存在が流れ場を変化させ、ダリウス水車に影響を及ぼしたためと思われる。

最後に、48 極発電機による発電実験を行い、ほぼ所定の電力で発電可能であることを確認した。これらの研究により、ダリウス・サボニウス水車の理想形としては、多段式とし、それぞれの作動面が重ならない形式が推奨される。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術進行機構の科学研究費補助金、基盤研究 (A) 課題番号 17206087 (平成 17-19 年度) の補助を受けました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 経塚雄策、尾川協一郎、若濱久敬：潮流発電用ダリウス形水車の流力特性について、日本船舶海洋工学会論文集、第 4 号、pp. 39-45, 2006.
- (3) Sheldahl, R.E. et al., Wind Tunnel Performance Data for Two- and Three-Bucket Savonius Rotors, J.ENERGY, Vol.2, No.3, (May-June 1978), pp.160-164.
- (3) 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.

