

生月大橋の橋脚を利用した潮流発電について

TIDAL CURRENT POWER GENERATION MAKING USE OF A PIER OF THE IKITSUKI BRIDGE

経塚 雄 策¹
Yusaku KYOZUKA

¹正会員 工博 九州大学教授 大学院総合理工学研究院 (〒816-8580 春日市春日公園6-1)

A feasibility study on the tidal current power generation by making use of a bridge pier in the narrow strait is introduced. Current velocity increases near the pier, therefore the tidal power generation becomes more efficient because the power is proportional to the cubic of the current velocity. Furthermore, the pier is convenient for the maintenance of the hydraulic turbine and the power unit. The project is now underway at the Ikitsuki Bridge in Tatsuno-Seto Strait of Nagasaki Prefecture. A Darrieus turbine is adopted for tidal current power generation because 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, a hybrid turbine, composed of a Darrieus turbine and a Savonius rotor is proposed. A combined Darrieus and Savonius turbine was tested in the circulating water channel. 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 turbine, Savonius rotor, starting torque, torque coefficient, power coefficient,*

1. はじめに

我が国の海洋エネルギーの利用促進に関して、最近になっていくつかの動きがあった。まず、2007年7月に施行された「海洋基本法」およびそれに続く「海洋基本計画」の策定である。また、NEDOが海洋エネルギーの調査に関して初めて予算をつけたことも現実の問題としては大きい。このような出来事背景には、「地球温暖化防止」、すなわちCO₂削減のための自然エネルギーの利用促進という背景がある。

2008年3月に「海洋エネルギー資源利用推進機構」が産官学の海洋エネルギー資源研究者が結集して立ち上げられた。大目標としては、2050年における日本の電力量の10%以上にあたる1400億kWh/年を洋上発電、波力発電、潮流・海流発電、海洋温度差発電によって賄おうとするものである。このうち、潮流・海流発電では200億kWh/年の電力量が期待されており、これはランス潮汐発電所33個分に等しい。

これを海洋と言う過酷な環境下で実現することは並大抵のことではないと思われるが、海水密度は空気の約800倍であり、潮汐は規則的で将来にわ

たって予測可能であることなど他の自然エネルギーに比べて有利なことも多いので、今後、我々の知恵を結集することによって実現可能であると思われる。

本報では、潮流発電に関する国内外の研究の現状をまず紹介し、次に我々が現在行っている研究を紹介する。最後に、今後の課題について述べる。

2. 潮流発電に関する国内外の研究の現状

自然エネルギーによる発電については、ヨーロッパ諸国が熱心であり研究も先行している、潮流発電についても同様である。

ノルウェーの最北端ハンメルフェスト近くのクバルサンド海峡において行われている潮流発電では、海底設置形の3翼プロペラ式の水車が用いられている。プロペラ直径は20mで、潮流の向きに応じてプロペラピッチが可変となっている。狭い海峡では、潮流は一定方向で向きを変えるので、風力発電のように首振り運動する必要はない。最大流速2.5m/sの潮流中で、プロペラ回転数は7rpm、平均出力は80kWである。年間発電量は70万kWhで、日本の標

準世帯ならば約 166 戸分の電力量に相当する。この装置による発電電力は 2003 年 9 月に世界で初めて、ノルウェーの電力網に接続された。

イギリスの Marine Current Turbines 社は、海中に支柱を立てて、稼動中は水中にメンテナンス時には空中に出るような昇降機能を備えたプロペラ式潮流発電装置の開発を行っている。1999 年から 2006 年まで Seaflo Project を実施し、2003 年 5 月にイギリス海峡のプリマス (Plymouth) において直径 11m の 2 翼プロペラ式発電機を設置し、最大 300KW の実証実験に成功した。このプロジェクトは現在、Phase-2 の SeaGen Project (2004-2007) に引き継がれており、ツインローター方式で 2 機のプロペラ式水車により 1 MW の発電を目指している。SeaGen では、水深 30m ほどの海域においてプロペラ直径を 18m とした装置が想定されている。同社では、さらに Phase-3 として SeaGen Array and overseas demonstration projects を平行して進めており、Array では 10 ユニットで 10MW の潮流発電を目指している。

同じくイギリスの Lunar Energy 社は、海底設置型でダクト付きプロペラ式潮流発電装置 (RTT) を開発中である。ダクトは前後対称で、流れの中でヨー制御はしないが、一定角度以内の流れに対してはプロペラ位置で増速効果があり、高効率で発電できるとしている。発電装置は、前後にダクトを配し、中央部にプロペラおよび発電ユニットを置くが、中央部はメンテナンスが必要となることを想定してカセット式に脱着可能となっており、水面上の船舶から操作する。2008 年に Orkney にある欧州海洋エネルギーセンターで 1 MW のタービンの確認実験を行う予定である。

イギリス沿岸においては、強潮流域の水深は 30m 以上のところが多いので、浮遊式が有利となっている。SMD 社の "Tide1" という潮流発電装置は、1 対の逆回転するプロペラ式発電装置を水平ビームでつないだものである。浮力体によって海中では浮くが、流れの中では力の釣り合いによって自律的に水平姿勢をとり、潮流発電を行う。2003 年までに 1/10 スケールの模型実験を終了し、実用化を目指している。実機は、水深が 30m 以上の海域において、直径 15m のプロペラによる発電機 2 台で、最大 5 ノット (2.5m/s) の潮流中で 1 MW の発電を計画している。

アメリカでは、ニューヨークのイーストリバーにおける潮流発電の計画がある。水面下 9m の海底岩盤にパイルを打ち込み、ヨー制御した全没プロペラ式潮流発電装置 (30KW) によって、最初は 6 台で最大 200KW の実証実験を行い、最終的には 200~300 台の装置によって 10MW の発電を行うことを計画している。これによってニューヨークの 8,000 戸分の電

力を供給することを目指している。

韓国南西部の珍島と本土の間にある Uldolmok 水道は最大流速が 13 ノットであり、潮流発電には最適地である。KORDI の 2006 年の年次報告書によれば、鉛直軸のヘリカル (Gorlof) 形水車による 1 MW のパイロットプラントが 2007 年中に完成の予定である。詳細については不明であるが、報告書の写真と図面から判断すると、海峡にジャケットフレームを設置し、その中に水面貫通の 4 段ヘリカル水車をおき、発電機はジャケットのデッキに置くような計画である。発電機は、同期型と非同期型でそれぞれ 600KW の発電を行い、性能を比較することを計画している。

上記の例は、いずれもそれぞれの国内におけるプロジェクトであったが、いずれ確立した技術は輸出されて、国際的なビジネスになるのは必定である。'OpenHydro' は米国の会社であるが、送風機と同様なローターを回し、ローター先端に取り付けられた永久磁石とそれを包むダクトにおかれたステーターによって発電する潮流発電装置を開発した。ローターの中心は穴が空いており、ローターが高効率で作動できるように流速を制御している。また、ローターの中心の穴は魚の逃げ道としても有用であるとしている。この装置は、カナダのノバ・スコシア電力からファンディ湾における大規模潮流発電ファーム計画の候補に採択された。また、英国およびアイルランドからの支援によって、Orkney の欧州海洋エネルギーセンターでの実海域実験を行っている。

以上のように、世界の各国で現在、潮流発電に関する研究開発が盛んに行われている。一方、我が国では、1983 年から 1988 年まで日本大学のグループが来島海峡において潮流発電実験を行い、世界で初めて潮流発電に成功した。日大の潮流発電装置は海底設置型のダリウス形水車を用いたもので、3 枚の翼はカーボン FRP を用いて製作され、軽量化されている。水車の下に増速比 1 : 9 の増速機があり、その下に 3 相同期発電機 (AC200V, 5KW) が置かれた。第 3 期実験は、約 2 年間にわたって行われ、発電量の長期的な変動や海洋生物による水車への影響なども明らかにされた。^{1), 2), 3)}

日本大学の先駆的な研究は、日大 OB の篤志家からの資金援助によって行われたが、その後、公的な研究支援もなかったため、継続しなかった。しかし、この成功の事実は大きく、その後の日本大学および海上保安庁、新日鉄における潮流発電の研究でもダリウス形水車が採用されている⁴⁾。

なお、数年前から津軽海峡における海流発電に関する基礎研究が弘前大学において行われている⁵⁾。

3. 生月大橋の橋脚を利用した潮流発電

我々の研究室では、2004年から長崎県平戸市の生月大橋の橋脚を利用した潮流発電の研究を行っているが、この研究では、実海域における潮流発電の実証実験を行うことを第一の目的とし、海水による腐食と付着生物の影響が水車および発電システムの性能に及ぼす変化について調査することなどを第二の目的としている。橋脚を利用するメリットはいくつかあるが、まず第一に発電装置の設置の容易さである。



辰ノ瀬戸 (700m) 長崎県平戸市生月町

(1) 現地の概況と潮流観測結果⁶⁾

図-1は長崎県平戸市周辺の地図であり、図-2の生月大橋は辰ノ瀬戸に架かる全長960mの鋼トラス形式の橋である。辰ノ瀬戸は、最狭部が約700m、最大水深が約50mであり、橋の建設前の調査によって大潮時の最大流速が約3ノットであることが分かっている。

図-1 長崎県平戸市生月町の辰ノ瀬戸の場所



図-2 生月大橋写真

図-3は、潮流発電装置の当初の設置案であり、我々が使用している生月島側の橋脚の様子を示している。平均水深7mの下に直径25mのコンクリートの土台がある。その上面は水平でほぼ建設時と同じ状態であり、装置の設置には好都合となっている。この橋は長崎県道路公社が管理しており、付近の海域は館浦漁協の管理下であるが、幸い両者からの協力が得られた。

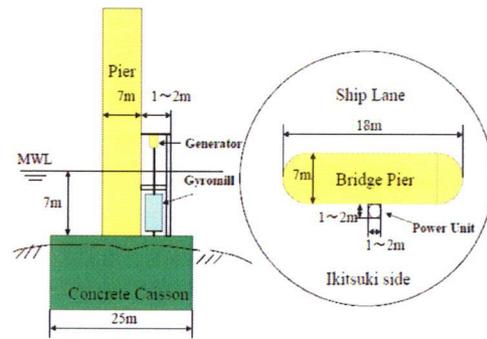


図-3 橋脚を利用した潮流発電装置の設置 (当初案)

平成17年6月から現地に超音波式多層流速計 (ADCP, $f=1\text{MHz}$) を設置して、潮流観測を行った。図-4は、平成17年8月26日から約1ヶ月間の観測データ (10分毎) から得られた流速ホドグラフであり、海底上0.9mと4.9mでの観測結果を示した。

橋脚によって約5割ほど増速されたことになり、前述の2次元計算と概ね合った結果が得られた。

下げ潮時の南西方向への流れの方が上げ潮時の逆方向への流れよりもやや大きいこと、海底上0.9mの観測値では上げ潮時と下げ潮時の方向が正反対とはなっていない、などが分かった。この観測から、現地における最大流速は大潮時に約2.4m/sであることが分かった。生月大橋建設時の現地観測では、最大流速が3ノット (1.5m/s) であったということなので、

図-5は、大潮を含む7日間について、流速の観測値と潮汐主要4分潮の流速から単位面積当たりの潮流パワーを計算した結果を比較したものである。

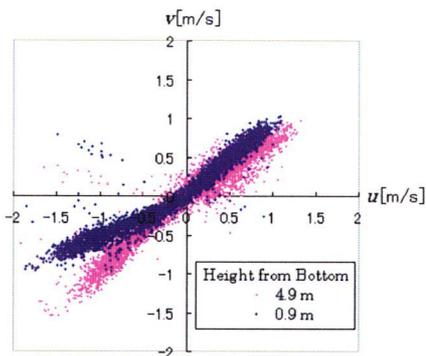


図-4 流速ホドグラフ

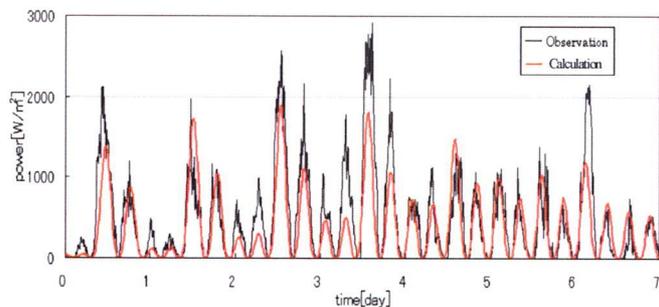


図-5 平成17年9月の大潮をはさむ7日間の単位断面面積当たりの潮流パワー (実測値と主要4分潮からの計算値の比較)

と、主として半日周潮と日周潮の足し合せによって潮流パワーが大きいのは1日1回であること、主要4分潮による流速だけで近似すると精度が悪いことなどが分かる。

(2) ダリウス形水車の開発⁷⁾

水車については、図-6に示すような鉛直軸回りに回転するダリウス形水車を採用した。その理由は、周期的に流れの方向を変える潮流に対して有効であり、構造的にも単純であるためである。また、日大グループがダリウス形水車によって成功したという事実が大きい。ただし、潮流発電装置を考えるなかで水車の特性を熟知しておくことは必須と考えて独自に模型実験を行った。

図-7は、回流水槽中の3翼ダリウス形水車の写真であり、直径0.6m、スパン長0.6mである。動翼としては、図-8の2種類の翼形状とした。円弧翼の厚さ分布はNACA0018と同じで回転円弧と同じキャンパーを持つものである。それらの2翼および3翼の水車について実験を行うとともに、回転アームとの取付け角についても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。

トルク係数およびパワー係数は次式で定義される。

$$C_Q = \frac{Q}{0.5\rho U^2 R A_w}, \quad C_P = \frac{Q\omega}{0.5\rho U^3 A_w} \quad (1)$$

ただし、 A_w :水車投影面積、 R :水車半径

図-9は、円弧翼の起動トルクの1回転中の変動を調べた結果である。1翼と3翼の実験値および1翼の結果を位相をずらして重ね合わせた結果を比較した。この結果から、3翼でも特定の角度において起動トルクがほとんどゼロとなること、1翼の実験

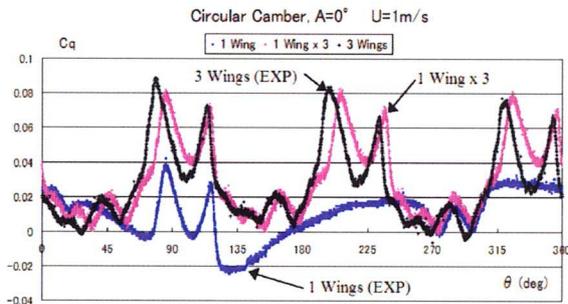


図-9 円弧翼の起動トルクの比較、1翼と3翼の実験値および1翼の結果を位相をずらして足し合せた半実験値(1Wing x 3)

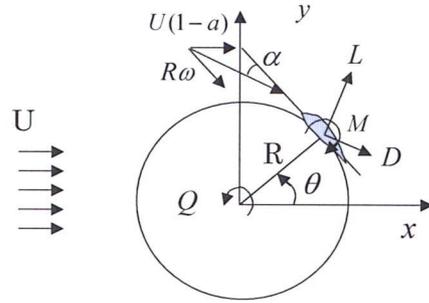


図-6 ダリウス形水車の座標系および諸量の定義



図-7 回流水槽中の実験模型

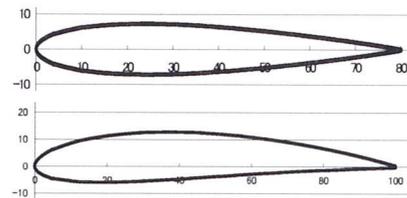


図-8 動翼断面形(NACA0018と円弧翼, 単位:mm)

値を足し合わせて計算した結果が3翼の実験値とほぼ同じであるので起動トルクについては翼間の干渉はそれほど大きくないことなどが分かる。

図-10は、2翼および3翼の円弧翼水車のパワー係数を周速比($\lambda = R\omega/U$)について比較したもので、取付け角による影響も比較した。この結果、2翼では取付け角が 0° 、3翼では $+5^\circ$ が良好な性能であることが分かる。また、それらのパワー係数のピーク値はほぼ同じであるが、そのときの周速比は

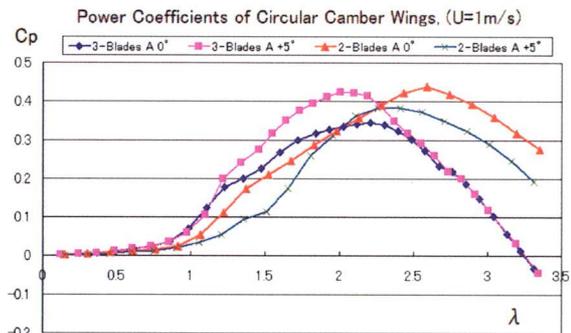


図-10 2枚円弧翼水車と3枚円弧翼水車のパワー係数の比較

2翼の方が大きい。このことは、発電機を含めて考えると2翼水車の方が増速比を小さくすることができるので有利であり、翼数を減らすことができるのはコスト的に大きな利点である。

これらの結果から、実海域模型として直径 2m、スパン長 1m の 2翼ダリウス形水車を位相を 120 度づつ変えて 3 段とした潮流発電装置を製作し、平成 18 年 11 月に実海域に設置した。水車の回転をチェーンベルトによって 1:8 に増速し、フレキシブルシャフトによって橋脚の踊り場に設置した発電機（出力 5.5kW）に連結した。ところが、設置直後から長時間起動しなかったため、フレキシブルシャフトが固まってしまい、大潮時にも回転することはなかった。このことは、発電機を回転させるために必要なトルクに比べて水車の起動トルクが相当に小さすぎたためであり、装置の機械損失を小さくすると同時に水車の起動トルクを大きくすることが必要と思われた。

(3) ダリウス・サボニウス混合水車の実験

既存のダリウス形水車の起動トルクを大きくするために、図-11 のように回転軸にサボニウス形水車を付けることを試みた。サボニウス水車は、半円弧形のバケットの抵抗係数が流れの方向によって異なることを利用する抵抗型水車であり、形状が単純ことで比較的広く使われている。特徴は、低回転時ほどトルクが大きいことであり、ダリウス水車とはそれぞれの欠点を補完できる可能性がある。そこで、まずサボニウス水車単独の実験を行い、回転軸が存在する場合の最適バケット配置を求めた。

次に、ダリウス水車と組合せるときの両水車間の角度（図-11 の β ）が重要であるので、 β をいくつか変えて実験を行った。図-12 は、ダリウス単独も含めたトルク係数の結果を比較したものである。 λ がゼロ付近の結果から、ダリウス単独では起動トルクが小さいこと、混合水車ではそれが大きいことが β による影響も大きなことが分かる。また、 $\lambda > 1.4$ では、ダリウス単独水車のトルクが大きいことが分かり、発電時に相当する $\lambda = 2.2$ 付近では混合水車はダリウス単独の約 70% の効率となることが分かる。これについては、 $\lambda > 1.4$ ではサボニウス水車が負のトルクを発生しているのではないかと思われたので、ラチェット機構を利用してトルクが負になったら自由回転できるようにした実験も行ったが、結果は改善されなかった。このことから、 $\lambda > 1.4$ では、サボニウスの存在が水車回りの流れを乱して結果的にダリウス水車のトルクを減じるものと思われた。

(4) 曳航水槽における発電実験

上記の実験は、モータを用いて強制回転させたときのトルクを計測して求められたものであり、水車効率については理想的なものである。一方、実海域実験では、潮流中で自己起動する必要があるため若

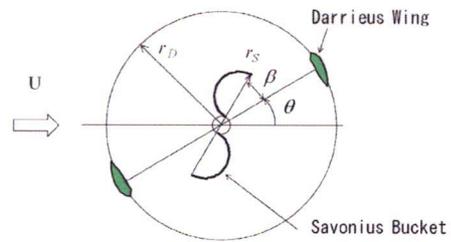


図-11 ダリウス・サボニウス混合水車

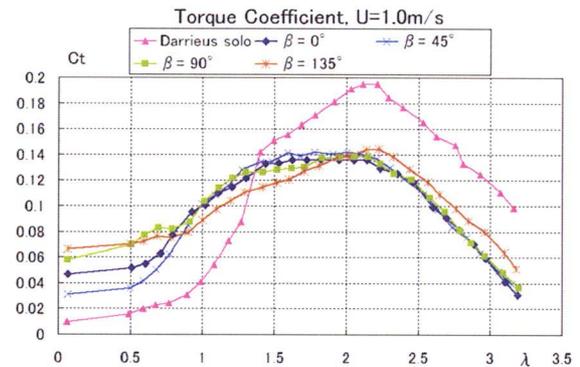


図-12 ダリウス・サボニウス混合水車およびダリウス単独水車のトルク係数の比較

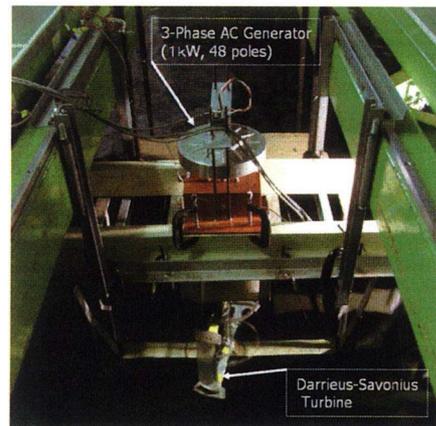


図-13 曳航水槽におけるダリウス・サボニウス水車と発電装置

干事情が異なってくる。そこで、静止時からの水車の起動特性については、九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽 ($L \times B \times d = 65\text{m} \times 5\text{m} \times 7\text{m}$) において実際に発電実験を行って調査した。前節までの実験で用いた動力計のモーターを外し、48極コアレス発電機 (1 kW) を水車に直結して用いた。この発電機は 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。発電機出力は、AC-DC 変換器により直流に変換して計測した。図-13 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。

図-14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、混合水車はその70%程度の性能であることが分かる。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、ダリウス単独水車とサボニウス固定時の混合水車との中間的な性能であることが分かる。ただし、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と言える。

(5) 実海域模型の改良

以上の結果から、実海域実験用の水車として図-15のようなダリウス・サボニウス混合水車に改良した。すなわち、3段のうち、1段目と3段目を混合水車にし、2段目はダリウス単独水車とした。また、伝達系は増速ギアとし、発電機と一緒に水密ボックス中に収納した。この改良により、工場における発電装置の起動トルクは25N-mと約1/4にすることができた。

平成20年3月14日に生月大橋の現地において再設置工事を行い、現在データを収集中である。幸い、設置直後の弱い流れの中でも回転をしていることを水中ビデオによって確認した。ADCPの流速計測と連動して、発電機の回転数および発電量などを計測しており、最低1年間の観測を予定している。

4. おわりに

潮流発電は、原理的には風力発電と同じであるが、“静か”，“見えない”，“予測可能”な“再生可能エネルギー”であり、両者の違いも大きい。ただし、海の世界は予想以上に苛酷であり、潮流発電の実用化にはまだまだ道のりが遠いと言わざるを得ない。ECでは、既に数年前から実用化に向けて、実海域における国際共同研究を開始している。この点、我が国の取組みはかなり遅れており、最近になってようやく始まったといった段階である。実用化に至るまでに予想される課題としては

- ・ 潮流発電適地に関する情報
- ・ 高性能水車システムの開発
- ・ 海水中における材料の腐食対策
- ・ 生物付着による発電性能の経年変化
- ・ 変動する発電量の平滑化と送電方法
- ・ メンテナンスの方法

など多いが、各分野の技術を結集することによってそれらを解決し、できるだけ早期に実現できることを期待している。

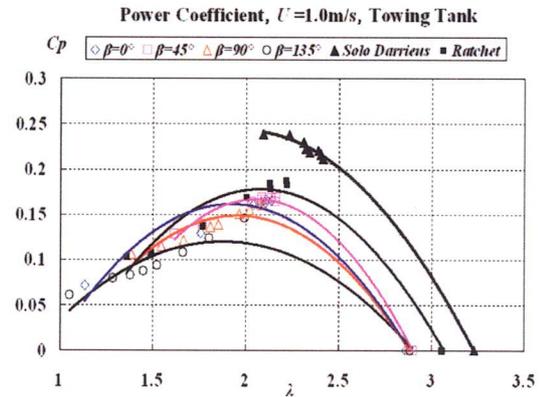


図-14 ダリウス・サボニウス混合水車およびダリウス単独水車の発電効率の比較

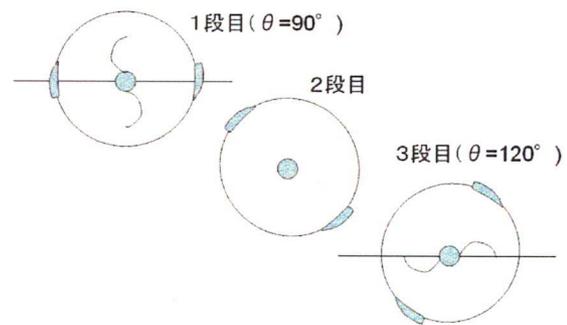


図-15 3段ダリウス・サボニウス混合水車の組合せ法

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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.
- 4) 鳥井正志，大久保寛，山根信，相良啓太，関和希：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。
- 5) 南條宏肇：津軽海峡潮流発電基礎研究，日本機械学会誌，Vol.108, No.1045, 2005.12.
- 6) 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。
- 7) 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，2006，pp.39-45。