潮流・海流発電システムの高効率化に向けた研究開発*

Development and High Efficiency Technology for Tidal and Ocean Current Power System

南 佳 成**
MINAMI Yoshimasa

Abstract When a suitable site has been found and established, tidal power and ocean current power is more predictable than wind and fluctuates less drastically than solar. It's a reliable producer of electricity. Tidal energy and ocean current energy are produced through the use of generators. These large underwater turbines are placed in areas with high tidal movements and ocean current, and are designed to capture the kinetic motion of the ebbing and surging of ocean tides in order to produce electricity. Tidal power and ocean current power have great potential for future power and electricity generation because of the massive size of the oceans. These articles explore the potential energy of tidal and ocean current power technologies.

Keywords: Renewable energy, Tidal current power, Ocean current power, Multi rotor

1. 緒 言

近年、エネルギー問題によって、石油価格の高騰を受け、脱石油、代替エネルギーの開発が求められている。その中で期待されているのが、再生可能エネルギー（自然エネルギー）である。自然エネルギーは再生利用可能であるが、一般に自然エネルギーはエネルギー密度が低く、気象条件に左右されるために安定供給が難しい。自然エネルギーの中でも海流・潮流エネルギーは波力、風力及び太陽光に比べ、その発現の規則性が極めて高いことから、最も安定したエネルギー源であると言える。その安定した発現性から利用可能エネルギー量の確定が容易であり、電源システム設計における安全率を最小に設定出来ることから、適切な発電機容量及び蓄電池容量の選定が可能となる利点がある。日本は四方を海に囲まれており、海洋エネルギーが豊富に存在する恵まれた海洋環境を持っている。

2. 潮流・海流エネルギーの賦存量

海流・潮流エネルギーは海水が移動することで生じる運動エネルギーである。我が国には世界の二大潮流の一つである黒潮が沿岸を流れている。この黒潮を含めた海流エネルギー賦存量は年間1,400 億 kWh と推定されている[1]。このうち、比較的安定したエネルギーが得られる地点としては、八重山諸島、トカラ列島、足摺岬沖、八丈島沖が挙げられる。潮流は、海流の場合利用できる海域が限定されるのに対して、沿岸部の海峡・水道など対象海域は多い。瀬戸内海、九州西岸及び五島列島の海域に集中している。潮流エネルギーの賦存量は、年間 2,190 億 kWh と見込まれている[1]。潮流は、潮汐と同様に 12 時間周期で正弦状に変化し、半周期ごとに流れの方向が反転する。流向が反転することを転流といい、転流時に海水の動きが停止する時を憩流という。潮流は、流速変化に周期性を持っているのでエネルギー変化量を予測可能である。

* 2011.10.31 受付

** 独）海上技術安全研究所洋上再生エネルギー開発系 〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1

TEL: (0422)41-3057 FAX: (0422)41-3143 E-mail: minami@nmri.go.jp

Fig.1 The main ocean currents in the world [1].

Table 1 The amount of ocean current energy potential around Japan coast [1].

Point	Max velocity [kt]	Average max velocity [m/s]	Area [m ²]	Energy potential [$\times 10^3$ kW]
Naruto Strait	9.9	3.8	93,000	2672
Kurushima Strait	8	3.1	77,000	1162
Kanmon Strait	6.8	2.6	12,920	120
Hiroshima Bay	6.3	2.4	48,300	328
Akashi Strait	5.8	2.2	264,000	1525
Shimabara Bay	5.4	2.1	286,000	1334

3. エネルギー変換システム

風力エネルギーでは、風力の空間にある運動エネルギーを回収するために風車がいられることは知られている。海流・潮流エネルギーを変換する時も同様に発電用の水車がいられる (Fig.2)。海流・潮流が持つ運動エネルギーは、水車を用いると次式のように表される。

$$P = \frac{1}{2} \rho Q V^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

ただし、流速を V 、流量を Q 、水車の掃過面積を A 、海水密度を ρ とする。

これは、風車でも同様な式が成り立つが、大きな違いは空気と水の密度の違いである。水の密度は、空気に比べて約 800 倍大きい。この密度の違いから、海流・潮流用の水車は、同じ掃過面積の陸上の風車と比較した場合に流速が約 1/10 でも陸上の風車と同等の発電エネルギーを回収することが可能である。海流・潮流発電用の主な発電用水車には、プロペラタービン方式、サボニウス型水車、ダリウス型水車、クロスフロー水車が良く用いられている。

Fig.2 The principle of energy transduction.

4. 潮流・海流発電の開発動向

海外では、最近の環境問題に関する関心の高まりから、欧米を中心に潮流発電の開発プロジェクトが進んでおり、商業化の一手手前まで来ている。そこで、海外の主な開発プロジェクトを以下に示している。

4. 1 イギリス

イギリスの Marine Current Turbines 社 (MCT 社、ブリストル) 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[2]。1999 年から 2006 年まで Seaflow Project を実施し、2003 年 5 月にイギリス海峡のプリマスにおいて直径 11m の 2 翼プロペラ式発電機を設置、最大 300kW の実証実験に成功した。MCT 社が行っている SeaGen Project のコンセプトを Fig.3 に示す。2008 年 12 月、MCT 社は、世界初の商業規模の潮力タービンを導入した「SeaGen 潮力システム」について、運用上の課題を解決し、最大出力 1.2MW で操業を開始した。SeaGen は 2008 年にアイルランド北部のストラんフォード海峡の海岸線から約 400 メートル沖合の海底に設置されたものである。設置からほどなくして、強力な潮流によりタービン 1 基のブレードが損傷を受けたが、SeaGen は修復のためにタービンを水の外に取り出すことが可能な設計のため、作業員達はブレードの交換を現地で行った。SeaGen Project の 600kW 水平軸ロータータービンは、1 日最大 22 時間稼動する見込

みである。直径 16m のタービンブレードは、タービンが両方向で潮を捉えられるように、潮流に対して 180 度の角度まで回転することができる。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。

Fig.3 SeaGen project in UK.

4. 2 アイルランド

OpenHydro 社は、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[2]。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、英国およびアイルランドからの資金支援によって、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。

Fig.4 1MW type OpenHydro device.

Fig.5 Image of array of OpenHydro devices.

4. 3 米国

2007 年に米国内でいくつかの波力および潮流のパイロット実証プロジェクトが開始される予定がある。米国連邦エネルギー規制委員会(FERC)が、EPRI が発表した実現可能性研究結果の報告書の中に明示されている潮流エネルギーサイトでの研究の実施に関して、2006 年に約 40 件の許可の申請を受けている。ニューヨークのバーダント・パワー社のイーストリバー・プロジェクトは最も米国で進んだ潮流エネルギープロジェクトである[2]。2007 年に同社は小規模な試験的プロジェクトでマンハッタン地区とクイーンズ地区の間を流れるイーストリバーに二つの水中タービンを設置している (Fig.6)。そして、さらに 4 つのタービンを追加する前に、18 ヶ月に亘り魚への影響を研究する。もし問題がなければ、同社は 300 基の水中タービンをイーストリバーに追加設置することができ、2008 年に 10MW の発電容量に達する。ニューヨーク州エネルギー研究・開発局はこのプロジェクトに対しこれまでに 200 万ドル以上を投資している。

Fig.6 Verdant Power turbine.

4. 4 日本

日本国内で、現在海流・潮流発電の取り組んでいる主な研究開発を以下に紹介する。現在は、基礎研究、応用研究の段階であり、経済性や環境影

響評価に関する基礎データを収集している状況である。

4. 4. 1 大間崎潮流発電

潮流発電の可能性については、津軽海峡の潮流、海流の速さに着目した弘前大学理工学部長の南條宏肇教授らの研究チームが 2002 年から大間崎沖で流速測定などの基礎調査を実施し、海流と潮流が混在して流速が早い地域があることが分かった。青森県は、エネルギー産業振興戦略の中でも、津軽海峡での潮流発電を県南・下北地域で、重点的に振興を図るプロジェクトの一つと考えている。これを受け、(財) エンジニアリング振興協会が事務局とし、青森県、弘前大、東大、海上技術安全研究所、電力会社及びメーカーがメンバーとなった大間崎潮流発電研究委員会が発足し、実証試験に向けて検討を進めている。

4. 4. 2 九州大学

九州大学では、経塚教授のグループが長崎県の生月島特有の周囲を流れる海流を生かし、島にかかる生月島大橋の橋脚を利用した潮流発電システムの開発を行っている。狭い海峡では一般に潮流は速いが、さらに橋脚による増速効果や発電機の設置などで既設の施設を利用できる点が特徴である。現在、流域調査や発電装置の検討を平行して実施しており、将来的に実証試験を行う予定である。

4. 4. 3 海上保安庁

海上保安庁では、潮流を航路標識用電源エネルギーとして利用することにより、電源容量の向上が容易に図ることが出来ること及び従来の波力発電や太陽光発電に加え、電源種別の選択肢が多様化を図っている。実際に発電能力が 35kW と小規模であるが灯浮標用のシステムで 2002 年に実用化されている。

5. 潮流・海流発電に関する高効率化への取組み

潮流発電の実用化を進める上で、流速が速いところに設置できれば、他の発電システムと競争出来るコストに低減することが出来る可能性がある。しかし、日本沿岸域で浅い水深でこのような適地は少ない。現在、海上技術安全研究所では日本沿岸域で広く利用でき、流速 1.0m/s 程度でも一定の発電量を確保できることを潮流発電システムの開発を進めている。

5. 1 マルチロータ

マルチロータ (タンデム方式) による高出力化を図る。2 枚のロータは、同一方向に回転して前ロータで取り逃がした流体エネルギーを後ロータで回収することで高出力化を図る。マルチロータに関する研究は、Newman らが無翼数理論を用いて水平軸風車に 2 つのロータをタンデム配置にしたシリーズ計算を実施している[3,4]。計算結果では、出力係数で 66.67% に達するケースが見られた。単独のロータの理論最大出力係数は、59.3% であるので出力が増加していることが分かる。Chantharasenawong らが、ロータ後流が後方へ広がっていくことを考慮し、前方ロータの翼根部分は翼モデルを設置せず、翼先端だけを翼モデルとしたケース (以下ハーフモデルと省略) を検討している[5]。この研究では、運動量理論をもとにロータ間の流速変化を推定し、前方ロータの翼モデル部分をどれくらいにすれば良いか計算している。ただ、理論計算結果はあるが、まだ具体的に模型を設計し実験結果での検証が行われていない。

我々の研究では、Chantharasenawong らの研究に基づき、運動量理論を用いて前方、後方ロータの流速変化からマルチロータの概念設計を実施する。我々が提案しているマルチロータ (タンデム配置) を用いた潮流発電システムの概念図を Fig.7 に示す。マルチロータは浮体式プラットフォームに係留され、流向変化に合わせて受動的にヨウ角は制御される。まず、運動量理論に基づいて、各ロータの前後での流速変化を Fig.8 に図示する。ベルヌーイの定理及び運動量理論をもとに各ロータの前後における平衡方程式を求める。

$$C_p = 4(1-2a-c)\left(a+c-2ac-a^2-c^2\right) + \left(\frac{16}{27}\right)\left(\frac{a+c}{1-a}\right) + (1+b-c)(2d-2bd-d^2) \quad (2)$$

ここで、Chantharasenawong らの研究結果から $a=0$ とするとき最大出力になることが示されている。このため、 $a=0$ として式(2)に代入すると、

$$C_p = 4(1-c)^2 + \left(\frac{16}{27}\right)c \quad (3)$$

これより、 c をパラメータに最大出力を求める

ことができる。最適設計を実施すると、 $c=0.418$ のとき出力係数が最大値 0.814 に達する。Betz の理論値から比べると約 30% の出力増加になっていることが分かる。これより、マルチロータシステムは出力増加できる可能性があることを確認した。

Fig.7 Illustration of tandem twin rotor system.

Fig.8 Flow velocities at various stages.

マルチロータの基本性能を確認するために模型を設計し水槽試験を実施した。マルチロータ模型は、当所で使用している翼素運動理論を用いた潮流発電用タービン設計ツールを用いてマルチ

ロータではなく、ロータ単独の状態で設計を実施した[6]。使用した翼型データ及び翼数は、Table 2 に示す。設計したタービン翼プロファイルを用いて、ハーフモデルは翼先端部分の情報を利用した。製作したマルチロータ模型を Photo 1 に示す。次に、位相角をパラメータとしてマルチロータの性能変化を調査した。ロータ間距離が $0.5D$ 、 $0.25D$ の 2 ケースに対して実施した。位相角は、0 度、30 度、-30 度の 3 ケースとした。位相角を変更した性能試験結果を Fig.9 に示す。計測結果から、位相角毎に出力係数が異なり、位相角の影響が大きいことが分かる。ロータ間距離が $0.5D$ 、位相角 30 度のケースが、出力係数 0.39 と最大になっている。ロータ後流の様子を調査するために、ナノバブルを用いた可視化計測を実施した。計測システムの概要は、Fig.10 に示す。今回、水中高速度カメラを用いて連続撮影して後流変化を調査した。観測結果の一例を、Photo 2 に示す。試験条件は、流速 0.5m/s 、最大出力係数付近の周速比 λ が 6 になる回転数に設定している。計測結果から、翼先端から大きな渦が発生しそれが後方へ流れていく様子が分かる。

これより、ロータ後流の旋回流の影響が大きいことが分かる。旋回流にあたる渦度が高く流速が遅い領域に後方ロータが位置すると出力が低下していることが推測できる。

Table 2 Principal dimension of turbine.

Diameter	D [m]	0.60
Number of Blade		2
Blade section		NACA4409

Photo 1 Model of the multi rotor system.

Fig.9 Change of power coefficient due to distance between two rotors and relative angle.

Fig.10 Measurement system of multi rotor using nano-bubble.

Photo 2 Photo of wake of rotor in water.

5. 2 小型超電導発電機の利用

東京海洋大学、鉄道総合技術研究所材、海上技術安全研究所が協力し、潮流・海流発電に超電導発電機を用いる新しい発電システムの研究開発を進めている。このプロジェクトは、大規模なギアボックスを不要にする超電導発電機を用いることが特徴である。従来の風力タービンでは通常、ギアボックスの部品のメンテナンスコストが最も高くなっている。ギアボックスのサイズは、タービンの定格出力の増加とともに急激に大きくなるため、風車のサイズも制限される。そこで、超電導発電機を用いることで、本質的に電気抵抗がゼロになり、より大量の電気が流せて定格出力に対して、発電機をさらに小型化、軽量化することができる。超電導体は極めて低い温度で機能するため、このシステムアーキテクチャにとって、冷却が重要ポイントとなる。研究の中では、立地性、システム、タービンプローペラ等設計から要求される低設置コストの新しい海水流発電用小型高効率回転機本体の発電部分、すなわち界磁磁束の回転により電機子コイルに発電電力を生成させるバイタルパートの設計・試作と性能評価を実施している。

(a) Bulk magnet.

(b) Wire coil magnet.

Fig.11 The kind of super conducting magnet.

Fig.12 Super conducting rotating machine.

6. 潮流・海流発電の実用化への課題

潮流・海流発電を事業として発展させるために、導入目標を達成するには課題を整理して対策を取りまとめる。

6. 1 エネルギー変換技術の性能向上

潮流は風力発電と異なり周期的に流速が変化し予測が可能である。しかし、流速が変化するために最適効率でエネルギー変換するにはタービン特性、増速機、発電機特性を考慮して設計する必要がある。このため、設置場所の流速特性に合わせた発電システムの設計が必要である。海流は流路、流向が長期的に変化するために、最適な効率が得られるような位置に移動できる係留・移動システムと流向変化に合わせた最適ヨー角制御システムを開発する。タービン単体のエネルギー変換効率向上だけでなく、発電システムとして発電量の大幅な向上を図ることで効率向上につながる。具体的には、タービンを1基だけでなく、複数基のタービンを装備することによりトータルで大出力化が可能になる。潮流・海流発電では、風力発電と異なり、タービン自体を水中に置くので浮力の影響で支持装置にかかる負担を軽減できる (Fig.13)。

Fig.13 Image of array of the power generation turbines in MCT[8].

6. 2 コスト低減

発電システム毎の変電設備や送電設備を設置するとコストが増加するために、複数の発電システムでインフラ設備を共有化することで全体のコストを抑える必要がある。また、タービンや支持部材等に複合材料を利用して軽量化による構造材料の低減もコスト低減につながる。潮流・海流発電の導入を進めることにより、発電機本体の大量生産による低価格化が見込まれる。変電、送電設備を海面より上に設置すれば、陸上用のパワーエレクトロニクス機器の転用を検討することができ、変電・送電設備の選択枝が広がる。

6. 3 信頼性

タービンを水中に設置するために、水密等の信頼性を十分に検証する必要がある。また、故障等が生じた場合にすぐにメンテナンスできるような技術の確立が必要である。また、積極的な保守技術としては、タービン等にセンサーを設置して遠隔モニタリングによって故障の事前予知を行うことも考えられる。

6. 4 流況把握、環境影響評価

潮流・海流エネルギーは、エネルギー密度が低い。このため、日本近海における潮流・海流エネルギーの最適なマップを作成することにより、潜在的に潮流・海流発電に適した場所を選定する。また、海域に発電タービンを設置することにより、海洋環境にどの程度影響があるかを実証プラントで検証し、周辺地域の理解が得られるように開発を進めていく必要がある。

7. 将来への展望

将来的な海流・潮流発電システムの実用化に向けた課題を整理する。海流・潮流発電を行う場所は漁業権等を考慮すると沖合 10km 以上になることが考えられる。設置コストも大きくなることが予想されるため、いかに発電コストを抑えるかが重要である。前述した MCT 社のプロジェクトでのコスト評価結果を Fig.14 に示す。潮流発電のコストは、洋上風力の約 2 倍、陸上の風力発電の 3 倍という試算になっている。今後、当該プロジェクトでは技術開発でかなりコスト低減し、陸上の風力発電と同等にしていく予定である。このため、現時点で海流・潮流発電の実用化を進める上では、海流・潮流エネルギー以外に洋上で利用できる自然エネルギーを総合的に利用することが

不可欠であると考え。洋上風力等でも沖合からの送電コストの問題があり、複合型海洋エネルギー利用施設を設置することで送電インフラに投資する額が相対的に小さくすることが可能である。一例として、沖合に設置した浮体式海流・潮流エネルギープラントの上の空間に風力発電設備、浮体内部空間には波浪による圧力変化による発電タービンを設けた複合型海洋エネルギー利用施設のイメージを Fig.15 に示す。

Fig.14 Cost trial calculation in project of MCT.

Fig.15 Image of platform using some ocean energies.

8. おわりに

地球温暖化問題など今後ますます再生利用可能エネルギーへ関心が高まると考えられる。我が国としては海外に依存するのではなく、日本の恵まれた海洋環境をいかにうまく利用していくかを検討する段階にきていると感じている。海洋エネルギーは、エネルギー密度は低い、海洋エネルギーだけで社会全体のエネルギー消費を賄う訳ではなく、エネルギー発生量が予測可能な特徴を生かし、地域のエネルギー需要に合わせて他のエネルギー源とのベストミックスを考えていけば、十分に実用化できると考えられる。

謝 辞

本研究は、日本学術振興会の科学研究費補助金：基盤研究(B) No.22360376 及び基盤研究(B)

No.21360425 のもとに行われ、ここに謝意を表す。

Nomenclature

C_p	: power output coefficient	[-]
D	: rotor diameter	[m]
A	: rotor swept area	[m ²]
V	: power output	[W]
Q	: flow amount	[m ³]
P	: power output	[W]
a	: axial induction factor at inner of rotor1	[-]
b	: axial induction factor at rotor1	[-]
c	: axial induction factor between rotors	[-]
d	: axial induction factor at rotor2	[-]
e	: axial induction factor at outer of rotor1	[-]
f	: axial induction factor at outer of rotor2	[-]

Greek letters

ρ	: flood density	[kg/m ³]

Subscripts

p	: power
1	: front rotor in tandem arrangement
2	: back rotor in tandem arrangement

参考文献

- [1]Kondo,H., Uehara,H., Kihou.Y., Miyazaki,T., and Tanino,K., A Utilization Technology Energy from Ocean Energy (in Japanese), Morikita, Tokyo (1996).
- [2] NEDO Oversea Report, Status of Development of the Current Power Generation and Wave Power Generation in Europe and America (in Japanese), (2005).
- [3] Newman, B. G., Actuator-Disc Theory for Vertical-axis Wind Turbine, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.15, 347-355(1983).
- [4] Newman, B. G., Multiple Actuator-Disc Theory for Wind Turbine, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.24, 215-225(1986).
- [5] Chantharasenawong C., Suwantragul B. and Ruangwiset A., Axial Momentum Theory for Turbines with Co-axial Counter Rotating Rotors, Commemorative International Conference of the Occasion of the 4th Cycle Anniversary of KMUTT,(2008).
- [6] Minami,Y. and Nimura,T., A Basic Research on the Tidal Current Power using Multi Rotor System, Conference Proc. of The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.13,(2011).