

# 大島瀬戸の潮流発電に関する研究

藤井雅之\*, 綿屋茂男\*\*

## Research on the ocean tide generation in Obatake-Seto

Masayuki FUJII and Shigeo WATAYA

### Abstract

In recent years, it was watching new generation system by clean energy, for example, solar, wind, and ocean energy. In this report, we tried to calculate the amount of latent power for generation in Obatake-Seto and examined about the possibility of the ocean tide generation. Then, Darius type hydraulic turbine was manufactured for the generation as an experiment, and the character was evaluated.

Key Words : clean energy, ocean tide, generation, Darius type, hydraulic turbine,

#### 1. はじめに

現代社会において電力は不可欠なものであるが、現在の主な発電方法になっている化石燃料は有限であり、これによる発電には限りがあるため、将来的な電力の確保を考えると、化石燃料に代わる新エネルギーの開発が急務となっている。そのため、あらゆる自然エネルギーによる発電が考案されている。その発電方法には様々なものがあり、波力発電、海洋温度差発電、潮汐発電、海流発電、潮流発電等の海洋エネルギーを利用したものもある。

潮流とは潮汐現象による流のことであり、日本には流れの速い「瀬戸」や「海峡」と呼ばれるところが多く存在し、潮位差はあまり大きくなくても、海峡地形が狭まっているところでは、エネルギーが集約されるため流速が速くなる。日本の潮流エネルギー賦存量の推定値は2500万kWで年間2190億kWhと見込まれている。ちなみに一般家庭における一月の消費電力の平均が330kWhとされているので、単純に計算すると5530万世帯分になることから、潮流発電に対する期待は高まっている。

自然エネルギーを利用する発電方法としては、太陽光発電や風力発電などの設備が増加している。自然エネルギーを利用する上で潮流は、波力、風力および太陽光に比べ、その発現の規則性が極めて高く、最も安定したエネルギー源と考えることができる。そのため、電力獲得の期待が高く、潜在的に豊富な潮流エネルギーから継続的に電力を

得ることができれば、将来的に最も期待のできる自然エネルギーであるといえる。

現在、鳴門海峡では徳島大学、来島海峡では日本大学がそれぞれ潮流発電の実験を行っている。2002年12月より、明石海峡航路で夜間に航行する船舶に海上航路の入り口などを知らせる日本初の潮流発電式の灯浮標（ブイ）が採用され、天候により電源供給が左右される太陽光発電型に比べ、24時間、安定して電源を供給できるという。さらに、今後の研究開発により、使用可能領域が拡大する可能性も秘めており、潮流発電に関する研究は年々高まっている。

本研究では、大島瀬戸指定航路図などを用いて年間エネルギー賦存量の算出し、潮流発電の可能性について検討した。また、発電用のダリウス式水車を試作し、水車特性を評価することにより、大島瀬戸の潮流発電の実用化に向けた取り組みを開始したので報告する。

#### 2. 潮流発電の概要

##### 2.1 発電方法

潮流・潮汐を利用した発電方法は実に多くのものが提案されているが、潮流の運動エネルギーを一旦水車によって回転エネルギーに変換し、発電するのが一般的な方法である。潮流発電に用いる水車には様々なものが提案されており、表1にエネルギー変換方式の例を示す。

\*電子機械工学科, \*\*K Y B (株)

表 1 潮流エネルギー変換方式の例

方式	概要	利点	欠点
プロペラタービン形	プロペラ形で船の推進力と逆の関係でエネルギーを変換する。効率は44%程度。	構造が簡単で内部構造も単純なのでコストが安価。	流速が遅いので装置を大型化しなければならない。
サボニウス形水車方式	半円弧状の板を偏心させて組会せた形状の水車。全方向の流れに対し常に一方方向の回転。効率は20~30%程度。	起動トルクが大きく、極めて低速の流でも回転する。構造が簡単。	大型化には適さない。効率はあまりよくない。
ダリウス形水車方式	翼を円周上に等間隔に配置した構造で、ダリウスによって発明された。効率は30~45%程度。	翼の周速度が流速より速くなる。構造が簡単。	自起動性に乏しい。
クロスフロー形水車方式	できるだけ稼働部をなくし対称形のノズルを持つ。効率は約60%	潮流にも応用が考えられる。	
フォイトシュナイダープロペラ方式	円盤に取り付けられた翼が場枯れにより生ずる揚力により円盤に回転力を与える。	流向の変化に対して即応的に一方方向の回転が得られる。	大型化への試みが課題。
セール・キャノピー方式	一連多数のパラシュートが海流の流れによって広げられるというもので、抗力の差を回転力に変換させるといったもの。	低流速のエネルギー変換にむいている。	

2. 2. 潮流エネルギー賦存量の算出

海峡や瀬戸と呼ばれるところは、エネルギー密度が高く、潮流発電に有利な場所と考えられる。その指針となる潮流エネルギー賦存量を知ることは潮流発電の導入に際して極めて重要である。そこで、大島瀬戸を含む日本国内における主な12の海峡(東京湾口、伊良湖水道、鳴門海峡、友ヶ島水道、明石海峡、播磨灘、備讃瀬戸、尾道水道、長崎瀬戸、来島海峡、関門海峡、大島瀬戸)を対象として、各海峡における年間エネルギー賦存量などを求め大島瀬戸と比較した。潮流エネルギー算出対象となる海峡の断面積や流速などは、日本大学によって発表された論文を参考にした。

(1) 平均流速  $v$  [m/s]

図1は平成17年1月13~14日における大島瀬戸の流速の変化を示す。潮流は約半日を一周期とし、流速が正弦波状の変化をすると考えて計算している。図1において、縦軸の流速がプラスになっている領域は潮流が西から東へ流れ、流速がマイナスになっている領域は潮流が東から西へ流れていることを示している。ここで、最大振幅(最大流速)を  $V_m$  [m/s]、周期を  $T$  [s] とすれば、平均流速  $v$  [m/s] は式(1)で表される。

$$v = V_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad \dots(1)$$

(2) 質量  $m$  [kg]

流体の質量を  $m$  [kg] とすると(2)式で表すことができる。

ここでは、海水の密度を  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]、瀬戸や海峡の断面積を  $S$  [m<sup>2</sup>] としている。

$$m = \rho S v \quad \dots(2)$$

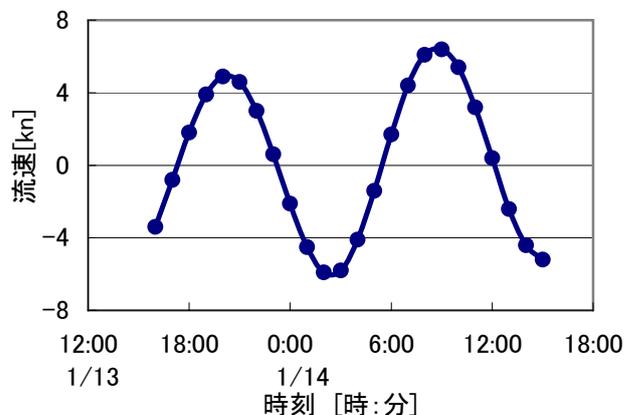


図 1 平成17年1月13~14日の大島瀬戸の潮流変化

(3) 運動エネルギー  $P$  [W]

運動エネルギー  $P$  [W] は式(3)で表すことができる。

$$P = \frac{1}{2} m v^2 \quad \dots(3)$$

(4) 流体の運動エネルギー  $P$  [W]

そして流体の運動エネルギー  $P$  は式(2)を式(3)に代入することで求め、式(4)で表すことができる。

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad \dots(4)$$

(5) 半周期における平均エネルギー  $P_{T/2}$  [W]

式(4)を積分し、また半周期時間で割ってやると半周期における平均エネルギーを求めることができ式(5)となる。

$$P_{T/2} = \frac{1}{2} \rho S \frac{2}{t} \int_0^{T/2} v^3 dt \quad \dots (5)$$

(6) 半周期当たりのエネルギー量  $W_{T/2}$  [W]

式(5)より半周期当たりのエネルギー量  $W_{T/2}$  [W]は式(6)となる。

$$W_{T/2} = \frac{2}{3\pi} \rho S V_m^3 T_s \quad \dots (6)$$

なお  $T_s$  は半周期時間である。

### 2. 3 大島瀬戸断面積の算出

潮流エネルギーを算出するにあたり大島瀬戸の断面積の算出が必要となる。今回は図2に示す大島瀬戸指定経路図(海図)により断面積を求めた。

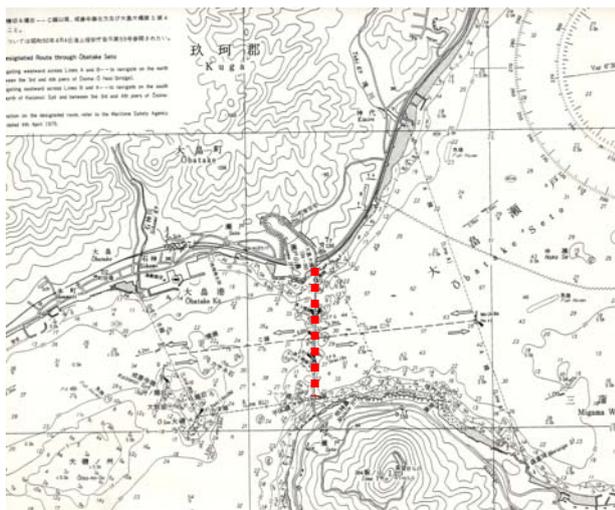


図2 大島瀬戸指定航路図

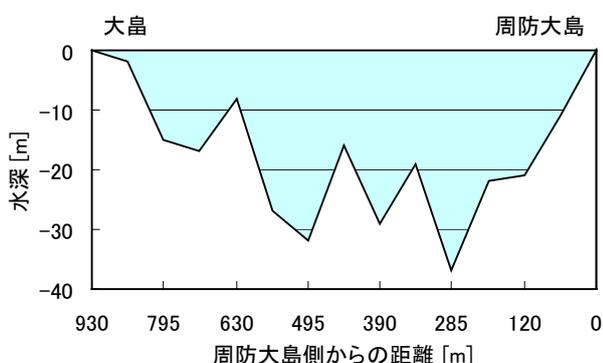


図3 大島瀬戸推定断面図

図2の大島指定航路図における、所々の小さい数字はその地点での水深を示している。今回は周防大島側と大

島側の岸が最も狭まっている大島大橋の真下の水深を読み取り、断面図を推定した。その結果、大島大橋直下では図3のような断面をしていると思われる。図3から断面積を求めると16612[m<sup>2</sup>]という結果が得られた。

### 2. 4 年間潮流エネルギー賦存量の算出

大島瀬戸の断面積と式(6)を用いて年間潮流エネルギー賦存量を算出した。なお、今回は海水の密度  $\rho$  を1020[kg], 大島瀬戸の最大流速を7[kn] (3.60[m/s])とし、周期  $T$  [s]は潮汐現象が概ね一日に2度起こることから12時間とした。また、このことから半周期時間  $T_s$  は6時間とした。

試算結果を表2に示す。大島瀬戸の年間エネルギー賦存量は12海峡の中で6番目となっている。また、この試算結果では流速が小さくても断面積が大きい場所は年間賦存エネルギー量が大きくなっている。これは年間エネルギー賦存量を求める際に、出てくる値が断面積と流速に起因するためである。

表2 潮流エネルギー賦存量の算出結果

場所	断面積 [m <sup>2</sup> ]	最大流速 [m/s]	年間エネルギー賦存量 [MWh]
東京湾	237500	0.98	70640
伊良湖水道	466500	0.93	118580
鳴門海峡	29920	4.57	902447
友ヶ島水道	317750	1.79	575912
明石海峡	234125	3.86	4255215
播磨灘	799800	0.31	7529
備讃瀬戸	225750	1.79	409165
尾道水道	1625	1.39	1379
長崎瀬戸	2950	1.44	2783
来島海峡	21500	5.14	922655
関門海峡	9405	4.27	231395
<b>大島瀬戸</b>	<b>16612</b>	<b>3.60</b>	<b>244929</b>

### 2. 5 年間エネルギー密度の算出

次に年間エネルギー密度を算出する。この値は

$$\frac{\text{年間賦存エネルギー量 [MWh]}}{\text{断面積 } S [\text{m}^2]} = \text{年間エネルギー密度}$$

で求めることができる。

算出される値は断面積が起因しないため平均的に流速が大きいことから起因すると予想できる。また、発電システムを設置するにあたってエネルギー密度が高い海峡の方が、効率良く発電するのに有利と考えることができる。以下に年間エネルギー密度算出結果を示す。

- ① 来島海峡 42.914
- ② 鳴門海峡 30.162
- ③ 関門海峡 24.603
- ④ 明石海峡 18.174
- ⑤ **大島瀬戸 14.744**
- ⑥ 友ヶ島水道 1.8124
- ⑥ 備讃瀬戸 1.8124
- ⑧ 長崎瀬戸 0.9436
- ⑨ 尾道水道 0.8487
- ⑩ 東京湾口 0.2974
- ⑪ 伊良湖水道 0.2541
- ⑫ 播磨灘 0.0094

この結果では、大島瀬戸の年間エネルギー密度は5番目となった。これにより大島瀬戸の潮流発電に対する期待値が高いことが認識できた。また⑥位以下は値が非常に低く、エネルギー密度が低い海峡、すなわち流速が遅い⑥位以下の海峡は潮流発電に適しているとはいえない。

### 3. 水車の製作

#### 3.1 水車の選定

水車は風車と同じように、抗力型と揚力型の二つの分類ができ、前者は流体が翼に当たることで、その水平方向に力が生まれ、これに対する抗力により回転する。抗力型は出力があまり大きくないが自起動性がよく、流速が小さくても敏感に反応する。一方、後者は流体を翼が受けて上に浮き上ろうとする力、つまり揚力によって回転する。揚力型の場合は自起動性が乏しいが出力は大きく、そして、一度回りだすと慣性により止まりにくいという特徴を持っている。

表 3 水車の特性

	自起動性	出力
揚力型	×	◎
抗力型	○	△

今回選定するにあたり考慮しなければならない点は、潮流が約半日を一周期とし、半周期ごとに流れが反転することである。つまり潮流は概ね6時間ごとに流れが逆

方向になる。このため、通常のプロペラ水車では、それに対応して、水車の向き、または翼のピッチを変える装置をつけけるか、両方向用の水車を2台設置する必要がある。これらのような複雑な装置をなし、潮流エネルギーを発電に用いるためには、海水の流れの方向に関係なく、360°どの方向からの流れに対しても一定方向へ回転する特徴をもった水車が必要である。今回はこの特徴を持ち構造も簡単で製作コストも安価なダリウス式水車を選定した。

#### 3.2 ダリウス式水車

ダリウス式水車は元来、風車で開発されたもので、翼が曲線状であり、制作上の難点があるため、図4のような直線状の翼を持ったものにした。これは表1で前述したように、回転軸を中心とする同心円状に、飛行機と同じ断面を持つ翼を置いた水車である。また、構造が簡単であり、比較的容易に製作できると考えられた。

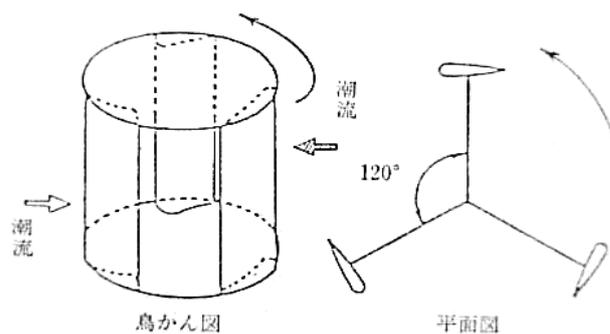


図 4 ダリウス式水車構造

ダリウス式水車において、水車を構成する数枚の翼幅の和が水車円周に占める割合をソリディティといい、この割合を変化させる、すなわち水車の翼幅を変えることで水車の出力、回転数、発生トルク等の特性が変化することが分かっているが、どのように水車特性が変化するかについては理論が確立しておらず、試験用水車をいくつも製作し、特性を評価していくのが現状である。

#### 3.3 水車部分の主な仕様

製作した試作機は、海上保安センター技術第二課において最も良好な動作が確認できたとの発表があった水車径φ600mm、翼長450mm、ソリディティ0.244のダリウス型4枚翼水車を模擬することとした。図5は3D-CADを用いて描いたダリウス式水車である。

軸には、腐食防止・強度等を考慮し、オールステンレスパイプを使用した。水車部分にも、腐食防止・強度等

を考慮し、アクリル板およびステンレス板を使用した。翼の形はNASAで研究されたNACA63-3-018型（図6参照）の左右対称形とする。作成方法は、発砲スチロールでマスターモデルを作り、強度を増すためにFRPで成形した。

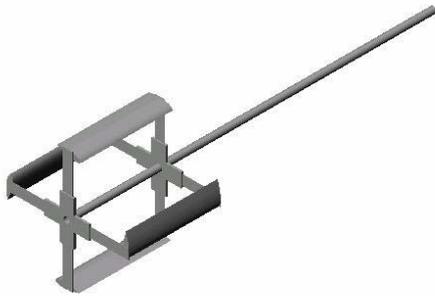


図5 3DCADを用いて描いたダリウス式水車

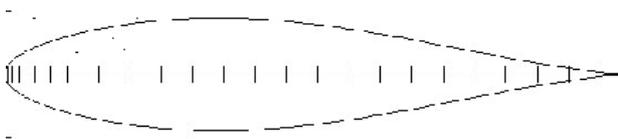


図6 翼の断面形状（NACA63-3-018型）



図7 完成したダリウス式水車

完成したダリウス式水車を図7に示す。今回製作した中で最も苦勞したのが翼部分の作成で、最初に発砲スチロールからマスターモデルをヤスリで成形したが、曲面を成形する際、だんだんと細くしていく部分に苦勞した。また、発砲スチロールのマスターモデルにFRPでコーティングを施し成形したため、理想としていたNACA63-3-018型の翼の断面形状には完全に一致しなかった。

#### 4. 水車特性の測定

##### 4.1 水車の起動トルク測定

実際に発電をするためには、発電機に接続しなくてはならない。この発電機を選定する際に水車特性、つまり起動トルクや回転領域、出力等を発電機特性に整合させる必要がある。今回、発電機を選定する際に自起動性に若干問題のあるダリウス式水車において重要となる起動トルクを測定した。

今回、試験的に行った起動トルクの方法は、水車を流れていない水中に入れ、4枚ある翼の1枚にワイヤーを結び付け、その先にばねばかりを取り付け、水車の回転方向に引っ張った。このとき、水車が動き出す瞬間のばねばかりの値を読み取り、その値からトルクを求めた。

トルク  $T$  は中心からの距離  $R$  と接線方向の力  $F$  の積で求めることができ、次の式(7)によって表すことができる。

$$T=R \times F \quad \dots (7)$$

今回の測定では、ばねばかりを水中に浸けることができないため、約  $35^\circ$  の角度をつけて引っ張り、水平方向の力に換算した。その結果、試作したダリウス式水車の起動トルクは  $0.12 \text{ [N}\cdot\text{m]}$  であると考えられる。

#### 5. 発電機を選定

発電機を選定する際に水車特性、つまり起動トルク、回転領域、出力等を発電機特性に整合させる必要がある。現段階では水車特性のうち、起動トルクの測定しか行っておらず、発電機を選定するためには、さらに水車特性を調査する必要がある。

今後は、

- ① 水車の起動流速を調査
  - ② 水車の流速による回転数の変化を調査
- などの調査が必要になると考えている。

より詳細に水車特性を調査し、発電効率の高い発電システムを構成したいと考えている。

## 6. 水車設置の問題点

実際に水車を設置するにあたり、様々な問題が予想される。

- ① 激しい潮流により潮流発電システムが壊れる
- ② 海藻などが絡みつき水車の動作が停止する
- ③ 水車の回転している時間が短い場合、ふじつぼなどの付着が回転速度に影響を及ぼす

これらの問題点を踏まえて、潮流発電システムの稼働は、試行錯誤で行って見なければならぬ。

## 7. 潮流発電装置と電力利用法の検討

潮流発電において問題になるのが電力輸送の問題である。海底ケーブルを引く方法や、一時的に化学エネルギーに変換して輸送する方法が考案されている。いずれの場合も設備が大掛かりになる。

そこで、潮流発電システムにおいて現在主流なのが、灯浮標（ブイ）の電源エネルギーとして利用する方法である。このような研究は明石海峡にて行われている。大島瀬戸においては、次のような利用方法が考えられる。

- ① 明石海峡と同様、浮標の電力供給を行う  
 ※ 大島瀬戸の灯浮標（ブイ）には、どのような電源エネルギーが使われているのかは未確認。
- ② 灯台付近に設置し、灯台の電力補助を行う。
- ③ 大島大橋の橋桁に設置し、大島大橋の橋桁を照らす電灯などの電力供給を行う。

考案したいいずれの方法も電力輸送に大規模な工事を必要としない。しかし、筆者らが試作したダリウス式水車によって、大島瀬戸の海洋エネルギーからどの程度発電できるかは未知数なので、主として電力の補助として考案した。

## 8. まとめ

本研究において大島瀬戸の年間潮流エネルギー賦存量、エネルギー密度などを算出することにより、大島瀬戸における潮流発電の期待値が高いことが認識できた。

しかし、試算による大島瀬戸の海洋エネルギーは、平均値により求められたもので、実際には大潮／小潮による潮流の違い、潮の干満による水深の違い、岸からの距離の違いなどによって、大幅に変わることが予想される。

また、ダリウス式水車を用いた潮流発電システムの試作においては、今後も引きつづき水車特性の調査や発電機の選定を行い、漁場や航路に影響のない場所で流速と発電特性について評価していきたいと考えている。

## 謝辞

大島瀬戸の断面積算出にあたり、海図の提供および有益なご助言をいただきました商船学科 古藤教授に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 
- (1) 「潮流発電装置に関する研究」：平本敬弥
  - (2) 「潮流発電に関する研究」：平本敬弥
  - (3) 「日本国内における主な海峡断面の流速分布を考慮した潮流エネルギー賦損量の算出」：菊池哲
  - (4) 「潮流発電用ダリウス形水車の基礎特性直径寸法の特性への影響」：谷口貴志
  - (5) 「潮流発電装置の実用化に関する調査研究」：山本信和
  - (6) 「海と旅」：  
<http://members.jcom.home.ne.jp/umi-to-tabii/>
  - (7) 「MIRC マリン情報」：  
<http://www.mirc.jha.or.jp/online/w/w-tc/>
  - (8) 「風車の種類」：  
<http://www.tronc.co.jp/fuusha.html/>