

# 瀬戸内海における橋脚下海洋空間を活用した潮流発電技術の開発

——大島大橋橋脚周辺の潮流エネルギー観測と取得可能なエネルギー量の試算——

石垣 衛\*

(平成26年10月23日受付)

The Power Generation from Tidal Currents Using Pier at Seto Inland Sea  
——Observation and Trial Calculation about Tidal Currents Energy of an Ohshima Ohashi Bridge——

Mamoru ISHIGAKI

(Received Oct. 23, 2014)

## Abstract

Japan is the maritime state surrounded by the sea, effective use of the ocean energy which exists abundantly is an important issue, and the realization is desired. Tidal current is the periodic energy which can be predicted, therefore it can expect to supply energy stably. In Seto Inland Sea, many straits and Seto regions exist, and it is known that tidal current energy will be amplified because a tidal current becomes quick. Therefore, the power generation technology which utilized current energy attracts attention. This study estimated the possibility of the tidal current power generation in Seto Inland Sea by performing local observation. At first time, the amount of maximum energies was calculated by observing the tidal current of Seto Inland Sea. Next, the amount of maximum energies obtained when a dynamo is built was calculated.

**Key Words:** Power Generation, Tidal Current, Seto Inland Sea, Hydraulic Model, GIS Data Base

## 1. はじめに

東日本大震災に伴う原子力発電事故以降、再生可能エネルギーを利用した発電技術の需要が高まっており、その実用化が急務となっている。革新的エネルギー・環境戦略<sup>1)</sup>によると、太陽光や風力等の再生可能エネルギーによる発電量は、2010年度の1,060億kWhから2030年度には3,000億kWhへと約3倍に導入拡大するとしており、新たな再生可能エネルギー技術の開発・実用化が求められている。特に、我が国は四方を海に囲まれた海洋国家であり、自然エネルギーとして豊富に存在する海洋エネルギーを有効活用することは重要な課題であり、その実現が望まれている。

海洋エネルギーを活用した発電技術は、波力発電、温度差発電、海流・潮流発電、潮汐発電等に分類され、その中

でも、潮流発電は潮汐で定まる周期的なエネルギーを利用するため、予測可能で安定的なエネルギー供給が期待される。特に、大小の島々が数多く存在する瀬戸内海では多くの海峡・瀬戸域を有しており、当該域における潮流は増幅されることから潮流エネルギーを活用した発電は注目される技術である。また海峡・瀬戸域には架橋が施されている場所が多いことから、既存の橋脚を活用した潮流発電が可能となれば発電施設等の建設コストの削減が期待できる。

本研究では、図-1に示すような橋脚下海洋空間を活用した潮流発電技術<sup>2)</sup>の開発を目的に、現地において潮流観測を実施し、発電施設仕様を想定することで取得可能なエネルギー量の算定を行い、潮流発電技術の実現性の評価に向けた課題を示した。

\* 広島工業大学工学部都市デザイン工学科

## 2. 潮流発電エネルギー量算定に向けた現地調査

### (1) 調査地域および調査概要

調査地域として対象とした大島瀬戸は、広島湾の南西部に位置し、山口県柳井市と周防大島町に挟まれた瀬戸である。その最狭幅は約800mの規模であり、その上に大島大橋が架橋されている。また日本三大潮流の一つであり、全国でも有数の急流場所として知られている。海上保安庁が公開している潮流予報値<sup>3)</sup>によると、大潮時の最大流速は約7.0ktであり、藤井らの試算<sup>4)</sup>では、瀬戸断面を通過する年間のエネルギー賦存量は244,929MWhに達することから、潮流発電適地として期待できる。

現地調査は、海底地形の形状、潮流の速度を調査項目に設定し、大島瀬戸全域の海底地形測量と曳航式による潮流観測を実施した。さらに発電機タービンを橋脚に付帯することを想定し、橋脚近傍の潮流観測を実施した。

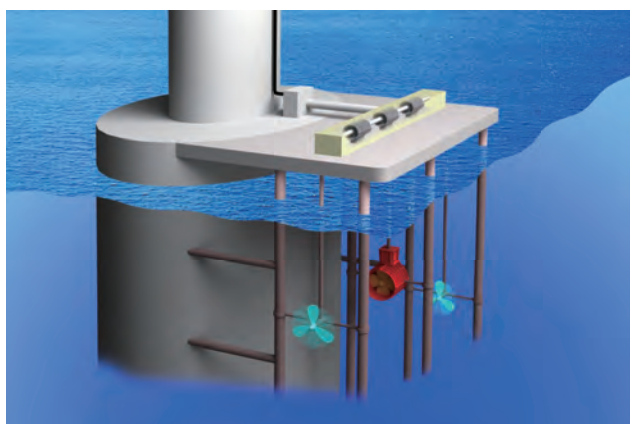


図-1 橋脚下海洋空間を活用した潮流発電技術<sup>2)</sup>

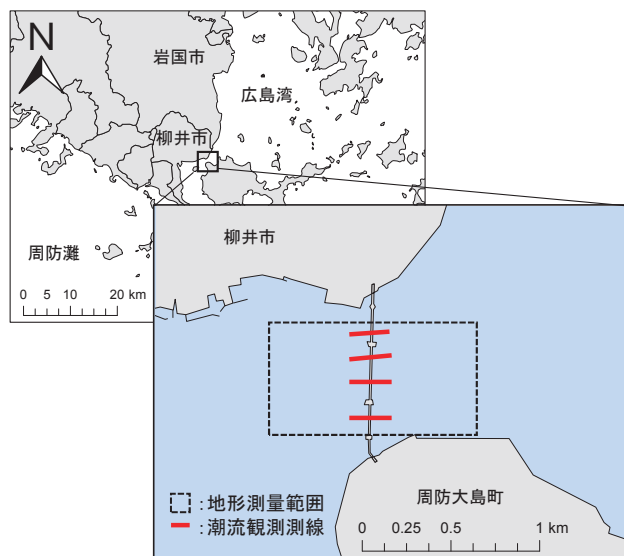


図-2 地形測量範囲および曳航による潮流観測測線

### (2) 調査方法

#### a) 海底地形測量

海底地形測量は、2013年3月6日～8日の小潮時において、図-2に示す地形測量範囲を対象に、マルチビーム測深機(Sonic2022)を搭載した観測船により、10cm精度にて海底地形を計測した。

#### b) 曳航式による潮流観測

曳航式による潮流観測は、図-3に示す2月26日～27日の大潮時において、下げ潮時9:00～15:00と上げ潮時7:00～13:00のそれぞれ6時間を対象に、1時間毎の3次元流速を計測した。計測は、ADCP(ワークホースセンチネル600kHz)を搭載した観測船が図-2に示す測線上を約2.0kt以下の速度で曳航することで、測線下の3次元流速データを取得した。

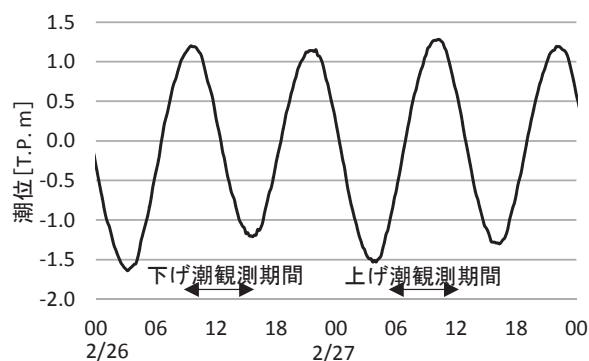


図-3 柳井観測局における調査期間の潮位変化

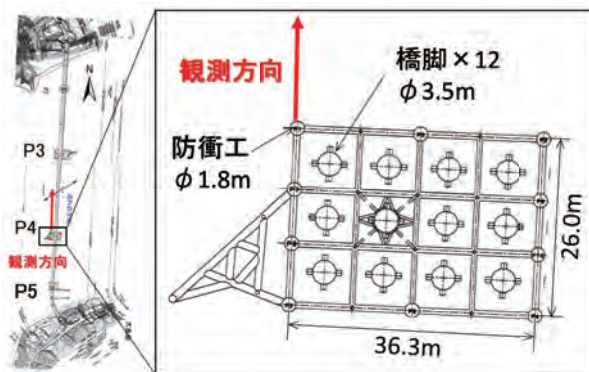


図-4 橋脚近傍の水平方向の潮流観測位置

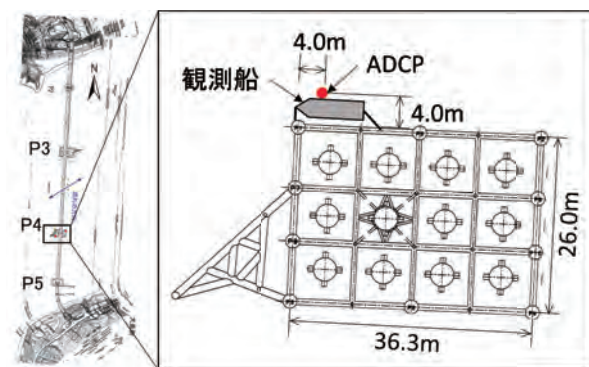


図-5 橋脚近傍の鉛直方向の潮流観測位置



c) 橋脚近傍の潮流観測

橋脚近傍の潮流は、構造物の影響により増幅・減衰することが考えられるため、橋脚からの水平距離に対する潮流変化と、橋脚近傍における鉛直方向の潮流変化を計測項目に設定した。

水平方向の潮流観測は、図-4に示すP4橋脚の北西端に位置する防衝工のTP-12mの地点に、H-ADCPを北向きに設置し、水平距離6mより2m間隔で潮流データを取得した。観測期間は2013年9月29日18:00～11月10日8:00の約42日間とし、10分毎の水平2次元流速データを取得した。

鉛直方向の潮流観測は、図-5に示すように、水平方向の潮流観測と同位置の防衝工にADCPを搭載した観測船を係留し、観測船の北側に位置する地点(防衝工から4m離れた箇所)に鉛直下向きに設置し、水深2mから0.5mピッチで海底付近までの3次元流速を計測した。観測期間は、大潮時の2014年1月16日13:00～17日16:00の約27時間を対象とし、1分毎の3次元流速データを取得した。ただし、潮流の転流後は、観測船の後方からの流れが生じ危険を伴うため、潮流の弱まる満潮時および干潮時の30～40分間に観測船の向きを反転させた。その際にADCPを観測船の左右反対側に付け替える必要があることから、その反転作業期間においては、データの取得には

至っていない。なお、17日5:20～7:50の上げ潮時において、機器トラブルが生じたため欠測した。

(3) 現地調査結果

a) 海底地形測量

地形測量結果を図-6に示す。図より、大島大橋の東側で大きな深みがあり、図中の赤丸で示す最深部で87.5mの値を得た。一方、西側では、主に35m以浅の水深帯が分布しており、全体的に起伏の多い複雑な海底地形となっている。また、P3橋脚とP4橋脚の間で大きな括れが存在することが示されており、海底地形の形状より、この括れに潮流が集中することから、当該地点で流速が大きくなると考えられる。

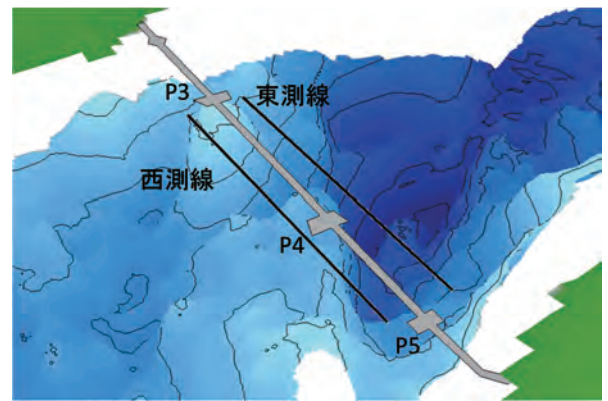


図-8 断面流速分布測線位置



図-6 大島瀬戸の海底地形

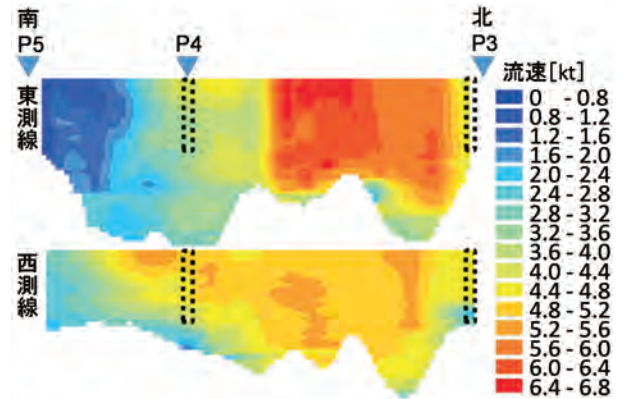


図-9 上げ潮最強時の断面流速分布

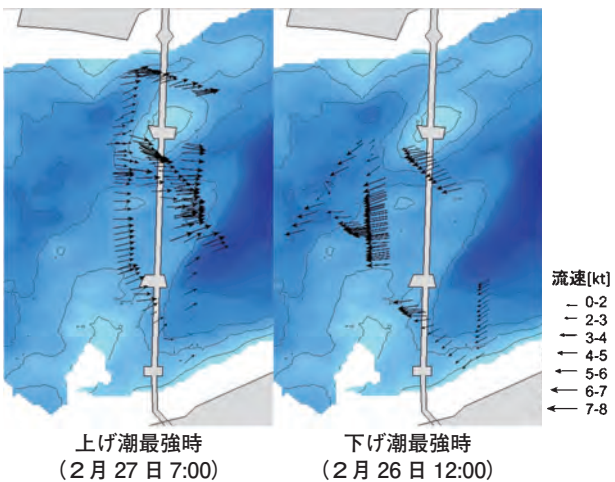


図-7 水深10m層における潮流ベクトル

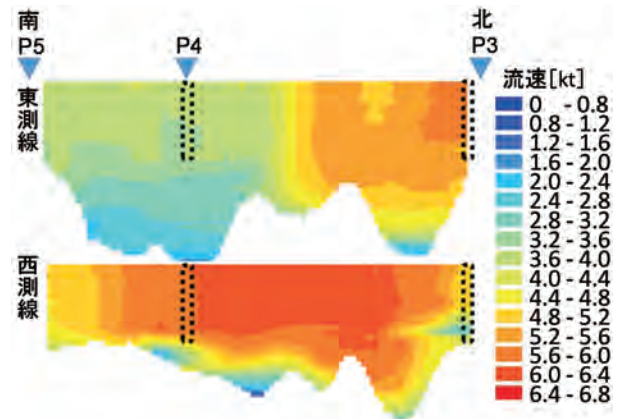


図-10 下げ潮最強時の断面流速分布

## b) 曳航式による潮流観測

曳航式による潮流観測の結果、水深5m間隔の各水深帯で流向、流速を比較すると、水深方向には大きな差異は確認されず、ほぼ一様であった。図-7に発電機タービンの設置を想定している水深10mの上げ潮最強時および下げ潮最強時の潮流ベクトルを示す。図より上げ潮最強時には、P3橋脚南側付近で、地形に沿って括れに向かう流れが確認され、最大流速は水深10mで6.9ktの値が得られた。P4橋脚付近においても、上げ潮時には大橋通過前後で流向に大きな差異は確認されず一様であった。また、下げ潮最強時においても、P3橋脚南側付近の橋梁直下において、上述した括れに向かう流れが確認され、最大流速は、水深10mで6.3ktの値を得た。この流れは、大橋を通過した後も流向はほぼ一定であった。

図-8に示す大島大橋の東西に測線を設けて、スプライン補間法により断面流速分布を抽出した。当該結果では流速値を補間で算出していることから、潮流の絶対値について議論はできないものの、大島瀬戸における潮流分布の特性については十分評価できるものと考ええる。

図-9に上げ潮最強時流速分布を、図-10に下げ潮最強時の流速分布を示す。図-9より、上げ潮時に西測線でほぼ一様な流速分布を示していたものの、東測線では、P3橋脚とP4橋脚の中央付近で局所的に最大流速が形成される結果を得た。一方、図-10より下げ潮時に東測線では、P3橋脚近傍で最大流速が確認され、西測線では、P3橋脚とP4橋脚間を中心に最大流速が形成されることが確認された。潮流の向きは、上げ潮時は西から東、下げ潮時には東から西に流れており、大橋を通過した後に上げ潮時、下げ潮時ともに流速が大きくなることが示された。ここで、黒の点線は、大島大橋の橋脚の範囲を示しており、水深0~15mに位置する。当該範囲の流速は、上げ潮時および下げ潮時にP3橋脚とP4橋脚ともに水深方向に一様で大きな流速値を示しており、橋脚を利用した潮流発電が期待できる流速分布が形成されていると考える。

## c) 橋脚近傍の潮流観測

橋脚近傍の水平方向の潮流観測の結果(図-11)、P4橋脚の防衛工から水平距離20mの地点において、上げ潮時の最大流速は6.2ktを示し、下げ潮時での最大流速は5.8ktであった。橋脚に接近した水平距離6mの地点では、下げ潮時は最大5.8ktと20m地点と同程度であった。一方、上げ潮時には5.9ktと20m地点に比較して若干流速の損失があるものの、その規模は5%に満たない程度であった。また水平距離6m地点の平均流向は、上げ潮時は75°を示し、下げ潮時は279°の値が得られ、いずれの潮時もばらつきは僅かであり、ほぼ一定の値を示した。このことは、水平距離20m地点においても同様の傾向を示しているこ

とから、橋脚から6m以上離れた地点では、橋脚の影響による潮流の乱れは小さいものと考えられる。

図-12に橋脚近傍の鉛直方向の潮流観測結果を示す。なお、鉛直成分の+は上向き、-は下向きを示し、流向についてはそれぞれの潮時の平均±標準偏差を示す。上げ潮時は、最大流速分布より、水深5m以浅において3.5kt程度の値を示し、水深10~20mでは5.2~7.2ktと水深間ではばらつきが大きく、最大流速は水深17mの地点で7.2ktを示した。鉛直成分の最大流速分布より、上げ潮時は全水深帯で下降流が確認され、その最大値は水深9mで2.8ktであった。また、平均流向分布より、水深8m以深において偏差が大きく、乱れが生じていることがわかる。この結果は、図-7で示したP4橋脚南西に位置する浅瀬側からの流れにより、海底の急勾配に伴う強い下降流が生じているためと考える。更に、P4橋脚近傍において東北東の流れが生じており、当該調査の観測位置が防衛工の背後に位置していることから(図-5)、橋脚の影響による下降流が生じ、その結果、底層での乱れが大きくなるものと考えられる。

一方下げ潮時は、最大流速、鉛直成分最大流速ともに、海底付近を除いて一様な分布を示し、最大流速は5.3~6.6ktの間で分布していた。鉛直成分の最大流速は1.5~2.1ktの値が得られ、P4橋脚北東側の深みからの上昇流が確認された。流向については、海底付近を除いて偏差が小さく、267~279°を示した。下げ潮時は、図-7で示したとおり、P4橋脚付近においてほぼ西向きの流れであることから、橋脚の影響は小さいものと考えられる。

## 3. 潮流発電エネルギー量の算定

## (1) 発電施設仕様の想定

潮流発電装置は、主に水平軸型タービンのプロペラ型、垂直軸型タービンのダリウス形水車やサボニウス形水車などがあり、国内外において様々な形式が提案・開発されている<sup>5)</sup>。海域によって潮流の特性が異なるため、最適な潮流発電装置も海域ごとに異なることが予想される<sup>6)</sup>。一般的に水平軸型タービンは発電効率が良く、大型化が容易である一方で、垂直軸型タービンは、流れの方向に対する依存性が小さいことが特徴として挙げられる。パワー係数 $C_p$ については、プロペラ型は0.3~0.4、ダリウス形水車やサボニウス形水車は0.2~0.3を示すことが多いことが知られている。

上述したとおり、P4橋脚防衛工から水平距離6mの地点では、上げ潮、下げ潮ともにほぼ一定の流向を示しており、いずれの潮時の潮流も捉えることが可能で、かつ高効率な発電機タービンが望ましい。山磨らが実施した水槽実験<sup>2)</sup>によると、開発した対象翼のプロペラ型タービンは、



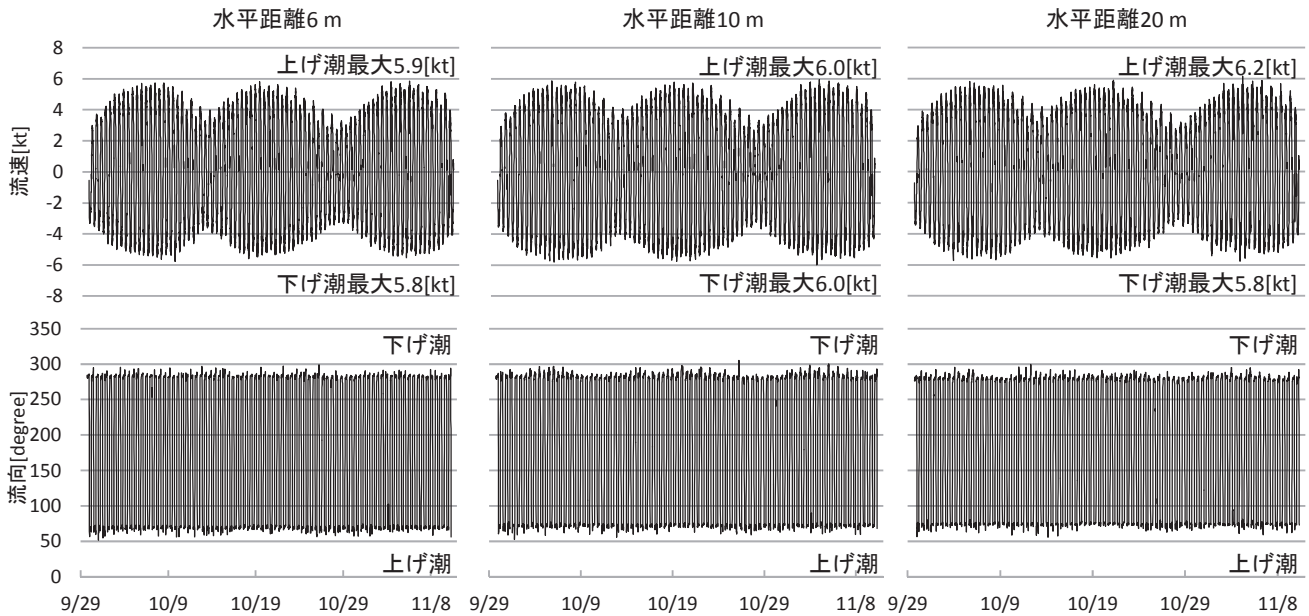


図-11 橋脚近傍における流速および流向の経時変化

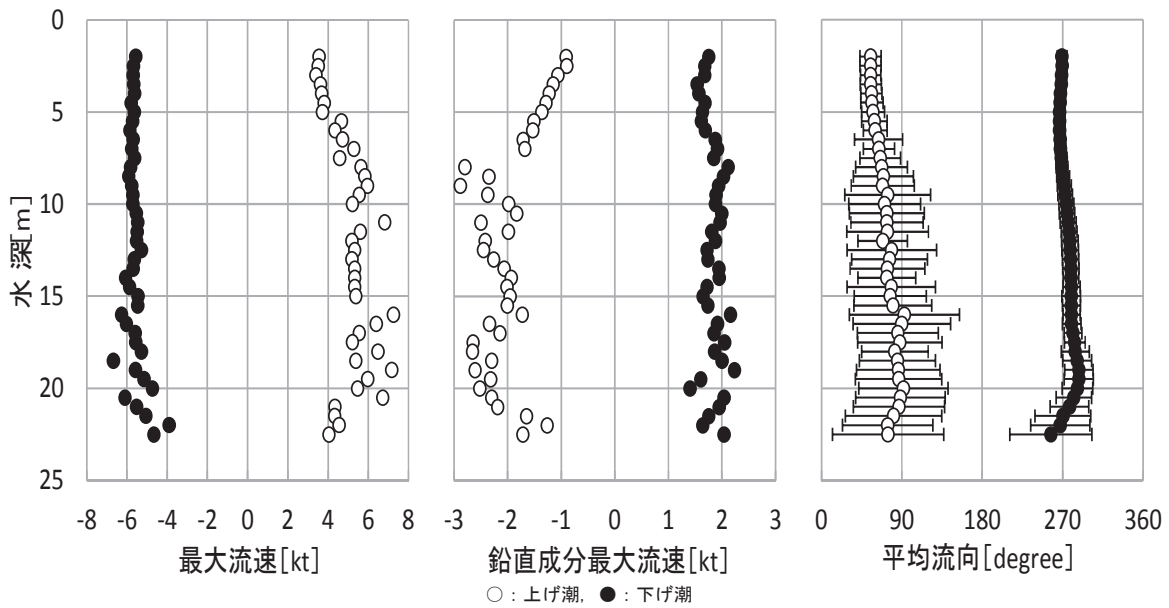


図-12 橋脚近傍における流速および流向の鉛直分布

上げ潮時、下げ潮時ともに  $C_p$  が 0.35 を示していることから、双方向の流れを効率良く捉えることが可能である。このことから、対象翼プロペラ型タービンを想定し、取得可能なエネルギー量の算定を行った。

(2) 算定方法

橋脚の影響による潮流の乱れが小さい P 4 橋脚防衛工から水平距離 6 m の地点を対象に、上述した約 42 日間の潮流観測結果を用いて、式 (1) により取得可能なエネルギー量の算定を行った。

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

ここで、 $P$ : エネルギー量 (W),  $\rho$ : 海水密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $S$ : 潮流通過断面積 ( $\text{m}^2$ ),  $V$ : 潮流 (m/s) である。海水密度は  $1020\text{kg}/\text{m}^3$  を仮定し、タービンの直径は、他の海域利用者との協調を考慮して直径 10 m (エネルギー取得面積  $78.5\text{m}^2$ ) を仮定した。また、パワー係数  $C_p$  については、前述の対称翼プロペラ型タービンの値である 0.35 を設定した。ただし、流向が上げ潮時  $75^\circ$ 、下げ潮時  $279^\circ$  と正対称から  $24^\circ$  のずれが生じているものの、当該算定ではこれによる損失は考慮していない。また、タービンの機働性や発電機の稼働率は考慮せず発電効率  $\eta$  は 1.0 としている。

(3) 算定結果

図-13 に想定した発電機仕様でのエネルギー出力を示

す。図より、最大出力は380.5kWの値が得られ、平均102.8kWの出力が得られることが示された。また、図-14に示すように一日あたりの最大エネルギー量は3.7MWhを示し、平均2.5MWhのエネルギー量が取得可能であると見積もられた。このエネルギー量は、1世帯が消費する電気消費量を10kWh/dayと仮定すると、250世帯に相当することが分かった。しかしながら、以上の算定は発電機タービンの起動特性や潮流の乱れによるエネルギー損失が見込まれておらず、今後の詳細な評価が課題として挙げられる。

#### 4. 結言

瀬戸内海における橋脚下海洋空間を活用した潮流発電技術の開発を目的に、潮流観測を実施し、発電施設仕様を想定することで取得可能なエネルギー量の算定を行った。大

島瀬戸を対象とした潮流観測の結果、橋脚近傍においても約6.0ktの流速値が得られ、橋脚から6m以上離れた地点では、橋脚の影響による潮流の乱れは小さいものと考えられた。同地点において、想定した発電機タービンを設置することで、一日あたりの最大エネルギー量は3.7MWhを示し、平均2.5MWhのエネルギー量が取得可能であると見積もられた。

#### 謝 辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が実施する「平成24～25年度次世代海洋エネルギー発電技術研究開発」の研究助成により実施したものである。ここに、関係者に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) エネルギー・環境会議：革新的エネルギー・環境戦略，20p，2012.
- 2) 広島工業大学，ナカシマプロペラ株式会社，五洋建設株式会社：平成24，25年度次世代海洋エネルギー発電技術研究開発成果報告書，2014。（印刷中）
- 3) 海上保安庁第六管区ホームページ：海象情報/潮流推算，[http://www1.kaiho.mlit.go.jp//KAN6/2\\_kaisyo/tidal-current/tidalc\\_fore-ca st.html](http://www1.kaiho.mlit.go.jp//KAN6/2_kaisyo/tidal-current/tidalc_fore-ca st.html)
- 4) 藤井雅之，錦屋茂男：大島瀬戸の潮流発電に関する研究，独立行政法人国立高等専門学校機構大島商船高等専門学校紀要，第39号，pp.52-57，2006.
- 5) 経塚雄策：潮流発電の研究開発の現状と課題，日本エネルギー学会誌，Vol.92，No.3，pp.248-254，2013.
- 6) 経塚雄策：潮流発電（特集 海からのエネルギー），エネルギー・資源，Vol.33，No.3，pp.136-146，2012.
- 7) 塩沢孝之，肥後竹彦，高杉由夫，埜口英彦，1991年：潮流エネルギー利用に関する研究，中国工業技術試験所研究報告，第7号
- 8) 石垣衛，三好順也，森田学，森本健司，山本瞭太：瀬戸内海における橋脚下海洋空間を活用した潮流発電技術の開発，広島工業大学紀要（研究編），第48巻，pp.1-6，2014
- 9) 平成25年度NEDO新エネルギー成果報告会－熱利用・海洋エネルギー－，pp.144-153，2013
- 10) 平成26年度NEDO新エネルギー成果報告会海洋エネルギー分野・熱利用分野予稿集，pp.101-112，2014

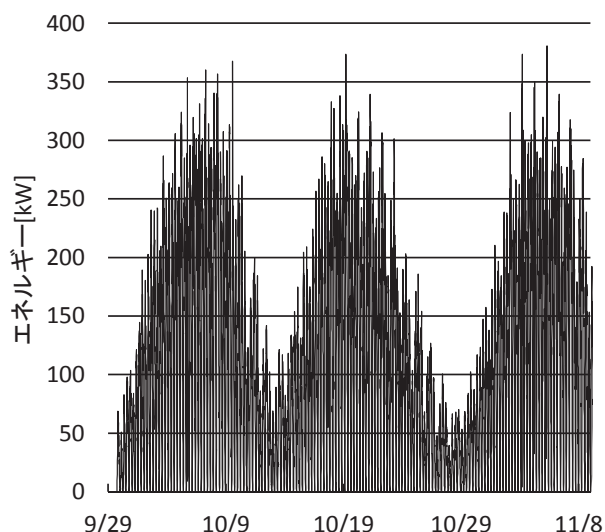


図-13 発電機タービンによるエネルギー出力

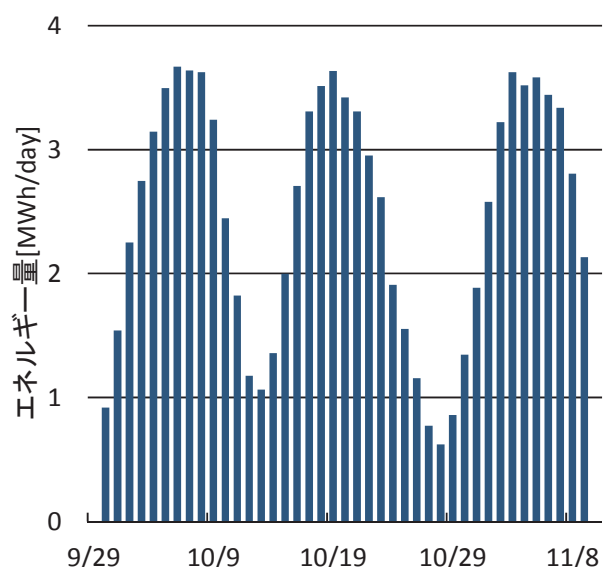


図-14 発電機タービンによる取得可能エネルギー量