

橋脚利用式潮流発電を目的とした大島大橋橋脚近傍における 潮流エネルギー賦存量の調査

石垣 衛*・長岡 あゆみ**・吉田 泰己***

(平成29年11月1日受付)

Investigation of Tidal Current Energy Amount at the Oshima Ohashi Bridge Piers for Verification of Tidal Power Generation using Bridge Piers

Mamoru ISHIGAKI, Ayumi NAGAOKA and Taiki YOSHIDA

(Received Nov. 1, 2017)

Abstract

For the purpose of developing tidal power generation using bridge pier, we conducted tidal current observation and calculated the amount of energy that can be acquired by assuming the power generation facility specifications. As a result of the tidal current observation for the Oshima Ohashi bridge, the maximum power generation output shows a value of about 120 kW, and the maximum power generation amount of the day got about 330 kWh/day. This value is about one-third of the initial forecast, and the main reason for this is the fact that after the current was formed at the generator installation site due to the vortex generated at the upstream piers at the time of downward tide, It was suggested that it becomes smaller.

Key Words: ocean energy, power generation, tidal current, Seto Inland Sea, bridge pier, harbor structure

1. 緒言

近年の地球温暖化に対するCO₂削減対策や東日本大震災ともな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¹⁾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。我が国は海に囲まれた海洋国家であり、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ることから、その実現が望まれている。大小の島々が数多く存在する瀬戸内海は、多くの海峡・瀬戸を有し、当該域の潮流は増幅さ

れることから潮流エネルギーを活用した発電技術は注目されている。また、これらの海峡・瀬戸には架橋が施されている場所が多く、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。



図-1 大島瀬戸および大島大橋の位置・概観

* 広島工業大学工学部環境土木工学科

** 広島工業大学工学部都市デザイン工学科 (現 いであ株式会社)

*** 広島工業大学工学部都市デザイン工学科 (現 株式会社オリエンタルコンサルタンツグローバル)

本研究では、橋脚利用式潮流発電技術の開発を目的に、図-1 に示す大島大橋の第4 橋脚近傍を対象とした潮流観測を実施し、潮流エネルギー賦存量を把握した。更に、設置する発電装置仕様から取得可能なエネルギー量（発電量）を算出することで、その実現性を評価するとともに、実用化に向けた課題を抽出した。

2. 潮流エネルギー賦存量算定に向けた現地観測

(1) 観測海域および概要

観測海域として選定した大島瀬戸は、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 800 m の規模であり、その直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²⁾によると、大潮時の最大流速は約 7.0 kt であり、藤井ら³⁾の試算では、瀬戸断面を通過する年間のエネルギー賦存量は 244,929 MWh に達することから、潮流発電適地として期待できる海域である。

筆者らは、2014年度までに大島大橋を含む大島瀬戸で ADCP を用いた船上からの潮流観測⁴⁾を実施し、瀬戸全域および、橋脚近傍の潮流の経時変化の値を得た。しかし、橋脚近傍の観測では、強い流れにより海面に発生する気泡の影響で観測値が乱れ、大きなばらつきが生じた。また、発電装置のタービン径を 2 m と設定したことで、発電量算出にあたっては、橋脚からタービンの中心までの距離 1 m 近傍の流速値が必要となる。よって、2015年度はこの課題の解決に向けて、橋脚から 1 m 近傍の範囲で潮流観測を実施し、取得可能な潮流エネルギー量を求めた。

(2) 橋脚近傍における潮流観測方法

橋脚近傍における潮流観測は、図-2 に示すように観測機材を架台へ取り付け、大島大橋の第4 橋脚北西端の水深 10 m 地点、17 m 地点の 2 箇所にベルトで設置固定した。設置水深は、筆者ら⁴⁾が2013年9月に実施した当該地点における潮流の鉛直分布観測結果より、図-3 に示すように、上げ潮時に流速のピーク値が出現した 10 m 地点、17 m 地点を選定した。

観測期間は、2015年9月5日～2015年9月22日の大潮を含む18日間とした。観測機器としてメモリー式小型電磁流速計（INFINITY-EM：JFE アドバンテック社製、以下、『EM』という）を用いて、観測期間において 1 Hz で橋脚近傍の潮流を計測した。ここで、EM は 2 次元計測機器であることから、前掲の図-2 に示すように、水平方向の流速は計測機器を垂直に設置することで、橋脚に沿って東向きを x 軸方向の正方向とし、橋脚から北向きを y 軸方向の正方向となるように設定した。また、鉛直方向の流速は、計

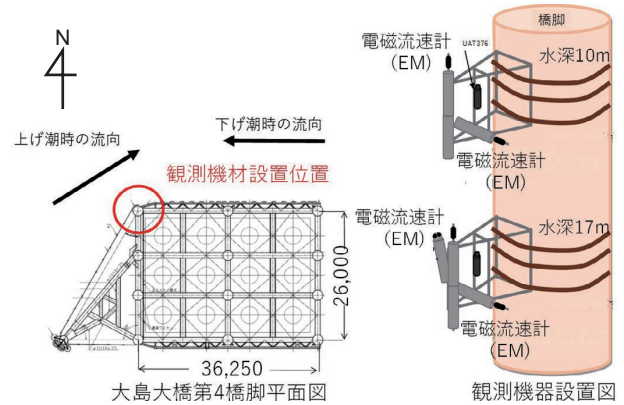


図-2 大島大橋第4 橋脚平面図と観測機器設置概要図

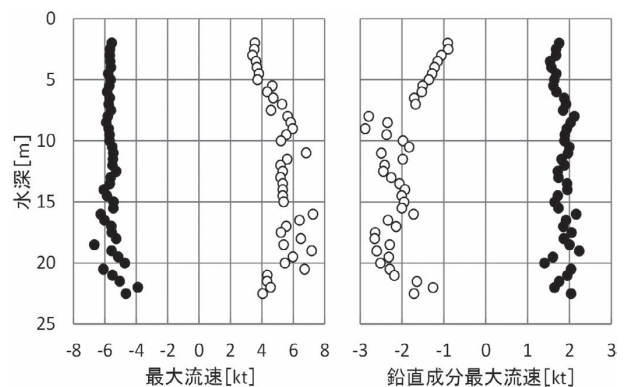


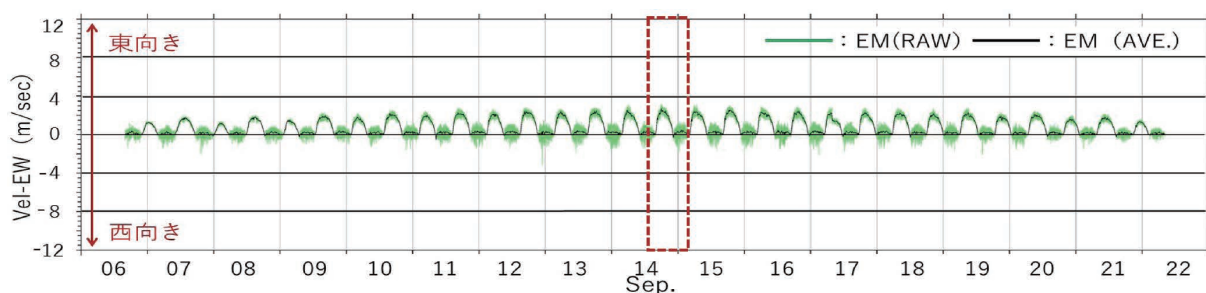
図-3 大島大橋第4 橋脚北西端における流速の鉛直分布⁴⁾

測機器を水平に設置することで、橋脚に沿って東向きを x 軸方向の正方向とし、鉛直上向きを z 軸方向の正方向となるように設定した。

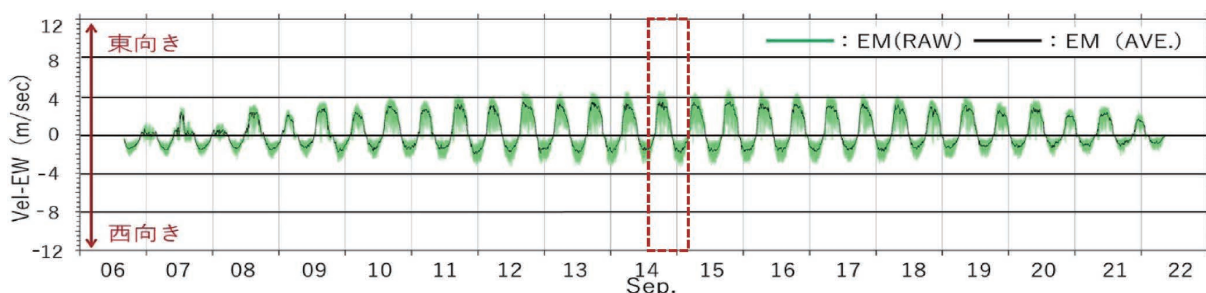
(3) 観測期間全般を通じての潮流観測結果

現地での18日間の観測期間で得られたデータより潮流の経時変化を求め、データ解析を実施した。水深 10 m 地点および、水深 17 m 地点における観測値を図-4 に示す。図は、観測期間において各水深に対して 1 Hz で取得した観測値（Raw データ）を緑線で示し、観測値に対する10分間の移動平均値を黒線で示した。また、当該海域では、上げ潮時は西から東に向かう流れが形成され、下げ潮時には東から西に向かう流れが形成される。図中では、流速値が正の場合に東向きの流れとして示し、負の場合に西向きの流れとして示した。

図より、水深 10 m 地点の流速は、観測値として、上げ潮最強時（2015年9月14日18：10頃）に東向きに最大約 3.2 m/s の値を示し、下げ潮最強時（2016年9月15日00：30頃）に西向きに最大約 1.80 m/s の値を示した。また、10分間の移動平均値は、上げ潮最強時に東向きに最大約 2.8 m/s の値を示し、下げ潮最強時も東向きに最大約 0.3 m/s の値を示した。



(a) 水深 10 m 地点における流速の経時変化



(b) 水深 17 m 地点における流速の経時変化

図-4 大島大橋第4橋脚における橋脚近傍1mの潮流観測結果

一方、水深 17 m 地点の流速は、観測値として、上げ潮最強時（2015年9月14日17：50頃）に東向きに最大約 4.7 m/s の値を示し、下げ潮最強時（2015年9月15日01：20頃）に西向きに最大約 3.4 m/s の値を示した。また、10分間の移動平均値は、上げ潮最強時に東向きに最大約 3.5 m/s の値を示し、下げ潮最強時に西向きに最大約 2.0 m/s の値を示した。上記の結果より、水深方向に対する流速値の比較では、水深 17 m 地点が水深 10 m 地点より観測値、10分間平均値ともに大きくなる傾向を示し、上げ潮時で最大約1.5倍、下げ潮時で最大約2.0倍の値となった。

観測期間を通じて、各水深地点の上げ潮最強時、下げ潮最強時には、計測した流速値の偏差が大きくなる傾向を示し、潮流の乱れが大きいことが示唆された。

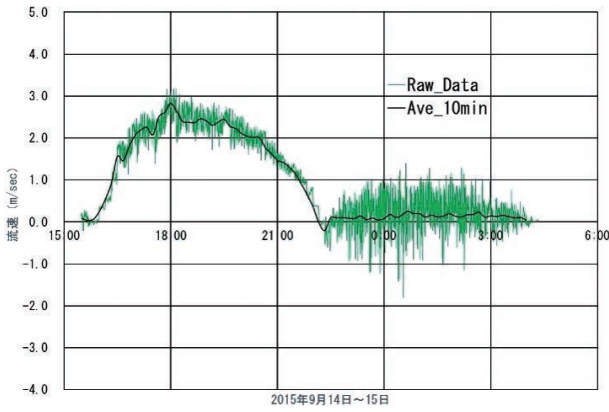
(4) 上げ潮・下げ潮最強時における流速経時変化

潮流発電の発電量が大きくなる上げ潮最強時および、下げ潮最強時の流速の経時変化について、観測結果をもとにデータ解析を実施した。図-5に観測期間における上げ潮時、下げ潮時に最大流速を示した1潮汐周期間（前掲の図-4中に赤点線枠で囲った範囲）の流速の経時変化を拡大して、その詳細を示す。

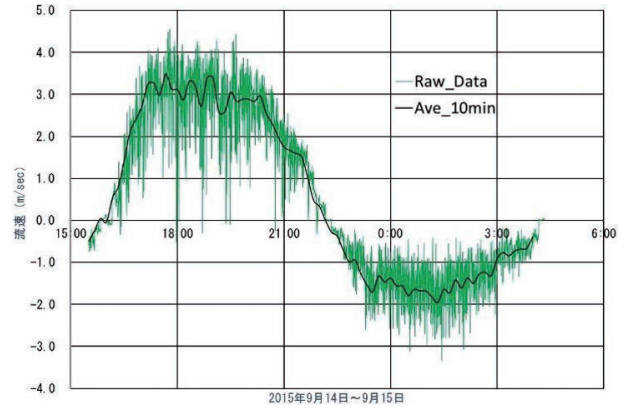
図より、水深 10 m 地点の流速の経時変化は、憩流時は流速値の偏差は小さいものの、上げ潮時に流速値の偏差が大きくなり、上げ潮最強時の10分間（2015年9月14日18：00～18：10）で、平均流速値が約 2.6 m/s ～2.8 m/s に対して、最大で約 0.5 m/s の偏差が生じ、10分間平均で約

0.2 m/s の偏差であった。下げ潮時では、上げ潮時と同様に憩流時に流速の偏差が小さいものの、下げ潮最強時の10分間（2015年9月14日00：20～00：30）で、平均流速値が約 0.1 m/s に対して、最大で約 1.5 m/s の偏差が生じ、10分間平均で約 0.4 m/s の偏差であった。この結果より、水深 10 m 地点の下げ潮時は、上げ潮時に比較して平均流速値に対する大きな偏差が生じることで、潮流の乱れが大きくなることが示された。ここで、下げ潮時の流速値は、期間内に正と負の値に跨ることで、短時間に流向が変化する傾向を示し、平均流速値が約 0.1 m/s 近傍に収束する結果を示した。この平均流速値に対して約 +1.5 m/s ～ -1.0 m/s の大きな偏差が生じている。この結果より、当該地点の流れ場が一方向の流れではなく、渦等の大きな乱れを含む流れ場として形成されていることが推測される。

一方、水深 17 m 地点の流速の経時変化は、水深 10 m 地点と同様に、憩流時には流速の偏差は小さく、上げ潮最強時、下げ潮最強時に流速の偏差が大きくなる結果を得た。さらに、水深 10 m 地点に比較して、平均流速値および、それに対する偏差が大きくなる傾向を示した。上げ潮最強時の10分間（2015年9月14日17：40～17：50）では、平均流速値が約 3.1 m/s ～3.5 m/s に対して、最大で約 2.0 m/s の偏差が生じ、10分間平均で約 0.5 m/s の偏差となった。また、下げ潮最強時の10分間（2015年9月14日01：10～01：20）では、平均流速値が約 1.5 m/s に対して、最大で約 1.3 m/s の偏差が生じ、10分間平均で約 0.4 m/s の偏差となった。この結果は、水深 17 m 地点において下げ潮時



(a) 水深 10 m 地点



(b) 水深 17 m 地点

図-5 上げ潮最強時・下げ潮最強時における橋脚近傍の流速経時変化

の乱れが上げ潮時に比較して大きくなることを示すものである。

このように水深 17 m 地点の平均流速や偏差が、水深 10 m 地点に比較して大きくなる理由として、構造物（橋脚）による増速効果や、海底地形の凹凸による乱れの影響が推察される。ここで、橋脚近傍で形成される流れは、鈴木ら⁵⁾が示した『Horseshoe Vortex（馬蹄形渦）』が生じることで、増速や乱れが生じることが一般的に知られており、これらの複雑な流れの機構が、橋脚近傍の流れ場に影響をおよぼしていることが示唆される。

上記より、各水深地点ともに上げ潮時最強時には、橋脚近傍の乱れの影響を受け、流速値が大きいながらも偏差が生じることで安定しなかったと推測される。一方、下げ潮時最強には設置した橋脚の乱れの影響は直接受けられないものの、流速値は小さくなり、流速に対する偏差の割合も大きい。この結果より、当該地点は、上流の橋脚で生成される後流の影響を受ける場であることが推測される。

(5) 橋脚近傍における取得可能エネルギー量の算出

前述までの大島大橋第4橋脚北西端を対象とした潮流観測結果を用いて、当該地点における取得可能なエネルギー量の算出を実施した。ここで、対象とする水深として、観測期間を通じて大きな流速値を得ることができた水深 17 m 地点を選定し、エネルギー量を算出した。

(a) 発電出力の算出

大島大橋第4橋脚北西端から水平距離 1.0 m、水深 17 m の地点に、直径 2.0 m、高さ 2.0 m のダリウス型で変換効率 0.28 のタービンを縦方向に 2 連で設置することを想定し、

観測期間の18日間について発電量の算定を行った。算定は、式 (1) を用いて発電出力量を求めた。

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_p \tag{1}$$

ここで、 P : エネルギー量 (W), ρ : 海水密度 (kg/m^3),

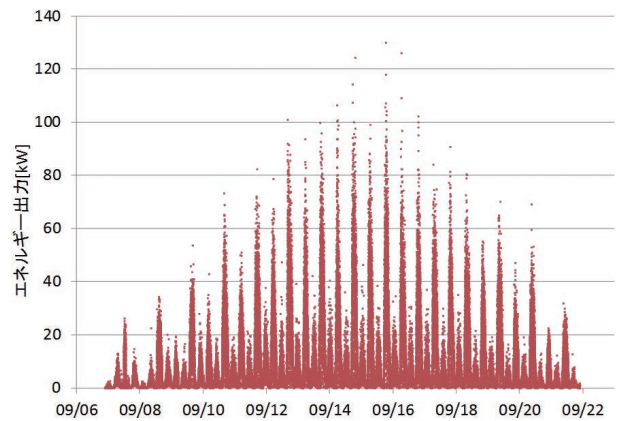


図-6 水深 17 m 地点における発電量経時変化

S : 潮流通過断面積 (m^2), V : 潮流 (m/s), C_p : 変換効率であり、海水密度は $1,020 \text{ kg}/\text{m}^3$ を仮定した。また、発電量試算にあたっては、発電装置のカットイン流速、カットアウト流速を考慮せず、全ての流速において発電可能と仮定した。図-6 に水深 17 m における発電出力量経時変化を示す。図より、観測期間を通じて発電によって得られる最大出力は、上げ潮時で約 120.0 kW となり、下げ潮時で約 40 kW となることが試算された。また、期間中における平均出力は 10.7 kW が見込まれる結果を得た。ここで、下げ潮時の最大出力が上げ潮時の最大出力の1/3となり、最大出力に対して平均出力が約1/10となった要因として、前掲の図-5 に示すように、上げ潮時の流速に比較して下げ潮時の流速が低いことが挙げられる。また、平均流速値に対する偏差の割合が、上げ潮時に比較して下げ潮時が大きいことから、下げ潮時は上流側の橋脚で形成された渦等の乱れ（後流など）の影響を大きく受けていることが示唆される。上記のような要因により、下げ潮時に取得できるエネルギー量が小さくなることが推察される。

(b) 取得可能なエネルギー量の算出

水深 17 m 地点における発電量を潮時に対して1日あたりの積分量として算出し、観測期間内の2015年9月6日～

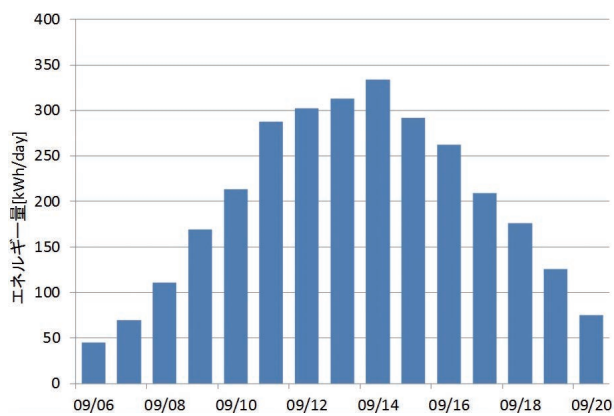


図-7 一日当たりの取得可能エネルギー量の経時変化

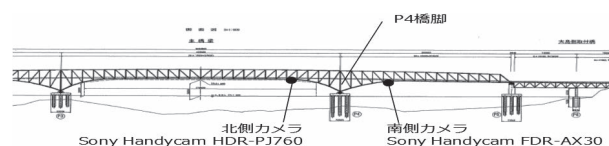
20日を対象とした15日間において、1日ごとの取得可能エネルギー量を図-7に示す。図より、1日あたりの最大発電量は約330 kWh/日という値を得た。また、この値を用いて1か月あたりの取得可能エネルギー量および、1年あたりの取得可能エネルギー量を算出するとそれぞれ、約7,000 kWh/日、約84,000 kWh/年の値を得た。この値は、一般家庭の年間電気使用量を3,650 kWh/年と仮定すれば、発電装置1ユニットで約23世帯分の電力エネルギー供給が可能となることを示すものである。

3. 橋脚近傍における後流の影響範囲の確認

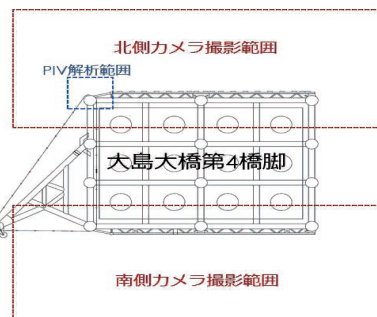
橋脚利用式潮流発電において、発電量低下の要因となる橋脚周辺の大きな乱れは、橋脚で形成される後流であると仮定し、その存在と形成範囲の確認を目的とした観測を実施した。観測は、橋脚周辺の潮流画像を撮影することで、画像解析を用いて流向・流速の出現率を求め、後流の存在と形成状況の確認を行った。

(1) 画像解析の概要・方法

前掲の図-1に示す大島大橋第4橋脚を対象とした画像解析により、橋脚周辺の流向・流速分布を把握した。調査は、まず、図-8(a)に示すように橋脚直上の橋梁下部に潮流撮影用のVTRカメラを設置し、図-8(b)に示す橋脚北側海面、南側海面の流況を撮影した。撮影期間は、上げ潮時は2016年7月6日06:00~08:00とし、下げ潮時は同日の12:00~14:00とした。次に、撮影した潮流画像を用いて、上げ潮最強時の10分間(06:49~06:59)および、下げ潮最強時の10分間(13:03~13:13)を対象とした画像解析(PIV解析)を実施した。本研究では、前述までに設定した橋脚北西端の観測地点をPIV解析の範囲とし、当該範囲に格子間隔1.0mの正方格子網を設定することで、潮流の流向・流速を推定した。流向・流速は、図-9に示すように、各格子点中心にて画像中のトレーサが形成する三角網の時々刻々の変形を抽出し、その変形量から各格子点にお



(a) 画像撮影装置設置場所



(b) 撮影範囲・PIV解析範囲

図-8 画像撮影機器設置場所および撮影範囲・PIV解析範囲

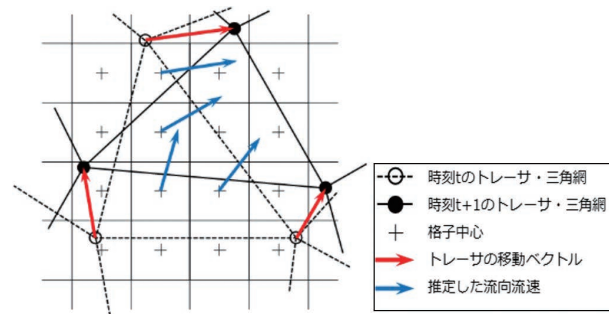


図-9 PIVを用いた流向・流速の推定方法概念

る流向・流速を求めた。なお、各三角形の変形は2次元アフィン変換とした。

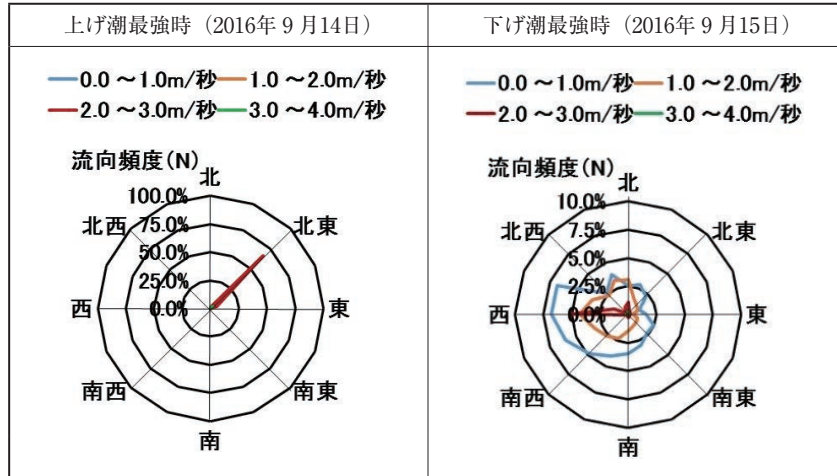
さらに、上記の結果を用いて流向・流速頻度分布図を作成し、橋脚近傍における後流形成状況の解析を実施した。ここで、後流の形成状況を把握する指標として以下のa)~c)の3つの指標を設定した。

まず、後流の影響が小さいと判断する基準として、a)流速が大きい(2.0 m/s以上)、もしくは流向が一方向で振れ幅が小さいものとした。また、後流の影響が大きいと判断する基準として、b)流速が小さく(1.0 m/s以下)流向の振れ幅が大きいもの、c)上記a)とb)が混在しているものとした。

(2) 橋脚周辺における潮流の流向・流速頻度分布

PIV解析で求めた大島大橋第4橋脚北西端の流速について、出現した流速を4つのクラス(クラスA:0.0 m/s~1.0 m/s, クラスB:1.0 m/s~2.0 m/s, クラスC:2.0 m/s~3.0 m/s, クラスD:3.0 m/s~4.0 m/s)に分類し、クラスごとに上げ潮最強時、下げ潮最強時に出現す

表-1 第4橋脚北西端における上げ潮最強時・下げ潮最強時の流向・流速頻度分布図



る流向の出現率を求めた。表-1に流向・流速の出現率の分布を示す。表より、上げ潮最強時における流速は、クラスCの出現率が高く、全体の約73.5%を占めた。ここで、クラスCの流向頻度は、北東方向近傍に集中し、それ以外の流向は確認されなかった。その他の流速の出現率は、クラスAが14.0%、クラスBが9.6%、クラスDは2.9%を示し、低い出現率であった。また、流向はクラスAと同様の傾向を示した。

一方、下げ潮時最強時における流速は、クラスAの出現率が高く、全体の約56.5%を占めた。ここで、クラスAの流向頻度は、西方向近傍（西南西～西～西北西）にピークを示すものの合計で19.6%に留まり、1.0%～4.0%の低い出現率で全方位に分布する結果となった。その他の流速の出現率は、クラスBが32.8%を示し、クラスAと同様の流向分布を示した。流速が大きいクラスC、クラスDについて、それぞれ10.1%、0.6%の出現率であったが、西方向に集中して出現する結果となった。

上記より、当該地点では、上げ潮時はクラスCの大きな流速が一方向に流れているのに対し、下げ潮時では、クラスAの小さな流速が多方向に乱れている結果を得た。この結果は、当該地点が下げ潮時において、上流側の橋脚で形成された後流の影響により、渦等の大きな乱れを受ける地点であることを示すものである。今後、橋脚利用式潮流発電により、より多くのエネルギー取得を目指すために、橋脚で生成される後流の影響を避けることができる最適な発電装置の設置位置を選定し、発電効率上げることが今後の課題として示された。

4. 結論

本研究では橋脚利用式潮流発電技術の開発を目的に、大島大橋を対象とした橋脚近傍の潮流観測を行い、橋脚利用式潮流発電における取得可能な発電量の算出を行った。算出

した最大発電出力は120kWとなり、この値を用いて、発電量の年間見込値を設備利用率40%（NEDO試算値）として算出すると約420MWh/年となる。ここで、前述の2.で算出した一年あたりの平均発電量の値（約84MWh/年）は、設備利用率を用いて算出した見込値に対して約5分の1の値となった。その主な要因として、橋脚近傍で形成される後流により、発電装置設置場所に大きな乱れが生じ、発電量が小さくなるためと推測した。今後の課題として、より多くの発電量を得るために、後流の回避や制御などの対処法の計画・設計が必要となることが示された。

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26年度～29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。

文 献

- 1) エネルギー環境会議：革新的エネルギー環境戦略，2012，p. 2012.
- 2) 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
- 3) 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.
- 4) 石垣衛，三好順也：瀬戸内海における橋脚下海洋空間を活用した潮流発電エネルギー量の算定，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol. 70，No. 2，pp. 79-84，2014.
- 5) 鈴木幸一：橋脚周辺部における流れと掃流力に関する研究，土木学会論文報告集，第272号，pp. 65-78，1977.