

橋脚利用式潮流発電の最適設置位置の選定に向けた 橋脚近傍の流れと乱れの観測と評価

石垣 衛*・長岡 あゆみ**・三好 順也***

(平成30年11月1日受付)

Observation and Evaluation of Tidal Current and Turbulence around Bridge Piers for Selection of Optimum Position of Tidal Power Generation Using Bridge Piers

Mamoru ISHIGAKI, Ayumi NAGAOKA and Jyunya MIYOSHI

(Received Nov. 1, 2018)

Abstract

In the feasibility verification of tidal current power generation using bridge piers, we selected the installation position of the generator considering turbulence. As an example, we targeted the 4th pier of the Oshima Bridge in the Obatakeseto Strait in Yamaguchi Prefecture. AD2CP was installed at the bottom 3.5 m to the south of the piers and 40.0 m south to observe the tidal current. As a result, the tidal current distribution at each site was compared with the turbulence intensity, and the installation position of the tidal current power generation facility considering the influence of the pier was verified.

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

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に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。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。

橋脚を活用した潮流発電技術の研究開発において、筆者らは従前の研究にて、図-1に示す大島大橋の第4橋脚（以

後、P4と表記）の周辺海域を対象とした潮流観測を実施し、エネルギー賦存量の把握や取得可能エネルギー量の算出を行ってきた。当該研究では、橋脚近傍で形成される潮流や乱流が発電装置のエネルギー取得量や効率、発電装置の設計強度に大きく影響をおよぼすことで発電コストが増加する懸念も示された。

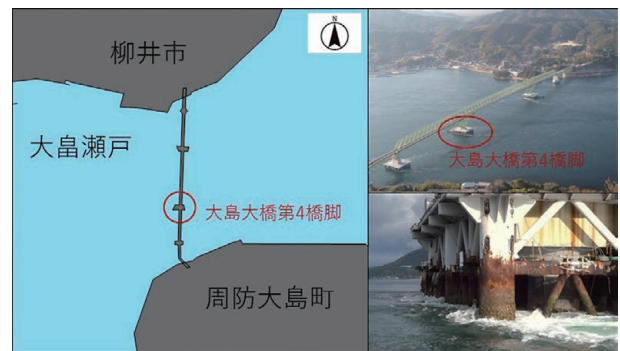


図-1 大島瀬戸および大島大橋の位置・概観

* 広島工業大学工学部環境土木学科
** いであ株式会社国土環境研究所環境技術部
*** 一般法人地域資源研究所

本研究では、橋脚利用式潮流発電技術の実用化を目的に P4近傍を対象とした潮流観測を実施し、当該地点で形成される潮流と乱流の分布を詳細に求めた。さらに、橋脚近傍で形成される潮流や乱流が発電装置のエネルギー取得量や効率、設計強度におよぼす影響を考慮した上で発電装置の最適設置位置を選定し、当該地点における潮流発電の実現性を評価した。また、実用化に向けた課題を抽出した。

2. 橋脚近傍における潮流ポテンシャル評価

(1) 潮流観測の対象海域および概要

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 であり、直上に大島大橋が架橋されている。また、当該瀬戸は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。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を実施し、瀬戸全域および、橋脚近傍の潮流の経時変化の観測値を得ている。また、2016年度までに橋脚で形成される後流を回避する地点として P4南東端を選定し、発電装置の設置候補地点とした。当該候補地点は、海底地形に多少の起伏があるものの、深浅測量の結果、水深は概ね 20.0 m ~ 25.0 m の範囲であった。

本研究では発電装置設置候補地点である P4南東端において、橋脚近傍 20.0 m 範囲の潮流を観測することで潮流分布の経時変化を把握し、潮流ポテンシャルが高い地点を最適設置位置として抽出した。

(2) 橋脚近傍における潮流観測方法

橋脚近傍の潮流を対象とした観測は、図-2 に示すように観測機材を架台へ取り付け、P4南東端の水深 14.5 m 地点(全水深：24.8 m) にベルトで設置固定した。設置水深は、過去に実施した当該地点における ADCP を用いた船上からの潮流の鉛直分布観測結果より選定した。観測期間は、2016年11月9日~25日の大潮を含む17日間とした。観測は橋脚近傍 20.0 m までの範囲の潮流を把握する目的で、超

音波ドップラー流速計 (Aquadop Profiler : Nortek 社製、以下、『AQD』と表記) を図-2 に示すように、L1~L4の観測線を設定し設置した。ここで、観測期間において、各 AQD は12分間バースト間隔にて 1 Hz で橋脚近傍の潮流を観測し、各観測線の流速値を用いた内挿補間により、20.0 m の観測範囲のうち観測機器設置架台から 10.5 m の範囲(橋脚から 11.5 m の範囲) の流速分布を求めた。

また、観測線 L3では、大潮期の2016年11月29日 21 : 30 ~ 30日 09 : 30に 1 Hz で12時間連続観測を実施することで、上げ潮時、下げ潮時の詳細な流速の経時変化を観測した。

(3) 橋脚近傍における潮流観測結果の評価

図-3 に P4南東端近傍 11.5 m 範囲における潮流の分布図を示す。図は (a) に潮時に関係しない潮流の最大値の分布を示し、(b), (c) にそれぞれ上げ潮最強時、下げ潮最強時の平均流速分布を示した。図-3 (a) より、潮時に関係しない潮流の最大値は、橋脚から 1.0 m 地点で約 4.9 m/s を示し、観測線 L3上の全域で 3.2 m/s ~ 3.6 m/s の高い流速分布を得た。同様に、図-3 (b), (c) より上げ潮最強時、下げ潮最強時の平均流速分布も橋脚から 1.0 m 地点で最大流速値を示し、観測線 L3近傍で流速が強くなる傾向を示した。観測線 L3上で、上げ潮の流速は橋脚から 1.0 m 地点で 4.9 m/s、橋脚から 2.0 m ~ 9.0 m の範囲で約 2.6 m/s ~ 2.8 m/s の値を示した。下げ潮時には、橋脚から 1.0 m 地点で

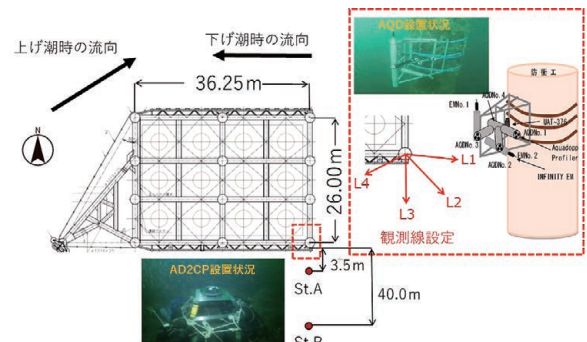
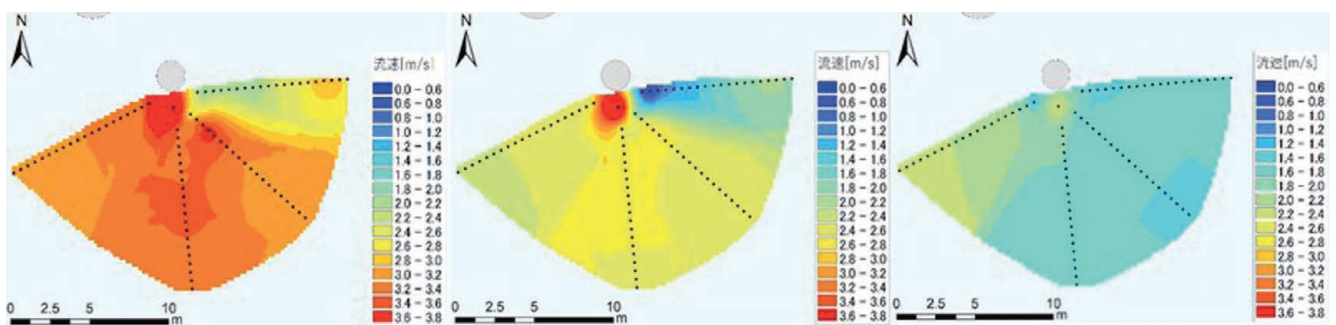


図-2 大島大橋第4橋脚平面図と観測機器設置概要



(a) 最大流速値分布

(b) 上げ潮最強時の平均流速分布

(c) 下げ潮最強時の平均流速分布

図-3 大島大橋第4橋脚南東端 11.5 m 近傍における流速分布

2.5 m/s, 橋脚から 3.5 m までの範囲にて 2.0 m/s ~ 2.2 m/s の値を示した。観測線 L2 近傍の上げ潮最強時, 下げ潮最強時の平均流速は約 2.4 m/s ~ 2.8 m/s, 1.6 m/s ~ 2.0 m/s となり, 観測線 L3 近傍の平均流速に比較して小さい傾向を示した。潮流発電における取得可能エネルギー量は, 1 潮汐周期間の平均流速値が大きい地点がより多くのエネルギーを取得できることから, この結果は P4 南東端において南側方向に発電適地が存在することを示すものである。

図-4 に観測線 L3 における潮流の12時間連続観測結果を示す。図中で (a) は観測線 L3 において, 橋脚から 2.5 m

離れた地点から 11.5 m 離れた地点までの流速を 1.0 m 間隔で示したものである。ここで, 流速は 1 Hz で12時間連続観測した値を10分間の移動平均値として示し, 上げ潮時の値を正とし, 下げ潮時の値を負とした。また (b) は, (a) における下げ潮最強時の1時間 (図中の赤枠: 2016年11月29日23:00~30日00:00) の流速経時変化を拡大して示し, 同様に (c) は上げ潮最強時の1時間 (図中の赤枠: 同年11月30日05:00~06:00) の流速経時変化を拡大して示したものである。観測線 L3 における潮流の経時変化は, 図-4 (b) より, 下げ潮最強時には橋脚から 2.5 m 離れた地点で 23:20 頃に最大値として約 2.2 m/s の流速値を示した。

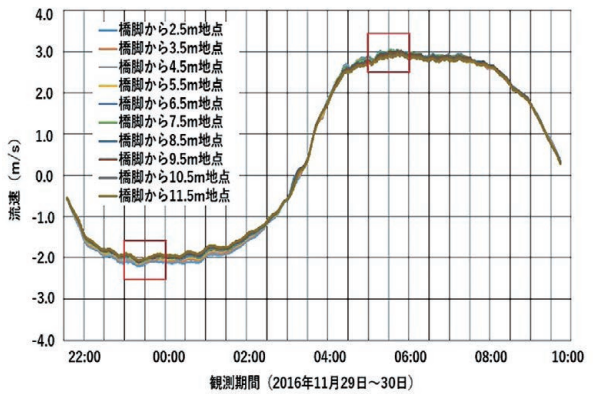
下げ潮時には橋脚から離れるに従って流速が小さくなる傾向を示すものの, その差は約 0.15 m/s ~ 0.2 m/s であり, 潮流エネルギーポテンシャルとして有意な差は生じていなかった。上げ潮時には, 図-4 (c) に示すように橋脚から 2.5 m 離れた地点から 6.5 m 離れた地点にかけて流速が大きくなる傾向を示し, 橋脚から 6.5 m ~ 7.5 m 離れた地点で 05:30 頃に最大値として約 3.3 m/s の流速値を示した。さらに, 橋脚から 11.5 m 地点にかけて流速は小さくなる傾向を示した。しかし, 流速差は下げ潮時と同様に約 0.2 m/s 程度と小さく, 潮流エネルギーポテンシャルとして有意な差は生じていなかった。図-4 (a) から 1 潮汐周期間を通じて各点で流速の大きな差異は生じていない。この結果, 観測線 L3 上では橋脚から 11.5 m までの範囲で潮流エネルギーポテンシャルは, ほぼ同一であると示唆される。

上記の結果より, 観測線 L3 上で橋脚から一番近い地点に発電装置を設置することで, 設置費が最も安くなり, 発電コスト削減に寄与することが推察される。ここで, 発電装置の設計検討において, 採用する発電装置は, 橋脚近傍の複雑な流況に対応可能なダリウス型タービンとし, そのタービン直径は 2.0 m と設定した。橋脚への発電装置設置は, 設置部材を考慮した場合, タービン半径 (1.0 m) に対して設置部材空間 (約 2.5 m) が必要となり, 橋脚から 3.5 m 地点が最適設置位置と選定される。

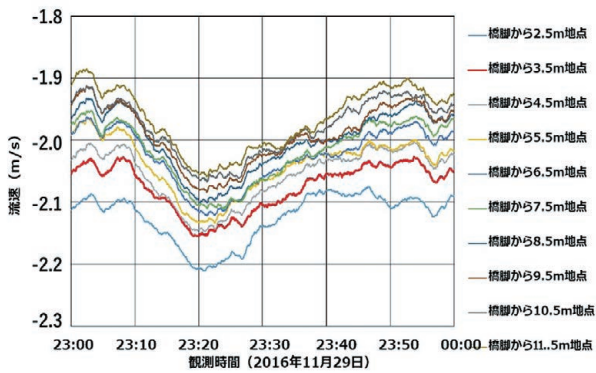
3. 橋脚が潮流におよぼす影響の評価

(1) 橋脚近傍における潮流観測方法

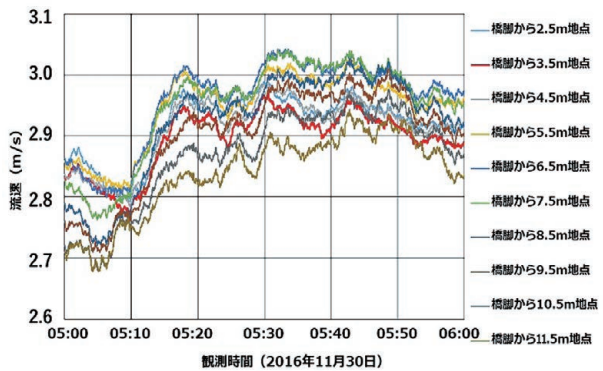
前掲の図-2 に示すように, P4 南東端の南側 3.5 m 地点 (以後, St.A と表記) と南側 40.0 m 地点 (以後, St.B と表記) に観測地点を設置し両地点の観測結果を比較することで, 橋脚が潮流や乱流におよぼす影響を評価した。観測は, 両地点に海底に超音波流速計 (Signature1000: Nortek 社製, 以後『AD2CP』と表記) を設置し, 計測層厚 0.5 m で潮流観測を行った。調査日時は, 2017年9月13日から2017年9月29日の17日間にて 5 beam モード, 8.0 Hz で昼夜の連続観測を行った。設置した AD2CP は東西南北方向と鉛



(a) 12時間連続観測結果



(b) 下げ潮最強時1時間の観測結果



(c) 上げ潮最強時1時間の観測結果

図-4 観測線 L3 における潮流の12時間連続観測結果

直方向の5方向の計測ビームにより測線上の3次元流速を計測するものである。ただし、St.Aに設置したAD2CPから発する北方向の計測 beam が橋脚と接触することで観測結果に大きな誤差が生じることが懸念されたため、北方向の計測 beam は休止とし、東方向、西方向、南方向、鉛直方向の4方向の計測 beam で観測を実施した。計測バーストは30分の間隔とし、毎回10分間のバースト時間を設定することで観測を行った。なお、計測した海面下3.5 mまでの範囲は計測ビーム設定上の都合にて欠測とした。

(2) 潮流の鉛直分布の経時変化

図-5に観測期間中のSt.A, St.Bにおける潮流の鉛直分布の経時変化を示す。また、図-6に図-5の赤点線枠で示した範囲(両観測地点の大潮時)における最大流速の鉛直分布を示す。図より、潮流の鉛直分布は、上げ潮最強時にSt.Aで表層(D.L.-4.0 m ~ D.L.-8.0 m)から中層(D.L.-8.0 m ~ D.L.-18.0 m)にかけて強い流速を示し、3.4 m/s ~ 3.7 m/sの値でほぼ一様に分布する傾向を示した。底層(D.L.-18.0 m ~ D.L.-26.0 m)流速は、表層および中層に比較して弱く、D.L.-18.0 m ~ D.L.-20.0 mでは2.0 m/s ~ 3.4 m/sの流速を示すものの、D.L.-21.0 m以深では0.9 m/s ~ 1.5 m/sの流速となり、水深が深くなるに従って減少する傾向を示した。下げ潮最強時は、上げ潮最強時に比較して全体的に流速は弱い傾向を示した。表層および底層の流速は表層で2.1 m/s ~ 2.7 m/s、底層で1.8

m/s ~ 2.4 m/sの値を示し、中層の2.5 m/s ~ 2.8 m/sの流速に比較して若干弱くなる傾向を示した。しかし、底層の流速は、上げ潮最強時の流速に比較して最大で0.8 m/s程度強くなる値を示した。一方、St.Bの流速は、上げ潮最強時の流速が表層で最大値を示し3.1 m/sの値を得た。中層から底層にかけて水深が深くなるに従って流速は減少する傾向を示し、中層で2.5 m/s ~ 3.0 m/sの流速となり、底層で1.2 m/s ~ 2.4 m/sの値であった。下げ潮最強時は、表層から中層の流速が一様に分布し、流速は2.3 m/s ~ 2.6 m/sの値であった。底層の流速はSt.Aと同様に、上げ潮最強時の流速に比較して最大で0.4 m/s程度強くなる値を示した。

上記の結果より、上げ潮最強時のSt.Aの流速はSt.Bに比較して中層で最大約1.0 m/s大きくなることが示された。

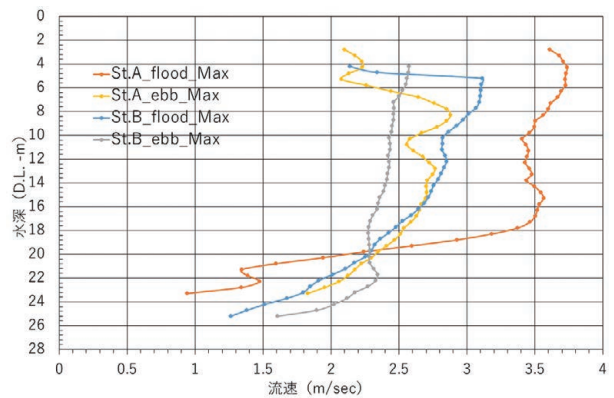


図-6 大潮期における観測地点の平均流速の鉛直分布

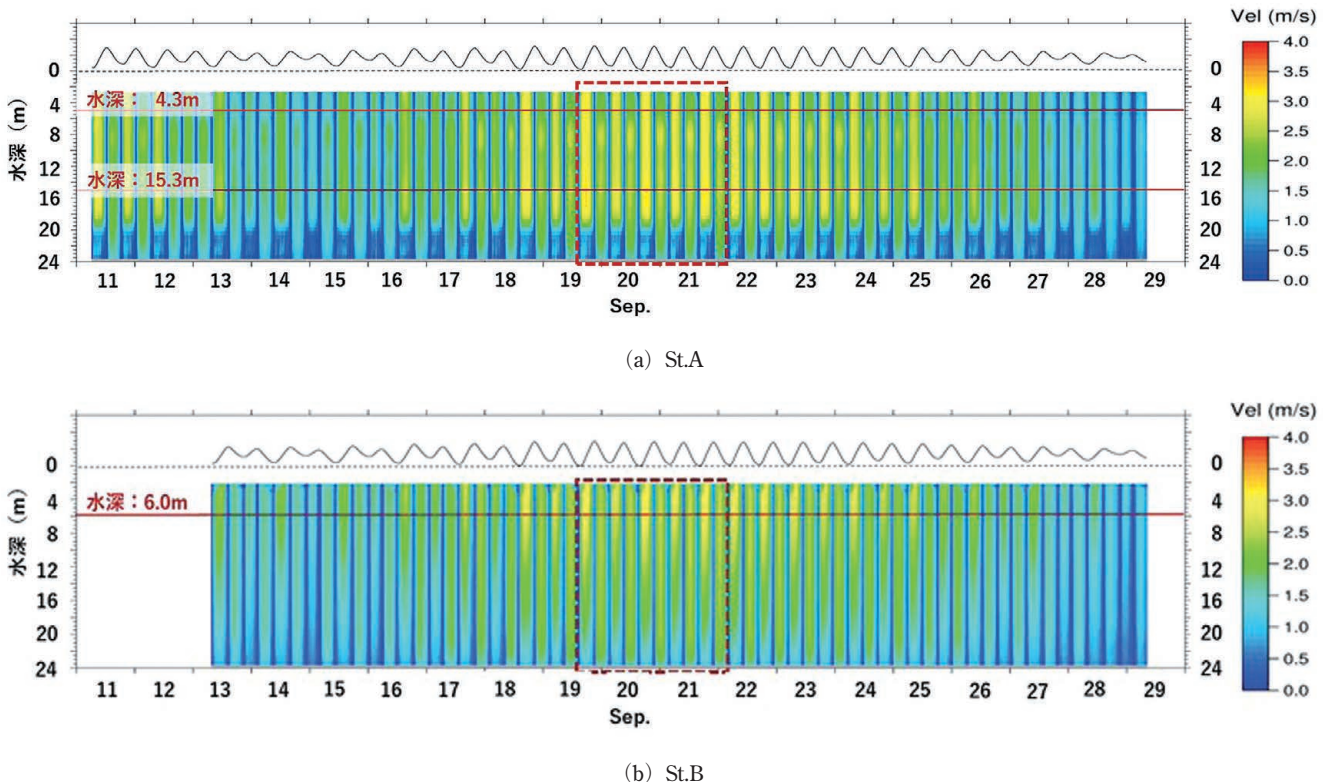


図-5 観測地点における潮流鉛直分布の経時変化

前掲の図-2 に示すように、上げ潮時の潮流の流向は東北東方向であり、P4南東端では、下げ潮時の西方向の潮流に比較して、上げ潮時の潮流は橋脚の影響を強く受けていることが推察される。一般に橋脚近傍の流れは、シア場の外で流速が増幅されることが知られている。P4南東端の潮流に対して、橋脚の影響が小さいと推察される下げ潮最強時には、両観測地点間で流速分布に大きな差が生じていない。一方で、上げ潮最強時には St.A が St.B に比較して潮流が強くなることから、橋脚の影響により流速が増幅されていることが推察される。また、St.A の流速が表層から中層でほぼ一様な大きな値を示しており、St.B に比較して潮流の強い水深帯が広くなり、当該水深帯に複数の発電装置の設置が可能となることが示唆される。

(3) 潮流の経時変化にともなう流速変動

前掲の図-5 にて強い流速を示した St.A の水深 D.L. - 15.3 m 地点について、上げ潮最強時に最大流速値を示した 2017 年 9 月 17 日 17:30~17:40 の 10 分間における計測結果を図-7 に示す。図中で緑色線は観測の実測値 (Raw データ)

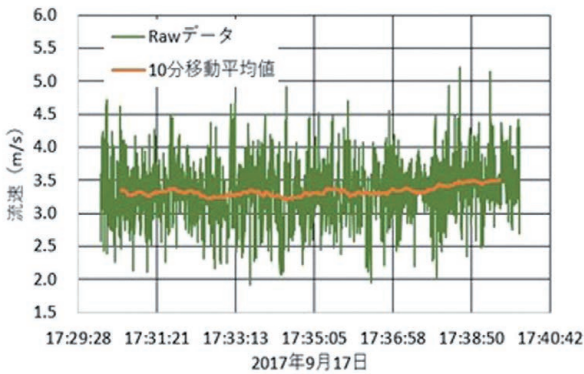


図-7 St.A (D.L. - 15.3 m) の上げ潮最強時の潮流変動

を示し、オレンジ線は実測値を 1 分間移動平均した値を示したものである。図より、上げ潮最強時の 1 分間移動平均値は約 3.2 m/s ~ 3.5 m/s の値を示した。ここで、実測値は上げ潮最強時の 10 分間に約 2.0 m/s ~ 5.0 m/s の値で細かく振動する傾向を示している。この値は、1 分間移動平均値に対して約 40% 程度の増減が生じていることになる。実測値は平均流速に対して大きく乱れる傾向を示し、当該地点の上げ潮最強時には乱れが大きくなることが確認された。この要因として前述のとおり、P4南東端では、上げ潮時に橋脚で形成される乱れの影響を受けやすく、流速も大きく変動することが考えられる。このような流速の大きな乱れは、橋脚で形成される渦などの影響であれば、発電装置のエネルギー取得効率の低下を招き、大きく繰返す流速変動により発電装置の設計強度の増加を招くことが懸念される。

4. 橋脚近傍と沖合で形成される乱流の評価

(1) 水深別の流速と乱流の相関

前述までの結果より、St.A の潮流の乱れは St.B とほぼ同程度であるものの、設置水深によって乱れが大きくなることで、発電効率の低下や発電装置設計強度が増加し、発電コストが高くなることが懸念された。よって、ここでは上げ潮最強時、下げ潮最強時の水深別の乱流強度を求めることで、乱流を考慮した最適設置位置を選定した。乱流強度 TI は、以下の (1) 式により算出した。

$$TI = \sqrt{\frac{1}{3} \{ \sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2 \}} / U \quad (1)$$

上記 (1) 式において、平均流速を U とし、流速の 3 次元方向成分 u, v, w の RMS を $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ とした。図-8 に水深別の流速と乱流強度値の関係を示す。図より St.B では、0.5 m/s 以下の流速で表層から底層で乱流強度は 0.2~0.7

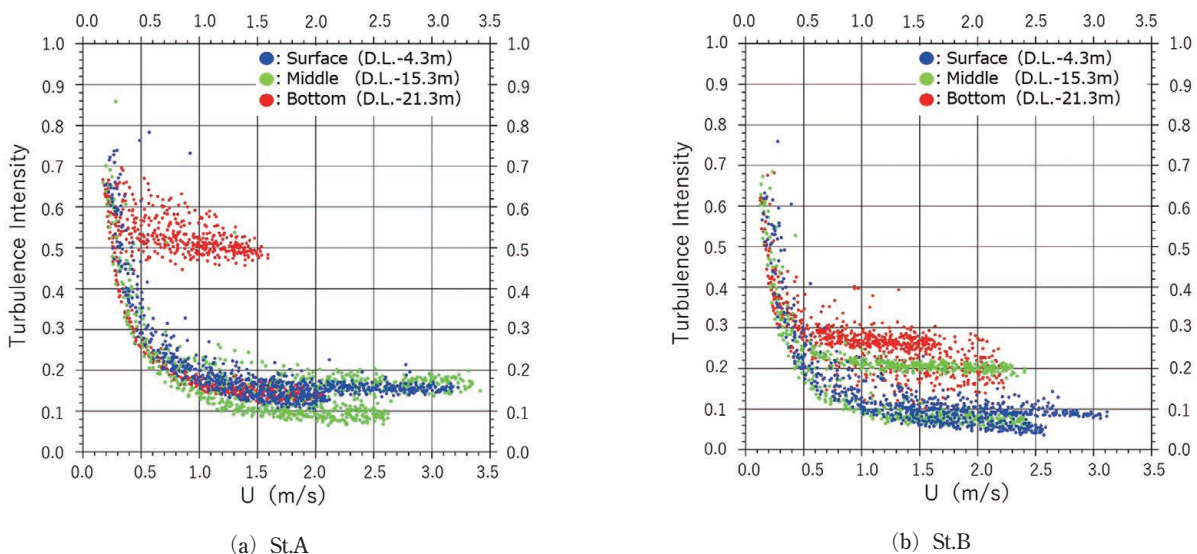


図-8 観測地点における水深別の流速と乱流強度の相関図

の値を示し、流速が弱くなるに従って乱流強度は高くなる傾向を示した。流速が1.0 m/s以上では、乱流強度は表層で0.1程度、中層では0.1~0.2程度を示し、底層で0.2~0.3の値を示した。このとき、乱流強度は表層、中層、底層の順で大きくなる傾向を示すことから、St.Bの潮流の乱れの要因は海底地形であることが示唆される。

St.Aでは、流速が0.5 m/s以下の乱流強度はSt.Bと同様の傾向を示した。流速が1.0 m/s以上では、乱流強度は表層、中層、下げ潮時の底層においても0.20以下を示すことでSt.Bと同様の傾向を示したが、上げ潮時の底層の乱流強度は0.50~0.70と高い値を示した。この結果は、St.Aにおける下げ潮時の底層の乱れは、沖合のSt.Bと同じ傾向を示すものの、上げ潮時には、底層の潮流が橋脚の影響を大きく受けることで、乱流強度が大きくなると推察される。

前述したように、橋脚近傍の底層は大きく乱れることが知られており、St.Aの底層が大きく乱れる要因の1つとして、海底地形の影響に橋脚の影響が加わっていることが推察される。

(2) 乱流強度の鉛直分布

図-9にSt.A, St.Bにおける上げ潮最強時および、下げ潮最強時の乱流強度の鉛直分布を示す。図中の縦軸は海底面からの距離を示し、横軸は乱流強度を示す。St.Bにおける乱流強度は、上げ潮最強時、下げ潮最強時ともにほぼ同様の値を示し、表層~中層で約0.20~0.24、底層で約0.30を示した。St.Aにおける乱流強度も上げ潮最強時、下げ潮最

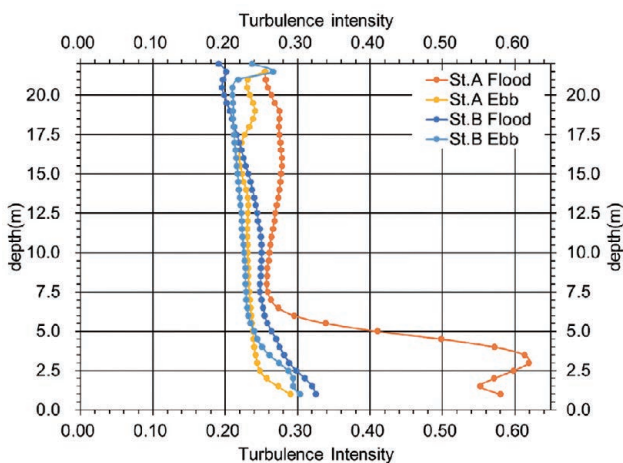


図-9 観測地点における乱流強度の鉛直分布

強時ともに表層から中層でほぼ一様な値となり、上げ潮最強時には約0.25~0.28、下げ潮最強時には約0.22~0.25の値を示した。一方、底層では、上げ潮最強時に海底面の約+7.0 m以深で急激に乱流強度が増加することで最大で0.62の値を示し、大きな乱れが生じていることが示唆された。これは、前述の2-(5)で示したように、橋脚の底層で生じる大きな乱れが要因と推察されるが、本データのみで要因を特定することは困難であり、今後、更なる調査により詳細を検証することが課題となった。

5. 結論

大島大橋第4橋脚(P4)の南東端近傍の潮流観測を実施することで、橋脚利用式潮流発電装置の最適設置位置の選定を行った。観測の結果、当該地点の表層から中層の広い範囲で潮流発電に適した流速が得られることが示された。また、当該地点では潮流が大きく乱れることで発電装置の効率や設計強度に影響をおよぼすことが懸念された。上五島における潮流発電を目的に経塚ら¹⁾が観測した一般海域における乱流強度は、表層から中層で概ね0.25以下であり、底層でも0.30程度であった。本観測により当該地点で確認された乱流強度は、橋脚から40.0 m離れた地点で、表層から中層にかけて約0.20~0.24、底層で約0.30であり上記の値と同程度であった。一方で、橋脚近傍の乱流強度は、底層で約0.62と高い値を示すものの、表層から中層で約0.20~0.28の値にあり、橋脚近傍であっても設置水深によって一般海域における発電装置の性能設計や強度設計と同様の設計が可能であることが示唆された。ただし、橋脚近傍で形成される乱流に対する発電装置の共振は設計上の大きな課題であり、当該地点の乱流構造について、スペクトル解析等により詳細に検証することが今後の課題として残された。

以上の結果、潮流発電装置の最適設置位置として、流速が大きく、橋脚で形成される乱流の影響を大きく受けない、P4南東端南側3.5 m地点の表層から中層を選定し、潮流発電が可能であることを示した。

文 献

- 1) 経塚雄策, パチ ガルシア ノボ: 上五島・神部瀬戸における潮流乱流の観測結果について, 第25回海洋工学シンポジウム, OES25-023, pp. 94-98, 2015.