潮流発電に関連した奄美大島周辺海域における 潮流の現地観測と数値実験

國里 立紀¹・加古 真一郎²・山城 徹³・
中川 智文⁴・山本 峻太郎⁵・城本 一義⁶

¹ 三洋テクノマリン株式会社 (〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町 1-3-17)

E-mail:kunisato@stm.co.jp

² 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

³ 正会員 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻 (同上)

⁴ 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻 (同上)

⁵ 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 (同上)

⁶ 正会員 鹿児島大学大学院 理工学研究科技術部 (同上)

潮流発電に関連して現地観測と数値計算を行い、鹿児島県奄美大島周辺海域における潮流パワー賦存量を算定した。その結果、大島海峡には潮流パワーが最大約 1.5 kW/m^2 、与路島水道には最大約 1.7 kW/m^2 の海域が存在することを明らかにした。さらに、大島海峡に潮流発電装置を 20 基設置した場合の数値実験を行うことによって、1 日あたりの抽出可能な最大エネルギー量は約 19 MW であることと、設置した周辺海域の潮流振幅を最大で約 20 % 程減少させることが示唆された。

Key Words : tidal energy, Amami-oshima, numerical model, ADCP observations

1. はじめに

多くの国でベース電源と位置付けされている火力発電には、燃料として石油、石炭、天然ガス等の化石エネルギー源が用いられている。しかし、これらは有限の資源であるため、その枯渇が懸念されている。加えて、化石燃料は燃焼時に大量の CO_2 を排出することから、地球環境への悪影響が1990年代以降、問題視され始めた。そのため、環境への負荷が少ない再生可能エネルギーを用いた発電システムに、世界的な注目が集まっている。日本においては、四方を海で囲まれていることから、再生可能エネルギーの中でも海洋エネルギーのポテンシャルが高いとされている。特に西日本では、瀬戸や海峡が多く存在するために潮流の強い海域が多く存在し、潮流発電が注目されている。

潮流発電の特長としては、潮の干満によって規則的に流れが変化するためエネルギー量の変動の予測が容易であることや、発電装置を海中に設置するため台風などの天候の変化に左右されない等が挙げられる。潮流発電の適地としては、長崎県の五島列島周辺海域¹⁾や瀬戸内海の来島海峡²⁾などが挙げられ、特に五島列島周辺海域は実証フィールドに認められている。また、宮城県の松島湾湾口部³⁾では、潮流発電装置の試作機を用いた実証実

験が行われようとしている。

このような発電装置の設置による海域への影響評価については、3次元海洋流動モデルを用いた研究が近年報告されている。例えば、Hasegawa et al.(2011)⁴⁾は、北アメリカのファンディー湾において防潮堤を用いた潮流発電システムが及ぼす影響について検討を行った。また、Yang et al.(2014)⁵⁾は、アメリカのピュージェット湾において発電装置を20基から最大100基まで設置した際の影響評価を行った。これらの結果は、発電装置の実機を設置する前にある程度の影響予測を、数値モデルから行えることを示唆した。

鹿児島県は、離島での地域振興を目的とした潮流発電の実現可能性について検討を行っている⁶⁾。鹿児島の離島である奄美大島には大島海峡や請島・与路島水道といった潮流の強い海域が多く存在している(図-1)。國里ら(2013)⁷⁾は、現地観測と数値モデルを用いた潮流シミュレーションの結果をもとに、大島海峡における潮流の特性、および潮流エネルギーポテンシャルについて報告した。そこで本研究は、奄美大島周辺海域における潮流の現地観測と数値計算の結果から、潮流パワー賦存量の算定を行うこととした。さらに、大島海峡に潮流発電装置を設置した場合の数値実験を行うことにより、抽出可能エネルギー量の推定と、装置が海域にもたらす影響につ

いて検討することとした。

2. 現地観測と数値実験

奄美大島は鹿児島県の南方に位置し[図-1(a)], その周辺には加計呂麻島、請島、与路島がある[図-1(b)]. 大島海峡は奄美大島と加計呂麻島の間、請島水道は加計呂麻島と請島の間、与路島水道は請島と与路島の間が存在する[図-1(c)]. 奄美大島周辺海域の潮流シミュレーションは、3次元有限体積法数値モデル、Finite Volume Coastal Ocean Model(FVCOM)⁹⁾を使用した。本モデルの特長としては、非構造系三角形格子を用いることにより、海岸・海底地形を詳細に表現できることが挙げられる。モデルに使用する海岸・海底地形データとして、日本水路協会から提供されているデータ⁹⁾を使用した。ただし、大島海峡と請島・与路島水道の一部については、魚探の測深データも使用した。作成したモデルの計算領域を図-2に示す。格子幅は、開境界では4000 m、大島海峡と請島・与路島水道では20 m から150 mで作成した。また、鉛直座標はσ座標系で10層に分割した。モデルの境界条件としては、海洋潮汐予測モデル¹⁰⁾を用いて計算した主要4分潮(M2, S2, K1, O1分潮)の潮位振幅のみを開境界に与えた。

潮流発電装置による海域への影響については、Yang et al.(2014)⁵⁾によって提案された外力項をモデルの運動方程式(1),(2)に加えて数値実験を行った。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_M \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + K_M \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - F_x^M \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_M \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + K_M \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - F_y^M \quad (2)$$

ここで、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速成分、 f はコリオリパラメータ、 ρ は海水密度、 ρ_0 はその代表値、 p は圧力、 A_M と K_M はそれぞれ水平および鉛直渦動粘性係数である。 $\vec{F}^M = (F_x^M, F_y^M)$ は加える外力項であり、式(3)で表す。

$$\vec{F}^M = \frac{1}{2} \frac{[(C_t + C_b)A_b]}{V_c} \left| \vec{u} \right| \vec{u} \quad (3)$$

ここで、 V_c はコントロールボリューム、 C_t はタービン効率係数、 C_b はタービン抵抗係数、 A_b はタービンプレードの面積、 $\vec{u}$ は速度ベクトルである。本研究ではChen et al.(2013)¹¹⁾をもとに、 C_t と C_b はそれぞれ0.33と0.5に設定した。また、 A_b は発電装置の高さを18 mと設定したため、254.5 m²とした。発電装置は海底に設置を想定している

図-1 奄美大島と観測海域の位置

図-2 モデルの計算領域

ため、外力項は装置の中心深さ(海底上9 m)にあたるσ層にのみ適用した。ただし本研究では、発電装置に対する潮流の入射角やプロペラの起動流速による効率の変化や、発電装置の支柱や土台による抵抗及びタービン間の相互作用は考慮していない。

数値計算結果を検証するために、大島海峡(2013年9月6日から7日)および請島・与路島水道(2014年9月8日から9日)で、TRDI社製の船舶搭載型ADCP(600 kHz)を用いた潮流観測を実施した[図-1(c)の青線]。深さ2 ~56 mを2 m間隔で測流出るようにADCPを設定し、船速6 knotで船を移動させながら流速データを収集した。また、請島・与路島水道(2009年10月10日から24日)で潮位計とADCPを用いた、潮位と潮流の定点観測を実施した[St.a,2,3; 図-1(c)]。St.2,3では、ADCPをそれぞれ海底直上である深さ13 mと16 mにて測流するように設定した。

本研究ではこれらに加えて、第十管区海上保安庁本部が大島海峡(2010年5月12日から6月22日)で実施した多層式ADCPを用いた流速観測のデータを利用させて頂いた[St.1; 図-1(c)]。第十管区海上保安庁本部が実施した観測では、観測層が深さ4 mから1 m間隔で深さ17 mまでに設定されていた。

3. 数値モデルの精度検証

(1) 潮位

2009 年の St.a での潮位観測結果に調和解析を施し、主要 4 分潮を合成した潮位と、モデルから得られた St.a 付近の潮位の時系列を図-3 に示す。図-3 を見ると、モデル潮位は観測をよく再現できている。また図示はしないが、計算値は名瀬・小湊検潮所における観測結果^{12),13)}とよく一致していた[図-1(b)の黒丸]。

(2) 潮流

ADCP 曳航潮流観測と数値モデルそれぞれから得られた上げ潮時の絶対流速の水平分布を図-4,5,6 に示す。これらの図から、待網岬沖（大島海峡）、与路島とハンミヤ島間（与路島水道）で観測された強流速域を、モデルがよく再現していることが分かる（図-4,5）。また図示はしないが、下げ潮時においてもモデル結果は観測とよく一致した。しかし、請島水道間におけるモデル潮流は、特に強流速帯において観測を過大評価する傾向にあった。（最大で 0.8 m/s 程度）（図-6）。

次に、潮流の定点観測と数値モデルそれぞれから得られた絶対流速の時系列を図-7,8,9 に示す。観測値は潮位と同じく、調和解析を施し主要 4 分潮流を合成したものである。これらの図より、大島海峡の St.1 と与路島水道の St.2 における計算値は、観測値とよく一致している（図-7,8）。しかし、請島水道の St.3 では、全体的にモデルが観測を約 35 %程度過小評価していた（図-9）。

以上のことから、大島海峡と与路島水道のモデル潮流については、時空間とも観測を概ね再現できた。請島水道の計算値が観測値と一致しなかった理由としては、周辺の海底地形データの解像度が粗いことや、メッシュの空間解像度が大きすぎることなどが推察される。

4. 潮流パワー

請島水道のモデル結果に関しては改良の必要があるが、大島海峡と与路島水道の計算値は観測値とよく一致したので、本研究ではそれら 2 海域のみに注目し、潮流パワー賦存量 $P[W/m^2]$ を式(4)を用いて計算した（図-10）。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho |\vec{u}|^3 dt \quad (4)$$

図-3 2009 年の St.a における観測とモデルから得られた潮位の時系列

図-4 2013 年 9 月 6 日 17:00 上げ潮時の大島海峡における深さ 4 m での絶対流速の水平分布(a)観測、(b)モデル

図-5 2014 年 9 月 9 日 16:00 上げ潮時の与路島水道における深さ 4 m での絶対流速の水平分布(a)観測、(b)モデル

図-6 2014年9月8日16:00 上げ潮時の請島水道における深さ4 mでの絶対流速の水平分布(a)観測, (b)モデル

ここで, ρ は $1,024 \text{ kg/m}^3$ とした. 計算した結果, 大島海峡では, 15 昼夜平均で潮流パワーが約 1.5 kW/m^2 [図-10(a)の赤丸], 与路島水道では約 1.7 kW/m^2 [図-10(b)の赤丸]の海域が存在していることが分かった.

5. 潮流発電装置の抽出可能エネルギーと海域への影響

潮流発電装置を設置できる水深(水深18 m以上)であり, かつ, 潮流パワーが最大であった大島海峡の待網岬沖[図-10(a)の黒枠]において, 発電装置を設置した際の抽出可能エネルギーの推算と, 装置がもたらす海域への影響について検討した. 本研究では, 装置を1, 2, 4, 8, 12, 20基(流軸方向に最大4基の設置とし, 装置の1から4基までは潮流の流軸に対して垂直に1列, 8基では2列, 12基では3列, 20基では5列)設置した6ケースの数値実験を行い, 設置しないケースとの潮位・潮流差をそれぞれ計算することにより, その影響を考慮した.

(1) 抽出可能エネルギー

装置を設置した時の最大抽出可能エネルギー量 $E[\text{W}]$ を式(5)を用いて推算した.

$$E = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho C_t A_b |\vec{u}|^3 dt \quad (5)$$

推算した結果, 1基設置した時の最大抽出可能エネルギー

図-7 St.1における観測とモデルから得られた深さ4 mでの絶対流速の時系列

図-8 St.2における観測とモデルから得られた深さ13 mでの絶対流速の時系列

図-9 St.3における観測とモデルから得られた深さ16 mでの絶対流速の時系列

図-10 モデルから得られた深さ4 mでの15昼夜平均の潮流パワー分布(a)大島海峡, (b)与路島水道

一は、1日あたり約1.5MWであり、20基では約19MWであった(表-1)。これは、一般家庭の1日の消費電力量を13kWh¹⁴⁾とすると、1基では約120世帯、20基では約1,480世帯に相当するエネルギー量であることが分かった。なお、大潮期から小潮期でエネルギー量は変動するが、将来予測が可能なため、電力の安定供給を実現するためには、充電などの対策も必要となる。また、設置数を増やす毎に1基あたりの最大抽出可能エネルギー量は少なくなることが分かった。理由としては、各格子における流速値の差異や隣り合う格子に装置を設置したことが考えられる。

(2) 海域への影響

発電装置を設置したケースと設置しないケースにおけるM2分潮(大島海峡で一番卓越している成分)の潮位・潮流(装置の中心付近である10m深)差をそれぞれ図-11と図-12に示す。負の値は、設置しないケース

表-1 潮流発電装置の最大抽出可能エネルギー

設置数	エネルギー量 (MW/day)	1基あたりのエネ ルギー量(MW/day)
1	1.54	1.54
2	3.01	1.51
4	5.03	1.26
8	8.52	1.07
12	12.15	1.01
20	19.16	0.96

図-11 M2分潮における潮位振幅差の水平分布(a)1基, (b)2基, (c)4基, (d)8基, (e)12基, (f)20基

図-12 深さ10mでのM2分潮における潮流振幅差の水平分布(a)1基, (b)2基, (c)4基, (d)8基, (e)12基, (f)20基

の方が、設置したケースより潮位（潮流）が高い（速い）ことを示す。図-11 で示すように、装置の設置数が多くなるほど、潮位振幅の変化が大きくなる。しかし、その値は 20 基設置した時で最大約 0.3 cm と非常に小さい変化[図-11(f)]であった。ところが、潮流に関しては装置を 8 基以上設置したケースにおいて、周辺海域のみならず装置の下流側でも振幅の減少が顕著であり[図-12(d,e,f)], 20 基設置した場合には最大で約 0.3 m/s の振幅の減少がみられた[図-12(f)]。そして、12 基以上設置したケースでは、装置の南北に振幅の増加の傾向がみられる[図-12(e,f)]。これは、発電装置という抵抗を避けるような流れが変化したためであると考えられる。また図示はしないが、残りの分潮についても定性的には同様な変化がみられた。

6. まとめ

本研究では、鹿児島県奄美大島周辺海域において現地観測と数値実験を行い、潮流パワー賦存量の算定、潮流発電装置による抽出可能エネルギー量の推算と海域への影響について検討した。その結果、以下のことが確認できた。

- 1) 大島海峡には潮流パワー賦存量が最大約 1.5 kW/m²、与路島水道には最大約 1.7 kW/m²の海域が存在することが明らかとなった。
- 2) 大島海峡に発電装置を 20 基設置した場合の 1 日あたりの最大抽出可能エネルギー量は 19 MW、一般家庭約 1,480 世帯の 1 日の消費電力量に相当することが示された。
- 3) 発電装置の設置は、潮位には大きな影響を与えなかったが、周辺海域の潮流強度を最大で約 20 %程度減少させることを示唆した。

謝辞： ADCP定点観測のデータを快く提供して下さった第十管区海上保安庁本部の皆様に厚く感謝を申し上げます

す。本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究（課題番号：26特5-7）の補助を受けたことを付記する。なお、作図にはGMT(Wessel and Smith, 1998)を用いた。

参考文献

- 1) 経塚雄策, 牧野愛, 長澤和也, 山城徹：五島における潮流発電のフィージビリティスタディ, 海洋工学シンポジウム, 22nd, ROMBUNNO.OES22-063, 2011.
- 2) 井内国光, 中村孝幸, 安井孝, 二宮一成：来島海峡周辺海域における潮流エネルギー賦存量の推定, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.67, No.2, 2011.
- 3) 河北新報：2015 年 2 月 20 日
- 4) Hasegawa, D., Sheng, J., Greenberg, D. A. and Thompson, K. R. : Far-field effects of tidal energy extraction in the Minas Passage on tidal circulation in the Bay of Fundy and Gulf of Maine using a nested-grid coastal circulation model, *Ocean Dynamics*, 61, 1845-1868, 2011.
- 5) Yang, Z., Wang, T., Copping, A. and Geerlofs, S. : Modeling of in-stream tidal energy development and its potential effects in Tacoma Narrows, Washington, USA, *Ocean & Coastal Management*, 99, 52-62, 2014.
- 6) 鹿児島県：平成 24 年度鹿児島県海洋再生可能エネルギー導入可能性検討事業報告書（概要版）, 2013.
- 7) 國里立紀, 加古真一郎, 山城徹, 中川智文, 城本一義：大島海峡における潮流エネルギーポテンシャルに関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.70, No.2, pp.I_109-I_114 .2014.
- 8) MEDM : <<http://fvcom.smast.umassd.edu/fvcom/>>.
- 9) 日本水路協会：海底地形デジタルデータ M7019 Ver.2.0 奄美海域.
- 10) Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe : Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, *Journal of Oceanography*, 56, 567-581, 2000.
- 11) Chen, W., Liu, W. and Hsu, M. : Modeling Evaluation of Tidal Stream Energy and Impacts of Energy Extraction on Hydrodynamics in the Taiwan Straits, *Energies*, 6, 2191-2203, 2013.
- 12) 第十管区海上保安庁本部ホームページ.
- 13) 気象庁ホームページ.
- 14) 経済産業省資源エネルギー庁：省エネ性能カタログ 2013 年冬版, 2013.

OBSERVATION AND NUMERICAL SIMULATION OF TIDAL CURRENT AROUND AMAMI-OSHIMA IN RELATION TO TIDAL POWER GENERATION

Ritsuki KUNISATO, Shin'ichiro KAKO, Toru YAMASHIRO,
Tomofumi NAKAGAWA, Shuntaro YAMAMOTO and Kazuyoshi JOMOTO

The tidal currents around Amami-oshima Island were examined in relation to tidal current power generation using the results of ADCP Observation and numerical simulation. We found the tidal current power of 1.5 kW/m² in the Oshima Strait and 1.7 kW/m² in the Yorojima Channel. Moreover, it was shown from the numerical simulation for the case of arrayed 20 tidal current turbines in the Oshima Strait that the daily mean value of extractable tidal energy is 19 MW and the amplitudes of tidal currents are reduced about 20 %.