三宅島近海流況観測とそれに基づく海流エネルギー資源量推定

正会員 清 松 啓 司* 正会員 小 平 翼**
 正会員 門 元 之 郎* 正会員 早稲田 卓 爾*
 正会員 高 木 健*

ADCP measurements of ocean currents near Miyake Island

by Keiji Kiyomatsu, *Member* Tsubasa Kodaira, *Member*
 Yukio Kadomoto, *Member* Takuji Waseda, *Member*
 Ken Takagi, *Member*

Summary

Ocean current near Miyake Island was measured by an Acoustic Doppler Current Profiler equipped on a moored buoy system from March 2013 to March 2014 for an ocean current energy converter development project. Current variations associated with the Kuroshio, tide and wind, were found in the observed record and are described in the paper. Based on the Kuroshio axis location, periods with and without the Kuroshio intrusion into the island were identified. Spectral analysis of the current speed revealed that the diurnal variation is enhanced when the Kuroshio does not intrude. This enhancement of diurnal current variation is possibly related to the generation of the Island-Trapped Waves. By combining the fine-scale observation data and the long-term coarse-resolution Kuroshio axis data, inter-annual variability of the current power was estimated. The estimated current power is about three times larger than the one estimated from an ocean reanalysis. The result implies that coarse-resolution non-tidal numerical models possibly underestimate current power in coastal ocean.

1. 結 言

(株)IHI, (株)東芝, (株)三井物産戦略研究所, 東京大学は, 海流発電の実用化を目指し定格出力 2MW の試験機の開発を進めている^{1,2)}. 沖縄から千葉県野島崎の沖合には, 最大流速約 2m/s, 幅約 100km に渡る世界有数の海流, 黒潮が流れている³⁾. 海流発電とは黒潮の持つ運動エネルギーを電気エネルギーに変換するものであり, 黒潮が恒常的に通過する海域では半日や一日周期の変動が卓越する潮流と比べて安定的な電力供給を行うことができると期待される. また水深が深い海域で大きな発電量を期待できるという特徴もある. 開発は順調で, まずは比較的設置の容易な水深 100-200m 程度の海域で, 定格出力 200kW ほどの小型試験機の実海域試験を行うことを計画している.

係留系を含め, 実証試験機の設計や資源量推定には設置海域の流況を把握しておくことが必要である. 流況を調べ

るには観測もしくは数値計算を行うことが考えられるが, 海洋モデルの高精度化が進んでいる現状においても, 現場観測は重要である. 例えば, 我が国周辺の海流資源評価には黒潮流路の再現性をデータ同化により高めた海洋モデルの計算結果, 海洋再解析が用いられるが⁴⁾, 過去の資源量評価で用いられたモデルには, 潮汐が導入されていない, 直径数 10km 以下の地形の影響下にある流れが再現できていない, といった明確な課題がある. そのため, 再現された日本沿岸の流れはモデル間の違いやモデル-観測間の違いが大きく, 数値モデルの結果をそのまま信用することはできない⁵⁾. 海流の長期計測には手間と費用がかかるため簡単ではないが, 現場観測は海流発電実用化を目指す上で極めて重要なプロセスであり, また, 得られたデータは公開・共有すべきコミュニティ全体の貴重な財産である. 我々は小型試験機による実海域試験を念頭に, 伊豆諸島・三宅島の北西, 水深約 175m の海域で長期流況観測を行った (Fig. 1a). 観測海域として三宅島近海を選択したのは, 研究拠点からのアクセスが比較的容易, かつ, 小型試験機実海域試験を行う予定の水深 100-200m を黒潮本流が通過するためである.

黒潮は長らく海洋物理学や水産学の興味の対象であり, ドローグ付きの漂流ブイなど, 戦前から様々な計測器を用いた観測が実施されてきた³⁾. 特に近年は係留系^{6,7)}や船舶を使った観測^{8,9)}の蓄積, 1980 年代以降の衛星海面水温観測¹⁰⁾, 1990 年代以降の衛星海面高度計による観測¹¹⁾などにより, 黒潮流路変動や黒潮流量変動のメカニズムといった, 黒潮

* 東京大学大学院・新領域創成科学研究科

** Department of Oceanography, Dalhousie University, Canada

の海洋物理学的な理解は確実に進んでいる。しかし、水深100-200mといった、黒潮の通過海域としては極めて浅い部類に入る沿岸海域での観測例はほとんどない¹²⁾。三宅島沿岸では、我々が2012年に行った4日間の観測の他は、海上保安庁により1995年6月24日から7月12日に三宅島北方で行われた例があるのみであり¹³⁾、流れの特徴を把握したり、資源量推定を行うには明らかにデータが不足している。

Fig. 1 Location of Miyake Island and observation site. (a) Map around Miyake Island and (b) distribution of the observed buoy locations relative to the sinker location in meters. Black line with dots indicates buoy trajectory from 00:00 Feb. 5 to 00:00 Feb. 6, 2014. Numbers near the black dots indicate hours. Background gray dots indicate all hourly recorded buoy locations during the observation. Cross indicates sinker location.

三宅島周辺の流れで卓越しているのは黒潮と潮流である。九州の南、トカラ海峡を通過した後の黒潮はその非線形性のため大きな流路変動を起こす¹⁴⁾。しかし、その流路パターンは伊豆海嶺の地形、特に水深が深くなっている南北2つの海域の存在によって緩やかに規定されており、例えば非大蛇行接岸流路、非大蛇行離岸流路、大蛇行流路の3つを典型的な流路型として分類できる^{15,16)}。これら流路型のうち、三宅島近海を黒潮が通過するのは非大蛇行接岸流路と大蛇行流路である。我々が2012年に行った観測では三宅島沿岸を流れる黒潮を捉えることに成功しており、最大で約2.5m/sに達する強い流れ(潮流含む)や、黒潮が三宅島によって遮られることにより生じる顕著な流れの水平シアなどが確認されている⁴⁾。一方、海上保安庁が1995年に実施した調査では黒潮が通過していない期間の流れが観測されており、

潮位変動では半日周潮が優勢な混合潮型であったが、流れは日周潮型であった¹³⁾。潮位変動と流速変動で支配的な周期が異なっていたのは内部潮汐の影響であると推測される。実際、伊豆諸島近海では顕著な内部潮汐が存在することが知られている^{17,18)}。我々の観測でも潮流により観測ブイの位置が変動している様子が確認できる。例としてFig. 1bに2014年2月5日0時から6日0時までの観測ブイの軌跡を描いた。背景の色の薄い点は観測期間中の観測ブイの位置を全て描いたものである。24時間の間にブイは大きく2度円を描くように移動しており、半日周期の流れの存在が読み取れる。

本論文では伊豆諸島・三宅島の北西、水深約175mの海域で2013年3月から2014年3月まで行った長期流況観測の結果と、観測結果から推定した資源量について報告する。今回の観測は非大蛇行接岸流路と非大蛇行離岸流路、及び接岸流路から離岸流路への遷移に対応する期間にまたがって実施されており、黒潮通過時と非通過時、両方のデータを長期間に渡り取得することに成功した。本論文の構成は以下の通り。本章では研究背景と意義を説明した。第2章では観測設備について説明する。第3章では観測された流れの特徴と、観測結果に基づく資源量推定結果を紹介する。第4章はまとめである。

2. 観測設備について

観測には一点弛緩係留系に搭載した ADCP (Teledyne/RDI, Workhorse Sentinel 300Hz)を用いた。使用した係留系と観測ブイの概要をFig. 2に示す。観測ブイ(ゼニライトブイ社)は灯標フロートを介して一点弛緩方式により係留した。コンクリート製シンカーの位置は三宅島の北西 34.1365° N, 139.462° E, 水深約175mである(Fig. 1)。係留索が海底面と接触することにより生じる摩耗を防ぐため中間フロートを用いている。波高5m、流速2.5m/sの海況下でも ADCP 計測限度傾斜角15°以下を保つよう係留環位置とダンパーの大きさを調整している。観測ブイと ADCP には付着生物量を低減するため防汚塗料を塗布した。

観測は2度の中断を挟んで2013年3月12日から2014年3月10日まで行われた。それぞれの観測期間を以下に示す。

第一期: 2013年3月13日 - 2013年6月30日

第二期: 2013年9月13日 - 2013年10月28日

第三期: 2013年11月23日 - 2014年3月10日

観測中断の理由は水中フロートの海面浮上(第一期)、灯標フロートと観測ブイをつなぐ係留索の破断(第二期)である。観測第二期では灯標フロートと観測ブイの間に予備索を取り付け、さらに主索と予備索に視認性向上のための浮きを取り付けていたが、主索と補助索が干渉し、摩耗、破断に至ったものと推測される。第三期では観測ブイ係留環との接続部で係留索が摩耗することで破断に至った。使用した係留

索の破断強度は十分三宅島の海象条件に耐えられるものであったが、金属部品とロープとの接続部の摩耗や、不必要な付属物によりロープが絡むことで摩耗が促進され、強度の劣化につながったと考えられる。今後は定期的な点検を行いやすい、シンプルな係留システムの設計が望まれる。

ADCP の電源は内蔵のリチウムイオン電池である。長期間の観測を実現するためボトムトラッキング機能は使用しなかった。流速は水深約 6.2m から 2m 間隔で 59 層分、1 分間の平均流速を 1 分間隔で測定した。1 分あたりの ping 数は 10、測定精度の目安(標準偏差)は 2.2cm/s である。ただし、後ほど述べるように、30 分移動平均による平滑化を施し、1 時間間隔に間引いたものを今回解析したので、解析対象のデータの精度は 2.2cm/s よりかなり改善されている。

Fig. 2 Schematics of the observation system

3. 結果

3.1 計測精度に関する検討

流れの特徴や資源量推定結果を紹介する前に、まずは計測精度に関する検討結果について述べる。

観測結果は水深とともに欠測が増える傾向があり、特に水深 80m から 90m より深くなると各観測期間の平均欠測率が 50%を超える(Fig. 3)。欠測は ADCP トランスデューサー面への生物付着、海中への気泡の混入、限度角を超えた ADCP の傾斜などによって生じる。海中の気泡の状態や生物付着量などが不明であるため欠測の原因を特定することは難しい。しかし、観測第一期には他の期間より明らかに激しい生物付着が確認されており、これが他の期間より高い欠損率の原因ではないかと考えている。第二期は 45 日間の間に 5 度の台風を経験しており、激しい気象・海象条件が欠損率の増加に影響していると考えられる(例 2013 年 9 月 16 日台風 18 号通過時の欠損率, Fig. 3)。

サンプリング周期は 1 分間であるが、平均的に見た場合、解析に適した周期の下限はそれよりもかなり長い。高周波数領域のスペクトルを Fig. 4 に示す。水深 6.2m での東西方向流速(1 分間隔)をデータ数 2048 のサブデータに分割し、その中で欠損率 20% 以下のものについて FFT(Fast Fourier Transform)法によりスペクトルを算出した。それらのアンサンブル平均が Fig. 4 に示したスペクトルである。アンサンブル数は 57 である。大まかに周期 1 時間弱でスペクトルが一定になり始め、約 30 分より短い周期ではスペクトルがほぼ一定となり、ホワイトノイズに近くなる。平均的に見て 1 時間弱より長い周期の流速変動は測定できていると考えられる。

以上の検討から、今回解析した流速データには、30 分移動平均により平滑化し、さらに 1 時間間隔に間引いたものを使用することとした。そして、比較的欠測の少ない水深 72.2m までを解析対象とした。本論文では東西方向流速を $u(z, t)$ 、南北方向流速を $v(z, t)$ と表す。 t は時間、 z は水深(6.2 ~ 72.2m)である。ある変数 ϕ の時間平均を $\bar{\phi}$ 、深さ方向平均を $\langle \phi \rangle$ とそれぞれ表記する。

Fig. 3 Rate of missing data in relation with water depth. The missing rate is derived from zonal velocity. Dots, crosses, triangles and stars indicate the rate in observation period 1, 2, 3 and Sep. 16, 2013, respectively.

Fig. 4 Power spectrum of zonal velocity at 6.2 m depth in the period from Nov. 23 2013 to Mar. 10 2014. The spectrum was estimated from ensemble average of 57 spectra calculated by FFT from segments of 2048 data (=34.13 hours) where the missing rate is less than 20 %.

3.2 流速最大値, 平均値, 流向, 鉛直分布

まず, Fig. 5 に(1)式で定義される深さ方向平均流の流速 U_D のヒストグラムを示す.

$$U_D(t) \equiv \sqrt{u_D(t)^2 + v_D(t)^2} \quad (1)$$

ここで,

$$u_D(t) \equiv \langle u(z, t) \rangle \quad (2)$$

$$v_D(t) \equiv \langle v(z, t) \rangle$$

は東西・南北方向流速の鉛直平均である。 U_D の最大値は 2.05m/s で, 2013 年 4 月 8 日 22 時(JST)に観測している. 平均値($\bar{U}_D$)は 0.56m/s であった. U_D の中で, 0.5m/s 以下のものの割合は 51.5%, 同じく 1m/s のものの割合は 88.0% であった. 流れの主な方向は北西である. 三宅島近海は黒潮が流れる海域であるが, 観測された流速は, 最大流速を見てもそれほど速くない印象である(2012 年の調査では最大流速 2.5m/s が観測されている⁴⁾).

Fig. 5 Statistical properties of depth-averaged current. (a) Speed U_D and (b) flow direction in degrees. Here, eastward flow and northward flow are indicated by 0° and 90° , respectively.

続いて流れの深さ方向変化を見てみる. 観測期間における流速 $U(z, t) \equiv \sqrt{u(z, t)^2 + v(z, t)^2}$ の最大値は 2.09m/s で, U_D の最大値と同じく 2013 年 4 月 8 日 22 時(JST)に, 水深 22.2m にて記録している(Fig. 6a). このとき, 流速の深さ方向変動は非常に小さく, 東西方向流速の深さ方向標準偏差(std_u^{depth})は 0.08m/s, 南北方向流速標準偏差(std_v^{depth})は 0.07m/s であった. ある時刻 t における std_u^{depth} と std_v^{depth} は次式で定義される.

$$std_u^{depth}(t) \equiv \langle (u(z, t) - u_D(t))^2 \rangle^{1/2} \quad (3)$$

$$std_v^{depth}(t) \equiv \langle (v(z, t) - v_D(t))^2 \rangle^{1/2}$$

平均流の流速プロファイル($\bar{u}, \bar{v}$)を確認すると, 最大流速観測時に限らず, 観測した流れの深さ方向変動は基本的には小さかったことがわかる(Fig. 6b). std_u^{depth} は全体の 74% が 0.1m/s 以下, 90% が 0.15m/s 以下であった. 同様に std_v^{depth} は全体の 75% が 0.1m/s 以下, 91% が 0.15m/s 以下で

あった. このことは, 黒潮が深さ方向に変化の少ない流れであることと整合性がある.

観測された流れの多くは深さ方向に変動が少ない一方で, 深さ方向に大きく変動している流れも含まれている. 例えば, 2013 年 10 月 24 日 14 時の流れは東西方向流速の深さ方向変化が大きい($std_u^{depth} = 0.42$ m/s, Fig. 6c). このとき, 海面付近で西向き 1m/s 以上であった流速は水深とともに大きく減少し, 水深約 60m 以下では北東の流れとなった. 2013 年 10 月 12 日 19 時の流れは南北方向流速の深さ方向変化が大きかった例である($std_v^{depth} = 0.44$ m/s, Fig. 6d). このときは流れの方向が水深 40m 付近を境として約 150 度変わっている. std_u^{depth} と std_v^{depth} のどちらか片方または両方が 0.15 m/s より大きな場合を深さ方向の変動が大きい流れと定義すると, 深さ方向の変動が大きな流れは全体の 10% である. 以降, 本論文では水深 6.2-72.2m で平均した流れ(深さ方向平均流, $u_D(t), v_D(t)$)を扱う.

Fig. 6 Examples of vertical current velocity profile from 6.2 m to 72.2 m depth: (a) 22 p.m. Apr. 08 2013, (b) time-averaged velocity profile ($\bar{u}, \bar{v}$), (c) 2 p.m. Oct. 24 2013, and (d) 7 p.m. Oct. 12 2013. Color indicates water subsampled at 6 m interval.

3.3 黒潮の影響

ここでは黒潮流路変動と観測流速の関係を調べ, 今回の観測で黒潮を捉えることに成功していることを示す.

まず, 観測流速と黒潮流路の関係を簡単に調べる. 潮流による変動は解析対象ではないので, (4)式で定義される深さ方向平均流の日平均流速 U_D^{day} を扱う(Fig. 7a). $\sim$ は日平均を表す. 中央値ではないことに注意.

$$U_D^{day} \equiv (\bar{u}_D^2 + \bar{v}_D^2)^{1/2} \quad (4)$$

U_D^{day} の最大値は 1.53m/s, 最小値は 0.00m/s, 平均値は 0.36m/s である. U_D^{day} は 2013 年 3 月から 5 月中旬にかけて大きな値となっている. また, 2013 年 11 月末にも大きなピー

クが確認できる。三宅島と黒潮の相対的な位置関係を表す指標としてはシンカーのある 139.462°E 線上における黒潮緯度(黒潮流軸の緯度)を採用する(Fig. 7b). 黒潮流軸データには MIRC(Marine Information Research Center)黒潮流軸データを用いた¹⁹⁾. この黒潮流軸データは海上保安庁が公開している海洋速報記載の黒潮流路²⁰⁾から機械的に決められたものである。海洋速報の黒潮流路は衛星観測海面高度・水温, 船舶観測水温・塩分・流速などのデータから推定されており, 画像は無料でインターネット上に公開されている²⁰⁾. データの時間間隔は期間によって異なるが, 我々の観測期間中は 1 日間隔のデータ(ただし平日のみ, 土日・祝祭日除く)となっている。黒潮緯度は流路変動に伴って南北に大きく変動している。時系列からは, 大まかに, 2013 年の 5 月中旬までと, 7 月中旬から 8 月中旬までの期間に黒潮が 34°N 付近にあったこと, 5 月中旬から 7 月中旬, 8 月中旬以降には黒潮が 32°N 付近にあったことがわかる。このように黒潮緯度の分布が二極化するの伊豆海嶺上に南北 2 つの黒潮の通り道があるためである^{15,16)}.

Fig. 7 Time series of daily-mean depth-averaged current speed, U_D^{day} , and the Kuroshio latitude along the observation site longitude.

Fig. 8 Relation between Kuroshio latitude and daily-mean depth-averaged current speed, U_D^{day} .

U_D^{day} と黒潮緯度に関する散布図からは, 黒潮が 34°N 付近, 三宅島近海を流れている場合に流れが速く, 33°N より南, 三宅島から離れている場合に遅いという傾向を確認できる(Fig. 8). この結果に基づいて黒潮流軸が 33°N より北の場合

と 33°N 以南にある場合で流速を分けて考えることにする。黒潮緯度が 33°N より北であった期間は全体の 24%, 33°N 以南であった期間は 76% である。なお, 2013 年 5 月に U_D^{day} が減少するタイミングは黒潮緯度の南下より遅れている。黒潮緯度が南下しても, 実際には黒潮が三宅島近海を流れていたものと考えられる。2013 年 11 月末に見られる U_D^{day} のピークは流軸データに現われない現象であると推測される。

続いて, 1 時間毎の深さ方向平均流速 U_D を用いて黒潮緯度が 33°N より北にある場合と 33° 以南にある場合の観測流速の特徴をより詳しく調べる(Fig. 9). 黒潮緯度が 33°N より北にある場合の流速ヒストグラムは $0.8 \sim 0.9 \text{ m/s}$ を中心とした分散の大きな分布である。分散が大きな理由としては, 黒潮内部の流速が一定ではなく時間的にも空間的にも変動していること及び潮流の存在が挙げられる。一方で, 流向は北東方向を中心としてばらつきが小さい。黒潮が三宅島に接近しているときは, U_D の平均値は 0.84 m/s , 最大値は 2.05 m/s , 標準偏差は 0.39 m/s であった。 0.5 m/s と 1 m/s 以下の流速の割合はそれぞれ 22% と 66% である。黒潮緯度が 33°N 以南のとき, 流速ヒストグラムは低速側に偏った分布となる。流向は北東と南西方向が卓越しており, 三宅島の海岸線に沿った往復流であることを伺わせる。 U_D の平均値は 0.47 m/s , 最大値は 1.55 m/s , 標準偏差は 0.27 m/s であった。 0.5 m/s と 1 m/s 以下の流速の割合はそれぞれ 61% と 95% であった。黒潮との相対的な位置関係により観測海域の流れの特徴が異なることは明らかである。

Fig. 9 Statistical properties of the depth-averaged current (top) with the Kuroshio and (bottom) without the Kuroshio. (a) and (c) Speed U_D , and (b) and (d) flow direction.

以上のように, 黒潮が三宅島近海を流れるとき, 観測海域では北東の流れとなり, 流速 2 knot 以上となることも珍しくないことがわかった。一方で黒潮が南下しているとき,

流れの方向は北東か南西であり、2knot以上の流れとなることはまれである。観測した流れに黒潮が含まれていることは確実であろう。

3.4 潮流

黒潮と並んで観測流速の主要な変動要因に潮流が挙げられる。潮流は外部潮流(潮位振動)と内部潮流(密度場の振動)に分類できるが、内部潮流は海洋内部の密度構造や流れと海底地形の相互作用に依存しているため季節変動や黒潮流路変動の影響を受けやすい。そこで前節と同じく黒潮緯度が33°Nより北にある場合と33°N以南の場合、さらに33°N以南の場合は異なる3つの期間に分け、それぞれパワースペクトルをFFT法により算出した(Fig. 10)。黒潮が三宅島近海を通過している期間では、半日周潮が卓越(ピーク周期12.4時間)しているが、日周潮に相当する周波数帯ではピークが半日周潮に比べて明らかに小さい。黒潮南下時には半日周潮のみならず、日周潮にも顕著なピークの存在が確認できる。また、期間によって半日周潮と日周潮の大小関係が異なる。Fig. 10は v_D に関する結果であるが、 u_D についても同様の結果を得ている。このような違いは、密度構造や背景流の変化により内部潮流の強さが変動しているためであると推測される。

黒潮の有無や観測期間によって観測海域の潮流の様子が大きく異なることが明らかとなったが、特に日周潮に違いが大きくでていることは興味深い。なぜなら三宅島近海の慣性周期²¹⁾($=2\pi/f=2\pi/2\Omega\sin(\phi)$, f : コリオリパラメータ, Ω : 地球自転の角周波数, ϕ : 緯度)が21.4時間($\phi=34.1^\circ N$)であるため、日周潮と同調かつ三宅島に補足された内部波(ITWs, Island Trapped Waves)が理論的には存在し得るためである²²⁾。現在、数値モデルを用いた検討を行っている²³⁾。

続いて、天文潮位と観測流速の関係について見てみよう(Fig. 11)。スペクトルからも明かなように、日周潮以下の周期で潮流は観測海域の流れを決める主因なので、大きな相関係数が得られる。天文潮位は気象庁によって公開されている三宅島坪田検潮所(Fig. 1)の天文潮位(60分潮からの再現値)を使用した²⁴⁾。気象庁が公開している資料によると坪田検潮所における上位4分潮は、M2(36.46cm), K1(22.88), O1(18.00), S2(16.83)である。負のラグは流れが潮位より先行しており、正のラグは潮位が流れより先行していることを意味する。相関係数の大きさは、データの期間、流れの方向(東西・南北)によって異なるが、黒潮接近時の u_D に関する結果を除いて、天文潮位が4から6時間先行する際に最大値となる。黒潮南下時の u_D と潮位の相関係数最大値(ラグ)は、0.83(5時間), 0.68(5), 0.75(6)であった。同様に、 v_D と潮位の間の相関係数最大値は0.69(4), 0.68(4), 0.67(4)である。黒潮が三宅島近海を通過している期間の相関係数が比較的小さい(u_D : -0.54(-1), v_D : 0.38(6))の、日周潮が弱いためであると推測される(Fig. 10)。

天文潮位と観測流速の間に大きな相関が確認されたことは、観測海域の流速変動がある程度予測可能であることを意味している。天文潮位から流れが遅くなる時間帯を予測しておけば、発電機設置工事やメンテナンスなどの際に役立つだろう。

Fig. 10 Power spectrum of meridional current speed v_D in the period of (a) Mar/13/2013 - May/14/2013, (b) May/20/2013 - Jun/29/2013, (c) Sep/14/2013 - Oct/28/2013, and (d) Nov/24/2013 - Mar/08/2014.

Fig. 11 Correlation function between astronomical tide level at Tsubota and observed (left) zonal and (right) meridional current speed u_D and v_D .

3.5 風との関係

黒潮、潮流に続いてここでは風と観測流速の関係を見てみよう。日本周辺の風況を決める主な要因は西から伝搬してくる低気圧や高気圧、そして熱帯で発生する台風といった気象擾乱である。これらに伴う風の変動は1日以上を周期を含んでおり、それに対する応答として1日以上を周期の流れが生じる²⁵⁾。そこで、 U_D^{day} と日平均風速の関係を調べたが、

ラグ±7 日の範囲で相関係数の大きさは 0.3 以下であった。季節や風向を限定したり、解析する流れの水深を浅くするなどすれば、違った結果が得られるかもしれない。しかしながら、平均的には 1 日以上時間スケールでの U_D^{day} と風の間に目立った関係はなさそうである。

次に観測流速に現れる突発的な振動現象と風の間を見てみた。 v_D に対して離散 Meyer wavelet を用いたハイパスフィルター²⁶⁾を適用し、周期約 3-4 時間の変動を抽出した結果が Fig. 12 である。最も強い振動が 4 月 6 日から 7 日にかけて生じたこと、それに次いで強い振動が 3 月 20 日に生じたことがわかる (Fig. 12)。気象庁発行の天気図²⁷⁾によると、3 月 20 日に前線を伴った低気圧が発達しながら太平洋岸を通過し、台風並みの強風が吹いた。その後天候は落ち着いていたものの、4 月 6-7 日に再び前線を伴った低気圧が発達しながら太平洋岸を通過し、台風並みの強風が吹いた。これら大気擾乱によって励起された内部波を観測しているものと推測される²⁸⁾。また、この振動を観測した期間は黒潮が観測海域を通過していたので、黒潮の存在が重要な現象である可能性もある。

Fig. 12 High-pass-filtered signal in depth-averaged meridional velocity. The original data was high-pass filtered using discrete Mayer wavelet transformation.

3.6 海流パワーの推定

本節では観測流速から推定した海流パワー密度を紹介する。ここで、海流パワー密度 $P(\text{W/m}^2)$ は次の式により計算した。

$$P(t) = 1/2 \rho U_D(t)^3 \quad (5)$$

ここで ρ は海水の密度 ($=1000\text{kg/m}^3$) である。 U_D は (3) 式で定義した鉛直平均流の流速である。 P は黒潮の有無で大きく異なり、潮流による変動も顕著である (Fig. 13)。観測期間全体の平均値は 0.20 kW/m^2 、最大値は 4.32kW/m^2 であった。 P の最大値は U_D 最大値 ($=2.05\text{m/s}$) に対応している。平均値が小さい主な原因は、黒潮が三宅島近海を流れていた期間が全体の 24% と短いことにある。今回の観測は三宅島近海での発電事業を想定したものではないが、仮に今回の観測結果から得られた平均海流パワー密度 0.20kW/m^2 の 30% をローター半径 5m の双発式発電装置一機で回収できたとすると、電

力量は約 34MWh となる。この値は一世帯の電力消費量を 300kWh とすると約 110 世帯分の電力量に相当し、ある程度の発電量が確保できることがわかる。高木と大澤²⁹⁾が述べているような海洋再生可能エネルギーの社会実験の場として、三宅島は悪くない場所であると思われる。

Fig. 13 Time series of current power estimated from observed velocity U_D . Black and gray lines indicate the current power during the periods when the Kuroshio intrudes into the observation site and when the Kuroshio flows far south from the Miyake Island, respectively.

前節と同じく黒潮緯度が 33° N より北の場合と 33° 以南の場合のパワー密度を計算すると、黒潮緯度が 33° N 以南の場合の海流パワー平均値 $\overline{P_{lat. \leq 33^\circ \text{ N}}}$ は 0.11kW/m^2 、黒潮緯度が 33° N より北にある場合 ($\overline{P_{lat. > 33^\circ \text{ N}}}$) で 0.485kW/m^2 となった。 $\overline{P_{lat. > 33^\circ \text{ N}}}$ を流速に換算すると約 1m/s となる。今回観測した黒潮の最大流速は約 2m/s であるが、黒潮接近時の流速には大きなばらつきがあり、結果として $\overline{P_{lat. > 33^\circ \text{ N}}}$ は 1m/s 相当の値となった (Fig. 9)。なお、鉛直平均流速からパワー密度を推定する (5) 式の代わりに、各水深の流速の変化を考慮した (6) 式でパワー密度を計算しても、 $\overline{P_{lat. \leq 33^\circ \text{ N}}}$ や $\overline{P_{lat. > 33^\circ \text{ N}}}$ は 0.01kW/m^2 程度大きくはならないといえる。

$$P(t) = 1/2 \rho \sum_{n=1}^N U(t, n)^3 / N \quad (6)$$

黒潮流路の変動や黒潮の流量つまり流速の変動により、海流パワーには経年変動が存在する。発電事業のためには経年変動を把握しておくことが重要であるが、長期観測を新たに行うことは現実的ではなく、既存長期データもしくは数値モデルの結果を利用する必要がある。ここでは次式により西暦 n 年における海流パワー密度平均値 $p^{year}(n)$ を推定した。

$$p^{year}(n) = \overline{P_{lat. > 33^\circ \text{ N}}} \cdot \alpha(n) + \overline{P_{lat. \leq 33^\circ \text{ N}}} \cdot (1 - \alpha(n)) \quad (7)$$

ここで $\alpha(n)$ は、西暦 n 年 1 年間の内、黒潮が三宅島に接近している期間 (黒潮緯度が 33° N より北の期間) の占める割合である。黒潮緯度の定義は 3.3 節で述べたものと同じであり、2013 年 3 月から 2014 年 4 月の黒潮緯度の時系列は Fig. 8b に見ることができる。黒潮流路の変動により、 α は年によって大きく異なる。風力発電における資源量評価では、知りたい場所の風速の長期変動を異なる場所の長期観測データから推定する MCP (Measure-Correlate-Predict) 法が用いられるが、(7) 式はそれに似た考え方である³⁰⁾。すなわち、観測期間

のデータを使って流れ(パワー)と黒潮緯度の関係を見出し、その関係と過去の既知黒潮緯度から過去の流れ(パワー)を推定している。ここでは 1965 年から 2013 年の p^{year} を推定した(Fig. 14)。 p^{year} の最小値は 1984 年の 0.174kW/m^2 、最大値は 2004 年の 0.478kW/m^2 であった。つまり、黒潮流路変動により観測海域の p^{year} は最大で約 2.7 倍変化する。仮に観測海域で発電事業を行うとすると、数年単位のエネルギー供給量変動への対応策を考えておく必要がある。推定手法の課題としては、あくまでも今回の大蛇行を含まない観測結果に基づく推定なので、黒潮大蛇行時の海流パワー密度の不確かさが大きいことが挙げられる。

Fig. 14 Time series of annual-mean current power estimated from equation (7).

最後に海洋再解析を用いた資源量評価の難しさについて述べる。JCOPE2 (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment 2, 水平方向格子間隔 $1/12^\circ$) の 15 年再解析³¹⁾を用いて 1997 年から 2007 年までの平均海流パワー密度を水深 50m 流速から計算したところ、観測海域に最も近い格子点(34.125°N , 139.458°E)で 0.119kW/m^2 であった。(7)式から得られた p^{year} の 1993 年から 2007 年の平均値は 0.362kW/m^2 であるので、再解析から計算した観測海域の海流パワー密度の約 3 倍大きい。一方で 1 つ北の格子点(34.208°N , 139.458°E)における平均海流パワー密度は 0.316kW/m^2 であり、(7)式を用いた推定値にかなり近づくが、位置に $1/12^\circ$ = 約 9km のずれがある。このようなことが起きる原因は、直径 10km 程の三宅島近傍の流れを扱うには解像度が不足しており、モデルの不確かさ(誤差)が大きいためである。また、観測海域で大きなエネルギーを持つ潮流がモデル内で表現されていないことも海流パワーを過小評価する方向に作用する。海洋再解析と本論文で紹介した観測データの比較については、また別の機会に詳しく報告したいと考えている。

4. まとめ

伊豆諸島・三宅島の北西で 2013 年 3 月から約 1 年間、途中 2 度の中断を挟みながら、一点弛緩係留された観測ブイに搭載した ADCP を用いて流速観測を実施した。大まかには、80m より浅く、1 時間弱より長い時間スケールの流れをよく観測できていると思われる。本論文では黒潮流軸データを用いて黒潮流路変動と観測流速の関係を整理し、黒潮通過時と非通過時の流れの特徴をまとめた。約 1 日周期の流れ

の強さが黒潮の有無で大きく異なっていたことや、黒潮が流れている状態で強い低気圧が通過した際に内部波と思われる数時間周期の振動が観測されたことも示した。一方、黒潮が三宅島近海を通過することが少なかったため、観測期間の平均流速及び海流パワーは期待したほどは大きくなかった。そして、今回の観測結果と黒潮流軸データを組み合わせることで局所的な地形の影響も考慮した準力学的統計手法により、海流資源量変動推定を行った。その結果、既存海洋再解析を使った資源量評価では伊豆諸島周辺海域の資源量を過小評価している可能性が示された。海流発電の実用化に向けて、流況観測及び資源量評価の観点からは、観測を充実させ、数値モデルを高精度化することが重要であると考えられる。

謝 辞

三宅島漁協関係者、五洋建設(株)三宅島事務所関係者、(株)ニチモウ・伊藤翔博士には大変お世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。本研究は東京大学が新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から受託したプロジェクト「風力等自然エネルギー技術研究開発/海洋エネルギー技術研究開発/次世代海洋エネルギー発電技術研究開発(水中浮遊式海流発電)」の成果です。

参 考 文 献

- 1) 武田勝利, 坂田和輝, 高木健, 双発式海流発電装置の運動シミュレーションに関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 18 号, pp. 55-61, 2013.
- 2) 高木健, 松田和也, 須山友樹, 二重反転タービン式海流発電装置の技術的成立性に関する研究 - 運動特性の視点からの検討 -, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 17 号, pp. 107-114, 2013.
- 3) S. Stommel and K. Yoshida: Kuroshio - physical aspects of the Japan current - (1972). University of Washington Press.
- 4) Kodaira T., Waseda T., Nakagawa T., Isoguchi O. and Miyazawa Y.: Measuring the Kuroshio Current Around Miyake Island, a Potential Site for Ocean-Current Power Generation. International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 23, No. 4, pp. 272-278, 2013.
- 5) Masumoto Y., Miyazawa Y., Tsumune D., Tsubono T., Kobayashi T., Kawamura H., Estournel C., Marsaleix P., Lanerolle L., Mehra A. and Garraffo Z. D.: Oceanic Dispersion Simulations of ^{137}Cs Released from the Fukushima Daiichi nuclear Power Plant. Elements, Vol. 8, pp. 207-212, DOI: 10.2113/gselements.8.3.207, 2012
- 6) Feng M., Mitsudera H. and Yoshikawa Y.: Structure and Variability of the Kuroshio Current in Tokara Strait, Journal

- of Physical Oceanography, Vol. 30, pp 2257-2276, 2000
- 7) Kimura S. and Sugimoto T.: Short-Period Fluctuations in Meander of the Kuroshio's Path off Cape Shiono Misaki, Journal of Geophysical Research, Vol. 98, No. C2, pp. 2407-2418, 1993
 - 8) <http://kagoshima.suigi.jp/fery/feryinfobody.aspx> (last accessed September 2014)
 - 9) Ebuchi N. and Hanawa K.: Mesoscale Eddies Observed by TOLEX-ADCP and TOPEX/POSEIDON Altimeter in the Kuroshio Recirculation Region South of Japan, Journal of Oceanography, Vol. 56, pp. 43-57, 2000.
 - 10) Qiu B., Toda T. and Imasato N.: On Kuroshio Front Fluctuations in the East China Sea Using Satellite and in Situ Observational Data, Journal of Geophysical Research, Vol. 95, No. C10, pp. 18,191-18,204, 1990.
 - 11) Ebuchi N. and Hanawa K.: Influence of Mesoscale Eddies of Variations of the Kuroshio Path South of Japan, Journal of Oceanography Vol. 59, pp. 25-36, 2003
 - 12) 小牧裕幸, 山城徹, 城本一義, 中村啓彦, 仁科文子, 広瀬直毅, 海流発電適地選定のためのトカラ海峡における黒潮調査, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 69, No.2, pp. I_109-I_113, 2013.
 - 13) 海上保安庁水路部: 5 万分の 1 沿岸の海の基本図, 海底地形地質調査報告, 三宅島, 56 pages, 1995.
 - 14) Qiu B. and Maio W.: Kuroshio Path Variations South of Japan: Bimodality as a Self-Sustained Internal Oscillation. Journal of Physical Oceanography, Vol. 30, pp. 2124-2137, 2000.
 - 15) Kawabe M.: Sea Level Variations at the Izu Islands and Typical Stable Paths of the Kuroshio, Journal of Oceanographic Society of Japan, Vol. 41, pp. 307-326, 1985.
 - 16) Kawabe M.: Variations of Current Path, Velocity, and Volume Transport of the Kuroshio in Relation with the Large Meander, Journal of Physical Oceanography, Vol. 25, pp. 3103-3117, 1995.
 - 17) Ohwaki A., Matsuyama M., and Iwata S.: Evidence for Predominance of Internal Tidal Currents in Sagami and Suruga Bays. Journal of Oceanographic Society of Japan, Vol. 47, pp. 194-206, 1991.
 - 18) Ohwaki A, Matsuyama M, Nagashima H.: Difference in the Prevailing Periods of Internal Tides between Sagami and Suruga Bays: Numerical Experiments. Journal of Oceanography. Vol. 50: pp. 449-463, 1994.
 - 19) <http://www.mirc.jha.jp/> (last accessed April 2014)
 - 20) <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/> (last accessed September 2014)
 - 21) Gill A.E., Atmosphere-Ocean Dynamics, Academic Press, 1982, ISBN 978-0-12-283520-9
 - 22) Longuet-Higgins M.S.: On the trapping of long-period waves round islands, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 37(4), pp. 773-784, 1969.
 - 23) 内田貴也, 早稻田卓爾, 清松啓司, 宮澤泰正, 伊豆諸島近海において島に補足された流れに関する考察, 日本海洋学会 2014 年度春季大会, 講演番号 123, 2014
 - 24) <http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/station2013.php> (last accessed Jun. 2014)
 - 25) Miyazawa Y., Masumoto Y., Varlamov S. M. and Miyama T.: Transport simulation of the radionuclide from the shelf to open ocean around Fukushima. Continental Shelf Research, Vol. 50-51, pp. 16-29, 2012.
 - 26) Misiti M., Misiti Y., Oppenheim G. and Poggi J.M., Wavelet Toolbox™ User's Guide, Version 4.13, The MathWorks, Inc.
 - 27) <http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (last accessed April 2014)
 - 28) Garrett C. and Munk W.: Internal Waves in the Ocean. Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 11, pp. 339-369, 1979.
 - 29) 高木健, 大澤弘敬, 我が国の排他的経済水域における海洋再生可能エネルギーの展開に関する予備的考察, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 12 号, pp. 143-148, 2010
 - 30) Rogers A.L., Rogers J.W., Manwell J.F.: Comparison of the performance of four measure-correlate-predict algorithms. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.93, pp. 243-264, 2005.
 - 31) Miyazawa Y., Zhang R., Guo X., Tamura H., Ambe D., Lee JS., Okuno A., Yoshinari H., Setou T., Komatsu K.: Water Mass Variability in the Western North Pacific Detected in a 15-Year Eddy Resolving Ocean Reanalysis. Journal of Oceanography, Vol. 65, pp. 737-756, 2009.