

仙台湾における ADCP 観測から推定した残差流

笥 茂穂[†]

Residual current estimated from ADCP observation in Sendai Bay

Shigeho KAKEHI[†]

Repeated observations with ship-mounted ADCP were acquired in Sendai Bay. As the duration of the observations was 9 h, which is shorter than semi-diurnal tidal period, residual current was estimated from the regressed current by the least squares method using the time derivative of predicted tide. The correlation coefficient between observed and regressed current was 0.996 at most. This indicates the de-tiding method of this study is valid. Southward current was dominant in the estimated residual current and the maximum residual current exceeded $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Geostrophic current calculated from observed temperature and salinity corresponded to the residual current. The residual current was likely to be driven by density distribution.

Key words: ADCP, de-tiding method, residual current, Sendai Bay

はじめに

海域における物質や生物の輸送過程を解明するには、流動構造を明らかにすることが不可欠であり、中でも残差流の分布を把握することが重要となる。ここで残差流とは、観測された流速から潮流成分を除去したものであり、潮流成分の除去方法にはさまざまなものが考案されている（花輪・三寺, 1985; Candela et al., 1992; Isobe et al., 2007）。残差流には、潮汐の非線形性と地形効果で発生する潮汐残差流、密度の空間的な違いが駆動力である密度流、風応力による吹送流などがあり、その成因を明らかにすることは残差流の時空間変動を解明する上で重要である。残差流を見積もるための測流には、流速計を設置する方法（柳・高橋, 1988; 杉山ほか, 1994; 濱田・経塚, 2006）、船舶に取り付けた超音波多層流速計（ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler）を用いる方法（藤原ほか, 1997; 杉山ほか, 1998; 高木ほか, 2009）、短波（HF: High Frequency）レーダーを用いる方法（Takahashi et al., 2000; 清水ほか, 2001）などがある。流速計を設置して計測する方法は、残差流を算出する過程でより多くの分潮を除去することができるため精度が高いことに加え、残差流の時間変動を議論することが

可能であるが、残差流の空間分布を得るには多くの地点に流速計を設置する必要がある。また漁業や船舶の往来が盛んな海域では、設置が困難なことも多い。船舶搭載型 ADCP では半日から1日程度の観測でデータを得ることができるが、残差流の時空間変動を議論するためには複数の往復観測を実施する必要がある（杉山ほか, 1995）。HFレーダーは海面における数10 km四方の流速分布を測定できるが、鉛直方向の流速分布については観測できない。一つの測定手法から残差流の時空間変動を解明するに足るデータを収集するのは容易ではない。

測流データでは得られない残差流の詳細な3次元構造を明らかにするために、診断モデルを用いた残差流シミュレーションが行われている（Guo and Yanagi, 1996; 柳ほか, 1998; 阿保ほか, 2006）。診断モデルを構築することができれば、密度の空間分布を観測することにより、残差流構造を明らかにすることができる。密度分布は水温・塩分分布から見積もることができることから、連続測流に比べると比較的容易に観測でき、都道府県の定線データなど利用できるデータも多く、密度分布の季節変動をもとに残差流の季節変動を明らかにすることも可能である（笥ほか, 2002）。このように診断モデルは残差流構造を把握する上で強力なツールであるが、開発の際には、シミュレーション結果を実測データから得られた残差流で検証し、モデルの再現性を確認することが不可欠である（藤原ほか, 2000）。

本研究で対象とする仙台湾は、名取川や阿武隈川などの

2011年6月9日受付, 2011年9月22日受理

¹ 水産総合研究センター東北水産研究所資源海洋部海洋動態グループ

Tohoku National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, Shiogama, Miyagi 985-0001, Japan

[†] kakehi@affrc.go.jp

大川が流入する湾であり、その大部分が50m以浅の大
陸棚となっており、その規模は東北太平洋岸最大である。
この海域はイシガレイなどの異体類やアカガイなどの二枚
貝類の主要な生息域となっている(菅野, 1966; Omori et
al., 1976)。外洋に開口した仙台湾において、移動力の乏し
いこれらの生物が再生産を繰り返して個体群を維持するた
めには、湾内にとどまる機構が存在するものと考えられる。
例えばイシガレイの稚魚は上げ潮時に海底から離れて浮遊
し、接岸流により加入することが報告されている(Ya-
mashita et al., 1996)。その一方で、アカガイのように卵・
幼生期に浮遊生活する生物の着底過程は、流動構造に大き
く支配されるものと考えられるが、詳細については不明な
点が多い。

仙台湾での流動について工藤(1971)は、潮流が弱く、
沿岸水と沖合水の分布状況により4つの流動パターンが形
成されることを報告した。このことから、仙台湾での流れ
は主に密度分布により駆動されると考えられるが、残差流
の分布ならびに成因についての詳細には不明な点が多い。
このことは診断モデルをはじめとする流動モデルを開発す
る上で、計算結果の検証ができないことから支障となっ
ている。そこで本研究では、仙台湾において、船舶に取り
付けたADCPを用いて約半日間の往復観測を行い、残差流を
算出するとともに、その成因を明らかにした。

観 測

仙台湾における残差流の断面分布を得るために、ADCPを
取り付けた船を用いた半日間の連続観測を計画した。観測
線を38°12.69'Nの141°0.81'–141°10.81'E(WGS)に設定し、
2'Eごとに測点を設けた。観測点は西からS01, S02, …,
S06とした(Fig. 1)。当初観測は2010年8月14日を予定し
ていたが、台風4号の通過に伴ううねりを避けるため、日
程を1日遅らせ、8月15日に実施した。8月14日を観測日
として予定していたのは、日潮不等がほとんどないため
である。15日も14日ほどではないものの、8月16–20日に比
べると日潮不等は小さかった(Fig. 2)。観測には、舷側に
ADCP(Teledyne RD-Instruments製 600 kHz Workhorse Sen-
tinel)を取り付けた貝ケタ漁船(5トンクラス)を用いた。
このADCPの取り付け部は可動式であるため、測点間は
ADCPを水面上に揚収して全速力で航行した。測点では停
船し、2m深を第1層として深度1mごとに海底直上2mま
で対地モードで測定を行った。測定では、全層のパーセン
トグッドが80以上になる30秒平均値を少なくとも4アン
サンブル取得した。解析にはこの4アンサンブルを平均し
て用いた。両端の測点(S01とS06)では観測回数を増や
すため、15分程度停船して測定した。両端の測点では、
測点到着直後および測点離脱直前に取得されたパーセン
トグッド80以上を満たす4アンサンブルを平均して解析に用
いた。また、1回目の復路(7–8時頃)と4回目の往路

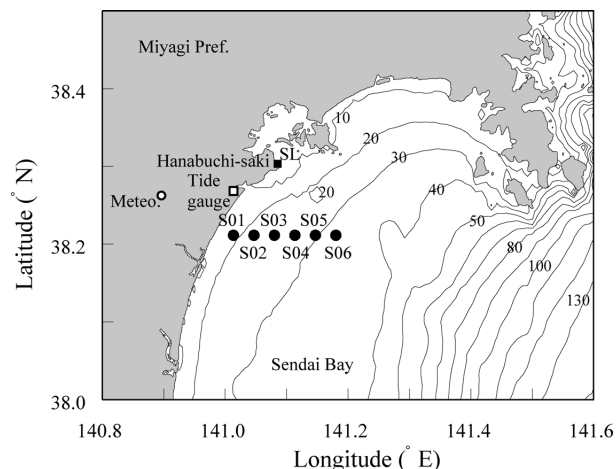


Figure 1. Locations of observation stations and bathymetry in Sendai Bay. Solid circles indicate ADCP stations. Solid square (SL) indicates the sea level observation station. Open square indicates the tide gauge station in the Port of Sendai. Open circle indicates the location of Sendai district meteorological observatory.

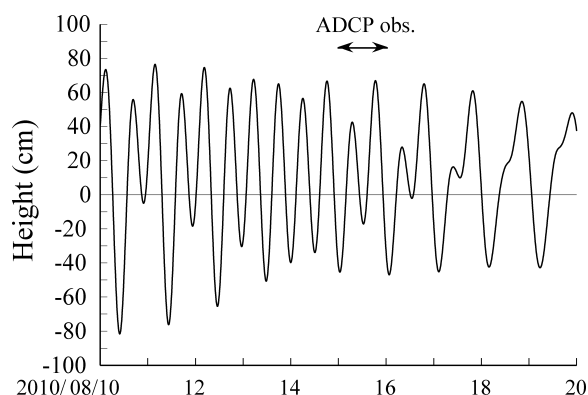


Figure 2. Predicted sea level changes in the Port of Sendai around the ADCP observation which was conducted on 15 August 2010.

(12–13時頃)では、各測点において多項目水質計(JFEア
ドバンテック製 AAQ1183)による水温、塩分、溶存酸
素濃度(DO)、クロロフィルa濃度(Chl.a)、pHの観測も
行った。観測は日出から日没までの約13時間で行う予
定であったが、14時に船のエンジントラブルが発生し4往
復目の復路で観測を終了することとなり、9時間で7–8回
のデータを得るにとどまった。

暖水波及などの影響で数時間から数日程度の流速変化が
起こることもあるため、これをモニタリングするために
水位の連続観測を行った。観測期間は2010年6月14日か
ら8月24日までである。水位は花淵崎(38°18.21'N,
141°5.13'E)の岸壁に波高計(JFEアドバンテック製
AWH-CMP)を固定して測定した(Fig. 1)。測定は、10分

間隔のバーストモードで、1秒間隔データを30個ずつ取得した。各時刻の測定値は、各バーストで得られた30個のデータのうち上位10個と下位10個を除いた10個のデータの平均値を採用した。仙台管区气象台 (Fig. 1) による10分ごとの海面更正気圧と1気圧 (1013.25 hPa) の差を気圧偏差とし、各時刻での水位の平均値に対して気圧偏差1 hPaにつき-1 cmの気圧補正を行った (筧, 2011)。

残差流の推定方法

船舶にとりつけたADCPによる測流データから潮流成分を除去して残差流を求めるには、最小二乗法調和分解を用いるのが一般的である (Candela et al., 1992)。しかし、本観測では観測時間が半日に満たないため調和分解により半日周潮成分を推定することができない。そこで本研究では、次式のように予報潮位の時間変化量を説明変数として、各測点 (i)・各深度 (j) の時刻 t における観測流速の東方成分 (u)、北方成分 (v) を推定する手法を用いた。

$$u(t, i, j) = m_u(i, j) + a_u(i, j) \cdot h'(t + \phi_u(i, j)) + \varepsilon_u(t, i, j) \quad (1)$$

$$v(t, i, j) = m_v(i, j) + a_v(i, j) \cdot h'(t + \phi_v(i, j)) + \varepsilon_v(t, i, j) \quad (2)$$

ここで、 m は平均流速成分、 a は h' と潮流の振幅比、 h' は予報潮位 h の時間変化量 ($=\partial h/\partial t$)、 ϕ は位相差、 ε は誤差であり、本研究では m を残差流とした。観測された流速は、磁北から真北に西偏7.53°で補正したのち、各測点・各層における7-8個の流速について ϕ を与え、最小二乗法により m と a を推定した。 ϕ は-360-360分の範囲内で1分ごとに变化させて推定式を計算し、各測点・各層における観測値と推定値の時系列に対して相関係数を算出して、相関係数が最も大きくなる ϕ を採用した。予報潮位 h は仙台港 (Fig. 1) の1年間の潮位データに40分潮の最小二乗法調和分解を適用して算出した (筧, 2011)。

このような12時間に満たないADCPデータに対して、潮位変化をもとに潮流成分を回帰する方法でも精度よく潮流が除去されることが示されている (筧ほか, 2004)。なお、振幅比と位相差は潮候改正数と呼ばれ、本来は各分潮ごとに求められる定数である (武岡・菊池, 1991)。しかし、これを実現するほど高い精度の流速データを処理するわけではないため、本研究では潮位と潮流の関係に適応した。

結果

ADCP観測日の気圧、風、予報潮位および気圧補正した観測水位の変化 (Fig. 3) を見ると、海面更正気圧は、観測開始時には1008.3 hPaであり、1010.0 hPaに増加した後、観測終了時には1008.4 hPaとなっていた。ADCP観測時の風は最大でも $2.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ であり、おおむね $1-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の南寄りの風が卓越した。観測水位の変化は予報潮位変化と良く一致した。暖水波及のような水塊の離接岸はなく、気圧の

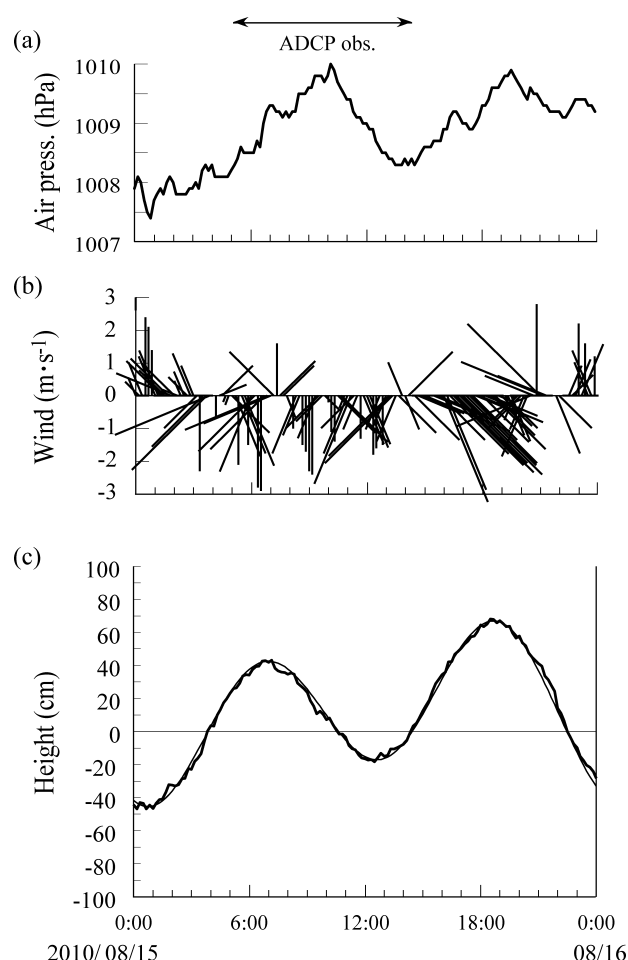


Figure 3. Time series of the atmospheric pressure at the sea surface (a), wind (b) and sea level (c) on ADCP observation date. The atmospheric pressure and wind were observed by Sendai district meteorological observatory. Thick line indicates observed sea level in WH. Thin line indicates predicted sea level in the Port of Sendai.

変動による水位の変化量も2 cm程度であることから、水位の変動は潮汐によって引き起こされていたと考えられる。

S05 (水深32 m) における深度別流速の北方成分 (Fig. 4) を詳しく見ると、観測中は南流が卓越し、特に11-13時頃の上層で強く、5 m深では $30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ を超える流速が観測された。南流は、6時頃には下層で強かったが時間とともに上層で強くなっていった。また、流速がほぼ $0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ となる深度は、6時頃の8 mから14時頃の23 mへと徐々に深くなっていった。

S05の8 m深での流速の観測値と推定値 (Fig. 5) を見ると、東方成分の観測値と推定値の相関係数は0.996であり、非常に高い精度で推定できている。北方成分についても、東方成分に比べると観測値と推定値に誤差はあるものの、相関係数は0.949と高い値であった。他の測点・層におい

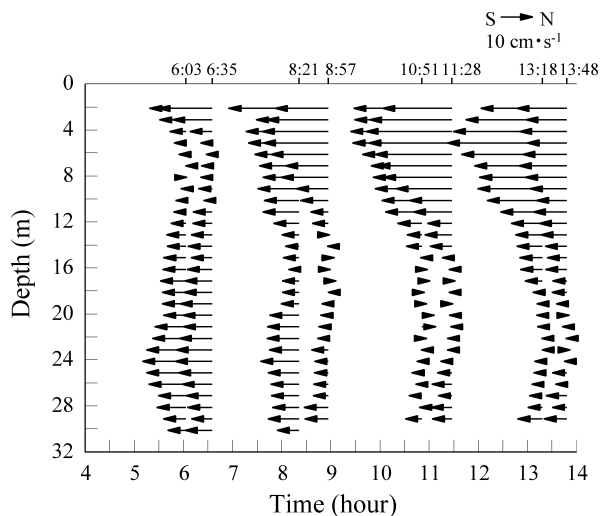


Figure 4. Vertical and temporal changes in the north component of observed current at Stn S05.

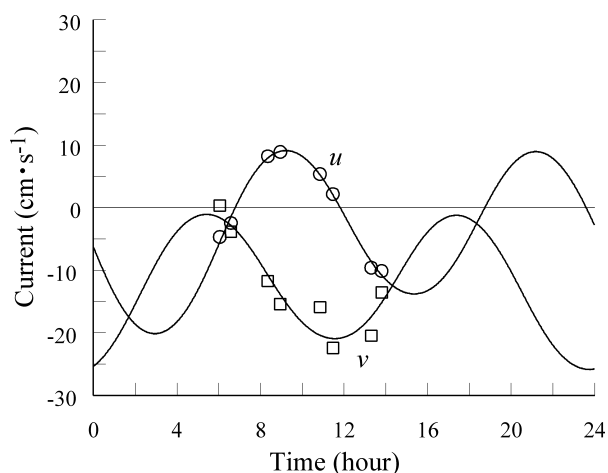


Figure 5. Time series of the current at 8 m depth of Stn S05. Open circles and squares indicate the observed east (u) and north (v) component of current, respectively. The solid lines indicate the estimated current regressed by the least squares method using Eqs. (1) and (2).

でも、観測値と推定値の相関係数はおおむね0.9以上であり、予報潮位の時間変化量を用いて高い精度で流速変動を推定することができた。全測点・全層における観測値と推定値の二乗平均誤差は、東方成分、北方成分それぞれ2.08、 $1.90 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ であった。

見積もられた残差流は、岸寄りの測点では弱く、沖に向かうにつれて強くなり、S06では $20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ を超えていた (Fig. 6)。S05とS06の水深10 m以浅は南流であるが、それ以深では南西流となっており、残差流の鉛直シアが大きかった。S04でも10 m以浅は南流であったが、それ以深では西流が卓越した。S04の15 m付近の残差流北方成分は正

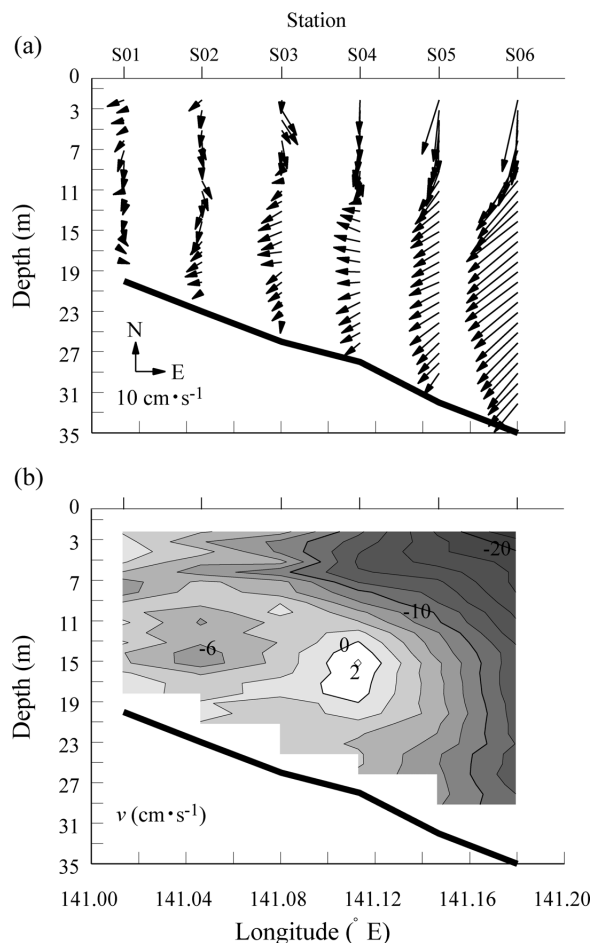


Figure 6. Cross sectional distributions of residual current velocities (a) and the north component of residual current (b). The shaded area in (b) indicates southward current.

であり、ごく弱い北向きの成分となっていた。S01からS03の残差流は $4\text{--}8 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ であり、沖の測点に比べ弱く、鉛直シアも小さかった。

考察

観測値と推定値の相関係数が最も高かったS05の8 m深の東方成分の位相差は -330 分であり、5.5時間前の潮位の時間変化量との相関が高かった。これは潮位変化に対して30分程度の遅れで変動していることを示すものであり、おおむね上げ潮時には西流、下げ潮時には東流となる。

一方、S05の東方成分の12 m深以深の位相差は100–200分であり、上層と下層で7.2–8.8時間の差があった。位相差が上下層で大きく異なる傾向は他の測点でも見られた。鉛直一様ではない往復流の成因としては内部潮汐の影響などが挙げられるが、本観測の結果からは明確にすることはできない。

湾内の潮汐周期の往復流が表面潮汐で駆動されているの

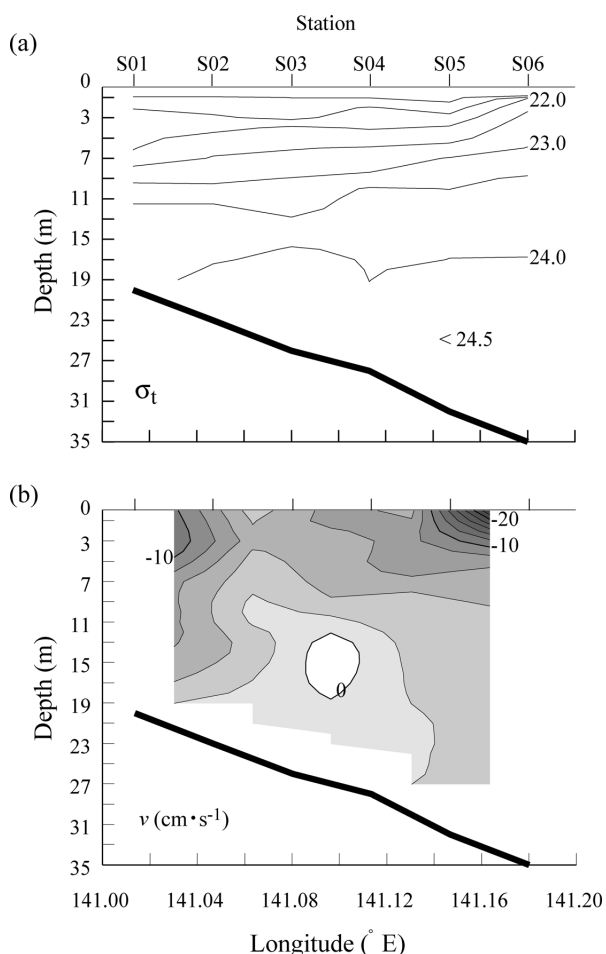


Figure 7. Cross sectional distributions of density (a) and geostrophic current (b) calculated from observed temperature and salinity. The shaded area in (b) indicates southward current.

であれば、予報潮位から潮流成分を推定することが可能であり、本研究で観測した測点においては、スナップショットの測流データから潮流を除去して残差流を推定することが可能となる。しかし、表面潮汐以外の機構によって往復流が駆動されている可能性があることから、スナップショットの測流データから往復流を除去することは困難である。したがって、仙台湾における残差流構造を把握するためには、係留あるいは往復観測による測流が不可欠である。

残差流の成因を明らかにするために、観測断面における地衡流との比較を行った。地衡流は、多項目水質計で得られた水温・塩分を用いて、海底を無流面として計算した。地衡流計算に用いた密度分布は、午前と午後に行った多項目水質計観測の平均値を使用した (Fig. 7a)。地衡流は、S03とS04の12–18mで北流、それ以外で南流となっていた (Fig. 7b)。南流は、沖の上層で特に強く、 $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ を

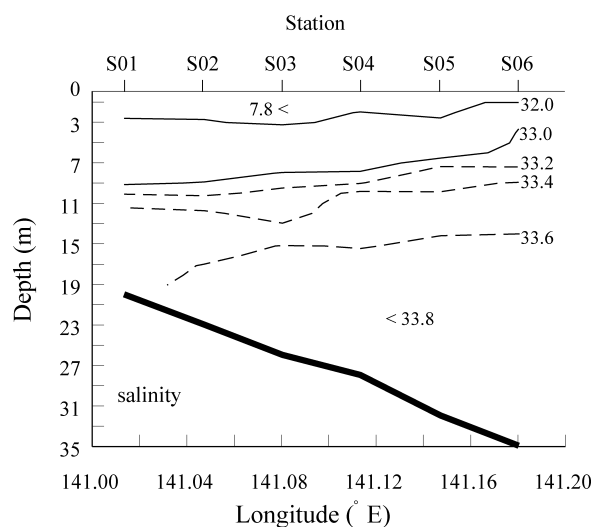


Figure 8. Cross sectional distribution of observed salinity.

超えた。このような地衡流の分布は残差流の南北成分の分布とよく一致した (Fig. 6b)。

ADCP観測時の仙台湾管区气象台 (Fig. 1) における風は $1\text{--}2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の南寄りの風が卓越していた (Fig. 3)。一方、表層の残差流は南流、つまり風上に向かって流れていることから、風によって駆動されているわけではない。これらのことから、観測時における残差流は圧力傾度力がコリオリ力とバランスした地衡流であると考えられる。

残差流が密度分布に対応しているという本研究の結果は、仙台湾の流動構造が水塊配置と密接に関係しているという工藤 (1971) の報告とよく一致している。この報告によると仙台湾の沿岸域で南下するのは塩分33.4以下の沿岸水である。地衡流計算に用いた平均塩分の分布では、塩分33.4以下の沿岸水は観測断面の9–12m以浅に分布していた (Fig. 8)。塩分33.4以下の分布域における残差流は南下流となっており、沿岸水が南下していたことを示している。工藤 (1971) の報告では、沖合水が東、南東、あるいは南から流入する際に沿岸水が南下するが、ADCP観測時の沖合の水塊配置や流動は不明であり、沖合水がどの方向から流入してきたかについてはわからない。

仙台湾の等深線は、本研究で観測した付近より南ではほぼ南北方向に分布する (Fig. 1)。本研究で明らかとなった沿岸域の南流は等深線に沿った流れとなり、この流れによって輸送される浮遊生物はほぼ同じ水深帯上を流れる。20–30m深の浅海域に着底するような生物にとっては、着底のタイミングが多少前後しても着底する水深は大きくは変わらないため、このような流れは資源の維持に寄与していると考えられる。

本研究により、仙台湾における残差流の断面分布を得ることができ、その分布は水平的にも鉛直的にも一様ではないことが明らかとなった。このことは、HFレーダーのよ

うな表面流速の測定だけでは残差流構造をとらえることができないことを示している。また、前述の通り、スナップショットの測流データからも残差流の分布を得ることは困難である。しかしながら、残差流は密度分布と密接に関連し、地衡流とほぼ一致したことから、仙台湾の診断モデルを構築することにより残差流分布をシミュレーションすることが可能となる。診断モデル開発の際には、本研究の結果はモデルの精度検証・パラメータ調節に用いることができる。実測残差流をよく再現する診断モデルが開発できれば、卵や幼生・仔稚魚調査のサンプリングの際に水温・塩分の分布を観測することにより、モデルで推定した流れでこれらの輸送実験を行い、輸送過程を明らかにすることが可能となる。

謝 辞

長時間にわたる調査を実施して頂いた智栄丸の佐藤政智船長に感謝致します。ADCPの機装・観測を行ってくださった、いであ株式会社の古殿太郎氏、齋藤昭二氏に深く感謝致します。また観測の遂行にご協力くださいました、いであ株式会社の奥田邦明博士、峯岸宣遠氏に感謝致します。また、JODCより仙台湾の毎時潮位のデータを提供して頂きました。最後に、本研究は、新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「環境変化に対応した砂泥域二枚貝類の増養殖生産システムの開発」の研究推進のために行いました。

引用文献

阿保勝之・杜田 哲・藤原建紀 (2006) 冬季の東部瀬戸内海における残差流と栄養塩環境. 海岸工学論文集, **53**, 1096-1100.
 Candela, J., R. C. Beardsley and R. Limeburner (1992) Separation of tidal and subtidal currents in ship-mounted acoustic Doppler current profiler observations. *J. Geophys. Res.*, **97**, 769-788.
 藤原正幸・藤原建紀・大橋行三・杉山陽一 (2000) 伊勢湾の秋季の残差流. 海の研究, **9**, 91-100.
 藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本 巨 (1997) 紀伊水道の流れと栄養塩輸送. 海と空, **73**, 31-40.
 Guo, X. and T. Yanagi (1996) Seasonal variation of residual current in Tokyo Bay, Japan—Diagnostic numerical experiments. *J. Oceanogr.*,

52, 597-616.
 濱田孝治・経塚雄策 (2006) 有明海湾奥における循環流とその変動について. 海の研究, **16**, 203-221.
 花輪公雄・三寺史夫 (1985) 海洋資料における日平均値の作成について—日平均潮位を扱う際の留意点—. 沿岸海洋研究ノート, **23**, 79-87.
 Isobe, A., T. Kuramitsu, H. Nozaki and P.-H. Chang (2007) Reliability of ADCP data detided with a numerical model on the East China Sea shelf. *J. Oceanogr.*, **63**, 135-141.
 笈 茂穂 (2011) 東日本大震災により宮城県七ヶ浜町を襲った津波の波高計データによる解析. 海の研究, **20**, 47-53.
 笈 茂穂・藤原建紀・杉山陽一 (2004) 伊勢湾底層への間欠的な外海水の進入とそれに伴う湧昇. 海の研究, **13**, 537-551.
 笈 茂穂・藤原建紀・山田浩且 (2002) 伊勢湾における密度・流動構造の季節変化. 海岸工学論文集, **49**, 386-390.
 菅野 尚 (1966) 仙台湾の底質とアカガイ漁場について. 東北区水産研究所研究報告, **26**, 55-76.
 工藤英郎 (1971) 仙台湾に流入する沖合水について. 昭和45年度, IBP. PM北方冷水海域における生物群集の生産に関する総合研究, 仙台湾研究班, 9-26.
 Omori, M., H. Kanno and I. Nishihata (1976) Study of the habitat of juvenile stone flounder, *Kareius bicoloratus* (Basilewsky), in the estuary of the Nanakita River. *Tohoku J. Agr. Res.*, **27**, 79-91.
 清水 学・柳 哲雄・野村宗弘・古川恵太 (2001) 東京湾の大潮—小潮期における残差流変動. 海の研究, **10**, 413-422.
 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真吾 (1995) ADCPによる伊勢湾の流動構造調査. 海岸工学論文集, **42**, 1096-1100.
 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・水鳥雅文 (1994) 伊勢湾北部海域の密度成層と残差流. 海岸工学論文集, **41**, 291-295.
 杉山陽一・中辻啓二・藤原建紀・高木不折 (1998) 伊勢湾湾央部の残差流系に関する一考察. 海岸工学論文集, **45**, 401-405.
 高木信夫・森永健司・中田英昭 (2009) 冬春季に天草灘・五島灘南部陸棚縁辺部で観測された北—北東向きの流れの構造と変動. 水産海洋研究, **73**, 172-180.
 Takahashi, S., I. Yuasa, M. Takarada, A. Nadai and Y. Hisaki (2000) Observation of tidal and residual circulations in Osaka Bay by HF radar. *La mer*, **37**, 145-152.
 武岡英隆・菊池隆展 (1991) ADCPによる測流データからの潮流の推定法. 沿岸海洋研究ノート, **29**, 76-81.
 Yamashita, Y., Y. Tsuruta and H. Yamada (1996) Transport and settlement mechanisms of larval stone flounder, *Kareius bicoloratus*, into nursery grounds. *Fish. Oceanogr.*, **5**, 194-204.
 柳 哲雄・黒田 誠・石丸 隆・才野敏郎 (1998) 伊勢湾の夏季の残差流. 沿岸海洋研究, **35**, 185-191.
 柳 哲雄・高橋 暁 (1988) 大阪湾の残差流の変動. 沿岸海洋研究ノート, **26**, 66-70.