

有明海湾奥部における残差流の分布について

ON THE RESIDUAL CURRENT DISTRIBUTION IN THE INNERMOST PART OF THE ARIAKE SEA

大串浩一郎¹・速水祐一²・濱田孝治³・山本浩一³・平川隆一⁴
Koichiro OHGUSHI, Yuichi HAYAMI, Takaharu HAMADA,
Koichi YAMAMOTO and Ryuichi HIRAKAWA

¹正会員 博士(工学) 佐賀大学助教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²博士(農学) 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³正会員 博士(工学) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト
(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴正会員 博士(工学) 佐賀大学助手 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Tidal currents in the bay are basic quantities and those of the Ariake Sea have been observed by many administrative agencies and researchers. However, a residual current distribution has been hardly obtained. This is one of the most effective parts for material transport and environment of the bay. In this study, the residual currents in the innermost part of the Ariake Sea were obtained from 13 hours velocity measurements with ADCPs. At the same time, temperature and salinity vertical profiles in wide area of this field were also measured. The observations were conducted in July 15, 2005, November 1, 2005 and March 10, 2006. A distinct density-stratification was found in July and March, whereas vertically well mixed condition was seen in November. In every seasons, residual current along the longitudinal section of the bay basically showed a two-layered structure; upper layer flowed offshore and lower layer did inward. These results indicate that estuarine circulation was dominated in every seasons.

Key Words : Ariake Sea, tidal current, residual current, ADCP, estuarine circulation, density structure, stratification

1. はじめに

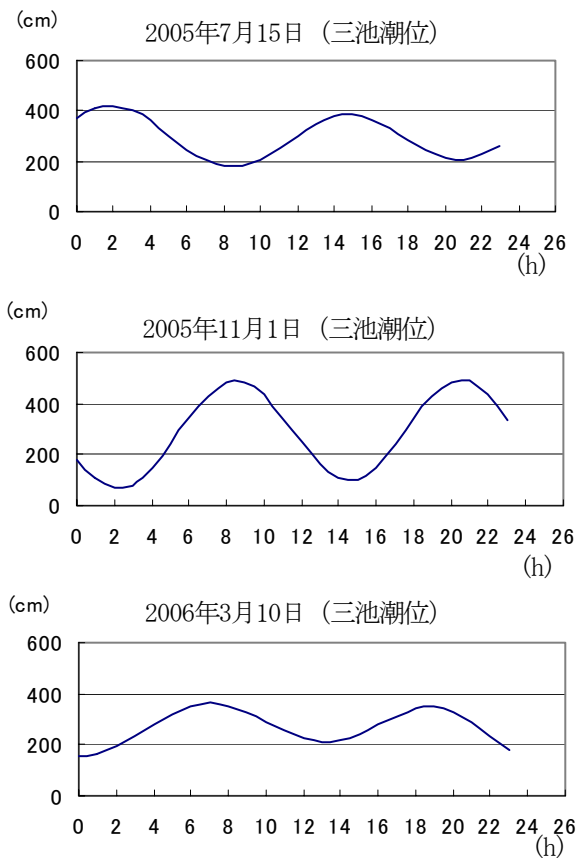
有明海は九州の4県に囲まれた半閉鎖性内湾である。海水のほとんどは早崎瀬戸を通じて外海と交換されている¹⁾。この内湾は、面積約1,700km²、平均水深約20mで、潮位差は我が国最大の約6mに達する。沿岸の開発に伴い、内湾の環境は悪化してきているが、中でも2000年度の植物プランクトン異常増殖によるノリ不作をきっかけとして、有明海の環境について多くの関心を持たれたことは記憶に新しい。また、二枚貝の漁獲量も1980年代から急激に減少しているという事実も無視できない。以上のような、いわゆる有明海異変の解明は、まだほとんどなされていない。この問題を解く第一のステップとして、湾内の物質輸送・物質循環を理解することが重要で、このステップを踏まずして次の段階のステップに進むことは困難である。この第一ステップを足がかりとして、この内湾の生態系を把握し、また、有明海の持続可能な利用

という条件を満たしながらの有明海再生が検討できると考えられる。

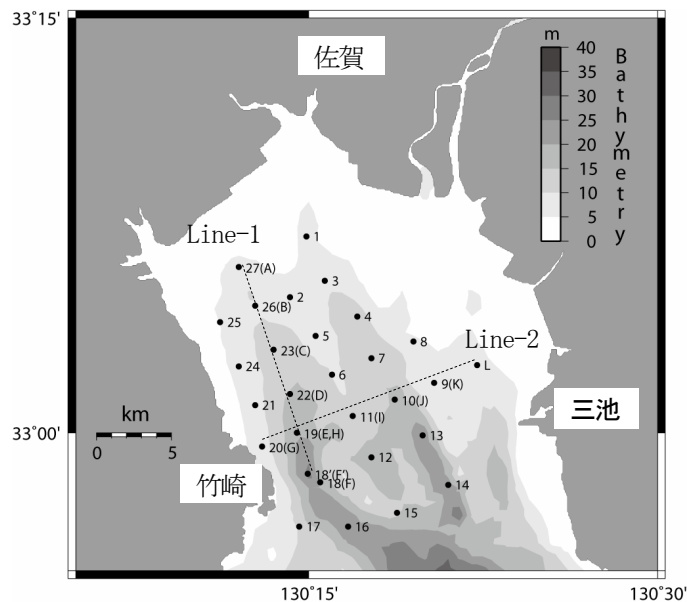
湾内の潮流は、基本的に重要な物理量である。有明海の潮流は、多くの調査機関や研究者たちによってこれまで観測されてきている^{2), 3), 4)}など。しかしながら、この内湾の残差流分布については、木谷による冬季の観測以外にはこれまでほとんど観測されていない⁵⁾。残差流は、この内湾の物質輸送に関して最も影響の大きいものの1つである。

以上のような理由から、本研究の目的として、有明海の残差流分布ならびに密度構造を、特に湾奥部に限定してADCPとCTDを用いて把握することにした。観測結果は、有明海湾奥部の流れ場と密度場の典型的なパターンとその相互作用に関する考察に用いられた。

2. 流れ場と密度場の観測



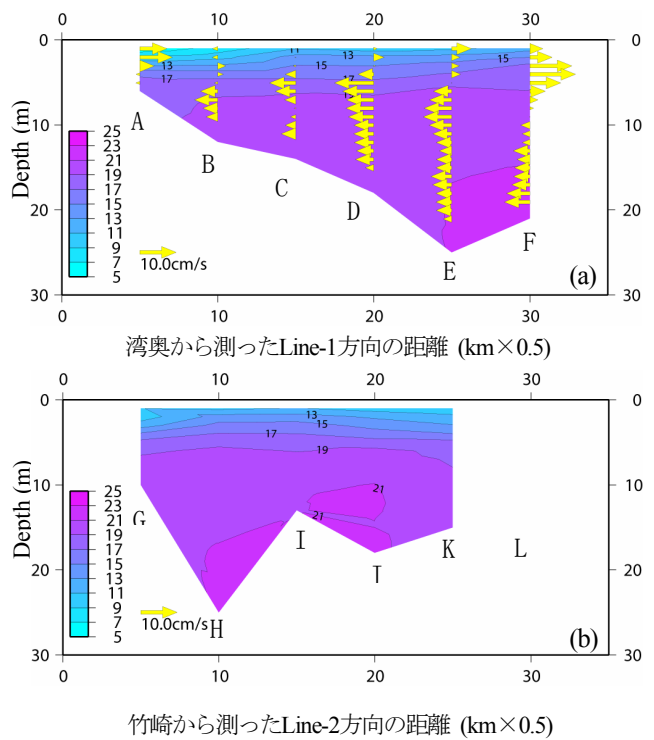
図－1 観測時の潮位変動 (三池)



図－2 有明海湾奥部におけるADCPとCTDによる観測地点

(1) 観測方法

観測は、2005年7月15日 (小潮) , 2005年11月1日 (大潮) 並びに2006年3月10日 (中潮) に実施した (図－1 参照) . また、図－2 に有明海湾奥部における観測地点と観測ラインを示す。図中のLine-1 (測点A, B, C, D,

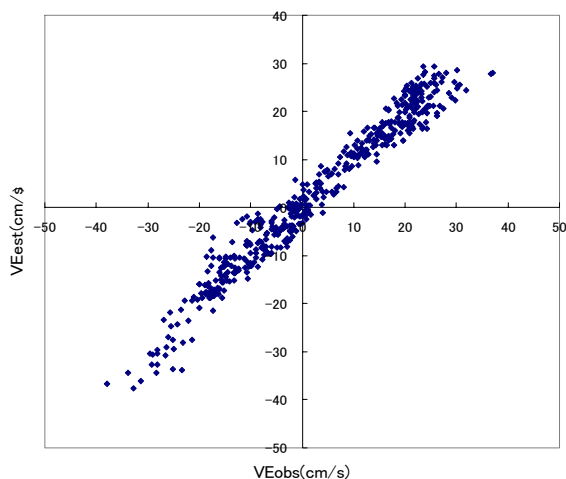


図－3 (a) Line-1方向の残差流と海水密度の鉛直分布 ; (b) Line-2方向の海水密度の鉛直分布 (2005年7月15日)

表－1 観測日前後の筑後川日流量の推移 (流量の単位はm³/s, 海域の観測日は2005/7/15, 2005/11/1, 2006/3/10の3回)

日付	流量	日付	流量	日付	流量
7/8	111.24	10/25	43.32	3/3	117.64
7/9	988.60	10/26	42.90	3/4	108.68
7/10	1688.55	10/27	42.63	3/5	101.94
7/11	1767.69	10/28	43.11	3/6	116.11
7/12	599.54	10/29	42.99	3/7	117.39
7/13	470.60	10/30	43.13	3/8	89.71
7/14	373.17	10/31	43.07	3/9	73.95
7/15	242.72	11/1	42.50	3/10	70.94
7/16	179.87	11/2	42.11	3/11	71.06

E, F) は7月15日と3月10日, Line-1とLine-2 (G, H, I, J, K, L) は11月1日の観測ライン・観測点を示している。それぞれの観測点において、船を停止し、船の舷側に取りつけたADCP (RD Instruments製, Workhorse 1, 200kHz) により潮流の水平成分の鉛直プロファイル (0.5mピッチ) を約1分間測定した。地点間は高速で移動し、Line-1, Line-2それぞれ往復2時間のインターバルをそれぞれF点とG点からスタートして往復6回半 (13時間) 繰り返した。このようにして得られた潮流データを調和解析し、半日周潮成分を除いて残差流分布を求めた^{6), 7), 8)}。また、ADCPを取り付けた船ではCTD (アレック電子製Compact CTDとYSIナノテック製600QS) による水温、塩分の鉛直プロファイルも同時に観測した。



図－4 2005年7月15日に測点Eで観測された潮流と調和解析で求めた推定値の散布図。相関係数=0.981。
(横軸：観測値，縦軸：推定値)

一方、この海域の広域的3次元的な密度分布を観測するため、7月、11月の観測では別の船によりCTD（アレック電子製AAQ1183）を用いて測点1から測点27までの計27点において船を停止し、水温、塩分、蛍光クロロフィル、濁度などの鉛直プロファイルを測定した。この27地点を6時間で周回する観測を2回、すなわち12時間実施した。さらに表層水を採水し、栄養塩の水平分布を実測した。

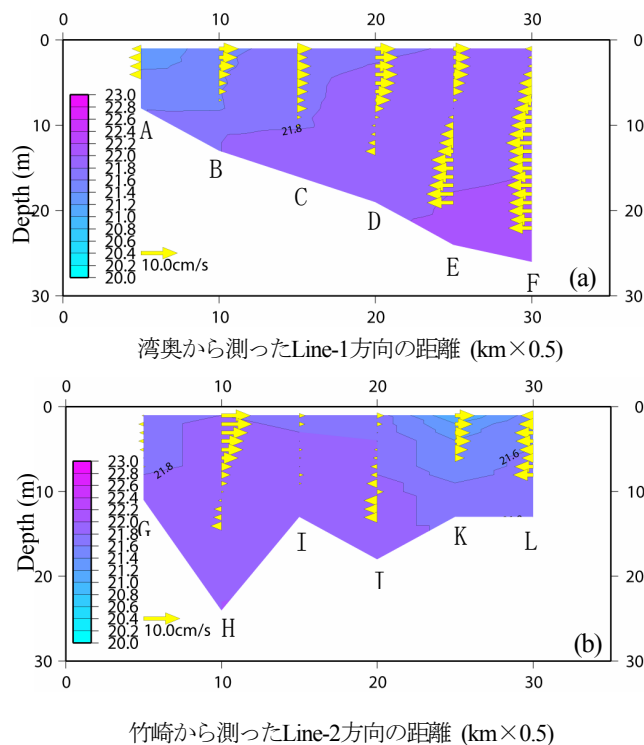
佐賀地方気象台の気象観測記録によれば、11月は観測日とその数日前まで天気は快晴で降水はなかった。一方、7月と3月の観測の数日前には比較的多い降水量を記録し、その結果、特に7月11日は筑後川の瀬の下でピーク流量1,700m³/s以上を記録したことが分かっている（表－1）。一方、風についてはいずれの観測日においても風速2m/s以下を記録しており、今回の観測結果に風の影響はほとんどないとみなして良いと考えられる。

(2) 観測結果

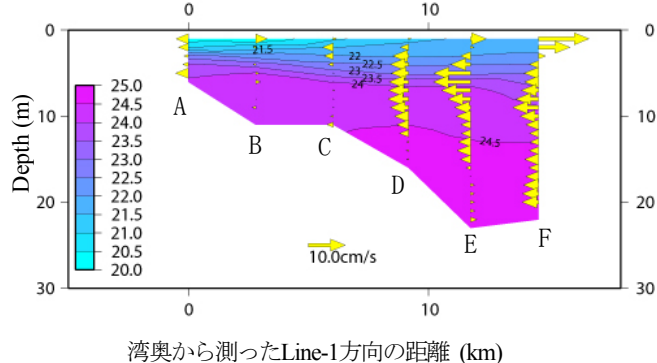
2005年7月15日（小潮時）のADCPによる潮流の観測結果を用いて調和解析により半日周潮成分を除去して得られた残差流分布を図－3に示す。図中には同時に海水密度（ σ_t ）を色分けによって示している。なお、調和解析の精度を検証するため、図－4に、測点Eにおける潮流そのものの観測値と、調和解析（最小二乗法）で求めた潮流の散布図を示している。相関係数は0.981であった。なお、測点A、Fなどの端点は観測点が少なかったにも関わらず、相関係数は0.97を上回っており、十分に観測値を説明できる精度であることが分かった。

図－3によれば、Line-1に沿った鉛直面内の残差流分布は、上層流出、下層流入の2層構造を示している。また、海水密度は強く成層しており、残差流の方向が変わる水深約5mにおいて明瞭な密度躍層を呈している。

図－5には、同様に2005年11月1日（大潮時）の残差流と海水密度の鉛直分布を示している。(a)にはLine-1に沿った方向、すなわち湾軸方向の残差流分布が示されており、残差流は2層構造、すなわち、夏季と同様に上



図－5 (a) Line-1方向の残差流と海水密度の鉛直分布；(b) Line-2方向の残差流と海水密度の鉛直分布（2005年11月1日）



図－6 Line-1方向の残差流と海水密度の鉛直分布（2006年3月10日）

層流出、下層流入の形態をとっている。一方、(b)にはLine-2方向、すなわち、湾軸と直交する方向の鉛直面における、湾軸方向の流速分布を示している。(b)図の流速ベクトルは、右方向が湾軸に沿って流出する方向である。この図によれば、確かにH地点（ここはLine-1と交差する地点）で上層流出、下層流入を示しているが、一方、東側のK地点やL地点では必ずしもそのようにはなっていない。この理由としては、水深が浅く、Line-1のような深い地点での沖合からの流入水と湾奥からの流出水のバランスから生じる2層構造が生じにくい状況であることと、さらに、地形の効果で潮汐残差流が効いている影響が大きいからであると推察される。

一方、海水密度の分布については、海面から海底までほとんど密度の差がない。密度分布をより細かく表示するために、図－5では密度の表示範囲を狭くしていることに注意されたい（図－3とは密度の表示範囲が異なる）。

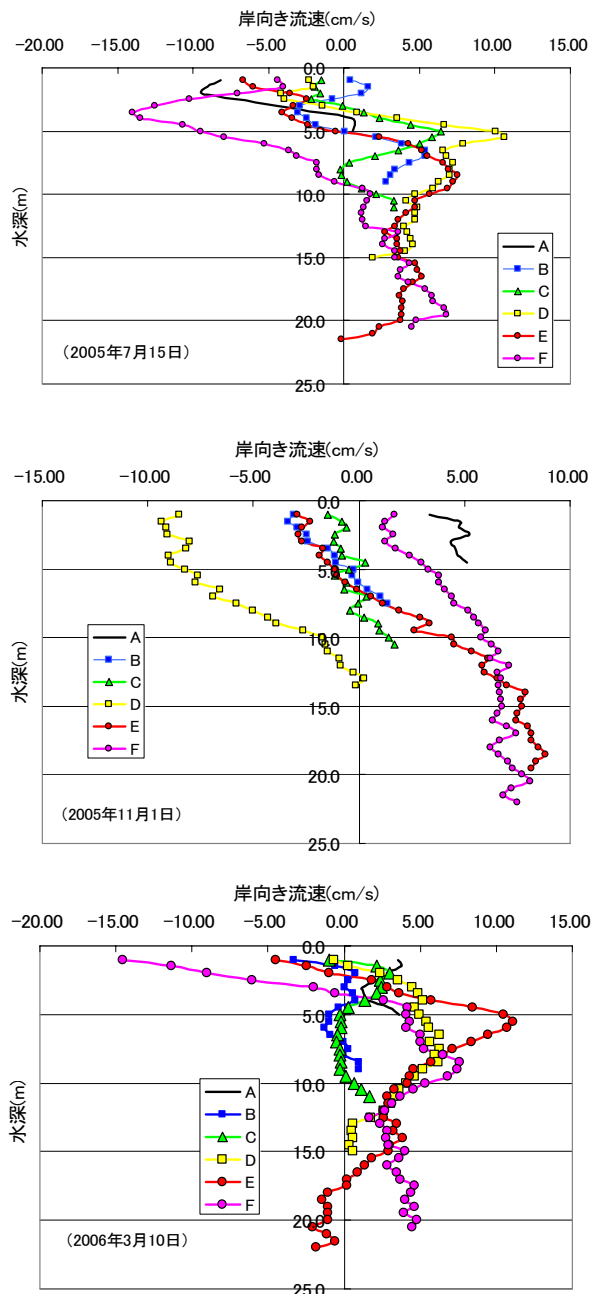


図-7 2005年7月15日（小潮）、11月1日（大潮）、2006年3月10日（中潮）時のLine-1方向の残差流の鉛直分布（A点が最奥部、F点が最も沖合の地点）

る）。秋季は、夏季と比べて水柱が鉛直方向に非常に良く混合されているのが分かる。

図-6には、2006年3月に観測し得られたLine-1に沿った残差流と海水密度の鉛直プロファイルを示している。測点Eの残差流分布を見ると、水深3m～15mに渡って岸向き流速（湾奥向き流速）が正の値を示し、その上下で負の値を示して、いわゆる中層に流入する3層構造が現れていることが分かる。これは、沖合から入ってくる海水の密度が湾奥の下層部より小さいために起こっているものであると考えられる。

図-7に、以上の3時期の残差流分布の詳細を示して

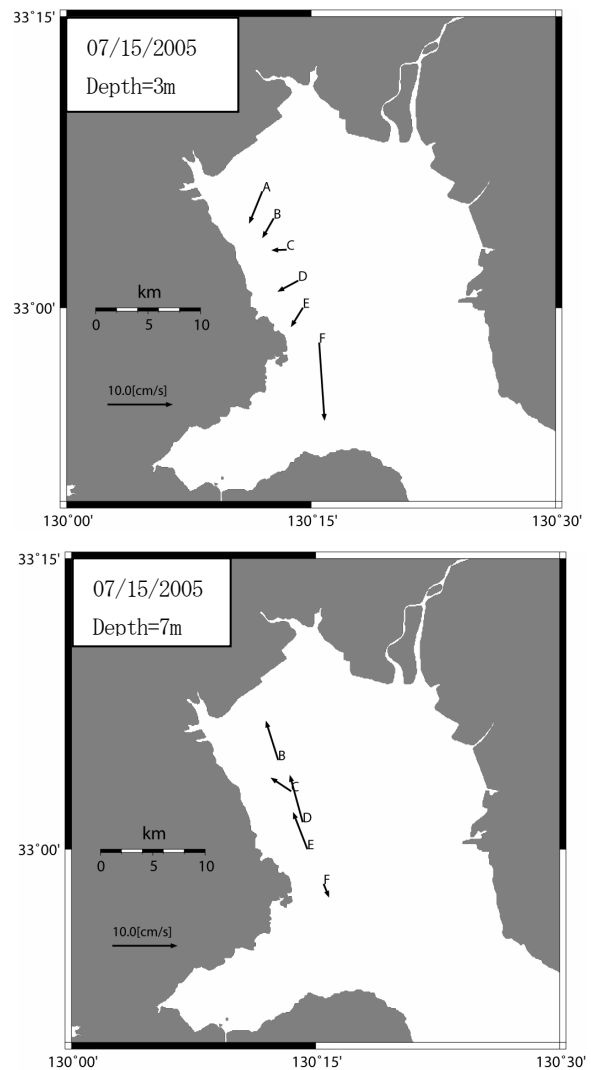
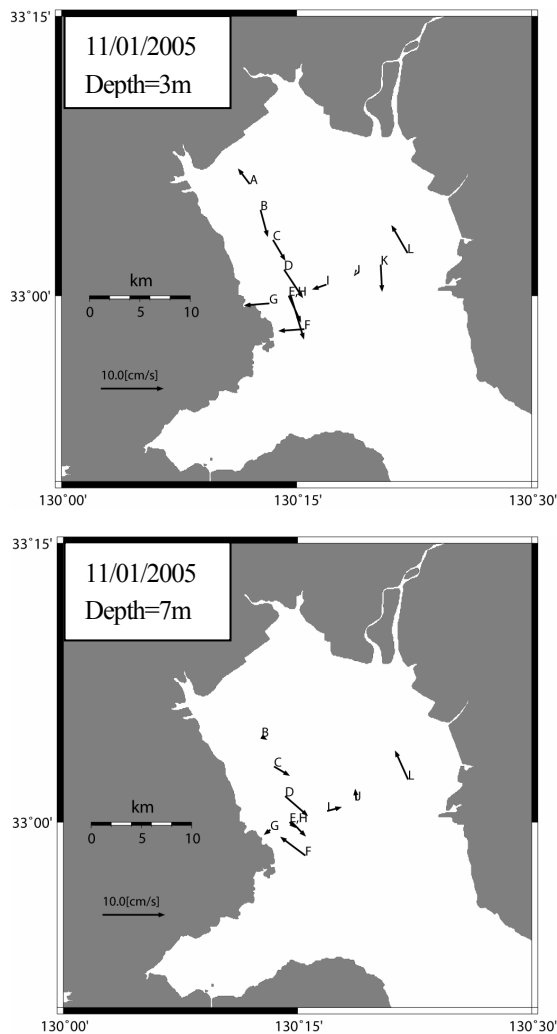


図-8 水深3m及び7mにおける水平方向の残差流の水平分布（2005年7月15日）

いる。特徴的なのは、非成層期の11月には上層流出、下層流入の流速分布が綺麗に平行に並んでいることと、一方で、数日前から淡水流入があった7月と3月には、上層流出と中層流入が現れ、より複雑な構造となっていることが分かる。

図-8には、7月15日観測の際の水深3m並びに7mにおける水平方向の残差流の平面分布を示している。図-9には11月1日観測時の同様の水深3, 7mにおける水平方向の残差流の平面分布を示している。図-8の7月のケースでは、5mの密度躍層より下ではLine-1に沿った流入傾向が卓越しているが、躍層より上の水深3mでは主に西向きの流れが卓越している。一方、図-9の11月においては、水深3, 7mで南向き成分（流出）が卓越している。なお、ここには示していないが、より下層の水深13mでは11月にはLine-1方向に沿って北向き成分（流入）が卓越していた。さらに、図-9には、11月1日観測の際のLine-2に沿った残差流の平面分布を示しているが、Line-2に沿った残差流は、Line-1に沿った残差流と同じ方向もあれば、逆になっている箇所もある。特に東側で



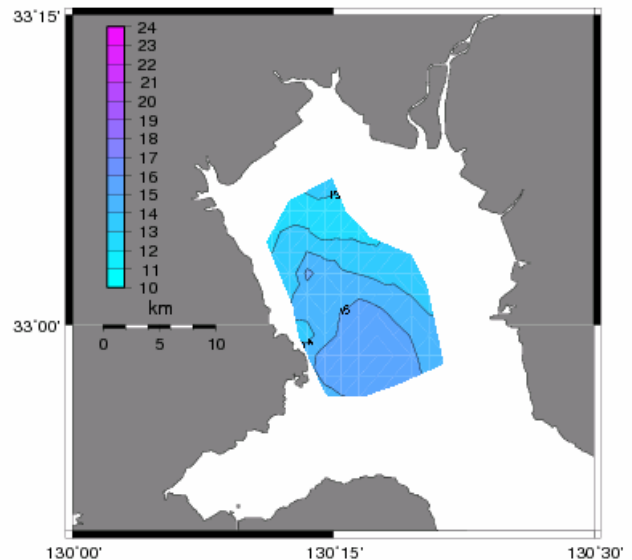
図－9 水深3m及び7mにおける水平方向の残差流の水平分布（2005年11月1日）

北向き成分（流入）が卓越している箇所と、一部、南向き成分（流出）が卓越している箇所が見られることが興味深い。

3. 考察

一般的に、内湾の残差流は幾つかの要因によって引き起こされる。まず、1つ目は水平方向の密度勾配による圧力差である。次に、潮汐と地形の効果によるものである（潮汐残差流と呼ばれて残差流と区別される）。3つ目は風応力による流れである。今回の3回の現地観測では、いずれも風速が2m/sを下回る気象条件であったことを考えると、3番目の風による影響は無視できる。

1番目の水平方向の密度勾配は2種類的作用を持っている。1つは長期的な水平方向の密度勾配としての作用であり、もう1つは淡水供給による短期的な作用である。長期的な水平方向の密度勾配は、鉛直循環（エスチュアリー循環）を惹起し、上層で流出、下層で流入の流れを



図－10 水深3mにおける海水密度の水平分布（2005年7月15日）

作る。この鉛直循環流れは2005年7月、11月のいずれでも見られた。その傾向は、2006年3月でも同様であった。一方、短期的な河川等からの淡水供給は、2005年7月15日と2006年3月10日の数日前に起こった。淡水は密度成層を引き起こし、その上層はあたかも蓋のように鉛直方向の循環を制限したと考えられる。そして、一方では、図－10のように蓋の上にさらに河川からの淡水供給がなされることによる水平方向の密度勾配が形成され、これによって上層での水平発散によって広がっていく流れが形成され、結果として東西方向の成分の残差流が上層で得られたと思われる。

一方、長期的な水平密度勾配の作用については、別の観点から考察することができる。前述のように、ADCPを取りつけた船においても、流速分布測定の後には、その地点の水質（水温、塩分）の鉛直分布を計測している。この情報を用いることにより、水平密度勾配による残差流を引き起こす駆動力を導くことができる。

湾奥から沖合に湾軸に沿って x 軸を取り、平均海水面から鉛直下方に z 軸を取れば、流れの駆動力は次式で表すことができる⁹⁾。

$$D = -\rho g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \int_0^z \frac{\partial \rho(x, z')}{\partial x} dz' \quad (1)$$

ここで、 $\rho(x, z)$ は密度、 g は重力加速度、 $\zeta(x)$ は平均海水面から測った水表面の高さである。もし、この駆動力の鉛直方向の平均を D_m 、それからの偏差を D_d とおけば、次式が得られる。

$$D_m = \frac{1}{h} \int_0^h D dz \quad (2)$$

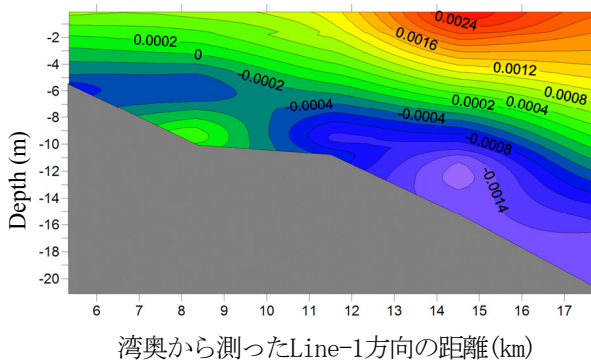


図-11 水平方向の駆動力の偏差の鉛直面内分布
(2005年11月1日、正は冲向、単位：N/m³)

$$D_d = D - D_m \quad (3)$$

ここで、 $h(x)$ は水深である。駆動力の鉛直方向の平均 D_m は水深に無関係であるが、一方、 D_d は水深毎に大きさと方向が異なり得る。この駆動力の偏差によって引き起こされる流れは鉛直面内で変化し、分布をもつ。

図-11は、式(3)によって得られる水平方向の駆動力の偏差のLine-1に沿った鉛直面内での分布を2005年11月1日のケースについて示したものである。上層の水塊は正の駆動力（冲向き方向の駆動力）を持ち、特に沖合14～15km地点で最大である。図-5(a)を参照すると、同じ地点で、上層では冲向きの残差流が卓越していることが確認できる。一方、下層では、負の駆動力が支配的で、結果として2層構造が形成されたと考えられる。図-11と図-5(a)は良好な一致を見ており、水平方向の密度勾配に起因した駆動力によって引き起こされた典型的なエスチュアリー循環であると説明することができる。この鉛直循環は、11月だけでなく7月、あるいは3月でも見られ、湾奥部は本質的にエスチュアリー循環の構造となっていることが推察される。しかしながら、7月あるいは3月には、短期的な淡水供給による強い密度成層が見られ、海底付近の沖合から流入する流れは、密度躍層直下の強い流入水に比べれば弱い流れであることが図-3、図-6より分かる。

一方、前節の最後に記述した11月1日の残差流の平面分布において、北向き成分（流入成分）と南向き成分（流出成分）が交互に現れた理由としては、東側が特に水深が浅い領域が広いことや海岸地形の影響による潮汐残差流の効果が含まれているためであると推察することができる。何故なら、11月1日の密度分布は鉛直方向にほぼ一様で、水平方向には湾奥から湾口にかけて弱い水平密度勾配が形成されてエスチュアリー循環が作られているが、これを覆すような他の外力としては、風応力か地形性の潮汐残差流しかなく、観測日には風の影響はほとんどなかったからである。

4. 結論

本研究では、ADCPを用いた半日の流速測定を3つの異なる季節で実施することで、有明海湾奥部における残差流分布を求めることができた。また、この流速測定と平行してCTDによる広域の水温や塩分分布を測定することで、この水域のより詳しい密度構造も調べることができた。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) どの季節についても、本質的な残差流のパターンは上層流出、下層流入の2層構造である。すなわち、この海域では本質的にはエスチュアリー循環的な流れが支配的である。
- (2) 短期的な淡水供給が起きた場合には、強い密度成層が生じる。
- (3) 残差流の水平パターンにおいて、東側で流入・流出の箇所が現れるが、これは浅い水深と地形の影響による潮汐残差流が原因であると推察された。
- (4) 密度分布から導き出せる水平方向の流れの駆動力よりエスチュアリー循環の流れを説明することができる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、現地調査やデータ整理の段階で、佐賀大学理工学部都市工学科の野口剛志技術職員や、当時、本研究室4年生だった牧田敦君、藤井健史君、笠置尚史君らの献身的な協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 海上保安庁水路部：島原海湾の海底地形・底質分布および潮流，海上保安水路部調査報告，1959.
- 2) 小田巻実・大庭幸広・柴田宣昭：有明海の潮流新旧比較観測結果について，海洋情報部研究報告，第39号，pp.33-61，2003.
- 3) 小松利光ら：北部有明海における流動・成層構造の大規模現地観測，海岸工学論文集，第51巻，pp.341-345，2004.
- 4) 八木宏・井瀬肇・松村航裕・木元克則：有明海湾奥部干潟前縁域の流動構造と懸濁態物質輸送特性に関する現地観測，水工学論文集，第50巻，pp.1465-1470，2006.
- 5) 木谷浩三：有明海における冬季の平均流について，海と空，vol.78，pp.129-134，2003.
- 6) 藤原建紀・肥後竹彦・高杉由夫：大阪湾の恒流と潮流・渦，海岸工学論文集，第36巻，pp.209-213，1989.
- 7) 中辻啓二・藤原建紀：大阪湾におけるエスチュアリー循環機構，海岸工学論文集，第42巻，pp.396-400，1995.
- 8) 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真吾：ADCPによる伊勢湾の流動構造調査，海岸工学論文集，第42巻，pp.1096-1100，1995.
- 9) Fujiwara, T. and Yamada, Y.: Inflow of oceanic water into Tokyo Bay and generation of a subsurface hypoxic water mass, Journal of Geophysical Research, vol.107, No.C5, 13.1-13.10, 2002.

(2006. 9. 30受付)