

鹿児島湾湾口部における成層期の残差流構造

Residual Current at the Entrance of Kagoshima Bay in the Season of Stratification

安達貴浩¹・登川武司²・大山俊昭³・山城徹⁴・櫻井仁人⁵

Takahiro ADACHI, Takeshi TOGAWA, Toshiaki OYAMA, Toru YAMASHIRO
and Masahito SAKURAI

In order to make clear the characteristics of water exchange at the entrance of Kagoshima bay in the season of stratification, the field observations on the velocity and density fields were carried out, and then the results on the residual currents were examined. As a result, the following findings were obtained ; 1) Two kinds of flow pattern of residual current "inflow at the upper layer and outflow at the lower layer" and "outflow at the upper layer and inflow at the lower layer" were observed. 2) The residual currents are regarded as the density-induced current, because those vertical patterns have strong correlation with the vertical profiles of the horizontal gradient of baroclinic pressure.

1. 本研究の目的

日本の代表的な閉鎖性海域の一つである鹿児島湾では、過去に数度、大規模赤潮による甚大な漁業被害が生じている。湾内の流動や海水交換はこのような赤潮の発生メカニズムを規定する重要な要因の一つであるが、鹿児島湾は他の閉鎖性海域に比べ水深が大きい上、底引き網漁等の水産活動が活発に行われていることもあって、流況観測、特に観測機器の係留による流況連続観測が困難な海域となっている。このような状況にあって、櫻井ら(2000)によって、1980年、1981年の2年間にわたり、混合期(2, 3月)と成層期初期(6月)を対象に流況の定点観測が湾口部で実施されている。この結果、鹿児島湾湾口部で出現する種々の残差流パターンが明らかにされているが、鹿児島湾では黒潮の影響が不定期に現れ流況が複雑に変化するにも関わらず、成層期の観測は6月のみと限られている。また、残差流形成メカニズムについても明確ではなく、鹿児島湾全域の流動に対する黒潮の影響についても全く理解が進んでいない。

以上のような背景の下、本研究では鹿児島湾湾口部での海水交換機構を明らかにすることを目的に、ADCPによる定期的な曳航調査ならびに流速計の係留による流れの長期連続観測を実施した。そして、得られた結果に基づいて鹿児島湾湾口部の残差流構造の特性を明らかにし、その形成メカニズムについて考察を行った。

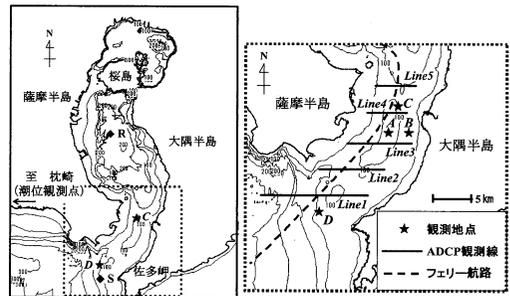


図-1 鹿児島湾と観測地点

2. 流速と塩分・水温の横断観測

(1) ADCP, STD 観測の概要

著者らによって、2003年からほぼ月に1回の頻度で、鹿児島湾湾口部における流れと水温、塩分の鉛直分布が観測されている(STD観測はADCP観測の前後1~3日の間に実施)。この観測ではADCP(Acoustic Doppler Current Profiler, 古野電気社製, CI-60G改244kHz)を用いて図-1に示す5測線での流況観測が実施されている(鉛直方向に全11層の観測)。

(2) ADCPによる流況観測結果

本横断観測では、1観測線に対し1日に1回のみ流速分布が計測されているが、観測時の潮汐の位相は様々である。これら観測結果の中で、潮流が小さい停潮時付近の流況は残差流パターンを示すことが期待されることから、停潮時付近(前後1時間以内)での観測結果のみを用いて流れのパターンを分類した。その結果、パターンの特徴が不明瞭な流動、さらには「中層流入」や「東側流入、西側流出」のパターンも存在したが、大半は「上層流出、下層流入」と、「上層流入、下層流出」という2つのパター

1 正 会 員 博士(工) 鹿児島大学工学部海洋土木工学科准教授
2 正 会 員 工 修 (株)東京久栄
3 第十管区海上保安本部海洋情報部
4 理学博士 鹿児島大学工学部海洋土木工学科准教授
5 理学博士 鹿児島大学工学部非常勤講師

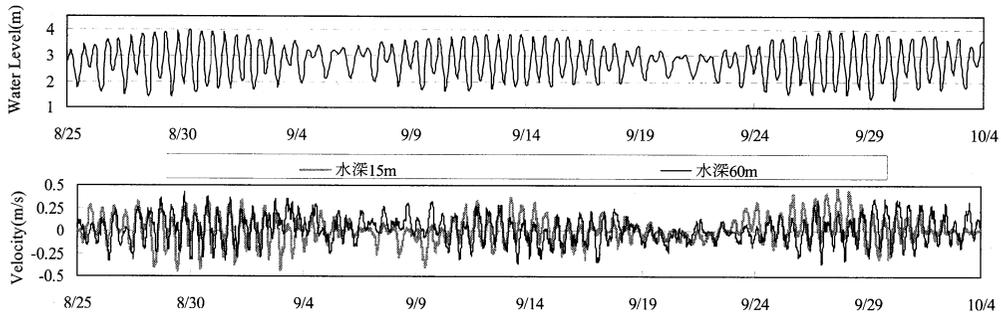


図-4 枕崎潮位とB点の流速の経時変化（流速の正の値は湾への流入方向に相当する）

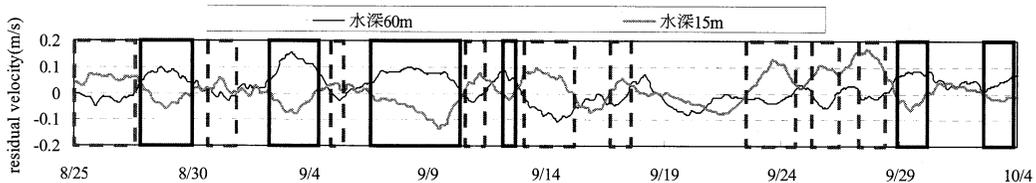


図-5 25時間移動平均流速の経時変化

（破線で囲まれた期間：「上層流入，下層流出」，実線で囲まれた期間：「上層流出，下層流入」）

長で5日程度であり，A点の最大流速は上層で10cm/s（流出方向），下層で35cm/s（流出方向），B点の最大流速は上層で15cm/s（流入方向），下層で13cm/s（流入方向）である．また，大きな流入や流出がある場合，A点，B点ともに，上層と下層で逆向きの流向となっていることが多い．

4. 残差流パターン形成メカニズムについての考察

(1) 河川流量と風の影響

表層と底層の両方で，より長期間の観測結果が得られたB点での結果を用いて残差流パターンの形成メカニズムを考察した．まず，タンクモデルを用いて計算した全河川流量の日平均値と残差流との相互相関を調べたところ，両者の間に相関関係は見られなかった．鹿児島湾へ流入する河川は全て二級以下の河川で，河川流量が湾スケールに対し小さいことから，河川流量が残差流に与える影響は小さかったものと考えられる．同様に風と残差流の比較も行ったが，両者の間にも相関は見られなかった．最も水表面に近い観測点が水面下15mの位置にあったことから，風の影響がそれほど強く現れなかったものと考えられる．

(2) 水温の水平構造の影響

上記のように風や河川水の流入の影響は，特徴的な残差流パターンの形成に対してほとんど無視できることが明らかになった．ところで，メカニズムへの直接的な言及はなされていないものの，従来の研究（櫻井，2000）では，成層期と混合期いずれにおいても，湾内と湾口の

水温差と残差流パターンの間に相関関係があることが明らかにされている．このため次に，このような水温の水平構造の影響について調べた．

具体的には，水産技術開発センター（ホームページアドレス：<http://kagoshima.suigi.jp/index.aspx>）によって配信されている，鹿児島 - 那覇間を運行する「フェリーなみのうえ（マルエーフェリー（株）所有）」で取得された水深10mの水温データを用いて，B点の残差流時系列との比較を行った．代表的な結果として，8/25と9/8の水温分布ならびに，混合期である10/30の水温の分布を図-6に示す．北緯31.6°～30.0度の移動に約5時間かかっているが，B点を通過する時刻から判断すると，9/8は「上層流出，下層流入」，8/25は「上層流入，下層流出」の残差流パターンに対応している．また，図中には観測点Bに加えて，櫻井ら（2000）が水温差を求めた地点S，Rの緯度も示している．

まず，成層期における表層水温の水平構造の特徴を整理する（なお，観測点Bの緯度：31.183°N，佐多岬の緯度：約31°Nである）．櫻井ら（2000）によって，混合期には地点S，Rの水温差は3～4°Cとなることが報告されているが，8，9月には日射の影響が強く，黒潮の温度と変わらないくらいにまで湾内表層水は加熱されるので，湾内外での水温差は小さい．また，北緯31.4度付近で水温が極大となっている分布が見られるが，これはこの点を境にフェリーが東西方向の進路を変えることの影響と考えられる（フェリーが北上する場合を例に取ると，北緯31.4度付近で，それまでの西から東への進路が，東から西へと変化する）．鹿児島湾湾中央部の表層では，成

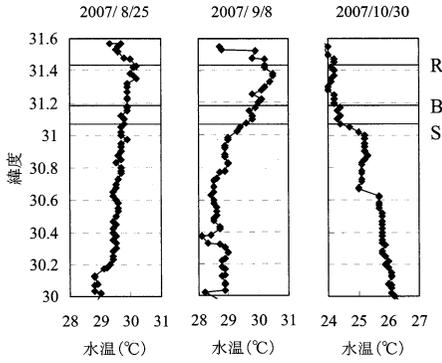


図-6 表層水温の水平構造

層期に東岸側に高温水が存在しているため、東西方向の進路の変化により水温変化の傾向も変わったと考えられる。

次に、残差流パターンと水温の水平構造の関係を調べた。大きく分類すると、「上層流出，下層流入」が出現する場合、北緯31.0～31.3度の区間で、水温は湾奥側に高くなる傾向が見られた。また、図-6に見られるように、B点近傍では局所的に表層水温の勾配の符号が変わりやすいことも確認された。B点付近は周辺よりも水深が浅く、成層が破壊されやすいため、このような局所的な変化が生じたものと考えられる。仮に残差流の形成がバロクリニック圧の勾配で説明できるならば、B点近傍の微細な変化ではなく、むしろ北緯31.0～31.3度の区間のマクロな水温構造で密度流が発生していることになる。

一方、「上層流入，下層流出」が出現する場合には、B点近傍における表層水温の水平勾配に一定の傾向が見られなかった。また、9/4～9/11において、「湾奥側高温，湾口側低温」といった水温構造が維持されていたにも関わらず、「上層流出，下層流入」のパターンは9/8までしか形成されていないことが確認された。仮にバロクリニック圧の勾配で残差流が説明できるならば、このように表層水温のみで残差流を説明できない理由として、水温の鉛直構造が考慮されていないことが考えられる。つまり、

成層期は表層水温の空間的な差が小さく、表層水温のみではバロクリニック圧の差を説明できないと考えられる。

(3) ADCP, STD 観測から得られた結果の考察

2章に示した STD を用いた観測では、湾軸方向に複数の塩分・水温の鉛直分布が観測されている。ただし、2007年8, 9月については湾軸方向の観測地点が限られていたため、それ以外の結果を対象に、前節での考察を踏まえつつ改めて ADCP の断面観測結果について考察した。まず、残差流よりも潮流の影響が大きく現れている結果を除去するために、定点観測の結果から潮流の調和定数を算出した後、調和解析により潮流を推定し、この結果と、ADCPによって得られた停潮時付近の流速とを比較した(表-1)。実測の流速が推算潮流よりも2倍以上に大きい結果(表-1中の記号「○」に相当)のみを対象に、湾軸方向のバロクリニック圧の勾配と残差流パターンとの関係を調べた。なお、前節で示したように、バロクリニック圧の勾配によって残差流が形成されているならば、北緯31.0～31.3度の区間のマクロな水温構造で密度流が発生していることになる。この点を考慮して、複数の観測点から図-1の地点 C, D を選定し、2点間のバロクリニック圧の差を求めた。バロクリニック圧の差を基準密度で除した値を求めた後、その水深平均値からの偏差 $\Delta p' / \rho_0$ の分布を求めた(図-7)。この結果を見ると、密度と流速の観測日には1～3日のずれがあるものの、「上層流入，下層流出」だけでなく、「上層流出，下層流入」だけでなく、「中層貫入」(表-1の「中層流入，それ以外で流出」)のパターンまでもバロクリニック圧の差によって説明できることが分かる。なお、成層期において、表層水温の空間勾配は必ずしもバロクリニック圧の勾配を代表するわけではないことが確認された。いずれにしても図-5に示す残差流の鉛直構造の大半がエクステンション・フローの形態を示すことや上記の結果から判断すると、鹿児島湾における成層期の残差流は、バロクリニック圧の勾配によって形成される密度流である可能性が高いと言える。

(4) 潮汐の影響

次に「潮汐強度」を用いて潮汐変動の大きさが残差流

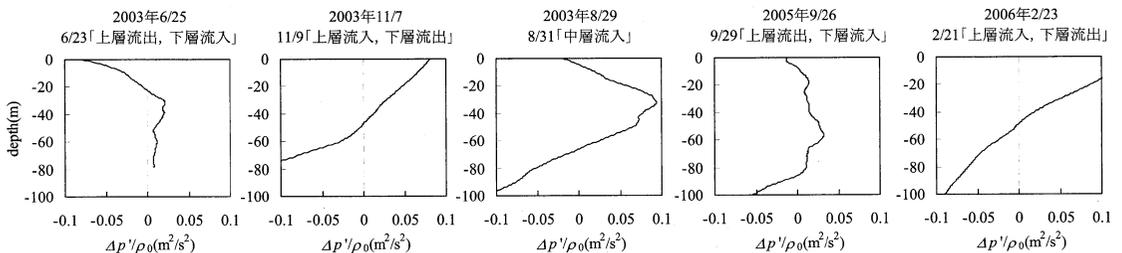


図-7 バロクリニック圧の差の鉛直分布 (横軸の正値は流入方向の残差流を誘起する圧力差を意味する)

パターンの違いに与える影響を調べた。ここで「潮汐強度」とは潮位変動の r.m.s. で与えられ、大潮や小潮など潮汐の強さの違いを表したものである。潮汐強度と B 点の流速の南北成分25時間移動平均値との相互相関をとって見たところ、水深15mでは遅れ時間-2日で正のピーク値、6日で負のピーク値が表れており、それぞれの遅れ時間において水深60mの相互相関係数は逆の符号を示していた(図-8)。これは潮汐が最小となる約1~2日前(潮汐強度の周期は14~15日)にエスチャリー循環が、反対に潮汐強度が最大となる1~2日前には逆エスチャリー循環が卓越しやすいことを示している。このように潮汐強度と残差流の間には相関関係が確認されるが、残差流のパターンの出現期間は2~5日で潮汐強度の変動周期(14~15日)とは異なっている。このため、潮汐そのものが残差流パターンを直接的にコントロールしているとは考えにくい。成層期では、水温の水平構造が数日スケールで変動し、この変動によって残差流パターンも変化していると考えられるが、前述のように湾口部の残差流形成に密度流が影響を及ぼしているのであれば、密度躍層の混合に寄与する潮汐変動が少なからず密度流の形成に影響を及ぼしているはずである。上記のように比較的高い相関が得られたのは、このような潮汐混合の影響を示唆していると推察されるが、その詳細については、今後さらなる検討が必要である。

5. 同一パターンの残差流が形成される範囲

本研究で観測された残差流の空間スケールを明らかにするために、ADCPによって得られた流速の横断分布を示す(図-9)。観測線毎に観測時刻が異なっているため、観測線によっては潮流の影響が少なからず含まれていることになるが、それにもかかわらず、全測線において同一の流況パターンが確認された。いずれの観測線も上述の地点 C、D の間に位置することから、C、D 間の密度(水温)分布によっていずれの測線にも同一のパターンの流れが出現していると解釈できる。このように本観測で得られた残差流のパターンは湾軸方向に比較的大きな空間スケールを有しており、湾口近傍の海水交換を支配する流動であると推測される。

6. 結論

- 1) 鹿児島湾湾口部では、成層期に「上層流出、下層流入」と「上層流入、下層流出」という特徴的な残差流構造が数日のスケールで、いずれも頻繁に出現することが明らかとなった。
- 2) 「上層流出、下層流入」と「上層流入、下層流出」のいずれの残差流も水温の水平勾配によって生じる密度流である可能性が高いことが示された。

謝辞：本論文を完成するにあたり、鹿児島大学水産学部・中村啓彦准教授、仁科文子助教、水産学部練習船「南星丸」の船長をはじめとする乗組員の皆様、また第十管区海上保安本部海洋情報部の皆様に、現地調査の実施においてご協力いただきました。また、鹿児島県水産技術開発センターにはフェリーなみのうえによって観測された水温データならびに黒潮北縁位置データを、また海流予測情報利用 有限責任事業組合 (FOP) には JCOPE データのご提供いただきました。以上の方々や関係機関に対して、ここに謝意を表します。

なお、本研究は、文部科学省科学研究費・萌芽研究「逆エスチャリー循環が閉鎖性内湾の水環境に及ぼす影響について」(代表者：安達貴浩、課題番号：19656233)の補助を受けて行われたものであることをここに付記します。

参考文献

櫻井仁人ら(2000)：鹿児島湾の湾口断面を通しての海水流入・流出過程, 海の研究, 9巻, 第1号, pp.1-12

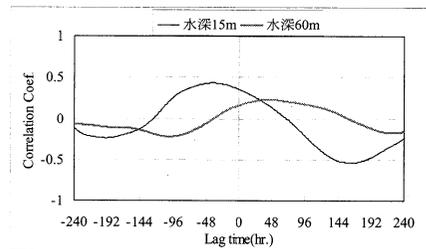


図-8 潮汐強度と残差流の相互相関

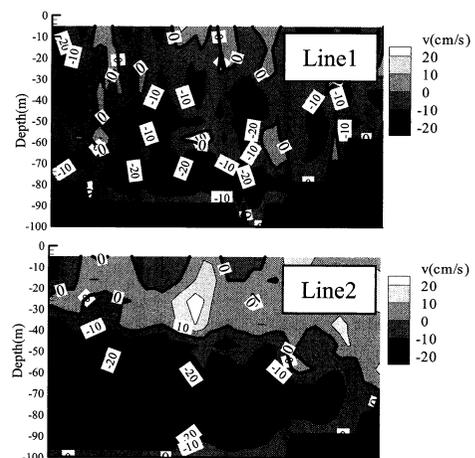


図-9 湾軸方向の流れ (2004年6/23, 図-2下図参照)