

鹿児島湾湾口部における混合期の 残差流形成メカニズム

MECHANISM TO FORM RESIDUAL CURRENTS AT THE MOUTH OF KAGOSHIMA BAY IN WINTER

安達貴浩¹・大山俊昭²
Takahiro ADACHI and Toshiaki OYAMA

1正会員 博(工) 鹿児島大学准教授 工学部海洋土木工学科(〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-40)
2非会員 第十管区海上保安本部海洋情報部(〒890-8510 鹿児島市東郡元町4-1)

The purpose of this study is to make clear the mechanisms to form the residual current at the mouth of Kagoshima Bay in winter. In this study, 3D numerical simulations on flow fields were carried out and compared with the results of field observation. Then the main driving forces to form the residual currents near the bay mouth were examined by the numerical experiments. As a result, the following findings were obtained; 1) It was confirmed that the numerical model constructed could reproduce the observational results with good accuracy. 2) A typical pattern of residual current in winter was deduced to be formed due to the change in temperature at the bay mouth brought by “Kuroshio” and Coriolis’ effect.

Key Words : Kagoshima Bay, semi-enclosed bay, water exchange, residual current, 3D numerical simulation, Kuroshio, density-induced current

1. 本研究の目的

鹿児島湾の海水交換特性を明らかにすることが本研究の目的である。既往の研究において、鹿児島湾湾中央部にまで外海からの高温水が貫入している様子がしばしば確認されていることから¹⁾、黒潮の影響を考慮することなしに鹿児島湾の海水交換を解明することはできないと考えられる。不定期に変化する黒潮波及水の影響を定量的に明らかにするためには、長期的な定点観測の実施が有効と考えられるが、鹿児島湾は他の閉鎖性海域に比べて水深が大きい上、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、これまで長期的な定点連続観測は櫻井ら²⁾の観測のみに限られていた。このため、湾内流動に対する黒潮波及水の影響についても明確にはなっていない。

以上のような状況を考慮して、安達ら³⁾は2007年の成層期(8~10月)を対象に、湾口の流れの定点連続観測を実施した。この結果、湾口の残差流として、湾軸方向の水温の水平勾配によって引き起こされる密度流が支配的であることが明らかにされている。一方、混合期については、櫻井ら²⁾によって流況観測が実施されているものの、他の物理環境要素の観測が限られていたことも

あって、残差流の形成メカニズムは未だ明確とはなっていない。混合期の流動メカニズムを明らかにすることは、漂流予測の精度向上等、海上保安の観点から重要であるばかりでなく、黒潮の影響は成層期よりも混合期において強く現れることから、湾内流動に対する黒潮波及水の影響を理解する上でも重要である。

以上のような背景を踏まえて、本研究では、まず櫻井ら²⁾の観測結果を対象に3次元流動数値シミュレーションならびに数値実験を実施し、混合期における鹿児島湾

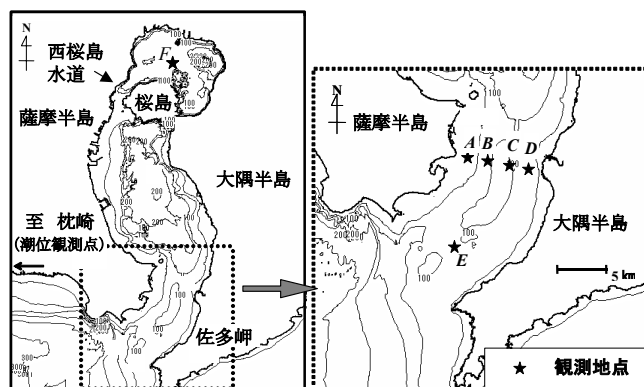


図-1 鹿児島湾と観測地点
(図中の数値は水深(m))

表-1 検証データの内容

観測地点	観測水深とデータ取得期間	
A	25m, 1980 2/13-3/16	—
B	10m, 1980 2/13-2/21	50m, 1980 2/13-3/16
C	20m, 1980 2/13-3/16	57m, 1980 2/13-3/16
D	20m, 1980 2/13-2/21	60m, 1980 2/13-3/16

の残差流，特に湾口からの暖水の貫入現象を規定する湾口近傍の残差流に着目して，その形成要因（駆動力）を明らかにした．さらにその結果を基に，黒潮波及水が湾内の物理環境に与える影響を考察した．

2. 3次元流動計算

（1）検証データの概要

本研究では，1980年に櫻井ら²⁾によって実施された現地観測結果を検証データとして用いた．鹿児島湾の模式図ならびに櫻井ら²⁾の現地観測の地点A～Dを図-1に示す．また，観測内容を表-1に示す．いずれの流況観測にも，AANDERAA社製RCM8が用いられている．櫻井ら²⁾の現地観測から，冬季の水平循環としては「東側流入，西側流出」の残差流パターンが観測断面において卓越して出現することが明らかとなっている．

（2）モデルの概要

1980年の1月1日～3月31日までを対象に流動数値シミュレーションを行った．本シミュレーションでは，水平方向に直交曲線座標を，鉛直方向に σ 座標を採用した準3次元モデルを適用した．鉛直方向の格子分割は10層とし，水面近傍の水温成層の構造を精度良く再現するために， σ 方向に不等間隔格子を採用した（水面から空間格子間隔は $\Delta\sigma=0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.08, 0.12, 0.15, 0.18, 0.18, 0.18$ である）．乱流モデルには， $k-\epsilon$ 乱流モデルを適用した．また，水平方向の渦動粘性係数と乱流拡散係数については，既往の数値シミュレーション⁴⁾を参考に，

それぞれ50, 20m²/sを与えた．

また，海底勾配によって生じる数値拡散を軽減するために，Stellingら⁵⁾によって提案されている手法を適用した．本シミュレーションで用いた水平格子の分割を図-2に示す．格子形状としては，湾幅方向よりも湾軸方向に長く，西桜島水道において最小となるような形状が採用されている．なお，格子の最小の長さは湾幅方向に100m程度となっている．

（3）湾口での境界条件

フェリー「なみのうえ」によって取得されている湾口での表層水温の時系列データを活用し，湾口の水温境界条件を作成した．図-3に1980年のフェリーの水温観測によって得られた，北緯31度8分，東経130度39分（図-1の点E）における表層水温の経時変化を示す．この結果を見ると，2月から3月にかけて点Eでの水温は15.5～19.2℃の範囲で変動しており，最高水温は2月27日に出現している．なお，点Eでは概ね3日に1回の計測が実施されているが，場合によっては計測の間隔が10日程度になることもあった．

上記のように，1980年以降湾口水温の実測データが得られているが，観測層は表層のみであり，何らかの手法で，水温の鉛直分布を推定する必要がある．そのため，第十管区海上保安本部の観測によって月1回の頻度で実施されているSTD観測の結果を利用して，混合期の水温鉛直分布を推定した．なお，1980年にはSTD観測は行われていなかったため，2004年～2007年の1～3月における北緯31度8分での水温の鉛直分布（図-4）に基づいて，以下の第一近似の関係を適用し，湾幅方向一様に水温の境界条件を与えることにした．

$$\begin{cases} \theta = \theta_s & (0 < z < 40m) \\ \theta = \frac{15.5 - \theta_s}{40}(z - 40) + \theta_s & (40 < z < 80m) \\ \theta = 15.5 & (z > 80m) \end{cases}$$

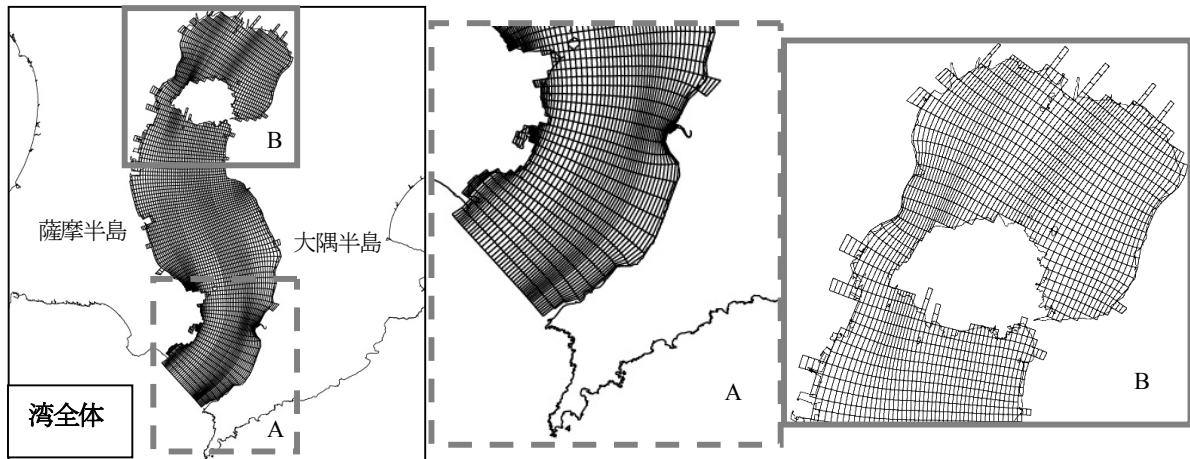


図-2 水平格子分割

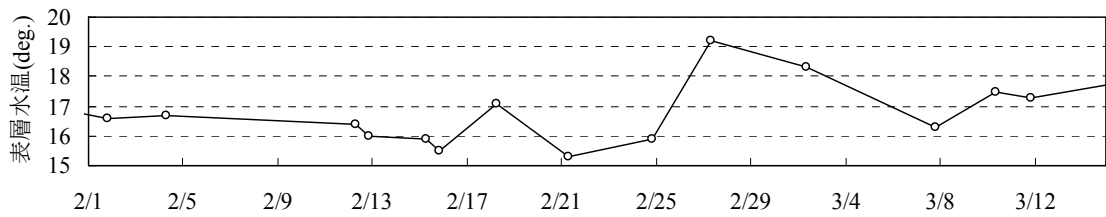


図-3 湾口表層水温の経時変化

ここで、 θ : 水温 (°C), z : 水表面を原点とする鉛直下方の座標 (m), θ_s : 表層水温 (°C) である. 図-4を見ても分かるように, 2月~3月においては, 表層から水深40mの区間の水温が鉛直方向に一樣になることが多いこと, また海底の水温はほぼ一定の値 (15.5°C程度) を示すことから上記のような関係式が与えられている. 以上のような関係式に, 実測の表層水温を時間的に直線内挿した時系列データを与えることによって, 境界における水温の鉛直分布を算出した.

塩分の境界条件については, 連続観測の結果が存在しないので, 実測値に基づいて一定値を湾口境界条件として与えた. 湾口水位については, 潮位観測地点である枕崎での潮位に対して6分潮 ($M_2, K_1, O_1, S_2, M_4, MS_4$) の調和解析を行い, 得られた調和定数を用いて湾口での潮位変動を再現した (図-1参照). さらに, 流速の境界条件については連続流出条件を与えた.

(4) 水表面での境界条件

水表面での熱フラックスはMurakamiら⁹⁾のモデルによって評価した. この際, 実測データとして, 全天日射量, 風速の絶対値, 相対湿度, 気温, 雲量が必要になってくるが, この内, 風速の絶対値, 相対湿度, 気温については, 陸上と海上で値が異なるのが一般である. したがって, 海上での風速の絶対値については, 陸上値の1.5倍の値を与えた. また, 相対湿度の海上値については, 著者らの研究グループの観測結果を再整理し, 陸上値の1.3倍の値を与えた. 同様に, 気温についても同観

測結果を用いて補正を試みたが, 陸上値と海上値の間には明確な相関が見出せなかった. このため, 海上気温については, 陸上値をそのまま与えることにした. 全天日射量, 雲量については, 鹿児島管区气象台によって配信されている (<http://www.data.jma.go.jp/>) 陸上観測値を与えた. いずれの気象データについても, 日平均値を用い, 時間的線形内挿により, 各時間ステップ毎の水表面熱フラックスを評価した.

(5) 河川流量の条件

鹿児島湾へ流入する河川では, 鹿児島県によって水位計測がなされているので, H-Qモデルを適用することにより, 流量の時系列データを作成することが可能である. しかしながら, 数値シミュレーション構築時において, 1980年の水位データが入手できなかったことから, 実測データの存在する期間に対してタンクモデル⁷⁾のパラメータを同定し, 得られたパラメータを用いて計算期間の河川流量を推定した.

(6) 数値シミュレーションの検証結果

上下層いずれにおいても欠測データが少なく, なおかつ特徴的な残差流の時間変化が観測された地点Cの水深20, 57mを対象に, 残差流の南北成分の実測値と計算結果の経時変化を比較した (図-5). なお, 図-5には枕崎での潮位実測値の経時変化も合わせて示している.

上述のように境界条件の作成のために活用できる表層水温の観測頻度はそれほど密ではなく, また水温の鉛直分布も実測値が与えられているわけではない. それにも拘わらず, 計算結果は, 観測によって得られた残差流を概ね良好に再現している. なお, 観測結果の2月27日から3月3日において見られる2つのピークは計算結果では再現されていないが, これは境界条件として与えた点Eでの水温が微細な流動を再現できる程密には観測されていなかったことに起因していると考えられる (図-3参照).

3. 混合期の残差流形成メカニズム

(1) 黒潮波及水が湾内の物理環境に与える影響

次に, 点Eの表層水温が観測期間の最低値15.5°Cを維

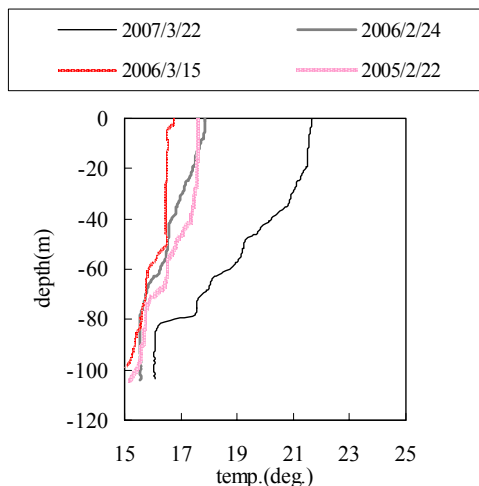


図-4 冬季湾口水温の鉛直分布 (実測)

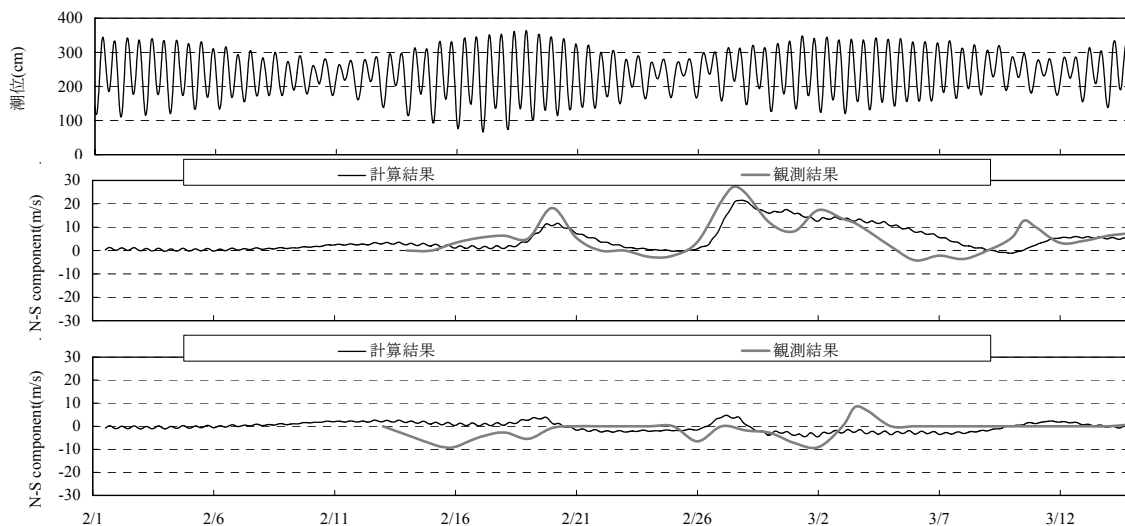


図-5 計算結果と観測結果の比較

(上段：枕崎での実測潮位，中段：水深20mの湾口残差流，下段：水深57mの湾口残差流)

持し続けた場合 (Case2と呼ぶことにする，実測の水温を用いた2章の計算はCase1とする) について計算を行い，両計算ケースの比較を行った．櫻井ら²⁾によると，黒潮の水温フロントの接岸と湾口水温の上昇のタイミングが一致すること，また1980年2月27日付近は水温フロントが湾口に急接近していたことが示されている．したがって，図-3に示すような湾口部の水温変動は，黒潮波及水によってもたらされていると考えられ，Case2のように湾口境界での水温を期間最低値に固定した計算とCase1を比較することによって，黒潮波及水の影響を抽出することが可能になると考えられる．

図-6に，湾口C点における水深20mでの残差流が最も強くなる2月27日の表層ならびに底層グリッドで得られた残差流の水平分布を示す．この結果を見ると，Case1とCase2とでは，残差流場の空間構造に違いが生じていることが分かる．特に，Case1ではCase2と異なり湾口境界付近の表層において反時計回りの循環流が形成されており，混合期の特徴的な水平残差流パターン「東側流入，西側流出」が明瞭に現れていることが分かる．また，桜島より北側 (北湾) で残差流の変化はほとんど見て取れないが，南湾の東岸沿いでは，Case2よりも強い湾奥向きの残差流がCase1において確認できる．

次に，表層の水温の水平分布を図-7に示す．なお，Case1については2月27日，3月4日，3月10日の結果を，またCase2については3月4日のみの結果を示す．上層流入の残差流が維持され (図-5, 6)，湾口の水温が高い期間 (図-3参照) に相当するCase1の2月27日，3月4日の結果では，東岸表層においてCase2にはない特徴的な高温域が形成されている．3月10日になると，湾内と湾口境界の水温差が小さくなり，この結果，残差流も弱まるので全体的に表層水温は水平方向に一樣になっている．しかしながら，それ以前の湾口からの熱の供給によって，Case1ではCase2よりも全体的に水温が高くなっている．Case1とCase2の3月4日の水温を比較すると，湾口からの

高温水の影響は，西桜島水道にまで及んでいることが分かる．

ところで，1979年の結果ではあるが，混合期の水温観測結果として櫻井ら¹⁾によって1月31日と2月1日の水深10mでの水温の水平分布が示されている．期間は異なっているものの，この実測結果は混合期の典型的な水温分布を示しており^{1), 2)}，しかも本計算結果がこの実測結果とほぼ同一のパターンを示していることから，本シミュレーションによって混合期の特徴的な物理環境を再現できたと判断できる．

(2) 湾口での残差流パターンの形成要因

以上のような残差流が形成される要因をより詳細に調べるために，コリオリ係数を0とする数値実験を行った (Case3)．なお，風の無いケースについても計算を行ったが，湾口近傍において風の有無による残差流場の有意な差は認められなかった (図示省略)．2月27日の

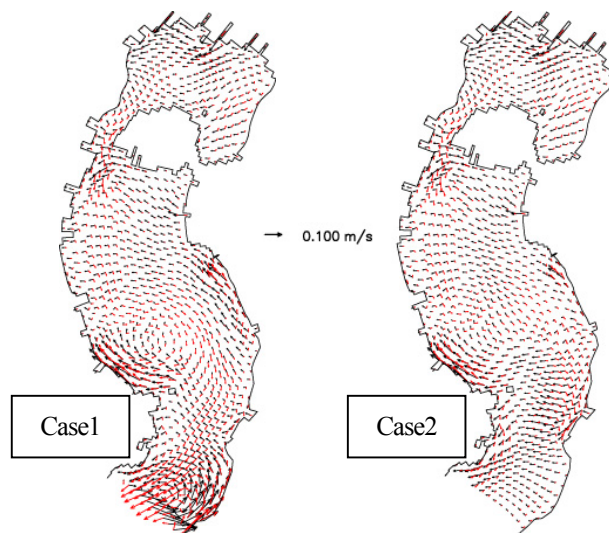


図-6 残差流の計算結果
(赤色：底層グリッドの結果，
黒色：表層グリッドの結果)

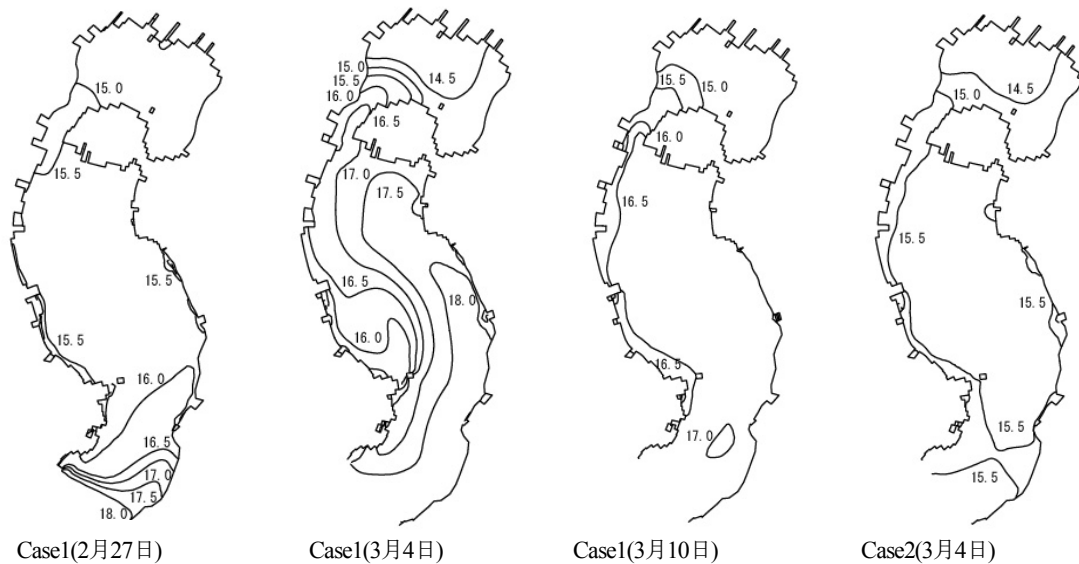


図-7 表層水温の水平分布の計算結果

表層・底層グリッドで得られた残差流ならびに表層水温を図-8に示す。これらの結果を見ると、コリオリ力の効果がない場合には、Case1とは異なり、湾幅にわたって「上層流入，下層流出」の残差流が湾口境界付近に現れており，2月27日の水温も湾幅方向に比較的一様な分布を示している。また，湾口の水温を15.5℃に固定したCase2と比べて，湾口水温が高い期間において鉛直方向に強いエクステンション・フローが形成されることから，鹿児島湾の湾口部における残差流は，湾口水温の上昇に伴って生じるバロクリニック圧の湾軸方向の勾配が駆動力となっていることが分かる。Case1でも，湾幅方向の平均で見れば「上層流入，下層流出」，すなわち鉛直方向のエクステンション・フローが形成されているが，コリオリ力の効果によって湾口境界での表層流速が東側へと偏向し，結果的に湾口付近の表層では反時計回りの環流が形成されている。以上のCase1～3の結果から，混合期において鹿児島湾の湾口付近に形成される残差流は，黒潮の水温フロントの接岸によってもたらされた湾口での水温上昇とそれに伴って生じる密度流がコリオリ力の影響を受けて形成されたものであることが分かる。

ところで，前田ら⁸⁾は，平面2次元モデルを用いて鹿児島湾の残差流形成メカニズムについて検討を行い，湾口での流れの流入を境界条件として強制的に与えると，観測から得られた湾内の水平循環流を精度良く再現できることを示している。また櫻井ら²⁾は，湾口の残差流の形成要因として，黒潮そのものの運動量の流入や気圧変化の影響の可能性を指摘している。このように湾内の水平循環を規定するいくつかの他の要因が指摘されているが，本研究のシミュレーション（Case1）により，これらの影響を湾口境界条件として加味しなくても比較的良好に現象を再現できることが明らかとなった。したがって，これらの要因は残差流の形成に対して2次的な影響

しか及ぼさないと判断される。平面2次元モデルでは，湾口近傍の残差流形成のトリガーとなるバロクリニック圧の効果を考慮することができないため，境界条件として強制的に流れの流入を与えなければ，前田ら⁸⁾の計算では現地観測結果を再現できなかったものと判断される。

また，上記のように湾口付近に形成される残差流はバロクリニック圧の水平勾配がトリガーとなって発生したと考えられるが，このような駆動力の大きさは一般に潮汐混合の程度によって変化する。したがって，潮差の変化は残差流の形成に多少なりとも影響を及ぼしていると考えられるが，図-5に見られるように，残差流の形成と潮汐変動との間に相関関係は見られない。したがって，潮差の変化も残差流の形成に対して2次的な影響しか及ぼさないと判断される。

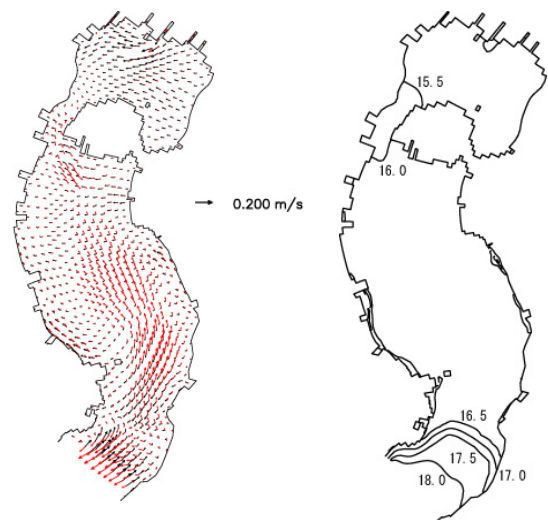


図-8 Case3における残差流と水温の水平分布計算結果
(赤色：底層グリッドの結果，
黒色：表層グリッドの結果)

(3) 湾奥部物理環境への影響

次に、湾奥部の物理環境に対する黒潮波及水の影響を調べるため、湾奥の地点F（図-1参照）における表層残差流の南北成分と水温についてCase1, 2の比較を行った（図-9参照）。この結果から分かるように、湾口から高温水塊が貫入し始めた期間（例えば2月27日，図-7参照）において、湾奥部の水温や残差流はその影響を全く受けない。しかし、高温水塊が西桜島水道を通じて湾奥にまで到達すると（例えば3月4日，図-7参照），水温に加えて残差流場も変化し，Case1,2の結果に差異が生じている。混合期では海表面を通じて海水は冷却されるので、湾口での高温水の接岸による加熱の影響は、成層期よりも顕著で、しかも「湾口高温，湾内低温」の水温構造は長期間継続する。したがって、上記のような湾奥部への影響は混合期特有の現象と考えることができるが、水温や残差流は湾奥部の水環境に対して重要な要素であるため、湾奥部の水環境を対象とする場合であっても、湾口の流動の影響を十分に考慮する必要があると言える。

4. 結論

本研究の結果を要約すると以下ようになる。

- 1) 混合期を対象として鹿児島湾の残差流の再現計算を行った。湾口の残差流や水温の水平分布の観測結果との比較より、構築したモデルは良好に実測結果を再現することが確認された。
- 2) 混合期の湾口部残差流場の形成要因として、黒潮フロントの離接岸に伴う湾口水温の変化によって生じる密度流が支配的であることが示唆された。
- 3) 密度流がコリオリ効果を受けることによって、鹿児島湾の混合期における残差流は上層において「東側流入，西側流出」のパターンを示すことが確認された。
- 4) 黒潮波及水が湾奥の物理環境に与える影響が明らかにされた。

謝辞：本論文を完成するにあたり、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ご提供いただきました。さらに、鹿児島大学工学部海洋土木工学科4年生・安井健君には、データ解析においてご協力いただきました。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）ならびに財団法人米盛誠心育成会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

- 1) H. Kikukawa et al. : Development of an interpolation method of NOAA/AVHRR images and its application to warm water intrusion into Kagoshima bay, *Mem. Fac. Fish. Kagoshima Univ.*, vol. 53, pp.22-36, 2004.
- 2) 櫻井仁人ら：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, 2000.
- 3) 安達貴浩ら：鹿児島湾湾口部における成層期の残差流構造，*海岸工学論文集*，第55巻，pp.996-1000, 2008.
- 4) 鹿児島県：第4期鹿児島湾ブルー計画資料編，2005.
- 5) Stelling, G. S. et al. : On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slopes, *Int. J. Num. Meth. Fluids*, vol.18, pp.915-955, 1994.
- 6) Murakami et al. : A numerical simulation of the distribution of water temperature and salinity in the Seto Inland Sea, *Journal of Oceanography Society of Japan*, vol.41, pp.221-224, 1985.
- 7) 菅原正巳：流出解析法，共立出版社，1972.
- 8) 前田明夫ら：鹿児島湾の混合期における海水循環に関わる数値実験，*桜島地域学術調査協議会調査研究報告*，1984.

(2008. 9. 30受付)

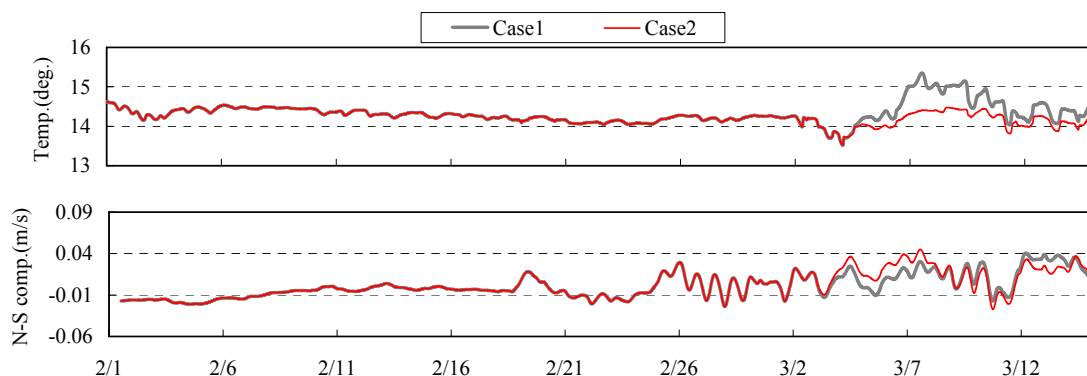


図-9 Case1,2 の湾奥での物理環境要素（水温，残差流）の比較