

3次元数値シミュレーションによる博多湾の 密度流構造についての検討

小松利光*・朴 童津**・安達貴浩***・小橋乃子****

1. 本研究の目的

比較的閉鎖性の強い内湾である博多湾では、ここ最近人口の増大や都市化に起因した富栄養化が慢性的に存在し、和白干潟への大量のアオサの漂着・腐敗、湾奥部における赤潮の発生などといった深刻な水環境上の問題が顕在化している。さらに、人工島の建設といった沿岸域の開発が湾内の水環境へ何らかの悪影響を与えることが懸念されていることから、博多湾内の流動メカニズムを明らかにし、人為的にもたらされた物理環境の変化が生態系へどのような影響を及ぼすのかを正確に把握することへの期待はより一層高まっている。

以上のような状況を考慮し、著者らは博多湾を対象とした3次元密度流数値シミュレーションを行い、博多湾の物質輸送を規定する支配的な要因と考えられる残差流の生成メカニズムについて検討した(小松ら, 2000)。この結果、塩分濃度の水平勾配に起因した密度流が最も支配的な残差流の成分となっており、その分布は3次元のかなり複雑なパターンをもっていることが明らかとなった。沿岸域における塩分濃度は、陸域から供給される淡水の流入と降水や蒸発による海面を通じた淡水の授受によって決定されているが、降水や蒸発の量は河川流量に比べて小さく、しかも両者は相殺し合うため、これらの影響はそれ程大きくないと推算された。従って、博多湾における塩分分布、延いては残差流パターンの形成には、河川からの淡水流入が最も支配的な要因となっているものと考えられる。

このため本研究では、河川からの淡水流入流量の空間分布特性や大きさが博多湾の残差流生成に如何なる影響をもたらしているのかを3次元数値シミュレーションによって検討した。そして得られた結果を基にして博多湾の残差流パターンの形成のメカニズム(中でも博多湾内

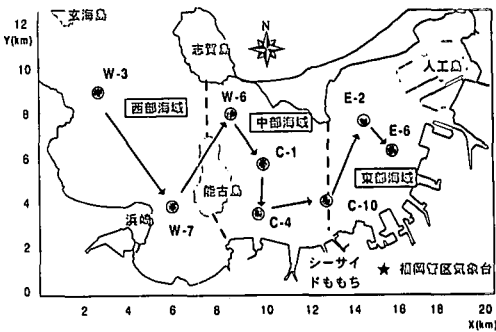


図-1 博多湾沿岸の概略図
(ただし、湾内の丸印は観測地点(福岡市, 1996))

の物質輸送に重要な役割を果たしていると考えられる能古島北側の密度流構造の生成要因)について考察を行った。

2. 気象条件ならびに河川からの淡水流入の特性について

(1) 降水量と蒸発量の季節変動特性

一般に、沿岸域での成層ならびに密度流動の特性は、気象条件などの外力の変化に伴って、季節的に大きく変化することが知られている。このため、まず福岡管区気象台で観測された1996年の気象データの内、塩・淡成層の形成に寄与すると考えられる降水量と蒸発量の季節変動の概略を説明する。なお、3-5月を春、6-8月を夏、9-11月を秋、12-2月を冬と定義し、各物理量の季節別平均値の比較を行った。まず、降水量の季節別平均値を比較すると、それぞれ2.7(春)、6.9(夏)、2.4(秋)、1.8(冬) mm/dayと夏季の値は冬季の約4倍となっている。一方、蒸発量については2.7(春)、3.4(夏)、2.1(冬)、1.1(冬) mm/dayであり、夏季において正味の淡水の授受が最も大きくなっていることが分かる。博多湾の表面積が約133 km²であることを考慮すると、夏季には正味46.6×10⁴ m³/dayの淡水が大気側から海側へ輸送されていることになる。

(2) 河川からの淡水流入流量の時空間分布

図-2は、博多湾沿岸の河川流入地点ならびに流入流

* フェロー 工博 九州大学大学院工学研究院教授 環境都市部門沿岸域環境学講座
** 学生会員 修士 九州大学大学院 工学研究科海洋システム工学専攻
*** 正 会 員 工博 九州大学大学院工学研究院助教授 環境都市部門沿岸域環境学講座
**** 学生会員 修士 九州大学大学院 工学研究科海洋システム工学専攻 日本学術振興会 特別研究員

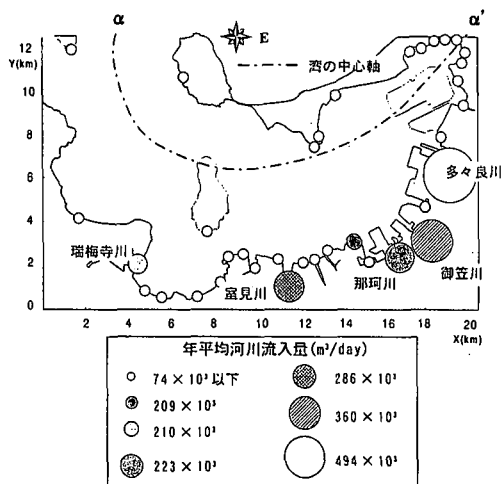


図-2 河川からの淡水の流入地点と流入量

量の大きさを示したものである。湾の中心線 ($\alpha-\alpha'$ 線) を基準にすると、合計 36 の流入河川の内、27 河川が南側の沿岸から流入していることが分かる。流入量の大きさについても、南側からの流入が全体の 96% を占めており、河川水の流入状況が南北方向に極度に非対称な分布となっていることが大きな特徴である。

次に、河川からの淡水の総流入流量の季節変化を見ると (図-3)、他の沿岸域と同様に夏季において河川流入量が最も大きく、1.5 (春)、4.7 (夏)、2.0 (秋)、1.6 (冬) × 10⁶ m³/day と夏季の総流量は冬季の約 3 倍となっている。また、海面からの淡水の流入が比較的大きい夏季においてですら、正味の淡水流入量は河川流入量の 1 割程度でしかないことから、博多湾の塩分分布の形成は河川からの淡水流入流量のみで十分議論できるものと考えられる。

3. 数値シミュレーションの概要

(1) Smagorinsky モデルを用いた水平方向の拡散能の評価

前報の数値シミュレーション (小松ら, 2000) では、水平方向の拡散係数を一定と仮定し、fitting によりその値を決定していたが、博多湾のように比較的複雑な流動場では、水平方向の拡散係数も時・空間に大きく変動していることから、上記のような仮定には自ずと限界があると考えられる。そこで、今回は以下の Smagorinsky モデル (Smagorinsky ら, 1965) を採用し、水平方向の拡散能を評価した。

$$D_{ix} = D_{iy} = C_{diff} \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \dots (1)$$

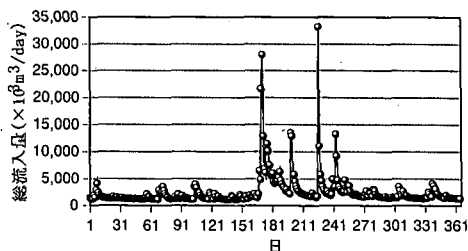


図-3 全河川の淡水総流入量の季節変化

ここで、 D_{ix} 、 D_{iy} はそれぞれ x 、 y 方向の水平方向の拡散係数、 u 、 v はそれぞれ x 、 y 方向の流速である。また、無次元の係数 C_{diff} は、海洋では通常 0.1—0.2 程度の値を取ると言われているが (Ezer・Mellor, 2000)、ここでは fitting からその値を 10 とした。Smagorinsky モデルを用いて行った現況再現計算の結果と観測結果を併せて図-4 に示す。横軸には湾口から湾奥にかけての観測地点を並べており、W-3 が湾口側の観測点である (図-1 参照)。まず、夏季と冬季の水深平均残差流 (図-5) を見ると、夏季には西部海域において 3 次的に複雑な残差流が形成されているのに対し、冬季には残差流が大幅に弱まっており、そのパターンも夏季のものと大きく異なっていることが分かる。これは季節毎の淡水流入流量や気象条件の違いによって生じた結果と考えられる。また、本シミュレーションでは、通常よりもかなり大きな C_{diff} の値を採用しているにも拘わらず、成層が発達する夏季の湾奥側の観測点の値が過小評価されていることが分かる (図-4)。これは前報で指摘したように、適用した数値モデルの鉛直分解能の不足により、湾奥の重力循環流が弱められたことを反映した結果と考えられる。しかしながら、Smagorinsky モデルの採用により季節毎の残差流の違いや塩分分布の局所性がより明確になっており、水平方向の拡散係数を一定とした場合よりも残差流

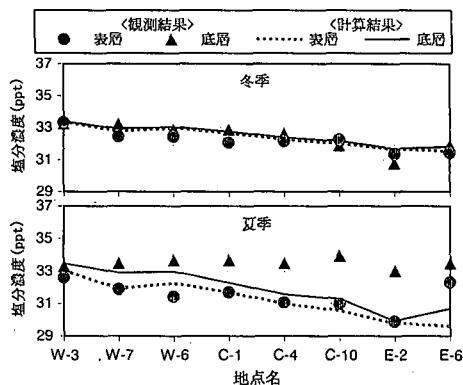


図-4 塩分濃度の流下方向分布

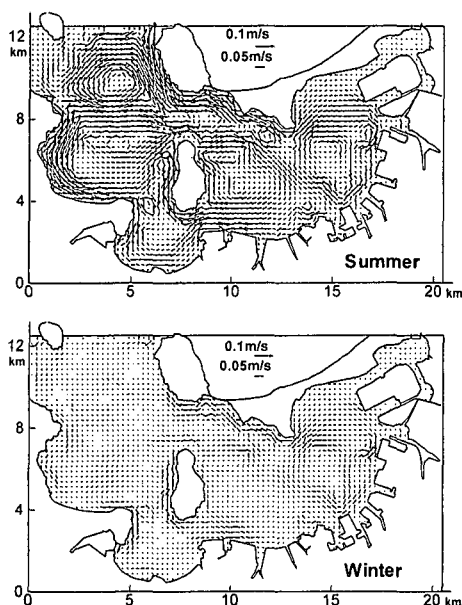


図-5 水深平均された残差流 (非定常計算)

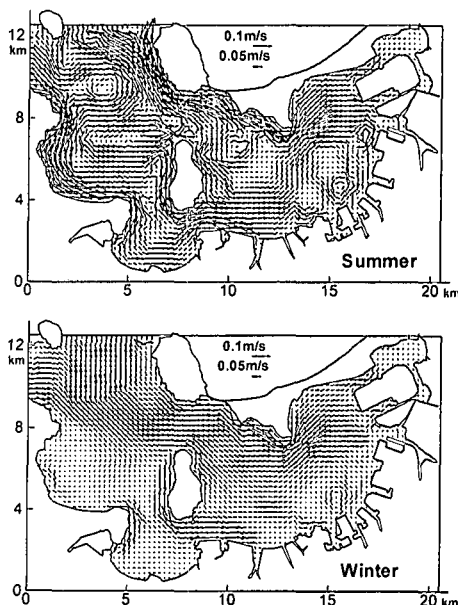


図-6 定常計算によって得られた水深平均残差流

パターンがより精度良く再現されていると考えられる。

(2) 定常計算による検討

前節では、月齢の違いによる潮差の変化や風の季節変動などの影響を考慮し、1年間を通じた密度流の非定常計算を行った。この結果、博多湾では残差流が夏季と冬季とで大きく異なっており、夏季の残差流は独特の流動パターンをもつという知見が得られた。ところが、このような非定常計算は結果の比較検討が行いにくいというだけでなく、現象の複雑さがその場の特徴を捕らえにくくするといった問題を有している。そのため、潮汐として M_2 分潮のみを開境界に与え、雨、河川流量、開境界の塩分・水温は季節平均値を与えることによって季節毎に周期的な現象を実現し(以下、定常計算)、前節の非定常計算と結果の比較を行った。なお、気温、風、湿度に関しては1日の間の変動も重要となるため、各季節毎に平均的な1日の間の時間変動を与えた。図-6に定常計算によって得られた夏季と冬季における水深平均された残差流のパターンを示す。図-5の非定常計算の結果と比較すると、夏季の残差流パターンは両者ともほぼ一致しているのに対し、冬季については残差流のパターン、絶対値のいずれについても一致度はそれ程良くないことが分かる。今回はそれ以上詳細な検討は行っていないが、現象の非線形性によってこのような差異が生じたものと考えられる。両者の違いは予想以上に大きいことから、今後より詳細に議論を行う必要があると言える。しかしながら、夏季の残差流のパターンや夏季と冬季に見られる残差流の大きさの変化といったおおまかな傾向性は再現できているので、次章以降は定常計算による数値実験を

行い、淡水流入の影響について検討を行うことにする。

4. 河川からの淡水流入と残差流との関係

(1) 河川からの淡水流入の空間的な非対称性の影響

まず、2(2)で示したような河川からの淡水流入が南北方向に極度に非対称な分布をもつことの影響を調べるため、河川全流入量を夏季の平均値に固定し、河川流入地点を南北方向に入れ替える数値実験を行った(CASE 1, 図-7)。淡水流入の影響が最も顕著に現われる表層での残差流の結果を図-8に示す。現況の結果(図-8a)ではA-A'線よりも西側の南岸から流入した淡水は主に能古島南側の水路から流出するのに対し、東側の南岸から流出した淡水は一旦北上し、その後大きく南側に旋回した後、能古島の北側から流出し、その一部は反時計周りの還流と合流している。一方、河川からの淡水流入点

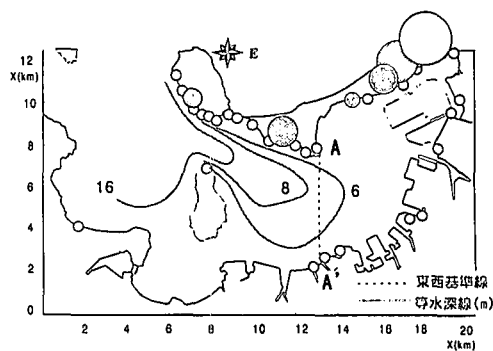
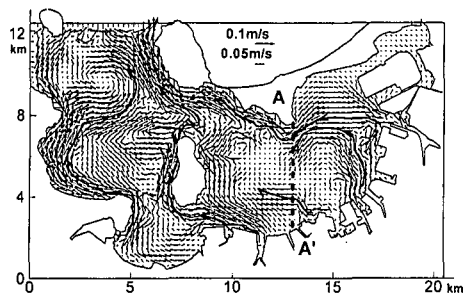
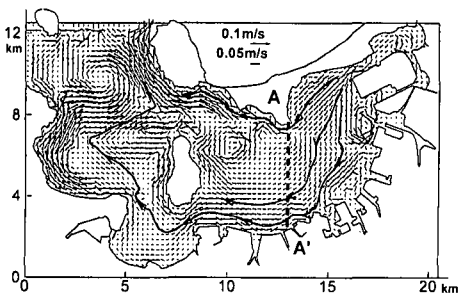


図-7 河川流入地点の入れ替えの様子



(a) 現況 (定常計算)



(b) 河川流入地点を入れ替えた場合 (CASE 1)

図-8 表層の残差流パターン
(ただし、実線は流線を示す)

を入れ替えた図-8bの結果を見ると、湾奥北側から流出した河川水は湾奥から蛇行しながら流下し、主に能古島の南側の水路へ流出している。以上のように、河川流入の南北非対称な分布はA-A'線よりも湾奥側の残差流パターンには影響を及ぼしているものの、西部海域において見られる特徴的な残差流の構造にはそれ程大きな影響を与えないことが見て取れる。

(2) 河川からの淡水流入量の大きさの影響

次に他の条件は固定し、夏季における河川からの淡水流入流量のみを全河川について一定の割合で変化させ、種々の河川流量に対する残差流の変化を調べる数値実験を行った(CASE 2)。得られた結果の一例として、淡水流入流量が現況の10%となる場合の表層の残差流パターンを図-9に示す。夏季の現況再現計算結果(図-8a)と比較すると、残差流のパターンにはそれ程違いが見られないが、河川流量の減少に伴い、残差流の強さが大幅に減少していることが分かる。より定量的な議論を行うために、次に各ケースの流入量と残差流の大きさとの関係を調べた(図-10)。なお、横軸の r_q は数値実験に用いた河川流入量と観測値との比を示しており、残差流の強さは湾内全域の表層から底層までの残差流のR.M.S.値を用いて評価した。また、河川流入量の変化に伴う塩・淡成層の変化を調べるために、観測点E-6(図-1参照)の底層と表層の塩分濃度の差を水深平均の塩分濃度で無

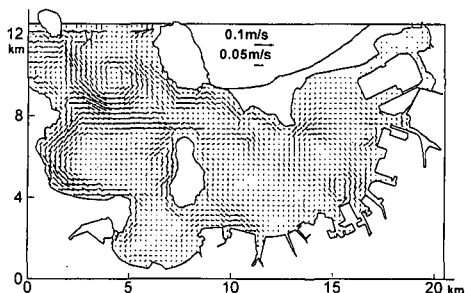


図-9 河川流量の減少による残差流の変化

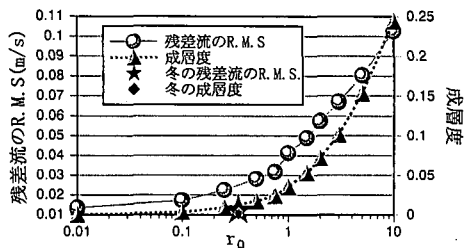


図-10 河川流量と残差流の大きさの関係

次元化し、成層度として定義した。図-10の結果を見ると、 $r_q < 0.1$ の範囲において残差流は小さく、しかも河川流量の増加に対して緩やかにしか増加していないが、 r_q が0.1を超えると、流量の増加に伴い残差流はその大きさを急増させていることが分かる。図-10で成層度と残差流のR.M.S.値がほぼ対応して変化していることから、このような結果は淡水流入量、すなわち浮力のインプットの増加に伴って塩淡成層が発達し、鉛直循環が強化されることを示唆するものと判断される。

また、冬季の結果を図-10にプロットすると、海面からの淡水の授受の程度が夏季と若干異なることが原因となっており、完全な一致は見られないが、残差流の強さ、成層度いずれについても上記の数値実験とほぼ一致した結果を示すことが分かる。この結果より、冬季の残差流が大幅に小さくなることの理由として、河川流量すなわち浮力のインプットの減少により、密度流が弱められたことが主な原因であることが理解できる。

5: 西部海域における密度流構造についての考察

以上の結果を総合して、博多湾内の物質輸送に重要な役割を果たしていると考えられる西部海域の特徴的な密度流項造の生成原因について考察を行う。著者らは、河川からの淡水流量の南北非対称分布が上記の流動を生じさせる1つの要因ではないかと考え、その影響を数値実験によって評価した。その結果、このような非対称性は

中部ならびに東部海域の流動には寄与しているものの、西部海域への流動に対してはそれ程影響を及ぼさないことが明らかとなった。また紙面の都合上、結果の掲載は省略したが、風向、風速、一方向からの連吹時間などを種々変化させる数値実験を行ったところ、このような海上風の違いも西部海域の残差流のパターンを大きく変化させるような影響力を有していないことが明らかになった。更に、河川からの総淡水流入量によって西部海域の残差流はその強さを変化させているが、ある程度の成層が保たれていれば構造そのものは大きく変化しないのに対し、成層が一旦消滅すると、複雑な流動パターンも同時に消失するといった結果が得られた。

ところで、Fischer (1972) は、緩混合型のエスチャリーでは、バロクリニックな圧力が水深によって変化するため、幅方向に水深が変化する幾何形状に対して、深い部分で陸向き、浅い部分で沖向きの水平循環流 (transverse gravitational circulation) が生じていることを理論的に明らかとした。本研究の結果、1) 西部海域における複雑な残差流は浮力のインプット以外の外力から殆ど影響を受けていないこと、2) 能古島北側の水路部においても深い部分で湾奥側、浅い部分で沖側の流動パターンとなっていること、3) 上記のような水平循環流は成層形成時のみ形成されること、等の知見が得られているが、以上の考察を踏まえると、西部海域において顕著に見られる複雑な残差流は、Fischer の示唆する transverse gravitational circulation の一種ではないかと考えられる。このような水平循環流は、エスチャリー域の物質輸送を規定する最も重要なメカニズムであることが指摘されており、博多湾内の物質輸送を考察する上で、その流動のメカニズムと物質輸送能力の定量評価は不可欠であると考えられる。

6. 結 論

博多湾では塩分濃度の水平勾配に密度流が最も支配的な残差流成分であるという従来の知見を踏まえて、本研究では、3次元密度流数値シミュレーションにより、博多湾の密度流構造の生成要因について検討を行った。そ

の結果、以下のような新たな知見が得られた。

1) 博多湾沿岸域は河川からの淡水流入が南北方向に極度に非対称な分布をもつといった特徴を有しているが、このような河川流入の非対称分布特性は湾奥部の表層における残差還流のパターンに影響を及ぼしているものの、湾全体の残差流系にはそれ程寄与していないことが分かった。

2) 河川からの総淡水流入量によって西部海域の残差流はその強さを変化させているが、ある程度の成層が保たれていれば構造そのものは大きく変化しないのに対し、成層が一旦消滅すると、複雑な流動パターンも同時に消失することが明らかとなった。

3) 紙面の都合上、結果の掲載は省略したが、博多湾における風の作用は密度差により生成された残差流パターンを大きく変えるような力は無いことが分かった。しかしながら、一定方向に風が強く連吹すれば水深が浅い湾奥の表層の残差流パターンや沿岸に沿う残差流パターンが大きく変化し、その補償流が底層に現われることが確認された。

4) 種々の数値実験からの総合的な考察により、西部海域において見られる複雑な密度流は、Fischer によって transverse gravitational circulation と名付けられる循環流の一種である可能性が示された。

参 考 文 献

- 小松利光・朴 童津・Yongming Shen・安達貴浩・小橋乃子 (2000): 3次元数値シミュレーションによる博多湾の物質輸送メカニズムについての検討, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 476-480.
- 福岡市環境局環境保全部啓発推進課 (1996): 福岡市水質測定結果報告, pp. 147-180.
- Ezer, T. and G. L. Mellor (2000): Sensitivity studies with the North Atlantic sigma coordinate Princeton Ocean Model, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 32, pp. 185-208.
- Fischer, H. B. (1972): Mass transport in partially stratified estuary, *J. Fluid Mech.*, vol. 53, part 4, pp. 671-687.
- Smagorinsky, J., S. Manabe and J. L. Holloway (1995): Numerical results from a nine-level general circulation model for the atmosphere, *Mon. Weather Rev.*, 93, pp. 727-768.