

内部潮汐を考慮した湾の流況予測シミュレーション

武 内 智 行*

1. はじめに

多くの場合、簡単のために密度成層を考慮せずに流況予測が行われている。しかし、沿岸域の流況調査の結果、内部潮汐などの現象がますます明らかになりつつあり、成層期の流況を十分考慮した上で生物生息環境や水質環境を検討することが必要である。

三重県五ヶ所湾では湾口付近を避難泊地として利用するための防波堤の構想が具体化しつつある。この検討に際しては、湾内の水質保全の観点から、湾内の海水交換への影響予測が必要である。しかし、流況等の物理環境についての調査資料が断片的なものしかなく、現況そのものにも不明な点が多かった。特に、夏季の密度成層を考慮したデータが不足していた。そのため、1993年に湾内全域にわたる四季別の流況調査が行われた。その観測結果から、6月および9月の密度成層期に内部潮汐の現象のあることがわかった(武内, 1995; 藤原ら, 1995)。この内部潮汐の特徴は、湾奥に侵入するにつれて波高が減衰し、湾奥には稀にしか達していないものの、湾口付近の界面の鉛直変動量は十数m、湾央でも数mあり、湾の海水交換への寄与は大きいと考えられることである。

この結果を参考にして、内部潮汐を模擬した数値計算を行い、観測値との整合性を検証すると共に、防波堤の配置による流況の変化を明らかにした。その結果をもとに、湾内の海水交流への影響を検討した。

2. 計算内容

(1) 計算方法

多層レベル密度流モデル(中田ら, 1983)を用いた数値シミュレーションを行った。多層レベル密度流モデルの理論は、平面近似された回転地球上の粘性非圧縮性流体で、鉛直方向には静力学的平衡、 f -平面近似が成立することを仮定している。基礎方程式は次の7つの方程式、すなわち① x および② y 方向の運動量方程式、③質量保存式、④自由表面の式、⑤熱量、⑥塩素量の保存則と⑦状態方程式である。

運動方程式の移流項は風上差分、時間項は前進差分、

その他の項は中心差分で近似した。その他の式についても同様である。

水平方向は100m×100m(メッシュ数95×103)、鉛直方向は最大12層に分割した(表-1)。水位境界として南端(湾外)境界に大潮時の潮位変動を与えた。また、水温、塩分の初期値と南端境界の水温振幅は1993年6月20日12時から22日12時まで(内部潮汐が顕著に見られた時期の代表として選んだ)の現地観測結果をもとにモデル化した。各層ごとに境界の水温振幅を変えることで内部潮汐を模擬した。

(2) 計算ケース

内部潮汐の現象を再現する計算(現況)を先ず行い、次に湾口付近に避難泊地を設けるために防波堤を配置した場合の流況予測計算を行った(表-3、図-1)。なお、防波堤は不透透型を仮定した。

3. 計算結果

(1) 現況再現計算結果(ケースI)

計算結果を現地観測データと比較し、計算の再現性を

表-1 計算条件一覧

空間差分 (dx, dy, dz):	
水平方向	100 m×100 m (メッシュ数 95×103)
鉛直方向	最大 12 層に分割 (表-2 参照)
時間差分 (dt):	1 s
水平渦動粘性係数 (N_x, N_y):	10 m ² /s
水平温度拡散係数 (k_x, k_y):	1.0 m ² /s
鉛直温度拡散係数 (k_z):	0.00001 m ² /s
水平物質拡散係数 (K_x, K_y):	1.0 m ² /s
鉛直物質拡散係数 (K_z):	0.00001 m ² /s
海底摩擦係数 (γ_b):	0.0026
水位境界:	南端境界に大潮時の潮位変動(振幅 0.75 m, 周期 12 時間)、東西で 0.25 度の位相差
流速境界:	東西端で流入なし、南端は自由流出
水温境界:	流出時は自由流出(勾配 0)、流入時は南端でモデル化した水温変動(初期値に加えて表-2 に示す振幅(潮汐と同位相))を与えた。
塩分境界:	自由流出
流速初期値:	全領域で 0
水温、塩分初期値:	(表-2)
水面での熱収支:	考慮せず
コリオリ力:	考慮する

表-2 鉛直方向の分割と初期値等

層番号	水深 (m)	初期値		水温振幅(°C)
		水温(°C)	塩分(psu)	
1	0.0- 5.0	22.0	33.6	1.0
2	5.0-10.0	21.8	33.8	1.0
3	10.0-12.5	21.6	34.0	1.0
4	12.5-15.0	21.4	34.1	1.0
5	15.0-17.5	18.2	34.2	2.0
6	17.5-20.0	16.2	34.3	1.5
7	20.0-22.5	16.0	34.4	1.0
8	22.5-25.0	15.9	34.5	1.0
9	25.0-27.5	15.8	34.6	1.0
10	27.5-30.0	15.7	34.6	1.0
11	30.0-35.0	15.7	34.6	1.0
12	>35.0	15.7	34.6	1.0

表-3 計算ケース一覧

番号	施設配置
I	現況
II	相賀浦防波堤 (NE 1000 m)
III	相賀浦防波堤+宿田曾防波堤
IV	相賀浦防波堤+宿田曾防波堤+沖防波堤

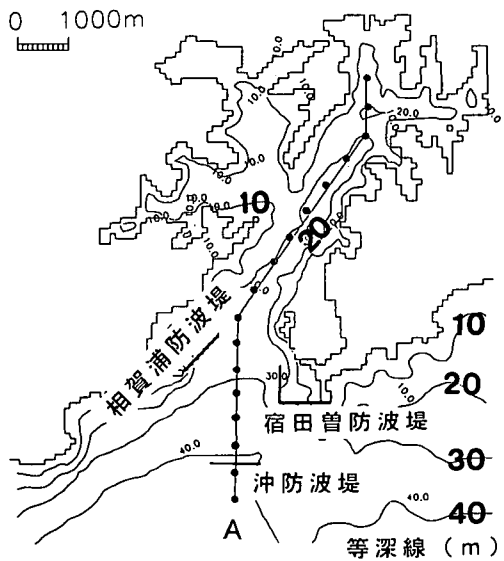


図-1 計算対象領域と防波堤の位置

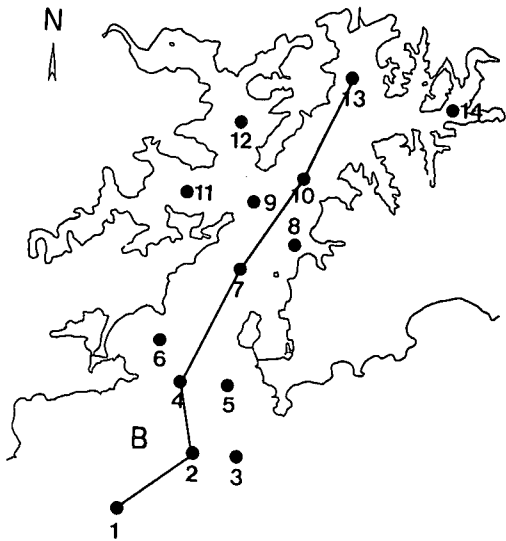


図-2 流況観測地点

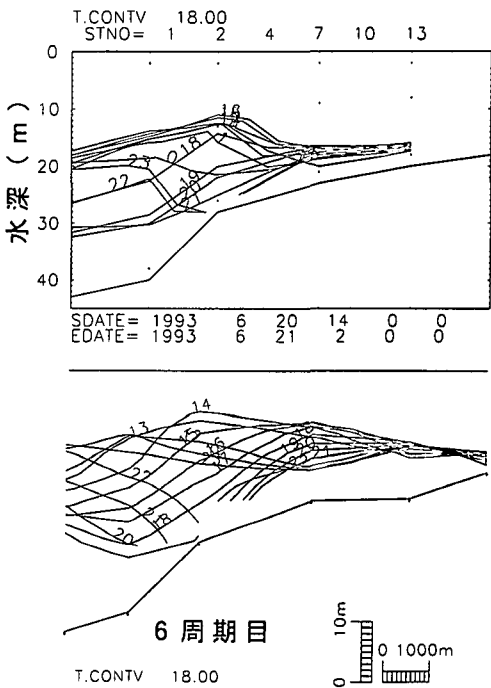


図-3 界面変動の比較 (上段：観測値, 下段：計算値)

検討した。なお、密度界面は現地調査結果から 18°C の等水温線で代表させた。湾外から湾奥までの現地観測地点 6 点を結ぶ鉛直断面(図-2 の B 線)における界面位置を 1 時間毎に 24 時間にわたって重ね書きしたのが図-3 である。観測値の図中の小点は観測位置を示す。観測は 3 層(測点 13 は 2 層)であるが、計算では最大 12 層に分割しており、鉛直方向の分解能は異なっている。計算値の方が観測値よりも界面位置がやや浅いが、内部潮汐の

現象は再現できている。また、図-4 に水温・流速断面分布の一例を示す。観測値と計算値とで若干の相違はあるものの、定性的にはかなり一致している。流速の大小関係は測点によりまちまちであるが、平均的にはほぼ同じ程度になっている。観測値には種々の要因が関係していることを考えると、内部潮汐の再現計算としては定量的にも極めて精度が良いものといえよう。したがって、こ

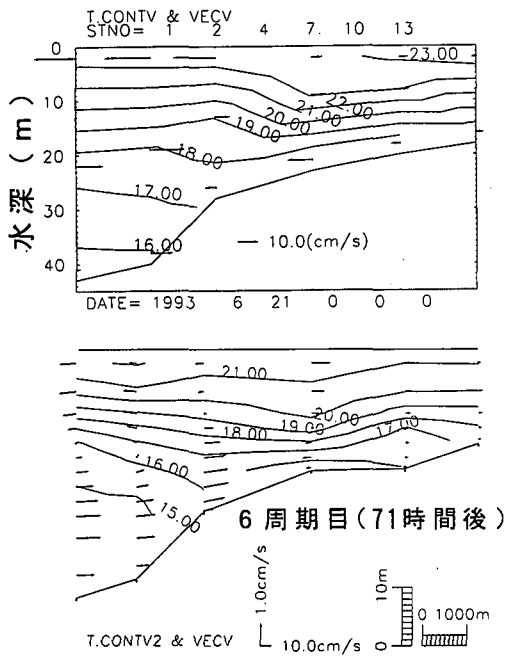


図-4 水温・流速の断面分布
(上段：観測値，下段：計算値)

の計算に用いた諸条件を予測計算にも用いることにした。

(2) 流況予測計算結果 (ケース II, III, IV)

それぞれのケースについて、湾外から湾奥までの17点を結ぶ鉛直断面 (図-1のA線) における密度界面の鉛直変動量 (図-5) と残差流の鉛直断面分布 (図-6) を比較検討した。なお、ここでは一周期平均流速を残差流速とした。また、図-5および図-6において左から5～6点目が湾口、同じく10～12点目が湾央に位置する。

a) 界面の鉛直変動量

密度界面の鉛直変動量について、ケース I (現況) と比較して、次のことがいえる。ケース II では、湾外から湾口付近にかけて変動量の増大が見られたが、湾央から湾奥にかけての変動量の変化はほとんどなかった。ケース III では、湾奥の変動量が若干小さくなっていた。また、界面位置が全体的にやや低くなっていた。ケース IV では、湾口部、湾央部とも変動量が小さくなっていた。また、ケース III と同様に界面位置も全体的にやや低くなっていた。なお、ケース IV の図で、左から2番目と3番目の点の間に沖防波堤が存在している (図-1) ことに注意されたい (作図の便宜上、図中の線はそのまま結んである)。

b) 残差流の鉛直断面分布

図-6の残差流分布を見ると、ケース I (現況) では、湾央付近の中層で湾内向き、同じく上層で湾外向き、湾

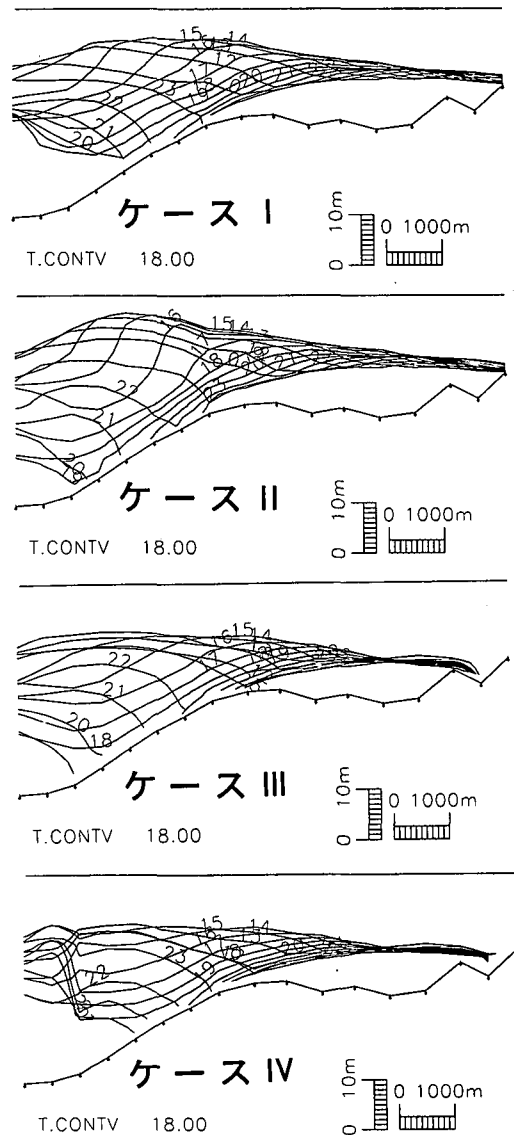


図-5 界面の鉛直変動量の比較

口付近の下層で湾外向き、同じく上層で湾内向きの流れとなっており、進行波としての内部潮汐の特徴をよく再現している。他のケースをこのケース I と比較すると、次のことがいえる。ケース II では、湾口付近で残差流の強さに若干の違いがある。例えば、中層で湾内向きの流れがやや強くなっている。しかし、分布パターンは同じである。また、湾央から湾奥にかけてはほとんど相違がない。ケース III では、湾口付近の下層の湾外向きの流れが弱まっている。湾央中層での湾内向きの流れは約半分程度に小さくなっている。表層の残差流も湾内では若干小さくなっている。ケース IV ではケース III と同様の傾向が見られる。湾口底層の残差流はケース III よりもさら

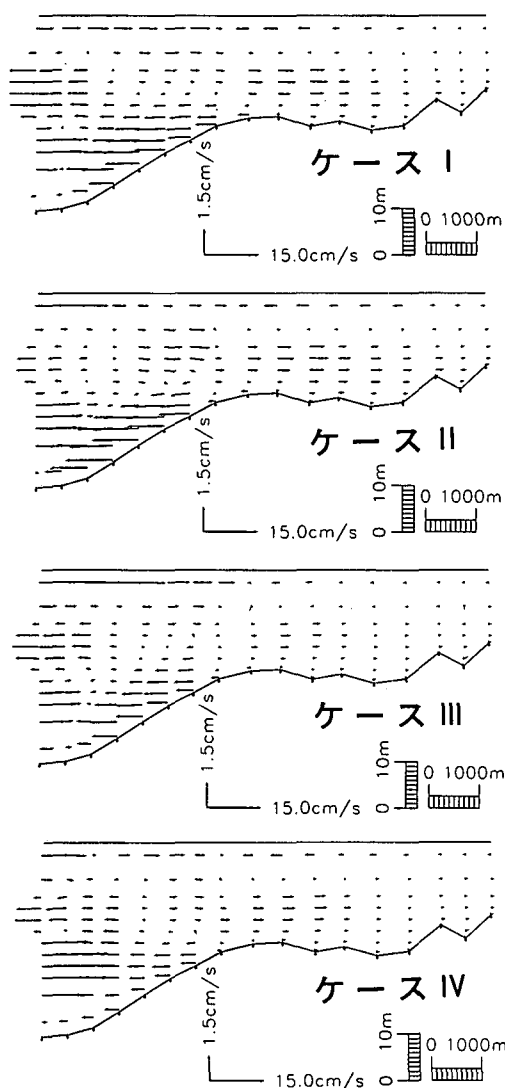


図-6 残差流の鉛直断面分布の比較

に小さくなっており、ケース I の $2/3 \sim 1/2$ 程度になっている。

4. 考 察

(1) 海水交流の検討

密度界面の鉛直変動量がケース II では、ケース I と比較して、湾外から湾口にかけて増大していたのは、相賀浦防波堤の導流（縮流）効果によるものと考えられた。ケース III で湾奥の変動量がやや小さかったのは、宿田曾防波堤が湾口を若干遮る形になるためであろう。ケース IV で湾口部、湾央部とも変動量が小さくなっていったのは、沖防波堤が内部潮汐を遮る形になるためであろう。同様の影響が、残差流速の分布にも現れており、ケース

IV (および III) では湾口から湾央にかけての残差流が小さくなっていった。なお、紙面の都合で図示していないが、平面分布からも同様のことがいえる。

このような計算結果から、沖防波堤の設置は内部潮汐を遮る形の配置になるため、密度界面の鉛直変動量が小さくなり、残差流速も小さくなることが分かった。このことは、沖防波堤の設置によって海水交換量が大きく減少することを示唆する。湾口および湾央付近の横断面を通過する流量を試算したところ、1 周期あたりの海水交換量は現況に比べて、湾口付近で 35% 程度の減少、湾央付近で 12% 程度の減少となる。また、宿田曾防波堤の設置によっても、沖防波堤ほどではないが、同様の影響が懸念される。この場合は、湾口、湾央とも現況比で 10% 程度の減少となる。

したがって、今後はこの湾の内部潮汐の機構をさらに詳しく調べると共に、防波堤等の構造も考慮した湾内流況変化予測を行う必要がある。今回の計算では不透過型の防波堤を仮定したが、基本的には内部潮汐をできるだけ遮らないような構造配置を検討する必要がある。なお、ケース II では湾内の海水交流への影響はほとんどないが、防波堤で囲まれた相賀浦内の水質については悪化の可能性があるため、水質保全のための工法を検討する必要がある。例えば、防波堤の一部や基部をあけるなどの工夫や、さらには海水導入工のような工夫も場合によっては必要であろう。

(2) 密度分布を考慮しない手法との比較

表-4 は密度分布を考慮せず、表面潮汐のみを考慮した流況予測計算を行った結果である(武内, 未発表)。マーカーを用いた海水交流・交換シミュレーションを行った。表中の数字で、分数の分母はマーカーの流入個数、すなわち海水交換量の指標である。同じく分子はマーカーの残留個数で、海水交換量の指標である。% 表示の数字は海水交換率に相当する。湾央部と湾口部のそれぞれの横断面で個数を計算した。

この結果では、防波堤を設置しても海水交換量はほとんど変化しない。また、湾央部の海水交換量もほとんど変化しない。湾口部では施設配置による局所的な流況の違いから、海水交換量は増大している。しかし、前述の密度分布を考慮した計算からはこのような結果は出てこない。逆に、施設の配置によっては内部潮汐を遮る結果

表-4 単層モデルによる海水交流・交換

ケース番号	湾 央	湾 口
I	119/1389=8.6%	113/1270=8.9%
II	127/1388=9.1%	238/1181=20.2%
III	120/1386=8.7%	211/1091=19.3%
IV	120/1380=8.7%	193/1132=17.0%

となり、海水交流・交換量が小さくなることが示唆されている。したがって、この湾のように内部潮汐の発達する場合の海水交流・交換を検討するためには、表面潮汐のみを考慮した計算では不適切であり、密度分布を考慮すべきであることがわかる。

なお、湾口および湾央付近の横断面における1周期当たりの海水交換量を試算した結果によると、内部潮汐を考慮した計算では、密度分布を考慮しない単層モデルの計算に比べて、湾口で3.57倍、湾央で1.34倍であった。

5. おわりに

本論文では三重県五ヶ所湾を対象として、密度成層期の流況計算を行い、観測値との整合性を検証すると共に、防波堤の配置による流況の違いを明らかにした。その結果をもとに、防波堤の配置による湾内の海水交流の違いを明らかに出来た。

従来は、密度差を考慮せず表面潮汐のみしか考慮しない流況予測計算が多かったが、成層期の流況を十分考慮した上で、湾内の生物の生息環境や水質環境を検討する必要のあることがわかった。

しかし、沿岸域の内部潮汐などの密度流現象の解明はまだ十分ではない。高知県野見湾では、湾口で振幅が小さく、湾奥で振幅の非常に大きい内部潮汐が観測されている(萩野, 1993)。これは、内部潮汐の共振現象が生じていたものと考えられている。また、五ヶ所湾への湾外水の侵入については沿岸湧昇との関連も示唆されている(阿保ら, 1996)。

今後、沿岸域の密度流現象を考慮した現地調査や環境予測手法の開発がさらに進展することを期待したい。

参考文献

- 阿保勝之・杜多 哲・西村昭史 (1996): 五ヶ所湾への湾外水の侵入と沿岸湧昇, 沿岸海洋研究, 第33巻, 2号, pp. 211-220.
- 武内智行 (1995): 三重県五ヶ所湾の成層期の流況特性, 平成7年度日本水産工学会学術講演会論文集, pp. 1-2.
- 中田喜三郎・堀口文男・田口浩一・瀬戸口泰史 (1983): 追浜湾の三次元潮流シミュレーション, 公害資源研究所彙報, 第12巻, 3号, pp. 17-36.
- 萩野静也 (1993): 成層した内湾の漁場水理環境に関する研究, 水産工学研究所報告, 第14号, pp. 1-49.
- 藤原建紀・高橋鉄哉・阿保勝之・杜多 哲 (1995): 内部潮汐による五ヶ所湾の海水交換, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1111-1115.