

内部潮汐を考慮した英虞湾の流動シミュレーション

上野成三*・灘岡和夫**・高山百合子***・勝井秀博****

1. はじめに

最近, 内部潮汐が湾の海水交換に大きく寄与する実態が明らかになりつつあり (藤原ら, 1995; 杜多・阿保, 1997; 上野ら, 1999a), その現象を数値計算で再現する試みがなされている (Lamb, 1994; 武内, 1996; 上野ら, 1998). しかし, 内部潮汐に起因する流動・水質変化は日オーダーの短い時間スケールを持つ現象であることから, この動的変化を捕らえた観測データはほとんどなく, 計算精度の検証が困難な状況にある. そこで, 内部潮汐が頻繁に観測されている英虞湾を対象として50日間の連続観測を実施し, 流動と水質・生態系が一体となったデータセットを得た. 本研究では, この観測データをもとに, 現地の現象を忠実に再現する流動シミュレーションを実施した. 特に, 通常の計算では考慮されない内部潮汐の再現性に着目した計算精度の検証を行い, 計算の問題点を抽出した. さらに, 海水交換に対する内部潮汐の寄与を定量化した.

2. 観測データの概要

対象海域である英虞湾の地形と観測点を示す (図-1). 英虞湾は湾口部 (st. C) にシルがあり, そのシルを越えて内部潮汐が間欠的に湾内へ侵入することが観測されている (杜多・阿保, 1997). 観測点は湾軸に沿って, 湾口部から湾奥部までの7点とし, 水温・塩分, 流速などを連続計測した. 観測期間は1998年6月1日から7月20日の50日間である.

観測期間での特筆すべき現象として, 内部潮汐の湾内侵入と湾口部での黒潮系水塊の滞留があげられる. 図-2に示した湾口部 (st. A) と湾奥部 (st. F) の水温の経時変化によると, 湾口部の st. A の底層水温に間欠的な変動が見られ, 内部潮汐が湾口部へ来襲しているのが分かる. これに対応して, 湾奥 F 点底層の水温は急激に上昇している (図中の↑). これは, 内部潮汐が湾内へ侵入した結果, 湾外の高温水が湾内へ流入したことを示してい

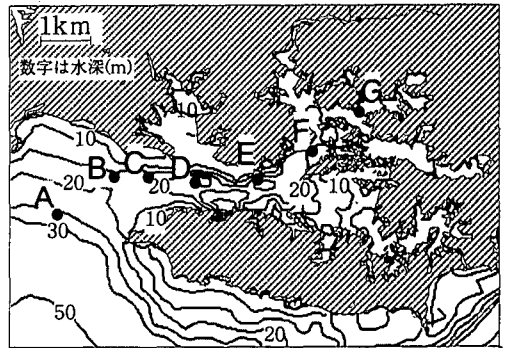


図-1 英虞湾の地形と観測点

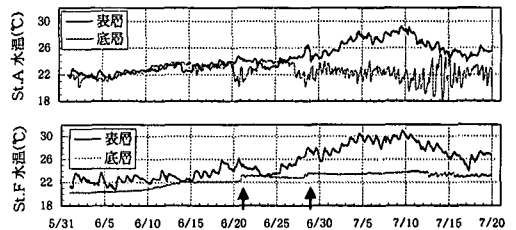


図-2 湾内外の水温の経時変化 (観測値)

る. また, 表層の水温が, st. A, F とも7月上旬に約30°Cまで上昇した. これは, この時期に, 晴天の日が続いたことと, 高水温の黒潮系水塊が英虞湾の湾口部に滞留したことが原因である. なお, 本観測データの詳細については上野ら (1999a, 1999b) を参照されたい.

3. 流動シミュレーションの概要

(1) 計算モデルと計算方法

計算プログラムはデルフト水理研究所で開発された Delft 3D flow を使用した. 本プログラムは, 静水圧近似を仮定し $k-\epsilon$ モデルを導入した流動計算と, 水温・塩分の移流拡散計算を行うものである. 計算モデルと検証データの観測点を示す (図-3). 内部潮汐は St. A で観測された水温・塩分の鉛直分布を開境界に入力して表現した. また, 観測値や予報値から潮位・風・河川流入・降雨・日射などの時間変化を外的条件として入力した. 水

* 正 会 員 工 修 大成建設(株)技術研究所海洋水理研究室
** フェロー 工 博 東京工業大学大学院教授 情報理工学研究所
*** 正 会 員 大成建設(株)技術研究所海洋水理研究室
**** 正 会 員 工 博 大成建設(株)技術研究所海洋水理研究室長

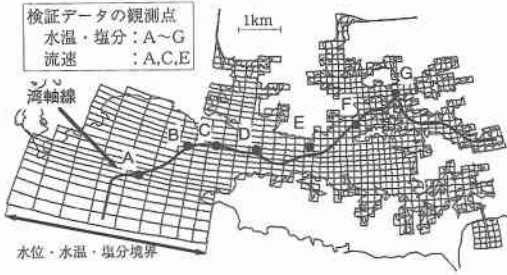


図-3 英虞湾の計算モデルと検証データの観測点

平グリッドは直交曲線座標で約 1000 に、鉛直には σ 座標で 20 層に分割した。

(2) 計算上の工夫

本計算では内部潮汐の再現に注力していることから、数値拡散により成層が弱くなる現象を極力抑制する必要がある。しかし、 σ 座標を用いた計算では、地形が急変する密度成層場で数値拡散が大きくなる問題がある。そこで、本計算では、クリープ補正 (Stelling・Kester, 1994) の採用に加えて、実地形の細かい凹凸をやや平滑化して、 σ 座標に伴う数値拡散を極力軽減した。しかし、後述するように、数値拡散による影響は計算結果の一部で有意となった。

湾口部で観測した風速が湾全体に様に作用するとした試算によると、湾奥部で顕熱・潜熱による熱放出が強くなりすぎて水温が大幅に低下した。そこで、英虞湾のようなリアス式地形では、地形の遮蔽効果により湾奥部で風速がかなり小さくなることを考慮して、本計算では湾奥部の風速を湾口部の風速の 50% に低減させた。ただし、この低減率はおよその目安として設定したもので、定量的な根拠はない。

本計算では海上降雨による淡水供給を考慮した。この理由は、英虞湾の流域面積 (約 62 km²) に比べて湾の水表面積 (約 26 km²) が無視できないことによる。しかし、後述するように海上降雨を考慮した効果は計算結果に大きく影響しなかった。

4. 流動シミュレーションの結果および考察

(1) 水温・塩分変動の再現性

全観測期間について、St. A (湾口部)、St. C (シル上)、St. F (湾奥部) における水温の鉛直分布の時間変化を比較する (図-4)。まず、観測値の特徴を述べる。St. A では、6/1 から 6/20 の期間で、水温分布はほぼ一様で、水温も低目で推移している。その後、表層での水温上昇に伴い水温成層が発達し、7/1~7/10 の期間では非常に強い水温成層が生じる。7/10 を過ぎると、水温成層が弱くなり、全体的に水温低下が生じる。水温成層が顕著とな

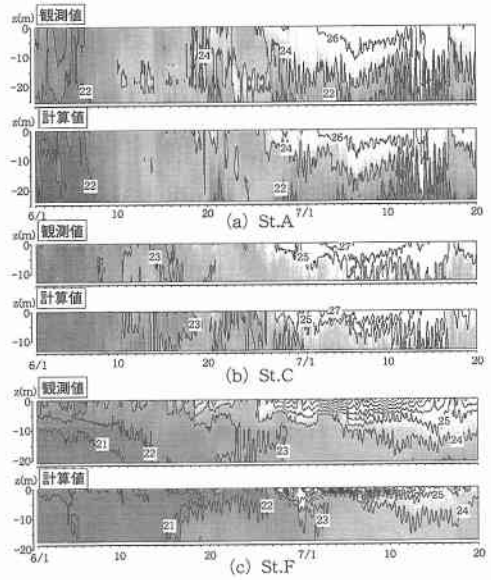


図-4 水温分布の時間変化の比較

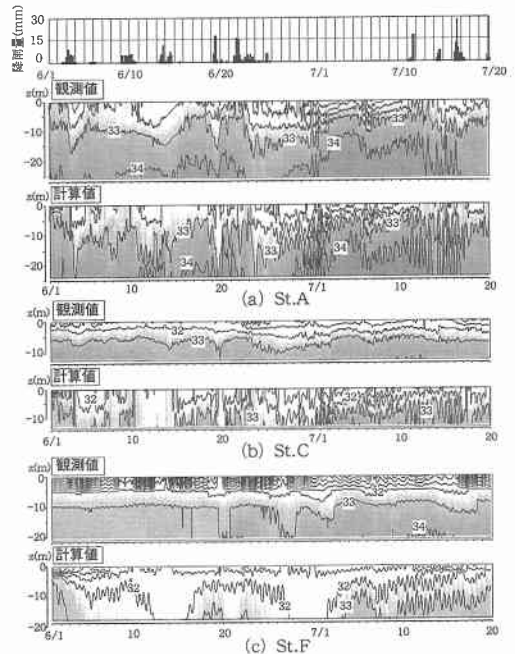


図-5 塩分の時間変化の比較

る 6/20~7/20 の期間では、等水温線が上下に変動している。これは内部潮汐の来襲を示している。特に、7/10~7/17 の期間で等水温線の変動幅が大きく、強い内部潮汐の来襲があったことが分かる。St. A で見られた上記の特徴は、St. C, F ともに、ほぼ同様に認められる。ただし、7/10~7/17 の期間で見られる等水温線の変動幅は湾奥部

に向かうほど小さくなることから、内部潮汐が湾内へ侵入するに伴い内部潮汐の振幅が減少していることが分かる。

水温の計算値では、St. A, C, Fとも、上記に述べた観測値の特徴をほぼ良好に再現した。特に、内部潮汐の状況については、計算された等水温線の変動幅がやや大きいものの、St. Aにおける内部潮汐の来襲状況やSt. C, Fにおける湾内への侵入時期など、主要な現象の再現性は非常に高い。

次に、塩分について、St. A, C, Fの鉛直分布の時間変化を比較する(図-5)。図-5には降雨量の経時変化もあわせて示した。St. Aにおける観測値では、全期間を平均的にみると、表層で約31 psu、底層で約34 psuとなる塩分成層が形成されている。しかし、表層の塩分値の変動は大きく、31 psu以下の低塩分水が間欠的に発生する。これは降雨時の淡水供給に対応している。内部潮汐の特徴としては、水温変動と同様に、7/10~7/17の期間で34 psuの等塩分線の変動幅が大きくなり、強い内部潮汐の来襲があったことが分かる。St. Cでは、St. Aとほぼ同様に、表層で約31 psu底層で約33 psuとなる成層が形成されている。しかし、等塩分線の変動幅は小さい。St. Fでは、水深5 m以浅に強い塩分成層が発達している。また、表層塩分は降雨期に低下し、その応答性はSt. A, Cに比べて高い。よって、St. Fでは河川水からの出水の影響が大きいことが言える。また、内部潮汐の強い期間である7/10~7/17の期間では、底層で34 psuの等塩分線の変動が見られる。

塩分に対する計算値と観測値の一致度は、水温の場合に比べて、低下する。St. Aでは、表層の塩分低下や内部潮汐の来襲状況など主要な現象は良好に再現できた。ただし、等塩分線の変動幅がやや大きく計算された。St. Cでは、観測値に比べ、等塩分線の変動幅が大きく計算され、全体的に再現性が低下する。これは、St. Aで等塩分面の変動幅が過大になった影響を受けているためである。St. Fの計算値では、観測値に見られる水深5 m以浅の強い成層は形成されず、全体的に鉛直混合が大きくなっていることが分かる。以上のように塩分の計算値では、湾奥に行くに従い再現性が悪化する傾向がある。

本計算では、開境界条件としてSt. Aの観測データを入力しているため、St. Aの計算値と観測値は必然的に一致度が高くなる。しかし、海岸地形の形状や海岸線での反射などが現地と計算で異なる要素があり、かつ、St. Aでの再現性は湾内での再現性に大きく影響するので、ここでは、St. Aでの一致度を詳しく確認した。

(2) 塩分の鉛直分布の再現性

水温に比べて、塩分の計算値の再現性が低下する原因を検討する。最も再現性が低下する降雨後の塩分鉛直分

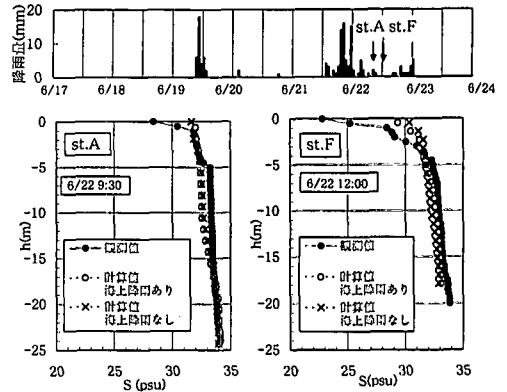


図-6 降雨時の塩分分布の比較

布について、海上降雨を考慮した場合としない場合の計算値を観測値と比較する(図-6)。観測値では、St. A, Fとも、水深1 m以浅で強い塩分成層が形成しており、特に、河川流の影響の大きいSt. Fでは表層の塩分が大きく低下している。これに対して、計算値では、観測値に比べて、表層の成層が弱くなっている。表層の塩分成層が弱く計算された結果、水深全体の塩分分布の計算値は、観測値に比べて、表層は高く、中・底層は低くなる。表層の塩分成層が弱く計算される理由として、観測された表層成層の厚さ(約1 m)に対して、計算で用いた計算グリッドの鉛直解像度が低いため(2, 3グリッド)、数値拡散が大きくなることが上げられる。なお、海上降雨を考慮した計算値は、考慮しない計算値に比べて、海面での淡水供給量が増加するため表層の塩分がやや低下するものの、表層成層の再現性はほとんど改善されない。表層の計算グリッドの解像度不足が本質的な問題である。

なお、図-4で示したように、水温の再現性は塩分に比べて良好であった。これは、水温の鉛直分布は塩分に比べて緩やかな成層状態となっており、数値拡散の影響が小さかったためである。

以上より、本計算では、観測値の特徴である極表層の強い塩分成層を精度良く再現するには、計算グリッドの鉛直解像度が不十分であることが明らかになった。よって、塩分の再現精度の向上には、表層での計算グリッドの鉛直解像度を上げることが必要となる。しかし、実用的な計算効率の観点からは、数値拡散がさらに少ない計算スキームの開発が必要である。

(3) 内部潮汐の湾内侵入過程の再現性

本計算の重要なポイントである内部潮汐の再現性について、内部潮汐が湾内へ侵入する状況、湾軸断面の水温・流速分布により比較する(図-7)。7月13日10:00の観測値では、湾外の低温水がシル頂上付近まで来襲している。計算値ではこの特徴が良好に再現できた。7月

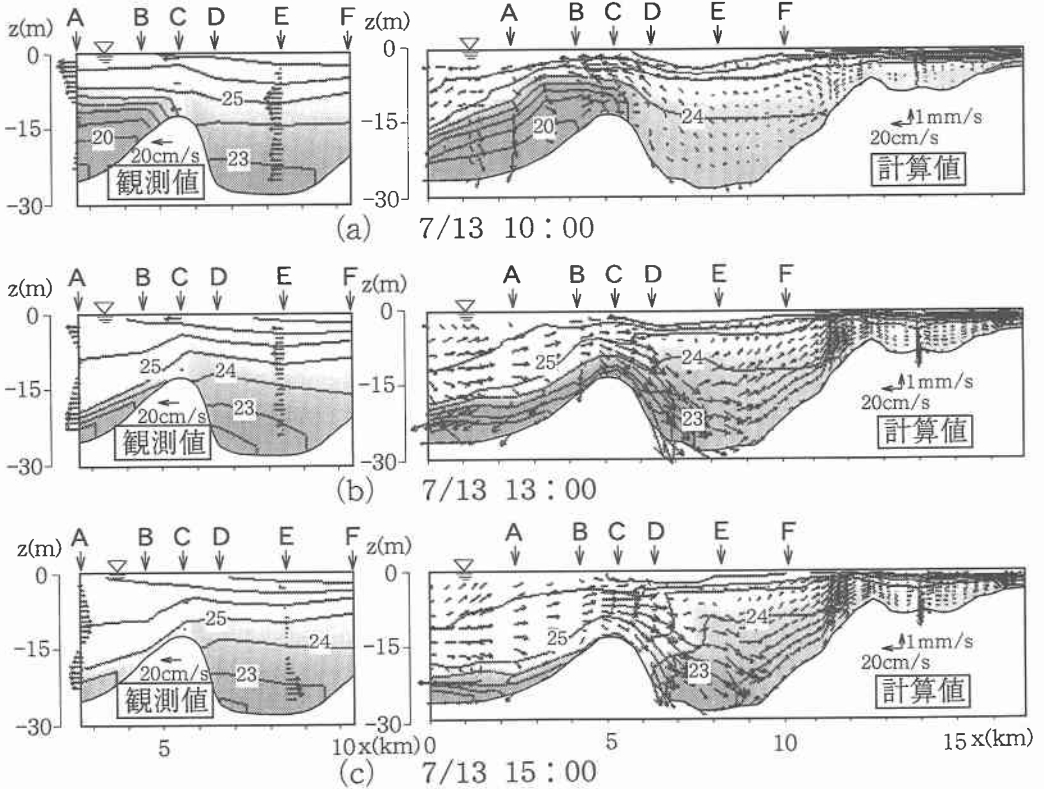


図-7 内部潮汐侵入時の流速・水温分布の比較

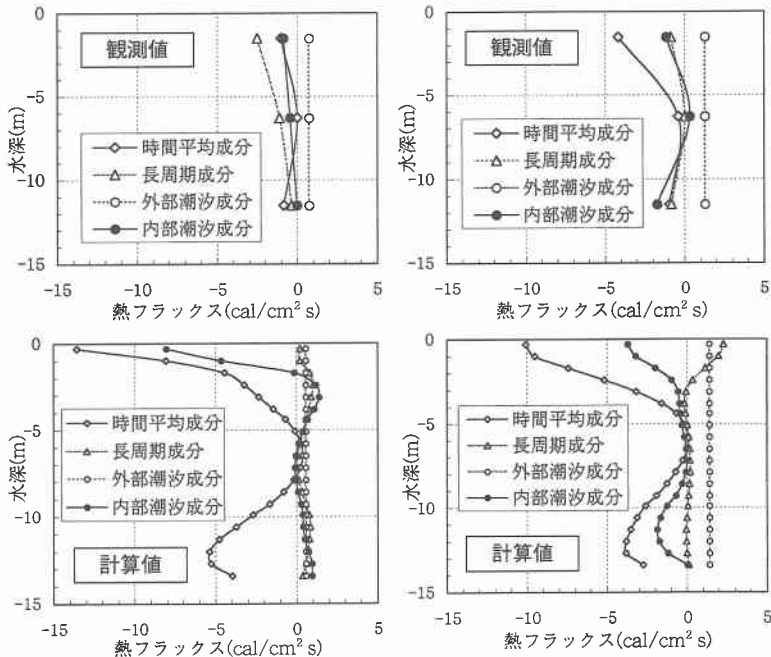


図-8 熱フラックスの各成分の鉛直分布 (St. C, シル上)

13日13:00の観測値では、内部潮汐がシルを越え、低温水が湾内に侵入している。内部潮汐特有の流速分布はSt. A, Cに見られ、St. Aの表・底層で流出、中層で流入、St. Cの表層で流出、底層で流入となった。計算値では、湾外の低温水がシルを越えて湾内に侵入する状況は概ね再現でき、流速分布についても、大きさに違いが見られるものの、内部潮汐特有の流れ場はほぼ再現できた。7月13日15:00の観測値では、内部潮汐が完全にシルを越え、湾内に侵入している。流速分布はSt. Eの底層で流入となり、内部潮汐は底層に沿って進行し、St. Eにまで到達したことが分かる。計算値では、内部潮汐が底層に沿って湾内に侵入する状況と、St. Eの流速分布などの特徴が良好に再現できた。

以上より、本計算では、水温分布における内部潮汐の侵入の過程や、内部潮汐特有の流速分布が良好に再現できたと言える。

(4) 内部潮汐による海水交換能力の定量化

熱フラックスの各変動成分を比較し、内部潮汐による海水交換を定量化する。熱フラックスの各変動成分は、時間平均成分、長周期成分(周期25時間以上)、外部潮汐成分(周期25時間以下の成分の鉛直平均値)、内部潮汐成分(周期25時間以下の成分と外部潮汐成分の偏差)に分解した。ただし、時間平均成分は算出誤差の大きい時間・鉛直平均成分を除外し、時間平均・シア成分のみとした。St. Cの流速・水温データから算出した上記の4成分の鉛直分布を、内部潮汐が弱い期間(7/1~7/10)と強い期間(7/10~7/20)別に比較したものを図-8に示す。内部潮汐が弱い期間の観測値では、各成分ともほぼ同じオーダーであり、熱フラックスに対して卓越する変動成分は認められない。一方、計算値では、時間平均成分の表・底層と、内部潮汐成分の表層で熱流出が大きく計算されており、観測値との一致度が悪い。内部潮汐が強い期間の観測値では、時間平均成分と内部潮汐成分ともに、表層と底層で熱流出が大きくなる。また、計算値と観測値を比較すると、絶対値は異なるものの、分布形のパターンの再現性は良い。この時期の熱フラックスの鉛直構造は、時間平均的な鉛直循環流と内部潮汐の侵入により、底層で外洋の低温水が流入し、表層で湾内の高温水が流出するパターンとなっている。以上より、内部潮汐が強い期間では、海水交換に対する内部潮汐の寄与が時間平

均流と同オーダーになることが分かった。

5. 結 論

英虞湾での連続観測データを用いて、流動シミュレーションの再現精度を検証した。以下に主要な結論をまとめる。

- ①本計算では、水温成層の発達・減衰、内部潮汐による変動など観測値で得られた結果を良好に再現した。
- ②本計算では、水温変化に比べて、塩分変化の再現性が低下した。これは、計算グリッドの鉛直解像度の不足により、観測で得られた表層の強い塩分層が再現できないためである。
- ③本計算では、内部潮汐がシルを越えて湾内へ侵入する過程が良好に再現できた。
- ④内部潮汐が強い期間では、海水交換に対する内部潮汐の寄与が時間平均流と同規模になることが分かった。

謝辞：本研究は農林水産新産業技術開発事業「水産養殖海域の水質汚染を予防する環境管理エキスパートシステムの開発」の成果であることを付記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・勝井秀博(1998): 湾口シルで碎波する内部潮汐の海水交換能力に関する数値実験, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 461-465.
- 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・片倉徳男・岡田美穂・勝井秀博(1999a): 英虞湾における黒潮系水塊と内部潮汐による海水交換, 平成11年度日本水産工学講演会, pp. 63-66.
- 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・片倉徳男・岡田美穂・関根義彦・勝井秀博(1999b): 水質環境の動的変化に注目した英虞湾の現地観測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1051-1055.
- 武内智行(1996): 内部潮汐を考慮した湾の流況シミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1141-1145.
- 杜多 哲・阿保勝之(1997): 内部潮汐の sill 越えによる英虞湾への湾外低温水の侵入, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1166-1170.
- 藤原建紀・高橋哲哉・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.
- Lamb, K. G. (1994): Numerical experiments of internal wave generation by strong tidal flow across a finite amplitude bank edge, *J. Geophysical Research*, Vol. 99, pp. 843-864.
- Stelling, G. S. and J. A. V. Kester (1994): On the approximation of horizontal gradients in sigma co-ordinates for bathymetry with steep slopes, *Int. J. Numerical Method of Fluids*, Vol. 18, pp. 915-955.