

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

上野 成 三*・灘岡 和 夫**・高山百合子***・勝井 秀 博****

1. はじめに

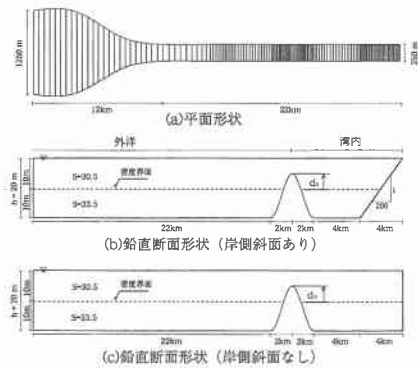
最近、内部潮汐により湾内水が外洋水と急激に交換される現象が報告されており（藤原ら, 1995；杜多・阿保, 1997）, 閉鎖性海域の海水交換にとって内部潮汐の役割が注目されている。内部潮汐による海水交換は内部潮汐の碎波による流れや乱れに起因すると考えられる。よって、海水交換を強めるには、内部潮汐を湾内へ進入させると同時に、いかに効率良く碎波させるかが重要となる。一方、湾口部にシル（浅瀬）を持つ湾は海水交換が悪く、シルが流れの阻害要因と考えられている。しかし、内部潮汐の観点で考えると、シルにより内部潮汐を強制的に碎波させることも可能である（Castro・Snyder, 1993；Lamb, 1994a）。そこで、本研究では、シルによる内部潮汐の碎波と海水交換の数値実験を行い、海水交換の強化に最適なシルの条件を検討する。さらに、内部潮汐・表面潮汐・吹送流の各外力に起因する海水交換能力と比較し、内部潮汐による海水交換の有用性を明らかにする。

2. 数値実験の方法と条件

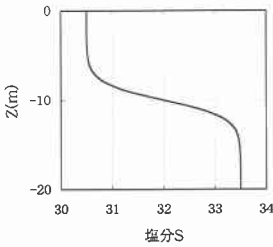
2.1 数値計算手法

基礎方程式は、静水圧近似を用いた鉛直 2 次元の流れの運動方程式・連続式と塩分の移流拡散方程式を採用した。また、乱流モデルとして $k-\epsilon$ モデルを用いた。計算プログラムはデルフト水理研究所で開発された delft 3 d-flow を用いた（Delft Hydraulics, 1997）。このプログラムの差分精度は 2 次で、移流項の差分に伴う数値粘性は 4 次であり（Stelling, 1984）、安定性が高く数値粘性が小さい差分モデルである。内部潮汐の既往の計算例として、静水圧近似を用いたレベルモデルによる計算（武内, 1996）、静水圧近似を用いない計算（Lamb, 1994 b）がある。碎波のような非線形性の強い内部波の計算で静水圧近似を用いると波形や伝播速度の計算精度が低下するとの指摘がある。しかし、内部波の碎波の計算にとって、

静水圧近似による計算誤差以外にも、碎波による鉛直混合の計算誤差も大きく、単に非静水圧の計算を行っても全体の計算精度は向上しない。そこで、本計算では、計算速度を重視して静水圧近似を用いることとした。なお、一樣斜面上の内部界面波の碎波に関する実験（Helfrich,



図一 海域モデル



図二 塩分の初期分布

表一 数値実験ケースの一覧

ケース	海域モデル	シル高/水深比 d_s/h	内部潮汐振幅 a_i (m)	表面潮汐振幅 a_o (m)	風向風速 W (m/s) (風向)	目 的
a-1	岸側斜面あり	-0.5	2	0	0	シル高と海水交換の関係
a-2	#	-0.25	2	0	0	
a-3	#	-0.125	2	0	0	
a-4	#	0	2	0	0	
a-5	#	0.125	2	0	0	
a-6	#	0.25	2	0	0	
b-1	岸側斜面なし	-0.5	2	0	0	岸側斜面の影響
b-2	#	-0.25	2	0	0	
b-3	#	0	2	0	0	
b-4	#	0.25	2	0	0	
c-1	岸側斜面あり	0	0	1	0	表面潮汐・風の影響
c-2	#	0	0	0	5 (沖向き)	
c-3	#	0	0	0	5 (岸向き)	
c-4	#	0	2	1	0	

* 正会員 工修 大成建設(株) 技術研究所海洋水理研究室
** 正会員 工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究所情報環境学専攻
*** 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

1992)について再現計算を行った結果、砕波波形にやや不一致がみられるものの、内部波の伝播や砕波後の段波の生成などは概ね再現できた(上野ら, 1998)。

2.2 海域モデル

海域モデルは、湾口部にシルを持つ湾(長さ 34 km, 一様水深 $h=20$ m)を基本とし、岸側部に斜面が有る場合と無い場合の2通りとした(図-1)。外洋と湾内の境界にシルを設置し、シル高さ d_s (内部界面位置を基準に上側を正)を変化させた。海域モデルの平面形状は沖側境界部で幅を広くした。沖側境界で波高の大きな内部潮汐が作用すると境界部の数値拡散が大きくなる問題が生じた。そこで、開境界付近の幅を拡大し内部波高を低下させた。塩分 S の初期条件は水深 10 m の内部界面を境に表層で 30.5, 底層で 33.5 とした(図-2)。沖側境界での S 分布を時間変化させて内部潮汐(進行波としての波高 $H_I=4$ m, 周期 $T=12.4$ hr)を発生させた。また、湾内に仮想的な汚濁物質(初期濃度 $c_0=100$)を与えて湾内水の海水交換パターンを可視化した。計算グリッドは、内部波形の前傾化やオーバーハングが再現できる様に細かくした。水平方向の計算グリッド幅は砕波領域で約 100 m(内部波長の約 1/150)とし、鉛直方向は σ 座標で水深を 20 分割した。水平渦動粘性係数を $5 \text{ m}^2/\text{s}$, 海底摩擦係数を 0.0026 と設定した。計算タイムステップは 15 秒, 計算時間は 15 潮汐とした。

2.3 数値実験ケース

実験ケースの一覧を表-1 に示す。岸側斜面有り無し2通りの海域モデルについて、シル高 d_s を変化させた検討を行った。また、外力として、内部潮汐のみ、表面潮汐のみ、吹送流のみ(風向は岸向きと沖向きの2通り)、内部潮汐と表面潮汐を同時に作用させた場合について比較を行った。なお、現地の内部潮汐の強度は一定でなく時間変動が大きい。そこで、各ケースの流況・海水交換の特性を内部潮汐の作用時間別に検討した。

2.4 σ 座標系に伴う数値拡散の抑制

σ 座標系を用いた場合、密度成層下の地形急変場の計算を行うと数値拡散が大きくなることが知られている。ここでは、 σ 座標面に添った拡散勾配を水平面に補正するクリープ補正(Stelling・Kester, 1994)を導入し、 σ 座標系に伴う数値拡散を低減した。クリープ補正の有り無しで流速・塩分の分布(3周期平均値)を比較する(図-3)。クリープ補正ありに比べて、クリープ補正なしの結果は塩分成分が弱まっており、数値拡散により鉛直混合が大きくなる。また、流速分布も両者で大きく異なる。 σ 座標系を用いた計算で、シル上の内部潮汐のような、地形が急変する密度成層場を扱う場合、数値拡散を低減させることが必要不可欠であることが分かる。

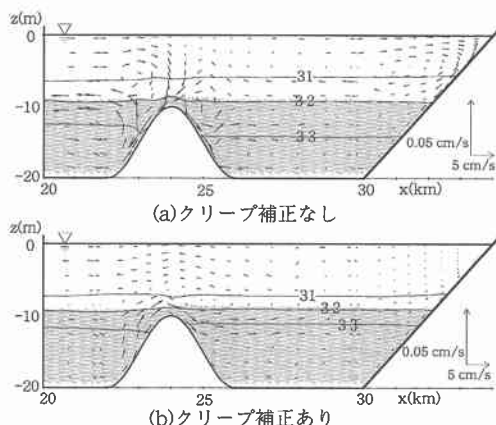


図-3 クリープ補正の有無による流況・塩分分布の違い(ケース a-4, $d_s/h=0$, 3~5 周期の平均値)

3. 数値実験結果

3.1 内部潮汐の砕波の様子

シル高 d_s を変化させたケースで流速と塩分 S の分布を比較する(図-4)。塩分コンターは $S>32$ の領域を灰色で表示した。シルが無いケース a-1 ($d_s/h=-0.5$) では、岸側の斜面上で砕波が生じ強い流れが発生する(図-4(a))。ただし、一様水深部で見られる鉛直循環は内部潮汐の波動運動である。シル高さが内部界面位置と一致するケース a-4 ($d_s/h=0$) では、シル上での強制砕波が生じるとともに、斜面上でも小規模の砕波が見られる(図-4(b))。シル高さが内部界面位置より高いケース a-6 ($d_s/h=0.25$) では、シル上での砕波は生じず、内部潮汐がシルで反射する(図-4(c))。また、内部潮汐は湾内へ侵入できず、流れがよどむ。

3.2 平均流況と湾内水の流出パターンの特徴

内部潮汐の作用時間 t による平均流況と湾内水の流出パターンの変化を調べる。まず、 $t=3T\sim 5T$ の期間について、時間平均した流速・塩分・仮想的な汚濁物質濃度の分布を図-5 に示す。シルの無いケース a-1 ($d_s/h=-0.5$) では、岸側斜面上の砕波により循環流が発生して塩分成分が弱まるものの、湾内全体の流れは弱い。汚濁物質濃度は初期分布からほとんど変化せず、海水交換が弱いことが分かる。これに対して、ケース a-4 ($d_s/h=0$) では、シル上の砕波に起因して、シルの直上で湾内への越流が発生し、外洋水が湾内へ侵入する。表層では、逆に、湾内水が外洋へ流出する。ケース a-6 ($d_s/h=0.25$) では、シルの直上で弱い越流が生じるものの、湾内の流れは非常に弱く、汚濁物質濃度は初期状態からほとんど変化しない。なお、シルの沖側部では循環流が発生して塩分成分が弱まる。以上より、内部潮汐の作用時間 t が $3T\sim 5T$ と比較的短期の条件では、シル高さが内部界面

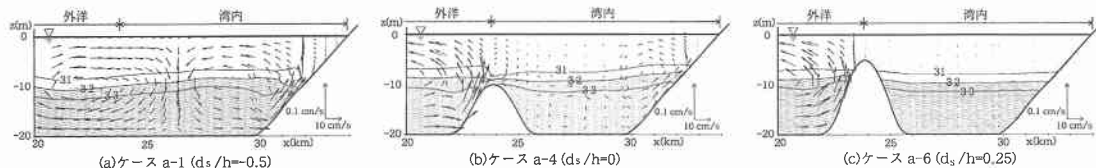


図-4 内部潮汐の碎波状況 (コンターは塩分)

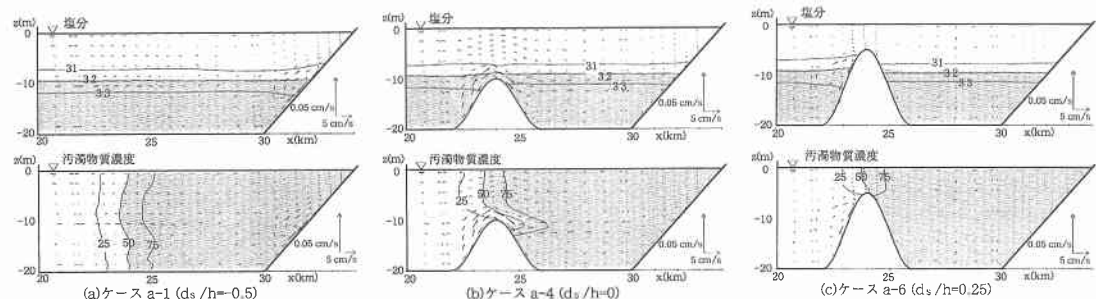


図-5 シル高と平均流況・湾内水の流出パターンの関係 (3, 4, 5 周期の平均値)

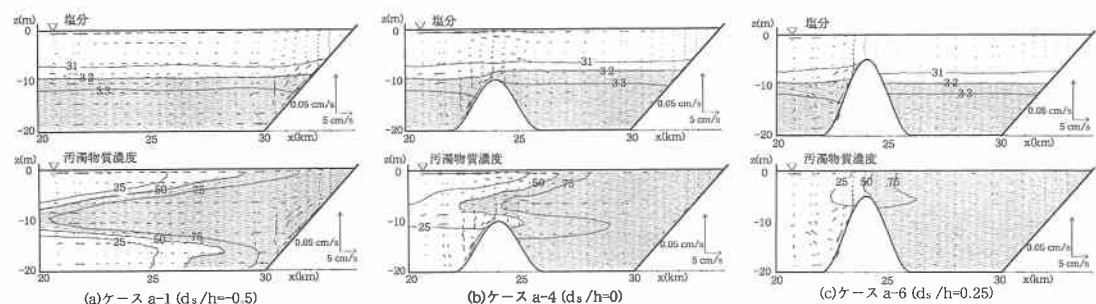


図-6 シル高と平均流況・湾内水の流出パターンの関係 (13, 14, 15 周期の平均値)

位置と一致する条件でシル上の強制碎波が生じて湾の海水交換が強まることが分かった。

次に、 $t=13T \sim 15T$ の期間について、図-5 と同様の整理をした (図-6)。シルの無いケース a-1 ($d_s/h = -0.5$) では、中層で湾内水が流出し、表層と底層で外洋水が流入する流況パターンとなり、図-5(a) で示した流況と全く異なる。ケース a-4 ($d_s/h = 0$) でも、シルの直上で外洋水が湾内へ侵入する傾向はあるものの、中層では湾内水が流出し、表層では外洋水が湾内へ流入するパターンとなる。さらに、ケース a-6 ($d_s/h = 0.25$) でも、小規模ながら、シルの直上での湾内への流入、中層での外洋への流出、表層での湾内への流入という流況となる。

以上より、内部潮汐の作用時間 t が $13T \sim 15T$ と比較的長期になる条件では、各ケースとも、中層で流出、底層と表層で流入という流況となる。中層流出が生じる理由は、シル上や斜面上の碎波により鉛直混合が促進され、混合された湾内水が密度流的に界面に沿って流出するためである。また、表層と底層の流入はこの中層流出の補

償流である。シルの存在はこの中層流出を阻害するため、シルが有る条件では内部潮汐の作用時間が長くなると海水交換が弱くなる。

3.3 シル高と海水交換の関係

汚濁物質の湾内平均濃度 c/c_0 の時間変化を図-7 に示す。 c/c_0 の減少傾向は $t/T < 8$ と $t/T \geq 8$ の期間で異なる。 $t/T < 8$ の期間ではシル上の碎波による湾内への越流が卓越する。一方、 $t/T \geq 8$ の期間では中層流出が卓越する。これは、内部潮汐の継続時間に依存して海水交換特性が変化することを意味している。なお、 $d_s/h = 0.25$ で c/c_0 の減少傾向がほとんど変化しないのは、内部潮汐がシル上で碎波せずシル上の越流が卓越しないためである。

d_s/h と無次元化された湾内水の平均滞留時間 τ/T の関係を図-8 に示す。図-8 では、シル上の越流が卓越する期間 ($t=6T$) と中層流出が卓越する期間 ($t=15T$) 別の τ/T を示した。 $t=6T$ の条件では $d_s/h = 0$ で τ/T が最小となる。一方、 $t=15T$ の条件では $d_s/h = -0.5$ で τ/T が最小となり、 d_s/h が増大すると τ/T は増加する。

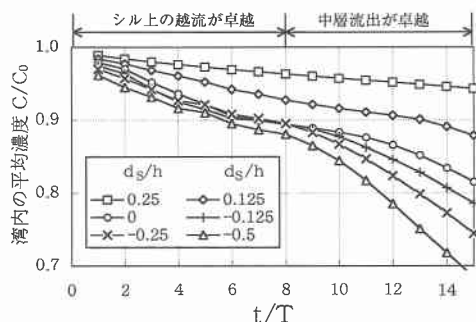


図-7 汚濁物質の湾内平均濃度の時間変化
(ケース a シリーズ, 岸側斜面有り)

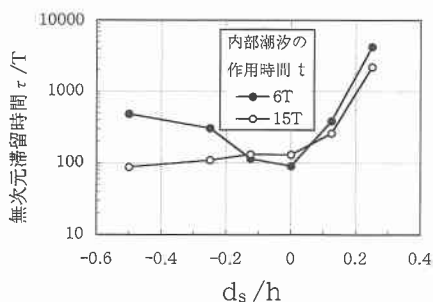


図-8 湾口シルの高さと海水交換能力の関係
(ケース a シリーズ, 岸側斜面有り)

以上より、内部潮汐が数波程度継続する条件では、シル高が密度界面と一致する時がシル上の強制碎波が促進され湾内流入が卓越して海水交換が最も強くなると言える。内部潮汐が数波以上継続する条件ではシルは湾内水の中層流出を阻害するため、シル高は低いほど海水交換が増大すると言える。内部潮汐の強度は大潮期に強まる傾向があることから(上野ら, 1993), 内部潮汐が数波程度継続する条件が一般的と予想される。今後、内部潮汐の経時変化を明らかにする必要がある。

4. 考 察

4.1 岸側斜面の存在が海水交換へ及ぼす影響

3章で述べたように、シルが無い場合、内部潮汐は岸側斜面で碎波し湾内水を鉛直混合する。その結果、中層流出による海水交換が卓越する(図-5(a), 図-6(a)参照)。よって、シルだけでなく、岸側斜面の存在も内部潮汐の海水交換に重要な要素と考えられる。そこで、岸側斜面の寄与を明らかにするために、岸側斜面の無い海域モデル(図-1(c)参照)を用いた検討を行った。シルの無いケース b-1 ($d_s/h = -0.5$) の流速・汚濁物質の分布($t = 13T \sim 15T$ の時間平均)を図-9に示す。岸側斜面の有る同様のケース a-1 と比較すると(図-6(a)参照),

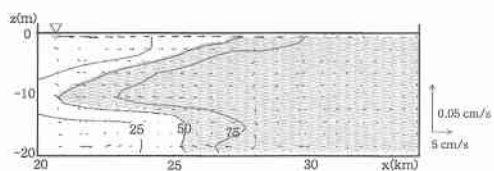


図-9 岸側斜面が無い場合の平均流況・湾内水の流出パターン
(ケース b-1, $d_s/h = -0.5$, 13, 14, 15 周期の平均値)

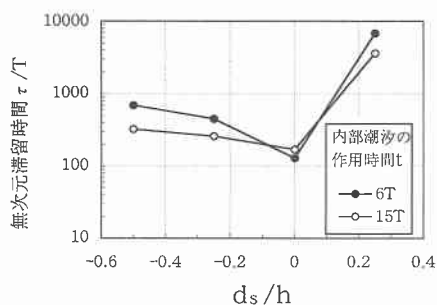


図-10 湾口シルの高さと海水交換能力の関係
(ケース b シリーズ, 岸側斜面無し)

中層流出が弱くなっているのが分かる。岸側斜面の無いケースで、図-8と同様に、 d_s/h と湾内水の平均滞留時間 τ/T の関係をもとめた(図-10)。 $t = 6T$, $t = 15T$ の両方の条件ともに、 $d_s/h = 0$ で τ/T が最小となる。

以上より、岸側斜面が無い条件では、内部潮汐の継続時間に関わらず、シル上の碎波が海水交換の増大に寄与することが明らかになった。

4.2 内部潮汐・表面潮汐・吹送流の海水交換能力の比較

内部潮汐による海水交換能力を、表面潮汐や吹送流の他の外力による海水交換能力と比較し、内部潮汐の有効性を明らかにする。各外力が作用する場合について、平均流速と汚濁物質濃度の分布($t = 3T \sim 5T$ の平均値)を比較する(図-11)。表面潮汐のみのケース c-1 では、シル上で新たに発生する内部波により1対の循環流セルが発達する。しかし、この循環流セルは湾内外の海水交換への寄与が小さいので湾内水の外洋への流出は少ない。沖向き風による吹送流のケース c-2 では、表層で湾内水が流出し、中層・底層で外洋水が流入する流況パターンとなり、湾内の海水交換が強い。岸向き風による吹送流のケース c-3 では、表層で外洋水が流入し底層で湾内水が流出する。また、湾内の底層部の水は流出しにくい傾向にある。このケースでは、ケース c-2 に比べて、海水交換が弱い。表面潮汐と内部潮汐が同時に作用するケース c-4 では、ケース a-4 で見られたシル上での外洋水の流入パターンに加えて(図-4(b)参照)、ケース c-1 で見

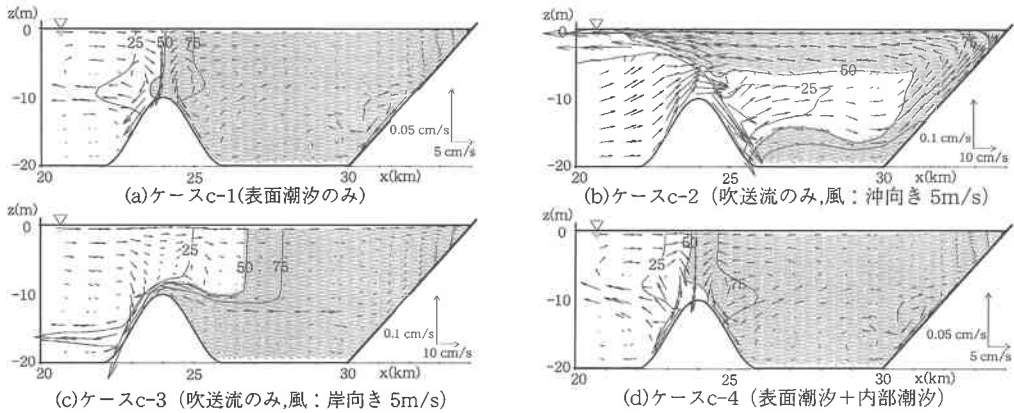


図-11 各外力作用時の平均流況・汚濁物質濃度の分布 (3, 4, 5 周期の平均値)

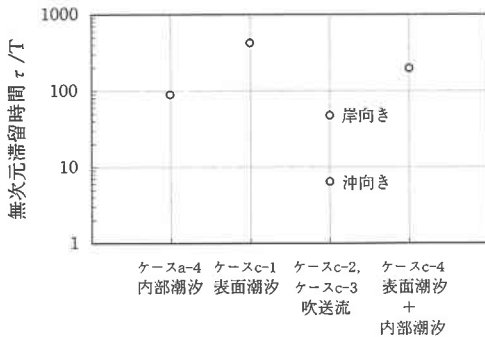


図-12 各作用外力の海水交換能力の比較

られたシル上の1対の循環流セルが見られる。

各作用外力別に湾内水の平均滞留時間 τ/T の関係 ($t=6T$) を比較する (図-12)。吹送流・内部潮汐・表面潮汐・内部潮汐・表面潮汐の順で、 τ/T は増加する (海水交換能力は減少する)。以上より、内部潮汐の海水交換能力は、表面潮汐より大きく、湾の海水交換を検討する場合無視し得ないことが明らかになった。また、吹送流による海水交換能力は大きく、本条件の海域モデルでは海水交換にとって最も重要な要因と言える。

5. 結 論

シル上で砕波する内部潮汐の海水交換能力について数値実験を行った。主要な結論を以下にとりまとめる。

(1) 内部潮汐が数波程度継続する海域では、シル高が密度界面レベルと一致する条件がシル上の強制砕波が促進され湾内流入が卓越して海水交換が最も強くなる。内部潮汐が数波以上継続する海域では、シルは湾内水の中層流出を阻害するためシル高は低いほど海水交換が増大する。

(2) 内部潮汐による海水交換能力は、吹送流による

海水交換能力よりは小さいものの、表面潮汐による海水交換能力より大きい。よって、内部潮汐による海水交換の有効性が確認できた。

参 考 文 献

- 上野成三・灘岡和夫・勝井秀博・大谷英夫 (1993): 密度成層期の東京湾で発生する密度・流動・水質場の急変現象と内部波に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 246-250.
- 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・勝井秀博 (1998): 斜面上で砕波する内部波の数値計算の検証, 土木学会第53回年次学術講演会, II-148.
- 武内智行 (1996): 内部潮汐を考慮した湾の流況予測シミュレーション, 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.
- Castro, I. P. and W. H. Snyder (1993): Experiments on wave breaking in stratified flow over obstacles, J. Fluid Mech., Vol. 255, pp. 195-211.
- Delft Hydraulics (1997): delft 3 d-flow, User Manual, release 3.00.
- Helfrich, K. R. (1992): Internal solitary wave breaking and run-up on a uniform slope, J. Fluid Mech., Vol. 243, pp. 133-154.
- Lamb, K. G. (1994a): Numerical simulations of stratified inviscid flow over a smooth obstacle, J. Fluid Mech., Vol. 260, pp. 1-22.
- Lamb, K. G. (1994b): 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. (1984): On the construction of computational methods for shallow water flow problems, Rijkswaterstaat communications, No. 35.
- 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.