

流動・生態系モデルを用いた剥離渦発生構造物の 海水交換・水質改善効果の検討

上野成三*・大谷英夫*・高山百合子**・勝井秀博***

1. はじめに

閉鎖性海域の海水交換にとって、湾口部で形成される大規模渦（湾口渦）が重要である。著者らは、構造物により湾内の循環流や海水交換を増大させる工法を提案した（大谷ら，1995）。この工法は，湾口部に小規模な突起状の構造物を設置して湾口渦を強め，その自走効果により湾内で循環流を発達させるものである。この構造物は流れを剥離させて渦を強化する機能を持つので，今後，**剥離渦発生構造物**と呼ぶことにする。本工法による循環流・海水交換の増大のメカニズムと効果は，水理実験により既に明らかにされている（大谷ら，1995，1997）。しかし，実海域の効果検討には，多様な地形・水理条件を考慮する必要がある。さらに，水質・生態系などの生化学的な要素も検討する必要がある。このような検討には，数値計算が有力なツールとなると考えられる。しかし，今までの湾口渦の計算例は渦の挙動や海水交換への寄与などを議論が中心で（例えば，Signell・Geyer，1991；Imasato，1994），計算の再現精度を定量的に評価したものは見あたらない。そこで，本研究では，まず，PTV 計測により得られた精密な実験データを用いて計算結果を詳細に検証した。その上で，現地海域に本工法を適用した場合の流動・水質改善効果を検討した。

2. 湾口渦の再現計算の検証

2.1 計算方法と条件

(1) 計算方法と数値スキーム

流れの計算には，通常の潮流計算で用いる浅水流方程式の差分モデルを採用し，デルフト水理研究所で開発された TRISULA を用いた（Delft Hydraulics，1995 a）。渦の計算には高精度の計算スキーム，特に数値粘性の小さなスキーム，が要求される。TRISULA 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），移流項の高精度化が必要な渦の計算に適した差分モデルである。

(2) 海域モデル

計算する海域のモデルは大谷ら（1995）の実験で用いた矩形湾とし，外洋の開境界で潮流を作用させた（図-1）。剥離渦発生構造物として三角柱状の構造物を湾口部に設置し，湾口幅 W は 3 種類変化させた。計算の検証データには，実験で PTV 計測により得られた平面流速分布の時系列データを用いた。

(3) 計算グリッドの解像度

計算グリッドの解像度は渦の計算精度に大きく影響する。特に，計算グリッドが粗い場合，渦の強度が弱く計算されて湾内の循環流が非常に弱くなってしまう。そこで，グリッド幅 Δ を変えた試行計算を行い，上げ潮終了時（満潮時）に形成した湾口渦の循環 Γ と計算グリッド数の関係を調べた（図-2）。 Γ のグリッド依存性が小さくなる条件として，湾口幅に対してグリッド数が 20 以上，構造物幅 d で 2 以上必要なことを分かる。本計算で

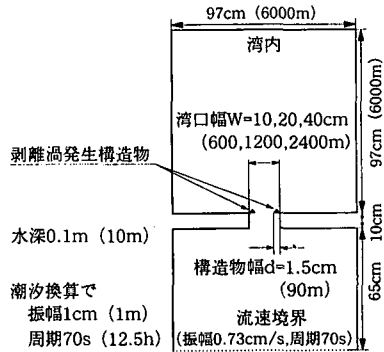


図-1 検証計算モデル（カッコ内は実スケール換算値）

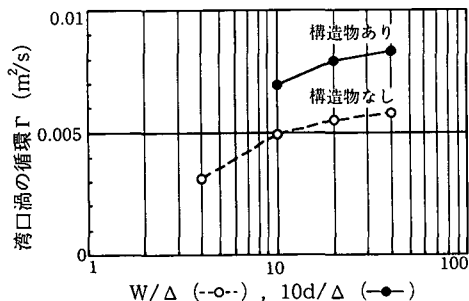


図-2 湾口渦の循環の計算グリッド依存性（ $W=0.1d$ ）

* 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 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

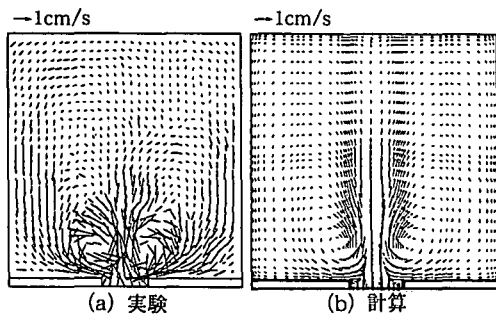


図-3 流速ベクトルの比較
(構造物なし, 満潮時, $W=20$ cm)

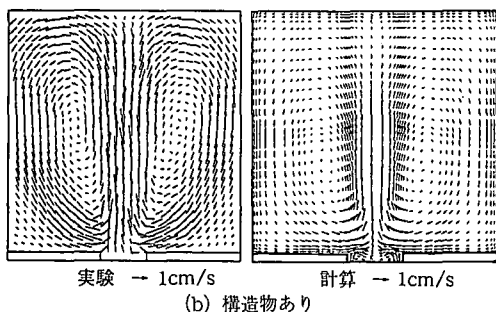
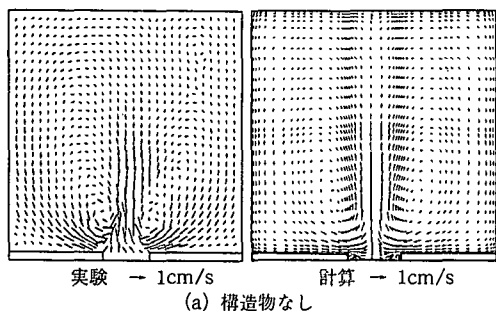


図-5 潮汐残差流の比較 ($W=20$ cm)

はこの解像度を満足する様に計算グリッドを設定した。

(4) 渦動粘性係数 ν_t

ν_t の設定は、渦の計算のみならず、沿岸域の計算全般で未解決な問題の一つである。本計算では、最も単純な方法として、空間・時間で一定の ν_t を用い、その値は、試行計算より実験結果との一致度が高い値として、 $7.5 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ と設定した。この値は、現地海域の拡散係数の実験式 (宇野木, 1993) である式 (1) による推定値とオーダーが一致することから、現実と大きく異なる値ではないと考えられる。

$$D = 0.01 \cdot L^{1.15} = 0.001 \cdot 20^{1.15} = 3.1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 D は拡散係数 (cm^2/s)、 L は代表長さ (cm) で湾口幅 W を代入する。本実験の条件以外の計算では、 ν_t の検証に耐えるデータが得られない現状を考えると、式 (1) により ν_t を推定するのが現実的な解決策と言える

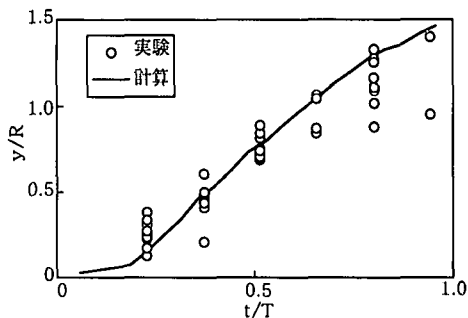


図-4 湾口渦の移動位置の比較
(構造物あり, $W=20$ cm)

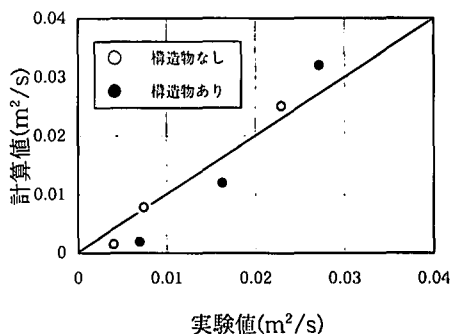


図-6 湾内残差流の循環 Γ の比較

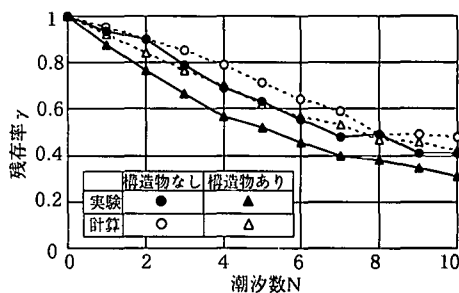


図-7 海水交換特性の比較 ($W=20$ cm)

よう。

2.2 検証結果

(1) 湾口渦

まず、湾口渦の再現例として、上げ潮終了時(満潮時)の湾内の流速ベクトルを実験と計算で比較する(図-3)。渦の大きさ・位置は良好に一致した。しかし、渦の外縁で湾内から湾口へ向かう流れは、実験に比べて、計算の方が遅い。この不一致は計算で無視した壁面摩擦を考慮すると改善できる。ただし、一般の実海域の条件では壁面摩擦を無視できる。

次に、一潮汐間の渦の移動位置を比較する(図-4)。図中の横軸は位相(上げ潮開始時を0)で、縦軸は湾口から渦の中心までの距離 y をタイダルプリズムに等価な半円柱の半径 R で割ったものである。実験値のばらつき

が大きいものの、両者の一致度は良好である。渦の移動は、渦の強度、渦対間隔、潮流が互いに影響する渦運動の結果を反映しており、本計算の渦の再現精度が高いことが示された。

(2) 潮汐残差流

構造物ありなしの場合 ($W=0.2$ m) の潮汐残差流を比較する (図-5)。実験での循環流の特徴として、構造物なしの場合は循環流が弱くその中心がやや湾口部寄りであるのに対して、構造物ありの場合は循環流が強くその中心が湾中央にあることが上げられる。計算結果はこの特徴を良く再現した。ただし、構造物なしの循環流は、実験値に比べて計算の方がやや大きい。これは、湾口部での流れの剝離が強く計算されるため、領域全体で一定の u_t を用いる本計算手法の問題点と言える。なお、構造物ありの場合、 $w/d=10$ 、 $d/d=1$ 程度の粗い計算グリッドを用いると、実験値よりはるかに弱い循環流しか再現されなかった。これは、2.1(3)で述べた様に、グリッドの解像度が循環流の再現に重要なことを示している。

構造物ありなしと W を変化させた 6 ケースで、湾内の残差流の循環値 Γ を比較する (図-6)。両者は良く一致し、様々な条件で本計算の再現性が高いことが確認できた。

(3) 海水交換

海水交換の再現性として、湾内に配置した浮標の残存率 γ の時間変化を比較する (図-7)。計算値は全体的に実験値より少し大きいものの、構造物ありとなしの γ の差や γ の減少傾向などの一致度は良い。よって、海水交換の観点からも、本計算の再現性が検証できた。

以上の検証結果より、本計算は、湾口渦、湾内循環流、海水交換がほぼ良好に再現でき、実用上十分な精度を有すると判断した。

3. 現地適用計算

3.1 計算手法と条件

(1) 対象海域

対象海域である奥ノ内湾の海岸線と水深を図-8に示す。奥ノ内湾は瀬戸内海西部呉市沖の倉橋島東部に位置し、岬、情島、小情島が囲まれた 2 つの湾口部を持つ閉鎖性湾 (東西方向約 4 km、南北方向約 3.2 km) である。湾内の水深は約 10 m でほぼ平坦で、湾口部は 50 m に達する深みがある。潮汐は M_2 振幅で約 1 m と比較的大きい。湾外の沿岸では南北に流れる潮流 (潮流振幅は約 10 cm/s) があるが、湾内の流れは弱い。水質状況として、奥ノ内湾には大きな汚濁源がないことから、顕著な水質悪化は生じていない。ただし、湾内ではカキの養殖が行われており、夏場に水質がやや悪化するとされている。

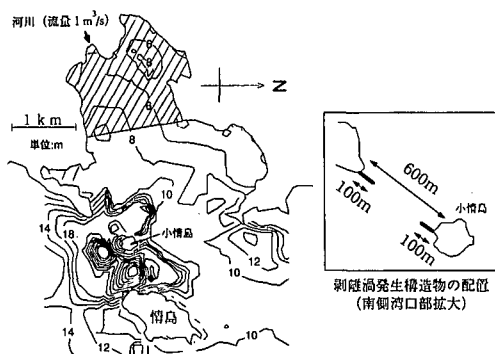


図-8 奥ノ内湾の地形と構造物の配置

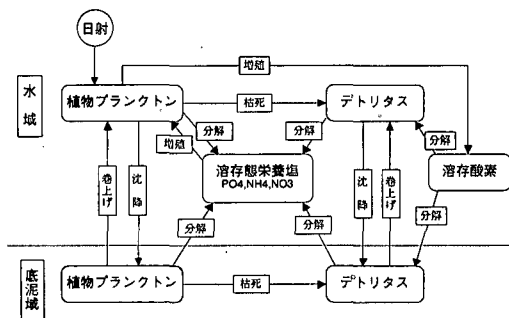


図-9 生態系モデルの概念図

(2) 剝離渦発生構造物の配置

試行計算によると、湾内の循環流は構造物の配置に大きく影響される。特に、湾口渦が陸域に近付くと鏡像効果により渦の自走が抑制され循環流が弱まる結果となった。そこで、渦が陸域から最も離れる様に構造物の最適諸元を求め、最終的に構造物の延長 d が約 100 m の突堤状の構造物を南側湾口部に設置した (図-8)。

(3) 計算方法

流動計算は、検証計算と同じ TRISULA (2次元浅水流モデル) を用いた。水質計算では水系 2 層・底泥系 1 層の生態系モデルを、デルフト水理研究所で開発された汎用水質計算プログラム DELWAQ (Delft Hydraulics, 1995 b) を用いて構築した。計算項目は植物プランクトン、デトリタス、栄養塩、溶存酸素などで、光合成による増殖、枯死、分解などの生化学プロセスを考慮した (図-9)。汚濁負荷として、当初、湾奥部の河川からの負荷を与えたが、湾内の水質はほとんど悪化しなかった。そこで、図-8の斜線部で示した湾奥部の底泥に仮想的な有機物負荷を与え、湾内の水質を悪化させた。これは、湾内全域でカキ養殖が行われたことを想定したものである。潮汐、潮流、各水質項目の境界条件は、海上保安庁 (1992)、水産庁 (1981)、環境庁 (1990) を参考に設定した。計算ケースは、現況と、南側湾口部に構造物を設けた場合の 2 ケースの計算を行った。

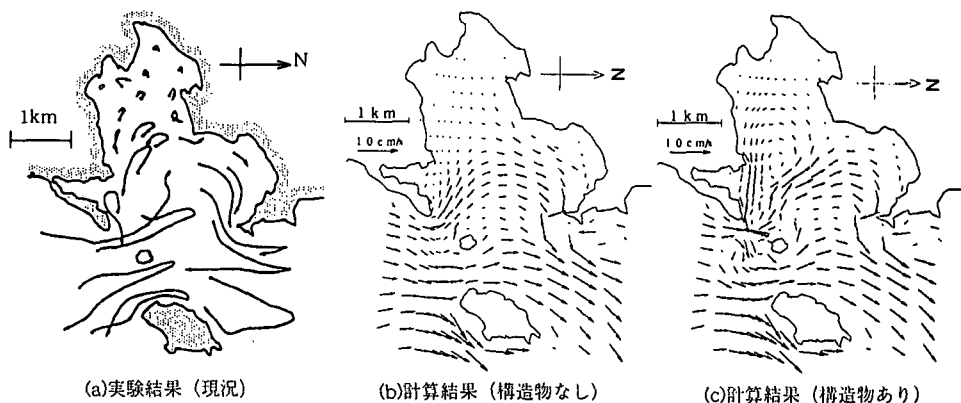


図-10 潮汐残差流の比較

(4) 流れ計算の検証

潮汐残差流を計算と実験とで比較する(図-10(a), (b)). 同図(a)は、通産省中国工業研究所の瀬戸内海大型水理模型内の奥ノ内湾を対象とした流況改善実験の結果で、湾内外に配置したフロートを1潮汐間追跡した軌跡を示している(山崎ら, 1997). 北側湾口部周辺の時計回りの循環流や、南側湾口部周辺の小さな反時計回りの循環流など実験と計算の流況は良く一致した. 以上より、本計算により奥ノ内湾の流況をほぼ再現できることが確認できた.

3.2 湾内の循環流の発達

構造物なしありの潮汐残差流を比較する(図-10(b), (c)). 構造物なしの場合、流れは南側湾口部から流入し北側湾口部から流出する. また、北側湾口部周辺で時計回りの循環流が発生するものの、湾中央より湾奥側で流れが停滞する. これに対して、構造物ありの場合、南側湾口部からの流入する流れが強まり、北側湾口部周辺での時計回りの循環流に加えて、湾中央部で反時計回りの循環流が新たに発生した. 以上より、剝離渦発生構造物を設置すれば、湾内で反時計回りの循環流が新たに発生し、湾内のよどみを小さくできることが分かった.

3.3 水質の改善

構造物なしありの代表的な水質分布を比較する(図-11). まず、上層の植物プランクトン(同図(a))をみると、現況では湾口部周辺の南側で濃度が低下するのに対して、構造物ありの場合、湾内の北側で濃度が低下した. これは、湾内の循環流に対応した結果と言える. すなわち、現況の場合、湾口部周辺で発生する時計回りの循環流により南側沿岸で濃度が低下する. これに対して、構造物ありの場合、湾中央部の反時計回りの循環流によ

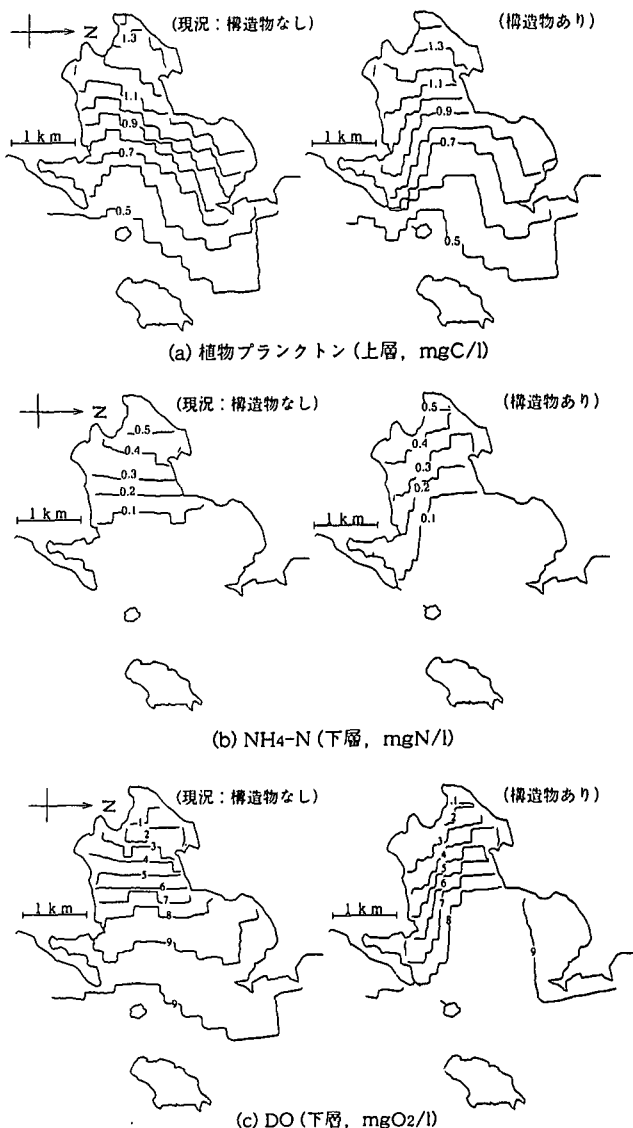


図-11 代表的な水質分布の比較

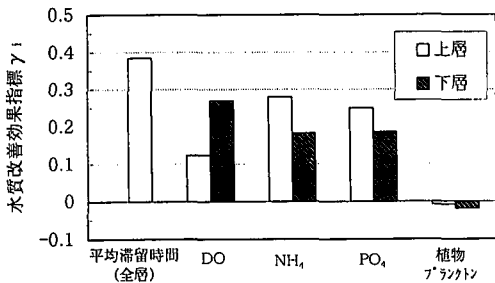


図-12 剝離渦発生構造物の水質改善効果

り北側沿岸まで濃度の低下範囲が広がる。なお、湾奥部の植物プランクトン濃度は両ケースで大きな差はなかった。この理由は、3.4で後述する様に、湾奥部では、構造物による海水交換の増大に比べて、植物プランクトンの増殖速度が大きいためである。

次に、下層のアンモニア態窒素 NH₄-N (同図 (b)) を見ると、植物プランクトンの場合とほぼ同様に、現況では湾内の南側で濃度がやや低下傾向にあり、構造物ありでは、湾内の北側で濃度が低下した。ただし、湾奥部の濃度は、現況に比べて、構造物ありの方が低下した。これは、剝離渦発生構造物による湾奥部の海水交換の増大効果が栄養塩の濃度低下に有効なことが示している。

さらに、溶存酸素濃度 DO を見ると (同図 (c))、両ケースとも湾奥部で貧酸素化が発生した。これは、湾奥部で有機物分解に伴う酸素消費量が多いためである。しかし、貧酸素化の範囲は、現況に比べて、構造物ありの方が小さくなった。これは、構造物ありの場合、湾中央部に存在する反時計回りの循環流によって湾外の酸素濃度が高い海水が湾奥へ供給されることを示している。以上より、剝離渦発生構造物を設置すると、現況に比べて、湾内の貧酸素化が抑制できることが明らかになった。

3.4 湾全体に対する海水交換・水質改善効果

本工法の効果をマクロに示す指標 γ_i として、式 (2) を定義し、平均滞留時間と各水質項目の改善効果を求めた (図-12)。

$$\gamma_i = (C_{0i} - C_i) / C_{0i} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 C_{0i} 、 C_i は、構造物なし、ありの水質項目 i の湾内平均濃度 (図-8 の斜線部分の平均) である。ただし、DO は増加すると改善効果があるので γ の正負を逆にして図化した。植物プランクトンを除く全ての項目で γ が正となり改善効果が見られた。特に、生物環境に影響の大きい底層の DO の γ が高く、本工法は貧酸素化の解消に効果的なことが示された。なお、植物プランクトンの γ が低く改善効果が見られない理由として、湾奥部では植物プランクトンの増殖速度が海水交換による濃度低下速度より 1 オーダー大きいことが上げられる。これは、湾奥部での栄養塩濃度が高く、植物プランクトンにとつ

て栄養塩は増殖の制限因子となっていないため、構造物の海水交換増大効果により栄養塩濃度が低下しても増殖速度は低下しないことが原因である。

以上より、海水交換が増大しても改善されない水質項目が存在することが明らかになった。水質改善効果の評価には、海水交換の強弱という単純な比較ではなく、生・化学的反応速度と流れ・拡散による物質の移動速度の相对比较という観点で検討することが重要である。

4. 結 論

剝離渦発生構造物の海水交換と水質改善の効果について、数値計算による検討を行った。本計算は、湾口渦・循環流・海水交換について実験結果を良好に再現した。本工法の現地適用例の流動・生態系計算から、剝離渦発生構造物により湾内循環流が新たに発生し、高い海水交換・水質の改善効果が示された。

本研究では、計算・データ整理で芙蓉海洋開発 (株) の兼田淳史氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して深く感謝の意を表します。

本研究は、通産省中国工業技術研究所、中国電力 (株)、大成建設 (株)、五洋建設 (株)、(株) プリジストンによる「海域制御のためのミチゲーション技術の確立に関する研究」の一環であることを付記する。

参 考 文 献

- 宇野木早苗 (1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, 672 p.
- 大谷英夫・上野成三・高山百合子・勝井秀博 (1997): 湾口渦強化による閉鎖性海域の循環流の形成に関する研究, ながれ, (投稿中)。
- 大谷英夫・高山百合子・石野和男・勝井秀博・宝田盛康 (1995): 流況制御のための湾口渦と水平循環流に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1221-1225.
- 海上保安庁 (1992): 日本沿岸潮汐調和定数表, 奥ノ内, pp. 165.
- 環境庁水質保全局 (1990): 全国公共用水域水質年鑑, 673 p.
- 水産庁 (1981): 昭和 55 年度赤潮対策技術開発試験 (潮流解析) 報告書 (2) 安芸灘, 流況図・流程图, 26 p.
- 山崎宗広・宝田盛康・高橋重樹・小林孝行 (1997): 湾口部地形改変による流況制御技術の実験的研究, 土木学会第 52 回年次学術講演会。
- Delft Hydraulics (1995 a): A simulation program for hydrodynamics flows and transport in 2 and 3 dimensions, release 2.45.
- Delft Hydraulics (1995 b): Delft Water Quality Model, Technical reference and Users manual, Release 4.
- Imasato, N., S. Fujio, Q. Zhang, T. Awaji, K. Akitomo (1994): Three-dimensional numerical experiments on tidal exchange through a narrow strait in a homogeneous and a stratified sea, J. Oceanogr., vol. 50, pp. 119-139.
- Signell, R. and W. R. Geyer (1991): Transient Eddy Formation Around Headlands, J. Geophys. Res., Vol. 96, NO. C2, pp. 2561-2575.
- Stelling, G. S., (1984): On the construction of computational methods for shallow water flow problems, Rijkswaterstaat communications, No. 35.