

東京湾の残差流のシミュレーションとそれが 水質解析に及ぼす影響について

田 中 昌 宏*・Guus S. Stelling**・Arjen Markus***

1. はじめに

沿岸海域の環境に対し、従来からの保全・管理に加え“環境創造”が社会的ニーズとして顕在化し、土木の分野にもそれを実現化するための技術開発が要求されてきている。環境問題が著しい湾の様な閉鎖性の強い海域に関しては海岸工学の分野でも古くから研究がなされ、主に残差流の特性や海水交換特性などの物理的側面の研究が行われてきた。しかし、現実の問題を解決するために必要となる環境評価では、最終的には、物理量の評価より生化学的な指標の定量的な評価・予測が重要となる。当然、その基礎として残差流などの物理的特性は重要な一要素であるが、それが最終的な生化学反応を含めた水質解析結果にどの様に影響するかを見極めておくことも重要と考えられる。また、これまでの残差流のシミュレーションも実測値を十分再現しているとはいえない。

本研究では、東京湾を対象に、まず残差流特性を表現するための数値モデルの必要条件について検討する。次に簡単な生化学反応を考慮した水質評価モデルを用いて、夏期の平均的な水質シミュレーションを実施し、流れ場の解析が水質評価の解析結果に及ぼす影響を検討する。

2. 東京湾の残差流の特性

まず既往の研究をまとめ、東京湾の残差流の特性について明らかになっている点を整理する。

残差流の特性を議論できる、長期的、広範囲の観測データは非常に限られているが、蓮沼(1979)、宇野木(1985)、森川・村上(1986)によって、下記のようなことが明らかとなっている。(一例として、宇野木がまとめた表層の残差流及び塩分濃度を図-1に示す。)

(1) 西岸に沿って表層に南下流が存在する。

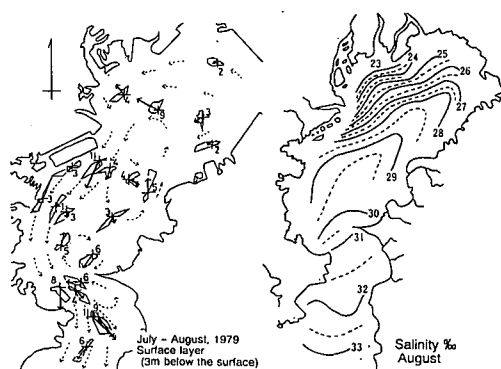
(2) 羽田一盤洲以北の湾奥部の残差流特性は風に大きく依存し、南風が比較的弱いときは、時計回りの還流が認められるが、夏期を通しては、明確な還流は無いが、

むしろ反時計回りの還流が認められる。

(3) 富津一観音崎の湾口及び羽田一盤洲までの湾央部も、風に大きく依存し、密度流による鉛直循環では表層流出、下層流入であるが、南風が強いときには、逆の鉛直循環が生じるため、非常に複雑となり、明確な一般的特性は認められない。ただし、基本的に富津岬によって発生する潮汐残差流による時計回りの還流が存在する。

以上の様に、東京湾夏期の残差流は、潮汐残差流、密度流及び吹送流がからみあった複雑な流れ場であり、特に風の影響を強く受ける。

一方、Guo and Yanagi (1996) は、宇野木のデータを用いて、診断モデルによる東京湾の残差流の季節特性を検討している。それによると、春の特徴として、湾奥の明確な反時計回りの還流と湾央部の東岸(千葉側)に沿う強い南下流がある。夏になると、湾奥の反時計回りの還流は残るものの、かなり不明確となり、西岸に沿う南下流が明確に現われる。これらの特性は、宇野木の結果をよく説明している。一方、残差流のシミュレーションに関しては、中辻ら(1995)が、夏期の成層密度場を対象に残差流の数値実験を行い、基本的な特性を明らかにしている。これによると、風が無い状況では、東京湾も、大阪湾や伊勢湾と同様の湾奥に高気圧性渦による時計回



(a) 残差流 (b) 塩分濃度

図-1 東京湾の表層の残差流と塩分濃度
(宇野木 (1985))

* 正会員 工博 鹿島・技術研究所

** Ph.D. Prof. Delft Univ. Technology
(Also Delft Hydraulics)

*** Delft Hydraulics

りの還流が存在し、風が作用した場合には、残差流はその影響を強く受ける。しかし、観測データや Guo and Yanagi の解析結果に見られた、多摩川付近から南への西岸に沿う南下流及び春に見られた盤洲から富津岬にかけての東岸の南下流などはシミュレートされていない。これは、ひとつには正確な計算条件を与えるデータが揃っていないこともあるが、シミュレーションにおける密度場の計算精度に問題がある可能性もある。

本研究では、鉛直拡散係数の評価モデルの比較からこの点も含めて検討する。

3. 流動モデルの概要

流動モデルは、オランダ・デルフト水理研究所が開発し、現在共同研究で改良を進めている流動モデル TRISULA (1995) を用いる。TRISULA は鉛直方向に静水圧近似を仮定した 3 次元モデルで、水平方向座標は直交曲線座標、鉛直方向には σ 座標を用いている。モデルの詳細はここでは述べないが、特に記述すべき点のみ簡単にまとめる。

(1) 鉛直渦動粘性係数の評価モデル

TRISULA は鉛直方向の渦動粘性係数の評価モデルに、2 方程式モデルとして標準型の $k-\epsilon$ モデル、1 方程式モデルとして $k-L$ モデル及びゼロ方程式モデルとして乱れの速度スケール及び長さスケールを代数式で表現するモデル（以下「代数式モデル」と呼ぶ）を用意し、選択できるようになっている。ここでは $k-\epsilon$ モデルと代数式モデルを用いるが、 $k-\epsilon$ モデルはよく知られているので説明を省略し、代数式モデルのみ簡単に述べる。

鉛直渦動粘性係数は次式で表わされる。

$$\nu_v = c_\mu L \sqrt{k} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 c_μ ；定数、 L ；乱れの長さスケール、 k ；乱れエネルギーである。

L は次式で表わされる (Bakhmetev (1932))。

$$L = \kappa(z+d) \sqrt{1 - \frac{z+d}{H}} F_L(R_i) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 κ ；カルマン定数、 z ；鉛直座標、 d ；ある基準面から測った水深、 H ；水深であり、 F_L は勾配型リチャードソン数 R_i の関数で、次式で表わされる (Busch (1972))。

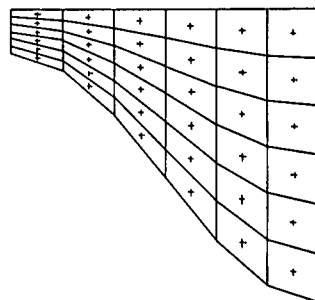
$$F_L(R_i) = \begin{cases} \exp(-2.3 R_i) & ; R_i \geq 0 \\ (1 - 14 R_i)^{0.25} & ; R_i < 0 \end{cases} \dots \dots \dots (3)$$

乱れエネルギー k は、次の二つの式から評価する。

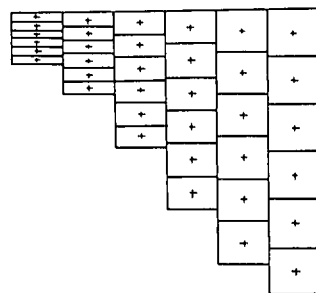
$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} \left[[u_{*b}]^2 \left(1 - \frac{z+d}{H} \right) + [u_{*s}]^2 \frac{z+d}{H} \right] \dots (4)$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} L^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 c_μ ；定数、 u_{*b} ；底面の摩擦速度、 u_{*s} ；水面の



(a) 通常の σ 座標のグリッド



(b) クリープ補正のグリッド

図-2 σ 座標におけるクリープ補正 (Stelling and Kester (1994))

摩擦速度である。(4)、(5)式から得られる渦動粘性係数をそれぞれ ν_{ALG} 、 ν_{PML} とすると、計算では大きい値を示すほうを採用する。即ち、

$$\nu_v = \text{MAX}(\nu_{ALG}, \nu_{PML}) \dots \dots \dots (6)$$

(2) σ 座標における急勾配地形の補正

σ 座標は図-2(a) に示すように、どこでも水面と海底の間を同じ比率で分割するため、海底地形が急峻な場合には、座標も急勾配となる。密度成層が存在する場合、等密度面は通常水平になるが、図から分かるように、 σ 座標では計算上等密度面を横切って見掛け上水平の移流・拡散が生じてしまうことになる。この問題を解消するために、水平方向のフラックスの計算に際しては、図-2(b) に示すようなメッシュで計算する補正を行う (Stelling and Kester (1994))。これを以下「クリープ補正」と呼ぶ。

4. 残差流のシミュレーション

(1) 計算条件

計算領域は中辻ら (1995) に従い、城ヶ島-岩井袋以北とし、水平方向は $800 \text{ m} \times 800 \text{ m}$ の正方形メッシュを用い、鉛直方向は σ 座標で均一に 5 層あるいは 10 層とした。境界条件は、開境界で周期 12 時間振幅 37 cm の水位変動を潮汐として与え、河川からの淡水の流入を主要 6 河川 (総流量 $512 \text{ m}^3/\text{s}$) で与えた。密度の計算は、塩分のみ考慮し、開境界で塩分濃度 34.2‰、河川からの流入

水は塩分濃度ゼロとした。初期条件は湾全体一様密度とし、5層の計算では塩分濃度 34.2‰, 10層の場合には、定常に達するまでの計算時間を短縮するため、17‰とした。

残差流に影響するファクターを明らかにするために、表一に示すような計算条件を設定した。

(2) シミュレーション結果

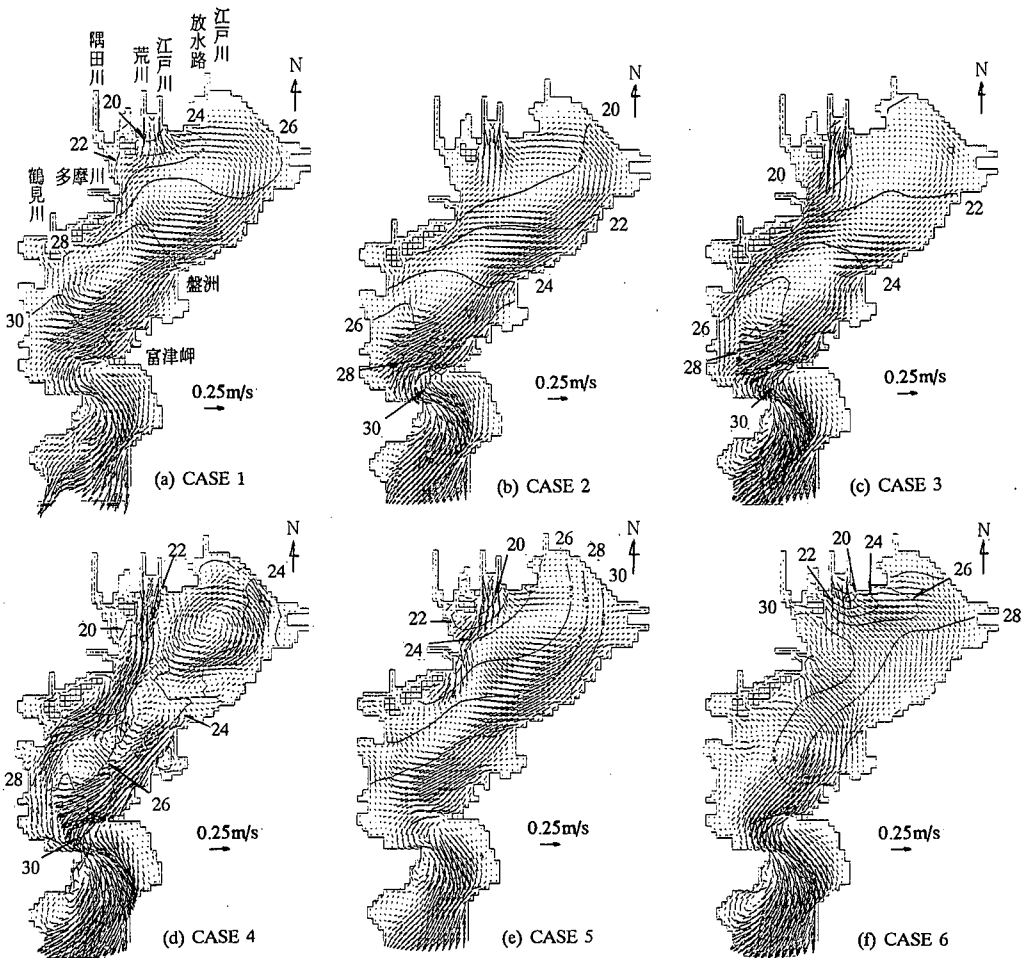
a) 風が無い場合

表一 計算条件

CASE No.	鉛直層数	鉛直拡散係数	水平拡散係数 (m ² /s)		風
			運動量	スカラー	
CASE 1	5	代数式モデル	40	40	無し
CASE 2	10	代数式モデル	40	40	無し
CASE 3	10	k-εモデル	40	40	無し
CASE 4	10	k-εモデル	5	1	無し
CASE 5	10	k-εモデル	40	40	5 m/s SW=>NE
CASE 6	10	k-εモデル	40	40	5 m/s NE=>SW

図一3(a) は、CASE 1 の結果で、表層の塩分及び最後の1潮汐を平均して得られた残差流を示している。荒川及び江戸川から流れ出した淡水が、河口近くで両側に分かれ、一方は西岸に添って流れ南下流を形成している。他方は千葉の沿岸に沿って東岸に達して南下し、盤洲辺りで二つに分かれ、一方は西進して湾奥に還流を形成し、他方はそのまま富津岬まで南下している。一方塩分濃度は、千葉側への流れがかなり強いいため、それに引きずられるような分布となり、図一1のような観測結果とは異なる分布となっている。このように、CASE 1 では、残差流のパターンが、風の影響の少ない実測データに近いものとなっているが、塩分濃度のパターンが実測値と異なっている。

図一3(b) は鉛直の層数を5層から10層に上げた場合のCASE 2の結果である。西岸に沿う南下流がさらに南まで延び、塩分の千葉側への回り込みも小さくなり、より実測のパターンに近づいている。



図一3 残差流及び塩分濃度 (‰) の計算結果 (表層)

図-3(c)は鉛直10層で鉛直の渦動粘性・拡散係数の評価に $k-\epsilon$ モデルを適用した結果である。西岸及び盤洲以南の南下流、湾奥の時計回りの還流、さらに湾中央部の時計回りの還流まで、残差流の特性を良く表わしている。また塩分濃度のパターンも実測値の特性と一致している。さらに図-3(d)は水平方向の渦動粘性係数を $5 \text{ m}^2/\text{s}$ 、拡散係数を $1 \text{ m}^2/\text{s}$ にした結果である。西岸に沿う南下流がより強くなり、湾奥の還流も顕著となっている。従来のシミュレーションでは、北よりの風を与えた場合には、西岸に沿う南下流が表現されているが、河川ブリュムによる南下流は十分表現されていない。

CASE 2 と CASE 3 及び CASE 4 の違いは、西岸に沿う南下流の強さである。 $k-\epsilon$ モデルを用い、さらに水平方向の拡散係数が小さいほうがより西岸に沿う顕著な南下流を表現している。杉山ら (1995) は、伊勢湾での ADCP を使った観測から、上層は、表層 2 m 程度の薄い河川ブリュムの層とその下の躍層までに分かれていることを指摘している。またその河川ブリュムは地球自転の効果を受けて西岸に沿って流れるとしている。CASE 4 の強い南下流はこの河川ブリュムに対応しているものと考えられ、本研究では $k-\epsilon$ モデルを用いることによりその特性をシミュレートできたものと考えられる。さらに、水平方向の拡散係数を小さくすることにより、河川ブリュムのフロントが明確になり、その特性がよりシャープに表現されたものと考えられる。

b) 風が作用した場合

東京湾の流れが風の影響を敏感に受けることは、多くの研究で指摘されている。数値シミュレーションでも、風を考慮した検討が行われてきているが、ほとんどの場合、ある方向の風を一定に与えている。しかし、特に夏期においては、同じ方向の風はせいぜい 2、3 日続く程度である。当然観測される残差流もそうした状況のデータを平均化して得られたものである。

そこで、ここでは、CASE 3 の結果を初期条件に、図-4 の様に南西風と北東風を交互に与え、計算期間全体の平均流速を残差流としてその変化をしてみる。(なお、南西風、北東風を一定に与えた計算も行い、基本的には中辻ら

の計算結果と類似の結果を得ている。)

図-3(e), (f) がそれぞれの CASE の結果である。まず、風を与える順番で残差流も塩分濃度も結果が大きく異なることが分かる。まず北東風が後半に作用した CASE 5 の場合には、北東風を一定に与えた場合と同様に湾奥の還流が強められ、また、底層水の東岸への湧昇によって、東岸の塩分濃度が上昇し、塩分の等値線が湾の長軸方向に平行となっている。一方、南東風を一定に与えた場合には、従来の結果から塩分の等値線は湾長軸方向に直角となるのに対し、CASE 6 の様に北東風の後南西風を与えた場合には、残差流も塩分濃度のパターンも大きく異なったものとなっている。

この様に、従来の知見のとおり、残差流は風に敏感に反応し、その履歴によって残差流のパターンが大きく異なることが分かる。今後の残差流の議論は、こうした事実を十分踏まえて行う必要があり、風のリアルデータに対応したシミュレーションの検討も必要であると考えられる。

なお、ここに示したすべての計算において、クリープ補正を行っているが、クリープ補正を行わない場合には、湾奥の還流の向きが全く逆となった。

5. 夏期の平均的な水質のシミュレーション

(1) 水質モデルの概要

ここでは、残差流の解析結果が水質のシミュレーション結果に及ぼす影響を検討する。対象とする水質は、東京湾の夏期の平均的な水質とする。モデルは我が国の海域の環境アセスメントで多く使われているモデルのひとつである Nakata and Kuramoto (1992) のモデルを適用する。このモデルは、COD を内部生産 (以下 COD 2) と外部起源 (COD 1) に分け、COD 2 の生産率を無機態リン、無機態窒素及び光強度の関数として、無機-有機の栄養塩循環を考えた簡単な生化学モデルである。変数としては、COD 1, COD 2, 無機-有機のリン、窒素及び溶存酸素の 7 つである。モデルパラメータ及び境界条件等は基本的に Nakata and Kuramoto に従った。

このモデルをデルフト水理研究所が開発した水質解析モデル DELWAQ (1995) を用いて構築した。DELWAQ は流れの解析結果をオフラインで用い、生化学反応を含めた移流拡散方程式を解く汎用プログラムである。

ここでは、残差流の結果が異なった CASE 1 と CASE 3 の流動場を用いて水質計算を行った。CASE 3 の計算では鉛直 10 層であるが、水質計算では 5 層で計算した。計算期間は、適当な初期条件から 120 日間まで計算したが、90 日程度で定常に達した。

(2) 計算結果

図-5 に CASE 1 と CASE 3 を用いた水質解析結果の

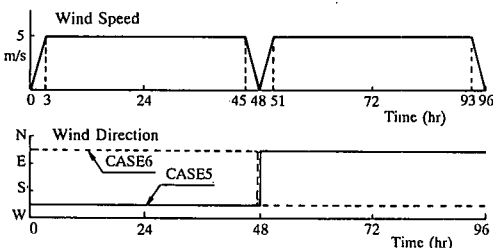
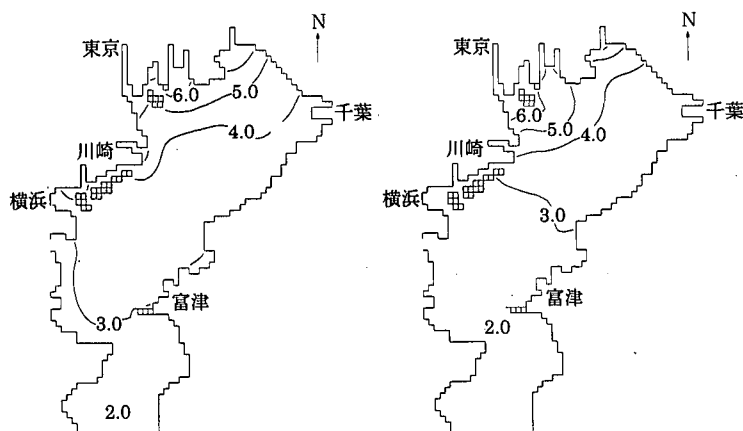


図-4 風の条件 (CASE 5, CASE 6)



(a) CASE 1 の流れ場を使用した場合 (b) CASE 3 の流れ場を使用した場合

図-5 水質の解析結果 (COD2 (mg/l) 表層)

COD 2 の表層の分布を示す。実測値と比較すると、計算値は両者とも 2~6 mg/l で、夏場の平均的な値と一致している。なお、COD 1 は河口付近を除いて、COD 2 に対し無視できる程度の濃度であった。両者を比較すると、多少の違いが見られるが、全般的にほぼ同じ程度の分布である。この原因を探るため、水質変化の各項のオーダーを見積ったところ、例えば COD 2 では、生産と分解の項が支配的で、移流拡散の項はそれらに較べて小さいことが分かった。つまり、東京湾の水質変化は内部の生化学的反応が支配的で、流れによる輸送は、河川などからの栄養塩の供給をある程度表現すればよいことになる。このことが、残差流のパターンが水質変化に大きな影響を及ぼさない原因と考えられる。しかし、このことは、このモデルが、夏の平均的な特性を表現することを目的としており、パラメータの設定もそれに対応しているためであり、当然、赤潮、青潮などの短期的な水質変化には、流れ場が大きく影響するものと考えられる。

上記の流れ場が水質に及ぼす影響は、主に水平の流れ場の特性が主体であるが、鉛直方向の水質変化、底層の特に溶存酸素の濃度には、流動モデルの結果による差が見られた。

6. おわりに

本研究では、東京湾を対象に残差流を表現するための数値モデルの条件について検討し、さらにその結果が夏期の平均的な水質解析に及ぼす影響を検討した。

主な結果は以下の通りである。

(1) 東京湾夏期の風の影響の少ない状況での残差流の特性である、西岸及び東岸の南下流、湾奥及び湾中央の時計回りの還流をシミュレートできた。このためには、安定成層場の鉛直方向の拡散係数を高精度に評価する必

要があり、そのひとつとして $k-\epsilon$ モデルが有効である。また、河川ブリュームの特性をシャープに表現するためには、密度フロントを明確にするため、水平方向の拡散係数は小さくする必要がある。

(2) 東京湾の残差流は風の影響を敏感に受け、数日の風のパターンの変化で、残差流も大きく変化する。

(3) 東京湾夏期の平均的な水質解析に対しては、残差流のパターンはあまり大きな影響を及ぼさない。ただし、水質の鉛直構造には、密度成層の影響が大きいのと考えられる。

謝辞: 流れの解析に際し、中辻啓二大阪大学教授より流量条件を教えて頂くと共に、貴重なコメントを頂いた。また水質解析においては、中田喜三郎氏・資源環境技術総合研究所に助言を頂いた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 宇野木早苗(1985): 第9章東京湾 II 物理, 日本全国沿岸海洋誌, pp. 344-361.
- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真吾 (1995): ADCP による伊勢湾の流動構造調査, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1096-1100.
- 中辻啓二・伊 鍾星・白井正興・村岡浩爾 (1995): 東京湾における残差流に関する三次元数値実験, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 391-395.
- 連沼啓一(1979): 東京湾における流動の特徴, 沿岸海洋研究ノート, 第16巻, pp. 67-75.
- 森川雅行・村上和男 (1986): 東京湾における長周期流れの変動特性, 港湾技研資料, No. 550, pp. 1-50.
- Bakhmetev, B. A. (1932): Hydraulics of open channels, Eng. Soc. Monograph, McGraw-Hill.
- Busch, N. E. (1972): On the mechanics of atmospheric turbulence, Workshop on Micrometeorology, A. Met. Soc., pp. 1-65.
- DELWAQ (1995): Delft water quality model, Technical ref. and Users manual, Release 4, Delft Hydraulics.
- Guo, X. and T. Yanagi (1996): Seasonal variation of residual current in Tokyo Bay, Japan, J. Oceanogr. Soc. Japan, in print.
- Nakata, K. and T. Kuramoto (1992): A model of the formation of oxygen depleted waters in Tokyo Bay, Proc. Adv. Mar. Tech. Conf., Vol. 5, pp. 107-132.
- Stelling, G. S. and J. A. TH. M. Van Kester (1994): On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slopes, Int. J. Numerical Method in Fluids, Vol. 18, pp. 915-935.
- TRISULA (1995): A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 2.45, Delft Hydraulics.