

沿岸海域流動モデルの計算精度と問題点の把握

田中昌宏* ・石塚正秀**・竹下 彰***
 水鳥雅文****・中辻啓二*****

1. はじめに

沿岸域の様々な環境問題に対処していく上で、その内部機構を理解し、また将来予測を行うために数値計算が欠く事のできない手段となっている。そのため、流動及び生態系モデルが数多く使用されているが、結果の信頼性については十分な社会的認知を得られているとは言い難い。この原因の一つは計算結果の検証が不十分なことにあり、これは検証に耐え得るデータセットが希少であることにもよっている。さらに数値モデルの詳細については論文上では議論が難しく、研究者間の情報交換が不十分となっている。

こうした問題を解決するため、海岸工学委員会地球環境問題小委員会の Estuarine Engineering WG では、活動の一環として流動モデルの数値コンペを進めている。本研究はその第一報として、现阶段の計算結果とその問題点を整理し、読者にも共通の情報を提供して、当分野の研究の発展を図ろうとするものである。

2. 検証データに使用する実験の概要

検証に十分耐え得るデータセットは、測定精度はもちろん境界条件が完全に把握されている必要がある。現地でのデータでは、境界条件を含め様々な不確定要因が入り込むため、実験室のデータが必要である。本研究では、EU のプロジェクト・European Large Installation Plan (Falconerら, 1994) の一つとしてデルフト水理研究所の大型潮汐水路で行われた実験を対象とする事とした。

水路は図-1 に示す様に、長さ 130 m、幅 1 m で下流端に海タンクがあり、水位と塩分のコントロールができ、また上流端では複数のポンプにより流量を制御して潮汐波の反射・吸収をコントロールできる。今回の実験では下流端から 24.5 m の位置に種々の形状の港のモデルを

設置し、水路との海水交換特性を検討している。本研究では、この中から図-1 に示すデルフト港モデルを選び、密度が一樣(淡水実験)と変化する場合(塩水実験)の2ケースについて計算を実施する事とした。

実験条件を表-1 に示す。上流端流量の負符号は上流から流下した流量が計算領域内に流入することを示して

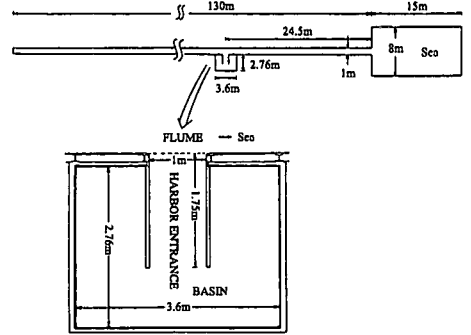


図-1 実験水路の平面図

表-1 実験条件

実験種類	淡水実験	塩水実験	
実験番号	P01	P09	
水深 (m)	0.25	0.25	
下流端水位	$\eta = a \cos\left(\frac{2\pi}{T_a}t - a_0\right)$		
振幅 a (m)	0.025	0.025	
周期 T_a (s)	650	650	
位相 a_0 (rad)	1.57	2.6	
下流端密度差 (kg/m ³)	0.0	20.0	
上流端流量	$Q = Q_0 + \sum Q_i \cos\left(\frac{2\pi}{T_i}t - a_i\right)$		
Q_0 (l/s)	0.0	-10.0	
P01, P09 共通	Q_i	T_i	a_i
$i=1$	22.374	650.0	0.722
$i=2$	3.854	325.0	2.227
$i=3$	2.755	216.7	0.098
$i=4$	1.520	162.5	1.339
$i=5$	0.498	130.0	1.905
底面粗度 (m ^{1/2} /s) (Chezy 係数)	0-75 m : 25.0 ただし、21-28 m 及び Harbour : 70.0 75 m-130 m : 70.0		
側面粗度 (mm) (粗度長さ)	0.03		

* 正会員 工博 鹿島技術研究所 主任研究員
 ** 学生会員 修(工) 大阪大学大学院 工学研究科 土木工学専攻
 *** 正会員 工博 (株)東京久栄 環境水理部 係長
 **** 正会員 工博 電力中央研究所 環境科学部 上席研究員
 ***** 正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻

いる。実験を担当した M. Karelse (私信)によると、数値シミュレーションを行う場合、次の点については計算パラメータのチューニングが必要であると指摘している。

- ①底面粗度 (Chezy 抵抗係数)
- ②塩水実験の下流端水位の位相
- ③②は、下流端のタンク内で塩分を一定に保つために激しく混合されており、発生潮位と水路下端の水位に位相差があるためである。

3. 計算モデルおよび計算条件

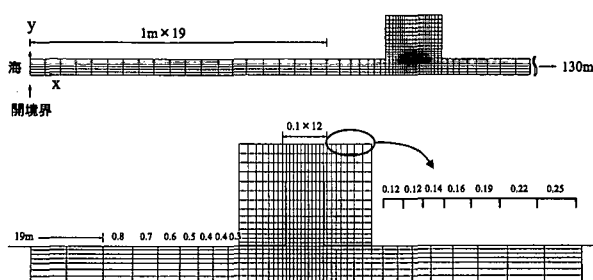
現段階では、著者らがそれぞれ所有する表-2 に示す4つのモデルで計算を行っている。いずれのモデルも鉛直方向に静水圧近似を仮定した準三次元モデルである。Delft 3D-FLOW (以下 Delft 3D) (Delft Hydraulics, 1998) と POM (Princeton Ocean Model) (Blumberg and Mellor, 1987) は鉛直座標に σ 座標系 (Phillips, 1957) を用いており、運動方程式中の水平拡散項は Mellor and Blumberg (1985) の近似を用いている。一方、TKM と ODEM (Osaka Daigaku Estuary Model) (中辻, 1996) は鉛直方向に固定した水平座標を用いたレベルモデルである。

Delft 3D は、ADI 法を改良し、半時間ステップ毎に各項の差分を最適な組み合わせにする AOI 法 (Alternating Operator Implicit) を開発している (Stelling and Leendertse, 1991)。この方法では、半陰解法の上に移流項の精度は2次、数値粘性の精度は4次であるため、安定でしかも高精度である。POM はインターネット上で自由に入手でき、アメリカを中心に数多くの研究者が利用している。このモデルでは時間積分を、Barotropic (外部) Mode モードに対しては短い時間間隔を、Baroclinic (内部) Mode モードには長い時間間隔を用いる Mode Splitting 法を採用している。ここでは、潮汐を計算できる点などの改良を加えた。TKM は水域の形状特性や重要度に応じて複数の水域区分 (計算格子分割) が設定できるネスティッド格子を特徴としている。ODEM の特徴は自由水面と密度界面の挙動を精度良く計算できる点であり、自由水面の計算は空間的な連続性を保つように陰解法で計算され、鉛直渦動粘性係数は水理実験に基づく成層化関数を導入している。

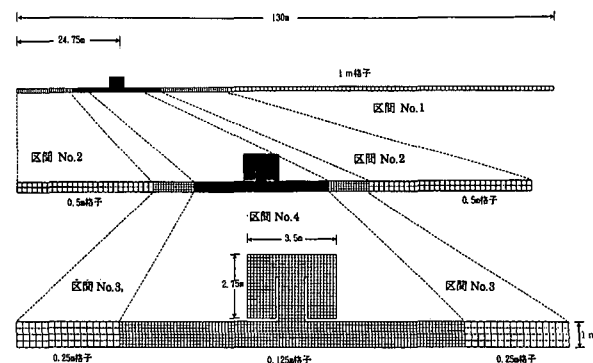
数値コンベの条件設定としては、計算格子やすべてを同条件にすることが望ましいが、個々のモデルの特性も

表-2 参加モデルの概要

モデル名	Delft 3D-FLOW	POM	TKM	ODEM
開発者	Delft 水理研究所	Princeton 大学	(株) 東京久栄	大阪大学
水平格子	可変格子 (0.12-1 m)	可変格子 (0.12-1 m)	ネスティッド格子 (0.125-1 m)	正方形格子 (0.2 m)
鉛直格子	σ 10 層 (一様)	σ 5 層 (一様)	レベル 3 層 (10, 8, 7 cm)	レベル 3 層 (10, 8, 7 cm)
時間積分法	Special ADI	Mode Splitting	Euler	Leap flog
時間間隔 (s)	0.12	内部モード: 0.02 外部モード: 0.004	0.005	0.025
移流項差分	2 次風上+中心	中心	一次風上	一次風上
鉛直渦動粘性係数	$k-\epsilon$ Model	$1 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{s})$	$1 \times 10^{-4} (\text{m}^2/\text{s})$	$1 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{s})$
水平渦動粘性係数	0.01 m^2/s 一定	0.01 m^2/s 一定	区間 1: 0.001 (m^2/s) 区間 2: 0.002 (m^2/s) 区間 3: 0.004 (m^2/s) 区間 4: 0.008 (m^2/s)	0.01 m^2/s 一定
底面粗度	粗面: 27.5 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) 滑面: 70.0 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)	粗面: 25.0 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) 滑面: 70.0 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)	粗面: 25.0 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) 滑面: 70.0 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)	粗面: 25.0 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) 滑面: 70.0 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)
側壁	スリップ	スリップ	スリップ	スリップ
計算潮汐数	5	4	3	4



(a) 可変格子



(b) ネスティッド格子

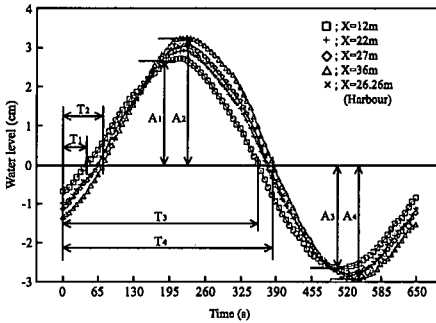
図-2 計算格子

あるため、境界条件のみを共通として、計算格子や計算時間間隔などは自由にする事とした。

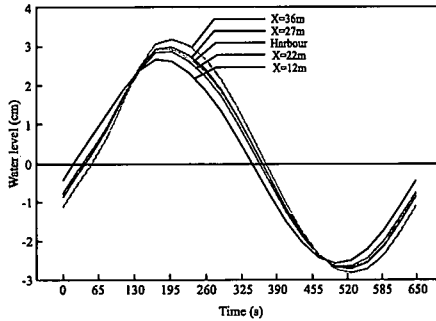
計算条件は、基本的に表-1 に示した実験条件を用い、計算格子や拡散係数などは表-2 の様に設定した。Delft 3D 及び POM に用いた可変格子及び TKM のネスティッド格子を図-2 に示す。

4. 計算結果

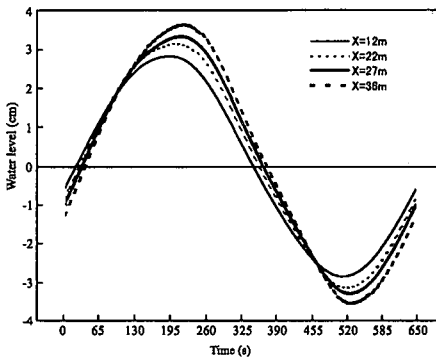
計算結果の検証のポイントは、(1)水路に沿う水位及



(a) 実験値



(b) Delft 3D による計算結果



(c) TKM による結果

図-3 淡水実験の水位変化

び流速の振幅と位相、(2) 港部分の渦の特性、(3) 塩分の混合特性 (各点の塩分鉛直分布) である。

4.1 淡水実験

まず、水路方向の各点での水位の伝播特性を比較する。図-3に水位の時系列を実験値と共に示す。紙面の制約から、ここにはσモデルの中からDelft 3D, レベルモデルからTKMを示すが、定量的な比較を行うため、図-3(a)の様に水面波の特性を定義し、それぞれのモデルの結果を表-3にまとめた。図-3(b)に示すDelft 3Dの結果は、表-1に示された底面抵抗係数の値 ($C=25 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) ではなく、それより1割大きい ($C=27.5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) 値を用いた結果を示している。これは若干のパラメータチューニングを行った結果であるが、 C が小さく (抵抗大) なるにしたがって、振幅は減少、地点間の位相差は

表-3 淡水実験の実験値と計算値の比較

	実験値	Delft 3D	POM	TKM	ODEM
T_1 (s)	42.4	17.9	10.0	29.5	9.8
T_2 (s)	74.6	52.1	35.8	50.6	27.6
ΔT_1 (s) = $T_2 - T_1$	32.2	34.2	25.8	21.1	17.8
T_3 (s)	361.7	345.6	345.7	363.0	340.0
T_4 (s)	390.0	370.9	374.1	388.3	366.0
ΔT_2 (s) = $T_4 - T_3$	28.3	25.3	28.4	25.3	26.0
A_1 (cm)	2.74	2.70	2.76	2.84	2.88
A_2 (cm)	3.27	3.20	3.25	3.69	3.52
A_3 (cm)	-2.57	-2.53	-2.48	-2.77	-2.70
A_4 (cm)	-2.84	-2.80	-2.67	-3.42	-3.06

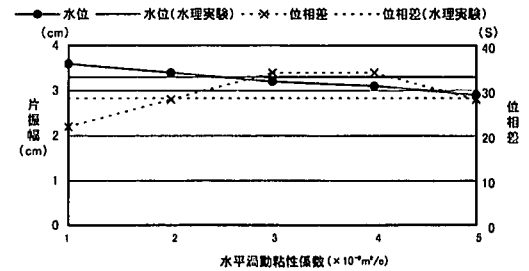
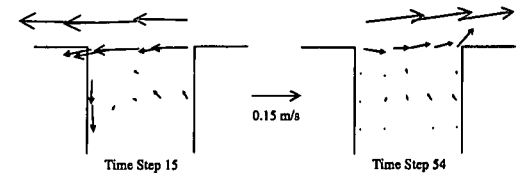
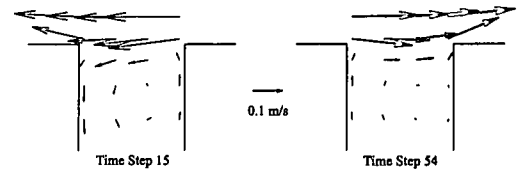


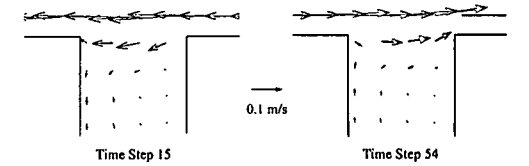
図-4 TKMにおける水平渦動粘性係数の影響



(a) 実験値



(b) Delft 3D による計算結果



(c) TKM による計算結果

図-5 各位相の鉛直平均流速ベクトル

増加し、 C が大きくなると、その逆となった。これは物理的に妥当な傾向であり、先に述べたように実験担当者も C の値についてはチューニングが必要であると述べている事から、妥当な結果と考えられる。(c)に示すTKMの結果は、水平混合項における格子間隔と水平渦動粘性係数 (A_h) による平滑化効果を区間毎に同程度とするために表-2で示したように A_h を設定した。実験結果に最

も近い結果が得られた条件は表-2のとおりである。また、水平渦動粘性の効果を見るために A_h を全域一様とし、 $0.01 \sim 0.05 \text{ m}^2/\text{s}$ の範囲で変化させて計算を実施した。結果を図-4に示す。上流側 ($X=36 \text{ m}$) の水位振幅と下流側 ($X=12 \text{ m}$) との位相差 ($T_4 - T_3$) を求め、パラメータチューニングした結果、 $0.02 \sim 0.03 \text{ m}^2/\text{s}$ で実験結果に適合した。

その他の POM と ODEM は表-3 のみに結果を示した。表-3 を見ると、まず全般的に、上げ潮時の水位が平均水位を切る時間 T_1 、 T_2 が実験値よりも小さくなってきている。これは下流端の水位の位相が塩水実験だけではなく淡水実験でも実際の位相が表-1 に示された値と異なっている可能性が考えられる。そこで、その影響の無い ΔT_1 、 ΔT_2 を見ると、下げ潮時の ΔT_2 の方が全般的に実験値に近くっており、 ΔT_1 の方はモデル毎に差が見られる。振幅特性は、 σ モデルの Delft 3D と POM は実験値とほぼ一致しており、レベルモデルの TKM と ODEM は若干振幅が大きくなっている。これが鉛直方向の座標系の違いによるものか、あるいは他のパラメータによるものか、現在は不明であり、今後検討すべき課題である。

次に港口付近の混合特性を検証するため、流速ベクトルを実験値と比較する。淡水実験では鉛直方向にほぼ現象が一様で、平面二次元的であったので、ここでは鉛直平均の流速ベクトルを比較する。図-5 に上げ潮時 (Step 15) と下げ潮時 (Step 54) の結果を実験値と共に示す。ここに Step 数は潮汐一周周期を 100 ステップに分割 (1 Step = 6.5 s) したものである。表-3 に示す様に、水位の位相が実験値と計算値では完全に一致していないため、流速ベクトルを同じ位相で比較すると定量的な議論は難しいが、港内の渦の形成などの定性的な特性は、いずれのモデルも実験結果をほぼ再現している。今後は渦のスケールや水路との混合特性などを、水平渦動粘性係数の評価法などと関連して、詳細に議論する必要がある。

4.2 塩水実験

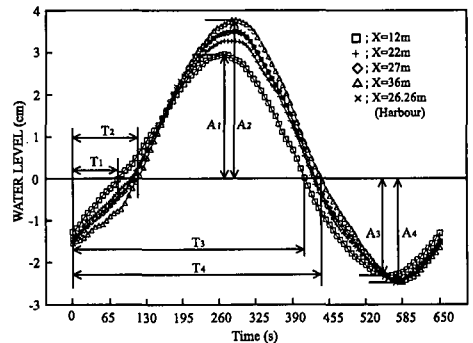
塩水実験については、Delft 3D の結果のみを示す。

まず、水路方向の水位分布の特性であるが、当初表-1 に示された下流端の条件の位相を用いた結果では、計算結果は実験結果とかなり異なった。そこで、下流端水位の位相についてパラメータスタディを行った結果、図-6 に示す様に、 $\alpha_a = 120$ 度 ($= 2.09 \text{ rad}$) でほぼ実験値に近い水位の振幅及び位相関係が得られた。振幅及び位相の実験値との比較を表-4 にまとめた。

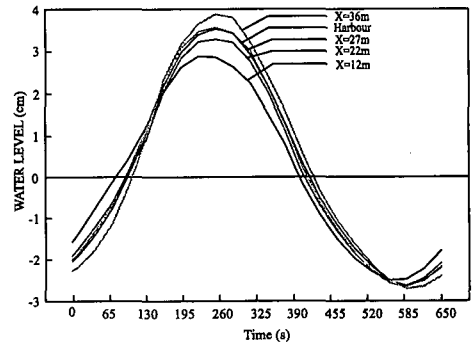
図-7 は、港口付近の各点の塩分の鉛直分布を示している。満潮 (Step 42) と干潮に近い (Step 99) ではほぼ実験値と一致しているものの、上げ潮時 (Step 23) と下げ潮時 (Step 61) では特に水路内の鉛直分布が実験結果と大きく異なっている。実験の上げ潮時、下げ潮時はス

テップ的な鉛直分布が見られるが、計算値はそれが表現されていない。この原因としては、鉛直計算格子の分解能、鉛直渦動粘性係数の評価なども考えられるが、もう一つ有力な候補として静水圧近似の仮定が考えられる。Casulli and Stelling (1998) は、静水圧近似からのずれを補正する手法を開発し、沿岸域の代表的な流れについてその影響を検討している。その中で、密度流フロントの形状が静水圧近似の場合にはフロント面が垂直に立ち、実際の滑らかな形状を表現できない事を示している。本計算の混合形態は、緩混合領域であるため (Falconer ら, 1994)、明確なフロントは形成されていない可能性もあるが、密度フロントのシミュレーションに、静水圧近似の仮定がどこまで有効か今後の検討課題である。

図-8 は港口付近の上層と底層の上げ潮時 (Step 23) と



(a) 実験値

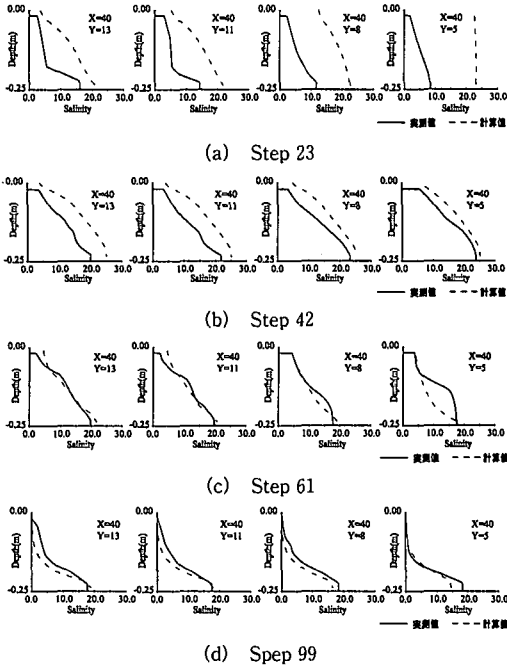


(b) Delft 3D の計算値

図-6 塩水実験の水位変化

表-4 塩水実験の実験値と計算値の比較

	実験値	Delft 3D
T_1 (s)	83.4	74.8
T_2 (s)	117.9	104.1
ΔT_1 (s) = $T_2 - T_1$	34.5	29.3
T_3 (s)	414.2	393.6
T_4 (s)	442.9	419.7
ΔT_2 (s) = $T_4 - T_3$	28.7	26.1
A_1 (cm)	3.00	2.90
A_2 (cm)	3.81	3.88
A_3 (cm)	-2.23	-2.53
A_4 (cm)	-2.38	-2.73



図一七 塩分の鉛直分布

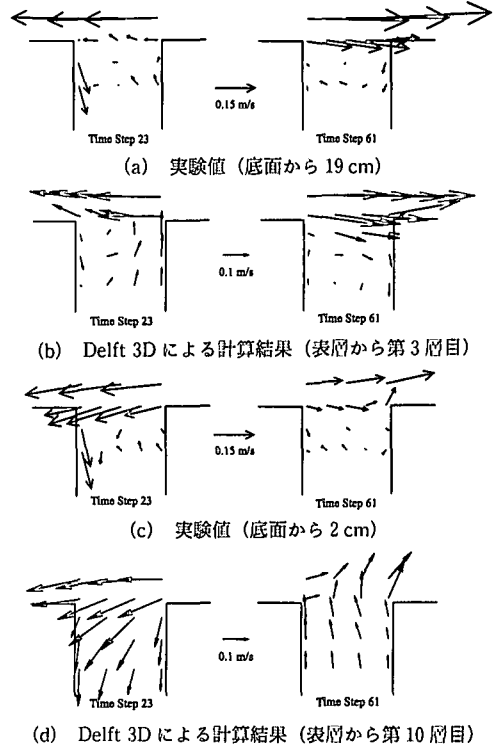
下げ潮時 (step 61) の流速ベクトルである。これも実験値と計算値では水位の位相が完全には一致していないため、瞬間的なベクトルと定量的な比較はできないが、港内の渦のパターンは概ね再現されている。またここに示した位相ではそれほど明確ではないが、表層と底層では流向の異なった二層流的な流動を生じており、計算結果もその特性を再現していた。

5. おわりに

本研究では沿岸海域の流動モデルの精度向上と計算結果の社会的認知を目指して、数値モデルのコンペを企画した。本来であれば、計算格子やモデルパラメータを完全に一致させたコンペが望ましいが、当分野では初めての試みであり、一気に本格的なコンペは困難であった。そこで、不十分ではあるが、ある程度の自由度を許して、異なるモデルの結果を比較・検討する中から、個々のモデルの精度を確認し、問題点を洗い出す事を目的とした。現段階では、ようやく結果が出始めたところで、検討が不十分であることは否めないが、個々のモデル及び共通したの問題点が徐々に明らかにされつつあり、今後はより詳細な検討に移っていきたい。

本研究で取り上げた実験は非常に単純であるが、実際に計算を行ってみると、かなりシビアな条件であった。読者の中からも本計算にチャレンジされ、情報交換に参加される方が増える事を期待する。

謝辞：本研究を進めるに当たり、デルフト水理研究所



図一八 塩水実験の流速ベクトル

Max Karelse 氏より実験の詳細について情報を提供頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

中辻啓二 (1996): 海洋一閉鎖性海域 (環境数値流体力学講座 2) 数値流体力学, 第 4 巻, 第 4 号, pp. 306-332.
 Blumberg, A. F. and G. L. Mellor (1987): A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal Estuarine Sciences., Vol. 4, N. S. Heaps, ed., American Geophysical Union, Washington D. C., pp. 1-16.
 Casulli, V. and G. S. Stelling (1998): Numerical simulation of 3D quasi-Hydrostatic, free surface flows, J. Hyd. Engng, Vol. 124, pp. 678-686.
 Delft Hydraulics (1998): DELFT 3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 3.00.
 Falconer, R. A., K.Shiono, J. Berlamont, A. Haque, C. Kranenburg, J. C. Winterwerp and M.Karelse (1994): EC-LIP harbour studies; tidal flume measurements, Report Z 352.
 Mellor, G. L. and A. F. Blumberg (1985): Modeling vertical horizontal diffusivities with the sigma coordinate system, Monthly Weather Review, Vol. 113, pp. 1379-1383.
 Phillips, N. A. (1957): A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting, J. Meteorology, Vol. 14, pp. 184-185.
 Stelling, G. S. and J. J. Leendertse (1992): Approximation of convective processes by cyclic AOI methods, Proc. 2nd Int. Conf. on Estuarine and Coast. Modelling, pp. 771-782.