

気象場と結合させた湾内海水流動計算のための 多重 σ 座標モデルの開発

村上 智一*・安田 孝志**・大澤 輝夫***

本研究では、気象場と結合させて大水深の外洋から内湾までの海水流動を σ 座標によって連続的に計算する場合、鉛直差分精度の水深依存性が問題となることを指摘し、その解決のために計算領域を鉛直方向に多数に分割した上で各領域に対してそれぞれ σ 座標を適用する多重 σ 座標モデルを開発した。これを伊勢湾大気海洋結合モデルに組み込み、夏季成層期においてモデルの動作確認及び計算精度検証を行った。その結果、従来の σ 座標では湾口部での海面温度や湾内での密度の鉛直分布の再現性に問題が見られた一方で、多重 σ 座標モデルを用いることにより、これらの問題が解決できることを明らかにした。

1. 緒 言

内湾の環境問題には水温・塩分・密度の鉛直構造が密接に関わっており、それらは日射や河川水による成層化や風による湾内循環・湧昇に加えて湾口から侵入して来る外洋水に強く支配されている。例えば伊勢湾では、湾口で鉛直混合した外洋水が内湾の中層に侵入し、低層の水塊を孤立停滞させて貧酸素水塊を形成する結果、魚介類の大量死などの社会的問題が発生している(高橋ら, 2000)。このような内湾環境問題の予測や対策のための数値計算では、外洋から内湾までを連続的に精度良く解くと同時に、地形変化のみならず日射や風など気象場からの作用を正しく評価できる海水流動計算が必須となる。

伊勢湾を対象として図-1 のように外洋を含めて計算領域を設定した場合、計算領域内の水深は約 1000 m から数 m となるので、内湾と外洋とは水深差が極めて大

きくなる。さらに湾口部では地形が複雑に急変している。このような条件下での海水流動の計算には複雑な海底地形を正確に表現でき、境界条件の取扱いが容易な σ 座標が多用され、その時の問題点として海底地形が急峻な場所で生じる水平圧力勾配項や水平拡散項の数値誤差に関心が集まってきた。この問題に対する改善策としては Stelling ら (1994) の SvK 法、それを発展させた Slordal (1997)、二瓶ら (2002)、入江ら (2003) の方法や灘岡ら (2000) の Dual- σ 座標系など数多くの研究があり、成果を挙げてきた。しかし、気象場と結合させて大水深の外洋から内湾までを σ 座標によって連続的に扱う場合、新たに鉛直差分精度の水深依存性の問題が発生し、特に海面境界条件を取扱う最上層での鉛直差分に生じる数値誤差が、湾口のみならず湾内の水温・塩分・密度分布に影響を及ぼすことが明らかになってきた。

本研究は、この問題の重要性を指摘し、外洋から内湾への海水侵入、内湾の水温・塩分・密度の鉛直構造を精度良く扱えるよう新たに開発した多重 σ 座標系海洋モデルの有用性を示そうとするものである。

2. 鉛直差分精度の水深依存性の問題

σ 座標は以下のように定義される。

$$\sigma = \frac{z - \xi}{\xi + h} = \frac{z - \xi}{H} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ξ は水面変位、 h は静水深、 H は全水深である。

式 (1) を用いて基礎方程式系をデカルト座標系から σ 座標系に変換し、有限差分法で離散化して解く時、デカルト座標系における物理量 ϕ と σ 座標系における物理量 $\bar{\phi}$ に関する鉛直差分の関係は次式のようになる。

$$\frac{1}{\Delta z}(\phi_{k+1} - \phi_{k-1}) = \frac{1}{H} \frac{1}{\Delta \sigma}(\bar{\phi}_{k+1} - \bar{\phi}_{k-1}) \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) 右辺の σ 座標系の差分式では、式 (1) から得られる $\Delta \sigma \cdot H = \Delta z$ の関係からもわかるように、 $\Delta \sigma$ に水平変化を持つ全水深 H が掛けられているので、水深に依存して格子毎に歪まされた Δz を用いて差分値を求めていることになる。例えば、 σ 座標系で等間隔鉛直 10 層の

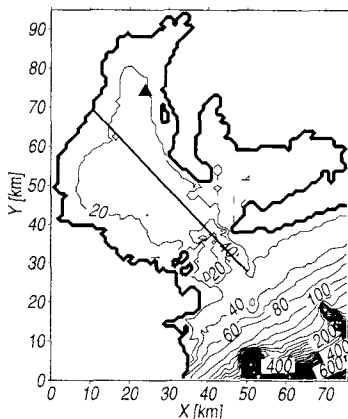


図-1 計算領域：コンターは水深で 20 m 間隔、A 点を三角▲、断面 B を直線で示す。

* 学生会員 修(理) 岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
** 正 会 員 工 博 岐阜大学教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
*** 正 会 員 博(理) 神戸大学助教授 海科学部

場合、水深 100 m の外洋と 3 m の内湾における Δz はそれぞれ 10 m, 0.3 m となる。式 (2) の差分式は Δz が大きい場合や物理量の鉛直変化が大きい場合に数値誤差を与え易くなり、内湾に比べて外洋ではその大水深のために鉛直差分の精度は極めて悪くなる。そして、対象とする内湾に外洋から大きな数値誤差を伴った物理量が侵入する結果、内湾の物理量の計算に大きな数値誤差が生じることになる。特に、気象場と結合する場合、風による運動量輸送、日射による熱交換、降水蒸発による水収支等を扱うために物理量の鉛直変化が大きくなり、この問題に対してより注意が必要となる。このように外洋から内湾まで連続的に解く場合には鉛直差分精度が水深に依存することが大きな問題となってくる。

この問題の単純な解決策としては、鉛直層数を増やす方法、あるいは海面付近での層間隔を密にするという不等間隔層の方法が考えられる。しかし、いずれの方法も、内湾と外洋のの大きさに差をなくすためには、相当な数の鉛直層にするか、極端な不等間隔層にする必要があり、却って計算時間の増大や計算の不安定性を招来することになり、決定的な解決策とはならない。

3. 多重 σ 座標

(1) 多重 σ 座標の概念

本研究では鉛直差分精度の水深依存性の問題を解決するために、多重 σ 座標を用いる。これは、計算領域を鉛直方向に多数に分割し、各領域に対してそれぞれ σ 座標を適用するものである。この多重 σ 座標の定義は、分割した領域を海面から順に I, II, III, ……として次のようになる。

$$\sigma_I = \frac{z - \zeta}{\zeta + h_I} = \frac{z - \zeta}{H_I} \quad -h_I \leq z < \zeta \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma_{II} = \frac{S_I + z}{h_{II}} = \frac{S_I + z}{H_{II}} \quad -h_{II} \leq z < -h_I \dots\dots (5)$$

$$\sigma_{III} = \frac{S_{II} + z}{h_{III}} = \frac{S_{II} + z}{H_{III}} \quad -h_{III} \leq z < -h_{II} \dots\dots (6)$$

$$\begin{cases} h_I = h & h \leq S_I \text{ の場合 (領域II以深は考えない)} \\ h_I = S_I & h > S_I \text{ の場合} \end{cases}$$

$$\begin{cases} h_{II} = h - S_I & h \leq S_{II} \text{ の場合 (領域III以深は考えない)} \\ h_{II} = S_{II} - S_I & h > S_{II} \text{ の場合} \end{cases}$$

$$\begin{cases} h_{III} = h - S_{II} & h \leq S_{III} \text{ の場合 (領域IV以深は考えない)} \\ h_{III} = S_{III} - S_{II} & h > S_{III} \text{ の場合} \end{cases}$$

ここでは、代表して領域 I, II, III の σ 座標の定義のみを記したが領域 IV 以深についても同様である。また、 S_I は $z=0$ から領域 I と II, S_{II} は $z=0$ から領域 II と III, S_{III}

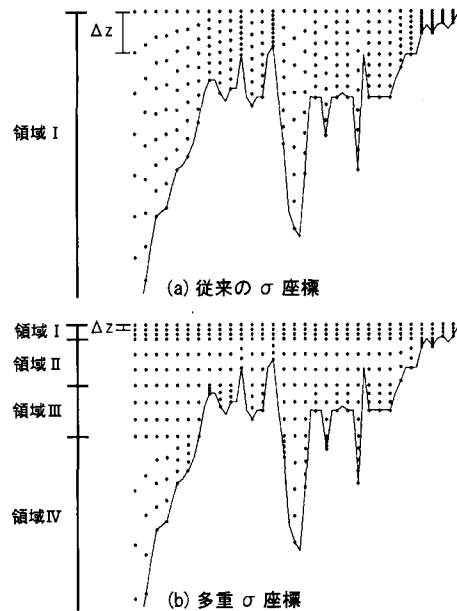


図-2 従来の σ 座標と多重 σ 座標の選点；黒点・が選点を示す。

は $z=0$ から領域 III と IV のそれぞれの境界面までの距離であり、これらの S を境界面水深と呼ぶ。このようにして定義された多重 σ 座標の選点と従来の σ 座標の選点を実際の伊勢湾の断面において示したものが図-2 である。図-2 の従来の σ 座標では Δz が水深変化の影響を受け内湾と外洋で大きな差があるのがわかる。これに対して多重 σ 座標では、海面直下の領域 I を狭くすることで領域 I から水深変化の影響を排除することができ、内湾と外洋の Δz は同じとなる。よって、気象場との結合計算において本質的に重要となる最上層での鉛直差分精度の水深依存性を解消することが可能となる。また、領域を多重に分割することで、海底の近傍以外も鉛直差分精度の水深依存性を解消できる。さらに、地形が急峻であっても、海底を含まない領域での水平差分は、デカルト座標系のもと同じになるため、従来から問題にされて来た水平圧力勾配項や水平拡散項の数値誤差の問題も改善できる。

多重 σ 座標は σ 座標の適用領域数 N と境界面水深 S の決め方に任意性があり、物理特性や計算時間等を考慮した決め方をしなければならない。まず、 S_I は先にも述べたように海面境界条件を取扱う最上層の鉛直差分を重視して、水深変化の影響を完全に排除するために 3 m 程度に浅く取ることとする。それより下層の S_{II} 以深はできるだけ水平方向で Δz が一定となるようにするのが望ましい。実際に N, S がどの程度であれば良いかは、4. で検討する。

(2) 多重 σ 座標を用いた海洋モデルの開発

本研究では、多重 σ 座標を用いた海洋モデルを新たに開発し、これを POM に代わるモデルとして伊勢湾大気海洋結合モデル (水谷ら, 2003) に組込んだ。この多重 σ 座標系海洋モデルの主な特徴は以下の通りである。

- ・静水圧近似, プジネスク近似を適用し, 基礎方程式は, 連続式, N-S 式, 温度・塩分の拡散方程式, 密度の状態方程式である。
- ・ σ 座標の適用領域数を任意の数に設定できる。
- ・移流項差分には 5 次精度上流差分, 拡散項差分には 4 次精度中心差分を使用。
- ・乱流モデルは, Mellor-Yamada Level 2.5 乱流クロージャーモデル (Mellor・Yamada, 1982) を使用。
- ・開境界条件には日野ら (1988) の無反射境界スキームを使用。

4. 精度検証

(1) 計算条件の設定

多重 σ 座標の有用性を調べるために, 多重 σ 座標系海洋モデルを組込んだ伊勢湾大気海洋結合モデルを用い, 計算領域を図-1 として, 2001 年 7 月 10 から 7 月 17 日まで表-1 の 6 つのケースで計算した。

表-1 検討するケース

	σ 座標の 適用領域数 N	境界面水深 S (m)
Case 1	1	
Case 2	2	$S_I=3$
Case 3	3	$S_I=3, S_{II}=22$
Case 4	4	$S_I=3, S_{II}=19, S_{III}=35$
Case 5	5	$S_I=3, S_{II}=14, S_{III}=26, S_{IV}=69$
Case 6	6	$S_I=3, S_{II}=10, S_{III}=20, S_{IV}=29, S_V=55$

ここで境界面水深 S は, 計算領域内の水平選点の数を各ケースの N で等分割されるように決めた。また, Case 1 は従来の σ 座標と全く同様である。なお, 今回の計算では最大水深を 100 m までと簡略化している。これは, Case 1 では実際的水深データを元にした地形 (最深部で約 1000 m) で計算すると解が発散してしまい, 目的である σ 座標の多重化による効果を調べることができないためであり, 計算期間が 1 週間と短期間であれば内湾に影響を与える外洋の水深は 100 m 以浅の部分が大きいと判断したからである。

(2) 計算結果

図-3 は夏季 (2001 年 7 月～9 月) の NOAA 衛星のデータ解析により求めた平均海面温度である。この図に



図-3 夏季 (2001 年 7 月～9 月) における平均海面温度の分布; コンターは 0.5°C 間隔で, 偏差が -0.5°C 以下の低温領域を灰色のトーンで表す (大澤ら, 2003)。



図-4 計算期間中の平均海面温度の分布; コンターは 0.5°C 間隔で, 偏差が -0.5°C 以下の低温領域を灰色のトーンで表す。

よると湾口部のみで相対的に海面温度が低下している。この温度低下について, 大澤ら (2003) は成層化した内湾水および外洋水が湾口付近の速い潮流と狭く複雑な海底地形によって鉛直混合した結果であると結論付けている。計算期間は NOAA 衛星の解析期間と違っているが, 温度低下は鉛直混合が卓越する湾口部のみで生じると考えられ, 内湾と外洋の中間で生じるこの現象は, 本モデルの計算精度を確認するのに適した対象であるといえる。そこで, この現象の再現性の観点から多重 σ 座標の効果について検討してみる。

図-4 は計算期間中の平均海面温度を各ケースごとに示したものである。Case 1 では湾口部でなく外洋で温度低下している。これは, 大水深のために外洋で Δz が大きくなり, 鉛直差分の精度が悪くなった結果であると考えられる。Case 2 では, わずかに湾口部で温度低下しているが, それ以上に外洋でも温度低下が見られる。これは Case 2 は 2 領域の σ 座標のために表層付近 ($z=-3$ m 以浅) の Δz は, 内湾も外洋も全く同じであるが, それ以

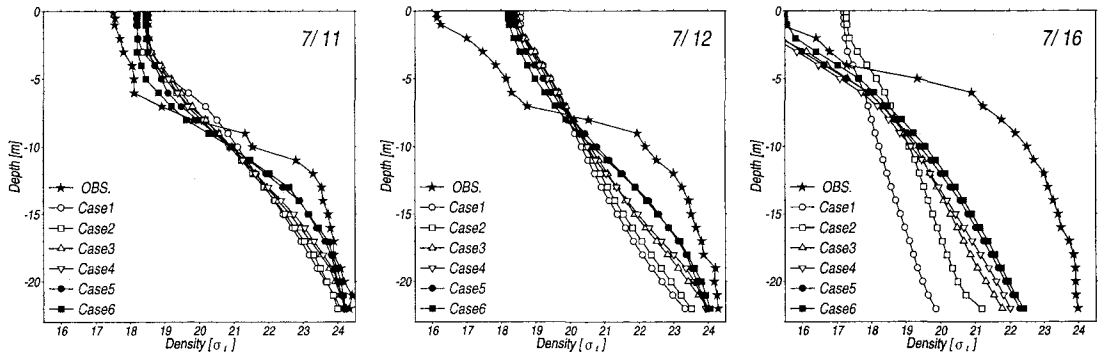


図-5 A点における密度分布の観測値と計算値の比較；(左) 7月11日の密度。(中) 7月12日の密度。(右) 7月16日の密度。

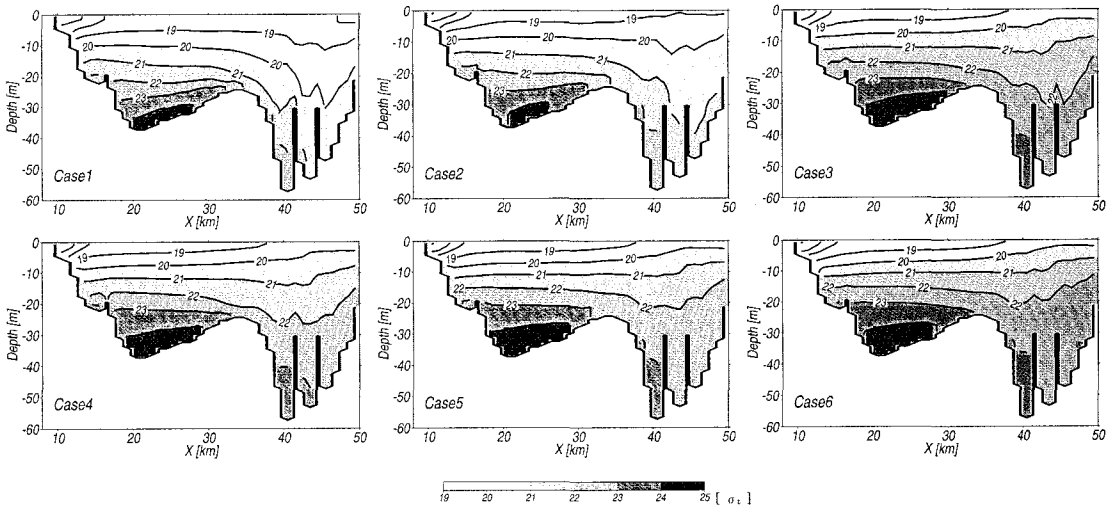


図-6 断面Bにおける計算期間中の平均密度分布；コンターは $1(\sigma_t)$ 間隔。

深の Δz は Case 1 と同じように外洋で大きくなっているためだと考えられる。これらに対して、Case 3~6 では図-3 と同様に湾口部のみで温度低下しており、多重 σ 座標を用いることで計算が向上しているものと判断できる。特に Case 4~6 のように、4 領域以上の σ 座標を用いたものでは、ほとんど違いがなくなっている。

図-5 は、図-1 の A 点において 1 日 1 回 (午前中) 行われている温度と塩分の観測データから密度を求め、各ケースの午前 10 時の密度と比較したものである。ここでは代表的な特徴が現れた 7 月 11 日、12 日、16 日のものを示した。7 月 11 日は Case 1~6 共に観測値の再現性が比較的良好な例である。反対に 7 月 12 日は観測値に比べて計算値が鉛直一様になり、また 7 月 16 日は大きな河川流量のため観測値に密度躍層が現れ成層の再現性が悪かった例である。いずれの計算においても密度分布が鉛直に一様化し過ぎる傾向がある (この傾向は Mellor-Yamada Level 2.5 乱流クロージャモデルに起因していると考えられるが、詳細は村上ら (2004) を参照のこと) が、

Case 1 から Case 4 へと、より σ 座標を多重化することによって Case 5, 6 の密度分布に近づき、計算精度が向上していく様子が、全ての日に共通して見られる。

図-6 は、図-1 の断面 B における計算期間中の平均密度分布を各ケースごとに示したものである。この図から、各ケースで外洋から侵入してくる密度 (図中 $X=50$ km 付近) に差が見られ、その結果、内湾の海底付近に存在する高密度水塊の分布に違いが生じていることがわかる。また、Case 1~3 では湾口付近で密度のコンターが地形に沿って大きく変動している。このように時間平均した密度場が水深に依存して大きく変動することは不自然であり、計算上の問題であると判断される。現に、 σ 座標が多重化することによって、この問題が徐々に解消されていくのがわかる。

図-7 は計算期間中の海面残差流を各ケースごとに示したものである。内湾の残差流場では全てのケースで寛ら (2002) が述べている夏季の伊勢湾の特徴である西側流出、東側流入の傾向が現れている。しかし、東側から

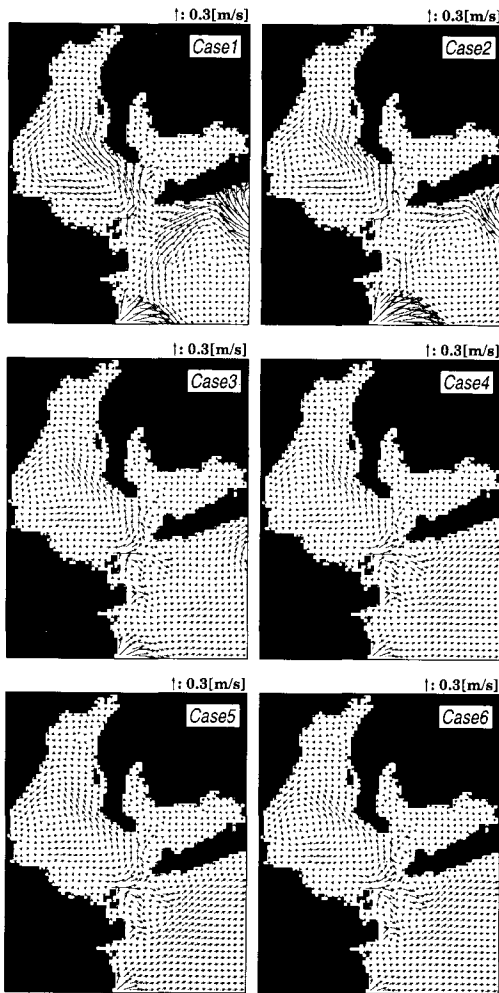


図-7 計算期間中の海面残差流。

流入する流速の強さなどに違いがある。また、Case 1, 2では南西と北東の開境界付近で大きな渦が見られる。この渦は計算領域を変化させても開境界上に現れることを確認しており、以前より計算上の問題となっている。そして、この渦のために外洋で南西向きの流れが強く現れている。この渦はCase 3では小さくなり、Case 4~6においてはほとんど見られなくなり、外洋の流れもCase 1, 2と正反対の北東向きの流れとなっている。このように多重 σ 座標を用いることにより開境界付近の計算上のエラーが減じられたことも、内湾の温度・塩分・密度等の計算精度が向上した原因の一つであると考えられる。

5. 結 語

本研究では、鉛直差分精度の水深依存性の問題を解決するために多重 σ 座標系海洋モデルを開発した。そして

伊勢湾大気海洋結合モデルに組み込み、夏季成層期において1領域の σ 座標(従来の σ 座標)から6領域の σ 座標まで精度検証を行った。その結果、従来の σ 座標モデルでは湾口部での海面温度や湾内での密度の鉛直分布などの再現性に問題があることが示された一方で、多重 σ 座標モデルでは、これらの問題が解決できることを明らかにした。また、今回の計算は最大水深100 mまでとする簡略化した伊勢湾であったことから、3 m~100 m程度の水深差であっても従来の σ 座標モデルでは鉛直差分精度の水深依存性が問題となることがわかり、この条件下においても多重 σ 座標モデルの有用性が示された。

謝辞: 精度検証に用いた海洋観測データは愛知県企業庁・中部国際空港株式会社よりご提供頂いた。また本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)(2)16360243および若手研究(B)14750426による成果であることを付記し、ここに併せて謝意を表する。

参 考 文 献

- 入江政安・中辻啓二・西田修三(2003): 密度差の大きい流動場への改良 σ 座標系モデルの適用, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 361-365.
- 大澤輝夫・伊藤秀文・水谷英朗・西部隆一郎・安田孝志(2003): 成層期における伊勢湾口での海面温度低下と鉛直混合, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 946-950.
- 寛 茂穂・藤原建紀・山田浩且(2002): 伊勢湾における密度・流動構造の季節変化, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 386-390.
- 高橋鉄哉・藤原建紀・久野正博・杉山陽一(2000): 伊勢湾における外洋系水の進入深度と貧酸素水塊の季節変動, 海の研究, Vol. 9, No. 5, pp. 265-271.
- 灘岡和夫・吉野忠和・二瓶泰雄(2000): 沿岸海水流動数値計算法の高度化のためのDual- σ 座標系の提案, 土木学会論文集, No. 656/II-52, pp. 183-192.
- 二瓶泰雄・山崎裕介・西村 司・灘岡和夫(2002): 浅水流場を対象とした三次元数値モデルの近似手法に関する検討— σ 座標系と静水圧近似に着目して—, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 411-415.
- 日野幹雄・仲座栄三(1988): 数値波動解析における新しい無反射境界スキームの平面二次元問題への適用, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 262-266.
- 水谷英朗・大澤輝夫・村上智一・小林智尚・安田孝志・藤原建紀(2003): 伊勢湾大気海洋結合モデルの構築とその精度検証, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 431-435.
- 村上智一・大澤輝夫・伊藤秀文・安田孝志(2004): 浅海域の海面境界層における乱流モデリングの重要性と改良の方向性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 346-350.
- Mellor, G. L. and T. Yamada (1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., Vol. 20, No. 4, pp. 851-875.
- Slordal, L. H. (1997): The pressure gradient force in sigma-coordinate ocean models, Int. J. Numer. Methods Fluids, Vol. 24, pp. 987-1017.
- 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. Numer. Methods Fluids, Vol. 18, pp. 915-935.