

汽水域への σ 座標系モデルの適用における誤差補正

大阪大学大学院 学生員 ○入江 政安
 大阪大学大学院 正会員 西田 修三
 大阪大学大学院 正会員 中辻 啓二

1. はじめに

近年、沿岸の小さな領域に対して、 σ 座標系海洋モデルを適用する研究が多く見られるようになってきた。その代表格のひとつである POM(Princeton Ocean Model)はフリーソースコードとして公開され、適用事例も多い。一方、POM が採用している σ 座標系は、座標変換に起因する数値誤差が発生することがよく知られている。数値誤差の補正方法が Mellor et al.¹⁾ や Stelling and van Kester²⁾ などにより提案され、他の研究者により密度差の大きい水域に適用されている。しかし、日本の沿岸域のように急勾配地形をもち、かつ、密度差の大きい水域について適用されている例はほとんどない。そこで本研究では、密度差の大きい汽水域を対象に、急勾配モデル地形を用いて流動計算を行い、誤差補正方法の汽水域への適用について評価・検討を行った。

2. 誤差の発生原因と補正方法

σ 座標系の数値誤差は主に水平圧力項および水平拡散項の算定の際に発生する。水平圧力勾配算定時の誤差は地形勾配が hydrostatic consistency と呼ばれる条件を満たさないときに発生するとされている。その対処法として、層数を減らすことが考えられるが、密度差の大きい領域においては密度場の再現性の低下をまねくことになる。しかも、急勾配地形の場合は、層数を減らしても条件を満たすことは難しい。Mellor¹⁾ は水平圧力勾配を算出する際に、密度を初期条件の水平方向平均密度からの偏差で表し、勾配を算出することで、数値誤差を大幅に抑制した。一方で、Stelling and van Kester²⁾ は hydrostatic consistency を無視できる誤差補正方法(SvK法)を提案した。本研究では、この SvK 法を Slørdal³⁾ が改良した補正方法(Slørdal 法)を用いて、Mellor による補正を行っている現在の POM との比較を行った。

Mellor による補正方法を採用した水平圧力勾配は次のように表される。

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial x} = g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD}{\rho_a} \left\{ \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho'}{\partial x^*} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x^*} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right) d\sigma' \right\} \quad (1)$$

ここに、第一項：barotropic 圧力項、第二項：baroclinic 圧力項
 ρ_a ：基準密度、 ρ' ：密度の初期水平方向平均値から偏差、 η ：水位、 D ：水深

Slørdal 法は式(1)の σ 座標系で表されたバロクリニック圧力勾配を、元のデカルト座標系での水平方向の密度勾配により算出する方法である(図-1)。このとき、バロクリニック圧力勾配は次式のように表される。

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P_{bcl}}{\partial x} = \frac{g}{\rho_a} \sum_{n'=1}^{n-1} \left[(\delta_z)_{i-1/2, n'} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_{i-1/2, n'} \right] + \frac{g}{\rho_a} \left[(z_{i-1/2, n} - z) \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_{i-1/2, n} \right] \quad (2)$$

ここに、 P_{bcl} ：baroclinic 圧力、 n ：両側のセルによって $i-1/2$ の線を上から順番に区切ったもの、 $(\delta_z)_{i-1/2, n}$ ： n 番目の切片の長さ

n 番目の切片における圧力勾配 $(\delta\rho/\delta x)_{i-1/2, n}$ は、まず、隣のセルの密度定義位置(+印)の水深での密度(○印 $\rho_{i-1, z(a)}$, $\rho_{i, z(b)}$)を線形補間し、 $z=a$, $z=b$ での密度勾配を求め、切片の中心(×印)での値に線形補間して算出する。

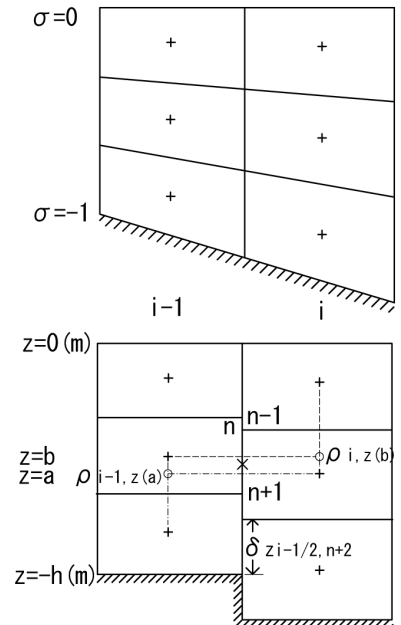


図-1 上；通常の σ 座標系
 下；補正したセル配置

3. 計算条件

計算は図-2 に示すように、急勾配を有するモデル地形で実施した。case-1,2 とともに、計算格子数は $30 \times 20 \times 30$ 層、大きさは 200m 四方である。斜面は $\cos^2$ 乗曲線で与え、case-1 で 1000m につき 28m、case-2 で 600m

キーワード σ 座標系, POM, 水平圧力勾配, 汽水域

連絡先 〒565-0871 吹田市山田丘 2-1 工学研究科土木工学専攻水システム工学領域 TEL 06-6879-7605

につき 24m 変化する。case-1 では、水深 2m の右側境界で外海と接し、水深 30m、塩分 15psu、水温 25°C の汽水湖に、塩分 34psu、水温 19°C の海水を単位幅あたり $0.25\text{m}^3/\text{s}$ 流入させた。計算開始後 12 時間は徐々に流量を増加させている。case-2 では水深 25m の密度成層化した汽水湖に風速 10m/s の東風（図-3 中、右から左へ）を連吹させた。計算開始後 6 時間で徐々に風速を増加させている。いずれのケースについても水平拡散、鉛直拡散を考慮し、コリオリ力は無視した。

4. 計算結果および考察

case-1 の海水流入開始から 48 時間後の密度分布を図-2 に示す。図-2(a), (b) はそれぞれ、通常の POM を適用した場合、Slørdal 法を用いて POM を適用した場合の結果である。図-2(a) より、POM をそのまま用いた場合、斜面から剥離するように密度場が変動し、結果として、密度場全体が鉛直方向に大きく拡散していることがわかる。また、斜面近傍で水平方向の密度差が大きくなるために、流速が過大に評価されている。一方で、Slørdal 法を用いた場合、海水が拡散せずに汽水湖底層に到達し、底層に密度の大きい水塊が蓄積されていることがわかる。その結果として、全体の流速が POM の結果に比べて、小さくなっている。

case-2 の計算開始から 24 時間後の温度分布を図-3 に示す。通常の POM を適用した場合(図-3(a))、風応力の影響が中層に及ぶにしたがって、両岸の水深 18m 付近から湖中央部に向けて、明らかにエラーと思われる高温水塊の移流が見られる。この水塊が中央で合流した後、水深 15m 付近で周囲との水温差が大きい水塊が間歇的に発生し続ける。一方で、Slørdal 法を用いた場合(図-3(b))、全体の温度の等値線は風の影響を受けて右上がりになり、風の影響が小さい下層では、ほぼ水平になっていることがわかる。このように、全体の密度場の再現には大幅な改善が見られる一方で、Slørdal 法を用いた場合、図-3(b) に示すとおり、両岸の急勾配地形付近で、等温線の急変が見られる。POM 用いた計算結果に比べると発生範囲は小さいものの、Slørdal 法を用いた場合でもその補正方法に起因する新たな誤差が発生している可能性が示唆される。

5. まとめ

POM をそのまま適用した場合に大きな誤差が発生する急勾配地形上の密度差の大きい流動に対して、Slørdal による補正方法を用いると誤差が低減され、良好な密度分布が得られるものと期待できる。今後、さらに他の現象に適用して、誤差補正効果についてより定量的な検討を行うつもりである。

<参考文献> 1) G. L. Mellor, T. Ezer and L. -Y. Oey, 'The pressure gradient conundrum of sigma coordinate ocean models', J. Atmos. Oceanic Technol., 11, 1126-1134 (1994)
2) G. S. Stelling and J. A. Th. M. van Kester, 'On the approximation of horizontal gradients in sigma co-ordinates for bathymetry with steep bottom slopes', J. Geophys. Res., 98, 14,683-14,701 (1993)
3) L. H. Slørdal, 'The pressure gradient force in sigma-co-ordinate ocean models, Int. J. Numer. Methods Fluids 24, 987-1017 (1997)

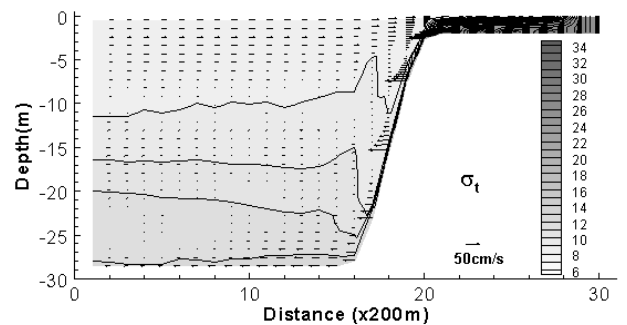


図-2(a) case-1 POM による密度分布

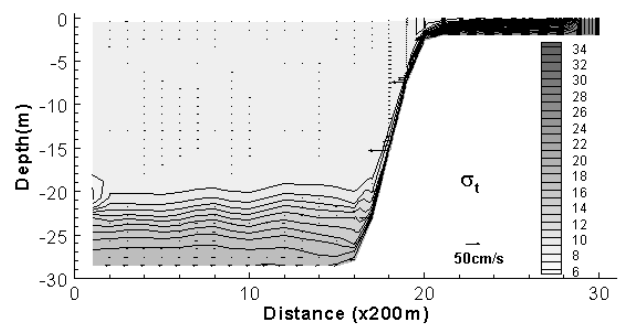


図-2(b) case-1 Slørdal の補正による密度分布

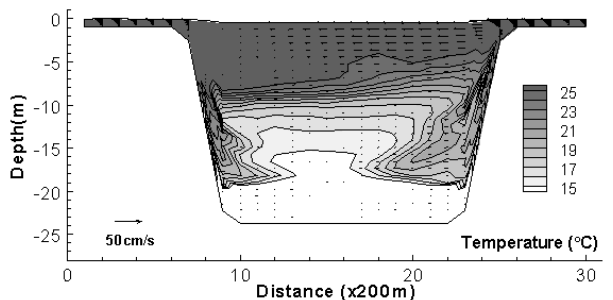


図-3(a) case-2 POM による温度分布

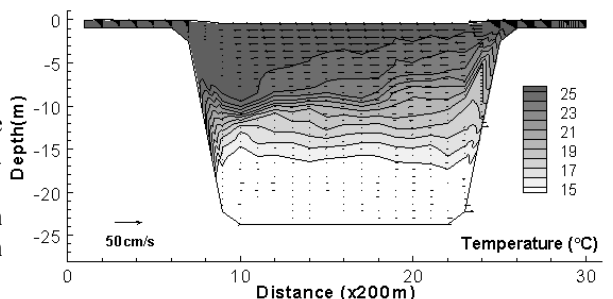


図-3(b) case-2 Slørdal の補正による温度分布