

中央大学 学員 吉川 修一

中央大学 正員 櫻山 和男

佐藤工業 正員 児玉 敏雄

1. はじめに

東京湾を典型とする閉鎖性内湾における青潮の湧昇、汚濁物質の移流拡散問題の特性を解明するためには、鉛直方向の流動を捉えることは必要不可欠である。そこで従来より数値解析手法として、レイヤーモデル、レベルモデル等が用いられてきた^{[1]-[4]}。レイヤーモデルは密度境界層が自由水面であるため鉛直方向の流動解析には適したモデルであるが、地形が複雑な場合、移動境界のモデル化等が複雑になる。一方レベルモデルは層間の関係の定式化がレイヤーモデルに比べて複雑ではあるが、境界が空間的に固定されており、複雑な地形に対応することができる。そこで本研究では、レベルモデルに着目し、従来水深は階段状に取り扱われていたものを直線的な水深変化が可能となるように改良を行った(図-1)。そして、本手法を東京湾の潮流解析に適用し、それを実測結果や単層モデル、2レイヤーモデルによる結果と比較し、本手法の有用性の検討を行った。

2. 基礎方程式と離散化

基礎方程式には、マルチレベルモデルを考慮した浅水長波方程式を用いる。また各層の圧力は静水圧分布を仮定する。離散化として、空間方向の離散化にガラーキン法による有限要素法、時間方向の離散化に2段階陽の解法を行う。また要素は三節点三角形一次要素を用いる。

$$\dot{u}_i^{(k)} + u_j^{(k)} u_{i,j}^{(k)} + \frac{1}{h^{(k)}} [(u_i w)^{k-\frac{1}{2}} - (u_i w)^{k+\frac{1}{2}}] + \frac{1}{\rho^{(k)}} p_{,i}^{(k)} - f \epsilon_{ij} u_j^{(k)} \\ = \frac{1}{\rho^{(k)} h^{(k)}} [h^{(k)} (\tau_{ij,j}^{(k)} + \tau_i^{(k)u} - \tau_i^{(k)l})] \quad (1)$$

$$\dot{\eta} + \sum_{l=1}^b (h^{(l)} u_i^{(l)})_{,i} = 0 \quad (2)$$

$$w^{(k)} = - \sum_{l=k}^b (h^{(l)} u_i^{(l)})_{,i} \quad (3)$$

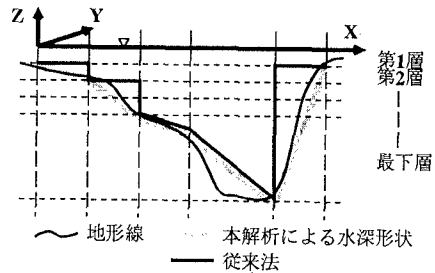


図-1 マルチレベルモデル

ここで、 (k) は層の番号、 $\rho^{(k)}$ は海水の密度、 $\tau_{ij,j}^{(k)}$ は粘性力、 $\tau_i^{(k)u}$ は自由表面での摩擦力、 $\tau_i^{(k)l}$ は底面での摩擦力、 f はコリオリの係数、 b は底層の層番号、 η は水位上昇量、 $h^{(k)}$ は第 (k) 層の層厚を表している。また式(1)中の左辺第3項は各層間の運動量の交換を表し、鉛直流速は式(3)で与えている。界面摩擦として、層間の密度差と速度差を考慮した式を用いた。

境界条件は陸岸境界において各層スリップ条件、開境界は反射波を考慮した開境界条件^[3]を用いた。

3. 数値解析例

本手法の実際問題に対する適用例として東京湾の潮流解析を行った。本手法の有用性を検討するため、本手法による結果を実測結果および浅水長波近似された単層モデル、2レイヤーモデルによる結果^[5]と比較を行った。なおレベルモデルの鉛直方向の層数は5層と10層(2ケース)を用いている。潮汐流として、 M_2 分潮(周期12.42時間、振幅0.25m)のみを考慮し、2周期間計算を行った。計算に用いる主な定数には、表-2の値を用いた。また水平渦動粘性係数は $40\text{m}^2/\text{sec}$ 、密度は $1.03\text{g}/\text{cm}^3$ とし、5層と10層では各層の密度を一定としている。また外力として河川の流入、風外力等は考慮せず、コリオリ力のみを与えている。図-3は表層における一周期平均の計算された潮汐残差流である。また太い矢印は夏季における残差流の実測の流向を示し、数字は大きさ(cm/sec)を表している。10層モデルの解析結果は単層解析の場合には見られない富津岬付近での時計回りの循環流がみられ、地形に沿った流動を捉えている。一方、湾奥では複雑な流動を示し、実測に見られるような恒流パターンは両者とも捉えられなかった。図-3は観測地点2,3(図-2参照)における潮流槽円を実測値と比較したものであり、レベルモデルによる計算結果は単層および2層モデルによる結果と比較して、実測値に近いことがわかる。また、図-4は横浜における水位上昇量を実測値と比較したものであり、レベルモデルによる結果が実測値とよい一致を示している。表-1は各モデルのCPU時間を比較したものであり、CPU時間は層数(要素数)に比例して増加することがわかる。

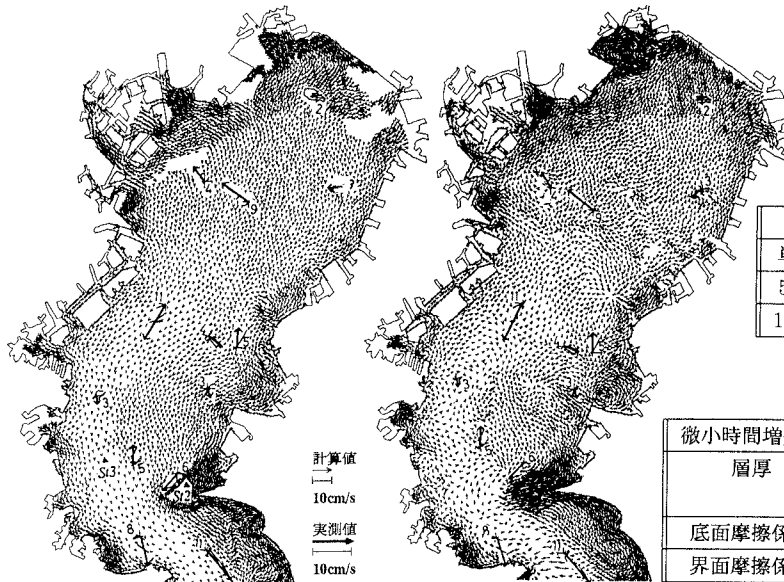


図-2 潮汐残差流(左:単層モデル, 右:10層モデル)
(太い矢 (cm/sec): 夏季における1ヵ月平均の恒流の流向と強さ)

	総要素数	CPU 時間
単層	19971	782 min
5層	32400	1490 min
10層	59160	2867 min

表-1 CPU 時間の比較

微小時間増分量	5.0 sec
層厚	5層 (8,10,10,10,15m) 10層 (各層 4m)
底面摩擦係数	0.026
界面摩擦係数	0.01

表-2 計算条件

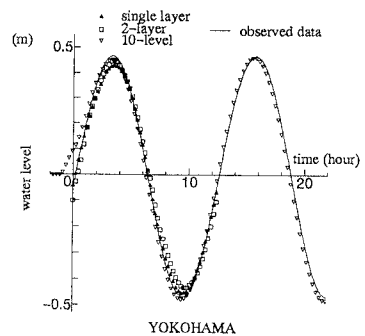
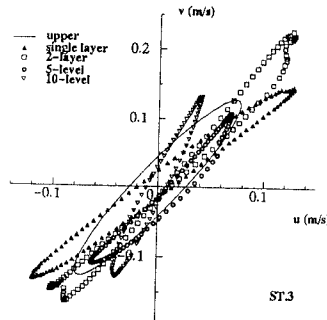
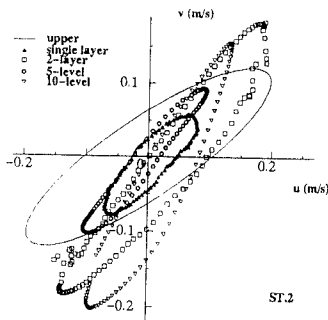


図-3 M_2 分潮による潮流楕円 (ST.2,3)

図-4 水位上昇量(横浜)

4. 終わりに

本報告において、水深変化をより正確に考慮したマルチレベルモデルを提案し、それを東京湾の潮流解析に適用し、湾の流動の特性を調べた。そして、計算結果を実測結果および単層、2レイヤーモデルによる結果と比較検討を行った。これらの比較より本手法は、東京湾の流動を良く捉えることができ、特に複雑な地形を有する場合の解析には有効な手法といえる。今後は、鉛直循環流についての検討を深めるため、密度成層を考慮した解析を行っていく予定である。

参考文献:

- [1] Kawahara, M., Kobayashi, M. and Nakata, K. "Multiple Level Finite Element Analysis and Its Applications to Tidal Current Flow in Tokyo Bay", pp.197-211, 1983
- [2] 村上和男 "2層モデルにおける鉛直循環流の評価と密度流の数値計算法", 第36回海岸工学論文集 pp.204-208, 1989
- [3] Kodama, T., Kawasaki, T. and Kawahara, M. "A Finite Element Method for Shallow Water Equation Including Open Boundary Condition", Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 2, pp.89-112, 1991
- [4] 日本海洋学会 沿岸海洋研究部会 "日本海洋学会誌" 東京湾 pp.335-361
- [5] 伊藤英恵、櫻山和男 "三段階テラーガーキン有限要素法による微細メッシュを用いた東京湾の潮流解析" 第49回土木学会概要集 共通セッション pp.128-129, 1994