

中央大学大学院 学員 ○吉川 修一
中央大学 正員 檜山 和男
佐藤工業 正員 児玉 敏雄

1. はじめに

東京湾のような閉鎖性内湾では、環境問題として赤潮・青潮の湧昇・沈降、汚濁物質の移流拡散等が生じている。そこで、その数値解析法として従来マルチレベルモデル等が用いられてきた^{[1][2]}。しかし従来のマルチレベルモデルは、単層に比べて準3次元的な解析を行うことができるため有効ではあるが、通常水深方向を格子分割するため、水深形状を正確に近似することができない。そこで本研究では、水深形状を線形的に補間し地形をできるだけ正確に表現することを試み、観測値との比較を行い本手法の適用性の検討を行った。

2. 水深形状の改良点

複雑な水深形状を有する数値解析を行う場合、水深形状を正確に再現することが重要である。観測地点付近の水深が急激に変化する部分などではその誤差は大きくなり、比較検討するにあたって影響は著しい。そこで本研究では、層分割を図-1のように形状を線形的に補間することで、水深形状をよりよく近似した。

3. 基礎方程式と境界条件

基礎方程式には、多層モデルを考慮した浅水長波方程式を用いる。

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

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

ここで、 $\dot{}$ は時間に関する偏微分、 $_{,i}$ は空間方向の偏微分を表す。また (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 は水位上昇量である。 $h^{(k)}$ は第 (k) 層の層厚を表している。また底層など水深の端数（水深と層厚の差）が生じる層では、その端数を加えたものを用いている。

鉛直方向流速も水位と同様に表せる。

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

各層の圧力は、静水圧分布により求める。

$$p^{(k)} = \rho^{(1)} g \eta - \sum_{m=1}^{k-1} \rho^{(m)} g h^{(m)} - \rho^{(k)} g (z - \sum_{m=1}^{k-1} h^{(m)}) \quad (4)$$

境界条件は陸岸境界において各層すべての条件、開境界においては後述する反射波を考慮した開境界条件を用いた。

4. 離散化

空間方向の離散化としてガラーキン法による有限要素法、時間方向の離散化として2段階陽的解法を行う。また要素は3節点三角形一次要素を用いる。

5. 開境界処理法^[2]

浅水長波解析を行う場合、全境界は陸岸境界と開境界とに設定される。そして解析を行う際、陸岸境界では完全反射の条件、開境界では周期的な水位変動の条件を与える。しかし、湾奥で発生した反射波は開境界上において捉えることができず、疑似の反射波が発生し、湾の固有周期に依存する自由振動モードが誘発されて、潮流現象を周期的に表すこ

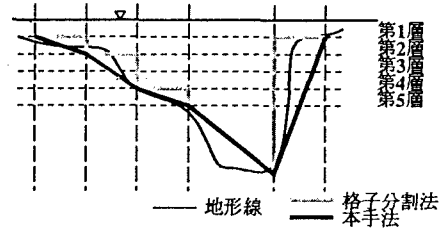


図-1 東京湾断面の模式図

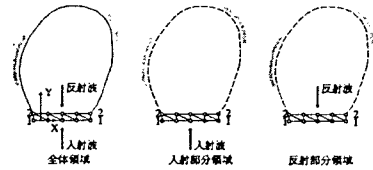


図-2 部分領域の概念図

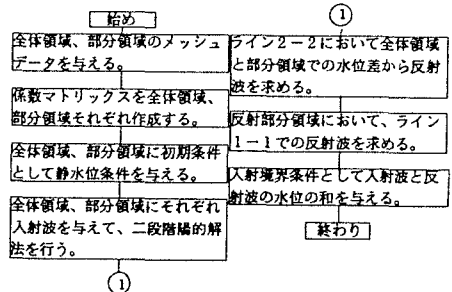


図-3 部分領域の計算手順

とができない。そこで本論文では、この疑似の反射波成分を「部分領域」というものを用いることによって求め、入射境界条件を無反射性のものとした。図-2に部分領域の概念図、図-3に計算手順を示す。

6. 東京湾潮流解析

本手法の実際問題に対する計算例として、東京湾の潮流解析を行った。図-5に東京湾の有限要素分割図を示す。総節点数 2029、総要素数 3473 とする。本解析では 5 層モデルを行い、各層の厚さは 5, 10, 10, 10, 15m とする。また、湾口境界での入射波の条件として周期 12.42 時間、振幅 0.25m の正弦波を与える。計算には微小時間増分 $\Delta t = 15.0$ 秒を用いる。各係数では渦動粘性係数 $10.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 、ランピングパラメーターを運動方程式で 0.9、連続式で 0.9 を用いている。

また河川流入として主要河川の江戸川、荒川、多摩川、鶴見川を考慮し、風外力として北風を対象とした。図-6は表層での残差流を、また図-7は各観測地での水位上昇量を示したものである。各観測点での水位上昇量は調和定数表から発生させたその時間変化を意味し、解析結果と良い一致を示している。残差流の結果から富津岬南部での循環をとらえることができたが、湾奥での時計回りの恒流パターンは見ることができなかった。

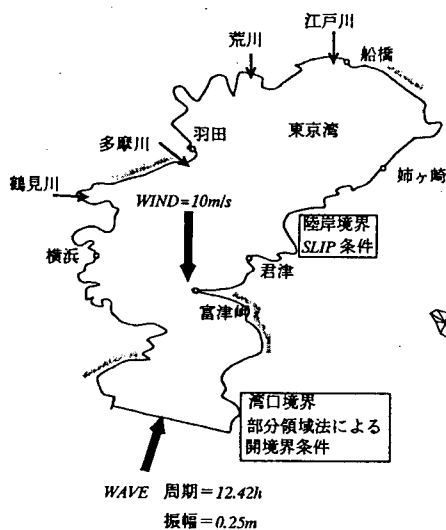


図-4 境界条件

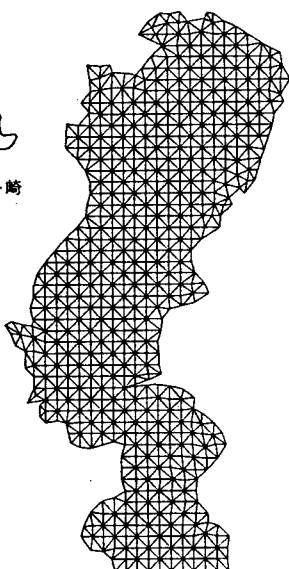


図-5 有限要素分割図

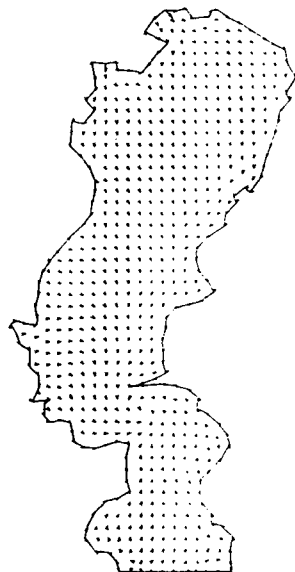


図-6 表層における残差流

7. おわりに

本報告において水深形状をできるだけ正確に表現するために線形補間を導入したマルチレベル法を提案した。これにより本手法は、複雑な水深形状を有する解析においても適用可能となる。今後の課題として、実測値との比較を多角的に行い、本手法の有用性を検討していく予定である。

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] 児玉敏雄: "多層有限要素法による東京湾潮流解析", 第47回土木学会概要集 pp.596
- [3] 日本全国沿岸海洋誌 第9章 東京湾, pp.335-361

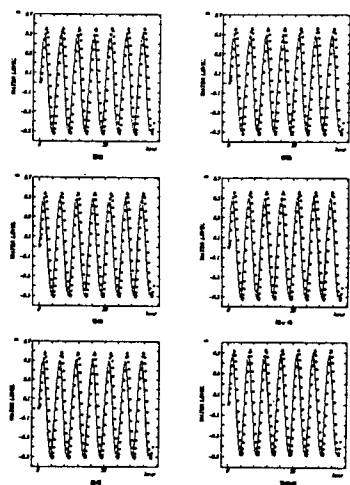


図-7 水位の時間変化 (M2分潮)