

2次元単層浅水方程式を用いた潮流シミュレーションへのOne-way-nesting法の導入

誌名	九州大学大学院農学研究院学芸雑誌
ISSN	13470159
著者名	本田,裕理 平松,和昭 原田,昌佳
発行元	九州大学大学院農学研究院
巻/号	67巻1号
巻号補足	
掲載ページ	p. 9-23
発行年月	2012年2月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



2次元単層浅水方程式を用いた潮流シミュレーションへの One-way-nesting法の導入

本 田 裕 理¹・平 松 和 昭^{*}・原 田 昌 佳

九州大学大学院農学研究院環境農学部門生産環境科学講座水環境学研究分野
(2011年10月28日受付, 2011年11月9日受理)

Application of One-way-nesting Technique on Tidal Current Simulation in Coastal Waters using a Two-dimensional Shallow Water Model

Yuri HONDA¹, Kazuaki HIRAMATSU^{*} and Masayoshi HARADA

Laboratory of Water Environment Engineering, Division of Bioproduction Environmental Sciences,
Department of Agro-environmental Sciences, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

緒 言

陸域と海域との移行帯である沿岸浅海域は、淡水と海水の混ざり合う汽水域を形成すること、潮汐・潮流などによる物理的変動の大きいこと、陸域の影響を強く受けることなどから、非常に複雑な環境を形成している。特に潮汐によって形成される干潟の影響は大きく、陸域からの流入による栄養源や、波による好気的環境により、沿岸浅海域は生物の生育場としての機能や渡り鳥の餌場としての機能を有している。また、そのような沿岸浅海域では養殖業などの漁業も盛んに行われてきた。しかし一方で、陸域に近いことから人の生活の影響を受けやすく、干潟をはじめ、昔から沿岸開発の対象地域となっている。さらに、沿岸浅海域の閉鎖性が高い場合、生活排水などによる窒素・リンの過剰な流入から、富栄養化状態になりやすい海域でもある。近年ではそうした干潟の劣化・消滅を中心に、沿岸浅海域における環境の悪化が問題となっており、早急な対策が必要である(馬場崎, 2008)。このような沿岸浅海域における環境問題に対する対策立案に際

して、物理的・生物化学的素過程の数理表現に基づく数値シミュレーションが極めて有効となる。

一般に、沿岸浅海域には、周りとは比べ局的に狭くなっている海域や、あるいは沿岸開発による人工的な構造物の存在により地形が急変している海域が存在する。そのような海域では、より解像度の高い計算を行う必要がある。しかし一方で、計算対象領域全体を高解像度とすると計算量が膨大となり、多大な計算時間を要することになる。さらに局所スケールの解析を行う場合、より広域スケールの流動場の影響も無視できない。このような場合、空間解像度の異なる計算領域を複数設定し、それぞれの計算結果を相互に伝達しつつ同時並行的に計算する、という多重ネスティング計算法が有効である。

本研究では新しい多重ネスティング計算法(二瓶ら, 2003)を採用し、これを2次元単層モデルへ導入し、仮想海域での数値実験を通してその有効性を検討した。二瓶ら(2003)のネスティング計算法は、大領域における計算結果を一方向的に小領域計算へ反映させる one-way ネスティングと呼ばれる計算法である。本

¹九州大学大学院生物資源環境科学府環境農学専攻生産環境科学教育コース水環境学研究分野

¹Laboratory of Water Environment Engineering, Course of Bioproduction Environmental Sciences, Department of Agro-environmental Sciences, Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University

^{*}Corresponding author (E-mail:hiramatsu@bpes.kyushu-u.ac.jp)

計算法では、大領域における結果を小領域計算へ時空間内挿する必要があり、そのため本研究では「支配領域」という考え方に基づくアルゴリズムを新たに開発した。

本研究の一部は日本学術振興会・科学研究費補助金・基盤研究(B) (課題番号: 23380144, 研究代表者: 平松和昭) の補助を受けた。記して謝意を表します。

材 料 と 方 法

1. 2次元単層モデル

(1) 概要

本研究では2次元単層モデルを用いた。内湾や湖沼のように、水深方向の変動スケールが水平方向の変動スケールと比べて極端に小さく、水平方向の空間スケールや水理量の変動スケールが大きな場合、水平方向の挙動を解析すれば十分であることが多い。このような場合に2次元単層モデルがしばしば用いられる。2次元単層モデルは、3次元基礎方程式を水深方向に積分することで得られる支配方程式を用いたモデルで、3次元モデルと比べ計算が簡潔であり、また計算時間も大幅に短くなるため、沿岸浅海域など水深の浅い海域において、潮流の平面的挙動を知るには実用的なモデルといえる(齋ら, 2006)。

(2) 支配方程式

2次元単層モデルの基礎方程式を求めるにあたり、平均海面上の1点に原点をとり、水平面上に x 軸、 y 軸、鉛直上方に z 軸をとる右手系の座標系を採用した。ここで平均海面は東京湾平均海面0m(海拔0m)である。Reynoldsの3次元基礎方程式を水深方向に積分することで2次元単層モデルの基礎方程式を求めた。このとき、次の3つの仮定を導入する。1) 質量力は重力とコリオリ力を考慮する。2) 静水圧分布が成立する。3) 動粘性係数と渦動粘性係数の関係は $(\nu + \nu_t) \approx \nu_t$ であり、水平方向と鉛直方向の乱れスケールが異なるため、両方向の渦動粘性係数 ν_h , ν_v は値が異なる。これらの過程により求めた、2次元単層モデルの支配方程式は、以下に示す通りである。

・連続方程式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + \eta)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(h + \eta)v] = 0 \quad (1.1)$$

・運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v \\ & = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{h + \eta} \frac{\tau_{xx} - \tau_{yy}}{\rho} \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u \\ & = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{h + \eta} \frac{\tau_{xy} - \tau_{yx}}{\rho} \end{aligned} \quad (1.3)$$

ここで、 η は水位(m)、 u , v は x , y 方向の流速(m/s)、 t は時間(s)、 ρ は流体の密度(kg/m³)、 p は圧力(N/m²)、 h は海面地盤高さ(m)、 f はコリオリ係数(s⁻¹)、 g は重力加速度(m/s²)、 A_H は水平方向の渦動粘性係数(m²/s)、 $\tau_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$ は水面せん断力(N/m²)、 $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ は底面せん断力(N/m²)である。渦動粘性係数 A_H の評価には次のSmagorinskyモデル(Smagorinsky, 1963)を導入した。

$$A_H = (C_s \Delta)^2 \left\{ 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

ここで、 C_s はモデル定数(=0.10)、 Δ は格子幅(m)である。また、水面せん断力および底面せん断力は以下の式により求めた。

$$\tau_{sx} = C_{fs} \rho_a U_w \sqrt{U_w^2 + V_w^2} \quad (1.5)$$

$$\tau_{sy} = C_{fs} \rho_a V_w \sqrt{U_w^2 + V_w^2} \quad (1.6)$$

$$\tau_{bx} = C_{fb} \rho u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1.7)$$

$$\tau_{by} = C_{fb} \rho v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1.8)$$

ここで、 C_{fs} は水面摩擦係数(=0.0013)、 ρ_a は空気密度(=1.293(kg/m³))、 U_w , V_w は x , y 方向の風速(m/s)、 C_{fb} は底面摩擦係数(=0.0026)である。

以上の方程式により数値解析を行った。このとき、差分展開には陽的解法であるLeap Frog法を用い、メッシュ系はスタッガードメッシュ系を選択した。

(3) 干潟処理

沿岸浅海域では潮位の変化に伴い干潟が干出する。このとき水深は0となるが、式(1.2)、(1.3)の分母に水深($h + \eta$)が存在するため、干潟の出現により計算が破綻する。そこで本モデルでは、干潟処理(Wetting and Drying Scheme, WDS)を導入し、格子点にLand Mask関数(LMF)(内山, 2004)を定義し、冠水・干出の判定を行った。このLMFは、陸域では0、海域では1の2値をとる関数であり、以下が干潟処理のアルゴリズムである。

まず、最低水深 $d_{\min}$ を設定する。本モデルでは0.2mとした。次に各計算格子点におけるある瞬間の水深 $D_{m,n}$ ($=h_{m,n} + \eta_{m,n}$)(m)と $d_{\min}$ の大小判定を行う。 $D_{m,n} > d_{\min}$ となる場合、そのメッシュは冠水していると判断し、 $LMF_{m,n} = 1$ とし計算領域に残す。一方 $D_{m,n} \leq d_{\min}$ となる場合、そのメッシュは潜在的に干出してい

ると判断し、さらに以下の3つの条件から構成されるWDSを適用する.

$$\left. \begin{array}{l} \text{a) } \min[\eta_{m-1,n}, \eta_{m+1,n}, \eta_{m,n-1}, \eta_{m,n+1}] \leq \eta_{m,n} \\ \text{b) } \min[D_{m-1,n}, D_{m+1,n}, D_{m,n-1}, D_{m,n+1}] \leq d_{\min} \\ \text{c) } \max[LMF_{m-1,n}, LMF_{m+1,n}, LMF_{m,n-1}, LMF_{m,n+1}] = 0 \end{array} \right\} (1.9)$$

すなわち、当該メッシュに隣接する周囲4つのメッシュに注目し、それぞれの格子点の値と当該メッシュの格子点の値を比較する。もし上記の条件を1つも満たさない場合、そのメッシュは冠水していると判断し、 $LMF_{m,n} = 1$ とし計算領域に残す。上記の条件のうち少なくとも1つ以上を満足する場合は、そのメッシュは実際に干出していると判断し、 $LMF_{m,n} = 0$ とし、計算領域から除外する。

(4) 潮汐計算

本モデルは湾口に潮位の変動を与えることにより計算を進める。その潮位は観測点における潮汐調和定数により求める。

$$\eta = \sum_{i=1}^{N_b} f_i H_i \cos[(V_i + u_i) - \kappa_i] + z_0 \quad (1.10)$$

ここで、 V_i , u_i , f_i は天文引数、 H_i , κ_i は観測地点での調和定数、 N_b は分潮数である（海上保安庁, 1992）。

2. ネスティング計算法

(1) 概要

本研究では、局所スケールの流れに対応したモデルを構築するため、ネスティング計算法を導入した。ネスティング計算とは、広域スケールの低解像度計算を行うとともに、必要な領域のみ局所スケールの高解像度計算を行うという計算手法であり、上位の大領域計算結果を下位の小領域計算に一方的に反映させるone-way ネスティング手法と、小領域計算結果を大領域計算へフィードバックさせるtwo-way ネスティング手法の2つに大別できる。

本研究のモデルには新しいone-way 多重ネスティング計算法（二瓶ら, 2003）を用いた。従来のネスティング計算法では図1に示すように、大領域での計算結果が境界条件を通じてのみ小領域計算へ反映されていた。一方本ネスティング計算法では、以下の式のように、小領域計算における水位・流速等の各従属変数を、上位の大領域計算結果と、それからの偏差に分離することで、小領域全体に大領域での計算結果を反映させる。

$$\left. \begin{array}{l} u_i = u_a + u_f \\ v_i = v_a + v_f \\ \eta_i = \eta_a + \eta_f \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

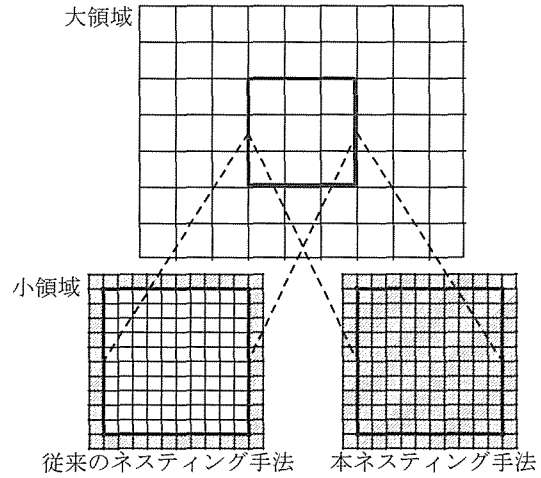


図1 小領域計算における大領域計算結果の反映範囲（ハッチ部）

ここで、添え字 t , a , f , はそれぞれ全成分、同化成分、変動成分を表している。また海底地盤高さ h に関しても同様に同化成分と変動成分に分離して考える。以下、大領域計算結果を同化成分、偏差を変動成分とする。

この手法の利点としては、同化成分として既存のプログラムから得られる大領域計算結果を利用できること、広域スケールと局所スケールの計算を分けて行うために、大領域・小領域それぞれが、それぞれのメッシュの取り方に依存しないこと等が挙げられる。またこの計算法はtwo-way ネスティング計算法に拡張することも可能である（二瓶ら, 2002）。

以上をまとめて計算の手順を示す。まず大領域での計算を行い、それを時空間内挿し、同化成分として小領域の計算へ与える。次に小領域計算では、グリッドの解像度が上がったことによる偏差を変動成分として求める。最後にこれらを足し合わせることで、これを小領域での計算結果とする。また、大領域と小領域における計算時間間隔の比は、各計算領域におけるクーラン数を同一とするように、格子幅 Δx , Δy の比を用いて、以下の式のように表せる。ここで添え字 L , S はそれぞれ大領域、小領域における値を示す。なお、本研究では $\Delta x = \Delta y$ である。

$$\frac{\Delta x_L}{\Delta x_S} = \frac{\Delta y_L}{\Delta y_S} = \frac{\Delta t_L}{\Delta t_S} \quad (2.2)$$

(2) 同化成分

同化成分は既然大領域計算における基礎方程式を満たしていることから、基礎方程式である式 (1.1),

(1.2), (1.3) より以下の式が得られる.

・連続方程式 (同化成分)

$$\frac{\partial \eta_a}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h_a + \eta_a) u_a] + \frac{\partial}{\partial y} [(h_a + \eta_a) v_a] = 0 \quad (2.3)$$

・運動方程式 (同化成分)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_a}{\partial t} + u_a \frac{\partial u_a}{\partial x} + v_a \frac{\partial u_a}{\partial y} - f v_a \\ = -g \frac{\partial \eta_a}{\partial x} + A_{Ha} \left(\frac{\partial^2 u_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_a}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{h_a + \eta_a} \frac{\tau_{sxa} - \tau_{bxa}}{\rho} \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_a}{\partial t} + u_a \frac{\partial v_a}{\partial x} + v_a \frac{\partial v_a}{\partial y} + f u_a \\ = -g \frac{\partial \eta_a}{\partial y} + A_{Ha} \left(\frac{\partial^2 v_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_a}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{h_a + \eta_a} \frac{\tau_{sya} - \tau_{bya}}{\rho} \end{aligned} \quad (2.5)$$

(3) 変動成分

式 (2.1) のように, 全成分から同化成分を差し引いたものが変動成分である. そこで変動成分の算定には, まず全成分を表す基礎式である式 (1.1), (1.2), (1.3) に変数分離操作を行っている式 (2.1) を代入する. そこで得られた式から同化成分に関する式 (2.3), (2.4), (2.5) を差し引くことにより, 下記のような変動成分に関する連続方程式と運動方程式が得られる.

・連続方程式 (変動成分)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h_f + \eta_f) u_f + (h_i + \eta_i) u_i] \\ + \frac{\partial}{\partial y} [(h_f + \eta_f) v_f + (h_i + \eta_i) v_i] = 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

・運動方程式 (変動成分)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_f}{\partial t} + u_f \frac{\partial u_a}{\partial x} + u_i \frac{\partial u_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial u_a}{\partial y} + v_i \frac{\partial u_f}{\partial y} - f v_f \\ = -g \frac{\partial \eta_f}{\partial x} + A_{Hf} \left(\frac{\partial^2 u_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_f}{\partial y^2} \right) \\ + A_{Ha} \left(\frac{\partial^2 u_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_f}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\tau_{sxi} - \tau_{bxi}}{h_i + \eta_i} - \frac{\tau_{sxa} - \tau_{bxa}}{h_a + \eta_a} \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_f}{\partial t} + u_f \frac{\partial v_a}{\partial x} + u_i \frac{\partial v_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial v_a}{\partial y} + v_i \frac{\partial v_f}{\partial y} + f u_f \\ = -g \frac{\partial \eta_f}{\partial y} + A_{Hf} \left(\frac{\partial^2 v_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_f}{\partial y^2} \right) \\ + A_{Ha} \left(\frac{\partial^2 v_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_f}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\tau_{syi} - \tau_{byi}}{h_i + \eta_i} - \frac{\tau_{sya} - \tau_{bya}}{h_a + \eta_a} \right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

ここで, 底面せん断力項に関しては, 式展開が複雑に

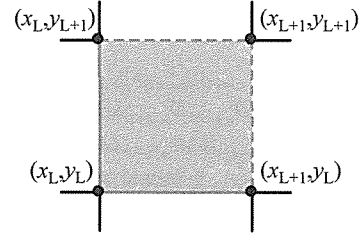


図2 点 (x_L, y_L) の支配領域
(ただし $x = x_{L+1}$, $y = y_{L+1}$ のライン上は含まない)

なるため, 全成分による項から同化成分による項を直接差し引く形となっている. また, 水面せん断力項に関しても, 底面せん断力項と類似して, 全成分から同化成分を差し引く形で記述されている. この水面せん断力の全成分 τ_{sxi} , τ_{syi} は小領域計算で用いられる水面せん断力であり, 同化成分 τ_{sxa} , τ_{sya} は大領域計算で用いられる水面せん断力の空間内挿値であるため, 通常沿岸流動計算で用いられる空間的に一様な風応力条件下では, 水面せん断力の全成分と同化成分は同一となる.

(4) 空間内挿

大領域計算は小領域計算と比べ低解像度であるため, 大領域計算結果を同化成分として与える場合, 空間内挿を行う必要がある. 空間内挿を行うために, 「支配領域」という考え方に基づくアルゴリズムを開発した. 図2に示すように, 小領域計算点はそれぞれ周囲を4つの大領域計算点に囲まれている. このアルゴリズムは, これら4つの計算点のうち, 左下の大領域計算点を, その小領域計算点の支配領域とする考え方である. その支配領域を基準とし, 空間内挿を行った.

(5) 時間内挿

大領域計算と小領域計算を同一時刻に行う場合, 時間内挿の必要はない. しかし大領域と小領域では計算時間間隔が異なるため, 小領域計算のみを行う時間の場合, 大領域計算結果を時間内挿する必要がある. 本研究では, 前後の大領域計算結果を線形補間することで, 時間内挿を行った.

(6) 境界条件

小領域計算における変動成分に対する境界条件として, 本研究ではSommerfeldの放射条件を導入した. これは大領域計算結果が同化成分として小領域計算へすでに与えられていることから, 変動成分に対する境界条件として, 大領域計算結果を考慮する必要がないためである.

この境界条件は, 境界上で境界に垂直な方向に対する移流方程式を解くことを基本とし (笹尾ら, 2005),

境界での波の反射をできる限り抑えることが可能となる(中西, 2002). 一般形は, 流出境界の法線方向が x 軸に等しいとすると, 以下の式となる(吉田ら, 2003).

$$\frac{\partial \phi_f}{\partial t} + c \frac{\partial \phi_f}{\partial x} = 0 \quad (2.9)$$

ここで ϕ_f は任意の従属変数の変動成分, c は波速 (m/s) である.

3. 計算条件

本研究では仮想海域を用いてモデルの検証を行った. 以下では, その仮想海域の概要および検証方法について述べる.

(1) 仮想海域概要

本研究では図3にあるような, 南北方向に4.8km, 東西方向に4.0kmの長方形湾を仮想海域として設定した. またネスティング計算法の効果を検証するため, 湾内中央に400m×400mの陸域を設定した.

(2) 計算条件

モデル検証のために, 24時間の解析を行った. 計算期間としては大潮満潮時からの2潮汐の間とし, 検証には後半の1潮汐を用いた. また将来的にはモデルの実海域への適用を検討しているため, 本研究では潮位

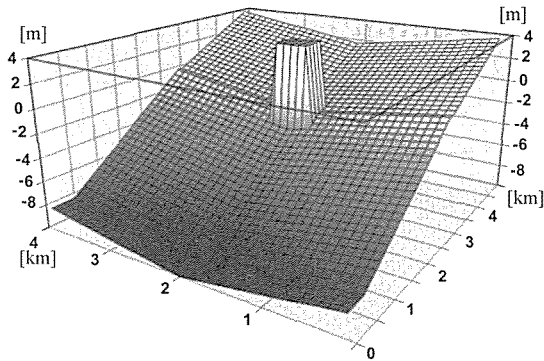


図3 仮想海域

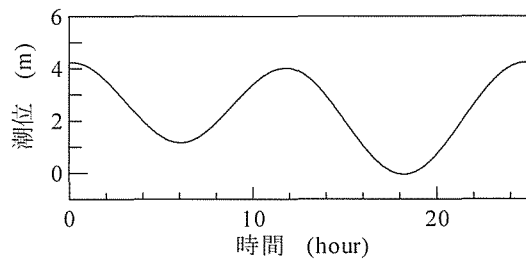


図4 湾口潮位

差の大きい有明海湾中央潮位である. 島原新港と熊本港の潮位の平均値を与えた. 期間としては2007年12月25日10:00から26日11:00までであり, その間の潮位を図4に示す. なお, 河川流入と風による水面シアの影響を考慮していない.

(3) ネスティング計算

本研究では図5に示すような, 湾内全体の大領域と, 中央陸域付近の小領域の2つの計算領域を設定した. 通常の2次元単層モデルを用いて大領域の計算を, ネスティング計算法を用いて小領域の計算を行う. 計算格子幅比は, 大領域100m, 小領域20mの5:1とした. その他詳細は表1に示す. 小領域の境界条件にはSommerfeldの放射条件を採用した. また中央陸域による流れの擾乱に対して, 大領域計算では1500回に1回スムージング処理を行った.

(4) reference計算

本研究では, ネスティングモデルの精度検証のためにreference計算を行った. これは仮想海域全体を小領域計算と同じ計算格子幅, 時間間隔で計算するシミュレーションである. あらかじめ大領域と小領域の計算格子幅比を調節し, 小領域計算点とreference計算点が一致するように設定することで, 小領域計算の精度を検討することが可能となる. 計算格子幅など詳細は表1に示す.

湾口境界条件は大領域と同様である. またスムージング処理を2400回に1回行った.

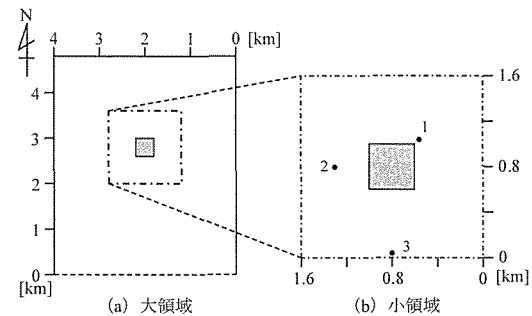


図5 仮想海域計算領域

表1 計算条件

	面積 (km)	格子幅 (m)	時間間隔 (s)	メッシュ数
大領域	4.8 × 4.0	100	1.0	49 × 41
小領域	1.6 × 1.6	20	0.2	81 × 81
reference 計算	1.8 × 4.0	20	0.2	241 × 197

結果と考察

1. 仮想海域計算結果

次にシミュレーション結果を示す。図6～図8はそれぞれ、シミュレーション開始15時間後（下げ潮最強流速時）、18時間後（最干潮時）、21時間後（上げ潮最

強流速時）の仮想海域の様子である。またここでは、図化の関係により流速ベクトルを間引いてプロットしている。米印は干潟を示す。reference計算結果と比べると、小領域計算結果では、陸域角付近の流速に対する過小評価が見られる一方で、陸域を回りこむ流れなど、全体として比較的良好な流速・流向の再現結果が

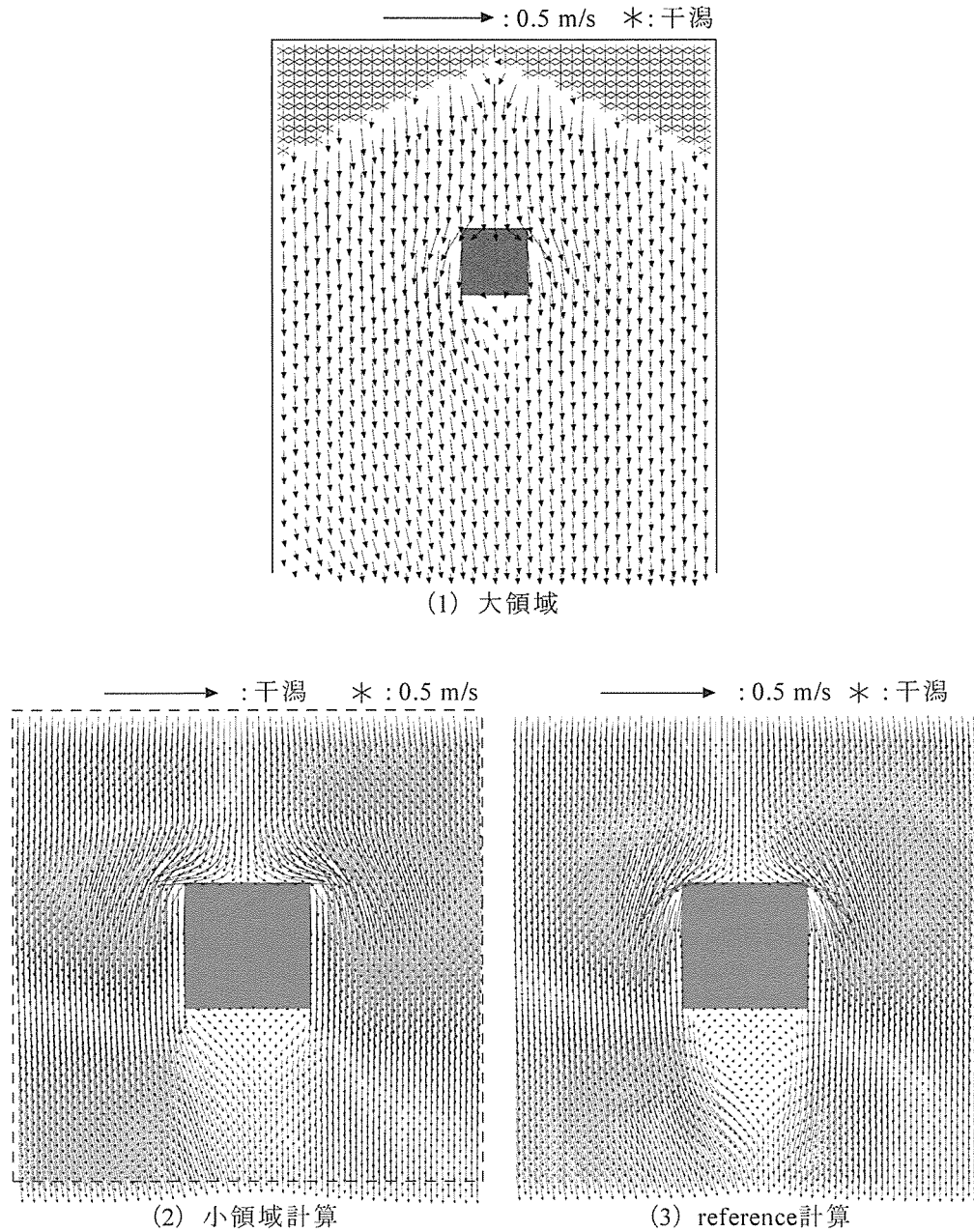


図6 計算開始15時間後（下げ潮最強流速時）の潮流ベクトル

得られているように見える。

再現結果の妥当性をより詳細に検証するために、図5中の3点に関して小領域計算結果とreference計算結果の比較を行った。図9は3点における水位の時間変化を示している。丸が小領域計算結果を、実線がreference計算結果を示す。水位に関してほとんど誤差

は見受けられない。また図10は3点の流速をベクトルで表したものであり、ベクトルの向きが流向を、長さが流速を表している。黒のベクトルが小領域計算結果、点線のベクトルがreference計算結果である。陸域の角近くであるPoint2ではやはり小領域計算における過小評価が見られる。しかし一方で、他2点に関しては、

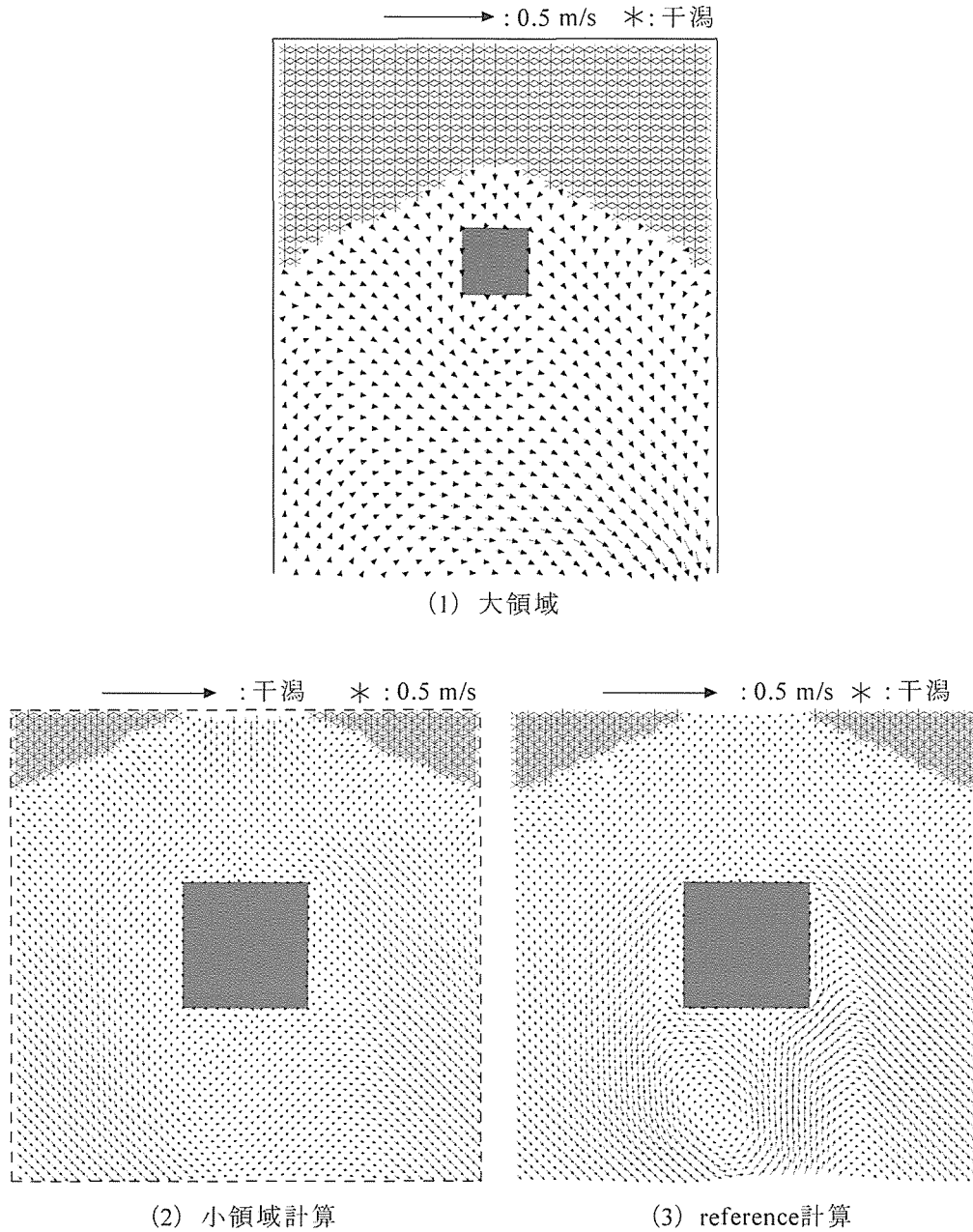
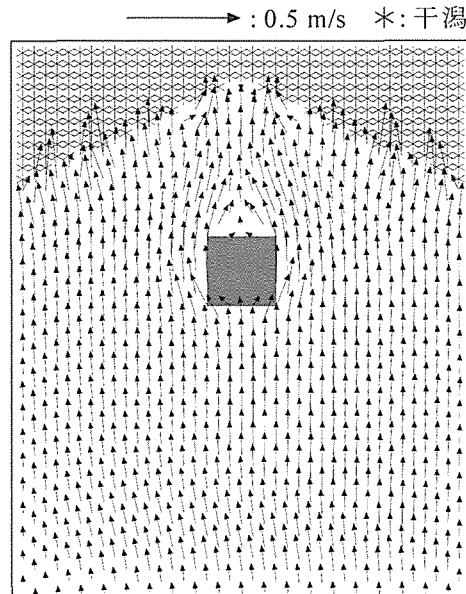


図7 計算開始18時間後（最干潮時）の潮流ベクトル

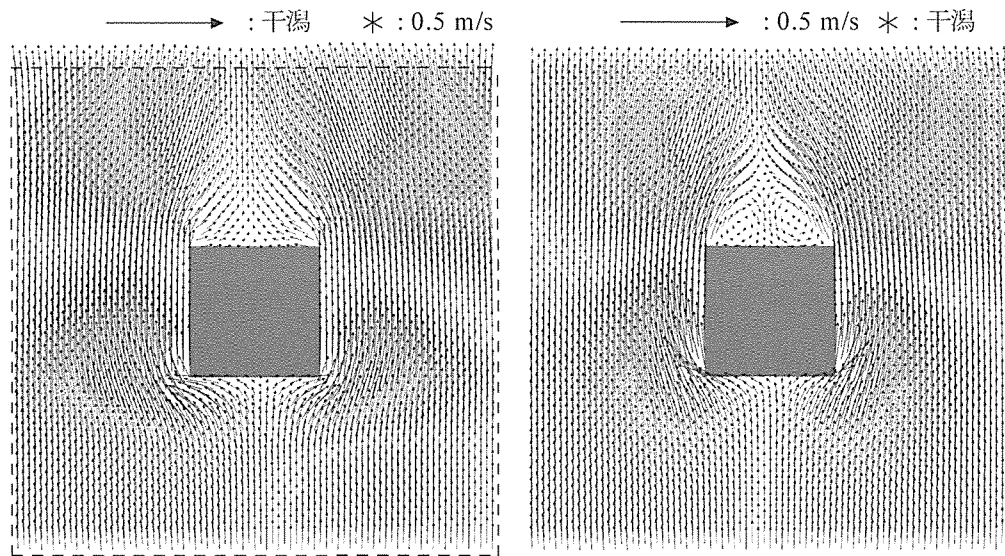
違いはほとんどない。

次に, 15 時間後 (下げ潮最強流速時) と 21 時間後 (上げ潮最強流速時) における, 小領域境界付近の水位・流速の変動について表したものが図 11 ~ 図 13 となる。丸が小領域計算結果を, 線が大領域計算結果を示す。

x 軸が 0 の点の小領域境界となり, プラス方向に進むと小領域内に, マイナス方向に進むと小領域外, すなわち大領域のみの計算点となる。どの境界においても, 大領域計算結果と小領域計算結果に大きな差はなく, 大領域計算結果が同化成分として小領域計算へ反映し



(1) 大領域

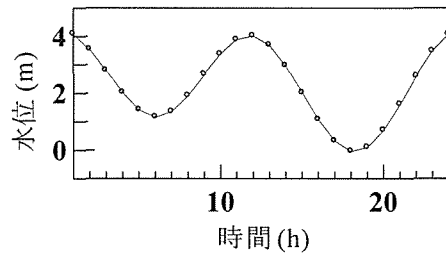


(2) 小領域計算

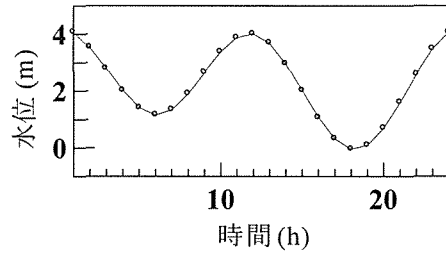
(3) reference計算

図8 計算開始 21 時間後 (上げ潮最強流速時) の潮流ベクトル

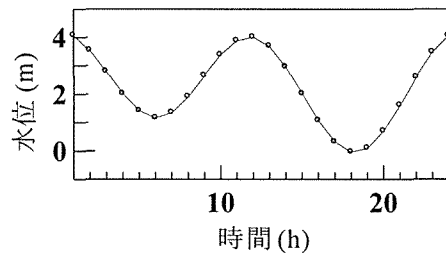
○ 小領域計算 ——— reference 計算



(2) Point 1



(2) Point 2



(3) Point 3

図9 水位変動に関する小領域計算とreference計算の比較

ていることがわかる。また、小領域計算において、境界条件による問題が起きていないことも判断できる。

さらに今回の計算条件において、全体を小領域と同じ格子間隔で行うreference計算では、1回の計算時間が約4.5時間であったのに対し、特定の領域のみを詳細に計算するネスティング計算法を導入した場合、1回の計算時間は約1.5時間であった。これより、ネスティング計算法による大幅な計算時間の短縮が期待できる。

2. 比較検討

(1) 干潟の出現

本モデルの沿岸浅海域への適用性を検討するため、図14に示すように陸域を移動し、陸域と干潟が重なる状態でのシミュレーションを行った。陸域以外の計算条件は前述の計算条件と同じである。図15はシミュレーション開始18時間後（最干潮時）の仮想海域の様子である。reference計算結果と比べ、小領域計算結果においても同様の干潟の出現が見られる。よってこのモデルは干潟の出現する沿岸浅海域においても適用できるものと考えられる。

(2) 後流渦の消失

図8を比較したときreference計算結果で見られた後流渦の発生を、小領域計算結果では確認できなかった。これは小領域計算における変動成分の再現性が不十分であることに起因し、フィードバック計算を行うtwo-way ネスティング計算法の導入など、今後の改善が必要である。

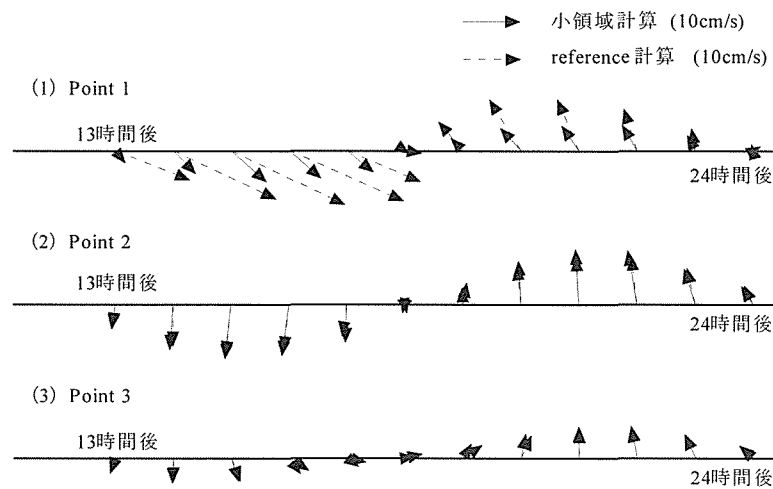


図10 流速・流向に関する小領域計算とreference計算の比較

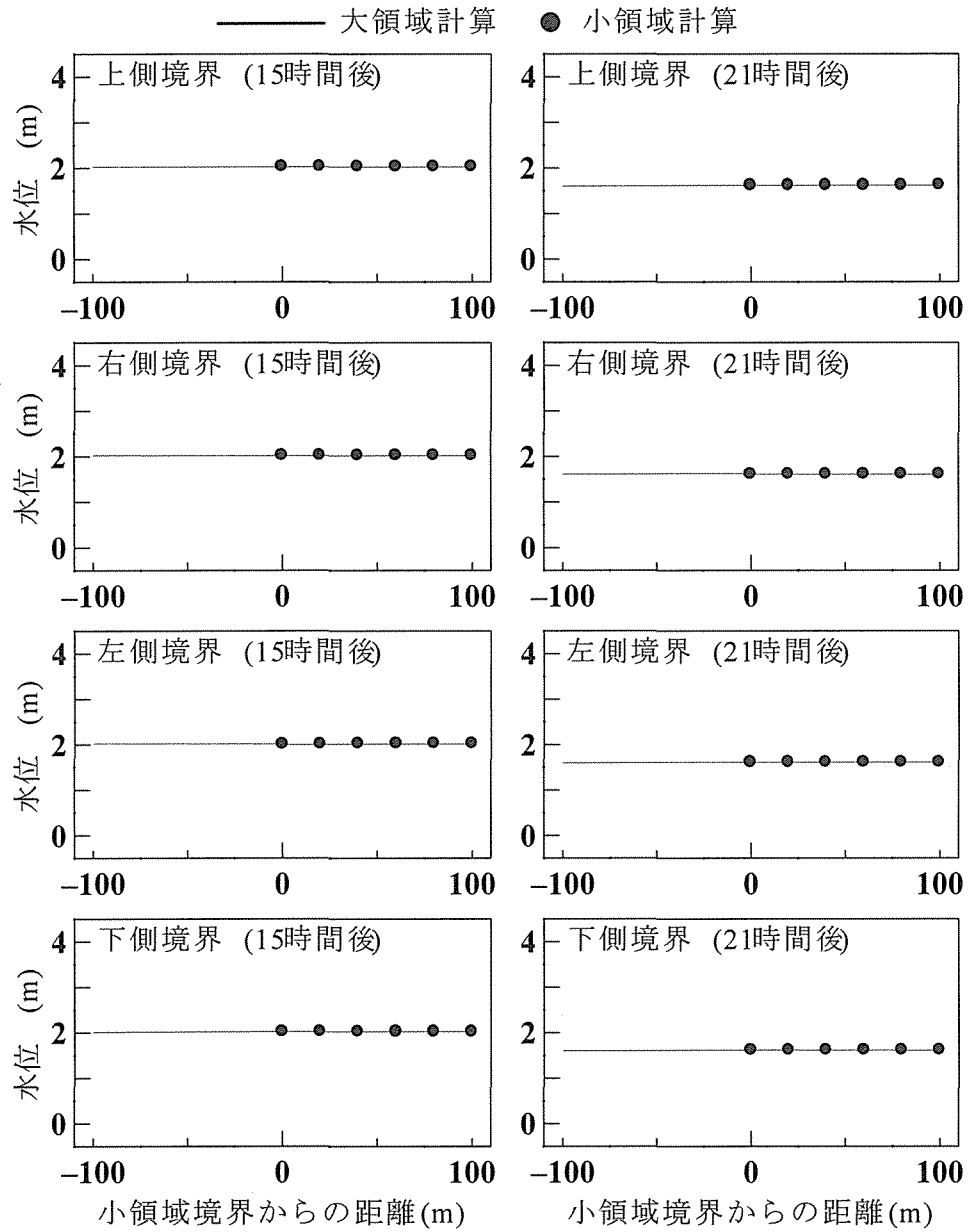
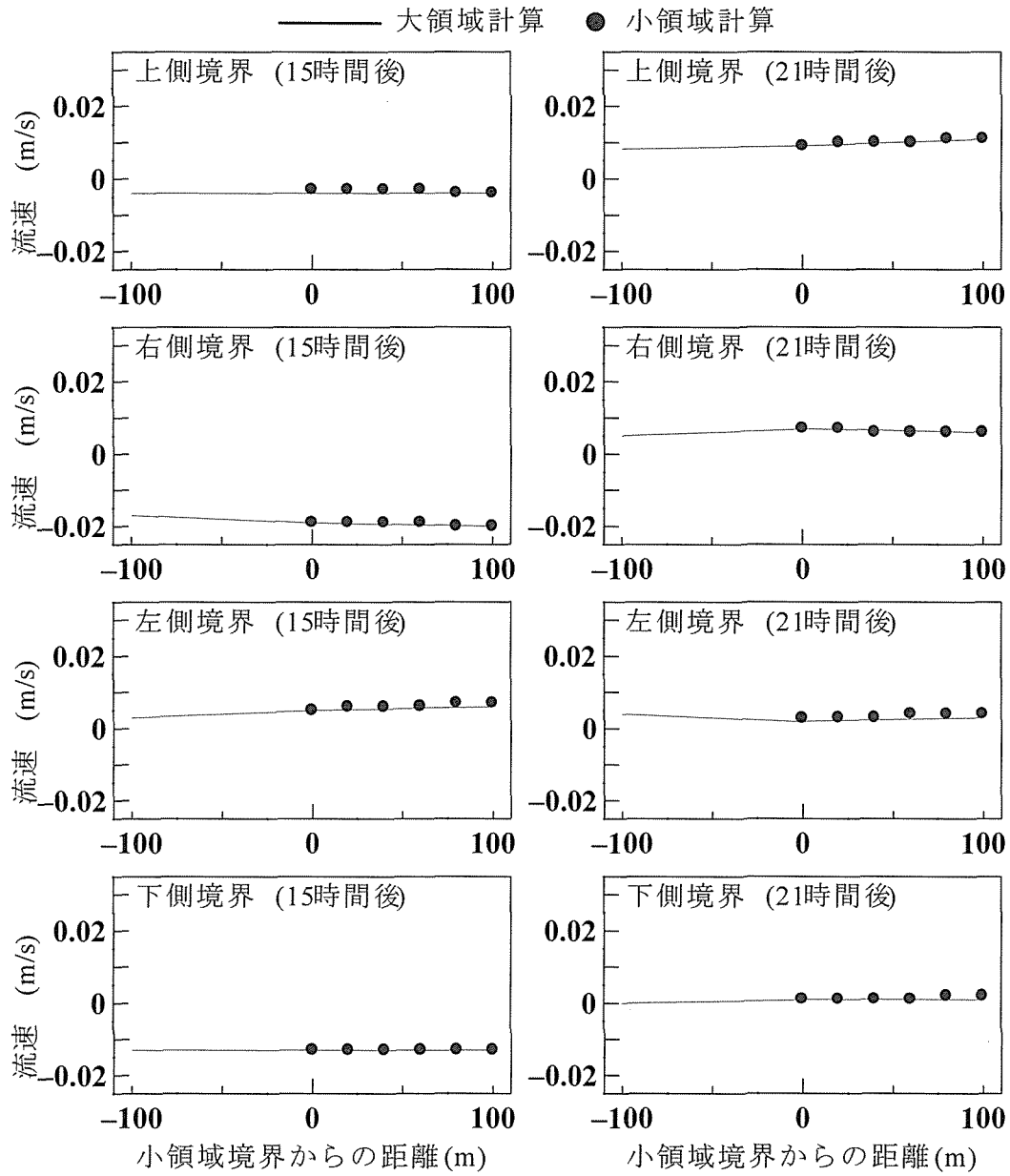
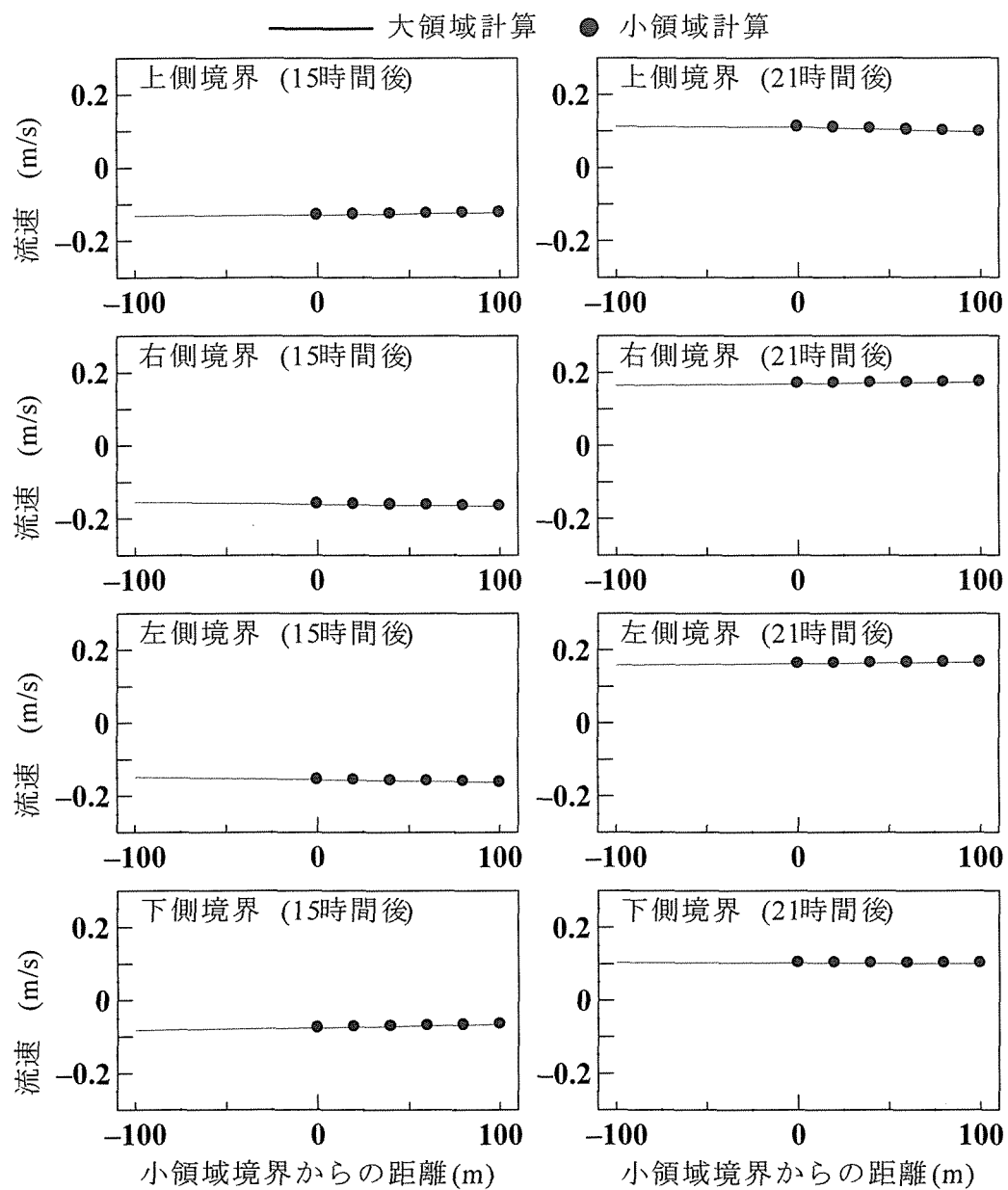


図11 小領域境界での水位に関する大領域計算と小領域計算の比較

図12 小領域境界での流速 u に関する大領域計算と小領域計算の比較

図13 小領域境界での流速 v に関する大領域計算と小領域計算の比較

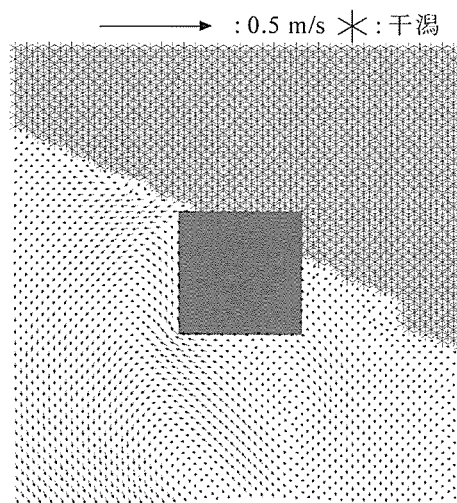
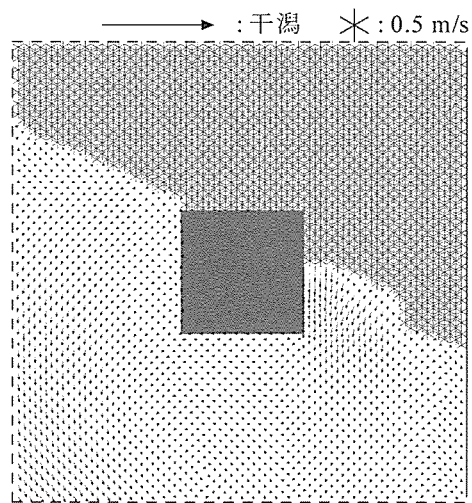
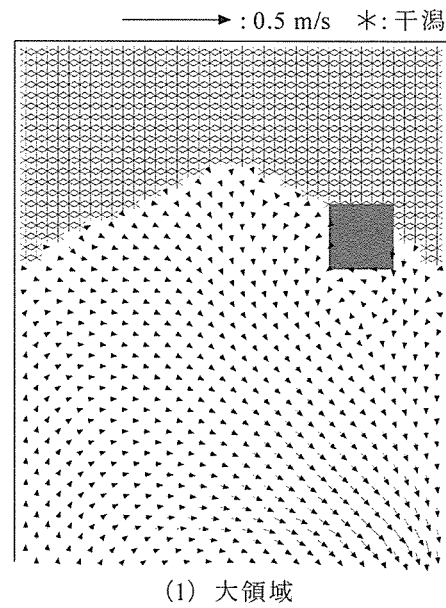
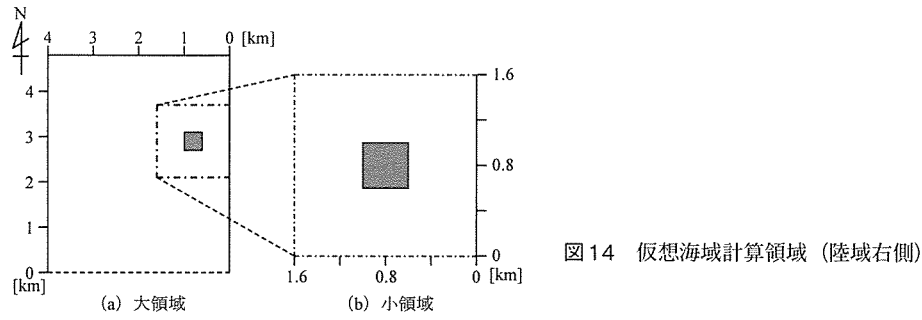


図15 計算開始18時間後（最干潮時）の潮流ベクトル（陸域右側）

結 言

本研究では、ネスティング計算法を導入した、浅海域流動シミュレーションモデルを構築した。仮想海域において、ネスティング計算による小領域計算とreference計算を行い比較することで、構築したモデルの実海域への適用性について検討した。

まず、大領域に対するシミュレーションモデルの構築を行った。モデルは底面摩擦項、コリオリ項、Smagorinskyモデルによる水平粘性項を考慮した2次元単層モデルとし、基礎方程式には連続方程式およびReynoldsの3次元運動方程式を用いた。それらの方程式をそれぞれ水深方向に積分することで、2次元単層モデルの支配方程式を求めた。支配方程式はLeap Frog法により差分展開した。沿岸浅海域を想定し、Land Mask関数による干潟処理を導入した。

次に、ネスティング計算法を導入したモデルの構築を行った。本研究では二瓶らによるone-way多重ネスティング計算法を採用した。one-wayネスティング計算法は、上位の大領域計算結果が一方向的に下位の小領域計算へ反映される計算法である。2次元単層モデルにより大領域を計算し、その結果を同化成分として小領域計算に反映させる。同化成分を小領域計算へ与える際、時空間内挿を行った。空間内挿には「支配領域」を考慮した線形補間を、時間内挿には前後の時間をを用いた線形補間を行った。また小領域の境界条件としてSommerfeldの放射条件を採用した。

小領域計算結果とreference計算結果を比較すると、仮想海域内に設置した陸域の角部分の流速に関して、小領域計算結果では過小評価が見られたが、それ以外の点では比較的良好な再現結果が得られた。さらに、小領域境界付近での大領域計算と小領域計算の結果を比較しても大きな違いはなく、小領域境界の影響のない良好な再現結果であった。干潟の出現に関してもreference計算と同様の再現結果が得られた。さらに、24時間の再現に必要な計算時間は、reference計算で4.5時間であったのに対し、ネスティング計算法を導入した場合は1.5時間であった。これより、ネスティング計算法による大幅な計算時間の短縮が期待できる。なお、reference計算で見られた後流渦の発生をネスティング計算では確認できなかった。これは小領域計算における変動成分の再現性が不十分であることに起因し、フィードバック計算を行うtwo-wayネスティング計算法の導入など、今後の改善が必要である。

以上のことから、本研究により、短時間での局所高

解像度計算が可能な、浅海域流動シミュレーションモデルが構築できたと考えられる。実海域への適用および、さらなる再現性の向上が今後の研究課題である。

キ ー ワ ー ド

潮流, 干潟, ネスティング計算法, 2次元単層モデル

文 献

- 馬場崎正博 2008 大規模開発による干潟環境の劣化防止手法に関する研究, 九州大学学位請求論文, pp.6-7
- 海上保安庁 1992 日本沿岸調和定数表, pp.94, 217, 238-252
- 中西幹郎 2002 1方向ネスティング手法に適した側面境界条件, 天気, 49(2): 117-128
- 二瓶泰雄, 町田佳隆, 佐藤慶太, 西村 司, 灘岡和夫 2002 新しいtwo-way ネスティング手法の開発, 海岸工学論文集, 49(1): 421-425
- 二瓶泰雄, 佐藤慶太, 灘岡和夫, 熊野良子, 西村 司 2003 沿岸海水流動シミュレーションに対する新しい多重ネスティング計算法の開発, 土木学会論文集, 740: 171-183
- 齊 幸治, 原田昌佳, 吉田 勲, 平松和昭, 森牧人 2006 ADI法を用いた2次元単層モデルによる湖山池湖流の数値解析, 九大農芸誌, 61(2): 281-288
- 笹尾和寛, 西田秀利, 松野謙一 2005 新しい外力評価法を用いた仮想境界法による二次元円柱まわりの流れの数値計算, 第19回数値流体力学シンポジウム, 19: A1-1
- Smagorinsky, J. 1963 General Circulation Experiments with the Primitive Equations, *Monthly Weather Review*, 91(3): 99-164
- 内山雄介 2004 海底面の力学過程を考慮した冠水・干出スキームの開発と三次元 σ 座標海洋流動モデルへの適用, 海岸工学論文集, 51: 351-355
- 吉田尚史, 渡辺 崇, 池田敏彦 2003 ゾンマーフェルト放射条件の対流速度についての評価, 日本計算工学会論文集, 6: 43-50

Summary

Because of the rapid growth in population, economy and urbanization, many countries have faced serious problems in aquatic environment of coastal waters. In these coastal waters, numerical simulation techniques based on the governing equations of physical and bio-chemical phenomena are necessary and effective in order to estimate the present situations and to predict feasible measures that can be attempted to prevent water environment degradation and rehabilitate the environment. In utilizing numerical simulation techniques in coastal waters with more complicated geography, more calculation points would be needed to understand the spatial distribution of tidal current in detail, resulting in taking more computation time. Nesting technique allows us to conduct numerical calculations efficiently: speedily in an entire wide area and finely in a specific narrow area.

In this study, using a two-dimensional depth-integrated shallow water model, the applicability of so-called “one-way-nesting technique” on tidal current simulation was investigated based on the calculations in a virtual coastal area. The wet-and-dry scheme was also incorporated with the simulation model to express the generation and disappearance of tidal flat. In the application of the one-way-nesting technique, the tidal currents and the water depths were firstly calculated by a two-dimensional shallow water model in the large-mesh area that covered entire calculation area. And then in the small-mesh area that was a portion of the entire calculation area and would be needed to obtain the spatial distribution of tidal current with higher resolution, the residual components were calculated by the induced governing equations of the components and the boundary condition based on the Sommerfeld radiation condition. In this study, the reference calculation, in which the large-mesh area was all covered by the small meshes with the same resolution as that in the small-mesh area of the nesting calculation, has been also executed in order to estimate the accuracy of the nesting calculation.

The simulation results indicated that the current velocities and the water levels obtained by the nesting calculations had a good agreement with those by the reference calculations, while the computation times of the nesting calculations were much shorter than those of the reference calculations. On the other hand, the rapidly-varied flows such as the trailing vortex downstream of structural objects were not appeared in the nesting calculations. In order to improve the reproducibility, it is necessary to consider the adoption of the so-called “two-way-nesting” with feedback calculation.

Key words: Nesting Technique, Tidal Current, Tidal Flat, Two-dimensional Shallow Water Model