

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

二瓶泰雄¹・佐藤慶太²・灘岡和夫³・熊野良子⁴・西村 司⁵

¹正会員 博(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail: nihei@rs.noda.tus.ac.jp

²学生員 修(工) 東京理科大学大学院博士後期課程 理工学研究科土木工学専攻(同上)

³フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴非会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社 情報技術部
(〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5)

⁵正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

より広域スケールの外洋影響を適切に反映した沿岸海水流動計算を行うために、大領域計算結果を明示的に反映しつつ、従来のネスティング手法で問題となる開境界条件処理が容易となる新しい多重ネスティング計算法を開発することを試みた。本ネスティング計算法の基本的な有効性を調べるために、水位擾乱の伝播現象に関する流動計算に適用した結果、従来のネスティング手法よりも計算精度が大幅に良いことが確認された。さらに、実海域流動計算の適用例として、本計算法を用いて典型的な開放性沿岸海域である沖縄県石垣島白保リーフ海域を対象とした流動解析を行ったところ、空間解像度の向上とともに、水平流速に関する計算値は観測値とより近い結果となっており、本計算法の基本的な有効性が検証された。

Key Words: multi-nesting approach, coastal current simulation, offshore influence, coral reef

1. はじめに

近年の沿岸海域環境に関する研究では、著しい計算機環境の進展やPOM(Princeton Ocean Model¹⁾)等に代表される応用性の高い海水流動モデルの構築²⁾に伴って、数値解析をベースとした研究の比重が益々高まっている。これらの沿岸海水流動モデルの計算精度や妥当性は、様々な沿岸域への適用計算を通じてある程度確認されているものの、未だ観測結果に対する再現性が不十分な点も多々見られる。このようなことから、今後、沿岸海水流動計算技術をさらに発展・高精度化していくためには、乱流モデルや移流項の計算精度等という流動計算法に内在する問題点を改善することのみならず、データ同化手法を整備し、沿岸域を囲む境界(海表面、海底面、陸域、外洋)からの影響を合理的に取り扱う手法を開発していくことは極めて重要である。

上述した数値シミュレーション上の課題のうち、沿岸環境に対する外洋域からの影響に着目すると、様々な現地観測に基づく研究により、黒潮流路変動等といった外洋擾乱が沿岸域における水理現象や水質・生態環境に対して多大な影響を与えることが指摘されている^{3)~5)}。

このように、沿岸海域環境を適切に再現・予測するためには、より広域スケールの外洋域における流動場の影響を合理的に反映した沿岸海水流動計算法の開発が必要となる。

このような要請に対しては、空間解像度の異なる計算領域を複数設定し、計算領域間において計算結果を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。この方法は、広域スケールの低解像度計算とともに、必要な領域のみ局所スケールの高解像度計算を行う、という計算効率性の高い手法であり、これまで主として気象分野の数値計算^{6)~9)}に適用され、海水流動シミュレーション^{10)~14)}においても応用されている。このネスティング計算法は、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、両計算領域の結果を交換するtwo-wayネスティング手法から構成されている。

このようなネスティング手法では、計算領域間を接続する側面境界部での境界条件を通して、計算結果を受け渡すようになっている。具体的には、例えばone-wayネスティング手法では、下位の小領域計算における側面の開境界条件及び境界周辺メッシュに対して、上位の大領域

計算結果を同化データとして与えている。このような手法では、境界条件を通してのみ大領域計算結果が小領域計算に反映されることになるので、十分合理的な計算法であるとは言い難い。さらに、側面境界部における水位や流速値等が規定されてしまうため、計算領域内で生成された擾乱が側面境界上を通過する際に再反射し、計算領域全域にわたって数値的不安定を引き起こすことが指摘されている⁹⁾。このような開境界部における擾乱の再反射を抑制するためには、境界条件処理に関する工夫が別途必要となるが、後述するように、様々な流動条件に対して適用可能な一般化された境界条件処理法は皆無に等しい。

そこで本研究では、従来のネスティング手法が抱える境界条件問題を抜本的に解決するために、沿岸海水流動計算のための新しいデータ同化手法に基づく多重ネスティング計算法を開発することを試みる。ここでは、one-way ネスティング手法を対象として、大領域計算結果を小領域全域にわたり合理的に取り込みつつ、大領域と小領域を接続する側面境界上での開境界条件処理が容易となるような新しいネスティング計算法を構築する。以下では、まず、従来のネスティング手法の問題点を整理し、新たなネスティング計算法の基本的な考え方や基礎方程式系等について記述する。次に、本ネスティング計算法の基本性能を検討するために、一様水深場における水位擾乱の伝播現象に対するネスティング計算を行い、本計算法と従来手法の計算精度について検討する。さらに、本計算法の実海域計算への適用性を明らかにするために、本計算法を用いて沖縄県石垣島白保リーフ海域を対象とした流動計算を実施し、現地観測結果¹⁵⁾との比較を行う。

2. 従来のネスティング手法の問題点と本ネスティング計算法の基本的な考え方

(1) 従来のネスティング手法

上述したように、従来のネスティング手法では、大領域と小領域を接続する境界面上において、計算領域内で生成された擾乱の再反射を抑制するための境界条件処理を行う必要がある。そのような境界条件処理としては、one-way ネスティング手法に対しては、主として二つの手法が提案されている。一つ目としては、境界付近においていわゆるスポンジ領域¹⁶⁾を設けることにより、境界領域へ伝播してくる波を減衰させ、境界での反射波の生成を抑制させている^{13), 17)}。しかしながら、この方法では、スポンジ領域と計算領域内部との計算結果を適切に接続させるためには、モデルパラメータの正確なチューニングが難しく¹¹⁾、一般化しづらい形となっている。も

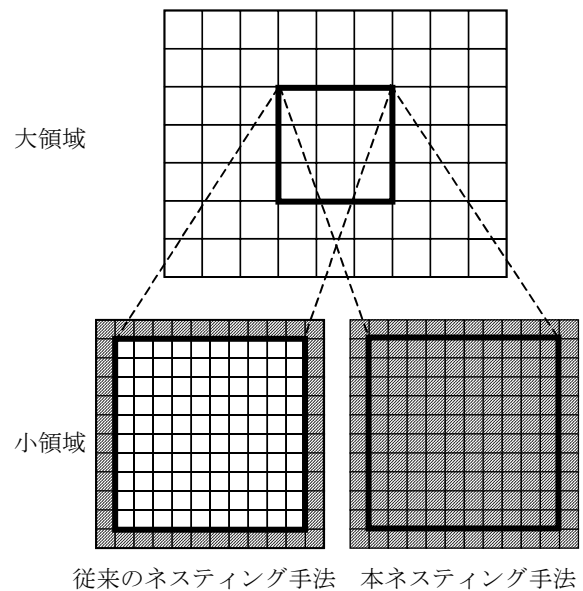


図-1 小領域計算における大領域計算結果の反映範囲 (小領域におけるハッチ部分は、大領域計算結果の直接的影響範囲に相当している。)

う一つの方法としては、側面境界条件として放射境界条件¹⁸⁾と大領域計算結果を組み合わせた流入条件が与えられる^{19), 20)}。しかしながら、小領域の側面境界上における流出・流入条件の判別が大領域計算結果と小領域計算結果とで異なる可能性がある⁸⁾。また、この流入条件の性能や適用性に関しては、海洋分野において十分検討されていないのが現状である。

さらに、従来のネスティング手法では、図-1に模式的に示しているように、大領域計算結果は小領域計算における境界条件及びその周辺メッシュにしか直接的に反映されていない。このような面からも、従来のネスティング手法は、十分合理的な計算法であるとは言い難い。

(2) 本ネスティング計算法

本ネスティング計算法では、従来のネスティング手法における境界条件問題を根本的に解消し、なおかつ、図-1に示すように、大領域計算結果をより明示的に小領域計算に反映させるために、流れ場における基礎方程式系やそれに含まれる従属変数を一部変更することを試みる。具体的には、下位の小領域計算における水位や流速等の各従属変数を、上位の大領域計算結果(以下、同化成分と呼ぶ)とそれからの偏差(以下、変動成分と呼ぶ)に分離する、という**変数分離操作を施し、基礎方程式系を再定式化する**。この場合には、大領域における計算結果は、既にそこでの連続式や運動方程式等を満足した形になっており、これを時空間的に内挿したものを小領域計算における同化成分として与える。したがって、小領域計算では、空間解像度が向上したことにより生じる各従属変数の変動成分に関する方程式系を解くこととなる。そこ

での変動成分に対する側面境界条件としては、大領域計算結果を与える必要は無くなり、よく使われる放射条件などの開境界条件を課することができる。このことより、本計算法は、従来のネスティング手法と異なり、側面境界上における境界条件問題を解消することが可能となる。

さらに本計算法では、各従属変数が大領域計算結果とそれからのずれである変動成分に分けられているため、大領域計算結果が小領域全域にわたり陽的に反映されることとなる(図-1)。これより、本計算法は、従来のネスティング手法と比べて、大領域計算結果が小領域計算により合理的に取り込まれているものと考えられる。

上記のことを踏まえて、本ネスティング手法の計算手順の一例を図-2に示す。ここでは、解像度の異なる計算領域を大・中・小領域として3つ設定した場合を記述する。まず、最も上位の大領域において得られた流速や水位等の計算結果を、下位の中領域における同化成分として与える。この際には、中領域の計算格子や計算時刻と一致するように大領域計算結果を時空間内挿する。ここで得られる同化成分を用いて変動成分に関する数値解析を実施し、その変動成分と同化成分の和を中領域の計算結果とする。さらに、それを時空間内挿したものを小領域における同化成分として取り込み、小領域における変動成分のみを計算する。

以上のことをまとめると、本研究で提案しているネスティング手法では、**広域スケールの流動場は同化成分として下位の領域計算に合理的に取り込まれ、グリッドの解像度が上がったことによる影響は変動成分として考慮する**、ということになる。さらに、**変動成分に対しては、境界条件としてはシンプルな放射条件を課せばよい**ため、境界における反射波の発生を簡便に抑制し得るものと期待される。なお、ここでは、上位の大領域計算結果のみを下位の領域計算結果に反映させる、という one-way ネスティング手法を対象として、本ネスティング計算法について記述しているが、ここで述べている新しいネスティング手法の考え方を two-way ネスティング手法へ拡張することには何の問題もなく、その成果の一部を既に報告している²¹⁾。

3. 新しい多重ネスティング計算法の概要

(1) 基礎方程式系

2.2で記述した新しい多重ネスティング計算法の基本的な考え方に基づいて、沿岸海水流動場に対する基礎方程式系を導出する。ここでは、本ネスティング計算法を平面2次元場に対する浅水流モデルへ組み込むこととする。まず、浅水流モデルにおける基礎方程式系としては、平面2次元場における連続式(式(1))と水平(x, y)方

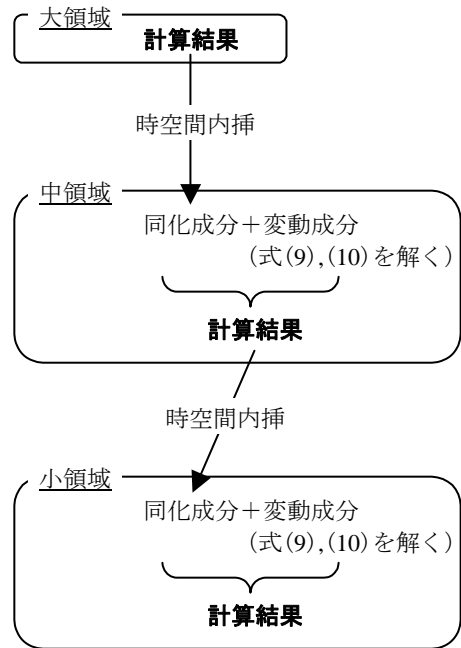


図-2 本ネスティング手法の計算手順

向運動方程式(式(2))となる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + \eta)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(h + \eta)v] = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = \\ -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{h + \eta} \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = \\ -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{h + \eta} \end{aligned} \quad (2b)$$

ここで、 u, v, η は、 x, y 方向の水深平均流速と水位であり、 g は重力加速度(=9.80m/s²)、 f はコリオリパラメータである。また、 A_H は水平拡散係数であり、以下のような Smagorinsky モデルを用いている。

$$A_H = (C_s \Delta)^2 \left\{ 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここで、 C_s はモデル定数(=0.10)、 Δ は格子幅である。また、式(2)中における τ_{bx}, τ_{by} は、 x, y 方向底面摩擦応力、 τ_{sx}, τ_{sy} は、 x, y 方向風応力をそれぞれ示しており、各々次のように表される。

$$\begin{aligned} \tau_{bx} &= C_{fb} u \sqrt{u^2 + v^2} \\ \tau_{by} &= C_{fb} v \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned}\tau_{sx} &= sC_{fs}U_w\sqrt{U_w^2+V_w^2} \\ \tau_{sy} &= sC_{fs}V_w\sqrt{U_w^2+V_w^2}\end{aligned}\quad (4b)$$

ここで、 C_{fb} は底面摩擦係数、 s は大気と水の密度比、 C_{fs} は水表面摩擦係数、 U_w, V_w はそれぞれ x, y 方向の風速を示している。

このような浅水流モデルの基礎方程式に対して本ネスティング計算法を導入するためには、まず、浅水流モデルにおいて主な従属変数である水平流速 u, v と水位 η を、次に示すように、同化成分と変動成分に分離する。

$$\begin{aligned}u_t &= u_a + u_f \\ v_t &= v_a + v_f \\ \eta_t &= \eta_a + \eta_f\end{aligned}\quad (5)$$

ここで、添え字 t, a, f は各変数の全成分と同化成分、変動成分をそれぞれ表している。また、水深 h についても、同様に同化成分と変動成分に分離する。

$$h_t = h_a + h_f \quad (6)$$

ここで、水深の同化成分 h_a は、上位計算で用いられた水深を下位計算領域へ空間内挿したものであり、変動成分 h_f は下位計算で用いられる水深 h_t と水深の同化成分 h_a との差となる。各変数の同化成分に関しては、上述したように、相対的に低解像度の領域計算結果を、高解像度の小領域における計算格子に一致するように空間内挿して与える。

この同化成分は、既に大領域計算において基礎方程式系を満たしていることから、式(1)、(2)より、同化成分に関する以下の式が得られる。

$$\frac{\partial \eta_a}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(h_a + \eta_a)u_a] + \frac{\partial}{\partial y}[(h_a + \eta_a)v_a] = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_a}{\partial t} + u_a \frac{\partial u_a}{\partial x} + v_a \frac{\partial u_a}{\partial y} - fv_a = \\ -g \frac{\partial \eta_a}{\partial x} + A_{Ha} \left(\frac{\partial^2 u_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_a}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sxa} - \tau_{bxa}}{h_a + \eta_a}\end{aligned}\quad (8a)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial v_a}{\partial t} + u_a \frac{\partial v_a}{\partial x} + v_a \frac{\partial v_a}{\partial y} + fu_a = \\ -g \frac{\partial \eta_a}{\partial y} + A_{Ha} \left(\frac{\partial^2 v_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_a}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sya} - \tau_{bya}}{h_a + \eta_a}\end{aligned}\quad (8b)$$

上述したように、各変数の添え字 a は同化成分を表しており、例えば、 A_{Ha} は水平拡散係数の同化成分に相当している。

各変数の変動成分に関する基礎方程式系を導出する際には、まず、浅水流モデルの基礎式である式(1)、(2)に、

変数分離操作を行っている式(5)、(6)を代入する。そこで得られた式から同化成分に関する式(7)、(8)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式(式(9))と水平方向運動方程式(式(10))が得られる。

$$\begin{aligned}\frac{\partial \eta_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(h_f + \eta_f)u_a + (h_t + \eta_t)u_f] \\ + \frac{\partial}{\partial y}[(h_f + \eta_f)v_a + (h_t + \eta_t)v_f] = 0\end{aligned}\quad (9)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_f}{\partial t} + u_f \frac{\partial u_a}{\partial x} + u_t \frac{\partial u_f}{\partial x} \\ + v_f \frac{\partial u_a}{\partial y} + v_t \frac{\partial u_f}{\partial y} - fv_f = -g \frac{\partial \eta_f}{\partial x} \\ + A_{Hf} \left(\frac{\partial^2 u_t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_t}{\partial y^2} \right) + A_{Ha} \left(\frac{\partial^2 u_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_f}{\partial y^2} \right) \\ + \left(\frac{\tau_{sxt} - \tau_{bxt}}{h_t + \eta_t} - \frac{\tau_{sxa} - \tau_{bxa}}{h_a + \eta_a} \right)\end{aligned}\quad (10a)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial v_f}{\partial t} + u_f \frac{\partial v_a}{\partial x} + u_t \frac{\partial v_f}{\partial x} \\ + v_f \frac{\partial v_a}{\partial y} + v_t \frac{\partial v_f}{\partial y} + fu_f = -g \frac{\partial \eta_f}{\partial y} \\ + A_{Hf} \left(\frac{\partial^2 v_t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_t}{\partial y^2} \right) + A_{Ha} \left(\frac{\partial^2 v_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_f}{\partial y^2} \right) \\ + \left(\frac{\tau_{syt} - \tau_{byt}}{h_t + \eta_t} - \frac{\tau_{sya} - \tau_{bya}}{h_a + \eta_a} \right)\end{aligned}\quad (10b)$$

ここで、底面摩擦応力項に関しては、式展開が複雑になるため、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、風応力項に関しても、底面摩擦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。この風応力の全成分 τ_{sxt}, τ_{syt} は小領域計算で用いられている風応力であり、同化成分 τ_{sxa}, τ_{sya} は大領域計算で用いられている風応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、風応力の全成分と同化成分は同一となる。

式(10)の変動成分に関する運動方程式は、元の基礎式(式(2))と比べていくつかの付加項があるものの、大きくは変更されていない。しかしながら、基礎方程式系によっては、変数分離された各変数を代入して式展開を行うと、式中の項数が大幅に増加する可能性がある。このような場合には、無理に式展開をして方程式中の項数を増やすよりも、例えば式(10)の底面摩擦項のように、全成分の項から同化成分の項を直接的に差し引いた形で各項を評価した方程式系を用いれば良い。

以上のことをまとめると、本計算法においては、最終

的には、水平方向流速と水位の変動成分に関する連続式と運動方程式(式(9), (10))を計算領域毎に解くこととなる。また、上記の変動成分に関する方程式系は、もとの基礎方程式系(式(1), (2))と比べて大きくは変更されていないことから、よく用いられている浅水流モデルに対する計算コードをそれほど変更せずに、本ネスティング手法を組み込むことが可能となる。また、その時の計算負荷もそれほど増加しないものと期待できる。なお、本論文では、平面2次元場を対象とした浅水流モデルを例にして、本ネスティング計算法の基礎方程式系を導出しているが、汎用的な沿岸海水流動モデルで通常用いられている3次元流動モデルに対して本手法を適用することに関しては、何ら支障なく実施できるものと考えられる(既にその成果の一部を報告している²²⁾)。

(2) 数値解法

a) 格子点配置と時間ステップ

上述した基礎方程式系に基づく本ネスティング計算法を有限差分法により数値解析を行う。その際に用いる大領域と小領域における格子点配置の例を図-3に示す。図中には、大領域と小領域の格子幅比が4:1のケースにおける矩形格子とともに、各変数の定義位置が示されている。なお、図を見やすくするために小領域における流速の定義位置は省略されている。この図に示されているとおり、水平流速 u 、 v と水位等のスカラー量 ϕ の定義位置が異なるスタaggerド格子をここでは採用している。

次に、大領域と小領域における計算時間間隔 Δt の設定について述べる。ネスティング計算を行う場合には、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ラン数を同一とするように、格子幅 Δx の比を用いて、以下のように与えられる¹⁴⁾。

$$\frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \quad (11)$$

ここで、添え字1, 2は大領域(Grid1), 小領域(Grid2)における値を示している。このことより、図-3に示されている格子を用いる場合には、図-4に模式的に示しているように、大領域と小領域における計算時間間隔の比も4:1となる。

b) 小領域計算における同化成分の作成方法

小領域計算における各変数の同化成分を作成するためには、格子解像度や計算時間間隔が小領域とは異なる大領域の計算結果を時間的及び空間的に内挿する必要がある。まず、時間内挿に関しては、両領域が同一時刻に計算を行うときには、その時の大領域計算結果を時間的に内挿する必要はない。一方、両領域の計算時刻が同一でなく、小領域のみ計算している場合には、小領域における計算時刻前後の大領域計算結果について時間内挿を行

大領域	▲ u_1 ■ v_1 ● ϕ_1
小領域	● ϕ_2

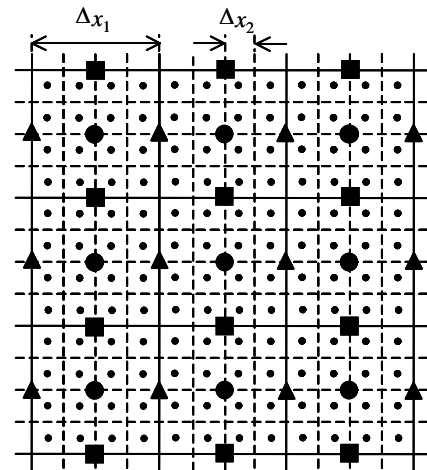


図-3 大領域及び小領域における格子点配置 (大領域と小領域の格子幅比は4:1である。また、小領域の流速は省略している。)

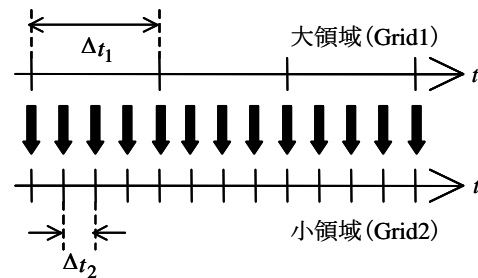


図-4 大領域と小領域における時間ステップの関係 (大領域と小領域の格子幅比が4:1の場合)

えばよい。本論文では、時間内挿に関しては線形補間を適用している。このように時間内挿することにより、図-4における太矢印のように、各計算ステップにおいて大領域計算結果が小領域計算に反映されることとなる。

空間内挿に関しては、低解像度の大領域計算結果を高解像度の小領域における計算格子に一致するように空間内挿操作を施す。具体的には、図-3に示されているように、小領域における流速やスカラー量の定義点を取り囲む大領域での4つの格子点の値を用いて空間内挿を行う。なお、その際に、大領域での4つの格子点の中に陸域の格子が含まれる場合には、陸域格子を除いた海域格子のみのデータを用いて空間内外挿する。ここでの空間内挿法としては、線形補間を適用している。

なお、上述したように、小領域計算における同化成分は大領域計算により得られた水位・流速値を空間内挿して得られるため、この同化成分が式(7), (8)を完全に満足している保証はない。しかしながら、予備的に行った離島周辺の潮流計算では、全成分に対する質量保存性などについて概ね満足していることが確認された。また、

このような空間内挿時に生じる誤差をなくすために、大領域計算結果として流速値や水位値を空間内挿させるのではなく、式(7)、(8)中の各項を直接的に空間内挿してそれらの式を満たす手法を別途構築している²¹⁾。

c) 差分スキーム

次に、本計算法における差分法の概要を記述する。ここで用いる変動成分に関する連続式(式(9))と運動方程式(式(10))の数値解法としては、別々に収束計算させるよりも、同時収束させた場合の方が、数値的安定性が高いことが確認された。そこでここでは、連続式と運動方程式を同時収束させることとし、その際にはSOR法を適用している。ここでの空間差分スキームに関しては、移流項は一次精度風上差分、その他の項は二次精度中央差分を適用している。また、時間差分スキームに関しては、移流項は半陰解法として、残りは完全陰解法としている。

4. 水位擾乱の伝播問題を対象とした新しいネスティング計算法の有効性の検討

(1) 計算条件

まず、本研究で新たに提案されたネスティング計算法の基本的な有効性を検討するために、一様水深場における水位擾乱の伝播現象を対象とした流動シミュレーションを行うことを試みる。ここで取り扱う水位擾乱の伝播現象とは、初期条件として計算領域内の一部に水位擾乱を与えて、それに伴って生じる擾乱波が同心円状に伝播する、というものである。この計算では、本ネスティング計算法に加えて、大領域計算結果を小領域計算の境界条件にのみ与える、という従来のネスティング手法も適用することとし、両ネスティング手法ともに one-way 手法のみを採用する。

計算領域としては、図-5に示すように、大領域(Grid1)と小領域(Grid2)の2つの計算領域を設定し、両計算領域において水深は一様に200mとする。表-1はGrid1と2における領域サイズ及び計算格子幅について記述しており、大領域と小領域の格子幅比は4:1である。初期条件としては、図-5に示すように、両計算領域の中央部に水位擾乱を与える。具体的には、Grid2の中央部1×1kmの範囲に+20cmの水位上昇を与えており、また、Grid1においてはその水位上昇量を空間平均した形で領域中央部において水位初期擾乱を設定している。計算時間は、生成された擾乱波がGrid1の境界部にほぼ到達する20分とする。各領域における計算手順としては、まず、Grid1に対して浅水流方程式(式(1)、(2))を用いて計算を行い、そこでの境界条件として放射条件を適用する。次に、Grid2に対して、本手法においては、Grid1における計算結果を同化成分として用いて流速や

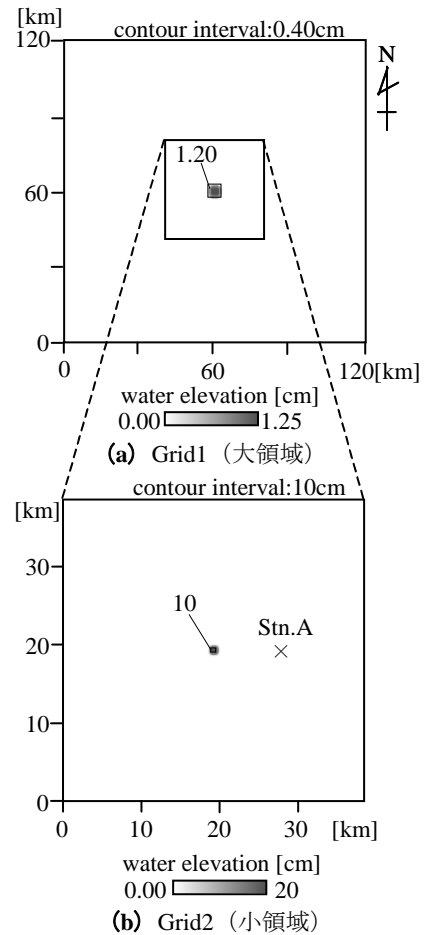


図-5 計算領域及び初期水位分布(水位擾乱伝播問題)

表-1 水位擾乱伝播問題に対する計算条件

	領域サイズ(km)	計算格子幅(m)
Grid1	120×120	2000
Grid2	38×38	500
reference計算	120×120	500

水位の変動成分を計算し、その変動成分に対する境界条件として Sommerfeld の放射条件を採用する(式(12))。

$$\frac{\partial \phi_f}{\partial t} \pm c \frac{\partial \phi_f}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

ここで、 ϕ_f は任意の従属変数の変動成分、 c は波速($=\sqrt{g(h+\eta)}$)である。一方、従来手法においては、Grid1と同じ浅水流方程式を用いて流速・水位を求めて、境界条件として Grid1 の計算結果を時空間内挿して与える。

上記のネスティング計算に加えて、両ネスティング手法の計算精度を検討するために、表-1に示すように、Grid2の計算格子幅を用いて Grid1と同サイズの計算領域を対象とした流動計算を実施する(以下、この計算をreference計算と呼ぶ)。ここでは、初期条件として Grid2

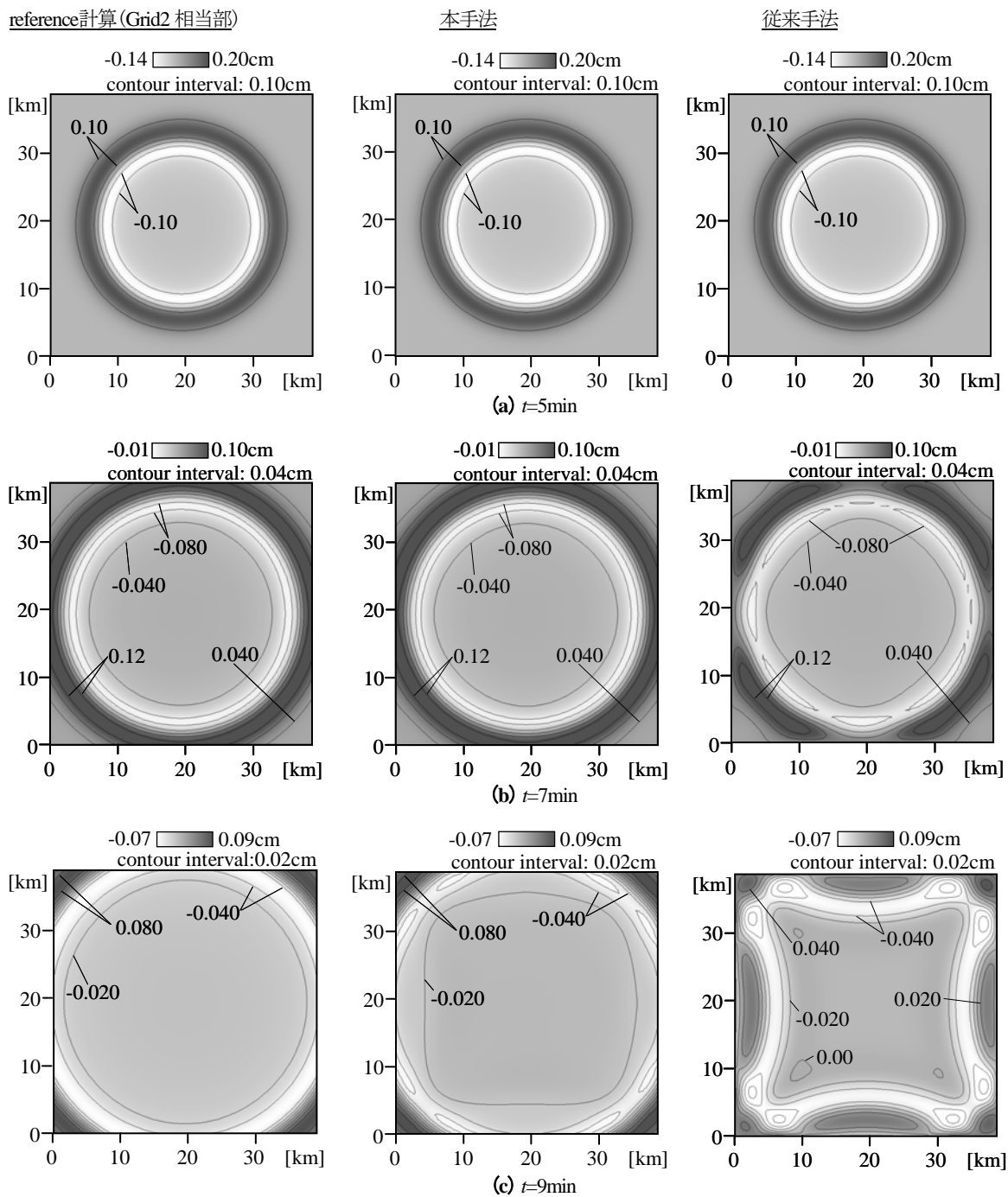


図-6 水位コンターに関する計算結果の比較(Grid2)

と同じ水位擾乱を与えている。この reference 計算では、ネスティング手法を用いていないため、この計算結果を正解とし、2つのネスティング手法の計算精度を比較・検討する。

(2) 計算結果

各計算における基本的な水位伝播過程を見るために、reference 計算と本手法、従来手法における水位コンターの時空間変動パターンを図-6に示す。ここでは、本手法と従来手法による計算結果を比較するために、Grid2の計算結果のみに着目し、reference 計算結果についても、

Grid2の計算領域に相当する領域を切り出して示している。まず、reference 計算による水位コンターを見てみると、初期の水位擾乱に伴う擾乱波が時間経過とともに、計算領域内で同心円状に伝播していく様子がうかがえる。また、 $t=7\text{min}$ には、その擾乱波の一部がGrid2相当領域の境界近傍に達していることが分かる。次に、本手法による計算結果を見てみると、 $t=9\text{min}$ の水位コンターには若干の歪みが見られるものの、計算初期に与えられた水位擾乱は概ね同心円状に伝播しており、本手法の結果はreference 計算と類似した結果となっていることが分かる。それに対して、従来手法の計算結果に着目すると、

まず $t=5\text{min}$ では、同心円状の水位分布となっており、reference 計算や本手法の計算結果と良好に一致している。しかしながら、 $t=7\text{min}$ では、その水位分布パターンは境界付近においてやや歪んでおり、さらに $t=9\text{min}$ では、計算領域全域にわたって水位分布が大きく歪み、reference 計算結果とは大きく異なる結果となっている。従来手法では、境界条件を Grid1 の計算結果に固定していることから、境界部に到達した擾乱波をうまく計算領域外へ伝播させることができないために、水位分布が大きく変形したものと考えられる。

これらの計算結果をより詳細に比較・検討するために、水位変動と東西・南北方向流速の時系列変化を図-7に示す。ここでは、Grid2 の Stn.A(図-5 (b))におけるreference 計算と本手法、従来手法の計算結果が示されている。これを見ると、reference 計算に見られるような、擾乱波の通過に伴う大きな水位・流速変動の様子を、本手法は良好に再現していることが分かる。それに対して、従来手法に関しては、擾乱波が Grid2 境界部に到達する計算開始7分後までは、従来手法の結果はreference 計算や本手法の結果と良好に一致している。しかしながら、それ以降に関しては、従来手法における水位や流速の計算結果には、reference 計算や本手法には見られない周期的な振動が顕著になっていることが分かる。これは、上述したように、計算領域内で生成された擾乱波が境界上を通過する際に形成された反射波の影響が計算領域全域に及んでいるためであると考えられる。

上記の計算結果より、従来手法では、大領域計算結果により小領域計算の側面境界条件が固定されているため、計算領域内で生成された擾乱波が側面境界上を通過する際には反射波が生成され、結果として計算精度が低下していることが確認された。それに対して本手法では、小領域の境界条件として放射条件を採用しているため、開境界部において擾乱波の再反射を抑制することが可能となっていることが分かる。このように本手法は従来手法が抱える境界条件処理に伴う計算精度の低下を大幅に抑制しており、本ネスティング計算法の基本的な有効性が示された。

5. 新しい多重ネスティング計算法の実海域流動計算への適用

(1) 計算条件

次に、本ネスティング手法の実海域計算への適用性を検討するために、アオサンゴ群落で世界的に有名な沖縄県石垣島白保リーフ海域を対象とした流動シミュレーションを実施する。このリーフ海域は外洋に広く面した典型的な開放性沿岸域であるので、このリーフ海域の流動

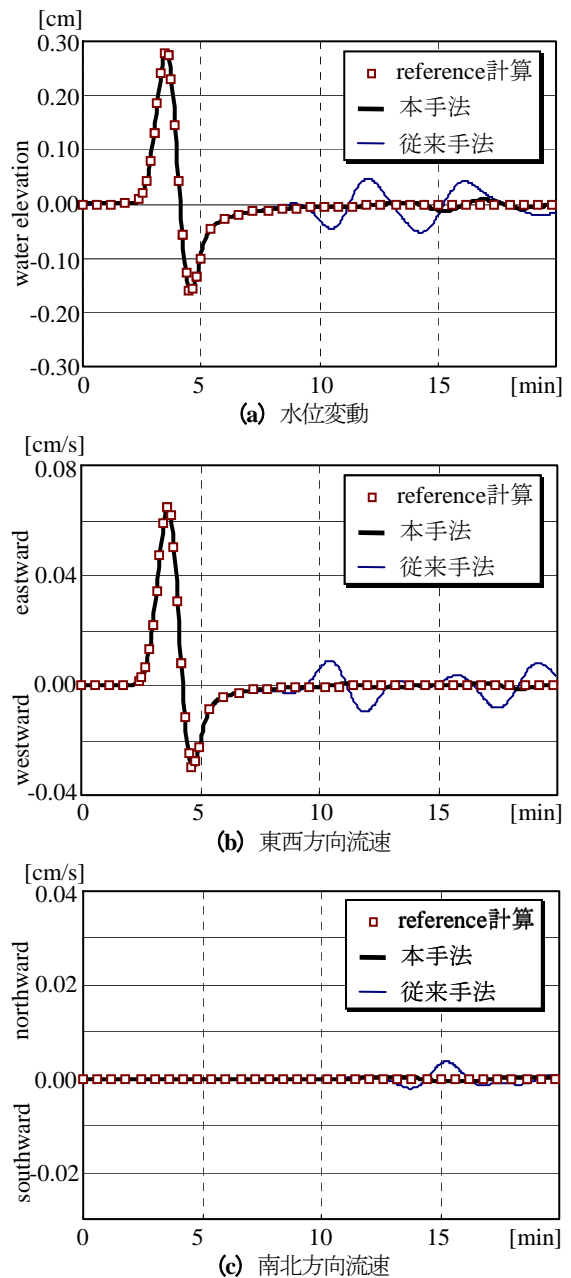


図-7 Grid2における水位・流速の時系列変化の比較 (水位擾乱伝播問題, Stn.A)

計算を行うためには、より広域スケールの流動シミュレーション結果を取り込むことは必要不可欠であり、ネスティング計算の適用例として適切な海域である。また、同海域を対象とした物理環境調査を別途行っており¹⁵⁾、計算結果と観測結果との比較を通して、本ネスティング手法の有効性について検討を行う。

このネスティング計算では、図-8に示すように、大・中・小領域の3つの計算領域を設定する。大領域としては石垣島や宮古島を含む先島諸島周辺海域(Grid1)とし、中領域としては石垣島南東岸海域(Grid2)、小領域として白保リーフ海域(Grid3)とする。表-2には、各計算領域のサイズと格子数、計算格子幅が示されている。ここで用いる水深分布は、図-8に示すとおりであり、

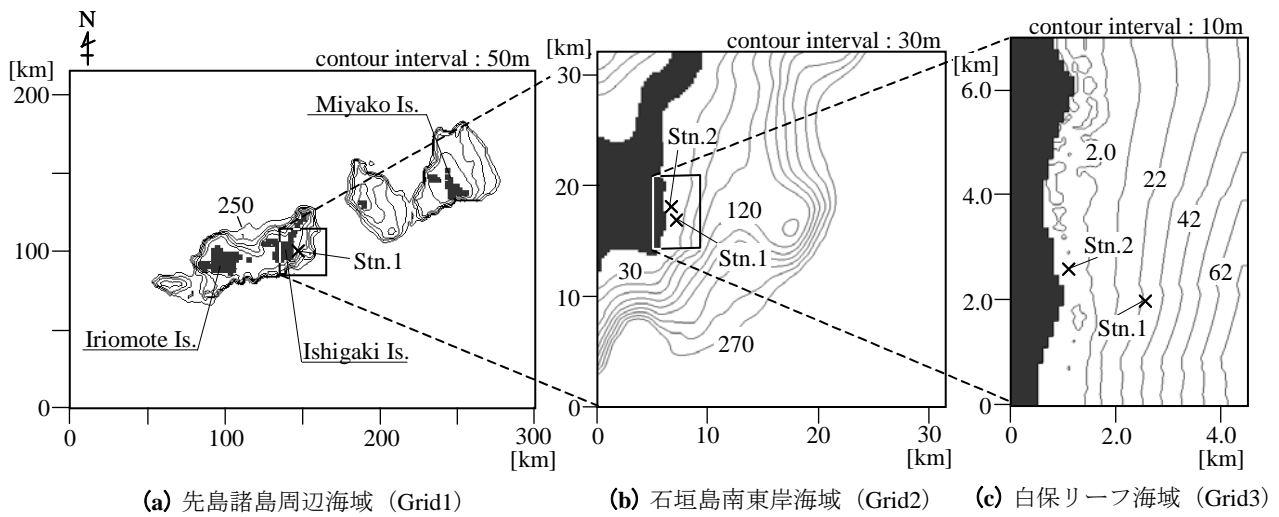


図-8 計算領域と水深分布(実海域流動計算)

表-2 実海域流動計算に関する計算条件

	Grid1	Grid2	Grid3
領域サイズ(km)	300×220	32.0×32.0	4.50×6.75
格子数	150×110	128×128	50×75
計算格子幅(m)	2000	250	90

Grid1, 2 全域及び Grid3 内のリーフ外の部分については、日本海洋データセンター(JODC)のデータベースに基づいて与えている。Grid3 中のリーフ内については、水深データがリーフ外と比べてごく粗い形でしか存在しないため、ここでは衛星画像解析による水深算定手法²³⁾を用いて算出している。なお、本計算では計算効率性を考慮して、最大水深を300mとする。

計算期間としては、著者らが別途実施した現地観測¹⁵⁾と比較するために、1998年10月19日6:00から50時間とした。この計算では、外力条件として潮汐及び風応力を与えている。潮汐に関しては、TOPEX/Poseidon海面高度計と沿岸潮位計の実測値をデータ同化した流動計算結果により得られた潮汐データ(NAO.99²⁴⁾)を用いて、主要四分潮(M_2 , S_2 , O_1 , K_1)を考慮する。ここで与えられる潮位の時系列変化の一例として、Grid1のStn.1(図-8(a))における水位変動を図-9に示す。風応力に関しては、石垣島気象台における実測値(図-10)を与えることとし、本計算期間中では約5m/sの北東風が卓越していた。なお、波浪に関しては、本計算期間中においては潮汐や風応力と比べてその影響が相対的に顕著でないことが現地観測結果¹⁵⁾より確認されているため、本計算には取り込まないこととする。

本計算における計算手順としては、まず、前述した主要四分潮の潮汐データを空間内挿して、Grid1における水位と流速の同化成分として与え、そこでの変動成分を

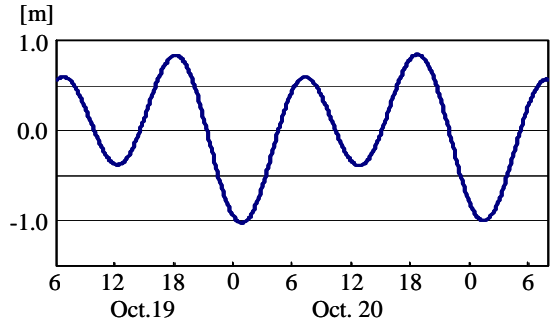


図-9 NAO.99²⁴⁾により与えられた水位変動(Grid1, Stn.1)

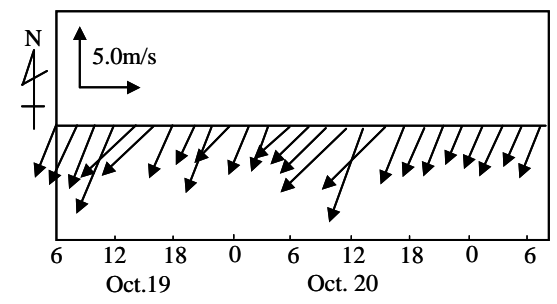
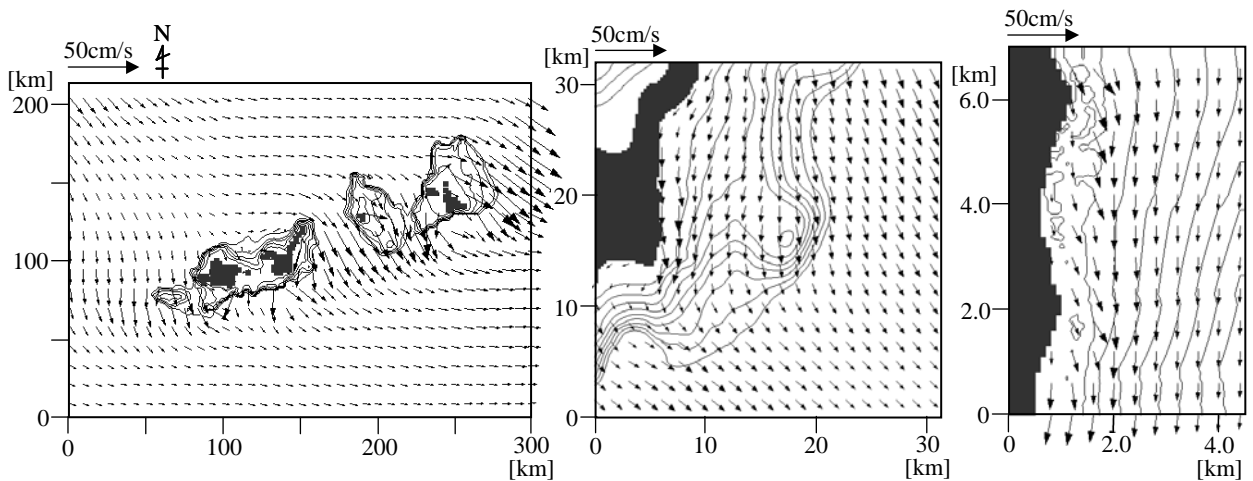


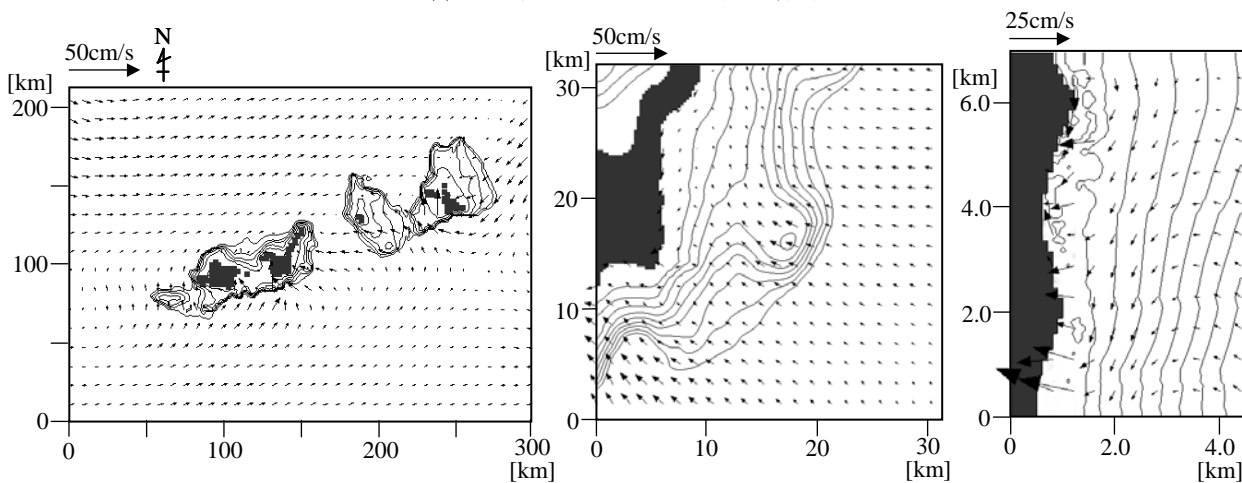
図-10 本計算で用いた風速ベクトル(石垣島気象台における実測値)

式(9), (10)を用いて計算する。次に、Grid2においては、Grid1での計算結果を時空間的に内挿して同化成分として与えて、Grid1と同様に変動成分に関する方程式系を計算する。Grid3に関しても、Grid2と同じ手順により計算を実施する。ここでの初期条件としては、各領域の水位と流速の変動成分に対して全て0を与える。また、境界条件としては、全ての開境界において、Sommerfeldの放射条件(式(12))を適用している。

なお、本計算領域に含まれるリーフ内では水深が浅く、干潮時には干出する部分が存在する。このような領域における冠水・干出処理を行う際には、水深0.1mを閾値として陸域・海域の判定を行い、干出領域を含めた陸域



(a) 1998年10月19日 22:00 (下げ潮時)



(b) 1998年10月20日 2:00 (上げ潮時)

図-11 平面流動パターン(コンター図は水深を示す。)

部分では流速が0となるようにしている。

(2) 平面流動パターンに関する計算結果

本ネスティング計算法により得られた計算結果のうち、各計算領域における平面流動パターンの典型例を図-11に示す。ここでは、下げ潮時(1998年10月19日22:00)と上げ潮時(20日2:00)の結果を示している。また、流況を見やすくするために、各計算領域内の流速ベクトルを適当に間引いて表示している。これを見ると、まず、Grid1に関しては、全体的には北西～南東方向が卓越流向となっており、島周辺の浅瀬では流速レベルが相対的に大きくなっている。次に、石垣島南東岸海域を対象とするGrid2の計算結果を見てみると、島東岸側では南北方向の潮流が顕著であり、島南側では北西～南東方向成分が卓越流向となっており、Grid1でも見られるような島を周りこむ流れが生じていることがうかがえる。高解像度格子を採用しているGrid3の結果に着目すると、相対的に水深の深いリーフ外では、Grid2の計算結果と同様に、南北方向に変動する潮流パターンが見られる。

一方、相対的に水深が浅く地形の起伏が大きいリーフ内においては、リーフ外とは大きく異なる流向・流速パターンが現れており、また、リーフ外からリーフ内への海水流入挙動が沿岸方向に一樣となっていないことが分かる。このようなリーフ内における流況パターンは、リーフ内特有の複雑な地形条件の影響を大きく受けているものと考えられる。

以上の結果をまとめると、本ネスティング手法による平面流動パターンにおいては、上位計算領域の計算結果が、下位計算領域全域において明示的に反映されている様子が分かる。また、小領域のGrid3では、起伏に富んだ地形形状と連動した複雑な流動パターンが形成されており、格子解像度の増加に伴って複雑な流動パターンがより明確に再現される、というネスティング計算法の利点が活用されていることが分かる。

次に、従属変数の分離操作を施し基礎方程式系を再定式化している本計算法の基本的な特性を調べるために、Grid2における流速ベクトル及び水深の同化成分と変動成分の平面分布を図-12に示す。ここでは、図-11(b)

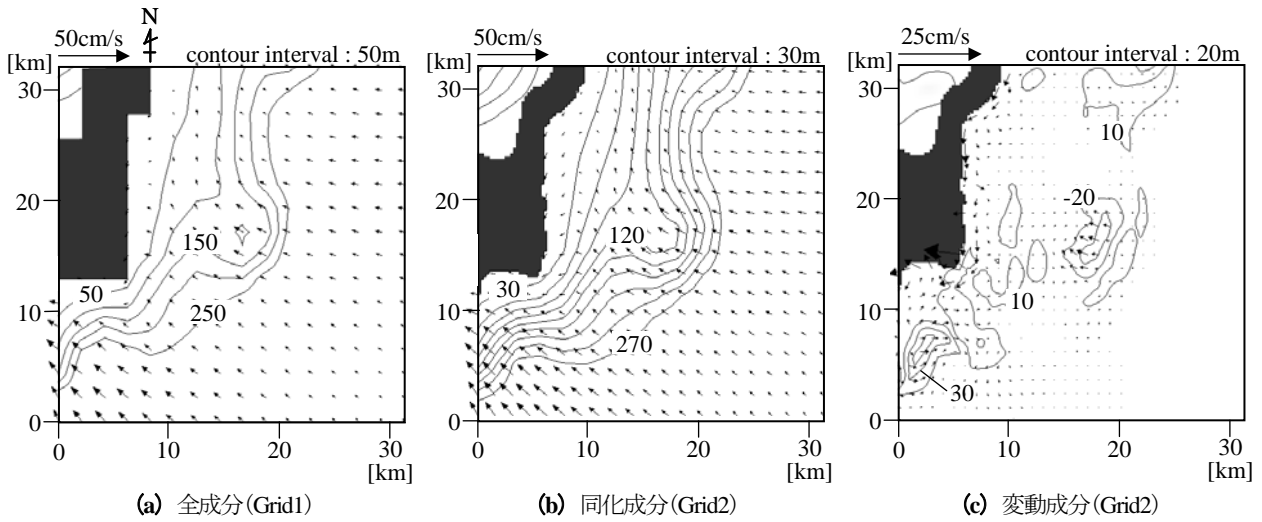


図-12 Grid2における流速・水深の同化成分と変動成分の平面分布(1998年10月20日2:00, 上げ潮時)

と同時刻における結果を示している。また、Grid2の同化成分を作成する際に用いるGrid1における計算結果のうち、Grid2の領域に相当する部分の結果も合わせて図示している。なお、図化の関係により、Grid2の同化成分と変動成分の流速ベクトルを間引いて表示している。これを見ると、まず、Grid2の同化成分に関しては、Grid1における結果がGrid2全域にわたって反映されている様子が確認される。一方、流速の変動成分に関しては、全般的に小さい値となっているものの、水深の変動成分の大きい部分や陸域近傍において有意な大きさとなっていることが分かる。これより、格子解像度の増加とともに生じる地形変化の影響が、流速の変動成分に反映されていることが分かる。また、流速の変動成分は水深が一般的な開境界付近ではほぼ0となっている。この結果から、本計算法では、開境界条件に起因する数値解析上の問題は生じていないものと推察される。

(3) 計算結果と観測結果との比較

本計算法の実海域計算への適用性を検討するために、計算結果と観測結果¹⁵⁾を比較することを試みる。図-13は、白保リーフ海域におけるStn.1(図-8, リーフ外, 水深25m)におけるuv-プロットに関する観測値と計算値を示している。ここでの観測値は、著者らが行った観測結果のうち、Stn.1の海底面上に設置されたADCPの実測値を鉛直平均した値となっている。また、計算結果としては、Grid1と2における結果を図示している。これらを見ると、まず、空間解像度が粗いGrid1の計算結果に関しては、流速値や卓越流向が観測結果と若干異なっていることが分かる。それに対して、相対的に空間解像度が高いGrid2における計算結果は、Grid1の計算結果と比べて、観測結果とより良好に一致していることが分かる。これより、格子解像度を増加させるとともに、本ネスティング手法における計算精度が向上していること

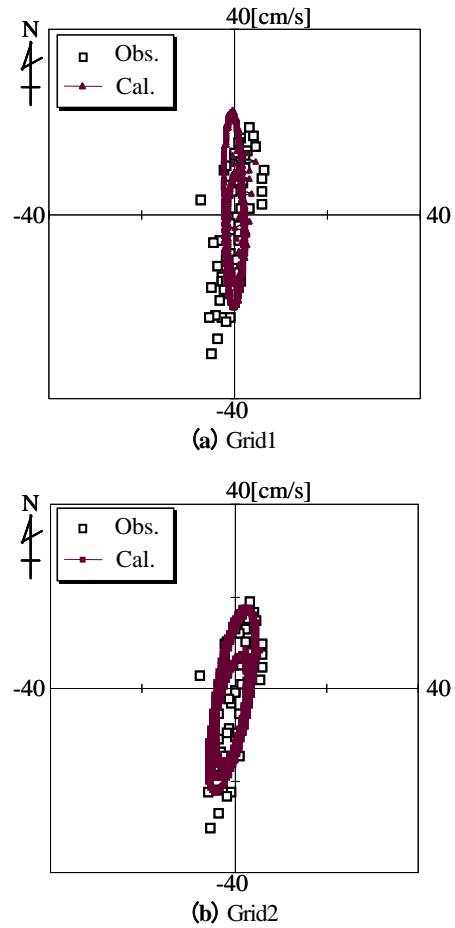


図-13 リーフ外(Stn.1)におけるuv-プロットに関する計算値と観測値の比較

が分かる。上記の結果をより詳細に比較するために、同じStn.1での計算結果のうち、Grid2における南北方向流速の全成分と同化成分、変動成分の時系列変化を図-14に示す。これを見ると、Grid1の計算結果を時空間内挿して得られる同化成分と比べて、小領域の全成分の方が観測値にやや一致しており、変動成分が同化成分を修正

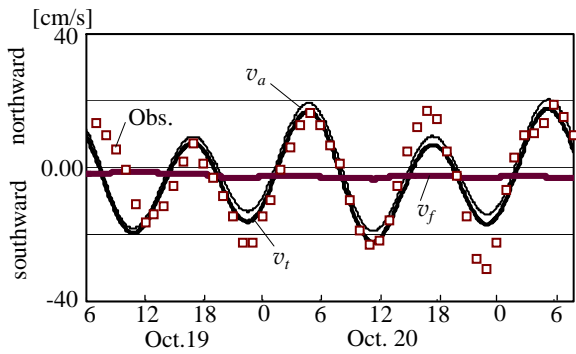


図-14 南北方向流速の全成分 v_t と同化成分 v_a 、変動成分 v_f の時系列変化(Grid2, Stn.1)

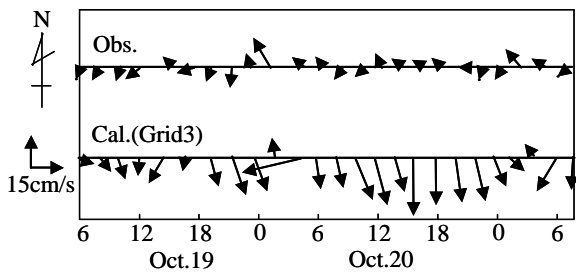


図-15 リーフ内(Stn.2)における水平流速ベクトルに関する計算値と観測値の比較

している様子がうかがえる。なお、10月20日18時以降では、流速振幅の計算値が観測値よりも小さいことが確認される。これは、Grid1における水位変動の同化成分の再現性がやや不十分であることに起因している。

また、複雑な地形形状を有するリーフ内におけるStn.2(図-8, 水深約2m)での水平流速ベクトルに関する計算結果と観測結果を図-15に示す。ここでの計算結果はGrid3における値である。これを見ると、計算結果における流向変化や流速の時間変動の様子は、観測値とやや類似しているものの、流速レベルに関しては、計算値と観測値は異なっていることが分かる。これは水深の数割にも達するサンゴ・キャノピーの凹凸による抵抗効果²⁵⁾に関して、本計算では、通常の底面摩擦応力の形で単純に定式化しているために、上述した流速レベルに関する観測値と計算値の相違が生じたものと考えられる。

以上の結果をまとめると、本計算法を石垣島白保リーフ海域の流動計算に適用したところ、空間解像度の向上とともに、計算結果が観測結果とより一致していたことが確認され、本ネスティング計算法の実海域計算への基本的な妥当性や適用性が検証された。

6. おわりに

本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) より広域スケールの外洋影響を適切に反映し得る

沿岸海水流動計算法を構築するために、大領域計算結果を小領域全域に合理的に取り込みつつ、従来のネスティング手法が抱える開境界条件処理の問題を解消することが可能となる新しい多重ネスティング計算法を開発した。ここでは、水位や流速などの従属変数を、上位の大領域計算結果(同化成分)とそこからの偏差となる変動成分に分離する、という変数分離操作を施し、基礎方程式系を再定式化した。

(2) 本ネスティング計算法の基本的な有効性を検証するために、一様水深場における水位擾乱の伝播現象を対象としたネスティング計算を実施し、従来のネスティング手法の計算結果と比較・検討した。その結果、本計算法は、従来手法で見られる境界条件処理に伴う計算精度の低下を大幅に抑制することに成功し、本計算法の基本的な有効性が示された。

(3) さらに、本ネスティング計算法の実海域計算への適用性を検証するために、沖縄県石垣島白保リーフ海域を対象として、3つの計算領域を設定した多重ネスティング計算を行った。その結果、平面的な流動パターンに関して上位の大領域計算結果が下位の小領域計算に明示的に反映されていることが確認された。また、水平流速に関する計算結果を観測結果と比べたところ、格子解像度の向上とともに計算結果が観測結果とより一致することが明らかとなった。これらの結果から、本ネスティング計算法の実海域計算に対する基本的な適用性が示された。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(1)(課題番号：12450198, 代表者：灘岡和夫)によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Blumberg, A.F. and Mellor, G.L.: Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight, *J. Geophys. Res.*, Vol.88, No.C8, pp.4579-4592, 1983.
- 2) Haidvogel, D.B. and Beckmann, A.: Numerical models of the coastal ocean, *The Sea*, Brink, K.H. and Robinson, A.R. eds., John Wiley & Sons, Inc., Vol.10, pp.457-482, 1998.
- 3) 松山優治, 岩田静夫, 前田明夫, 鈴木 亨: 相模湾の急潮, 沿岸海洋研究ノート, 第30巻, pp.4-15, 1992.
- 4) 武岡英隆, 秋山秀樹, 菊池隆展: 豊後水道の急潮, 沿岸海洋研究ノート, 第30巻, pp.16-26, 1992.
- 5) 日向博文, 八木 宏, 吉岡 健, 灘岡和夫: 黒潮系暖水波及時における冬季東京湾湾口部の流動構造と熱・物質フラックス, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.221-238, 2000.
- 6) Birchfield, G.E.: Numerical prediction of hurricane movement with the use of a fine grid, *J. Meteor.*, Vol.17, pp.406-414, 1960.
- 7) Harrison, E.J.: Three-dimensional numerical simulations of tropical systems utilizing nested finite grids, *J. Atmos. Sci.*, Vol.30, pp.1528-1543, 1973.
- 8) Perkey, D.J. and Kreitzberg, C.W.: A time-dependent lateral boundary scheme for limited-area primitive equation models,

- Monthly Weather Review*, Vol.104, pp.744-755, 1976.
- 9) Zhang, D.-L., Chang, H.-R., Seaman, N.L., Warner, T.T. and Fritsch, J.M.: A two-way interactive nesting procedure with variable terrain resolution, *Monthly Weather Review*, Vol.114, pp.1330-1339, 1986.
 - 10) Oey, L.-Y.: The formation and maintenance of density fronts on U.S. southeastern continental shelf during winter, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 16, pp.1121-1135, 1986.
 - 11) Spall, M.A. and Holland, W.R.: A nested primitive equation model for oceanic applications, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.21, pp.205-220, 1991.
 - 12) Galperin, B. and Mellor, G.L.: A time-dependent, three-dimensional model of the Delaware Bay and river system, part 1, Description of the model and tidal analysis, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, Vol. 31, pp.231-253, 1990.
 - 13) Oey, L.-Y. and Chen, P.: A nested-grid ocean model: with application to the simulation of meanders and eddies in the Norwegian coastal current, *J. Geophys. Res.*, Vol.97, No.C12, pp.20063-20086, 1992.
 - 14) Miyazawa, Y. and Minato, S.: POM and two-way nesting POM study of Kuroshio damping phenomenon caused by a strong wind, *J. Oceanogr.*, Vol.56, pp.275-294, 2000.
 - 15) Nadaoka, K., Nihei, Y., Kumano, R., Yokobori, T., Omija, T. and Wakaki, K.: A field observation on hydrodynamic and thermal environments of a fringing reef at Ishigaki Island under typhoon and normal atmospheric conditions, *Coral Reefs*, Vol.20, No.4, pp.387-398, 2001.
 - 16) Kesel, P.G. and Winninghoff, F.J.: The fleet numerical weather central operational primitive equation model, *Monthly Weather Review*, Vol.100, pp.360-373, 1972.
 - 17) Carton, J.A.: Coastal circulation caused by an isolated storm, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.14, pp.114-124, 1984.
 - 18) Orlandi, L.: A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows, *J. Comput. Phys.*, Vol.21, pp.251-269, 1976.
 - 19) Carpenter, K.M.: Radiation conditions for the lateral boundaries of limited-area numerical models, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.108, pp.717-719, 1982.
 - 20) 中西幹郎: 1方向ネスティング手法に適した側面境界条件, *天気*, Vol.49, No.2, pp.117-128, 2002.
 - 21) 二瓶泰雄, 町田佳隆, 佐藤慶太, 西村 司, 灘岡和夫: 新しい two-way ネスティング手法の開発, *海岸工学論文集*, Vol.49, No.1, pp.421-425, 2002.
 - 22) 佐藤慶太, 二瓶泰雄, 田口富之, 綱島康雄, 中村武志, 今野 篤, 西村 司: マングローブ河道部-氾濫原間の運動量・濁質輸送特性に関する検討, *河川技術論文集*, Vol.9, pp.403-408, 2003.
 - 23) 灘岡和夫, 田村英寿: 沖縄赤土流出問題に関する汎用衛星モニタリングシステム構築の試み, *海岸工学論文集*, Vol.40, No.2, pp.1106-1110, 1993.
 - 24) Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M.: Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan, *J. Oceanogr.*, Vol.56, pp.567-581, 2000.
 - 25) 灘岡和夫: サンゴ礁海域の環境水理, *ながれ*, Vol.20, No.5, pp.375-383, 2001.

(2003. 1. 20 受付)

DEVELOPMENT OF A NEW MULTI-NESTING APPROACH FOR COASTAL CURRENT SIMULATION

Yasuo NIHEI, Keita SATO, Kazuo NADAOKA, Ryoko KUMANO and Tsukasa NISHIMURA

A new multi-nesting approach for coastal current simulation is presented to effectively incorporate offshore influences and easily remove the difficulties in the treatment of open boundary conditions. In the present method, the computational results in a larger-scale domain are taken into account as the values to be assimilated in a smaller-scale computation. To examine the fundamental validity of the present method, we perform the computation for the propagation of a scattering wave, showing that the numerical accuracy of the present method is appreciably higher than that of a conventional method. We also apply the present method to the computation of coastal currents at Shiraho reef in the Ishigaki Island. The result indicates that the computational results of the horizontal velocities give good agreements with observed data, demonstrating the fundamental applicability of the present method.