

新たなデータ同化手法に基づく開放性沿岸域の ネスティング手法の提案

二瓶 泰雄*・灘岡 和夫**・熊野 良子***

1. はじめに

開放性沿岸域における水環境特性は、ごく浅海域においても何らかの外洋影響を受けることが最近の現地観測により知られている(例えば、八木ら 1998)。このようなことから、そこでの流動シミュレーションを行う際には、外洋条件をどのように設定するかが極めて重要となってくる。そのような流れ場に対する従来の沿岸海水流動シミュレーションでは、開境界における水位値(もしくは流速値)を、疎らな観測点における実測データを内・外挿して与えるか、もしくは、計算領域内において観測された水位などの実測値と一致させるように適当にチューニングする、といった手法が用いられている。しかしながら、このような手法では、外洋条件の設定に数多くの不確定要素を含むことから、実際の外洋条件をどの程度正確に再現できているかは大いに疑問である。

このような外洋条件をより適切に設定する方法として、領域スケールや空間解像度が異なる計算領域を複数設定し、広域スケールの現象を局所スケールの数値計算に適切に取り込むことが可能なネスティング手法が挙げられる。この手法は、主として気象分野における数値シミュレーション(例えば、Harrison, 1973)で用いられており、最近では海洋流動計算の分野でも適用されつつある(例えば、Oey・Chen, 1992; Miyazawa・Minato, 2000)。このネスティング手法では、広領域における流動シミュレーションの結果を、小領域計算における境界条件及び境界周辺メッシュにおける同化データとして組み込むことから、ネスティング手法は、上述した手法と比べて、より汎用的に開境界における外洋条件を設定することが可能となっている。

しかしながら、従来のネスティング手法では、上述したように、境界条件を通してのみしか広領域計算結果を小領域計算に反映できない形となっており、十分に合理的な計算法であるとは言い難い。さらに、開境界における水位や流速値を規定してしまうことから、計算領域内

で生成された反射・散乱波の開境界における再反射を防ぐための工夫が別途必要となってくる。

そこで本研究では、開放性沿岸域における流動場を精度良く予測するための数値シミュレーション手法を構築するために、外洋影響を合理的に反映させた新たなデータ同化手法に基づくネスティング手法を提案するとともに、実海域計算への適用を通じて、本計算手法の基本的な有効性や妥当性について検証することを試みた。

2. 本計算手法の概要

(1) 本手法の基本的な考え方

本研究で提案する新たなネスティング手法では、従来の手法と比べて、上位の広領域計算結果をより明示的に下位の小領域計算に反映させるために、各従属変数(例えば、流速と水位)をデータ同化成分(広領域計算結果)とそれからの変動成分(小領域計算で求める部分)に分離し、基礎方程式を再定式化する。その場合、広領域における計算結果は、既にそこでの運動方程式や連続式を満たした形になっており、これを内挿したものを小領域計算のデータ同化成分として与える。小領域計算では、グリッドの解像度が上がったことにより生じる変動成分(同化成分からのずれ)に関する方程式系を解くことになる。さらに下位の計算領域を設定する場合にも同様に、上位の計算結果をデータ同化成分として取り込み、変動成分のみを計算する。上述した計算法の概要をまとめた計算フローは、図-1に示すとおりであり、ここでは、上位の広域スケールの計算結果を下位の局所スケール計算に反映させているものの、局所スケールの計算結果を広域スケール計算には反映させない、という one-way ネスティング手法を採用している。

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、大局的な流動場は同化成分として下位の小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部では単純な開放条件を課せばよいから、境界における反射波の発生の影響を取り除くことが可能となる。

* 正会員 博(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科

** 正会員 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

*** 修(工) 福井県

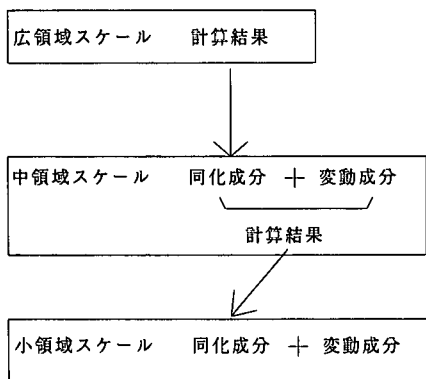


図-1 本ネスティング手法における計算フロー

(2) 基礎方程式系

ここで提案されたネスティング手法を、著者らがリーフ海域に適用した浅水流モデル（灘岡ら，1999）に組み込むこととする。まず、従属変数となる水平流速と水位を、以下に示すように、データ同化成分とそれからの変動成分に分離する。

$$\left. \begin{aligned} u &= u_a + u' \\ v &= v_a + v' \\ \eta &= \eta_a + \eta' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 u 、 v 、 η はそれぞれ x 、 y 方向の水平流速と水位であり、添え字 a と $'$ は各変数の同化成分、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。

$$h = h_a + h' \dots\dots\dots (2)$$

なお、ここでの水深の同化成分 h_a とは、上位計算で用いられた水深データを、変動成分 h' とは、下位計算で用いられた水深 h と上位計算で用いられた水深 h_a との差（ $h - h_a$ ）をそれぞれ表している。上述したように、各変数のデータ同化成分に関しては、相対的に空間解像度が粗い広領域における計算結果を、空間解像度の細かい小領域における計算格子と合うように線形空間内挿をして与えている。

ここで用いる浅水流モデルにおける基礎方程式系は、以下に示すような平面二次元場での連続式と運動方程式である。

・連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(h + \eta)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(h + \eta)v] = 0 \dots\dots (3)$$

・運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} - fv &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ &\quad - \frac{\tau_{bx}}{h + \eta} + \frac{\tau_{sx}}{h + \eta} \dots\dots\dots (4a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{Dv}{Dt} + fu &= -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ &\quad - \frac{\tau_{by}}{h + \eta} + \frac{\tau_{sy}}{h + \eta} \dots\dots\dots (4a) \end{aligned}$$

ここで、 g は重力加速度（ $=9.80 \text{ m/s}^2$ ）、 f はコリオリパラメータ、 A_H は水平拡散係数である。また、上式中の τ_{bx} 、 τ_{by} は x 、 y 方向の底面摩擦応力を、 τ_{sx} 、 τ_{sy} は x 、 y 方向の風応力をそれぞれ示している。データ同化成分に関する連続式と運動方程式は、上述された基礎方程式系を用いて以下のように記述される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta_a}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(h_a + \eta_a)u_a] + \frac{\partial}{\partial y}[(h_a + \eta_a)v_a] &= 0 \\ \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{Du_a}{Dt} - fv_a &= -g \frac{\partial \eta_a}{\partial x} + A_{Ha} \left(\frac{\partial^2 u_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_a}{\partial y^2} \right) \\ &\quad - \frac{\tau_{bxa}}{h_a + \eta_a} + \frac{\tau_{sxa}}{h_a + \eta_a} \dots\dots\dots (6a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{Dv_a}{Dt} + fu_a &= -g \frac{\partial \eta_a}{\partial y} + A_{Ha} \left(\frac{\partial^2 v_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_a}{\partial y^2} \right) \\ &\quad - \frac{\tau_{bxa}}{h_a + \eta_a} + \frac{\tau_{sxa}}{h_a + \eta_a} \dots\dots\dots (6b) \end{aligned}$$

各変数の変動成分に関する基礎方程式系は、式（3）、（4）から同化成分に関する式（5）、（6）を差し引くことにより、以下のような形で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta'}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(h' + \eta')u_a + (h_a + h' + \eta_a + \eta')u'] \\ + \frac{\partial}{\partial y}[(h' + \eta')v_a + (h_a + h' + \eta_a + \eta')v'] &= 0 \dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u'}{\partial t} + u_a \frac{\partial u'}{\partial x} + u' \frac{\partial (u_a + u')}{\partial x} + v_a \frac{\partial u'}{\partial y} + v' \frac{\partial (u_a + u')}{\partial y} - fv' \\ = -g \frac{\partial \eta'}{\partial x} + A_H' \left(\frac{\partial^2 u'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u'}{\partial y^2} \right) \\ - \left(\frac{\tau_{bxa}}{h_a + h' + \eta_a + \eta'} - \frac{\tau_{bxa}}{h_a + \eta_a} \right) \\ + \left(\frac{\tau_{sxa}}{h_a + h' + \eta_a + \eta'} - \frac{\tau_{sxa}}{h_a + \eta_a} \right) \dots\dots\dots (8a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v'}{\partial t} + u_a \frac{\partial v'}{\partial x} + u' \frac{\partial (v_a + v')}{\partial x} + v_a \frac{\partial v'}{\partial y} + v' \frac{\partial (v_a + v')}{\partial y} + fu' \\ = -g \frac{\partial \eta'}{\partial y} + A_H' \left(\frac{\partial^2 v'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v'}{\partial y^2} \right) \\ - \left(\frac{\tau_{bya}}{h_a + h' + \eta_a + \eta'} - \frac{\tau_{bya}}{h_a + \eta_a} \right) \\ + \left(\frac{\tau_{sya}}{h_a + h' + \eta_a + \eta'} - \frac{\tau_{sya}}{h_a + \eta_a} \right) \dots\dots\dots (8b) \end{aligned}$$

以上のことから、本計算手法においては、最終的には、流速と水位の変動成分に関する連続式と運動方程式（式（7）、（8））を計算領域毎に解くだけでよい。その上、式（7）、（8）の形で記述される基礎方程式系が、もとの式形（式（3）、（4））と大きく異なることから、

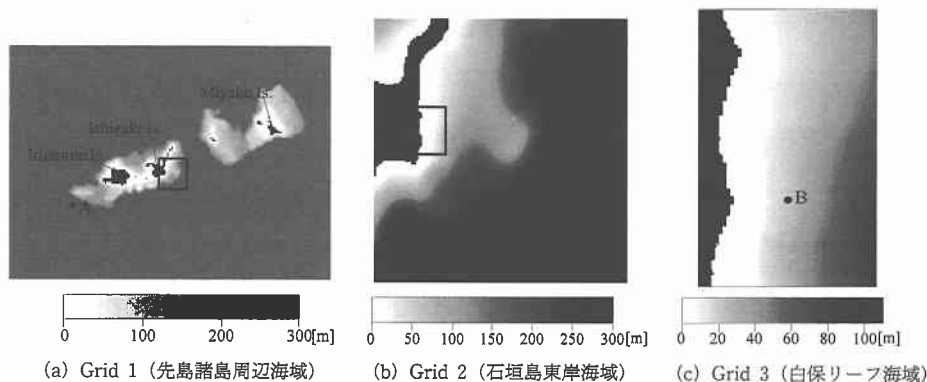


図-2 計算領域の設定

表-1 計算条件

	Grid 1	Grid 2	Grid 3
領域サイズ	300×220 km	32.0×32.0 km	4.50×6.75 km
格子数	150×110	128×128	50×75
計算格子幅	2000 m	250 m	90 m
計算時間間隔	10 s	3.0 s	1.5 s

従来からよく使われている浅水流モデルに関する計算プログラムをそれほど変更せずに、本ネスティング手法によるコーディングを容易に行うことができる。なお、ここでは浅水流モデルを例にして、本ネスティング手法の基礎方程式系を導出したが、汎用的な海水流動モデルで通常用いられている三次元流動モデルに、本手法を適用することには何の支障もない。

3. 本計算法の実海域条件への適用

(1) 計算条件

上述した計算法の実海域における流動計算への適用性を検証するために、ここでは、典型的な開放性沿岸海域である、沖縄県石垣島、宮古島などを含む先島諸島周辺海域に本手法を適用することを試みる。ここで設定する計算領域としては、図-2に示すように、先島諸島周辺海域(広領域、Grid 1)、石垣島東岸海域(中領域、Grid 2)、白保リーフ海域(小領域、Grid 3)とする。各Gridにおける領域サイズやメッシュ数などの計算条件は、表-1に示すとおりである。本計算結果を著者が別途行った観測結果(灘岡ら, 2000)と比較するために、ここでの計算対象期間を1998年10月19日6時からの約2日間とした。また、ここでの風応力については、石垣島地方気象台による実測値を与えており、計算期間内では、約5 m/sの北東風が卓越していた。各計算領域で用いられた水深分布に関しては、Grid 1, 2の全域及びGrid 3中のリーフ外の部分については、日本海洋データセンター

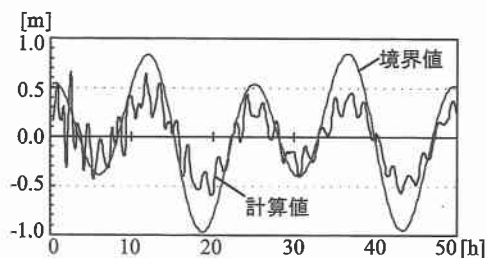


図-3 従来のネスティング手法による計算結果例(点A(図-2)境界部における水位変動)

(JODC)のデータベースに基づいて与え、Grid 3中のリーフ内については、灘岡ら(1999)と同様に、衛星画像解析による水深算定手法(灘岡・田村, 1993)に基づいて与えることとした。なお、計算効率を考慮して、本計算での最大水深をここでは300 mとしている。

本計算における具体的な計算フローとしては、まず、Grid 1においては、TOPEX/POSEIDON海面高度計データと流動シミュレーション結果より得られた潮汐データ(Matsumoto et al., 2000)を同化データとして用い、そこでの変動成分(式(7), (8))を計算した。なお、ここで同化する潮汐データとしては、主要四分潮(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)のみを考慮した。次に、Grid 2では、Grid 1での計算結果を同化データとして与えることにより外洋影響を反映させ、そこでの変動成分を計算し、Grid 3でも同様の手順をとることとした。境界条件に関しては、全ての開境界において放射条件を与え、変動成分に関する初期条件は、全て0として計算を行った。

(2) 計算結果

a) 従来のネスティング手法の問題点

本計算法に基づく数値計算結果を示す前に、従来のネスティング手法の問題点を明らかにすることを試みる。ここでは、シンプルに境界のみで水位を与えることとし、広域スケール(Grid 1)の数値シミュレーションを行うこ

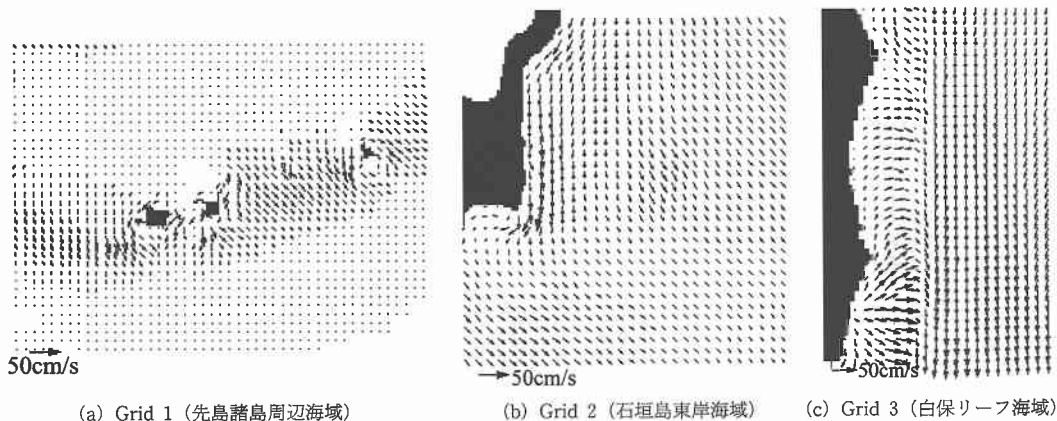


図-4 各 Grid における平面流動パターンの一例 (下げ潮時)

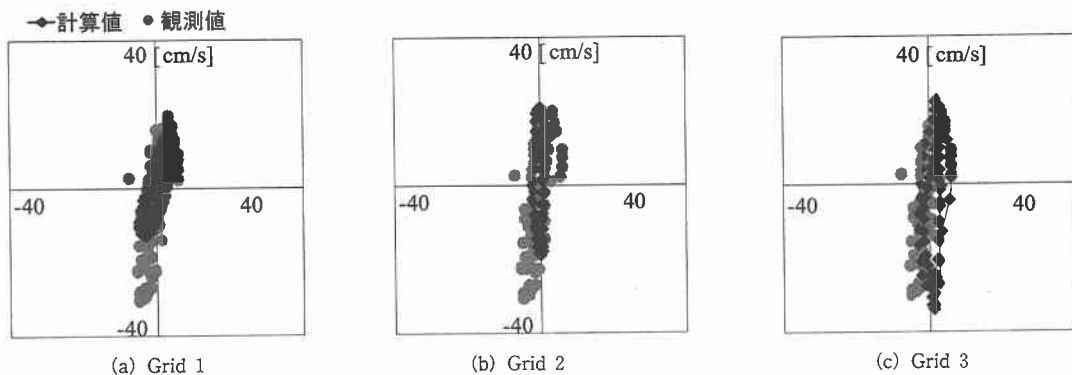


図-5 計算値と観測値の潮流図表に関する比較 (点 B (図-2))

とした。なお、ここでの境界上における水位値は、Matsumoto et al. (2000) の潮汐データを用いて与えることとした。そこで得られた計算結果の一例として、図-2 (a) 中の点 A における水位変動を図-3 に示す。これを見ると、点 A における水位変動は、境界部における値と比べて高周波振動が顕著に現れていることが分かる。このことは、従来手法では、境界部で水位を規定しているため、計算領域内で生成された反射・散乱波が領域外にうまく抜けていないことを示している。

b) 各 Grid における平面流動パターン

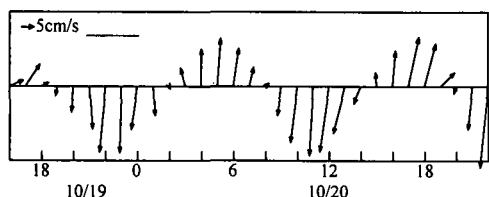
次に、本計算法により得られた各計算領域における平面流動パターンの一例を図-4 に示す。ここでは、下げ潮時 (10/19 22 時) における結果を図示している。これを見ると、Grid 1 において見られるような広域にわたって生じている南下流が、Grid 2 における計算結果に合理的に反映されている様子がうかがえる。また、Grid 3 に関しては、相対的に水深の深いリーフ外では同様な流動パターンが形成されているが、リーフ内においてはリーフ外と大きく異なる流動パターンが形成されており、地形

条件の違いが明確に現れていることが分かる。

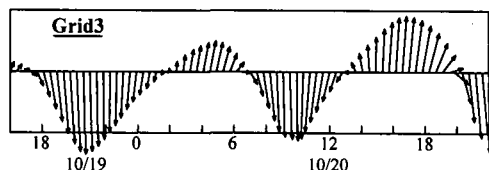
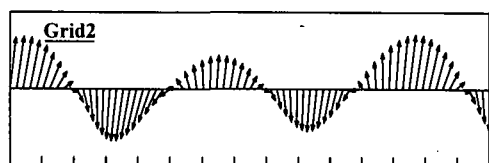
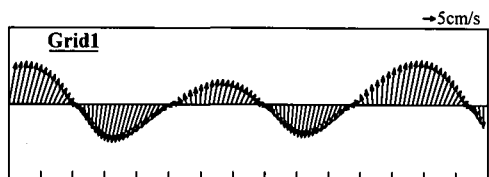
c) 計算結果と観測結果の比較・検討

本計算法の妥当性を検討するために、図-2 (c) 中の点 B (リーフ外、水深 25 m) における潮流図表に関する計算結果と観測結果を図-5 に示す。ここでの観測値は、著者らが石垣島白保リーフ海域において行った観測結果のうち、点 B において測定された ADCP の実測値を鉛直平均したものである。また、ここでの計算結果としては、各 Grid における結果をそれぞれ示している。これを見ると、空間解像度が粗い Grid 1 での計算結果は、観測結果よりも小さい流速値となっているが、空間解像度を向上させるとともに、計算値と観測値が一致する傾向にあることが分かる。

より詳細に比較するために、同じ点 B における水平流速ベクトルの時系列変化を図-6 に示す。これを見ても明らかに、図-5 と同様に、空間解像度の増加とともに、計算結果と実測結果は一致する傾向になっていることが分かる。具体的には、Grid 1 における計算結果では、潮汐に伴う北上流と南下流がほぼ対称となっている

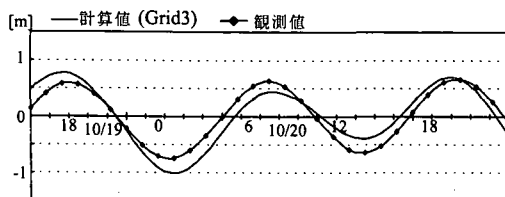


(a) 観測結果



(b) 計算結果

図一6 点Bにおける水平流速の時系列変化



図一7 水位変動の観測値と計算値の比較 (点B)

4. 結 論

本研究では、開放性沿岸域での流動計算における外洋影響を適切に反映させるための新たなネスティング手法を提案することを試みた。また、本計算法を実海域計算に適用したところ、従来のネスティング手法で問題となる境界条件の取り扱いを解決するとともに、水平流速値に関して観測結果と計算結果が概ね一致したことから、本手法の基本的な妥当性や汎用性が検証された。

参 考 文 献

- 灘岡和夫・田村英寿 (1993): 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.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・熊野良子 (1999): 高解像度水深マップを用いたサンゴ礁海域の流動シミュレーション, 海岸工学論文集, Vol. 46, No. 2, pp. 1186-1190.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・熊野良子・横堀達也・大見謝辰男 (2000): 陸域・外洋影響を考慮したサンゴ礁海域の水環境特性に関する検討, 沿岸海洋研究ノート (投稿予定).
- 八木 宏・日向博文・緒方健太郎・灘岡和夫 (1998): 長期・広域観測データに基づく鹿島灘沿岸域の大規模流動解析, 海岸工学論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 421-425.
- Harrison, E. J. (1973): Three-dimensional numerical simulations of tropical systems utilizing nested finite grids, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 30, pp. 1528-1543.
- Matsumoto K., T. Takanezawa and M. Ooe (2000): Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical mode: a global model and a regional model around Japan, *J. Oceanography* (submitted).
- Miyazawa, Y. and S. Minato (2000): POM and two-way nesting POM study of Kuroshio damping phenomenon caused by a strong wind, *J. Oceanography*, Vol. 56, pp.275-294.
- Oey L. and P. Chen (1992): 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. C 12, pp.20063-20086.

のに対して、Grid 3では、観測値に見られるような、北上流よりも南下流の方が強い非対称な潮汐パターンが良好に再現されている様子が分かる。また、図-7に示されている点Bにおける水位変動に着目すると、図-3に見られたような高周波振動は本手法に基づく計算結果においては生じていないことが分かる。このことより、本計算法が、従来のネスティング手法において問題となった、反射波・散乱波の開境界における再反射を発生させていないことが分かる。

以上の結果から、本研究で提案したネスティング手法は、従来手法の問題点を解決するとともに、実海域計算において観測値を概ね再現することに成功したことから、本計算法の基本的な妥当性や有効性が確認された。