

ネスティング計算法を用いた吹通川マングローブ水域における 高解像度流動シミュレーション

二瓶泰雄*・佐藤慶太**・青木康哲***・西村司****・瀬岡和夫*****

水平スケールが大きく異なる河道部 (creek) と氾濫源 (swamp) を有する R 型マングルの流動特性を明らかにするために、沖縄県石垣島吹通川マングローブ水域全域を対象として、ネスティング計算を用いた流動計算を行うことを試みた。ここでは、3つの計算領域を設定し、局所領域では格子幅を 0.25m とした高解像度計算を実施した。その結果、creek や swamp における流速の計算値と観測値の比較を通して、ネスティング計算を用いた本流動計算法の有効性が検証された。また、本計算法により、現地観測により得られた creek 周辺における流速の横断分布形状や水平大規模渦構造を概ね再現することに成功し、それらの形成要因について考察した。

1. 緒論

潮流が往復する水路 (creek) と、その川岸に沿って群落が形成されている樹林帯 (swamp) により構成されるマングローブ水域 (R 型マングル) は、蛇行や分岐を繰り返す複雑な creek 形状、マングローブ植物による流体力学的抵抗、creek と比べて swamp の面積が大きい、などの特徴を有している。このような R 型マングルにおける水環境特性を予測するためには、水平スケールが大きく異なる creek や swamp の地形的特徴を適切に考慮した形で流動シミュレーションを行うことが重要となる。

このようなマングローブ水域を対象とした流動シミュレーションはいくつか実施されているものの、その多くは理想化された地形条件下で行われている (例えば、金澤・松田, 1994)。また、実際のマングローブ水域を対象とした流動計算も実施されているが (山本ら, 1997; 浅野ら, 2001)、現地観測結果との比較などによる十分な検証は行われていない。さらに、上述した地形的特徴を有する R 型マングルにおける流動計算を適切に行うためには、広域スケールの現象を低解像度格子により計算しつつ高解像度格子を用いて小スケール現象を計算する、というネスティング手法が極めて有効であると考えられるものの、そのような試みはこれまでのところ皆無である。

そこで本研究では、典型的な R 型マングルを有する沖縄県石垣島吹通川マングローブ水域全域を対象として、ネスティング計算法を用いた流動計算を行うことを試みる。ここでのネスティング計算では、creek 周辺における複雑な流動構造を再現するために、3つの大きさの異なる計算領域を設定し、局所スケールの計算領域における格子幅を 0.25m とした高解像度流動計算を実施する。

2. 流動シミュレーションの概要

(1) 基礎方程式系

吹通川マングローブ水域における creek では、満潮時でも水深は 2m 程度であるため、干潮時を除いて明確な鉛直密度成層は形成されていない (二瓶ら, 2001)。そこで本論文では、流動シミュレーションに用いる基礎方程式系をマングローブ植物の流体力学的な抵抗項を考慮した浅水流方程式とし、平面 2 次元計算を実施している。

・連続式

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

・運動方程式

(x 方向)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v = \\ -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ - \left(\frac{C_{fb}}{h + \eta} + \frac{aC_D}{2} \right) u \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (2a)$$

(y 方向)

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u = \\ -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ - \left(\frac{C_{fb}}{h + \eta} + \frac{aC_D}{2} \right) v \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (2b)$$

ここで、 u 、 v はそれぞれ x 、 y 方向水深平均流速、 η は水位、 h は水深、 g は重力加速度 ($=9.80\text{m/s}^2$)、 f はコリオリパラメータ ($=6.03 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$)、 A_H は水平渦動粘性係数、を各々表している。このうち、水平渦動粘性係数 A_H に関しては、スマゴリンスキーモデルを適用している。

底面摩擦項と植生抵抗項は、式 (2) 右辺第 3 項に示されているように、植生帯を含む河川乱流シミュレーション (例えば、瀬岡・八木, 1993) を参考にして、別々に

*	正会員	博 (工)	東京理科大学講師	理工学部土木工学科
**	学生会員	修 (工)	東京理科大学大学院	理工学研究科土木工学専攻博士後期課程
***		修 (工)	五洋建設 (株)	
****	正会員	工博	東京理科大学教授	理工学部土木工学科
*****	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

分けられた形で表記されている。これは、既存のマングローブ水域を対象とした数値解析(例えば,金澤・松田, 1994)とは異なっている。ここで,底面摩擦項に関しては,空間的に一定な底面摩擦係数 C_{fb} ($=2.6 \times 10^{-3}$) を用いている。また,植生抵抗項については,植生密度パラメータ a と植生の抗力係数 C_D により表されており,ここでは,既存の研究を参考にして,マングローブ植物が繁茂する swamp において $aC_D/2=1.0\text{m}^{-1}$ となるように設定している。なお,この定数を $0.1 \sim 10.0 \text{m}^{-1}$ の間で変化させて計算したところ,マングローブ水域における大局的な流況パターンは概ね変化しないことが確認されている。

(2) ネスティング計算法

本流動シミュレーションでは,大きく異なる水平スケールを有する creek と swamp の地形的特徴を合理的に取り扱うために,大きさや空間解像度の異なる複数の計算領域を同時計算する,というネスティング計算法を用いる。このネスティング計算としては,図 1 のように,吹通川マングローブ水域全域を含む Grid1(格子幅 4.0m), creek が大きく蛇行・分岐をしている同水域中央部の Grid2(格子幅 1.0m), 著者らが別途行った現地調査(二瓶ら, 2002a)の観測点(Stn.C3)を含む Grid3(格子幅 0.25m), という3つの計算領域を設定している。各計算領域の計算条件に関しては,表 1 に示すとおりである。

ネスティング計算法としては,地盤高さの高分解能データを得ることができなかったため,著者らが開発している新しいネスティング計算法(二瓶ら, 2000)を用いずに,上位領域の計算結果を下位領域計算における開境界条件として与える,という最もシンプルな one-way 手法を適用する。ここでは,ネスティング計算時に生じる計算誤差を抑制するために,上位領域と下位領域の格子幅比は 4 : 1 とし(表 1), また,上位領域計算結果より下位領域の開境界条件を与える際には,線形補間ではなく三次精度スプライン補間を用いる(佐藤ら, 2002)。

(3) 計算条件

著者らが行っている現地観測結果(二瓶ら, 2002a; 2002b)と比較するために,計算期間としては,2001年8月16日13時から22時間とした。ここで,Grid1に関しては上記の期間全てを対象とし,Grid2と3に関しては,計算負荷を考慮して,上記期間のうち,creek における流速が大きくなる時間帯(16日15:30~18:00, 20:00~22:30, 17日2:00~4:30, 7:00~9:30)のみとする。この計算期間では,明確な河川出水が見られなかったことから,流れの駆動力としては潮汐のみとする。この潮汐は,計算領域の北側境界上に位置する河口部において,図 2 に示されている水位変動の観測値を用いて与えている。

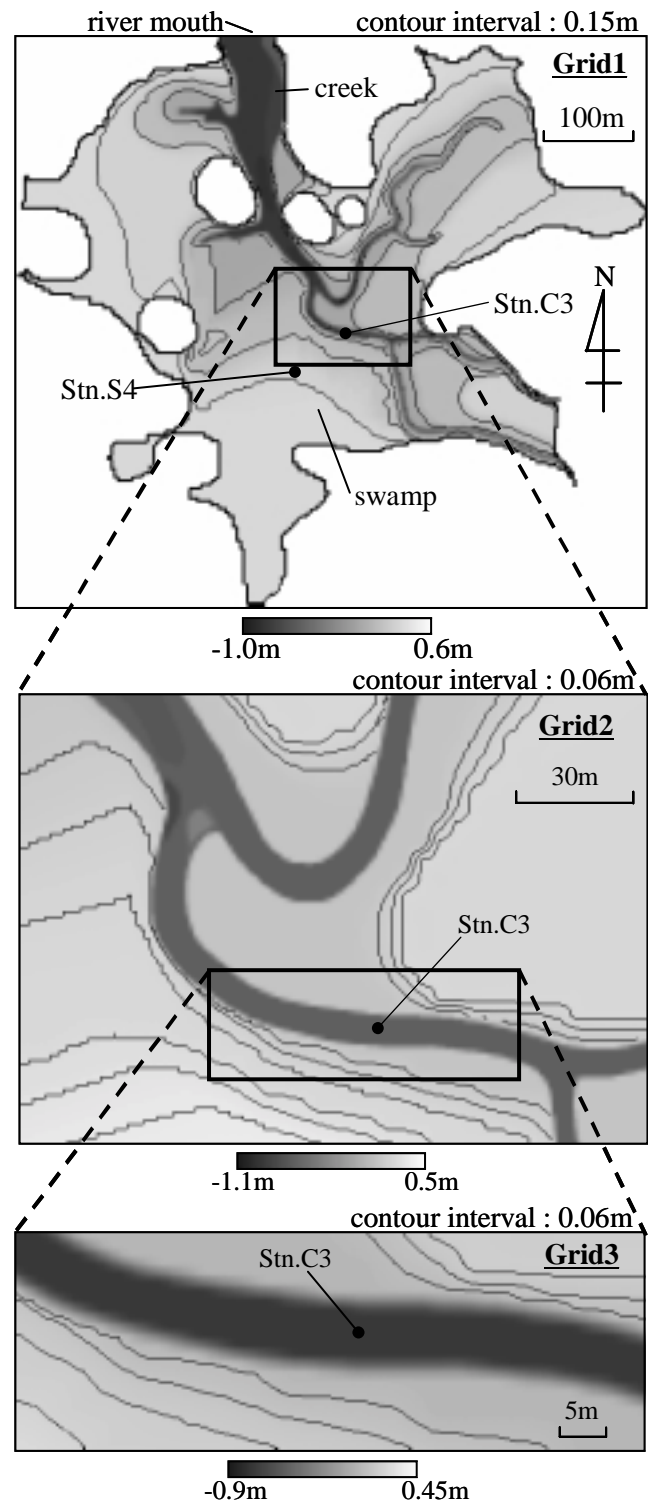


図 1 計算領域と地盤高さコンター (コンター線は swamp のみを対象)

表 1 各領域における計算条件

	Grid1	Grid2	Grid3
領域サイズ	688 × 612m	144 × 100m	69 × 24m
格子数	172 × 153	144 × 100	276 × 96
計算格子幅	4.0m	1.0m	0.25m

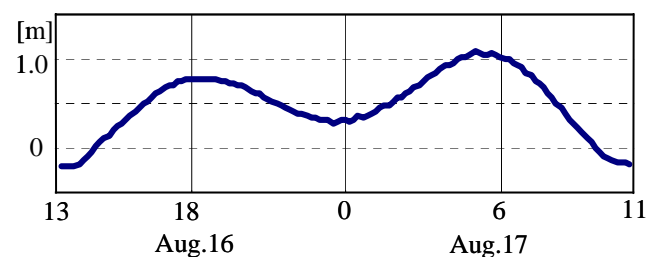


図 2 河口部における水位変動の観測結果 (水位基準面: 石垣港平均水面)

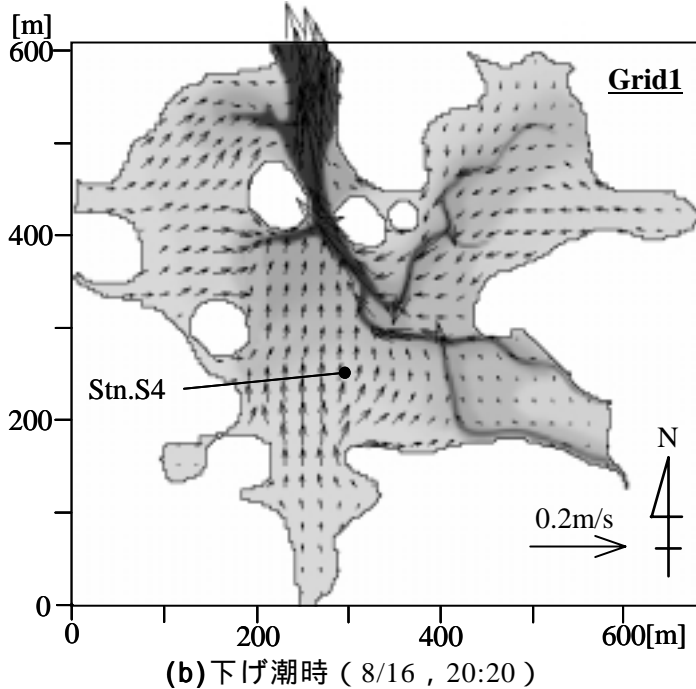
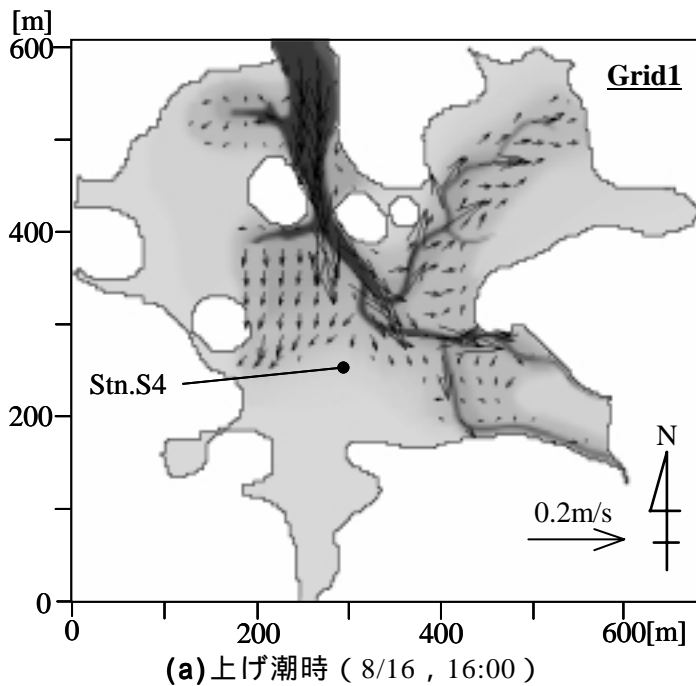


図 3 Grid1 における平面流動パターン

地形データについては、肥後ら（1993）の結果と著者らの測量結果等を用いて、図 1 のように与えている。ここでの値は石垣港平均水面を基準としており、creek と swamp の境界は地盤高さ約 0.15m に相当している。地形図を作成する際には、まず、Grid2 と同じ格子解像度 1m のデータをマングローブ全域にわたり作成する。Grid1 の地形データに関しては 1m メッシュデータを空間平均して求めて、また、格子幅 0.25m の Grid3 については、Grid2 の地形データを空間内挿して与えている。

3. 流動シミュレーション結果

(1) swamp 内における平面流動パターン

Grid1 における上げ潮時（8月16日 16:00）と下げ潮時（同日 20:20）の平面流動パターンを図 3 に示す。図中では、冠水している部分のみの結果が示されている。これを見ると、上げ潮時には、河口より上流側へ海水が

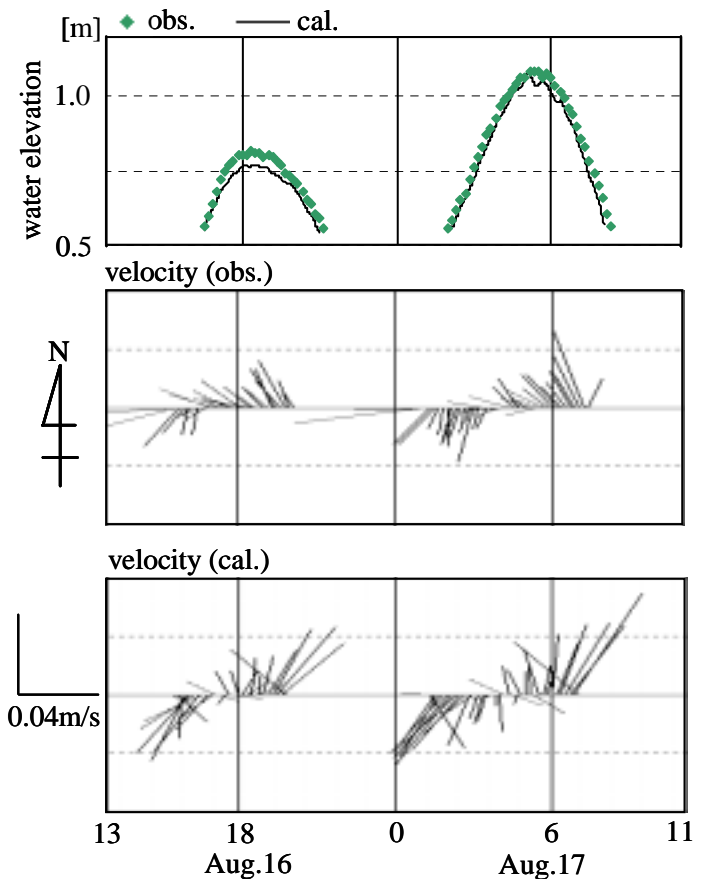


図 4 Grid1 における計算結果と観測値の比較 (Stn.S4 (swamp), 水位変動と流速ベクトル)

侵入し、creek では概ねその形状に沿う流向となっている。一方、マングローブ林が繁茂する swamp では、マングローブ植物による流体力学的な抵抗により、creek より 1 オーダー程度小さい流速値となっている。また、流向に関しては、従来から知られている creek と直角な方向のみならず（金澤・松田，1994），平行方向にも流れが生じている様子がうかがえる。下げ潮時には、全体的に河口に向かう流れとなっていることが分かる。

この Grid1 における流動シミュレーションの妥当性を検討するために、swamp 内の観測点 Stn.S4（図 3）における水位と流速ベクトルに関する計算値と観測値を比較した結果を図 4 に示す。まず水位変動に関しては、計算値と観測値は良好に一致している。また流速ベクトルに関しても、冠水直後や干出直前の流向は、両者の間で差が見られるものの、それらを除けば、観測値と計算値の流速ベクトルは概ね一致しているものと考えられる。

(2) creek 内の流動特性

次に、図 3 と同時刻である上げ潮時と下げ潮時における Grid2 の平面流動パターンを図 5 に示す。これを見ると、Grid1 では明確には見られなかった、creek 横断方向の流速差が明瞭に現れていることが分かる。具体的には、まず、上げ潮時では、同図中左上から分岐している creek-A と creek-B 共に、左岸側における流速値が右岸側に比べて大きくなっている。特に、大きく湾曲している creek-A では、その湾曲部において swamp へ入り込む

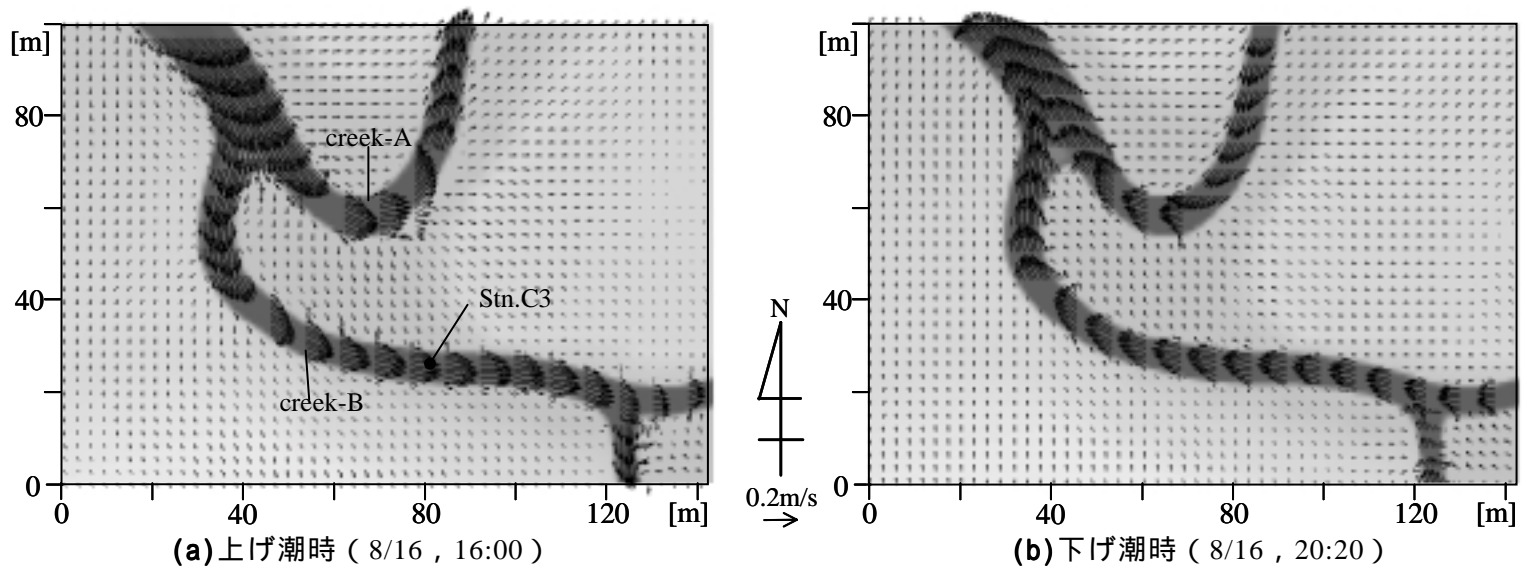


図 5 creek 内の流速分布 (Grid2)

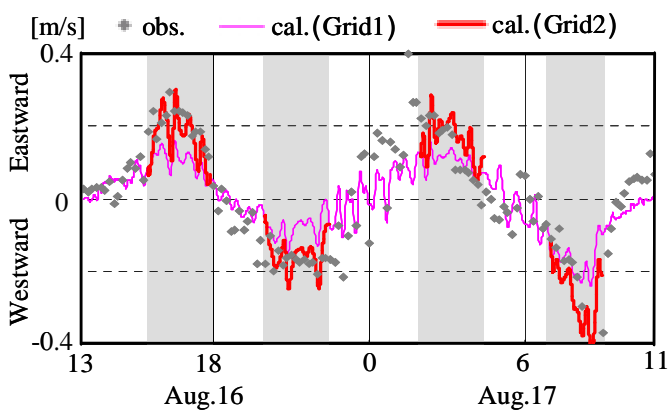


図 6 creek (Stn.C3) における主流方向流速の時系列変化 (図中の網掛けは Grid2 の計算期間を表す)

流れが生じている。一方、下げ潮時では、両方の creek とも右岸側の流速が大きくなっている。このような creek 横断方向の流速分布が上げ潮時と下げ潮時で異なる様子は、著者らによる局所流速観測結果と定性的に一致している (二瓶ら, 2002a)。このような creek における流速の横断分布特性は、creek の曲がり形状や分岐・合流の影響のみならず、creek 平面配置形状に起因したマングローブ水域における大局的な流況の影響を受けているものと推察される。

creek における流速に関して観測値と計算結果を比較するために、creek 内の一地点 (Stn.C3) における主流方向流速の時系列変化を図 6 に示す。ここでは、観測値 (二瓶ら, 2002b) と Grid1 及び Grid2 における計算値が図示されている。なお、上述したように、Grid2 においては、この図中の網掛けの部分においてのみ数値解析を行っている。この図より観測値と Grid1 と 2 における計算結果を比べると、Grid2 の結果は Grid1 の値と比べて、観測値とより一致していることが分かる。このようなことから、格子解像度を増加させるとともに、creek 内における流速変動の再現性が向上しており、ネスティング手法を用いた本流動計算法の基本的な有効性が検証された。

(3) creek 周辺の水平大規模渦構造

さらに、格子幅が 0.25m という高解像度格子を用いた Grid3 における計算結果を図 7 に示す。図中には、上げ潮時 (8月16日 16:05) と下げ潮時 (8月16日 20:38) における平面流速ベクトルと渦度コンターを示している。また、そこには、swamp と creek の境界位置を点線で示している。これらの図を見ると、creek 内において明確な水平大規模渦構造が上げ潮時と下げ潮時ともに形成されている。このような大規模渦構造に伴う流速変動パターンは、著者らの観測においても捉えられている (二瓶ら, 2002a)。この大規模渦の位置は、上げ潮時では右岸側で、下げ潮時では左岸側で生成されていることが分かる。これらの結果より、水平大規模渦の生成パターンが右岸側と左岸側で異なること、また、その生成位置が上げ潮時と下げ潮時とで変化することが明らかとなった。

このような水平大規模渦の生成パターンに関する時空間変動特性について考察する。このような大規模渦の生成要因としては、基本的には、creek と swamp における流速差に伴う流れの変曲点不安定 (池田ら, 1992) によるものと考えられる。このような流速分布の変曲点は creek の両側において見られるものの、なぜ片側にのみ大規模渦が現れるのであろうか。ここで右岸側と左岸側のせん断層厚さを比べると、例えば下げ潮時では、右岸側へ向かう横断方向流速が見られるので、右岸側のせん断層厚さは左岸側よりも小さくなっている。このようにせん断層厚さが小さくなると、大規模渦の発達が抑制されてしまうことから、下げ潮時には左岸側にのみ大規模渦が現れるものと考えられる。また、上げ潮時には、その逆に左岸側のせん断層厚さが右岸側よりも小さく、右岸側においてのみ大規模渦構造が形成される。このように、creek 周辺では、creek と swamp の流速差に起因して水平大規模渦構造が形成され、その生成パターンはマングローブ水域における大局的な流況と密接に関連していることが明らかとなった。

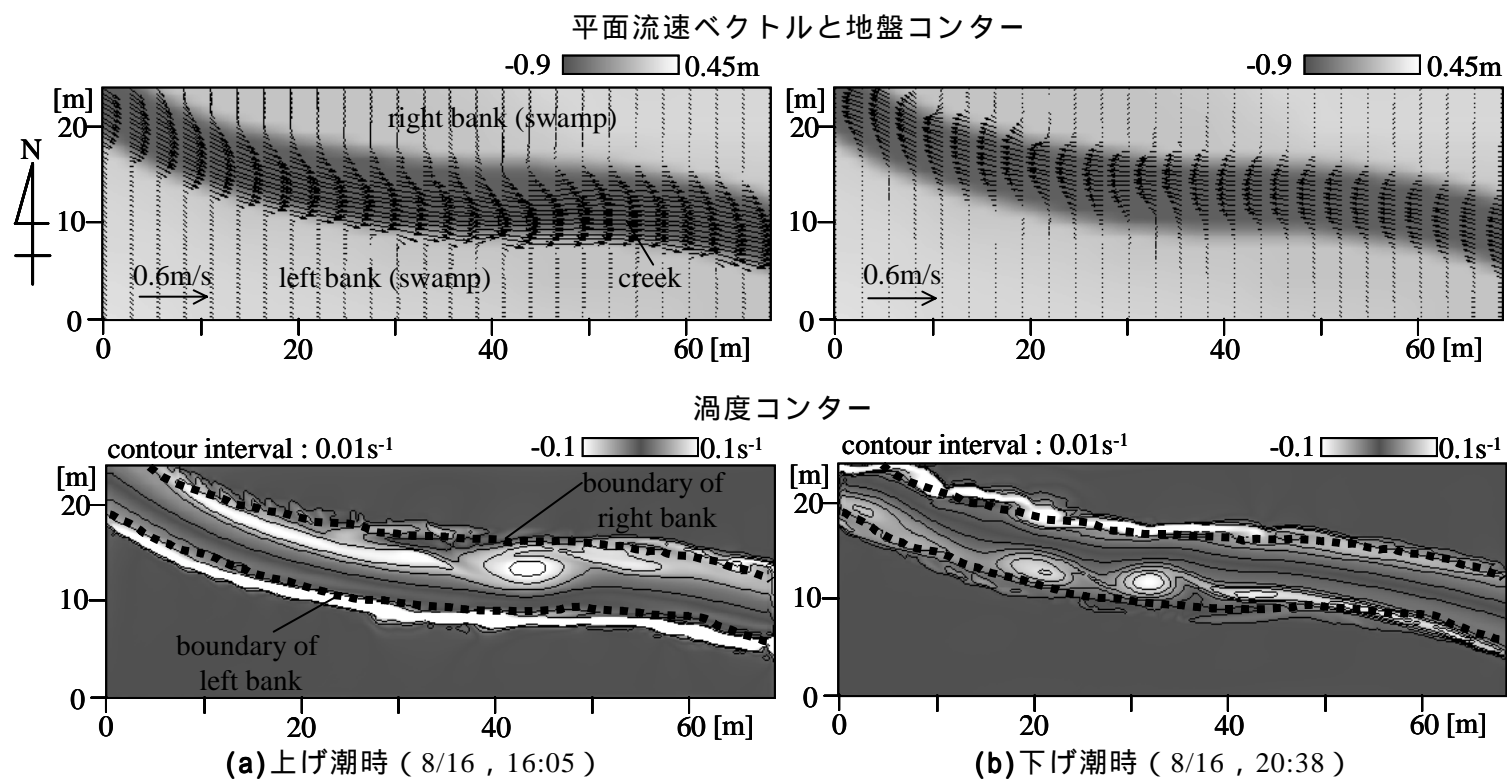


図 7 creek 周辺における水平大規模渦構造 (Grid3)

4. 結論

水平スケールの大きく異なる creek と swamp を有する R 型マンガルの地形的特徴を適切に取り扱うために、ネスティング手法を用いて、石垣島吹通川マングローブ水域の流動シミュレーションを実施した。ここでは、3つの計算領域を設定し、局所スケールの計算領域では格子幅が 0.25m という高解像度流動計算を行った。その結果、格子解像度の増加とともに、creek 内の流れを良好に再現できたことから、ネスティング計算法がマングローブ水域の流動シミュレーションに有効であることが検証された。また、creek 内における流速横断分布や水平大規模渦構造に関して、現地観測結果と類似したパターンを再現することに成功するとともに、それらの空間構造や形成要因等を明らかにした。

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), (C)(2) (課題番号：13650573, 代表者：西村司) によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

浅野敏之・園田勝徳・Shahbudin Saad・Mohd. Lokman Husain (2001): 周辺低湿地への氾濫を有するマングローブ感潮入江の流動特性, 海岸工学論文集, Vol.48, No.2, pp.1221-1225.

池田駿介・太田賢一・長谷川洋 (1992): 側岸部植生境界の周期渦の発生機構, 土木学会論文集, No.443, pp.47-54.

金澤延幸・松田義弘 (1994): マングローブ河川における潮汐流の非対称性, 海の研究 Vol.3, No.1, pp.1-11.

佐藤慶太・二瓶泰雄・西村司・灘岡和夫 (2002): 沿岸流動計算におけるネスティング手法の適用性に関する基礎的検討, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, p.295.

灘岡和夫・八木宏 (1993): SDS & 2 DH モデルを用いた開水路せん断乱流の数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.473 / - 24, pp.35-44.

二瓶泰雄・灘岡和夫・熊野良子 (2000): 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, 海岸工学論文集, Vol.47, No.1, pp.461-465.

二瓶泰雄・灘岡和夫・青木康哲・若木研水・矢井秀明・大見謝辰男・古川恵太・佐藤慶太 (2001): マングローブ水域における流動・熱・水質環境特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, Vol.48, No.2, pp.1211-1215.

二瓶泰雄・横井淳一・青木康哲・綱島康雄・佐藤慶太・西村司・灘岡和夫 (2002a): マングローブ河道部周辺における三次元流動構造と乱流特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, Vol.49 (投稿中).

二瓶泰雄・青木康哲・綱島康雄・佐藤慶太・西村司・灘岡和夫 (2002b): 多点連続観測に基づくマングローブ・エスチュアリーにおける流れと物質輸送特性, 海岸工学論文集, Vol.49 (投稿中).

肥後竹彦・高杉由夫・佐藤一紘・渡嘉敷義浩: マングローブ水域の流動・堆積環境特性 石垣島吹通川の流動・堆積環境, 「マングローブ林を中心とした生態系の解明に関する研究」成果報告書, pp.63-76, 1993.

山本多成・中辻啓二・大屋敬之 (1997): マングローブ・エスチュアリーにおける 3 次元流動と物質輸送, 土木学会第 52 回年次学術講演会, pp.806-807.