

# 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

## STUDY ON MOMENTUM AND SEDIMENT TRANSPORTS BETWEEN CREEK AND SWAMP IN A MANGROVE ESTUARY

佐藤慶太<sup>1</sup>・二瓶泰雄<sup>2</sup>・田口富之<sup>3</sup>・綱島康雄<sup>4</sup>・中村武志<sup>5</sup>・今野篤<sup>5</sup>・西村司<sup>6</sup>  
Keita SATO, Yasuo NIHEI, Tomiyuki TAGUCHI, Yasuo TSUNASHIMA, Takeshi NAKAMURA,  
Atsushi KONNO and Tsukasa NISHIMURA

<sup>1</sup> 学生員 修士(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(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

<sup>2</sup> 正会員 博士(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科(同上)

<sup>3</sup> 非会員 学士(工) 東京理科大学 理工学部土木工学科 元学部生

<sup>4</sup> 非会員 修士(工) (株)ジェイアール東日本情報システム(〒151-0053 東京都渋谷区代々木 2-2-2)

<sup>5</sup> 学生員 学士(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程

<sup>6</sup> 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科

To understand momentum and sediment transports between creek and swamp in a mangrove area, we have conducted field measurements at Fukido River estuary section in the Ishigaki Island, Okinawa, Japan. A 3D current computation in the mangrove estuary has also been performed with a new multi-nesting procedure recently developed by the authors. The observed results indicate that the temporal and spatial variations of the momentum and sediment transports between the creek and swamp appear appreciably mainly due to horizontal current patterns in the mangrove swamp. The computational results for the 3D flow structure around the creek give qualitatively agreements with the observed results, indicating the fundamental performance of the present numerical models.

**Key Words:** Mangrove estuary, creek, momentum transport, sediment transport, nesting procedure

### 1. はじめに

河道部(creek)とヒルギ類等の塩性植物が密生する氾濫原(swamp)で構成されるマングローブ水域では、creekを介して、潮汐作用に伴ってswampと周辺海域との間で海水・物質交換が行われており、ここでは豊かな生態系が形成されている<sup>1)</sup>。このような海水・物質交換特性を理解するためには、そのベースとなるcreekとswamp間における物質交換過程を把握することが重要となる。このマングローブ河道部は、大きな蛇行部や分岐部等で特徴付けられている複雑な平面形状を有し、その両岸には異なる形状をしたマングローブ植物が繁茂する広大な氾濫原が存在する、ということが一般的である。そのため、マングローブ水域での河道部—氾濫原間の運動量・物質輸送過程に関しては、これまでの河川工学の知見をそのまま準用できないものと推察される。また、マングローブ河道部及びその周辺における水理環境に関する既存の知見はそれほど多くない<sup>2)~5)</sup>。

このような背景から、著者らは沖縄県石垣島吹通川マングローブ水域を対象とした現地観測を実施し、creek周

辺における三次元流動特性や乱流構造に関する基礎的な検討を行っている(二瓶ら<sup>6)</sup>、以下前報と呼ぶ)。その観測結果により、時間的にダイナミックに変化するcreek内における三次元流動構造やcreek周辺の流速変動特性の形成要因などについて検討した。しかしながら、前報では、乱流観測時における測定器の制約により、時間的・場所的に十分な流速データを得ることができておらず、その上、濁質などを対象とした物質輸送過程に関する調査も行っていない。

そこで本研究では、creek—swamp間における運動量・濁質輸送過程を検討するために、同じ吹通川マングローブ水域を対象として、現地観測と数値シミュレーションを行うことを試みた。ここでは、現地観測結果に基づいて、creek—swamp境界部における乱流構造や運動量・濁質フラックスの時空間的变化について検討する。次に、著者らが別途提案している新しいネ스팅手法<sup>7)</sup>に基づく流動計算を行い、creek周辺における三次元流動構造特性を調べる。

### 2. 現地観測概要

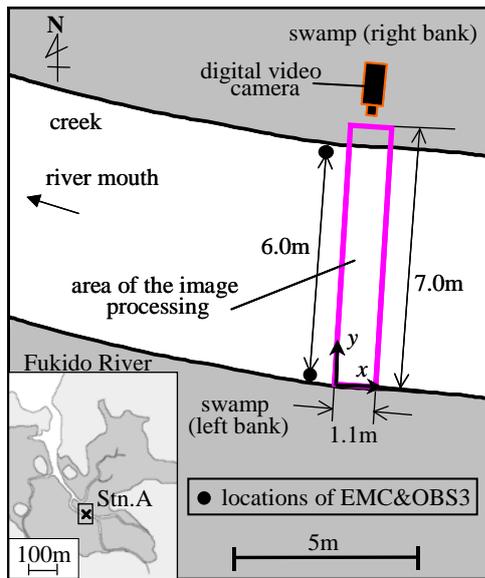


図-1 吹通川マングローブ水域と観測点配置図

現地調査は、前報と同様に、吹通川マングローブ水域中央部に位置する Stn.A(図-1)周辺を対象として、①有線式測器を用いた乱流輸送観測、②デジタルビデオカメラによる水表面流速観測、という二種類から構成される。観測期間は両観測とも2002年9月17~20日とし、本論文では、上げ潮時(19日16:06~18:50)と下げ潮時(20日6:36~10:02)の結果を示す。①の観測では、室内用有線式電磁流速計3台(VM-201H, 株KENEK製)と光学式濁度計2台(OBS-3, D&A社製)を、図-1に示すように、creekの右岸・左岸側におけるcreek-swamp境界部の底面上10cmに設置した。ここではサンプリング周波数を10Hzとし、それらの結果をデータロガー(NR1000, 株KEYENCE製)にて記録した。これらの測器のうち、右岸側に設置した濁度計は故障したため、観測値は得られていない。前報では、連続的な流速測定を最大で20分しか行えなかったものの、本観測では、上記の時間全て計測している。なお、本論文では、図-1に示すように、creek主流、横断方向をそれぞれ $x$ ,  $y$ 方向とし、各方向流速成分を $u$ ,  $v$ とする。また、現地で採取された底質を用いたキャリブレーション結果に基づいて、濁度をSSに変換しており、ここではSSを $c$ として表す。

②の観測では、swamp右岸側にデジタルビデオカメラ(DCR-TRV9000, SONY株製)を取り付け(図-1)、creek水表面を流れるトレーサー(Vフォーム, 株東京パック製)の軌跡をラグランジュ的に追跡することにより、creek内の水表面流速ベクトルを算出した。このVフォームは、水中投入後しばらくして溶解する緩衝材であり、実河川における水表面流速計測用トレーサーとして用いられている<sup>8)</sup>。幾何補正に際しては、あらかじめ水平位置を測定した標定基準点を撮影範囲内に6点設け、2次

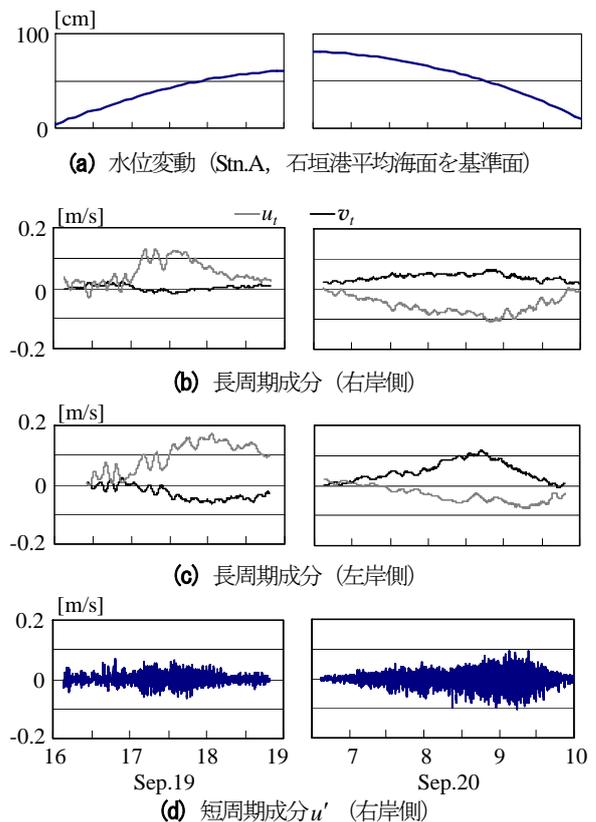


図-2 流速変動の時系列変化

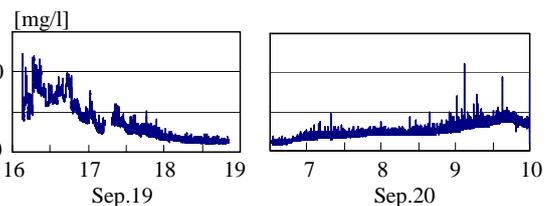


図-3 SS生データの時間変化(左岸側)

射影変換式<sup>9)</sup>を適用している。撮影画像の解析対象範囲としては、図-1に示すように、creek主流方向1.1m、横断方向7.0mの矩形領域とする。

### 3. 観測結果と考察

#### (1) 流速・SSの時間変動特性

図-2は、creek両岸側における主流・横断方向流速の時系列変化を示す。ここでは、前報と同様に、流速変動を周期3分以上の変動成分(長周期成分, 添え字 $i$ )とそれ以下の変動成分(短周期成分, 添え字 $'$ )に分離した形で表記している。なお、短周期成分に関しては、紙面の都合上、右岸側におけるcreek主流方向成分 $u'$ のみを図示している。また、図中には、石垣港平均海面を基準面とする水位変動の観測値も表示している。これらを見ると、creek主流方向の長周期成分 $u_i$ に関しては、上げ潮時では左岸側の方が右岸側よりも大きく、下げ潮時ではその逆の傾向が見られる。また、セイシュに相当する

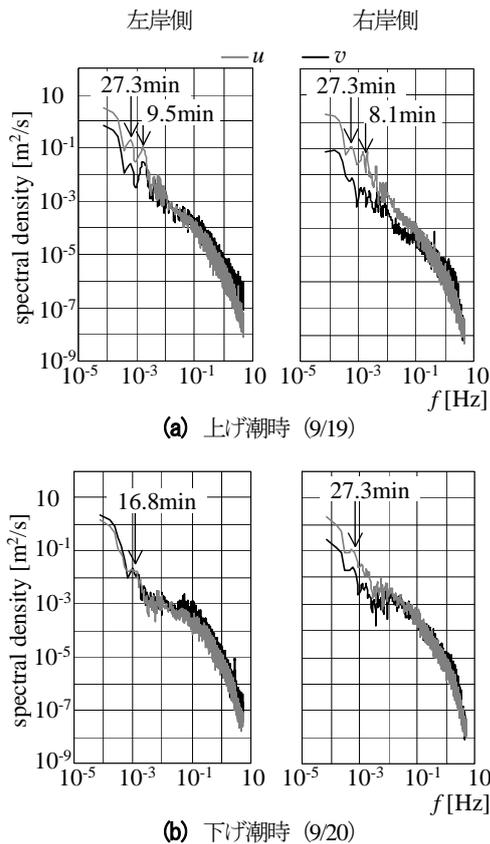


図-4 流速変動のスペクトル解析結果

周期 10 分程度の流速変動が見られており、その様子は上げ潮時の方が明確である。一方、creek 横断方向の長周期成分  $v$  については、上げ潮時では、右岸側ではほぼ 0 となっているのに対して、左岸側では負、すなわち左岸側へ向かう方向の流れが発生している。また、下げ潮時では、両岸ともに右岸側へ向かう方向の流れが生じており、その様子は左岸側の方が顕著となっている。このマングローブ水域では、上げ潮時では、河口部から creek を介して swamp 奥部へ向かう流れが、下げ潮時ではその逆の傾向が見られているため、上述した横断方向流速が形成されたものと考えられる。また、両岸での creek 主流方向の流速差は、creek の曲がり形状・合流部などの影響とともに、このような横断方向流速に伴って creek-swamp 間での流入・流出が顕著に起こっている結果を反映しているものと考えられる。

流速変動の短周期成分に着目すると、その変動振幅は明確な時間変化をしており、creek 主流方向の長周期成分とともに大きくなっているように見受けられる。また、上げ潮時と下げ潮時における結果を比較すると、下げ潮時における変動振幅の大きさは、上げ潮時の結果よりも顕著になっていることがうかがえる。これらの短周期成分の時空間的变化に関しては、次節以降にて詳述する。

次に、上げ潮時・下げ潮時の左岸側における SS 変動の観測値を図-3に示す。まず、上げ潮時では、前半に

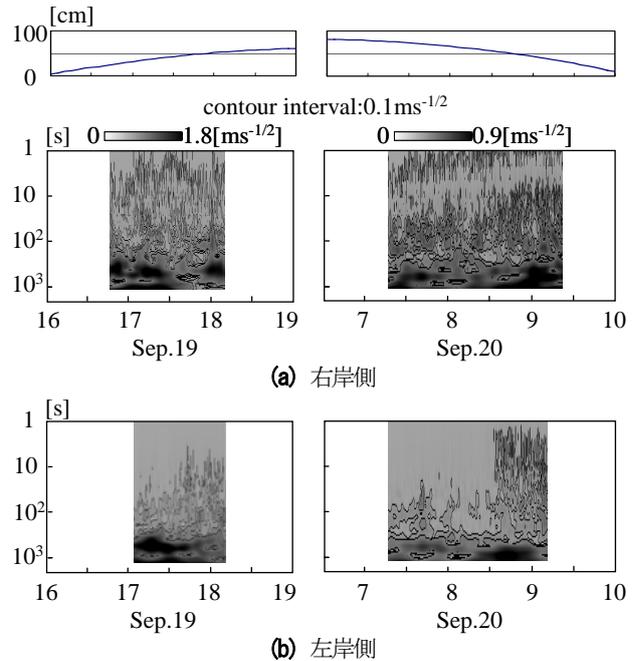


図-5 creek 主流方向流速成分  $u$  に対する wavelet 解析結果

SS ピークが見られ最大で  $20\text{mg/l}$  を越えており、その後は漸減傾向となっている。一方、下げ潮時では、時間経過とともに徐々に上昇しており、後半に SS ピークが生じている。また、短周期成分に相当する SS 変動自体は、全体的には大きくないことがうかがえる。

## (2) 流速変動の周波数依存性

流速変動データの周波数依存性に関する基本特性を調べるために、上げ潮時と下げ潮時各々における流速変動のスペクトル解析結果を図-4に示す。図中には、両岸側における creek 主流・横断方向の結果が示されており、図化の関係上、 $10^2\text{Hz}$  以上の高周波数域に関しては移動平均している。これを見ると、まず、図中矢印に示されているように、セイシュに相当する約 10 分、17 分、27 分周期の変動ピークが現れている。この結果は、既存の研究<sup>6), 10)</sup>とは完全に一致しておらず、また、ここでは観測データが不十分なため、この水域におけるセイシュについて今後より詳細に検討する必要がある。次に、短周期成分に着目すると、 $10^1\text{Hz}$  よりも高周波数域ではコルモゴロフの  $-5/3$  乗則が現れており、乱流状態となっていることが分かる。この短周期成分を右岸側と左岸側とで比較すると、上げ潮時では左岸側の方が、下げ潮時では右岸側の方が、やや大きくなっている。また、主流方向と横断方向のスペクトル解析結果について比較すると、長周期成分に関しては creek 主流方向のスペクトル密度が大きいものの、乱流状態となっている高周波数域ではほぼ同程度となっている。

より詳細に検討するために、creek 主流方向の流速変動

に対する wavelet 解析結果を図-5に示す。ここでは、流速データの前後にダミーデータを付加することなく解析したため、取得データよりも解析期間が短くなっている。周期3分以下の短周期成分に着目すると、周期100s前後において、流速変動のパワーが大きくなっている。また、スペクトル解析結果と同様に、上げ潮時には左岸側が、下げ潮時には右岸側のパワーがそれぞれ相対的に大きくなっていることが分かる。さらに詳細に見ると、これらの短周期成分は連続的に大きくなっているわけではなく、むしろ間欠的に増加・減少を繰り返している。

### (3) creek 両岸における乱流構造の比較

乱流構造の時間的・場所的な変化を調べるために、流速データの短周期成分を10分毎に分割し、そのデータに対してレイノルズ応力 $-\overline{\rho u'v'}$ を算出した結果を図-6に示す。これを見ると、上げ潮時には左岸側、下げ潮時には右岸側のレイノルズ応力がそれぞれ顕著となっていることが分かる。このレイノルズ応力は、creek-swamp境界部付近における流速差に伴う乱流輸送過程により主として形成されるため、creek-swamp間における乱流輸送特性がcreek両岸側で異なり、さらにその大小関係が上げ潮時と下げ潮時とで異なることが明らかとなった。

このような乱流構造の場所的な違いの要因を調べるために、ここでは、creek水表面流速分布に注目する。図-7はデジタルビデオカメラ観測により得られたcreek内の水表面流速分布を示す。ここでは、下げ潮時(20日9:16~17)の結果について、creek横断方向に50cm間隔で平均化したものを図示している。これを見ると、流速ピーク位置は、creek中央部よりもやや右岸側寄りに位置している。また、creek両岸における速度勾配を比べると、左岸側ではほぼ0となっているのに対して、右岸側では大きな速度勾配が形成されていることが分かる。これは、図-2(b), (c)に示したように、ここではcreek右岸側へ向かう横断方向流速が形成されているため、主流方向流速のピーク位置が右岸側寄りに形成され、さらに、creek両岸における速度勾配の大きさの違いが生じるものと考えられる。これらの結果と図-6に示すレイノルズ応力の結果を比較すると、下げ潮時では、レイノルズ応力の小さい左岸側ではcreek水表面流速の速度勾配は小さく、レイノルズ応力の大きい右岸側では速度勾配は大きくなっており、両者は明確な対応関係があることが分かる。また、上げ潮時に関しても類似した関係が確認されている。

これより、creek両岸における乱流構造の違いは、creek内の流速分布特性と密接に関係しており、それに対して、creek横断方向流速を介して、マングローブ水域での大局的な平面流動パターンが大きな影響を及ぼしているもの

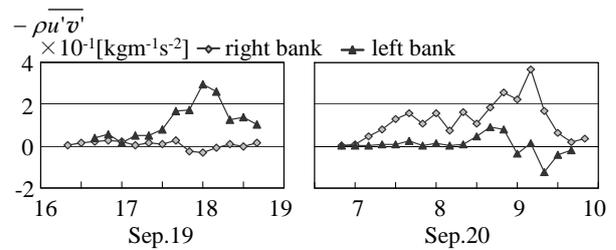


図-6 creek両岸におけるレイノルズ応力 $-\overline{\rho u'v'}$ の比較

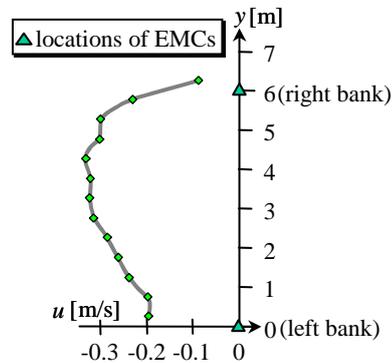


図-7 creek内の水表面流速分布(9/20 9:16~9:17)

と考えられる。なお、このレイノルズ応力に関する観測結果は、著者らが別途行っているネスティング計算法に基づく高解像度流動シミュレーション結果<sup>11)</sup>と逆の傾向となっており、それに関しては今後の検討課題とする。

### (4) creek-swamp間の運動量・濁質輸送特性

creek-swamp間における運動量・濁質輸送特性を検討するために、成分別に運動量・SSフラックスを算出し、その結果を乱流統計量の時と同様に10分毎に平均化した。そこで得られた結果のうち、creek両岸での運動量フラックスと左岸側のSSフラックスの長周期成分を図-8に示す。まず、運動量フラックスに関しては、上げ潮時では、左岸側の運動量フラックスが右岸側の結果よりも明確に大きいものの、下げ潮時では、両者はほぼ同程度であることが確認される。これは、図-2に示したcreek主流・横断方向流速の傾向と対応している。次に、SSフラックスは、概ね、同地点での運動量フラックスと同様に時間変化しているものの、そのピーク時刻に関しては、上げ潮時ではSSフラックスの方が、下げ潮時では運動量フラックスの方が、それぞれ早く現れていることが分かる。これは、SS自体のピークが、図-3に示したように、上げ潮時では前半に、下げ潮時では後半に現れるためである。また、上げ潮時と下げ潮時のピーク時の結果を比べると、下げ潮時のSSフラックスが上げ潮時よりも大きくなっていることが分かる。このような違いはcreek内の濁質環境に大きな影響を及ぼすものと推察される。以上のようなcreek-swamp間における運動量・SSフラックスは、creek横断方向流速と直接的に関

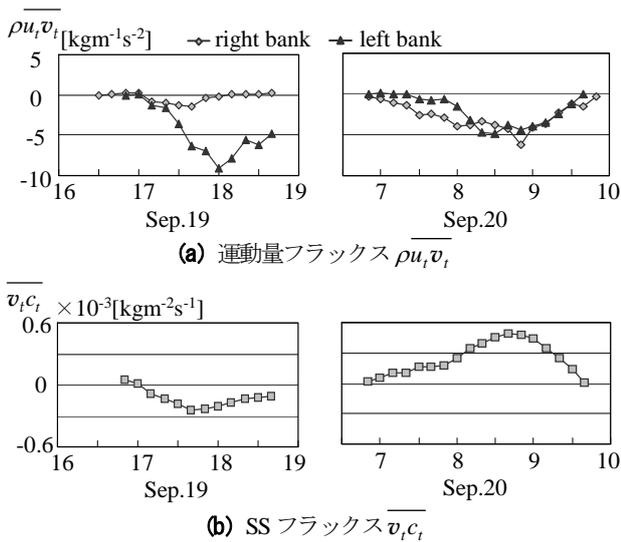


図-8 運動量・SSフラックスの長周期成分の時間変化

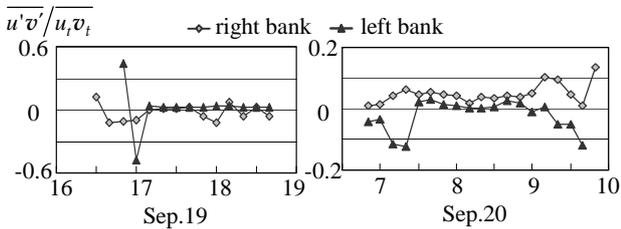


図-9 短周期・長周期成分の運動量フラックス比 $\overline{u'v'}/\overline{u_i v_i}$ の時間変化

連していることから、それに多大な影響を及ぼすマングローブ水域の平面流動パターンが、ここでの運動量・濁質輸送過程と密接に関連しているものと考えられる。

さらに、運動量フラックスにおける長周期成分と短周期成分の大きさを比較するために、短周期成分と長周期成分の比 $\overline{u'v'}/\overline{u_i v_i}$ に関する時系列変化を図-9に示す。これを見ると、上げ潮時については、右岸側の比の絶対値は左岸側よりも大きく、10%を越える場合も存在しており、図-6における結果と異なっている。これは、図-8に示したように、右岸側における長周期成分の運動量フラックスがほぼ0となる時間帯があるためである。一方、下げ潮時に関しては、右岸側の結果は全般的に5%程度であり、左岸側よりも大きくなっており、図-6に示したレイノルズ応力の結果と一致している。このように、短周期成分の運動量フラックスは、長周期成分の5~10%程度であり、また、その大きさがcreekの両岸で明確な違いがあることが明らかとなった。

#### 4. creek 周辺の三次元流動シミュレーション

##### (1) 計算方法及び計算条件

creek-swamp間の物質輸送過程と密接に関連すると考えられるcreek内の三次元流動構造を把握するために、

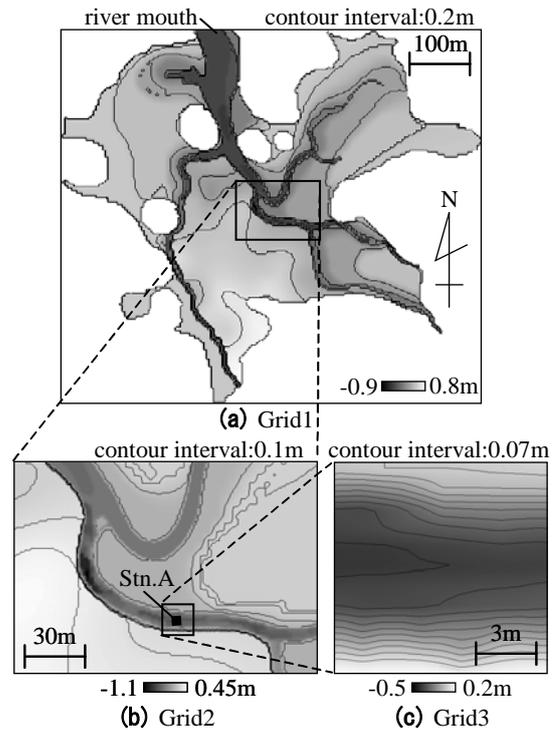


図-10 計算領域と地盤高さコンター (基準面: 石垣港平均海面)

表-1 主な計算諸条件

	領域サイズ	格子数	格子幅
Grid1	704×652m	176×163	4.0m
Grid2	148×104m	148×104	1.0m
Grid3	11×11m	44×44×10	0.25m

Stn.A 周辺での三次元流動計算を試みる。ここでは、3. で述べたように、creek内の流動構造がマングローブ水域における大局的な流況特性の影響を大きく受けることから、ネスティング計算法を導入することにより、swamp内の大局的な流況を反映しつつ、効率的にcreek周辺における高解像度流動計算を実施する。ここでは、ネスティング計算法として、開境界条件処理を適切に行うことが可能な新しい多重ネスティング計算法を用いる<sup>7)</sup>。

計算領域としては、図-10に示すように、3つの領域が設定されている。ここでは、マングローブ水域全域(Grid1)と同水域中央部(Grid2)の範囲は、二瓶ら<sup>11)</sup>と同じとし、Grid3は、現地観測を行ったStn.A周辺域とした。また、計算効率性を考慮して、Grid1と2に関しては平面二次元計算を実施し、Grid3に関してのみ三次元計算を実施した。同図中に示されている地盤高さコンターは、肥後ら<sup>10)</sup>における地形図と著者らが別途計測した結果を用いて作成されている。計算条件の詳細を表-1に示す。計算期間は、上述した観測期間を対象とする。外力条件については、この期間中に河川出水が見ら

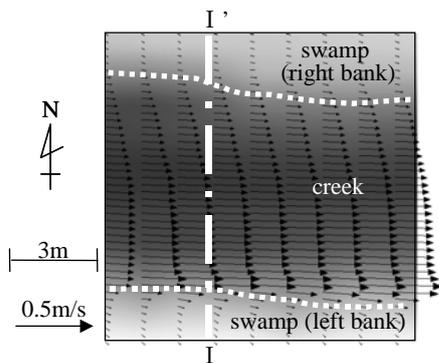


図-11 Stn.A 周辺の鉛直平均流速ベクトル (Grid3, 上げ潮時, 9/19 18:10)

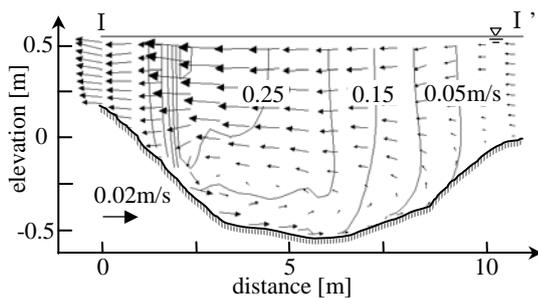


図-12 断面 I-I' における二次流構造と東西方向流速コンター (Grid3, 上げ潮時, 9/19 18:10)

れなかったため、潮汐のみを考慮し、Grid1 の北側境界部に位置する河口部にて水位変動の観測値を与えた。

## (2) 計算結果

まず、creek 内流速の時間変化について計算結果と観測結果を比較したところ、格子解像度の向上とともに、計算結果は観測値とより一致することが確認された。ここでは、紙面の都合上、Grid3 における計算結果のみを記述する。図-11 は、Grid3 における、上げ潮時 (9/19 18:10) での鉛直平均流速ベクトルを示している。図中の点線は creek-swamp 境界部を表示している。これを見ると、観測結果と同様に、creek 左岸側の流速が全体的には右岸側よりも大きくなっている。このような場合における creek 断面内における三次元流動構造を調べるために、図-11 に示される断面 I-I' における二次流構造と東西方向流速のコンターを図-12 に示す。これを見ると、表層では swamp 左岸側へ向かう流れ、底層ではその逆向きの流れとなっており、図中半時計回りの二次流構造が明確に形成されていることが分かる。また、creek 主流方向に相当する東西方向の流速分布に関しては、creek 左岸側ではコンター間隔が密であり、また、流速分布が鉛直方向に一様化している。これらの結果は、前報において示された観測結果と定性的に一致しており、本ネスティング計算法の基本的な有効性が確認された。

## 5. おわりに

creek-swamp 境界部における乱流構造や運動量・物質輸送特性を把握するために、沖縄県石垣島吹通川マングローブ水域を対象とした現地観測及び数値シミュレーションを実施した。その結果、creek-swamp 境界部での乱流構造特性や運動量・濁質フラックスは、時間的・場所的に大きく変化していることが示された。そのような時空間的な変化に対しては、creek 主流・横断方向流速を介して、マングローブ水域における広域的な平面流動特性が大きな影響を与えていることが示唆された。また、新しいネスティング計算法に基づく creek 周辺の三次元流動計算を実施し、creek 断面内における二次流構造が明確に形成されていることが示された。

## 参考文献

- 1) 中村武久, 中須賀常雄: マングローブ入門 海に生える緑の森, めこん, pp.1-234, 1998.
- 2) Wolanski, E., Mazda, Y. and Ridd, P.: Mangrove hydrodynamics in Tropical mangrove ecosystems (eds. Robertson, A. I. and Alongi, D. M.), *American Geophysical Union*, pp.43-62, 1992.
- 3) 松田義弘: マングローブ水域の物理過程と環境形成 一自然の保護と利用の基盤一, 黒船出版, pp.1-41, 1997.
- 4) Wolanski, E., Mazda, Y., Furukawa, K., Ridd, P., Kitheka, J., Spagnol, S. and Stieglitz, T.: Water circulation in mangroves, and its implications for biodiversity (ed. Wolanski, E.), *CRC Press*, pp.53-76, 2001.
- 5) 二瓶泰雄, 青木康哲, 綱島康雄, 佐藤慶太, 西村司, 灘岡和夫: 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, No.2, pp.1201-1205, 2002.
- 6) 二瓶泰雄, 横井淳一, 青木康哲, 綱島康雄, 佐藤慶太, 灘岡和夫: 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, No.2, pp.1196-1200, 2002.
- 7) 二瓶泰雄, 佐藤慶太, 灘岡和夫, 熊野良子, 西村司: 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*, 2003 (投稿中).
- 8) 戸田祐嗣, 池田駿介, 西亮樹: PIV の実河川流速計測への適用性に関する研究, *河川技術論文集*, 第7巻, pp.479-484, 2001.
- 9) 高木幹雄, 下田陽久: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版, pp.423-429, 1991.
- 10) 肥後彦彦, 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 一石垣島吹通川の流動・堆積環境一, 「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.63-78, 1993.
- 11) 二瓶泰雄, 佐藤慶太, 青木康哲, 西村司, 灘岡和夫: 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, *海岸工学論文集*, Vol.49, No.1, pp.416-420, 2002.

(2003. 4. 11 受付)