

# マングローブ水域における平常時・降雨時の物質輸送過程及び植生環境に関する検討

## MATERIAL TRANSPORTS UNDER NORMAL ATMOSPHERIC AND RAINY CONDITIONS AND VEGETATION ENVIRONMENTS IN A MANGROVE AREA

二瓶泰雄<sup>1</sup>・田所奈美<sup>2</sup>・綱島康雄<sup>3</sup>

Yasuo NIHEI, Nami TADOKORO and Yasuo TSUNASHIMA

<sup>1</sup>正会員 博(工) 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

<sup>2</sup>学生員 学(工) 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻修士課程

<sup>3</sup>非会員 修(工) (株) ジェイアール東日本情報システム

To understand material transports and vegetation environments in a mangrove area, we have done field measurements on hydrodynamic, water quality and vegetation environments in a mangrove swamp with two surrounding creeks. The observed results show the tidal asymmetry of the salinity and turbidity fluctuations that the differences of salinity and turbidity in the flood and ebb tides appear appreciably due to the horizontal current patterns and deposition process in the swamp, respectively. The advection and diffusion processes of the terrestrial water through influent rivers in the swamp may vary due to the timing of the hydrologic event and tide. The relationships of the vegetation density of the mangrove trees and physical environments are also examined.

**Key Words:** mangrove swamp, salinity, turbidity, tidal current, vegetation

### 1. 序論

熱帯・亜熱帯域における潮間帯に存在するマングローブ林は、海と陸に挟まれたバッファゾーンとして、様々な防災・環境機能の役割を果たしている<sup>1), 2)</sup>。このマングローブ水域では、河川水や海水が、河道部(creek)を通してマングローブ植物が繁茂する氾濫原(swamp)に浸水し、マングローブ水域は周辺の陸域・海域環境から影響を直接的に受けやすい立地条件となっている<sup>2)</sup>。

このためにマングローブ水域における海水・陸水挙動やそれに伴う物質輸送特性を把握することは重要である。マングローブ水域における流動構造や物質輸送特性に関する既存の研究は、現地観測をベースとして行われ、Wolanski et al.<sup>3), 4)</sup> や松田<sup>5)</sup> にまとめられている。しかしながら、マングローブ水域への河川水や海水の流入・流出に伴う物質輸送過程やこれらとマングローブ生態系との関連性については十分理解されていない。また、creekに囲まれた氾濫原上における水理・水質環境の平面構造に関する知見は、著者らの研究<sup>6)</sup> を除くと皆無である。

本研究では、多くの蛇行・分岐部を有するcreekに囲まれたマングローブ氾濫原における水理・水質・植生環境調査を実施し、平常時・降雨時における塩分・濁質輸送特性の平面構造や植生の立地環境に関して検討する。

### 2. 現地観測の概要

#### (1) 観測サイト

本研究では、二瓶・綱島<sup>6)</sup>と同様に、沖縄県石垣島北西部に位置する吹通川マングローブ水域南西部における二つの河道部に挟まれた氾濫原を観測サイトとする。ここでのマングローブ植物の優占種は、ヤエヤマヒルギ(*Rhizophora stylosa*)とオヒルギ(*Bruguiera gymnorhiza*)である。図-1は、後述する観測対象域における地盤高さ(基準面:石垣港平均海面)の空間分布を示す。この氾濫原は平均海面より高く、最大の地盤高さは平均満潮位(約60cm)と概ね一致する。また、このマングローブ水域へは4つの上流河川からの淡水供給が存在する。上流河川からの淡水流入量は、平常時には、河口部での潮汐に伴う海水流入量と比べて著しく小さく、このときには河川流よりも潮汐流が支配的となる。

#### (2) 観測方法

観測地点としては、図-2に示すように、二つのcreek(同図中creek-IとII)に挟まれたswamp全域をカバーするために、swamp42点、creek16点という計58地点を選定した。観測期間は、大潮期(2002年9月20~23日)とした。測定項目としては、全地点において水位、水温、

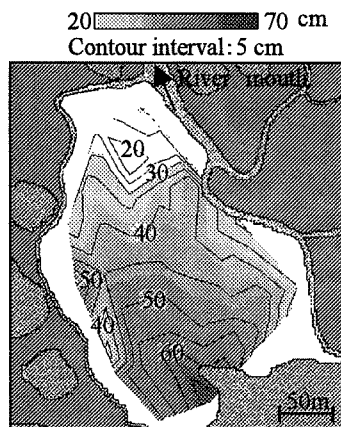


図-1 氾濫原における地盤高さの空間分布  
(石垣港平均海面を基準)

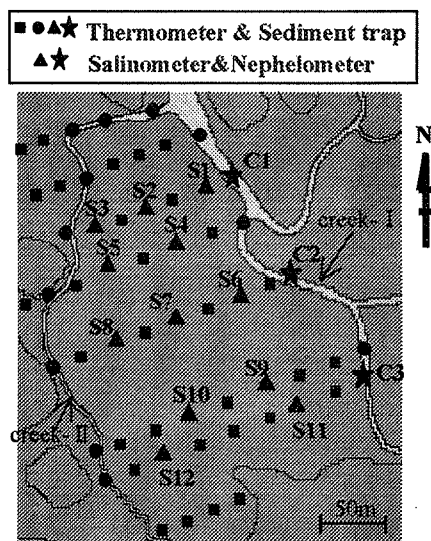


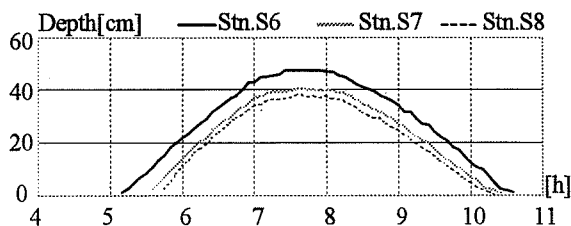
図-2 観測地点の配置図

土砂沈降量を, creek3 地点 (★印) と swamp12 地点 (▲印) では, 上記の項目に加えて塩分濃度と濁度とし, ▲印地点の一部では底層流速とした。また, 5×5m のコードラートを用いた植生調査を実施し, 植物種, 植生密度, 胸高直径を swamp 内 42 地点において計測した。その他の詳細は, 二瓶・綱島<sup>6)</sup> を参照されたい。なお, 上記の観測期間中, 9 月 21 日午前中に 46mm の降雨が観測され, 上流河川からの淡水・土砂供給が見られた。以下では, 降雨時として 9/21 の結果を, 平常時として降雨影響が少なく相対的に潮汐作用が顕著な期間 (9/20, 22-23) の結果を示す。

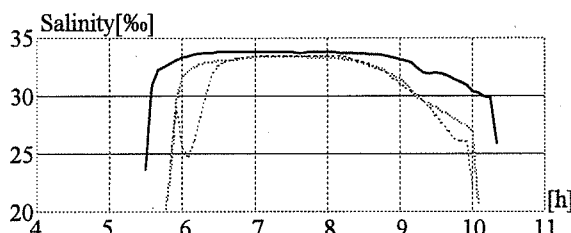
### 3. 潮汐による塩分・濁質輸送特性 (平常時)

#### (1) 時間変動特性

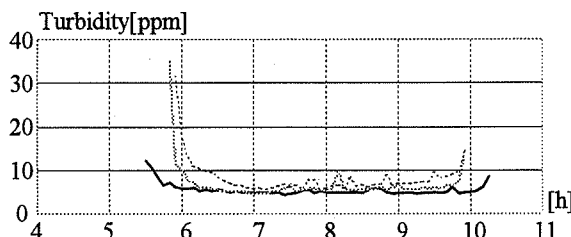
平常時における塩分濃度と濁質環境の基本的な特徴を



(a) 水深



(b) 塩分濃度



(c) 濁度

図-3 平常時における塩分濃度と濁度の時間変化 (9/22)

見るために, swamp 中央部 (Stns.S6~S8) における水深, 塩分濃度, 濁度の時系列変化を示す。ここでは, 大潮期のうち 9/22 における一潮汐分の結果が示されている。まず, 塩分濃度に関しては, 全地点において, 冠水直後や干出直前の塩分値は低く, 満潮時には高い。上げ潮時と下げ潮時における塩分濃度を比べると, 大きさについては下げ潮時の方が相対的に小さく, 時間変動パターンとしては, 上げ潮時では急激に上昇するのに対して下げ潮時には緩やかに減少しており, 上げ潮時と下げ潮時には塩分変化の様子が異なる。

濁度に関しては, 全点にて冠水直後や干出直前に濁度ピークが現れる。これは, 水表面付近にマングローブ植物の葉が分解されて形成された油状の高濁度層が形成されるためである<sup>7)</sup>。この冠水直後と干出直前の濁度値を比べると, 全般的に冠水直後の方が大きい。また, 冠水時の濁度ピーク後には, 濁度値は大きく減少し, ほぼ一定値となる。このように濁度に関しても, 塩分と同様に, 上げ潮時と下げ潮時に明確な差が現れている。

#### (2) 平面分布

##### a) 塩分濃度

平常時における塩分濃度の平面分布特性を見るために, 各観測点において計測された塩分濃度の上げ潮時と下げ潮時の塩分平均値 ( $\overline{Sal_f}$ ,  $\overline{Sal_e}$ ) 及びその塩分差

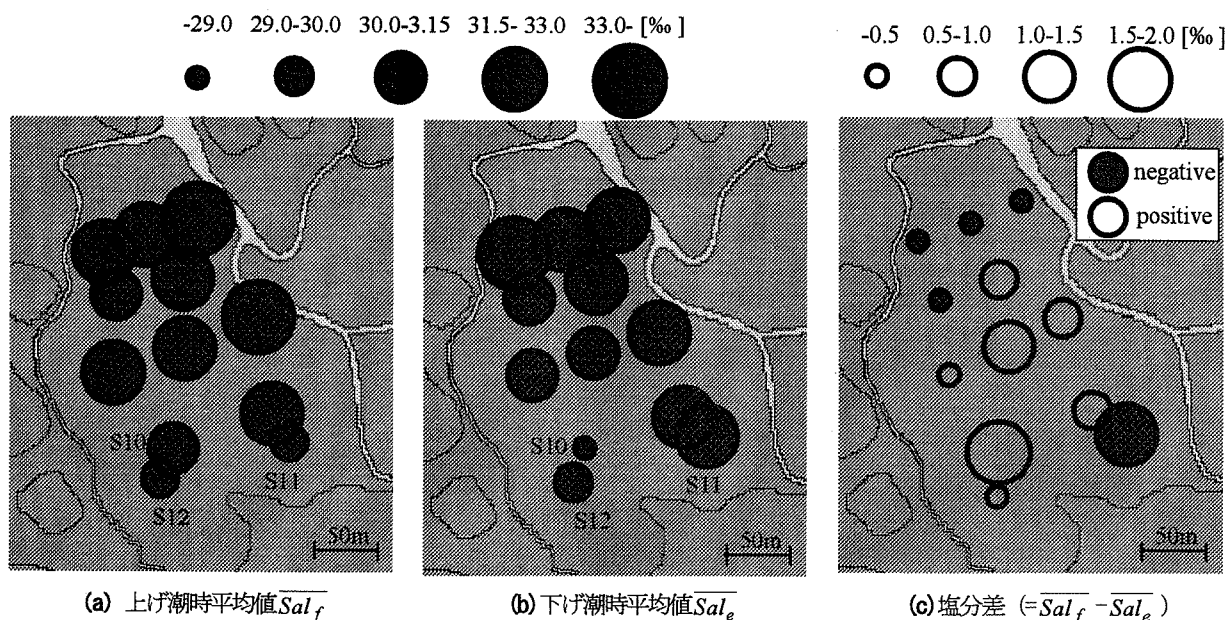


図-4 塩分濃度の平面分布

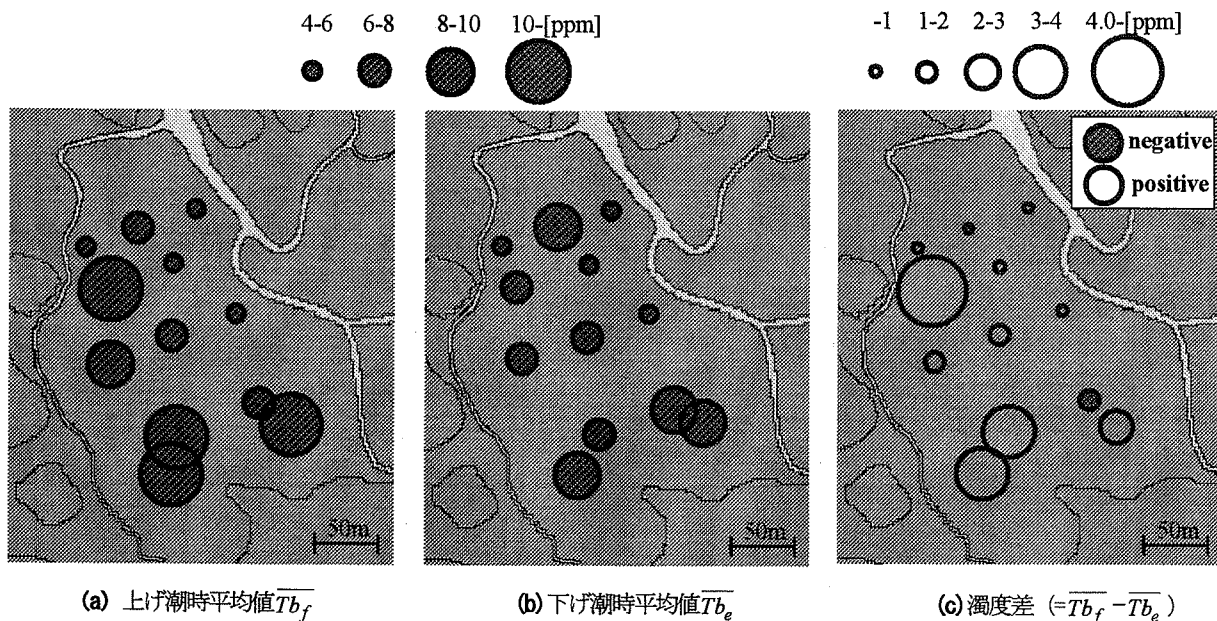


図-5 濁度の平面分布

( $=\overline{Sal_f} - \overline{Sal_e}$ ) を図-4に示す。図中には、平常時の結果を、凡例に示すように、円の大きさで表示している。まず、同図 (a) に示される上げ潮時に関しては、河口に近い swamp 北側や中央部では塩分濃度は相対的に高く、swamp 南側では塩分値が相対的に低い。このときの最大値は 33.4‰、最小値は 29.7‰である。次に、下げ潮時 (同図 (b)) では、swamp 北側の塩分値が高く、南側で低い、という傾向は変わらない。しかしながら、塩分濃度の最小値が現れる位置は Stn.S10 であり、swamp 南側からやや中央部よりに移動している。

次に、上げ潮時と下げ潮時の塩分濃度差 (同図 (c)) に関しては、swamp 北側ではほぼ 0 となるものの、中央部や南側では、Stn.S11 を除くと、広い範囲で正の値、す

なわち、下げ潮時の塩分値が上げ潮時よりも低いことが分かる。また Stn.S11 では、その逆に塩分差は負、すなわち、上げ潮時の塩分濃度が下げ潮時の値よりも低い。このように、塩分濃度が上げ潮時と下げ潮時で異なるという一潮汐間の非対称性が、swamp の広い範囲で見られる。

b) 濁度と土砂沈降量

図-5は、濁度に関する上げ潮時・下げ潮時の平均値 ( $\overline{Tb_f}$ ,  $\overline{Tb_e}$ ) 及びその差 ( $=\overline{Tb_f} - \overline{Tb_e}$ ) の平面分布を示している。まず上げ潮時 (同図 (a)) では、swamp 北側や creek-I 近傍では相対的に濁度値が低いのにに対して、creek-II 近傍や swamp 南側では濁度値が相対的に高い。一方、下げ潮時 (同図 (b)) の濁度値は全体的に減少するとともに、その空間的な変化も上げ潮時と比べて小さい。

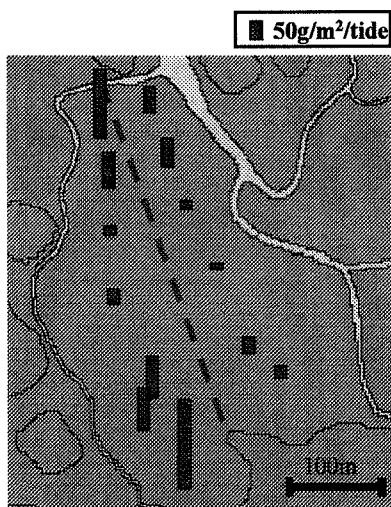


図-6 土砂沈降水量

これらの結果を反映して、上げ潮時と下げ潮時の濁度差（同図(c)）に関しては、swamp北側やcreek-I近くで濁度差は±1ppm以下となっているのに対して、swamp奥部やcreek-II近傍では全般的に、正の値、すなわち、上げ潮時の濁度値が下げ潮時よりも大きく、最大で6ppmとなっている。このように、上げ潮時と下げ潮時における濁質環境の違いが、塩分濃度と同様に、swampの広い範囲にわたり顕著である。

次に、Sediment trapにより計測された土砂沈降水量の平面分布を図-6に示す。ここでは、図化の関係上、swamp上の全42点における計測結果を、swamp東側（creek-I側）と西側（creek-II側）に分割し、それぞれ近傍の測定点で平均化した結果を示している。これより、土砂沈降水量は全般的にswamp西側の方が東側よりも大きく、また、swamp中央部では北側や南側よりも小さい、という傾向が見られる。この土砂沈降水量の観測結果と上げ潮時と下げ潮時の濁度差（図-5(c)）を比べると、swamp南側における濁度差が大きい地点では、土砂沈降水量も大きくなる傾向が見られる。これより、上げ潮時にswamp奥部に輸送されてきた濁質は、その後沈降するため、下げ潮時には濁度が低下しており、上げ潮時と下げ潮時における濁質環境の違いは土砂沈降過程に起因しているものと推察される。なお、上げ潮時と下げ潮時の濁度差と土砂沈降水量の対応関係は、完全には一致していない。今後、土砂沈降過程を把握するために必要な浮遊土砂の粒径分布や沈降速度、水表面浮遊物の挙動<sup>7)</sup>を検討する必要がある。

### (3) 塩分濃度の平面的な輸送過程の検討

#### a) 計算方法

塩分濃度に関する一潮汐間の非対称性の形成要因を調べるために、氾濫原上での塩分濃度の平面的な輸送過程

を検討する。一般的に、氾濫原内ではcreekに対して直角方向における流れが卓越する<sup>3)~5)</sup>。そこで、creek直角方向のみを考慮した塩分濃度の一次元移流計算を実施し、計算値と観測値を比較することにより、creek-Iに直角方向及び平行方向の塩分輸送の寄与を調べる。まず、ここで用いる基礎方程式系としては、水深平均した一次元の連続式、運動方程式、塩分濃度輸送方程式とし、各々以下に示すとおりである。

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{a C_D}{2} \frac{u|u|}{h+\eta} \quad (2)$$

$$\frac{\partial Dc}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Duc) = 0 \quad (3)$$

ここで、 $t$ は時間、 $x$ はcreek直角方向、 $u$ は $x$ 方向流速、 $\eta$ は水位変動、 $h$ は水深、 $D$ は全水深（ $=\eta+h$ ）、 $c$ は塩分濃度である。また式(2)の右辺第二項はマングローブ植物による植生抵抗項を表しており、植生密度 $a$ と抵抗係数 $C_D$ の値は、二瓶ら<sup>8)</sup>と同一値を与えている。ここでは、creekの一点(Stn.C2)を境界として、この点とStns.S6～S8を結ぶラインをcreek-Iに対する直角方向として計算対象領域とする。境界条件として、creek内のStn.C2における水位及び塩分濃度の観測値を与える。計算期間は、図-3に示す大潮時(9/22午前中)とする。

#### b) 計算結果

図-7は、一潮汐間における氾濫原(Stn.S6, S7)での塩分濃度の観測値と計算結果を示す。これより、両地点ともに、上げ潮時では計算値と観測値がほぼ一致しているものの、下げ潮時では計算値と観測値に大きな差が生じており、観測値が計算値よりも小さくなっている。これらの結果より、上げ潮時では、creek-Iから直角方向への海水流動が顕著であるために、塩分濃度に関する観測値と計算値が一致するのに対して、下げ潮時では、creek-Iから直角方向よりも平行方向の流れが卓越するために、観測値と計算値との間に明確なずれが生じているものと考えられる。また、図-4に示している上げ潮時・下げ潮時の塩分濃度の平均値に関しては、全般的にはswamp南側の方が相対的に低くなっている。このことより、下げ潮時にはswamp南側の低塩分水塊がswamp北側へ向かって輸送されるため、上げ潮時よりも下げ潮時の塩分濃度が低くなると考えられる。

これらの塩分輸送過程に関する知見は、氾濫原中央部(Stn.S6～S8)において、上げ潮時ではcreek-Iと直角方向の流れが、下げ潮時ではcreek-Iと平行方向の流れがそれぞれ顕著になる、という平面流動特性<sup>6)</sup>と符合している。以上のことから、上げ潮時と下げ潮時の塩分環境の違いに対しては、swampにおける平面流動特性が密接に

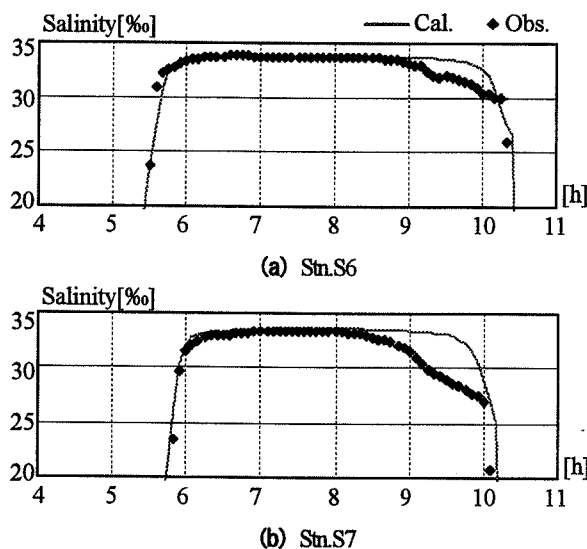


図-7 観測結果と一次元塩分輸送計算結果の比較

関与していることが明らかとなった。

#### 4. 降雨時における河川水挙動

次に、降雨時におけるマングローブ水域内の河川水挙動を検討する。図-8は降雨時(9/21)での氾濫原内(Stns.S1~S3)における塩分濃度と濁度の時系列変化を示す。このときの降雨状況としては、上げ潮時に相当している午前4時から6時にかけて38mmの集中豪雨が生じている。まず、塩分濃度に関しては、上げ潮時には、冠水直後より塩分値が急上昇し、その後ほぼ一定となっており、平常時と比べて大差ない。その後、下げ潮時では、午前9時を過ぎるあたりから3地点ともに急激な塩分低下が発生し、最終的には10‰まで低下している。また、濁度に関しても同様に、上げ潮時では平常時と類似した変化となっているのに対して、下げ潮時には濁度値が平常時よりも大きい60~75ppmまで上昇している。

この観測結果に基づいて、降雨イベントと潮位変化の位相関係が河川水挙動に及ぼす影響について記述する。今回の降雨イベントは、前述したように、上げ潮時に降雨が観測されているものの、塩分低下が見られたのは下げ潮時後期である。これは、上げ潮時には、海水がマングローブ水域を通過して上流河川まで侵入するため、降雨流出水は上流河川内に貯留する。その後、下げ潮時には、降雨流出水は潮汐流とともにcreekを通してマングローブ水域内を拡散している。一方、干潮時に集中豪雨が発生する場合には、降雨流出水は干潮時にcreekへ流入し、上げ潮時にswampへ拡散している、という結果も確認されている。このように、降雨イベントと潮位変化の位相関係により、マングローブ水域における河川水挙動は変化していることが示唆された。なお、これらの結果をより正確に検証するためには、さらなる観測データの蓄積

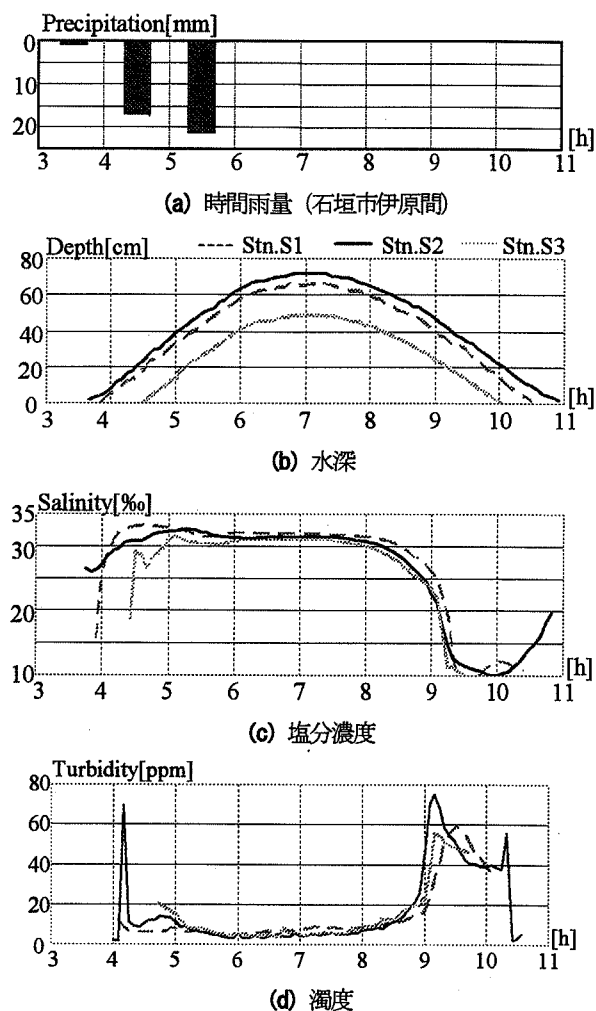


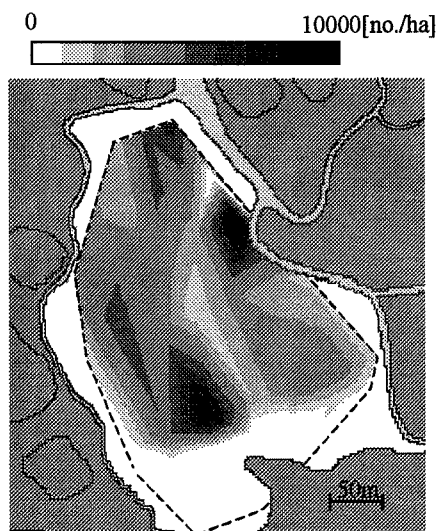
図-8 降雨時における塩分濃度と濁度の時間変化(9/21)

を行う必要があり、今後、多地点・多時点の調査研究を実施する予定である。

#### 5. 植生分布と物理環境の関連性

対象水域における卓越種であるヤエヤマヒルギとオヒルギの植生密度の空間分布を図-9に示す。ここでは、図中点線で囲まれた範囲において行われたコドラート調査結果が表示されている。これを見ると、両樹種ともに一様に分布しておらず、空間的な粗密が見られる。この領域での平均密度は両者とも約2500本/haとなるものの、植生密度の標準偏差は、ヤエヤマヒルギでは約2500本/ha、オヒルギでは約1200本/haであり、ヤエヤマヒルギの植生密度の方が空間的なばらつきが大きい。また、swamp南側では、ヤエヤマヒルギがほとんど繁茂しない領域が存在している。

このような植生分布の立地環境を検討するために、石垣港平均海面を基準面とする地盤高さと植生密度の相関図を図-10に示す。オヒルギの植生密度は地盤高さに関係なく2000~3000本/haであり、ほぼ一定となっている。一方、ヤエヤマヒルギの植生密度は、地盤高さ40cm



(a) ヤエヤマヒルギ



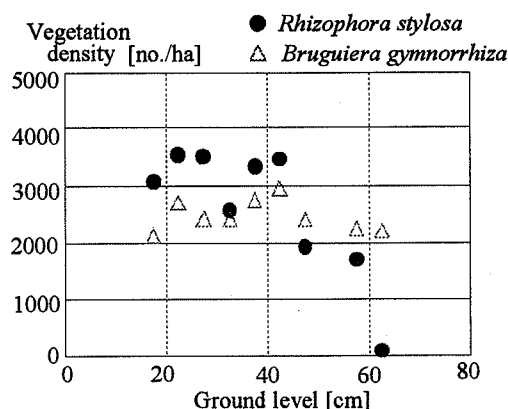
(b) オヒルギ

図—9 氾濫原上における植生密度の空間分布

以下では 3000 本/ha を越える高い密度となっているものの、40cm 以上の地盤高さでは急激に減少し、地盤高さが 60cm を超えると植生密度はほぼ 0 となっている。つまり、上述した swamp 南側でヤエヤマヒルギが存在しない領域は、地盤高さが高い領域に相当している。このように、オヒルギは地盤高さと明確な相関関係はなく分布しているのに対して、ヤエヤマヒルギの植生密度は地盤高さとの相関関係が見られ、樹種により植生分布と地盤高さとの相関関係が異なっている。さらに、氾濫原上の地盤高さは、そこでの海水の浸水頻度・時間や塩分・濁質環境などの物理環境と関連していると考えられるので、ヤエヤマヒルギとオヒルギの植生密度に対して物理環境の与える影響の度合いが異なることが示唆された。

## 6. 結論

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。



図—10 植生密度と地盤高さの関係

(1) 上げ潮時と下げ潮時の塩分・濁質環境が大きく異なる、という一潮汐間の非対称性が氾濫原上の大部分において生じていた。このような非対称性の形成に対して、塩分環境には氾濫原特有の平面流動パターン<sup>6)</sup>が、濁質環境には土砂沈降過程が、それぞれ支配的となる。

(2) 降雨時における氾濫原上の河川水挙動は、降雨イベントと潮汐変化の位相関係により変化する。

(3) マングローブ植物の植生密度と地盤高さ等の物理環境との相関関係は、卓越種であるヤエヤマヒルギとオヒルギとでは大きく異なることが示された。

**謝辞：**本研究における現地観測を実施する際には、東京理科大学理工学部土木工学科西村司教授及び大学院生中村武志氏、元大学院生佐藤慶太氏（現(株)ドーコン）には大変お世話になった。ここに記して謝意を表する。

## 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) 宮城豊彦, 安食和宏, 藤本潔: マングローブ 一なりたち・人びと・みらい, 古今書院, pp.1-56, 2003.
- 3) 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.
- 4) Wolanski, E., Mazda, Y., Furukawa, K., Ridd, P., Kithaka, 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) 松田義弘: マングローブ水域の物理過程と環境形成 —自然の保護と利用の基礎—, 黒船出版, pp.1-196, 1997.
- 6) 二瓶泰雄, 網島康雄: マングローブ氾濫原における水理環境の平面構造, *土木学会論文集*, No.747/II-65, pp.111-124, 2003.
- 7) 二瓶泰雄, 太田和裕介, 中村武志, 今野篤: 吹通川マングローブ水域における水表面浮遊物の水質環境に関する現地観測, *海岸工学論文集*, Vol.51, 2004 (投稿中).
- 8) 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.

(2004. 4. 7受付)