

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

二瓶泰雄*・青木康哲**・綱島康雄***・佐藤慶太****・西村司*****・灘岡和夫*****

マングローブ水域における水理環境特性を検討するために、沖縄県石垣島吹通川マングローブ水域において多数の測器を平面展開した多点連続観測を実施した。その結果、swampにおける平面流動特性としては、従来まで知られていない、水平循環流構造に代表されるいくつかの特徴的な平面流動パターンが生じていることが明らかとなった。この平面流動パターンは、creek平面形状に起因して形成される水位勾配の空間分布と密接に関連していることが示された。さらに、このような平面流動パターンは、creekにおいて上げ潮時よりも下げ潮時の流速値が大きい、という潮流非対称性の場所的变化や、swampにおける塩分濃度輸送過程に対して、多大な影響を及ぼしていることが明らかとなった。

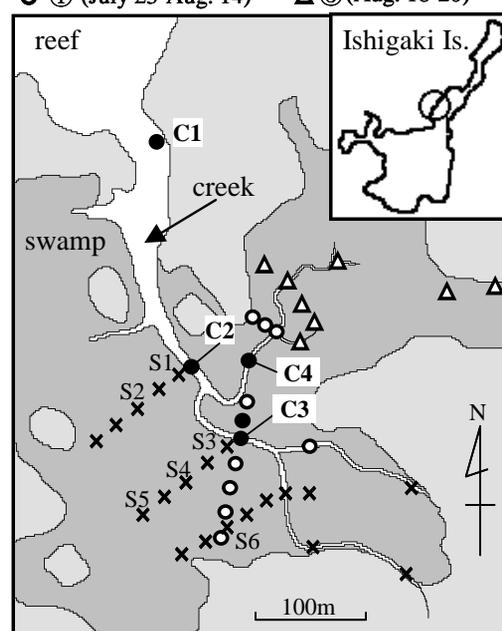
1. 序論

周辺陸域・海域の開発等による様々な人為的環境負荷に直面しているマングローブ林を適切に管理するためには、マングローブ林生態系のベースとなる海水流動特性や温熱環境、物質輸送過程を把握することは重要となる。このうち、マングローブ・エスチュアリーにおける流れや物質輸送に関する既存の研究としては、温帯域におけるエスチュアリー研究と比較するとその数は圧倒的に少なくなるものの、現地観測や数値シミュレーションによりいくつか行われている（例えば、Wolanskiら、1992；松田、1997；Wolanskiら、2001）。

これらの研究により得られたマングローブ水域における特徴的な水理現象としては、マングローブ林の抵抗効果により、①マングローブ林が繁茂する氾濫源（swamp）では流速は小さく、流向は河道部（creek）と直交方向となる、②creekでは上げ潮時よりも下げ潮時の流速が大きいという潮流の非対称性が形成される、ということが知られている。しかしながら、実際のマングローブ水域では複雑な地形特性や植生分布から構成されていることから、上記の水理現象に関する知見が様々なマングローブ水域に対して適用できるかどうかは不明である。

そこで本研究では、マングローブ水域における水理環境特性を検討するために、沖縄県石垣島吹通川において多数の測器を平面展開した多点連続観測を行うことを試みた。ここでは、その観測結果に基づいて、①swampにおける平面流動特性、②creekにおける潮流の非対称性、③流れと物質輸送過程との関係、に着目して検討を行う。

● All (July 23-Aug. 20) × ② (Aug. 14-18)
○ ① (July 23-Aug. 14) ▲ ③ (Aug. 18-20)



図—1 吹通川マングローブ水域と観測点

2. 観測方法

現地観測は典型的な riverine forest type である吹通川マングローブ水域（図—1）で行われた。このマングローブ水域は、creekの面積よりもswampの面積の方が圧倒的に大きく、またswamp底面は高潮時に浸水・氾濫し、低潮時に干出する。このマングローブ水域の外海側では、低潮時に干出する浅瀬（sill）が存在するため、低潮時にはマングローブ水域とリーフ海域との接続が分断されてしまい、干潮時における水位変動が大きく歪んだ形となる（松田、1997；二瓶ら、2001）。

本観測では、様々なメモリ式測器をcreek、swamp、上流河川域に、2001年7月23日から8月20日の約1ヵ月間にわたり設置した。観測地点は、期間①（7/23 - 8/14）、期間②（8/14 - 18）、期間③（8/18 - 20）と3期間に分けて異なる配置となっており、詳細は図—1に示すとおりである。なお、これらの3つの期間全てにおいて測器が設置されている観測地点もcreekに4地点、swampに1

*	正会員	博（工）	東京理科大学講師	理工学部土木工学科
**		修（工）	五洋建設	
***		学（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
****	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
*****	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

地点ある。観測項目としては流速、水位、水温、塩分濃度、濁度、Chl.a 濃度、pH、DO 等である。ここで用いるメモリ式測器の測定間隔は5分もしくは10分としている。

本論文でデータ解析を行う期間①と②における測定点と測定項目を述べる。期間①では、creek6 点、swamp8 点の観測点とする。creek では、全地点において表層・底層塩分濃度と鉛直方向に密に水温を計測し、4 地点 (Stn.C1~C4) において表層・底層流速及び水位を測定している。swamp では、水温・塩分濃度を全地点、流速・水位を4 地点のみにて計測し、測器は底面付近に設置されている。期間②に関しては、マングローブ水域南西側を中心として、creek9 点、swamp17 点としている。creek では水温・塩分を全地点、表層流速・水位を4 地点にて測定している。swamp では水温を全地点、塩分濃度を11 地点、流速・水位を7 地点において計測している。

3. 観測結果と考察

(1) swamp における平面流動パターン

a) 流速ベクトルの時系列変化の特徴

期間②における観測結果に基づいて、swampでの流れの時空間変動特性を検討する。図-2は、swamp内6地点 (Stn.S1~S6) における流速ベクトル及水深 (Stn.S3) の時系列変化を表している。swamp底面は低潮時には干出するため、その時にはそこでの流速ベクトルは図示されていない。これを見ると、水位変動に伴って各地点における流向や流速レベルが変化しており、それらは場所毎に大きく異なる。例えば、creek (Stn.C3) から約20, 80, 140mに位置するStn.S3, S4, S5の結果に着目すると、潮流の卓越流向は、必ずしもcreekに対して直角方向とはならず、その様子は各地点間で大きな差がある。特に、最もswamp奥部に位置するStn.S5では、潮汐に伴う往復流というよりも、一方向的な流れが顕著となっていることが分かる。流速の絶対値に関しては、全体的にはcreekからの距離と共に流速レベルは減少するものの、潮汐によっては明確な差が見られない。また、Stn.S1とS3の結果を比較すると、creekからの距離が同じ程度 (20m) にも関わらず、流速レベルはStn.S1の方がStn.S3よりも明らかに大きくなっていることが分かる。

既存の研究におけるswampの流況については、creekと直交方向を卓越流向とし、流速レベルはcreekからの距離と共に減少する (金澤・松田, 1994)。しかしながら、それらの結果はcreek形状が直線である場合を想定しているので、ここでのマングローブ水域のように大きく蛇行・分岐をしているcreek平面形状が存在する場合には、これらの知見はそのまま適用できないものと考えられる。

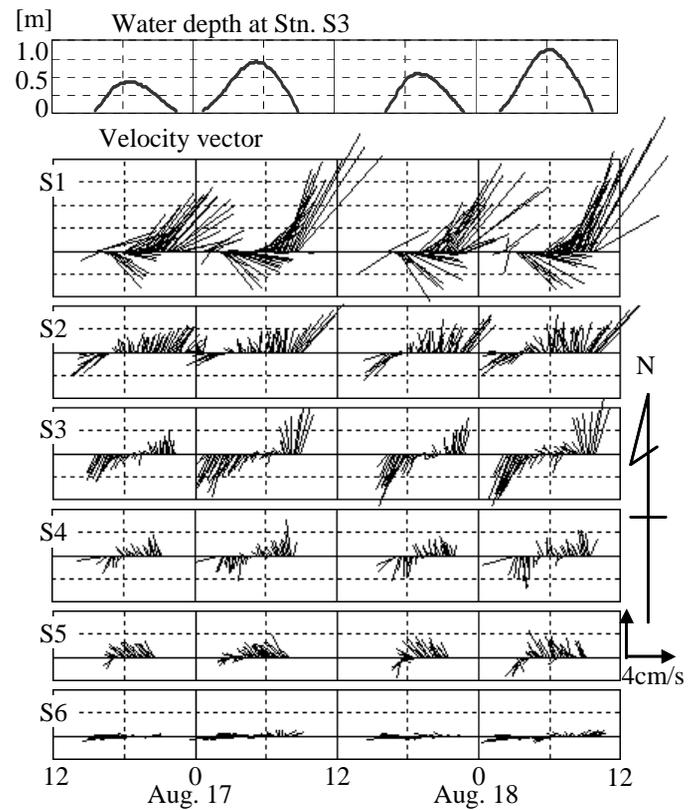


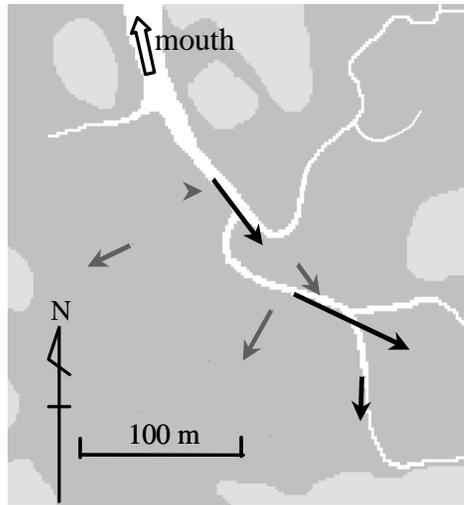
図-2 swamp における流速ベクトルの時系列変化 (期間②)

b) 流速ベクトルの空間パターン

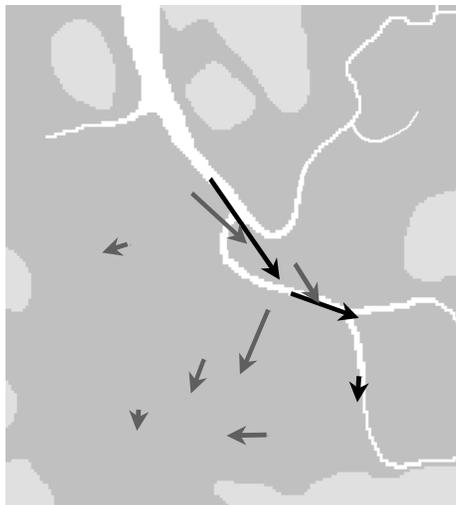
次に、swamp内における平面流動パターンを明らかにするために、各地点における流速ベクトルを地図上にプロットした結果を図-3に示す。ここでは、一潮汐間 (期間②, 8月17日午前) の6つの時刻を対象として、creek3 地点、swamp7 地点における流速データを示している。また、速度ベクトルを見やすくするために、creek とswampの流速ベクトルの基準を変えて表示している。これを見ると、まず冠水直後 (同図 (a), 8月17日 1:30am) には、creekでは河道沿いに上流向きの流れが卓越し、swampではcreekから直角方向となる南西向きの流れが主として顕著となる。その後の上げ潮時 (同図 (b), 2:30am) においてもswampではcreekと直角なswamp奥部へ向かう流れが卓越している。満潮時 (同図 (c), 5:20am) では、creek内では流れは止まっているのに対して、swamp内では時計回りの水平循環流が生じている。この水平循環流構造は、満潮を挟んで2時間以上継続している (同図 (d), 6:30am)。その後、下げ潮時 (同図 (e), 7:40am) には、swampにおいて全体的に河口向きとなる流れが顕著となり、さらに時間が経つと (同図 (f), 8:40am), swampではcreekへ向かう流れが卓越し、それと連動してcreek内での流速値が極めて大きくなる。このように、swamp内ではcreekと直角方向のみならず、平行方向にも流れが生じており、特徴的な平面流動構造が生じていることが明らかとなった。

潮汐残差流に関する平面特性を把握するために、2潮汐を含む1日 (8月16日12時~17日12時) にわたり時

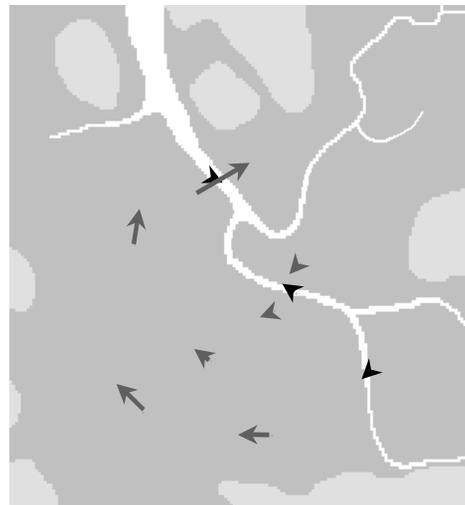
creek : 25cm/s →
swamp : 5cm/s →



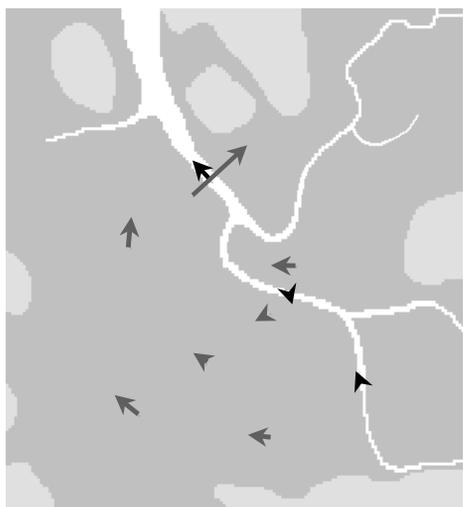
(a) 冠水直後 (1:30am)



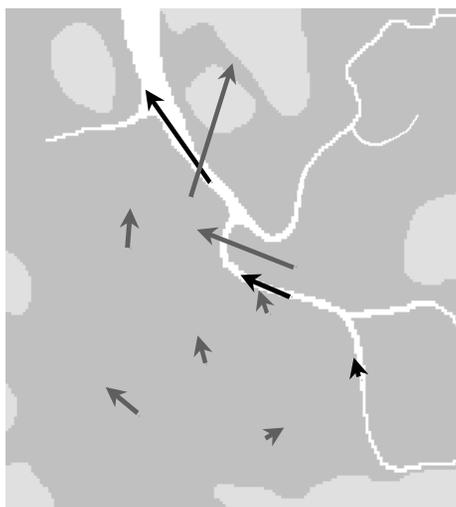
(b) 上げ潮時 (2:30am)



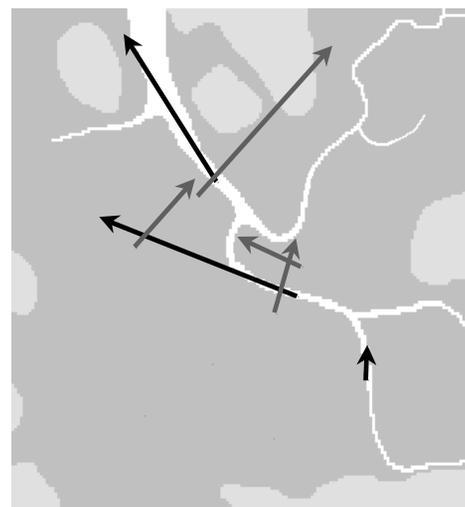
(c) 満潮時 (5:20am)



(d) 満潮直後 (6:30am)

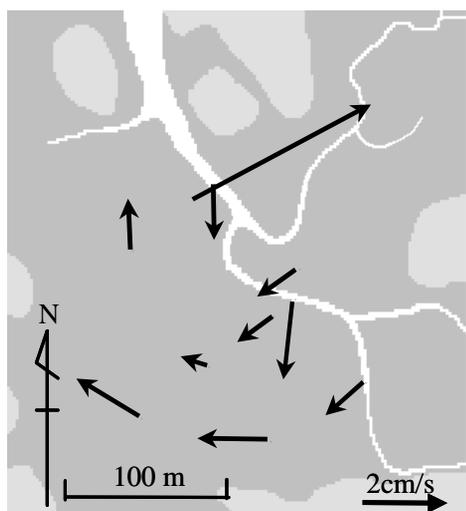


(e) 下げ潮時 (7:40am)



(f) 干出直前 (8:40am)

図—3 swampにおける平面流動パターン (期間②, 8/17)



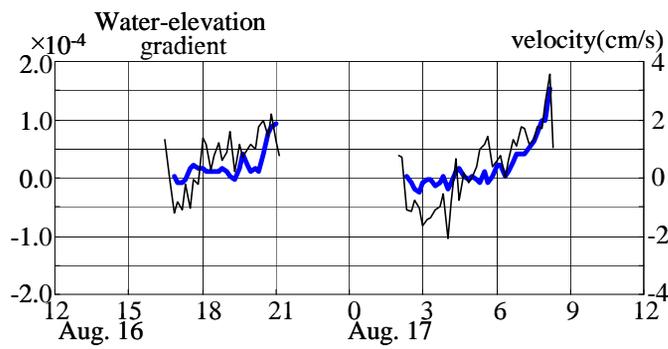
図—4 潮汐残差流の平面構造 (期間②)

間平均された潮汐残差流パターンを図—4に示す。これを見ても明らかなように、満潮時付近において見られたswamp全域に及ぶ明確な水平循環流構造が残差流においても現れていることが分かる。また、この残差流の大きさとしては、概ね2cm/s程度であり、最大で4cm/sまで達している。吹通川マングローブ水域の水平スケールを

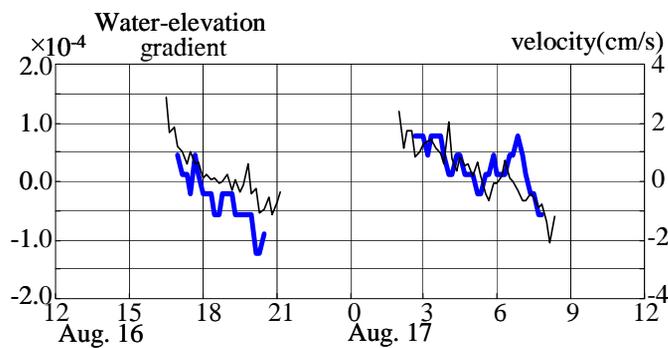
考えると、このような小さい残差流によっても物質輸送特性に対して十分大きな影響を与えるものと考えられる。

c) 流速と水位勾配の関係

このように、swampではcreekと直角な方向のみならず、平行方向にも有意な大きさの流れが生じており、水平循環流構造などの特徴的な平面流動パターンが形成されていたが、どのような要因によりこのような流れが形成されるのであろうか？swamp内における流れの支配要因としては、主として水位勾配とマングローブ植物による抵抗が考えられる(例えば、松田, 1997)。そこでswampにおける水位勾配と流速の関係を検討するために、Stn.S4におけるそれらの時間変化を図—5に示す。ここで、流速をcreek(Stn.C3付近)に対する平行・直角成分に分離するために、Stn.S2とS6を結んだ線を平行方向、Stn.S3とS5を結んだ線を直角方向として、Stn.S4の流速値よりそれぞれ求めた。各方向の正の値は、各々、平行成分についてはStn.S2へ、直角成分についてはStn.S5へ向かう方向とする。また、図中の水位勾配に関しては、



(a) creek 平行方向
(Stn.S2~S6, 正: Stn.S2 へ向かう方向)



(b) creek 直角方向
(Stn.S3~S5, 正: Stn.S5 へ向かう方向)

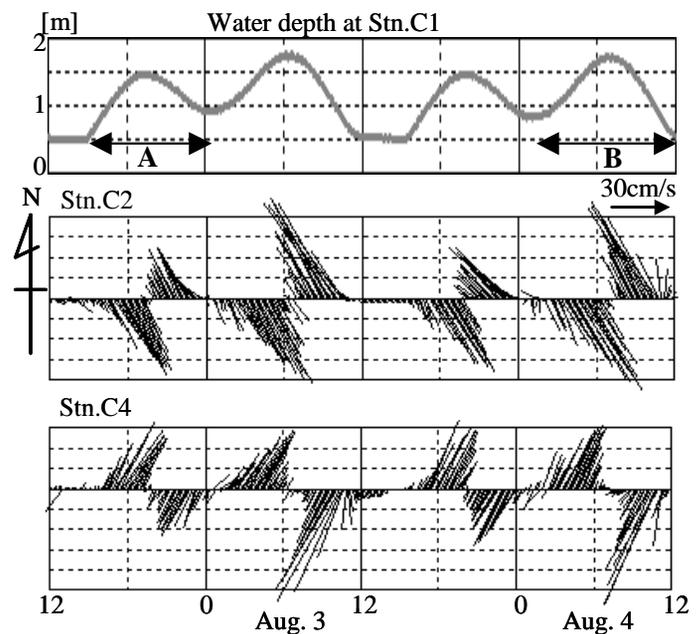
図—5 swamp (Stn.S4) における水位勾配 (太線) と流速 (細線) の比較

Stn.S4 周辺の観測点における水位値を用いて算出し、水位勾配の正負は流速の向きと一致させている。

この図を見ると、creek 平行・直角方向流速成分は、各方向の水位勾配と概ね対応して時間変動していることが分かる。また、creek 直角方向と平行方向の水位勾配値は概ね同程度の大きさとなっている。このように、swamp 内における水位勾配値は creek 直角方向のみならず、平行方向にも有意な大きさを有しているため、swamp 内において特徴的な平面流動パターンが形成されたものと考えられる。このような平面流動パターンは直線的な creek では見られないことから (例えば、金澤・松田, 1994)、流れの駆動力となる水位勾配の形成要因としては、大きな蛇行や分岐をしている creek 平面形状に起因するものと推察される。しかしながら、creek 形状以外にも、マングローブ林の抵抗や地盤高さによる影響も重要であるので、今後別途行っているマングローブ水域における流動計算 (二瓶ら, 2002) と共に検討する予定である。

(2) creek における潮流非対称性

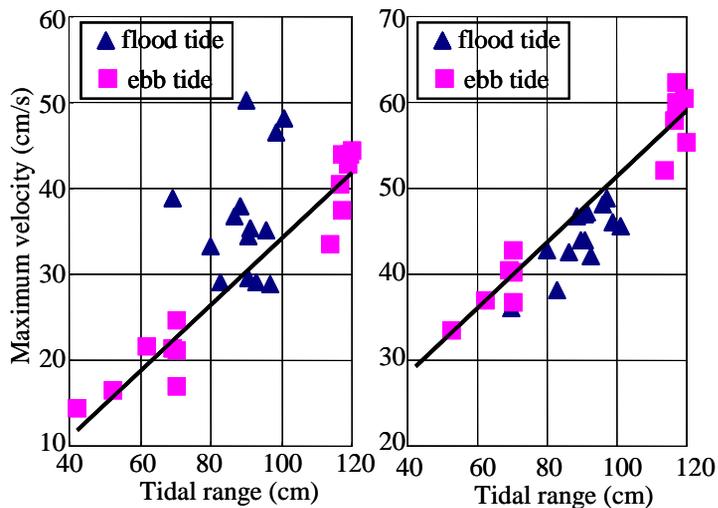
creek における潮流の非対称性を検討するために、期間①における Stn.C2 と C4 における表層流速の時系列変化の一例を図—6 に示す。図中のデータは大潮時における結果であり、Stn.C1 における水深変化も合わせて示している。これを見ると、このマングローブ水域では、干潮時を除いて明確な水温・塩分濃度の鉛直成層が形成され



図—6 creek 表層における流速変動特性 (期間①)

ないため、両地点ともに潮位変動に伴って上げ潮時には上流向き、下げ潮時には河口向きの流れとなっている。潮流の非対称性を見るために、上げ潮時と下げ潮時における流速最大値を比較すると、Stn.C2 においては、同図中矢印 A の期間では、上げ潮時の方が下げ潮時よりも大きくなるのに対して、矢印 B の期間では、その大小関係が逆になることが分かる。これは、矢印 A の時には、上げ潮時の潮位差の方が下げ潮時の値よりも大きく、矢印 B の時にはその逆となっていることと関連しているものと考えられる。同様の傾向は、Stn.C4 についても確認できる。

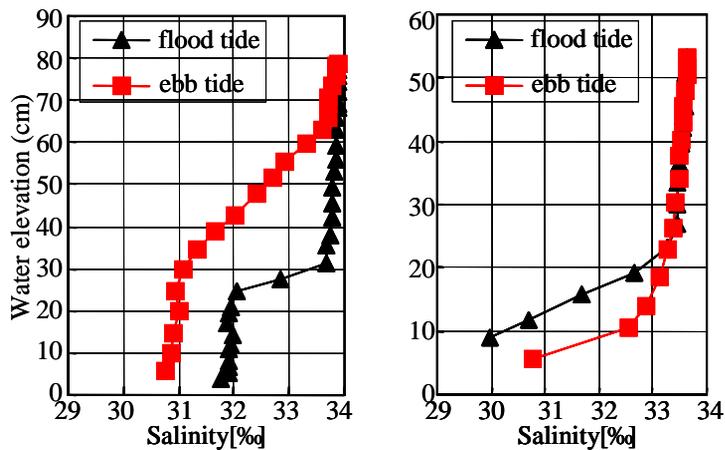
このように、creek における潮流の流速値は、潮位差の影響を大きく受けることから、この影響を考慮した形で上げ潮時と下げ潮時の流速最大値を比較する必要がある。そこで、上げ潮時・下げ潮時における流速最大値とそれと対応する潮位差を図—7 に示す。この図には、期間①のうち 8 月 1 日~7 日における 14 潮汐に関する結果が示されている。図中の直線は、下げ潮時における流速最大値と潮位差に対する近似直線に相当している。これを見ると、潮位差が大きくなると、上げ潮時・下げ潮時ともに、流速最大値は概ね増加している。潮流非対称性を調べるために、上げ潮時と下げ潮時の結果を比べる際には、同じ潮位差での観測値がほとんど存在しないため、上げ潮時の観測値と下げ潮時データに対する近似直線とを比較する。これを見ると、Stn.C2 においては、上げ潮時の値は下げ潮時データに対する近似直線を概ね上回っているのに対して、Stn.C4 においてはその逆の傾向が現れている。これより、同じ潮位差に対して、Stn.C4 では下げ潮時の最大流速値が上げ潮時の値よりも大きくなる、という従来からよく知られている結果と一致するのに対して、Stn.C2 ではその逆に上げ潮時の方が下げ潮時よりも



(a) Stn.C2

(b) Stn.C4

図—7 creekにおける潮位差と流速最大値の関係
(太線：下げ潮時データに対する近似直線)



(a) Stn.S2

(b) Stn.S6

図—8 塩分濃度と水位変動の関係

大きくなる傾向にあることが明らかとなった。

このような creek における潮流非対称性は、上げ潮時と下げ潮時における creek と swamp 間を出入りする海水量に大きく依存する (金澤・松田, 1994)。上述したように、swamp では残差流として明確な水平循環流構造が生じるため、creek では場所的に swamp への流入もしくは流出が顕著となる場所が存在しているものと推察される。これらの結果として、creek における潮流非対称性が場所的に大きく変化したものと考えられる。

(3) 流れと塩分輸送過程の関係

上述した swamp における特徴的な流れと物質輸送過程との関係を調べるために、creek から同じ距離に位置する Stn.S2 と S6 における塩分濃度変動を図—8 に示す。図中には、期間②の 8 月 17 日午前における水位変動と塩分濃度に関する関係を示している。これを見ると、両地点ともに、水位上昇とともに塩分値が増加し、海水が swamp へ侵入している様子が見える。しかしながら、上げ潮時と下げ潮時における塩分値は変化しており、Stn.S2 では下げ潮時よりも上げ潮時の塩分値が大きくなるのに対して、Stn.S6 ではその大小関係は逆となる。こ

のような上げ潮時と下げ潮時における塩分濃度が大きく異なるということは、swamp 内において物質混合過程が顕著に生じていることを示唆している。また、このような swamp 内における物質混合過程の要因としては、3.1 で記述した swamp 内における水平循環流構造と密接に関連しているものと推察される。

4. 結論

マングローブ水域における流れや物質輸送過程を把握するために、沖縄県石垣島吹通川マングローブ水域における平面水理環境観測を実施した。その結果、まず、swamp 内では、従来まで知られていない、水平循環流構造などの特徴的な平面流動構造が生じていた。このような平面流動パターンは、creek 平面形状に起因する水位勾配の平面分布と密接に関連していることが示された。また、creek における潮流非対称性について検討するために、潮位差の影響を考慮して上げ潮時と下げ潮時における流速最大値の大小関係を比較した。その結果、creek における潮流非対称性は、creek 内の場所毎に大きく異なること、これらの違いに対して swamp 内における平面流動構造の影響が現れていることが示唆された。

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

- 金澤延幸・松田義弘 (1994)：マングローブ河口における潮汐流の非対称性，海の研究，Vol.3, No.1, pp.1-11.
- 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・佐藤慶太・青木康哲・西村司・灘岡和夫 (2002)：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 (投稿中)。
- 松田義弘 (1997)：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盤 —，黒船出版，pp.1-103.
- Wolanski, E., Y. Mazda and P. Ridd (1992): Mangrove hydrodynamics in Tropical mangrove ecosystems (eds. Robertson, A. I. and D. M. Alongi), *American Geophysical Union*, pp.43-62.
- Wolanski, E. Y. Mazda, K. Furukawa, P. Ridd, J. Kitheka, S. Spagnol and T. Stieglitz (2001): Water circulation in mangroves, and its implications for biodiversity (ed. Wolanski, E.), *CRC Press*, pp.53-75.