

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

二瓶泰雄*

矢井秀明*****

・ 灘岡和夫**

・ 大見謝辰男*****

・ 青木康哲***

・ 古川恵太*****

・ 若木研水****

・ 佐藤慶太*****

1. はじめに

熱帯・亜熱帯域における沿岸域・汽水域に位置するマングローブ域では、特有な動物相・植物相から構成される豊かな生態系が形成されており、マングローブ林が林内や隣接する沿岸海域における生態系の根幹をなしていることが知られている（例えば、小滝，1997）。しかしながら、近年では、マングローブ域に隣接する陸域・海域における開発行為に伴う人為的な環境負荷等のために、マングローブ林が減少・消滅しつつあり、それらの結果として、マングローブ域の生態系の崩壊や周辺海域の水産資源の低下といった深刻な環境問題が発生している。これらの問題に対して適切に対処するためには、マングローブ林の生態環境に多大な影響を及ぼす水環境特性の実態を把握することが不可欠である。

マングローブ域に関する研究は、主として地理学的または林学的分野を中心に行われてきており、マングローブ域での水理現象や水環境特性に関する現地観測や数値解析はいくつか行われているものの（例えば、Wolanskiら，1992；中辻ら，1994；浅野・瀬戸口，1995；Furukawaら，1997），他の沿岸海域や汽水域と比べると、それらに関する知見は極めて乏しいと言わざるを得ない。その主な理由の一つとしては、マングローブ群落の水理学的抵抗や複雑な地形特性等に起因して、そこでの河川水や海水の流動構造やそれに伴う熱・塩分・濁質・栄養塩等の物質輸送過程が極めて複雑になっているためである。

そこで本研究では、従来まで十分に明らかとなってい

ないマングローブ域における水理現象や水環境特性の実態を把握するために、沖縄県石垣島吹通川マングローブ域を対象とした現地観測を行うことを試みた。ここでは、マングローブ域内の河道部（creek）と氾濫原（swamp）における流動特性や温熱・水質環境特性を明らかにするために、多点係留ブイ観測とSTD・採水観測を実施したので、以下にそれらの結果を示す。

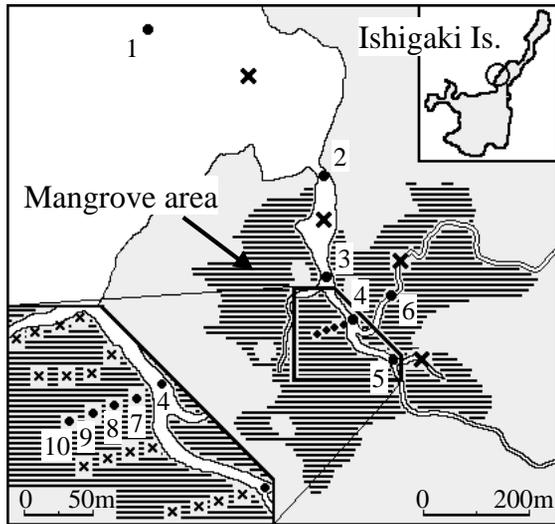
2. 観測概要

現地観測は、**図—1**に示されている石垣島北西部に位置する吹通川マングローブ水域において、2000年9月30日から10月2日にかけて約2日間実施した。吹通川マングローブ域は、面積が約18haと小規模であること、また、河道部（creek）よりも氾濫原（swamp）の面積が大きく、その面積比が約10倍である、という特徴を有している。本研究では、このような吹通川マングローブ域を対象として、係留ブイ観測とSTD・採水観測を上記した期間内に同時に実施した。

係留ブイ観測におけるブイ設置点は、**図—1**に示されているとおり、サンゴ礁海域（reef）に1点（Stn.1）、creekに5点（Stn.2～6）、swampに4点（Stn.7～10）、の計10点とした。観測点の平均水深としては、reefでは約2m、creekでは0.7～0.9mとなっている。そこでの測定項目としては、ほぼ全ての観測点において、水温、塩分濃度、水位、濁度とし、流速に関してはreef（Stn.1）、creekの一部（Stn.2，4）、swampの一部（Stn.7）のみ計測することとした。各観測点においては、メモリー式測定器を設置して、10分もしくは20分間隔で各項目を連続計測することとした。また、swamp内における温熱環境や流動パターンを広範囲にわたって把握するために、**図—1**中の拡大図に示されているように、creekから15～60m程度の範囲内におけるswamp内の計16点において、小型水温計を別途設置した。

濁質の動態やその収支を詳細に把握するために、底面における土砂巻上げ量と沈降量をも計測することとした。

*	正会員	博（工）	東京理科大学講師	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
***		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	学（工）	東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻	
*****		学（工）	（株）青木建設	
*****			沖縄県衛生環境研究所赤土研究室	
*****	正会員	工修	国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部海洋環境研究室室長	
*****	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課程	



図—1 吹通川マングローブ水域と観測点配置図

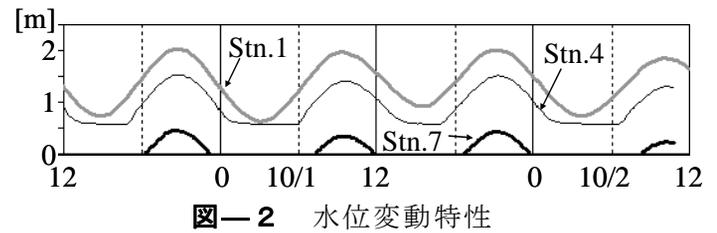
このうち、土砂沈降量計測のために、沈降土砂を貯留するための簡易的なセディメントトラップを、上述した Stn.1~10 と swamp 内の 16 箇所に小型水温計とともに設置した。一方、土砂巻上げ量計測に関しては、3次元超音波流速計 ADV を creek 底層 (Stn.4 の右岸側) に設置して行った。この ADV は、3次元流速とともに、超音波の後方散乱強度をも同時に計測している。この後方散乱強度は、水中に浮遊する土砂により影響されるので、後方散乱強度データを用いて濁度値を得ることが可能となる (川西ら, 1996)。そこで、この散乱強度から変換された濁度値と、鉛直方向流速成分を用いることにより、底面からの土砂巻上げ flux を直接的に計測し得ることになる。なお、超音波の後方散乱強度から濁度値を得るために、別途キャリブレーション実験を行っている。

時空間的に詳細な水質変動特性を把握するために、STD・採水観測を行うこととした。ここでの計測点としては、係留ブイ観測点のうち reef と creek の Stn.1~6 と、それら点の間に位置する図—1 中×印 (4 地点)、の計 10 点とした。また、採水したサンプル水を分析し、全窒素や全リン、SS を計測した。

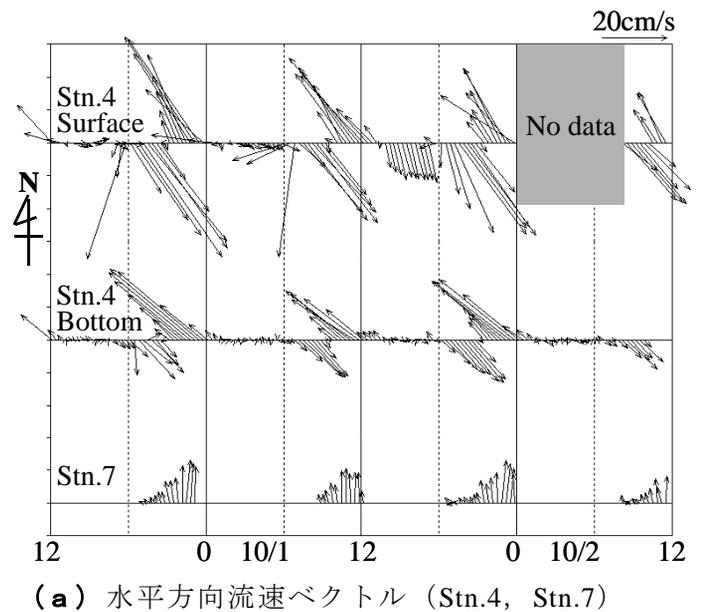
3. 観測結果と考察

(1) 水位変動特性

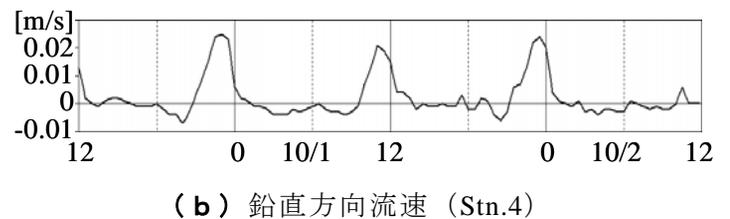
図—2 は、reef (Stn.1), creek (Stn.4), swamp (Stn.7) における水位変動の時系列変化を示している。これを見ると、reef での水位は振幅 75cm 程度の滑らかな変動となっているが、creek における変動パターンは reef の場合とは異なって大きく歪んでおり、干潮時にある一定水位より低下していないことが分かる。このような creek における歪んだ水位変動は他の creek の地点においても見られることから、干潮時にはマングローブ域とサンゴ礁海域との接続が分断され、その結果として、creek ではある一定水位より低下しないものと考えられる。次に、



図—2 水位変動特性



(a) 水平方向流速ベクトル (Stn.4, Stn.7)



(b) 鉛直方向流速 (Stn.4)

図—3 creek と swamp における流速変動特性

swamp における水位変動特性は、干潮時には水位値は 0 であり swamp 底面は完全に干出し、満潮時を挟んで数時間のみ冠水していることが分かる。また、満潮となる時刻は、reef や creek, swamp ともに概ね一致している。

(2) 流速変動特性

a) 生データ

次に、creek と swamp における水平方向流速の変動特性を調べるために、Stn.4 (creek) における表層・底層及び Stn.7 (swamp) における底層の流速ベクトルの時系列変化を図—3 (a) に示す。まず、creek に位置する Stn.4 における水平流速変動に着目すると、水位の時間変化が大きい上げ潮時や下げ潮時には、それぞれ上流向き、下流向きの流れが観測されており、満潮時や干潮時にはほぼ流速が 0 となっている。上げ潮時・下げ潮時の流速ベクトルの大きさを比べると、底層に関しては、下げ潮時の流速値が上げ潮時よりも大きくなる、というよく知られる潮汐流の非対称性 (金澤・松田, 1994) が生じている。一方、表層においては、上げ潮・下げ潮時とも概ね同程度の流速が生じており、上げ潮時と下げ潮時において明確な流速鉛直構造の違いが存在している。図—3 (b) は、Stn.4 の底層における鉛直方向流速の時系列

変化を表している。これを見ると明らかなように、上げ潮時では鉛直流速がほぼ0であるのに対して、下げ潮時では上昇流が卓越していることが分かる。このような上昇流の形成により、下げ潮時では流速の鉛直分布がほぼ一様になったものと考えられる。

また、Stn.7 (swamp) における流速変動を見てみると、上げ潮時には2cm/s程度の流速レベルであり、主流向は西北西方向となっており、creek に対して概ね垂直にswamp 奥部へ向かう弱い流れが形成されていることが分かる。一方、下げ潮時では、上げ潮時と比べて流速値が大きくなり最大で10cm/s程度まで達しており、そこでの流向はcreek に対して垂直方向よりも平行方向の成分が顕著になっている。このようなことから、Stn.7 における流速変動特性は、上げ潮時と下げ潮時とで大きく異なっていることが明らかとなった。

b) creekの蛇行形状の影響

このようなcreek やswamp における上げ潮時と下げ潮時における流動特性の違いを検討するために、creek 周辺における平面的な流動パターンとcreek の平面形状との関連性について検討する。図-4はStn.4と7における水平流速データを地図上にプロットしたものを示している。これを見ると、まず、上げ潮最大時(9/30 19:10)には、creek では表層、底層ともにcreek に沿う流向になっており、swamp ではswamp 奥部へ向かう弱い流速が生じている。それに対して下げ潮最大時(同日 22:10)には、creek における表層と底層の流向は異なっており、底層ではcreek とほぼ平行に、表層ではcreek を横切ってやや北向きの流れが形成されている。さらに、同時刻におけるswamp では、creek の表層における流向と類似して北向きの流れとなっていることが分かる。ここで、Stn.4 周辺のcreek の蛇行形状に着目すると、Stn.4 より下流側では概ね直線的になっているが、上流側では2つのcreek が合流していること、また、これらのcreek の形状が大きく蛇行していることが分かる。

このように、下げ潮時では、creek 内での底層と表層の流向が大きく異なること、また、Stn.4 より上流側のcreek が大きく蛇行していることを考慮すると、下げ潮時におけるStn.4 周辺での流れ場が、creek が低水路、swamp が高水敷となる一種の複断面蛇行流れ(武藤ら, 1996; 福岡ら, 1997)と類似した流動パターンとなっていることが分かる。さらに、このような複断面蛇行流れに伴って強い2次流が形成されることから(福岡ら, 1997)、図-3(b)に示した下げ潮時における卓越した鉛直上昇流が生成されたものと考えられる。また、Stn.4 における横断面図を見てみると(図-5)、左岸側が相対的に深く、ADV が設置された右岸側が浅くなっていることから、複断面蛇行流れにより形成される強い2

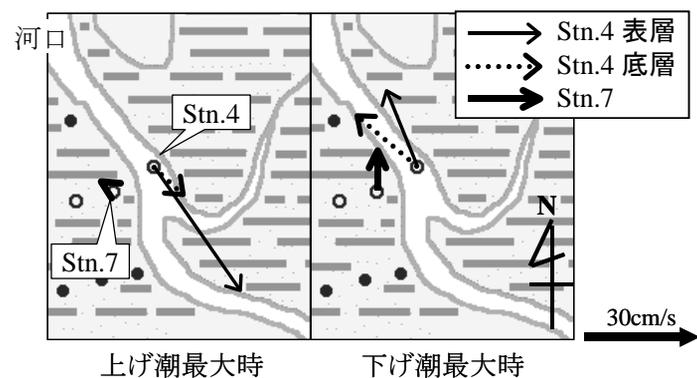


図-4 creek 及びその周辺域での平面流動パターン

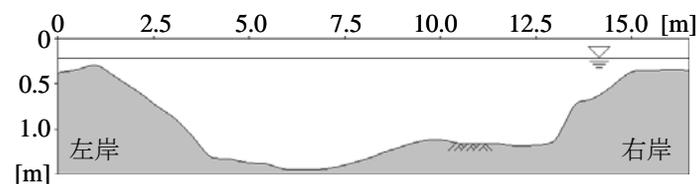


図-5 creek (Stn.4) の横断面図

次流がcreek 内の地形特性と密接に関与しているものと推察される。以上のことから、creek 周辺では、複断面蛇行流れと類似した流動パターンが形成されており、それに伴ってcreek 内やその近傍のswamp での流動特性や地形特性が大きく変化していることが示唆された。

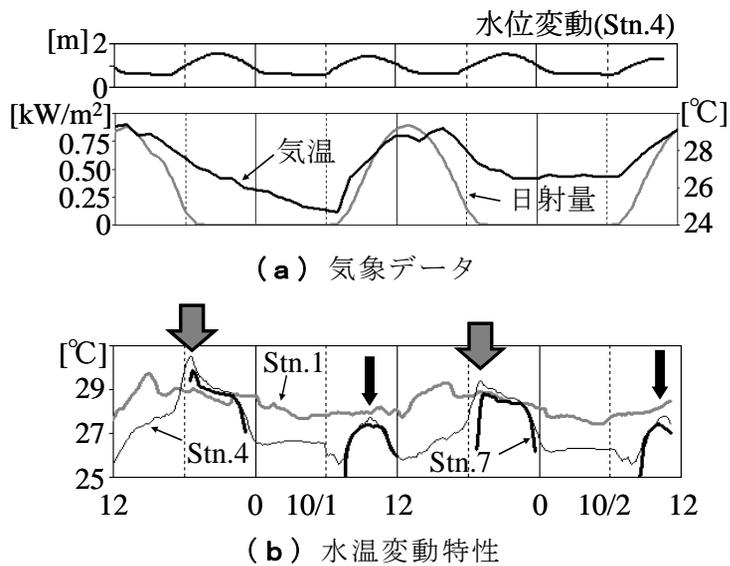
(3) 水温環境

a) reef, creek, swampにおける水温変動の特徴

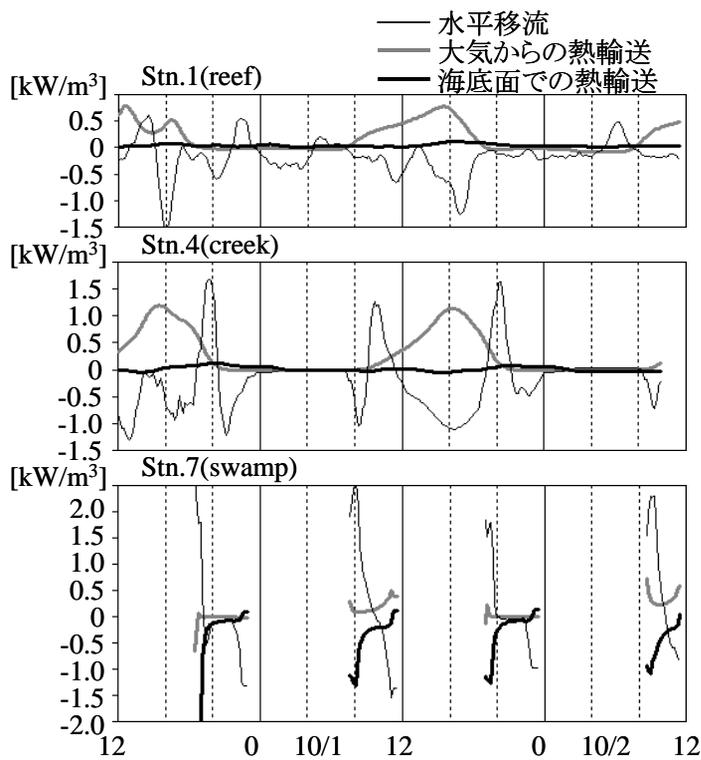
マングローブ水域における温熱環境特性を把握するために、reef (Stn.1) とcreek (Stn.4), swamp (Stn.7) における水温の時系列データを図-6に示す。同図には、石垣島地方気象台で計測された日射量と気温も合わせて示している。これを見ると、reef では相対的に概ね高温であり、日射や気温、潮汐の影響により、日中における干潮時に水温が最大となり、その後上げ潮時には外洋水の侵入に伴い水温が急激に低下していることが分かる。

それに対してcreek では、潮位変動に伴って水温上昇、低下を繰り返しており、潮汐によりサンゴ礁海域における高水温塊がマングローブ水域を出入りしている様子がうかがえる。creek における水温値をreef での値と比べてみると、夕方の上げ潮時では、creek 内の水温はreef での値よりも大きくなるが(同図中太矢印)、早朝の上げ潮時では反対にreef の水温値の方が相対的に大きくなっている(同図中細矢印)。これは、3.1で述べたように、マングローブ域とサンゴ礁海域(Stn.1)の間には、干潮時に両者を分断する浅瀬域が存在しており、その浅瀬における水塊が直接的にマングローブ水域に流入するため、上述した上げ潮時におけるcreek とreef の水温差が生じたものと考えられる。

swamp における水温変動特性としては、creek と同様に上げ潮時に水温上昇、下げ潮時に低下している。また、swamp 内に多点にわたり設置した水温観測データを見



図—6 reef, creek, swamp における温熱環境特性



図—7 熱収支解析結果

ると, creek からの距離とともに水温は低下している傾向となっており, 満潮時には約 $0.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の水温勾配が形成されていた. このようにマングローブ域に侵入した海水は, swamp 内で冷却され, 下げ潮時に creek や周辺海域の水温を低下させているものと考えられる.

b) 熱収支解析

上述した creek や swamp における水温変動の要因を定量的に把握するために, 熱収支解析を行うことを試みた. ここでの熱収支解析としては, 単位体積を有する水柱を想定して, 水柱内における温度増減効果を表す貯熱変化量が, 海表面と海底面での熱フラックスと水平移流・拡散熱フラックス, 水中での短波吸収量の和と等しくなるとする. これらの領域では水深が極めて浅いことから, ここでは海底面での日射の反射や地中伝導熱を考慮した熱収支解析を行っており, その詳細は二瓶ら (2001) を参照されたい. なお, swamp での熱収支解

析には, マングローブ林による日射遮蔽や植生からの大気放射の効果 (近藤, 1994) を考慮しており, 放射に対する植生層全体の透過率は Clough (1992) を参考にして 0.10 とした. また, ここでは, 水表面でのアルベドを 0.06, 底面でのアルベドに関しては, reef では 0.25, creek と swamp では 0.14 としている.

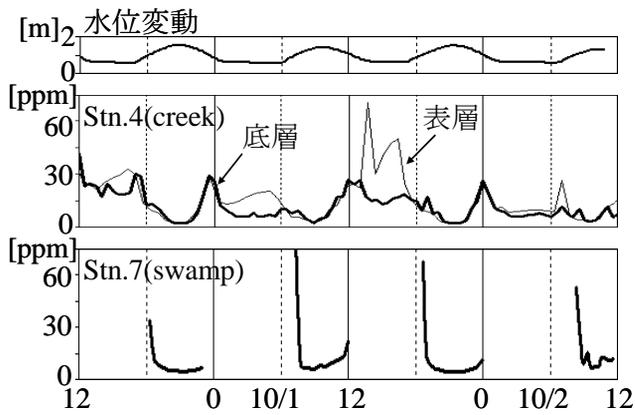
図—7 はここで得られた熱収支解析結果を示す. 図中に記載されている大気からの熱輸送とは, 海表面での水中伝導熱 G と水中・地中における短波吸収量 S_{abs} の和を表しており, 海底面上での熱輸送とは地中伝導熱 G_{soil} に相当している. これを見ると, reef に関しては大気からの熱輸送と水平移流熱フラックスが大きな影響を及ぼしている. creek (Stn.4) に関して見てみると, 熱源である reef と冷源である swamp との間における潮汐に伴う海水交換により, 大気からの熱輸送とともに水平移流熱フラックスが大きく変動していることが分かる. また, swamp (Stn.7) について着目すると, 潮位変動と連動して水平移流熱フラックスが大きく変動しており, 潮汐に伴って reef との大きな熱交換が生じていることが分かる. さらに, 海底面での熱輸送が特に冠水直後に顕著な負の値を取っていることが分かる. このことから, 満潮時に浸水した swamp 上の海水は地表面との熱交換により冷却され, 下げ潮時に creek や reef における水温を低下させていることが分かる.

(4) 濁質環境

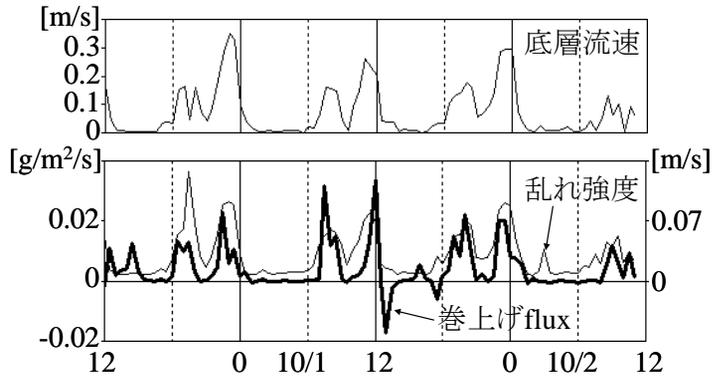
a) creek と swamp における濁度変動特性

creek や swamp における濁質環境を検討するために, creek (Stn.4) の表層と底層, swamp (Stn.7) の底層における濁度の時系列データを 図—8 に示す. まず creek における濁度変動パターンに着目すると, 底層では流速が大きくなる上・下げ潮時に濁度値が大きくなること, また, 下げ潮時でのピーク値の方が上げ潮時の値より大きくなる傾向があることが分かる. 一方, 表層では, 底層の場合と同様に上げ潮・下げ潮時に濁度値は変動するものの, 濁度の極大値は干潮時に現れており, 干潮時には濁質環境が表層と底層で大きく異なっていることが分かる. このような干潮時における鉛直成層構造は, 水温データからも確認されており, 流れの弱い干潮時には明確な水温や濁度などの成層構造が形成されているものと考えられる.

また, 同図 (b) に示されている swamp (Stn.7) での濁度変動特性に着目すると, 冠水直後に濁度のピーク値が現れていることが分かる. ここでの濁度計測に用いている光学式濁度計は, 受光部近傍に水表面が存在すると計測誤差が多少生じることが確認された. しかしながら, セディメントトラップにより得られる単位面積あた



図—8 creek と swamp における濁度変動特性



図—9 土砂巻上げフラックス (creek, Stn.4)

りの土砂堆積量を swamp と creek で比べたところ、creek と同程度の土砂堆積量が swamp においても確認された。このことより、swamp で計測された冠水直後における高濁度値は計測誤差の影響ではなく、creek で巻き上げられた土砂が swamp 内へ輸送されている様子を捉えているものと推察される (Furukawa ら, 1997)。

b) 土砂巻上げフラックス

上述した creek における濁度変動特性の要因を調べるために、creek (Stn.4) に設置された ADV による土砂巻上げフラックスの時系列変化を図—9 に示す。ここでの土砂巻上げフラックスは、鉛直方向流速と SS の乱流成分の積により算出されている。これを同時に計測された平均流速と乱れ強度とともに見ると、流速の大きくなる上げ潮・下げ潮時において乱れ強度は大きくなり、それと連動して土砂巻上げフラックスが大きくなる。また、土砂巻上げフラックスの値は、上げ潮時と下げ潮時とで同程度の値となっていることが分かる。このことより、creek 底層において下げ潮時での濁度値が上げ潮時での値よりも大きくなる要因としては、乱れに伴う局所的な土砂巻上げフラックスの影響よりも、土砂の水平移流効果が大きく関与しているものと推察される。すなわち、上げ潮時にはサンゴ礁海域から低濁度水が、下げ潮時には上流側の creek や swamp からの高濁度水が輸送されてくるために、このような上げ潮・下げ潮時における濁度変動特性の違いが生じたものと考えられる。

5. 結論

マングローブ水域における水環境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多点同時集中観測を実施した。そこで得られた主要な結論は以下に示すとおりである。

- 1) creek やその近傍の swamp では、複断面蛇行流れと類似の流動パターンが形成されており、そこでの流動特性や地形特性に密接に関連していることが明らかとなった。
- 2) 水温データや熱収支解析結果から、creek や swamp では潮汐と連動した水平移流熱フラックスのため大きな水温変動が生じること、また swamp では地表面との熱交換により海水の冷却効果が顕著になることが明らかとなった。
- 3) creek の底層における濁度値は上げ潮時よりも下げ潮時の方が高くなり、その主要因が局所的な土砂巻上げよりも水平移流効果の影響を受けていることが確認された。

謝辞：本観測に実施に際して、独立行政法人水産総合研究センター西海区水産研究所石垣支所海洋環境研究室長阿部和雄氏と(株)アレック電子から観測機器をお借りした。ここに記して謝意を表します。なお、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), 基盤研究 (B) (2) (課題番号: 12555147, 代表者: 灘岡和夫), 基盤研究 (C) (1) (課題番号 12895008, 代表者: 灘岡和夫), 平和中島財団国際学術共同研究助成 (研究代表者: 灘岡和夫) によるものである。

参 考 文 献

- 浅野敏之・瀬戸口喜祥 (1995): 狭小水路と氾濫原で構成されるマングローブ感潮入り江の流動特性, 海岸工学論文集, Vol.42, No.1, pp.401-405.
- 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.
- 川西澄・小谷英史・余越正一郎 (1996): 超音波ドップラー流速計を用いた感潮域の流動と懸濁物質濃度の現地観測, 海岸工学論文集, Vol.43, No.2, pp.1086-1090.
- 小滝一夫 (1997): マングローブの生態, 信山社, pp.1-138.
- 近藤純正 (1994): 水環境の気象学 — 地表面の水収支, 熱収支一, 朝倉書店, pp.206-239.
- 中辻啓二・伊藤渉・村岡浩爾・R.A.Falconer (1994): 熱帯性マングローブ河口の水理特性, 海岸工学論文集, Vol.41, No.2, pp.1126-1130.
- 二瓶泰雄・灘岡和夫・綱島康雄・丸田直美・青木康哲・若木研水 (2001): サンゴ礁海域における温熱環境特性に関する多面的観測と解析, 海岸工学論文集, Vol.48 (投稿中).
- 福岡捷二・大串弘哉・加村大輔・平生昭二 (1997): 複断面蛇行流路における洪水流の水理, 土木学会論文集, No.579/II-41, pp.83-92.
- 武藤裕則・塩野耕二・今本博健・石垣泰輔 (1996): 複断面蛇行開水路流れの3次元構造について, 水工学論文集, Vol.40, pp.711-716.
- Clough, B.F. (1992): Primary productivity and growth of mangrove forests (eds. Robertson, A. I. and D. M. Alongi), *American Geophysical Union*, pp.225-249.
- Furukawa, K., E. Wolanski and H. Mueller (1997): Currents and sediment transport in mangrove forests, *Estuarine, Coastal Shelf Science*, Vol.44, pp.301-310.
- 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.