

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

二瓶泰雄\*・横井淳一\*\*・青木康哲\*\*\*  
綱島康雄\*\*\*\*・佐藤慶太\*\*\*\*\*・灘岡和夫\*\*\*\*\*

マンガロープ水域での河道首(creek)及びその周辺の氾濫源(swamp)における三次元流動構造特性や乱流特性を検討するために、沖縄県石垣島久通川マンガロープ水域を対象として、デジタルビデオカメラによるcreek内の平面流速観測と電磁流速計を用いた乱流観測、という二種類の現地観測を実施した。その結果、マンガロープ河道部では、creekの平面形状やswamp内での大局的な流動パターンに影響により、時間的に大きく変化する三次元流動構造が形成されていた。また、creek・swamp間における運動量輸送に対して、平均流による輸送のみならず、セイシュや水平大規模渦に起因した流速変動に伴う運動量フラックスが有意な大きさであることが示唆された。

## 1. はじめに

河道部 (creek) とマングローブ林が繁茂する氾濫源 (swamp) から構成されているマングローブ・エスチュアリーでは、潮汐作用により、creek を通して周辺に隣接する沿岸域 (干潟、藻場、サンゴ礁) との海水・物質交換が行われており、マングローブ域は隣接する周辺海域の生態系に大きく関与していることが知られている (例えば、小滝, 1997)。このようなことから、これらの海水交換や物質輸送特性のベースとなる、creek 内における流動構造特性や creek と swamp 間における物質輸送特性を解明することは強く求められている。

このようなマングローブ・エスチュアリー の物理過程に関する現地観測はいくつか行われている（例えば，Wolanski ら，1992；松田，1997；二瓶ら，2001）。これらの研究により，creek における潮流特性や swamp 内における基本的な流動特性に関する知見は得られつつあるものの，大きく曲がりくねった平面形状を有する creek 内における三次元流動構造や，物質輸送過程と密接に関連している creek 内外における乱流構造特性に関する研究は皆無に等しいのが現状である。

そこで本研究では、従来までほとんど明らかになっていない、creek における三次元流動構造や creek・swamp 間における乱流輸送過程を明らかにするために、典型的な R 型マンガルが存在する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行うことを試みた。そこでは、①デジタルビデオカメラによる creek 内の平面流速観測、②複数台の電磁流速計を用いた creek 内外における乱流観測、という 2 種類の現地観測を実施した。

ので、以下にその結果を示す.

## 2. 現地観測の概要

現地観測対象である吹通川マングローブ水域（図-1）は、そこでの面積が約 18 ha と小規模であること、また、creek よりも 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。このマングローブ水域における creek 内の一地点（Stn. C3）を対象として実施された、①デジタルビデオカメラを用いた平面流速観測と、②室内用有線式電磁流速計による乱流構造観測、の概要について以下に示す。まず、これらの観測期間は、2001 年 8 月 16 日 14:00~19:00 と 8 月 17 日 06:45~10:00 とした。これは、図-2 に示されている水位変動を見ても分かるように、上げ潮時、下げ潮時にそれぞれ相当している。

creek 水表面流速の面的分布や creek 内における 3 次元流動構造を詳細に把握するために、デジタルビデオカメラを用いた平面流速観測を実施した。そこでは、まず、図-1 下図に示しているように、creek と swamp の境界付近に設置された脚立上部にデジタルビデオカメラ (SONY (株), DCR-TRV9000) を取り付けた。このデジタルビデオカメラにより、水表面を漂流する葉等といったトレーサをラグランジュ的に追跡し、水表面流速の平面分布を計測した。このビデオ画像は斜め上方より撮影されているので、幾何補正を行う必要がある。そこで、あらかじめ水平位置が分かっている標定基準点を撮影画像内に 6 点設け、それらを用いて幾何補正を行い、流速データを算出している。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 0.8 m、横断方向 6.0 m の矩形領域とした。なお、本論文では、creek 内の主流方向と横断方向をそれぞれ  $x, y$  とし、各方向速度を  $u, v$  とする。そこで得られた結果に基づいて、平均流速・乱流統計量分布のみならず、水表面流速の発散 (divergence) を求めて、creek 内の 3 次元流動構造を把握した。

creek 内外における乱流構造特性を検討するために、

|            |      |                       |             |
|------------|------|-----------------------|-------------|
| * 正 会 員    | 博(工) | 東京理科大学講師              | 理工学部土木工学科   |
| **         | 学(工) | 积水ハウス(株)              |             |
| ***        | 修(工) | 五洋建設(株)               |             |
| ****       | 学(工) | 東京理科大学大学院<br>専攻修士課程   | 理工学研究科土木工学  |
| ***** 学生会員 | 修(工) | 東京理科大学大学院<br>専攻博士後期課程 | 理工学研究科土木工学  |
| ***** フェロー | 工 博  | 東京工業大学教授<br>位報奨学専攻    | 大学院情報理工学研究科 |

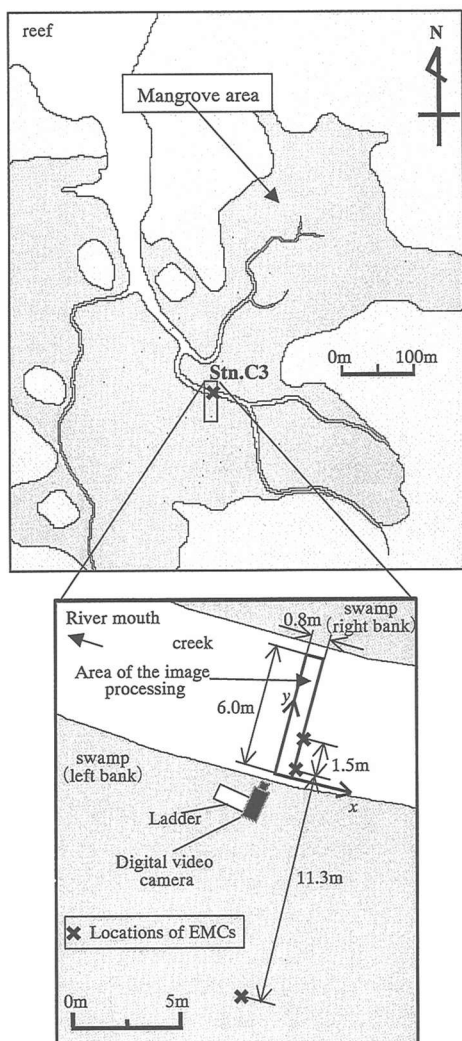


図-1 吹通川マングローブ水域と観測点配置図

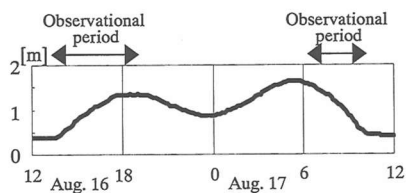


図-2 Stn. C3 における水位変動と観測期間

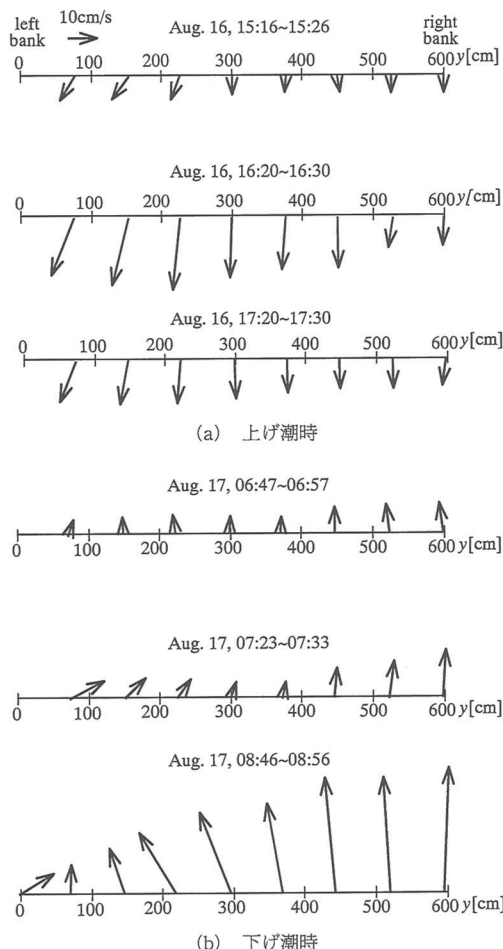


図-3 水表面流速ベクトルの横断分布

の電磁流速計のサンプリング周波数を 10 Hz として、一回の観測に付き 10~20 分の連続計測をした。その結果により、平均流速・乱れ強度・レイノルズ応力の算出やスベクトル解析・wavelet 解析などを行った。

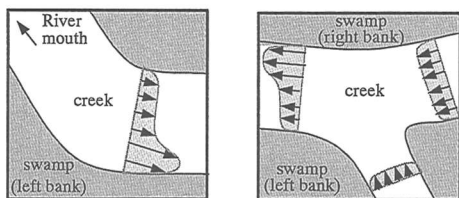
なお、これらの二つの観測と同時に、吹通川マングローブ水域全域を対象とした平面的な水理環境観測を実施した(二瓶ら, 2002a)。ここでは、そこで得られたマングローブ域における大局的な水理現象と creek 周辺における局所的な流動構造との関連性を比較・検討した。

### 3. 観測結果と考察

#### (1) creek 水表面における水平方向流速分布

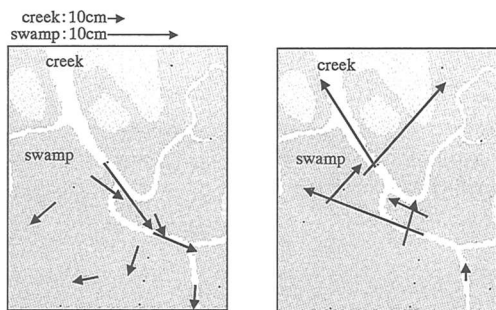
デジタルビデオカメラを用いた平面流速観測結果に基づいて、creek 横断方向 75 cm ごとに上げ潮時と下げ潮時における 10 分間平均の水表面流速分布を求めた結果を図-3 に示す。これを見ると、上げ潮時に関しては、左岸側の主流方向流速が右岸側よりも相対的に大きく

複数台の電磁流速計を用いた乱流観測を、上述したデジタルビデオカメラを用いた平面流速観測と同時に実施した。この観測では室内用 2 成分電磁流速計 7 台((株)ケネック, VM-201H; 東京計測(株), SF-2042)を用いた。これらの測器を creek 表層・底層, creek と swamp の境界部, swamp の合計 4 箇所に設置した(図-1 下図)。こ



(a) 上げ潮時 (観測点河口側) (b) 下げ潮時 (観測点上流側)

図-4 観測地点周辺の creek 形状と流速分布の関係



(a) 上げ潮時 (16日 16:30) (b) 下げ潮時 (17日 8:40)

図-5 Stn. C3 周辺における平面流動パターン (二瓶ら, 2002a)

なっていると同時に、横断方向流速は全体的に左岸側に向かって流れていることが分かる。このように、この地点では左岸側の swamp への流入は卓越しているものの、右岸側の swamp への海水の侵入は顕著でないことが分かる。

一方、下げ潮時では、右岸側における主流方向流速が左岸側での値と比べて大きくなっており、特に下げ潮時後半(8月17日8:46~8:56)において、その傾向が顕著になっていることが分かる。また、横断方向流速分布より、creek 内において明確な収束域が形成されており、その収束域が時間とともに creek 中央部から左岸側へ移動していることが分かる。

上記のような特徴的な平面流速パターンの形成要因としては、観測地点(Stn. C3)周辺における creek 形状や swamp における大局的な流動パターンが挙げられる。まず、creek 形状と流速分布との関連性を説明するための模式図を図-4に示す。これを見ると、上げ潮時では、観測地点河口側の creek 形状が大きく曲がっているため、外岸側である左岸側の流速が内岸側に相当する右岸側よりも大きくなるものと考えられる。一方、下げ潮時では、観測地点上流側(陸側)では2つの creek がほぼ直角に合流しているため、右岸側の流速が左岸側よりも大きくなるものと推察される。また、上げ潮時(8月16日16:

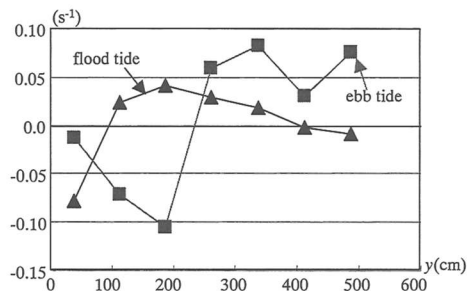


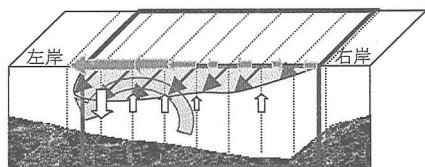
図-6 水表面上における水平流速の発散 (flood tide: 8/16 16:20-16:30, ebb tide: 8/17 8:46-8:56)

30) と下げ潮時(8月17日8:40)における観測地点周辺での平面流動パターンを図-5に示す(二瓶ら, 2002a)。なお、図中の速度ベクトルを見やすくするために、creek と swamp における速度ベクトルの大きさを変化させている。これらを見ると、観測地点周辺に関しては、左岸側の swamp では、creek と直角方向の流れが明確に起こっているのに対して、右岸側の swamp における卓越流向は主として creek と平行な方向となっている。このような大局的な流動パターン、特に右岸側と左岸側の swamp における卓越流向の違いは、図-3に示した creek 内における横断方向流速分布と密接に関係していることが分かる。以上のことから、creek における局所的な水表面流速分布に対して、マングローブ水域内における creek 平面形状や大局的な swamp 内における流動パターンが大きな影響を及ぼしていることが示唆された。

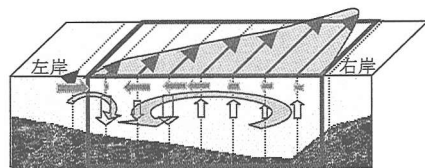
## (2) creek における三次元流動構造

creek 内における鉛直流構造を把握するために、水平方向流速の発散を算出した結果を図-6に示す。ここでは、上げ潮時(8月16日16:20~16:30)と下げ潮時(8月17日8:46~8:56)における結果を示している。これを見ると、上げ潮時では creek 中央部において正の発散値、左岸境界付近では負の発散値となっており、それぞれ発散域、収束域が形成されていることが分かる。これより、creek 中央部では上昇流が、左岸境界付近では明確な下降流が生じているものと考えられる。次に下げ潮時における発散値に関しては、creek 左岸側で負(収束域)、中央より右岸側で正(発散域)となっている。この結果より、上昇流は中央部から右岸側にかけて形成され、下降流は creek 左岸側において顕著となっていることが分かる。これらのことより、上げ潮時と下げ潮時とは、creek 内において発散域や収束域が形成される場所が変化していることが明らかとなった。

以上のような水表面流速分布と、その発散値により算出された鉛直上昇流・下降流構造に基づいて得られた、



(a) 上げ潮時 (8/16, 16:20-16:30)



(b) 下げ潮時 (8/16, 8:46-8:56)

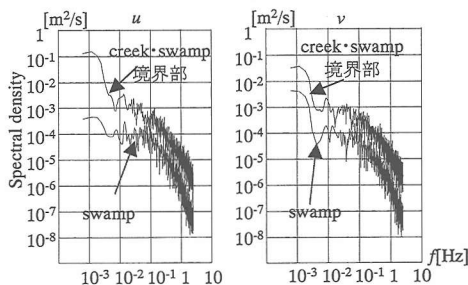
図-7 creek における三次元流動構造の模式図

creek 内における三次元流動構造の模式図を図-7 に示す。まず、上げ潮時には、左岸側において水表面上の主流方向速度が大きかったこと、creek 中央部が発散域、左岸境界付近が収束域となっていたことを考慮すると、同図 (a) に示されているとおり、一つの循環流構造が形成されているものと考えられる。一方、下げ潮時では、creek 内左岸側において収束域、右岸側より中央部では発散域が形成されていたことから、creek 内において一対の循環流構造が形成されているものと考えられる。このように、マングローブ河道部内では、時間的に大きく変化する三次元流動構造が形成されていることが明らかとなった。

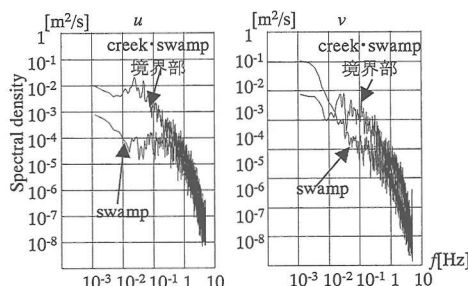
### (3) creek 内外における乱流特性

電磁流速計による乱流観測結果に基づいて、creek とその周辺の swamp における乱流構造特性について検討する。まず、水平方向流速の生データを見たところ、10 分弱の卓越周期となる変動成分と、それよりも短い時間スケールの変動成分が顕著であることが確認された。そこで、creek・swamp 境界部と swamp において計測された主流 ( $u$ ) 方向・横断 ( $v$ ) 方向成分の流速変動スペクトルを図-8 に示す。図中には、上げ潮最大時 (8/16, 16:20~16:40) と下げ潮最大時 (8/17, 8:48~8:58) における結果が示されている。

これらのうち creek・swamp 境界部における結果を見ると、両方向ともに、生データからも確認された 10 分弱の周期に相当する変動成分 (以下、長周期成分と呼ぶ) に加えて、数十秒から 100 秒程度の周期の変動成分 (以下、短周期成分と呼ぶ) が卓越していることが分かる。このような長周期成分と短周期成分におけるスペクトル密度の大きさを比べると、上げ潮時には長周期成分の方が短周期成分よりも大きくなっているのに対して、下げ潮時にはその逆となっており、数十秒程度のより明確な



(a) 上げ潮時 (8/16, 16:20-16:40)



(b) 下げ潮時 (8/17, 8:48-8:58)

図-8 流速変動スペクトル

ピークが現れている。短周期成分よりもさらに高周波数域では、コルモゴロフの  $-5/3$  乗則がほぼ成立している。このような流速変動の成因としては、短周期成分に関しては、creek とマングローブ植物が繁茂する swamp 間における大きな流速差に起因して形成される水平大規模渦によるものであるものと考えられる (二瓶ら, 2002b)。次に、長周期成分に関しては、肥後ら (1993) が指摘するように、マングローブ水域に隣接するリーフ海域と陸岸との間で形成されるセイシュに起因するものと推察される。しかしながら、彼らの結果と異なり、本研究では潮位に関わらず卓越周期が 8~9 分程度とほぼ一定値となっていた。

swamp における流速変動スペクトルに関しては、creek・swamp 境界部と比べて全般的にスペクトル密度の大きさは小さくなっているものの、その減少の割合は周波数や方向により大きく異なっている。すなわち、高周波数域では両方向ともにその減少の程度は相対的に小さい。それに対して、低周波数域 (長周期成分や短周期成分) では、主流方向に関しては大幅に減少するものの、横断方向に関してはやや減少するか (上げ潮時)、逆に上回るときがある (下げ潮時)。このように、swamp における流速変動スペクトルが、creek 主流方向と横断方向とで大きく異なるのは、① creek と swamp の地盤高さの違いやマングローブ植物による流体力学的抵抗に起因して、swamp 内での長波の進行方向が creek と垂直な方向

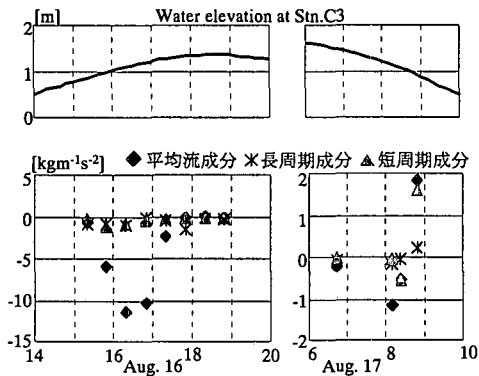


図-9 swamp・creek 境界部における運動量フラックス

となることや、②水平大規模渦の水平スケールが creek の幅に大きく規定されるため、swamp での計測地点 (creek・swamp 境界部より 10 m) まで水平大規模渦の影響が直接的には及んでいない、という要因が考えられる。

#### (4) creek・swamp 境界部における運動量フラックス

さらに、前節と同様に、creek 内外における乱流観測結果を用いて、creek と swamp の間における運動量交換過程を検討した。図-9 は、creek・swamp 境界部における平均流成分、長周期成分、短周期成分の運動量フラックスの時系列変化を示す。ここで、平均流成分の運動量フラックスとしては、計測期間毎において各方向の時間平均流速を算出し、それらの積として求められている。また長周期成分と短周期成分に関しては、流速変動成分を 3 分以上の変動成分 (長周期成分) とそれ以下の変動成分 (短周期成分) に分離して、各変動成分の積を計測期間内において時間平均したものを運動量フラックスとしている。これを見ると、上げ潮時には、全体的には平均流成分が卓越しており、長周期成分や短周期成分は上げ潮最大時において平均流成分の 10~20% 程度の値を取っている。それに対して下げ潮時に関しては、上げ潮時と比べて全体的に値が小さくなっていること、さらに、長周期成分や短周期成分の運動量フラックスが平均流成分と同程度の値となっていることが分かる。これらの観測結果により、creek と swamp 間の物質交換特性を考える際には、長周期・短周期流速変動に伴う輸送プロセスを考慮することの重要性が示唆された。

## 4. 結 論

本研究では、沖縄県石垣島吹通川マングローブ水域を

対象として、デジタルビデオカメラによる平面流速観測と複数の電磁流速計を用いた乱流観測、という二種類の現地観測を実施し、creek 周辺における三次元流動構造や乱流構造特性について検討することを試みた。その結果、マングローブ河道部では、creek の平面形状や swamp における大規模な流動パターンの影響を受けて、時間的に大きく変化する三次元流動構造が形成されていることが明らかとなった。また、creek 周辺における流速変動特性としては、10 分弱の卓越周期を有するセイシュによる長周期成分と、水平大規模渦に起因している数十秒から 100 秒程度の短周期成分が顕著となっていることが示された。さらに、creek・swamp 境界部における運動量フラックスを調べたところ、これらの流速変動成分は平均流成分と比べて有意な大きさを持つことが明らかとなり、creek と swamp 間における物質輸送特性を考える際には、長周期・短周期変動成分による寄与を考慮することが重要であることが示された。

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る。

## 参 考 文 献

- 小滝一夫 (1997): マングローブの生態, 信山社, pp. 1-138.
- 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・青木康哲・網島康雄・佐藤慶太・西村 司・灘岡和夫 (2002a): 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.
- 二瓶泰雄・佐藤慶太・青木康哲・西村 司・灘岡和夫 (2002b): 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.
- 肥後竹彦・高杉由夫・佐藤一敏・渡嘉敷義浩 (1993): 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.
- 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.