

マングローブ氾濫原における水理環境の平面構造

二瓶泰雄¹・綱島康雄²

¹正会員 博 (工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: nihei@rs.noda.tus.ac.jp

²非会員 修 (工) (株) ジェイアール東日本情報システム

マングローブ氾濫原における水理環境の平面構造を明らかにするために、沖縄県石垣島吹通川マングローブ水域を対象として、二つの河道部 (creek) に挟まれている氾濫原 (swamp) 上の水位や流速変動に関する長期連続観測と多点平面観測を実施した。その結果、従来の知見と異なって、氾濫原上では、creekに直交方向のみならず、平行方向の流速成分が有意な大きさで生じていること、また、上げ潮時と下げ潮時の流向や流速レベルが異なる、という潮汐流の非対称性が顕著であることが明らかとなった。このような流動構造に対してはswamp内の水位勾配が駆動力となっており、さらに、creek内における水位分布がこのswamp内における水位勾配の形成過程に大きく関与していることが示された。

Key Words: mangrove, swamp, hydrodynamic environments, tidal current, water elevation

1. 序論

マングローブ水域は、陸域と海域の間におけるエコトーンに位置しており、そこでは陸域・海域からの様々な影響を受けた形でバランスした多様な生態系が成立している^{1)・2)}。このようなマングローブ水域は、防波・防風機能等の海岸防災林、魚やエビ等に住处を与える魚付き林、周辺海域への栄養塩・有機物供給源、陸域起源の流入土壌粒子のトラップ効果等という様々な環境機能を有しており、マングローブ林を適切に保全・管理していくことは極めて重要である。

最も一般的なマングローブ地形としては、**図-1**に示すように、河道部 (creek) 沿いにマングローブ植物が繁茂する氾濫原 (swamp) が存在する、というR型 (riverine forest type) マンガル³⁾が挙げられる。このR型マンガルでは、creekを介して、陸域から河川水、沿岸域から海水がそれぞれswampを流入・流出しており、マングローブ水域は陸域・海域の環境変化の影響を直接的に受けやすい立地条件となっている。そのため、近年の農地造成等の陸域開発や漁港建設等の海域開発に伴う人為的な環境ストレスの影響を受けて、マングローブ林生態系の崩壊や周辺海域の水産資源の低下等という深刻な環境問題が発生している。このようなことから、周辺陸域・海域からの環境負荷がマングローブ生態系に及ぼす影響を具体的に把握する必要がある。そのためには、



図-1 swamp と creek の様子 (干潮時)

マングローブ水域における海水・河川水挙動やそれに伴う物質輸送特性の実態を把握することが必須である。

マングローブ水域における流れや物質輸送に関しては、Wolanski et al.^{4)・5)}や松田⁶⁾により総説がまとめられており、この他にも現地観測や数値解析に基づく様々な関連研究が実施されている^{7)~13)}。これらの研究成果のうち氾濫原上における水理現象に関しては、①マングローブ林の抵抗効果により、swampにおける流速はcreekでの値と比べて小さく、その流向はcreekと直交方向となり、②水面勾配による圧力勾配とマングローブの地上根による流体力学的抵抗が力学的にバランスする、ということが知られている。しかしながら、これらの知見は、直線的な河道形状に関しては確認されているものの(例えば、金澤・松田¹³⁾)、より一般的である、大きく蛇行・分岐するcreekを有するマングローブ水域

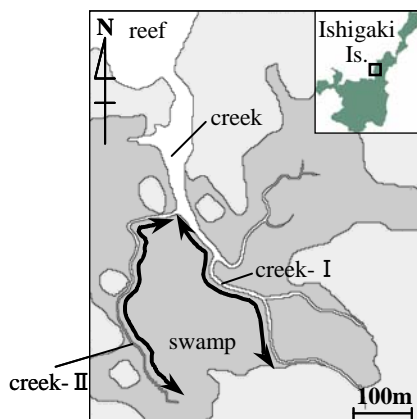


図-2 沖縄県石垣島吹通川マングローブ水域の平面図

に対して、上記の知見を適用できるかどうかは不明である。特に、図-2に示される2つの creek (図中矢印の creek-I, II) に挟まれた氾濫原を対象とした平面的な水理環境に関する知見は皆無である。

このような研究背景に基づいて、著者らは図-2に示している沖縄県石垣島吹通川マングローブ水域を対象とした平面的な水理環境調査を実施し、氾濫原上における平面流動パターンについて検討している(二瓶ら¹⁴⁾、以下前報とする)。しかしながら、そこでは観測期間が3, 4日間と短く、流速測定点の数が限られていたため、氾濫原全体における流れの様子は不明確であり、また、そこでの潮汐や河川出水の影響に関しては十分に捉えられなかった。

そこで本研究では、潮汐や河川出水の影響を考慮した形でマングローブ水域における平面的な水理環境特性を把握するために、同じ吹通川マングローブ水域の氾濫原を対象とした水理環境観測を実施した。ここでは、1) 約2ヶ月にわたって水位・流速に関する長期連続観測を実施し、河川出水や潮汐が氾濫原上の流動特性に及ぼす影響を調べる。また、2) 図-2に示されている二つの creek に挟まれる氾濫原及びその周辺における多点平面観測を大潮期・小潮期に行い、潮汐影響を含めた形で氾濫原における水理環境の平面構造やその形成メカニズムについて検討することを試みた。

2. 現地観測の概要

(1) 吹通川マングローブ水域について

吹通川マングローブ水域は、図-2に示すように、沖縄県石垣島北西部に位置し、水域全体の面積は約18haであり、swampの面積はcreek面積の約10倍となっている。このマングローブ林の樹高は5~8m程度となっており、十分発達したマングローブ林が存



(a) ヤエヤマヒルギ



(b) オヒルギ

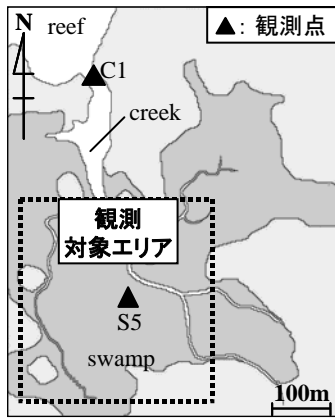
図-3 観測域におけるマングローブ植物の優占種

在する。マングローブ植物の優占種は、図-3のように、ヤエヤマヒルギ (*Rhizophora stylosa*) とオヒルギ (*Bruguiera gymnorhiza*) である。ヤエヤマヒルギは支柱根、オヒルギは膝根と呼ばれる特徴的な形状の根を有しており、これらの流体力学的抵抗がswamp内の流動を複雑化する一因となっている。この氾濫原におけるマングローブ植物の胸高直径と樹木密度は、平均的には、各々8~10cmと4000~6000本/haである。地形勾配の緩いswampの底面は潮汐により浸水・干出を繰り返す、creekは複雑に蛇行・分岐してswamp奥部へ達しており、このマングローブ水域は典型的なR型マングローブである。また、図-2中に示されているswampを挟む二つの creek に関しては、creek-Iの川幅や水深は、creek-IIよりも全般的に大きくなっている。

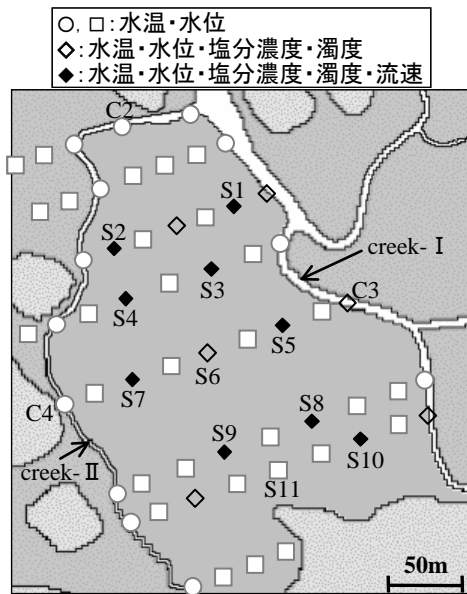
この水域の周辺環境としては、陸側には、淡水供給源となる4つの小河川がマングローブ水域に流入している。また、沿岸域には藻場やサンゴ礁が存在し、それらとマングローブ域の間には浅瀬状の sill が発達している。この sill は通常干潮時に干出するため、干潮時にはマングローブ水域と外海との接続が分断されて、水位変動は大きく歪んだ形となる¹⁴⁾。

(2) 長期連続観測

swamp内の流動特性に対する潮汐や河川出水の影響を把握するために、2002年9月24日から12月2日までの約2ヶ月間にわたり長期連続観測を実施し



(a) 長期観測



(b) 多点平面観測

図-4 測定器配置図

た. ここでの観測点は, 図-4 (a) に示すように, swamp 内の1点 (Stn.S5) とし, 自記式測定器を用いて水位・流速を長期的にモニタリングした. なお, 同時に河口部 (Stn.C1) において流速・水位・雨量などを計測し, 河口部での地形・流量調査を別途行っている¹⁵⁾. 使用した自記式測定器は, 表-1 に示すとおりであり, その測定時間間隔は水位・流速ともに10分とした. ここで得られた結果を用いて, 河川出水や潮汐と氾濫原上の流動特性の関係について検討する.

(3) 多点平面観測

多数の測定器を平面展開している多点平面観測は, 小潮期 (2002年9月13~16日) と大潮期 (2002年9月20~23日) において実施された. 前報よりも広範囲かつ細密な平面アレイ観測を実現するために, 図-4 (b) に示すように, 2つのcreekに挟まれた

表-1 使用した測定器の一覧

長期連続観測			
測定項目	測定器名	個数	製造会社
水位・水温	TD-Diver	2	Eijikelkamp社
水平流速	COMPACT-EM	2	アレック電子(株)
多点平面観測			
測定項目	測定器名	個数	製造会社
水温	TidbiT	43	Onset社
	Water Temp Pro	15	
水位	D-Diver	11	Eijikelkamp社
水位・水温	TD-Diver	7	
水温・塩分濃度	COMPACT-CT	5	アレック電子(株)
	ACLI04-8M	1	
濁度	COMPACT-CLW	4	
水平流速	COMPACT-EM	3	



図-5 測定器設置の様子

swamp 全域をカバーするように, creek16点・swamp42点に自記式測定器を配置した. 測定点間の距離は, creek-I に対して概ね直交する西南西~東北東方向には20~30mとし, それに直交しcreek-Iと平行な方向には25~70mとする. 測定項目としては, 全地点において水温・水位を, 同図中◇印(6地点)では水温・水位に加えて塩分濃度と濁度を, ◆印(9地点)では上記4項目と流速としている. この観測で用いた測定器一覧を表-1に示す. 各測定器の設置方法は, 図-5に示すように, マングローブの根もしくは底面に固定することとした. また, 同時期に河口部 (Stn.C1) においても水位計測を実施している. このような多点平面観測を実現するために, 水温計以外の数が少ない測定器に関しては, 観測期間中にswamp内の北側・中央・南側と3日間にわたり移動させており, 1地点当たり2潮汐(約1日)以上設置されている. この観測期間中における河口部 (Stn.C1) の水位変動を図-6に示す. ここでは, 石垣港平均海面を基準面として水位を表示している.

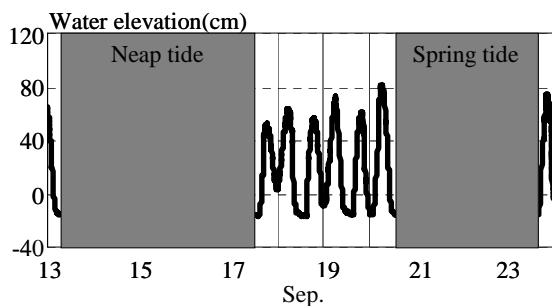


図-6 河口部 (Stn.C1) における水位変動 (石垣港平均海面を基準)

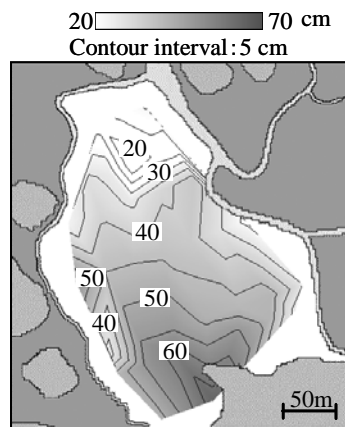


図-7 swamp 内の地盤高さ (石垣港平均海面を基準)

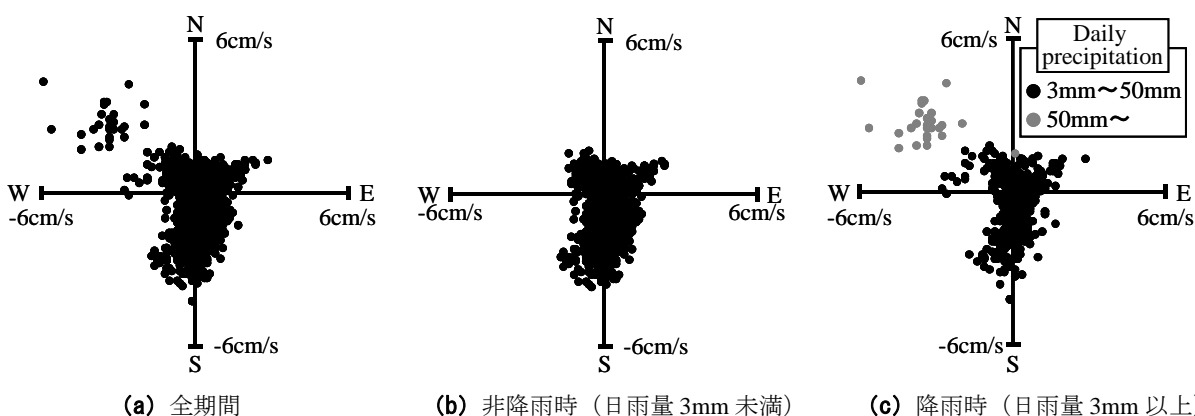


図-8 swamp 内における水平流速プロット図 (長期連続観測, Stn.S5)

これより、各期間内における水位変動パターンはほぼ類似しているため、後述するように別々の時刻で計測された結果を重ね合わせて比較・検討することには大きな支障はないものと考えられる。測定時間間隔としては、水温計は 10 分、その他の測器は 5 分とした。本論文では、これらの観測結果のうち、水位・流速・水温の観測結果を用いて、swamp 内の平面的な水理環境特性について検討しており、塩分・濁質環境の平面構造については別途報告する¹⁶⁾。

この観測の対象範囲における地盤高さを図-7に示す。ここでも石垣港平均海面を基準面として、swamp 内の全観測点に設置された水位計のデータを用いて地盤高さを算出している。具体的な算定方法としては、大潮期における満潮時水位はマングローブ水域内において空間的に一様となる、と仮定して、各地点の満潮時水深と河口部 (Stn.C1) の水位値より、各地点の地盤高さを求めている。なお、上記の仮定に関する妥当性は、別途行っている数値解析結果¹⁷⁾より確認されている。この図より、swamp 奥部ほど地盤高さは高くなっていること、creek- I 付近よりも creek- II 付近の地形勾配がきつくなっている

こと、などが見られる。この地盤高さデータと swamp 内での平面流動特性の関係については後述する。

3. swamp 内の流動特性に対する河川出水・潮汐影響

(1) 河川出水の影響

まず、swamp 内における基本的な流れの様子を見るため、長期連続観測により得られた swamp (Stn.S5) における全データの水平流速プロットを図-8 (a) に示す。ここで、潮位と流速変動の関係を確認したところ、上げ潮時には creek- I から swamp 奥部への南南西方向の流れが生じているのに対して、下げ潮時には creek- I に向かう北東方向への流れが形成されている。また、このような潮汐流の卓越流向とは大きく異なる北西方向への流れが生じている。

この潮汐流とは異なる流れの形成過程を見るために、ここでは降雨に伴う河川出水に着目して、全データを非降雨時 (日雨量 3mm 未満) と降雨時 (日雨量 3mm 以上) に分けて、それぞれの水平流速プ

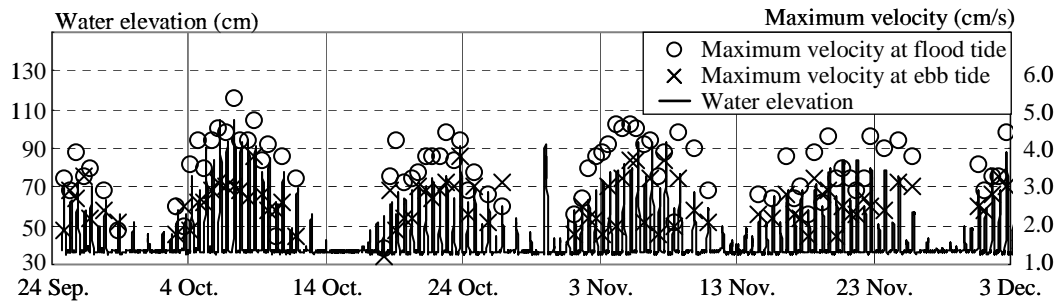


図-9 水位変動と流速最大値の時系列変化 (Stn.S5)

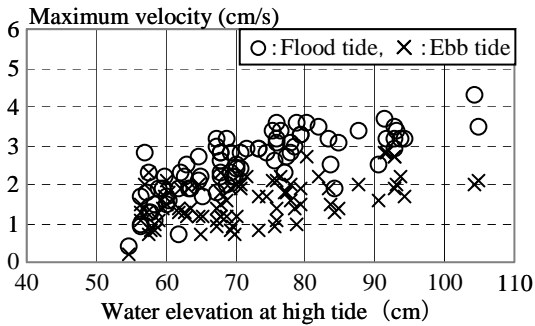


図-10 満潮時水位と流速最大値の相関図 (Stn.S5)

ロットを図-8 (b), (c) に示す。降雨時の結果については、さらに、日雨量が 3~50mm と 50mm 以上の場合に分離して表示している。これを見ると、降雨時のうち日雨量が 3~50mm における流向は概ね非降雨時の結果と一致しているものの、日雨量が 50mm を超えた時には、上述した北西方向の流れが生じていることが分かる。このことから、降雨イベントが見られても雨量が少ない（ここでは日雨量が 50mm 未満）場合には、swamp 内における流動場には河川出水よりも潮汐の影響が支配的であるのに対して、河川出水の効果が顕著となるのは大規模な降雨イベント時（ここでは日雨量が 50mm 以上）に限定されていることが分かる。このように、少雨時における河川出水が swamp 内の流動特性に影響を及ぼさないのは、swamp の面積が creek よりも著しく大きいためであると考えられる。なお、降雨時における swamp 内の塩分・濁質環境に関しては、日雨量が 10mm 程度の降雨においても、非降雨時とは異なって低塩分・高濁度となる観測結果が得られている。

(2) 潮汐の影響

次に、swamp 内の流動特性に対する潮汐の影響を検討するために、Stn.S5 における水位と上げ潮時・下げ潮時各々の流速最大値に関する時系列データを図-9 に示す。なお、一部の小潮では swamp 底面が冠水しないため、そのときの流速最大値は表示されていない。また、この水位値は石垣港平均海面を基

準面としており、以下も同じ基準面を用いて水位変動を表示する。これを見ると、水位変動が大きい大潮期には、流速最大値は上げ潮時・下げ潮時ともに大きくなり、小潮期には流速最大値が小さくなる、という変動傾向がうかがえる。また、上げ潮時と下げ潮時の流速最大値の大小関係としては、上げ潮時の方がやや大きいことが分かる。

このような潮汐振幅と流速最大値の関係をより詳細に検討するため、満潮時水位と上げ潮時・下げ潮時の流速最大値の相関図を図-10 に示す。これを見ると、上げ潮時・下げ潮時の流速最大値は、満潮時水位とともに大きくなる傾向が見られ、満潮時水位の上昇に伴う流速増加量は上げ潮時・下げ潮時ともに同程度であることが分かる。このように、上げ潮時・下げ潮時の流速最大値は潮汐振幅に対応して変動していることが明らかとなった。

4. 氾濫原における平面流動特性

(1) 水平流速プロット

多点平面観測結果に基づいて、氾濫原上における流れの時空間変動特性について検討する。まず、swamp 内における平面的な潮流特性を明らかにするために、各地点における水平流速プロットを図-11 に示す。ここでは、小潮期・大潮期に得られた全データについて図示している。小潮期では、swamp 底面が冠水し、かつ、流速計センサーが完全に水没したことが確認された Stns.S1~S3, S5 の 4 地点のみの結果を図示している。これを見ると、まず、大潮期における卓越流向は、swamp 北側ではばらつきが大きいものの、南側に関しては、概ね、北北東~南南西方向となっていることが分かる。このうち、swamp 南側の流向は、swamp 東側沿いに位置する creek-I に対して垂直に近い方向となっている。これより、swamp 南側では、観測エリアを囲む 2 つの creek のうち、相対的に川幅や水深の大きい creek-I の影響が、creek-II よりも大きく現れているものと考えられ

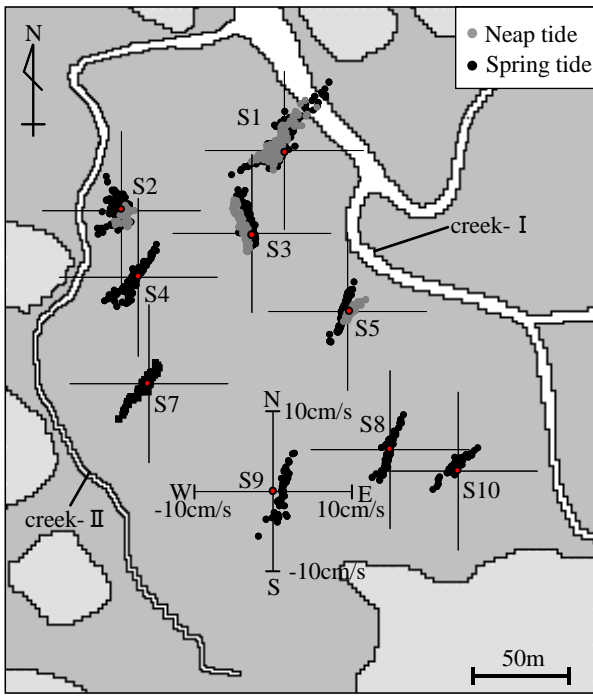
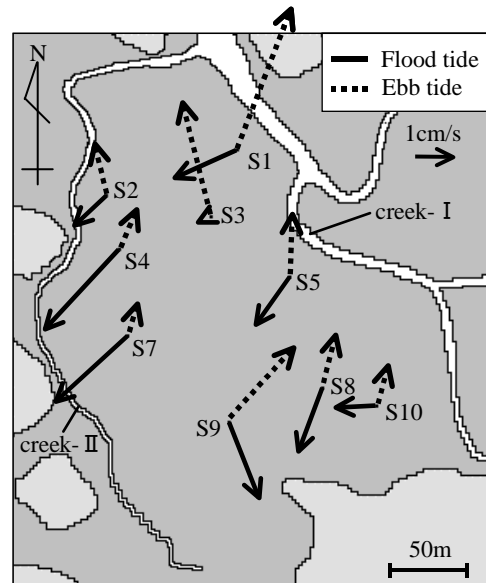


図-11 水平流速プロット

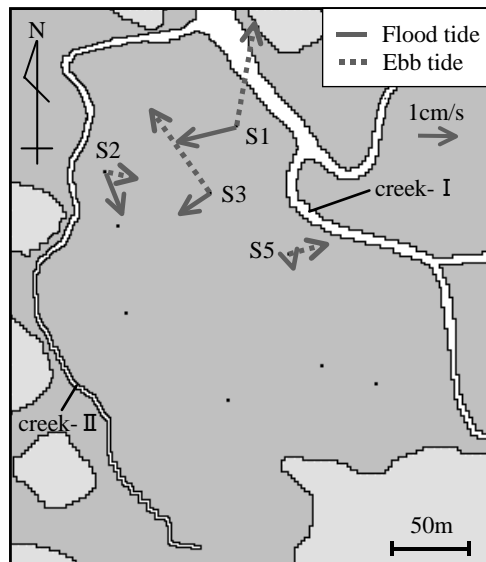
る。一方、swamp 北側における卓越流向が各点ごとに大きく異なっているのは、creek-I や II からの影響に加えて、地図上には示されていない小 creek の存在や、creek-I の蛇行形状などの影響を受けているものと推察される。次に流速振幅に着目すると、creek-I に近い Stn.S1 の結果が他の地点よりもやや大きいものの、明確な傾向は見られない。

小潮期の結果に着目すると、卓越流向は概ね大潮期と類似しているものの、河口部からの距離が相対的に遠い Stns.S2 や S5 では若干の流向差が見られる。また、流速振幅に関しては、小潮期の結果は、3.2において記述したように、大潮期の値と比べて全体的に減少しており、その傾向は流向変化の見られた Stns.S2 や S5 において顕著となっている。

これらの流向や流速レベルの観測結果は、swamp 内での流向が creek と直交方向となり、流速振幅が creek からの距離とともに減少する、という数値実験結果¹³⁾と大きく異なっている。この数値シミュレーションは、直線的な河道部を対象に行われていることから、本観測対象域のように、大きく蛇行する二つの creek に挟まれた swamp に対して、上記の知見を適用することには限界があるものと考えられる。また、氾濫原上の流動特性とそれを取り囲む二つの creek の関係としては、全体的には、相対的に川幅や水深の大きい creek-I の影響が大きいものの、二つの creek の分岐点に近い swamp 北側では両者の影響を受けて複雑な流況特性となっている。



(a) 大潮期



(b) 小潮期

図-12 上げ潮時・下げ潮時の平面流動パターン

(2) 流速ベクトルの平面分布

大潮期と小潮期における流速ベクトルの平面分布を図-12に示す。ここでは、図-11にプロットされた結果を上げ潮時・下げ潮時それぞれにおいて時間平均した結果を図示している。まず大潮期に着目すると、上げ潮時では、swamp 全域において creek-I から直交方向に swamp 奥部 (creek-II) へ向かう流れとなっており、流速レベルは swamp 奥部ほど大きくなる傾向がうかがえる。それに対して下げ潮時では、swamp 奥部から creek-I への直交方向に向かう流れとはならず、全体的に河口へ向かう流れとなっており、その傾向は swamp 北側で顕著となっていることが分かる。また、上げ潮時と下げ潮時の流速の大きさを比べると、creek-II に近い Stns.S4 や S7 では上げ潮時の方が相対的に下げ潮時よりも大きく、

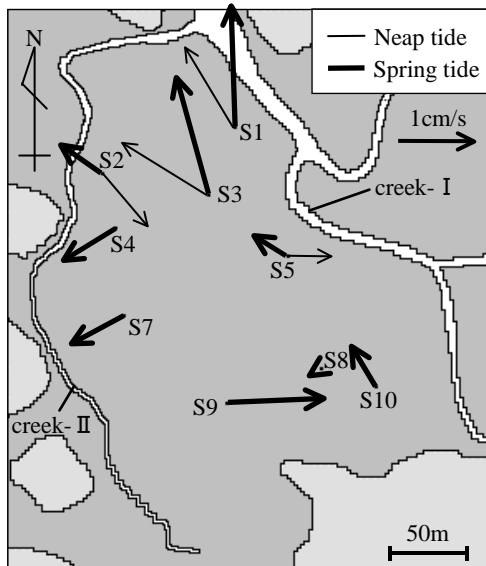


図-13 潮汐残差流ベクトルの平面分布

creek- I に近く河口寄りの Stns.S1 や S3 ではその逆の傾向が見られ、その他の観測地点では概ね同程度となっている。

次に、小潮期に関しては、上げ潮時と下げ潮時の流向・流速の違いが、大潮期と同様に顕著に表れている。また、大潮期と小潮期の結果を比べると、Stns.S2 や S5 では流向や流速レベルに大きな違いが見られており、図-11 に示した大潮期と小潮期における水平流速プロットの違いと一致している。

このように、swamp における流向や流速レベルは、上げ潮時と下げ潮時とで大きく異なっており、creek のみならず¹³⁾、swamp においても顕著な潮汐流の非対称性がswamp の広範囲に現れていることが明らかとなった。また、creek- I に対する平行方向の流れは、上げ潮時よりも下げ潮時においてより明確に現れていることが示された。

潮汐残差流に関する平面特性を把握するために、2 潮汐間にわたり平均された大潮期・小潮期における潮汐残差流の平面パターンを図-13 に示す。大潮期について見ると、swamp 北側では周囲の creek に発散する流れとなっており、南側では swamp 内部に収束する残差流が形成されている様子がうかがえる。このときの残差流の大きさとしては、概ね 1cm/s 程度であり、最大で約 2cm/s となっている。この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。次に、小潮期の結果を大潮期と比較すると、両者の結果の違いは明確であり、特に Stns.S2 や S5 では残差流の流向が逆向きとなっている

ことが分かる。このように、潮汐残差流の流向に関しても、図-11, 12 と同様に、creek- I に対する直交方向のみとはならず、平行方向成分も有意な大きさで生じていることが明らかとなった。

(3) 水温をトレーサーとした平面流況特性の把握

前節までに、氾濫原上での平面的な流動特性に関する結果を記述してきたが、これらは底面設置された自記式流速計の観測値に基づいている。しかしながら、この流速計の周囲には、図-3 に示すような錯綜しているマングローブ植物の根が存在するため、ここでの観測データが局所的な根の影響を受けている可能性がある。そこでここでは、別の方法により swamp 内の流況特性を把握するために、全観測点において計測された水温データをトレーサーとして、平面的な流動パターンや潮汐の侵入・後退挙動を検討する。

図-14 は、大潮期の 9 月 22 日 5:30am~9:30am における水温コンターと、水温をトレーサーとして得られた流速ベクトルを示す。図中には、上げ潮時(図中①~④)、満潮時(⑤)、下げ潮時(⑥~⑨)における水温分布が図示されている。ここで水温をトレーサーとして流速ベクトルを算出する際には、2 時点のコンター図を用いて、等値線形状等から見出される特徴的な点を時間的に追跡する方法¹⁸⁾を採用しており、2 時点の水温コンター図の時間間隔は 10 分とする。なお、水温値は swamp 底面での冷却効果等により変化するものの¹⁹⁾、ここでは 2 時点の水温コンター図の時間差を 10 分としているので、この影響は流速算定には無視できるものとする。

まず、swamp 内における水温分布の概況を述べる。上げ潮時(図中①~④)の結果を見ると、swamp 内部の水温は creek 付近の値よりも相対的に低く、水温最小値は時間経過とともに減少していることが分かる。これは、主として swamp 底面への地中伝導熱により、swamp 内の海水が冷却されているためであると考えられる¹⁹⁾。満潮時(図中⑤)においても同様な傾向は見られ、このときの水温分布パターンは図-7 に示されている地盤高さコンターと類似している。さらに、下げ潮時(図中⑥~⑨)では、swamp 奥部ほど水温が低いという傾向は変わらないものの、上げ潮時と比べて空間的に一様化しており、swamp 内における一種の水平混合現象が生じていることが分かる。また、ほぼ同じ河口水位となる上げ潮時と下げ潮時の結果を比べると、下げ潮時の冠水面積は相対的に上げ潮時よりも広がっていることが分かる。

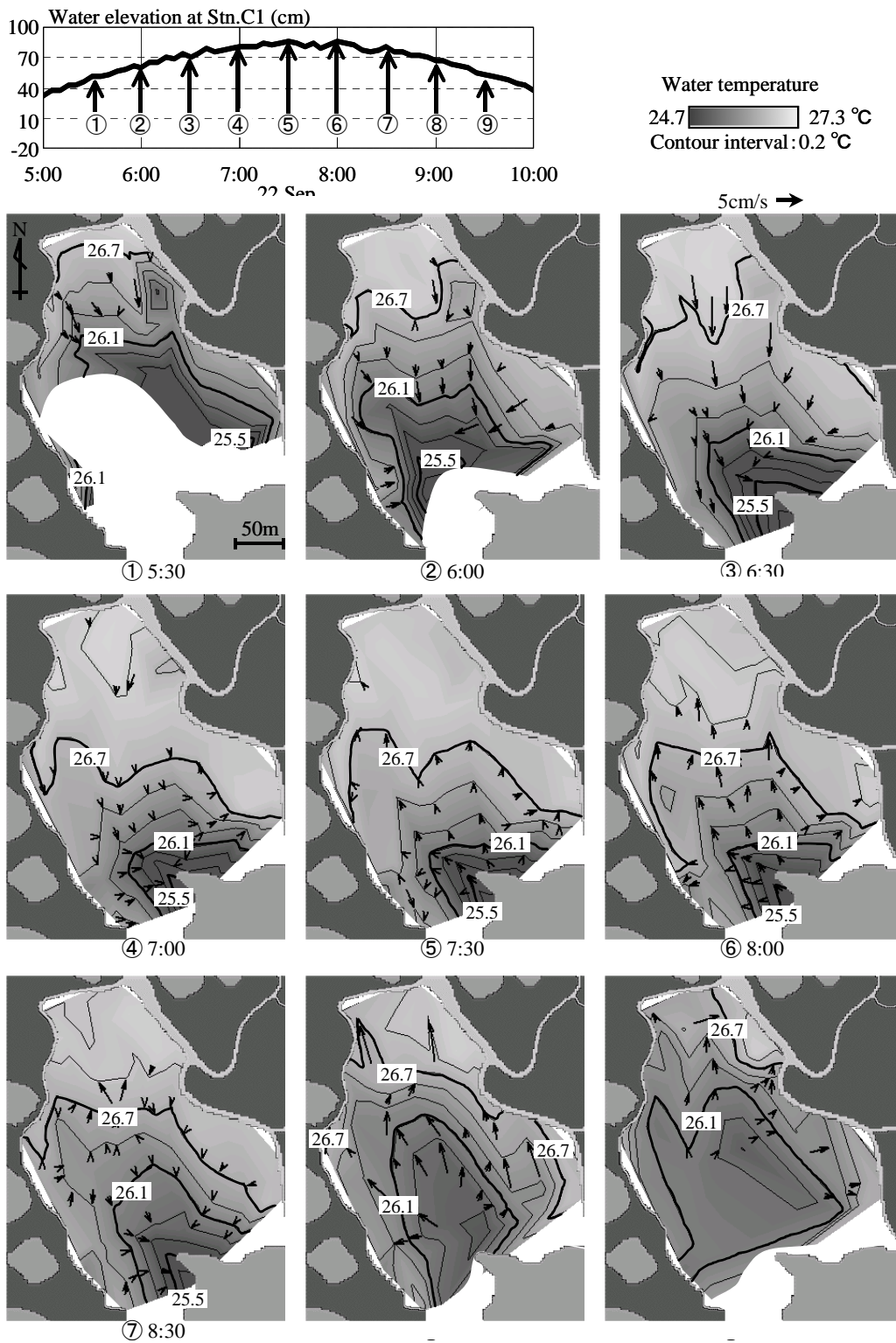
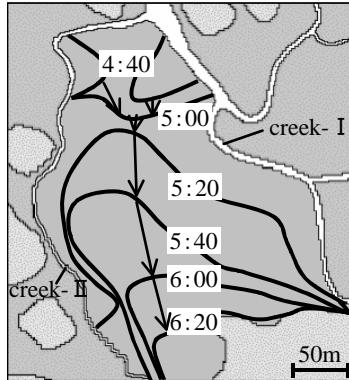
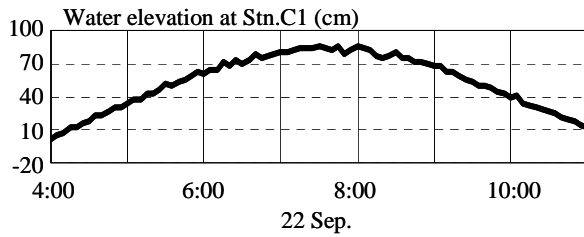


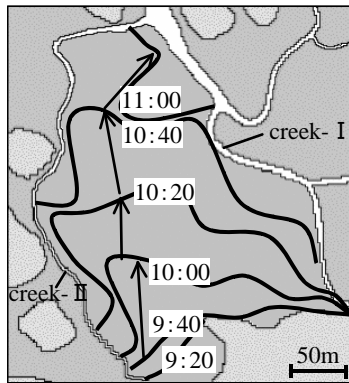
図-14 swamp 内の水温コンターと流速ベクトル (9/22 午前)

次に、水温をトレーサーとして算出された流速ベクトルの平面分布を見ると、上げ潮時では、地盤高さの等値線に直交するような流れが形成されている。すなわち、creek- I から swamp 奥部に向かう流れのみならず、図-12 では見られなかった swamp 西側に位置する creek- II から swamp 内部への流れが生じている。一方、下げ潮時の同日 9 時頃 (図中⑧) に

おいては、creek- I や II への流れも見られるもの、それ以上に全体的に河口向きへの流れが卓越していることが分かる。このような流れ場の影響を受けて、下げ潮時における swamp 内の水温一様化が生じたものと推察される。これらの結果から、図-12 で見られた潮汐流非対称性と定性的に一致する流動パターンが、水温をトレーサーとして算出された流速ベク



(a) 上げ潮時



(b) 下げ潮時

図-15 swamp内における潮汐フロント線 (9/22 午前)

トルにおいても確認できる。

さらに、swamp内における潮汐の侵入・後退挙動を明らかにするため、図-14と同じ9月22日午前中を対象として、水温データより得られた20分間隔の潮汐フロント線を図-15に示す。ここでは、swamp底面が冠水・干出する時に、底面付近に設置された水温計の計測値がそれぞれ急激に増加・減少することを利用して、各観測点における上げ潮時・下げ潮時の水温急変時刻をそれぞれ冠水・干出時刻として算出し、その結果に基づいて潮汐フロント線を求めている。これを見ると、上げ潮時では、潮汐フロントは二つのcreekから侵入しているものの、swamp北側や東側からのフロント進行速度は、相対的に西側(creek-II)よりも大きいことが分かる。これは、図-7に示されている地盤高さコンターを見れば明らかのように、creek-I付近の地形勾配がcreek-IIよりも相対的に緩くなっているためである。一方、下

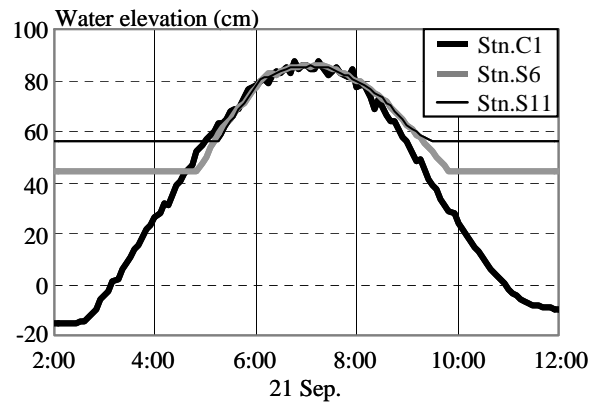


図-16 swampにおける水位変動の特徴

げ潮時に関しても、上げ潮時と同様にswamp西側よりも北側・東側のフロント進行速度が早いものの、この両者を比べると、河口へ向かう北側への潮汐フロントの移動が東側のものよりも顕著になっていることが分かる。このような潮汐の侵入・後退挙動に関する結果は、図-12で示されたswamp内の平面流動構造と定性的に一致していることが明らかとなった。

5. 平面流動構造の形成メカニズム

(1) swamp内水位変動の特徴

4. では、二つのcreekに挟まれた氾濫原上の平面流動特性として、creek-Iと直交方向のみならず、平行方向にも有意な大きさの流れが生じていること、上げ潮時・下げ潮時で流速値や流向が変化するという潮汐流非対称性が存在すること、などを明らかにした。しかしながら、そこでは平面流動構造の形成要因については記述されていないため、ここではこの流れの支配要因について検討する。swamp内における流れの支配要因としては、松田⁶⁾は、大局的には水位勾配項とマングローブ植物による抵抗項がバランスする、と指摘している。そこでここでは、これらの支配要因のうち水位勾配に着目し、多点計測されている水位データを用いて、swampにおける水位勾配と流速の関係を検討する。

まず、swamp内における水位変動の特徴を明らかにするために、河口部(Stn.C1)とswamp内2地点(Stns.S6, S11)における水位の時系列データを図-16に示す。これを見ると、swamp内の水位変動は、河口部での水位変動よりもやや遅れて時間変化しており、その時間遅れに関しては下げ潮時の方が上げ潮時よりもやや大きくなっている。この結果を反映して、swamp内における上げ潮時の冠水時間 T_F (冠

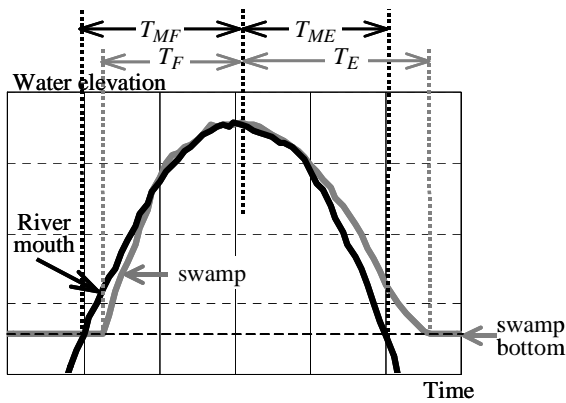
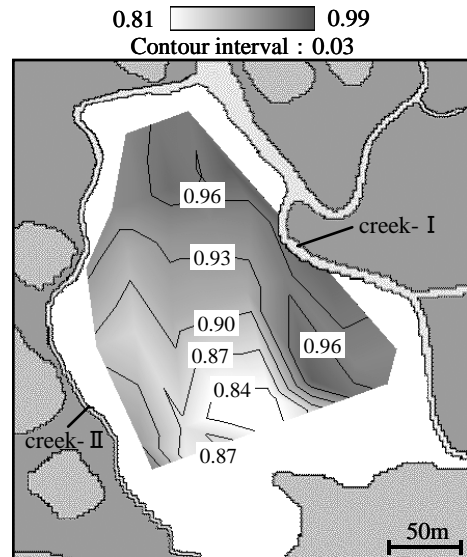


図-17 冠水時間 T_F, T_E, T_{MF}, T_{ME} の定義

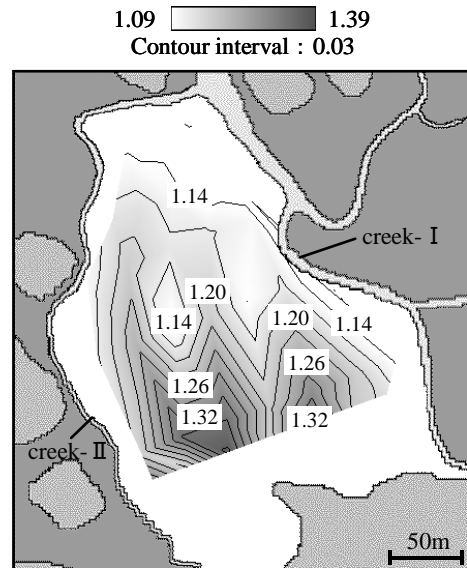
水から満潮までの時間)は、下げ潮時の冠水時間 T_E (満潮から干出までの時間)よりも短くなっている。これより、水位変動に関しても、流速変動と同様に、上げ潮時と下げ潮時とでその特徴が異なることが示された。

このような上げ潮時・下げ潮時の冠水時間 T_F, T_E について詳細に調べるために、図-17に定義される4種類の冠水時間 T_F, T_E, T_{MF}, T_{ME} を各観測点において求め、それらの冠水時間比 T_F/T_{MF} と T_E/T_{ME} の空間分布を図-18に示す。ここで、図-17中の T_{MF}, T_{ME} は、swamp内水位が河口水位と一致すると仮定したときに想定される上げ潮時・下げ潮時の冠水時間にそれぞれ相当している。この冠水時間比は、観測域が全て水没した大潮期の結果のみを示している。この図より、上げ潮時に関しては、creek-I近傍のswamp東側では T_F/T_{MF} は1.0に近いのに対して、swamp南西側ではその値は小さくなり、0.85以下となっている場所も見られる。一方下げ潮時に関しては、 T_E/T_{ME} の最小値が1.09となっており、swamp内における水位変動と河口水位変動との差が上げ潮時と比べて全体的に大きくなっていることが分かる。また、swamp南側の T_E/T_{ME} は全般的に大きくなっており、分布形状が上げ潮時の結果と変化している様子が分かる。このように、swamp内水位の時間変化の様子は、河口水位と異なって、上げ潮時と下げ潮時とで対称とはならず、その非対称性は、河口から離れたswamp奥部ほど顕著であることが示された。

次に、 $(T_F + T_E)/(T_{MF} + T_{ME})$ の空間分布を図-19に示す。この河口水位と地盤高さより求められる T_{MF}, T_{ME} は、浅瀬域における冠水面積・時間を簡易的に算出する時に用いられており、マングローブ水域にも適用されている²⁰⁾。実際の冠水時間 $T_F + T_E$ と上記の冠水モデルより得られる冠水時間 $T_{MF} + T_{ME}$ の比を見ることにより、冠水モデルの妥当性について検討することが可能となる。このよう



(a) T_F/T_{MF} (上げ潮時)



(b) T_E/T_{ME} (下げ潮時)

図-18 冠水時間比の空間分布 (大潮期)

なことを踏まえた形でこの図を見ると、swamp全域において1.0よりも大きい値を取っており、最大値としてはswamp奥部にて1.15となっている。このような結果は、河口水位に基づく冠水モデルを用いると、このような約250m四方の面積の小さい氾濫原においても、冠水時間を過小評価しており、その誤差は10%以上となるエリアも存在することが明らかとなった。

(2) 水位勾配と流速の関係

swampにおける水位勾配と流速の関係を検討するために、creek-Iに対する直交・平行方向の水位勾配と流速の時間変化を、大潮期を例として、図-20に示す。ここでcreek-Iに対する直交・平行方向の定

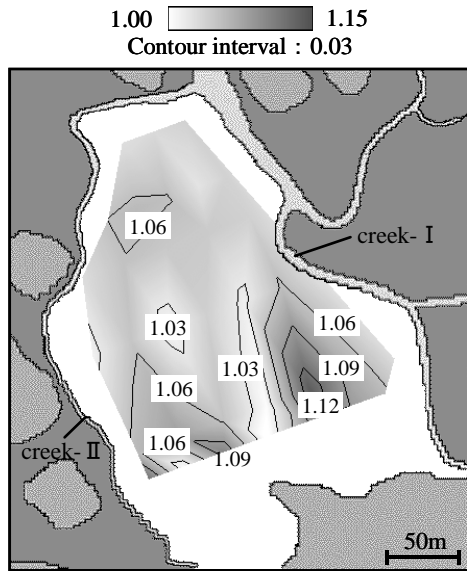
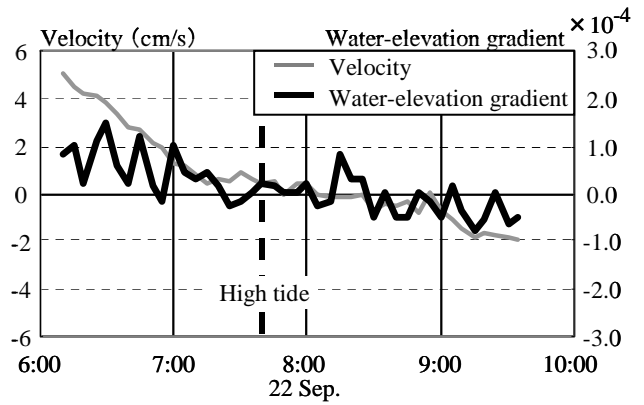


図-19 $(T_F + T_E) / (T_{MF} + T_{ME})$ の空間コンター

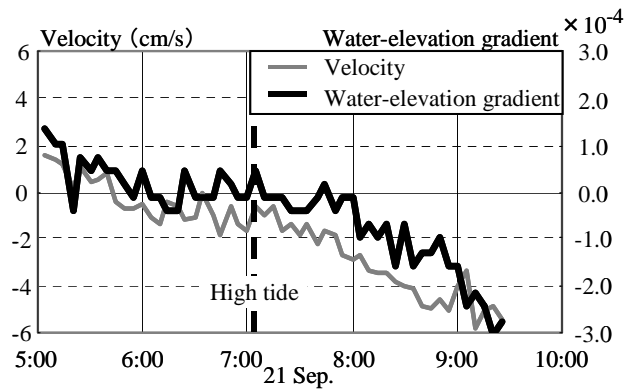
義としては、直交方向は Stns.C3 と C4 を結ぶ方向、平行方向は Stns.C2 と S6 を結ぶ方向とする。また各方向における流速・水位勾配を算定する際には、直交方向に関しては、Stn.S7 の流速値とその点を挟む Stns.S6 と C4 の水位値を、平行方向に関しては、Stn.S3 の流速値と Stns.C2 と S6 の水位値をそれぞれ用いる。さらに、流速の正の値は、直交方向については Stn.C4、平行方向については Stn.S6 へ向かう方向とし、水位勾配の正負については、流速の向きと一致させている。この図を見ると、流速は creek-I に対する直交・平行方向ともに、水位勾配と概ね対応して時間変動していることが分かる。このような流速と水位勾配の関係は他の地点においても同様になっていることが確認されている。これより、流速変動は水位勾配の影響を大きく受けており、図-12 に示されたような creek 平行方向流速の駆動力が水位勾配であることが示唆された。また、水位勾配の大きさを上げ潮時と下げ潮時とで比較すると、上げ潮時には creek 直交方向成分が、下げ潮時には creek 平行方向成分がそれぞれ大きくなっている。この結果は、上述した流速変動が上げ潮時と下げ潮時で非対称となる、という傾向と一致している。これより、swamp 内の水位勾配が上げ潮時と下げ潮時とで大きく異なることにより、潮汐流の非対称性が形成されているものと考えられる。

このような creek-I に対する直交・平行方向の水位変化を詳細に見るために、大潮期における両方向の水位差の空間分布を図-21 に示す。ここで水位差としては、各地点の水位から基準点の水位の差としており、ここでの基準点は直交方向 (Stn.C3~Stn.C4



(a) creek 直交方向

(流速: Stn.S7, 水位勾配: Stn.S6~Stn.C4, 正: Stn.C4 へ向かう方向)



(b) creek 平行方向

(流速: Stn.S3, 水位勾配: Stn.C2~Stn.S6, 正: Stn.S6 へ向かう方向)

図-20 水位勾配と流速の時間変化

のライン) では Stn.C3, 平行方向 (Stn.C2~Stn.S11 のライン) では Stn.C2 とする。また、各ライン上の水位観測が密に行われていた期間を選定して、直交方向に関しては 9 月 22 日午前、平行方向に関しては 9 月 21 日午前における結果をそれぞれ図示している。なお、図中の横軸については、直交方向に関しては Stn.C4、平行方向に関しては Stn.C2 からの距離を表しており、また各ラインの地盤高さ分布と基準点水位も合わせて表示している。まず、creek 直交方向 (同図 (a)) に着目すると、上げ潮時においては、基準点水位がこのラインにおける地盤高さ最高値よりも低い図中①、②では、Stn.C3 側の水位が高く、水位差は最大で 3cm 程度になっている。その後、③の時点では、直交方向の水位差は 1cm 以内となっている。下げ潮時に関しては明確な水位差は生じておらず、水位分布は一様化していることが分かる。次に、creek 平行方向 (同図 (b)) に関しては、上げ潮時と下げ潮時ともに、明確な水位差が見られるものの、上げ潮時では水位差は最大で約 2cm であるのに対して、下げ潮時では最大で 4cm を越えていることが分かる。

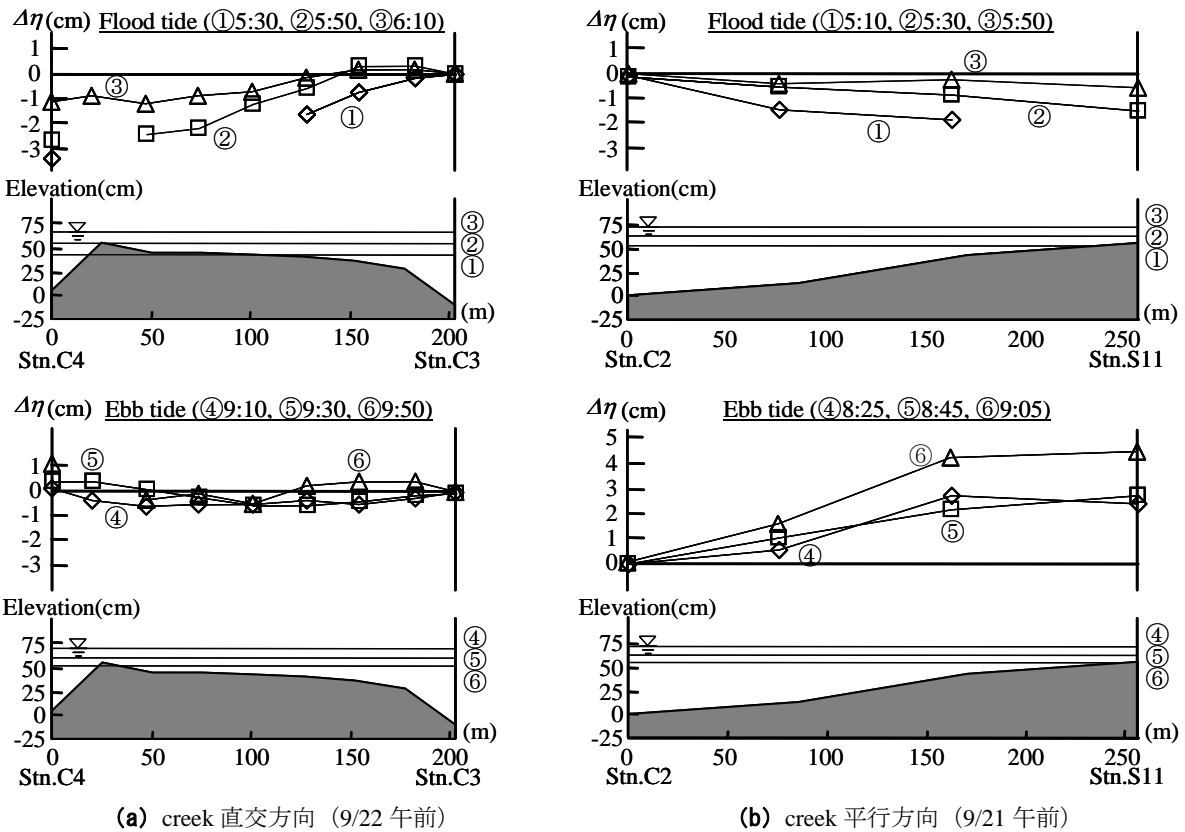


図-21 水位差 $\Delta\eta$ の空間分布 (大潮期)

これらの結果より, swamp 内の水位差としては, creek-I に対する直交方向に関しては上げ潮時の値が, 平行方向に関しては下げ潮時の値がそれぞれ顕著になっていることが確認された. また, 下げ潮時における creek 平行方向の水位勾配は swamp 北側 (Stn.C2 側) の方が swamp 南側よりも大きくなっている. これは, 図-12 に示された, 下げ潮時において swamp 北側では creek 平行方向の流れが顕著になる, という結果と符合していることが分かる.

(3) 水位の平面分布の形成要因

では, なぜ, このような水位分布の空間構造が氾濫原内において形成されるのであろうか? この要因を検討するため, ここでは creek 内の水位変化に着目して, Stn.C2 の水位 η_{c2} と Stns.C3, C4 の水位 η_{c3} , η_{c4} との差の時系列変化を図-22 に示す. 図-4 (b) に示しているように, Stn.C2 は3地点の中で最も河口に近く, Stns.C3, C4 はそれぞれ creek-I, II に位置している. これを見ると, 上げ潮時には, Stns.C2 と C3 の水位差は小さいものの, Stns.C2 と C4 の水位差は最大で 3cm に達しており, creek-I と II では水位上昇の様子が異なっていることが分かる. これは, creek-I と II では川幅や水深が異なるため, creek 断面全体の摩擦力に明確な違いがあるためであると

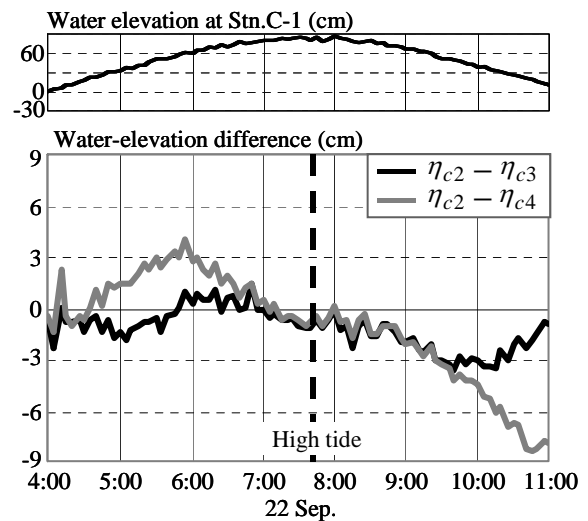
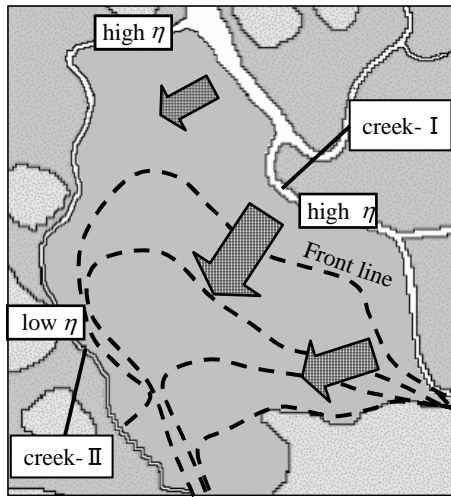
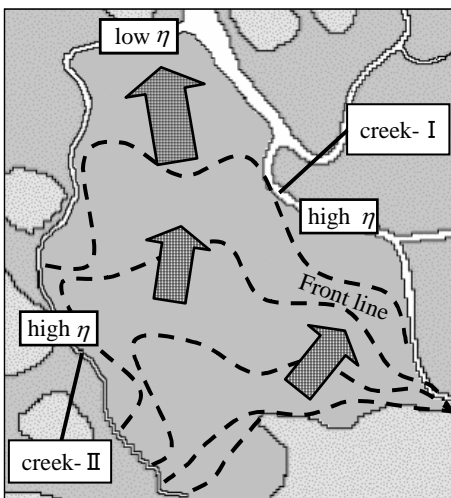


図-22 creek 内水位差の時間変化 (大潮期, 9/22)

考えられる. 一方, 下げ潮時では, Stns.C3, C4 の両地点ともに Stn.C2 との水位差が下げ潮時前期・中期まで同程度となっており, 後期にのみ Stn.C4 の水位差の絶対値が Stn.C3 よりも大きくなっていることが分かる. このように下げ潮時では, 上げ潮時と異なって, 全般的に creek-I と II の水位は同程度に変化している様子がうかがえる. これらの結果をまとめると, creek 内水位の大小関係は, 上げ潮時では, $\eta_{c2} = \eta_{c3} > \eta_{c4}$ であり, 下げ潮時では $\eta_{c2} < \eta_{c3} = \eta_{c4}$



(a) 上げ潮時



(b) 下げ潮時

図-23 潮汐フロント（点線）と平面流動パターン（矢印）の模式図（ η ：水位）

となり、前節で示した swamp 内の水位勾配の上げ潮時と下げ潮時の様子と一致する結果が得られている。このような結果により、swamp 内における水位の平面分布は、creek 内における水位差により規定されている、ということが具体的に明らかとなった。

以上の結果を踏まえて、swamp における潮汐侵入・後退挙動と平面流動パターンの模式図を図-23に示す。上げ潮時には河口側や creek-I 側の水位上昇が早く、creek-I から creek-II へ向かう方向に水位勾配が大きくなるため、卓越流向は creek-I に対して直交方向となる。一方、下げ潮時には河口側の水位低下が creek-I や II よりも顕著であるため、swamp 奥部から河口へ向かう方向に水位勾配が大きく、結果として creek-I に対して平行方向の流れが顕著となる。以上のことから、swamp 内の平面流動パターンは、水位勾配の平面分布の影響を強く受けており、その水位勾配の形成過程に対しては creek 内の水位差が大きく関与していることが明らかとなった。ま

た、creek の平面配置は、creek 内の水位分布を介して、swamp 内の水位勾配やそれによって引き起こされる流動パターンと密接に関係しているものと推察される。

6. 結論

マングローブ氾濫原における水理環境の平面構造を把握するために、沖縄県石垣島吹通川マングローブ水域において水理環境に関する長期連続観測と多点平面観測を実施することを試みた。そこで得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 長期連続観測結果に基づいて、swamp 内の流動特性に対する河川出水・潮汐の影響を検討した。その結果、河川出水の影響が顕著となるのは、大規模な降雨イベント（ここでは日雨量 50mm 以上）に伴う河川出水時に限定されていた。また、潮汐影響に関しては、潮位振幅に対応する形で上げ潮時・下げ潮時の流速最大値が増減することが示された。

(2) 二つの creek に挟まれた swamp 内における流動構造としては、相対的に水深や川幅の大きい creek-I に対して直交方向のみならず、平行方向の流速成分が有意な大きさに生じていることが明らかとなった。また、上げ潮時と下げ潮時の流向や流速レベルが異なる、という潮汐流の非対称性が swamp 内の広範囲にわたり見られることが明らかとなった。

(3) 氾濫原上の流動特性に対する二つの creek の影響に関しては、全体的には、規模の大きい creek-I の影響が大きいものの、二つの creek の分岐点に近い swamp 北側では両者の影響を受けて複雑な流況特性となることが示された。

(4) このような平面流動パターンの形成メカニズムを検討するために、水位勾配と流速の関係について検討することを試みた。その結果、両者が良好に対応していることから、水位勾配が駆動力となって、swamp 内における平面的な流動パターンや潮汐流非対称性を引き起こしていることが示された。

(5) swamp 内における水位の空間分布の形成要因としては、それを取り囲む creek 内の水位分布が大きく関与していることが明らかとなった。

なお、swamp 内の流動場に及ぼす影響因子としては水位勾配以外にも、マングローブ植物の抵抗や地盤高さ分布が挙げられる。したがって、今後、別途実施しているマングローブ水域における流動シミュレーション¹⁷⁾に基づく数値実験により、これらの要素が氾濫原上の平面流動特性に及ぼす効果につい

て検討する予定である。

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佐藤慶太氏、中村武志氏、元学部生田口富之氏には大変お世話になった。また、東京大学大学院生田所奈美氏（当時東京理科大学学部生）には現地観測の実施やデータ整理を行う際に御助力を頂いた。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) Robertson, A. I. and Alongi, D. M.: Tropical Mangrove Ecosystems, *American Geophysical Union*, pp.1-329, 1992.
- 3) Lugo, A. E. and Snedaker, S. C.: The ecology of mangroves, *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol.5, pp.39-64, 1974.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 肥後竹彦, 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—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.63-78, 1993.
- 8) 中辻啓二, 伊藤渉, 村岡浩爾, Falconer, R. A.: 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, 1994.
- 9) 浅野敏之, 瀬戸口喜祥: 狭小水路と氾濫源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, 1995.
- 10) Furukawa, K., Wolanski, E. and Mueller, H.: Currents and sediment transport in mangrove forests, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.44, pp.301-310, 1997.
- 11) Ridd, P. V., Stieglitz, T. and Lacombe, P.: Density-driven secondary circulation in a tropical mangrove estuary, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.47, pp.621-632, 1998.
- 12) 赤松良久, 池田駿介, 中嶋洋平, 戸田祐嗣: 現地観測に基づくマングローブ水域における有機物・栄養塩輸送に関する研究—大潮期に着目して—, 土木学会論文誌, No.698/II-58, pp.69-80, 2002.
- 13) 金澤延幸, 松田義弘: マングローブ河川における潮汐流の非対称特性, 海の研究, Vol.3, No.1, pp.1-11, 1994.
- 14) 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.
- 15) 二瓶泰雄, 中村武志, 綱島康雄: 現地観測に基づくマングローブ河口域における sill 形状と海水交換特性の検討, 海岸工学論文集, Vol.50, 2003 (印刷中).
- 16) 二瓶泰雄, 田所奈美, 綱島康雄: 石垣島吹通川マングローブ氾濫原における塩分・濁質環境の平面特性, 水工学論文集, Vol.48, 2004 (投稿中).
- 17) 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.
- 18) 田中總太郎, 杉村俊郎, 西村司, 二宮泰, 畠山祐二: NOAA-6/AVHRR データによる黒潮流動ベクトル図の作成と海洋渦および短周期蛇行に関する考察, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.2, pp.11-30, 1982.
- 19) 二瓶泰雄, 綱島康雄, 佐藤正也, 青木康哲, 佐藤慶太, 灘岡和夫: 現地観測に基づくマングローブ域の水溫・放射環境に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.49, No.2, pp.1206-1210, 2002.
- 20) 黒沢勝彦, 鈴木款, 立田穰, 杉岡伸一: マングローブ生態系の水中部における有機・無機物質フラックス, 日本マングローブ学会'02年次大会講演要旨集, 23p., 2002.

(2003. 4. 2 受付)

HORIZONTAL STRUCTURES ON HYDRODYNAMIC ENVIRONMENTS IN A MANGROVE SWAMP

Yasuo NIHEI and Yasuo TSUNASHIMA

To clarify horizontal structures of hydrodynamic environments in a mangrove swamp, we have conducted field measurements in a mangrove swamp with two surrounding creeks, which is located in Fukido River estuarine section of the Ishigaki Island, Okinawa. The results indicate that the tidal currents in the swamp flow towards not only the normal direction to the creek, but also the parallel direction. We have also found the tidal asymmetry of the swamp currents that the differences of the flood and ebb water velocities appear appreciably. These patterns of the swamp currents are governed with the water surface slope in the swamp, which is closely related with the differences of the water elevation along the surrounding creeks.