

マングローブ水域における出水時の粒子態物質の輸送に関する研究

赤松良久¹・池田駿介²・中嶋洋平³・戸田祐嗣⁴

¹正会員 博士(工) 日本学術振興会特別研究員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科環境理工学創造専攻 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

²フェロー会員 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 修士(工) (株)建設技術研究所 (〒980-0014 宮城県仙台市青葉区本町2-15-1)

⁴正会員 博士(工) 東京工業大学大学院助手 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

急勾配な河川と河口のマングローブ樹林が特色である沖縄地方のマングローブ水域では出水による粒子態の物質の輸送がマングローブ生態系に大きな影響を与えていると考えられる。そこで、本研究では現地観測および数値計算により出水時のマングローブ水域における粒子態物質の輸送と出水がマングローブ生態系に及ぼす影響について検討した。その結果、出水の規模だけでなく、出水と潮汐とのタイミングが河口域に位置するマングローブ水域での粒子態物質の挙動を支配していることが明らかになった。また、出水時のマングローブ水域へリンが供給されることがわかった。

Key Words : mangrove, sediment transport, nutrients, flood, numerical simulation

1. はじめに

熱帯・亜熱帯沿岸域で見られるマングローブ水域には、極めて多様な水生生物が生息することが知られており、水界生態系の保全や水産資源の生産の場といった観点からマングローブ水域に対して高い注目が集まっている。

マングローブ水域は熱帯・亜熱帯に位置し、台風やサイクロンあるいはスコールによる集中豪雨に見舞われるため、河川の出水が多い状況にある。そのため、沖縄本島をはじめとする南西諸島の河川では、赤土の流出による河川・沿岸域の濁水化、珊瑚礁域の生態系の破壊などの大きな問題が生じている。近年、赤土の流出に関する研究は盛んに行われており、現地での赤土の生産・流出に関する調査(酒井ら¹⁾、南ら²⁾、南ら³⁾)から赤土の流出予測モデルに関するもの(酒井ら⁴⁾、比嘉⁵⁾、Enrico・灘岡⁶⁾、大澤・酒井⁷⁾)まで様々な研究がなされている。沖縄本島をはじめとする南西諸島に見られる我が国のマングローブ群落は河川に沿って比較

的狭い範囲に生育していることから、出水の影響を強く受けていると考えられる。しかし、河口域に存在し、珊瑚同様に出水の影響を大きく受けるマングローブ水域での出水時の土砂・栄養塩の輸送に関する研究は少ない。マングローブ水域での土砂の輸送に着目した研究としては平水時の掃流砂量についてLarcombe and Ridd⁸⁾によって詳細な調査がなされているが、出水時の土砂の輸送に関する研究はほとんどない。

そこで、本研究では、出水時のマングローブ水域での粒子態の物質循環に着目して、現地観測および出水時の浮遊砂輸送のシミュレーションを行うことによって、出水がマングローブ水域の環境に与える影響を把握する。

2. 観測の概要

(1) 観測地概要

現地観測は沖縄県石垣島名蔵川において、雨の

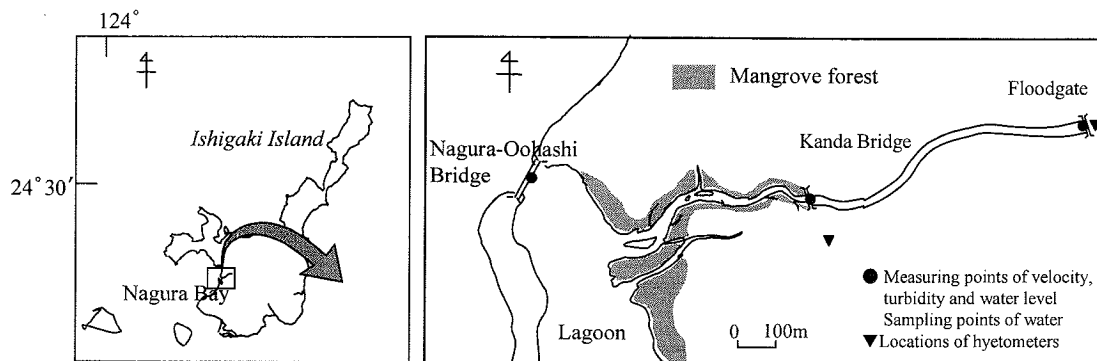


図-1 観測地地図

多い時期である2002/9/1～2002/11/5にかけて行った。名蔵川は石垣島最高峰である於茂登岳(560m)中腹から端を名蔵湾までにいたる全長約4.5mの比較的小さい河川であり、その流域面積は約16km²である。名蔵川流域では約70%が森林で約20%が畑地であり、残りの約10%が水田、果樹園あるいは住宅地で占められている。畑地の大部分はサトウキビ畑であり、降雨時にはこのサトウキビ畑から大量の赤土が流出し、沿岸域の生態系の破壊を招いている。

名蔵川の河口部には名蔵川アンパルと呼ばれる広い干潟(ラグーン)が存在し、その東側に河岸に沿って約16ha⁹⁾にわたるマングローブ群落広がっている(図-1)。名蔵川河口域のマングローブ群落は比較的長い区間にわたり河岸に沿って整然と生育しており、マングローブ水域での物質循環の把握に適した観測地であると考えられる。観測は河口に位置する名蔵大橋から、その約2.5km上流側に位置する取水堰までのマングローブ群落を含んだ区間を対象として行った。

(2) 観測方法

現地観測では上流の取水堰、神田橋および名蔵大橋に流速計、濁度計、水位計を設置し、流速・濁度・水位の連続計測を行った(図-1)。また、観測期間中図-1の▼に示す位置において雨量計を設置した。さらに、取水堰および神田橋においては自動採水機を設置し、出水時に2時間ごとに採水を行った。採水したサンプルは冷蔵し、直ちに空輸し、研究室に持ち帰り有機物・栄養塩濃度(溶存態有機炭素DOC、粒子態有機炭素POC、リン酸態リンPO₄-P、全リンT-P、アンモニア態窒素NH₄-N、硝酸態窒素NO₃-N、亜硝酸態窒素NO₂-N、全窒素T-N)、懸濁態物質濃度(以下、SS濃度)について分析を行っ

た。栄養塩濃度は、多項目自動分析器(AACS-II, BRAN+LUEBBE)を用いた比色法で定量化し、溶存態および粒子態の有機炭素濃度はTOC-Control(TOC5000A, (株)島津製作所)を用いて測定した。また、レーザー粒度計(SAID-3000, (株)島津製作所)を用いて出水時の流水中の粒度分布の測定も行った。

さらに、8/15,10/20,11/5に河口のマングローブ林内の18点において表層(1cm)土壌のサンプリングを行い、炭素含有量、窒素含有量、リン含有量および粒度分布の測定を行った。また、土壌のサンプリングポイント付近に塩ビパイプを土壌中に埋め込み、9/9,10/20,11/5にパイプの先から地表面までの距離を計測することによって、観測期間中の出水による土壌の堆積厚の変化を計測した。

3. 観測結果

(1) 観測期間中の雨量および河川流量

図-2に観測期間中の上流の取水堰における雨量および河川流量を示す。名蔵川は平水時の河川流量は0.1～0.4m³/s程度であり、流量は非常に少ない。9月6日～9月8日には台風の接近にともない時間降水量10mm/h程度の弱い降雨がみられ、河川流量は最大1.5m³/sに達している。また、9月21日および9月25日においては時間降水量37～38mm/hの強い雨が1,2時間程度降り、河川流量は5.7～7.5m³/sまで急増している。10月7日～10月11日にかけては断続的に10mm/h程度の降雨が続き、河川流量も5.4～6.2m³/sまで増加している。さらに、10月19日にも時間降水量43mm/hの強い集中豪雨があり、最大流量は10m³/sに達している。10月23日～10月25日および10月30日～10月31日の降雨では取水堰での放流が行われ、流量が計測不能となっている。なお、10

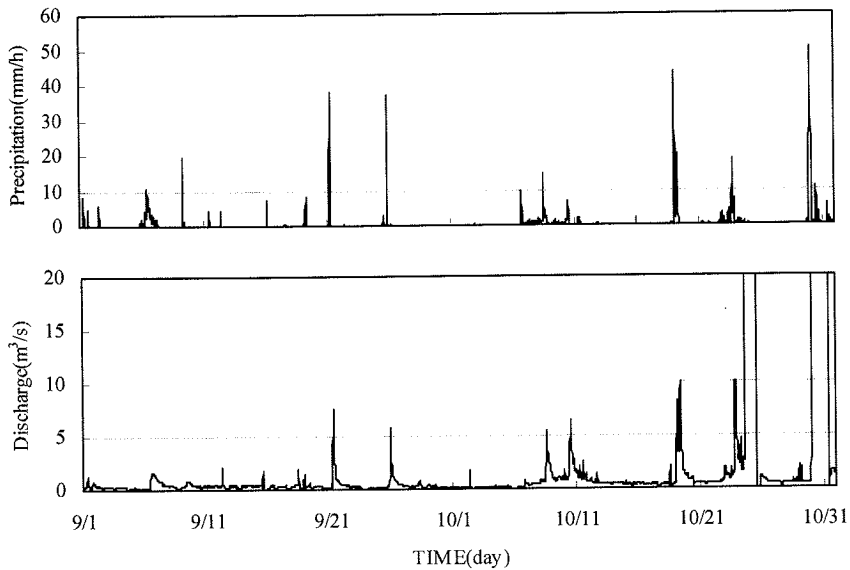


図-2 観測期間中の雨量および河川流量

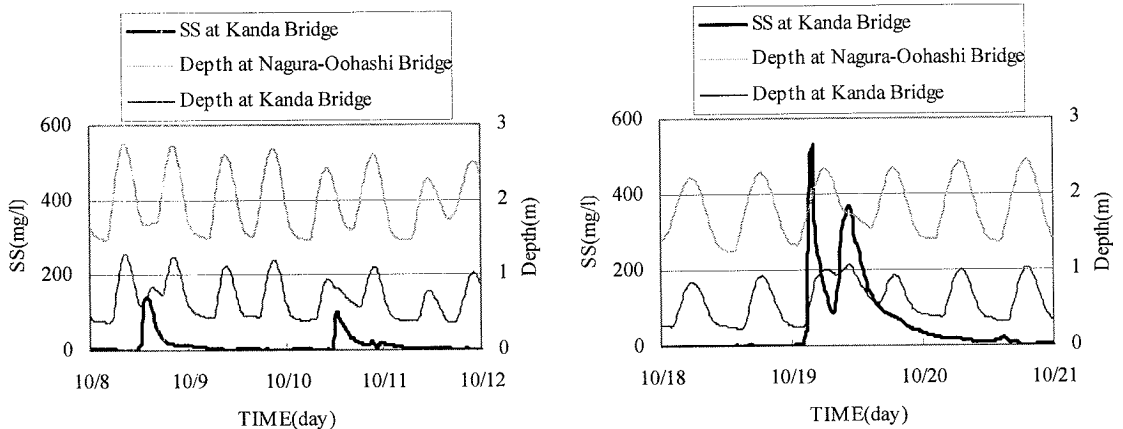


図-3 10月8日～10月12日および10月18日～10月21日にかけての神田橋でのSS濃度と名蔵大橋および神田橋での水深の時系列変化

月30日～10月31日の出水は非常に大規模なものであり、超過確率年10.4年に相当する。

(2) 出水流中の物質濃度

a) 懸濁態物質濃度および粒径

図-3に10月8日～10月12日および10月18日～10月21日にかけての神田橋でのSS濃度と名蔵大橋および神田橋での水深の時系列変化を示す(ここで示すSS濃度は河床底面から約15cmの位置に設置した濁度計から得られたデータである)。10月8日および10月10日の出水では神田橋でのSS濃度が増加する時間帯は引き潮であり、そのため土砂は沿岸域まで速やかに輸送された。10月19日の出水では神田橋でのSS濃度の増加は上げ潮時に起こって

おり、満潮時には海水の浸入によってSS濃度の低下が見られる。したがって、本観測対象域のような流量の少ない河川の感潮域では、出水時の土砂の輸送に潮汐が大きく影響していることがわかる。

図-4に10月8日および10月19日の出水における神田橋での流水中の浮遊砂粒径の頻度分布を示す。両方の出水において10～20 μ mにおいてピークが見られる。畑から流出する土砂の平均粒径が10 μ m程度であることから¹⁰⁾、畑からの流出水が河川内に流れ込んだため、10～20 μ mの粒径の浮遊砂が多かったと考えられる。また、50～60 μ mにおいてもピークが見られるが、これは出水時の速い流れによって巻き上げられた河床の土砂が浮遊砂として輸送されていたためと考えられる。50～60 μ mにお

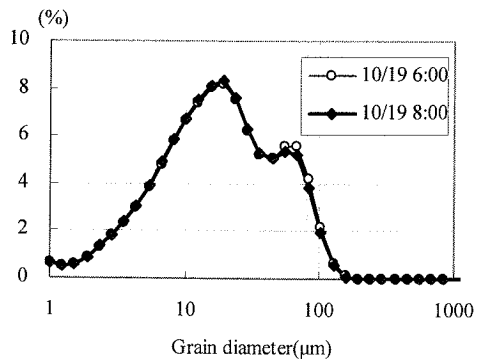
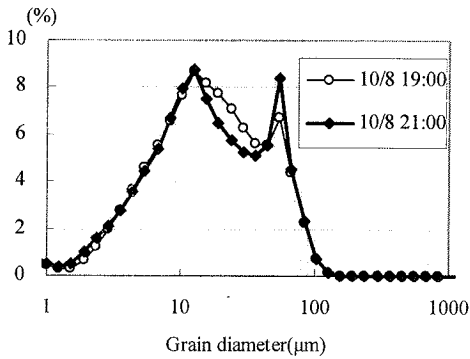


図-4 10月8日および10月19日の出水における神田橋での流水中の浮遊砂粒径の頻度分布

けるピークは10月8日の出水においてより顕著に見られるが、この原因は不明であり、今後の検討が必要である。

b) 有機物・栄養塩濃度

図-5に10/18 18:00～10/20 6:00にかけての神田橋における溶存態の有機物・栄養塩濃度（溶存態有機炭素DOC、硝酸態窒素 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、アンモニア態窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、リン酸態リン $\text{PO}_4\text{-P}$ ）とSS濃度の時系列変化を示す（ここで示す溶存態の有機物・栄養塩およびSS濃度は河床底面から約30cmの位置に設置した自動採水機から得られたデータである）。溶存態有機炭素濃度は10月19日の出水ではSS濃度の増加にともなって、増加しているものの、平水時の干潮時（10/18 18:00）の濃度と大差はない。硝酸態窒素は降雨後のSS濃度の増加に伴って増加し、その後、SS濃度は減少するにもかかわらずしばらくの間高い濃度を維持している。本観測では流域における地下水の採取・分析を行っていないため、断定はできなが、これは流域の地下水中に含まれた高濃度の硝酸態窒素および亜硝酸態窒素が降雨後に浸透流として長い時間をかけて河川内に流入したことによるものと考えられる。リン酸態リンは大きな出水の起こった10月19日にはSS濃度の増加に伴って増加している様子が見られる。これは10月19日の出水においては比較的長い時間にわたって土砂の流出が続いており、上げ潮時に塩水が浸入してくることにより、土砂に吸着したリンが放出されたためと考えられる。

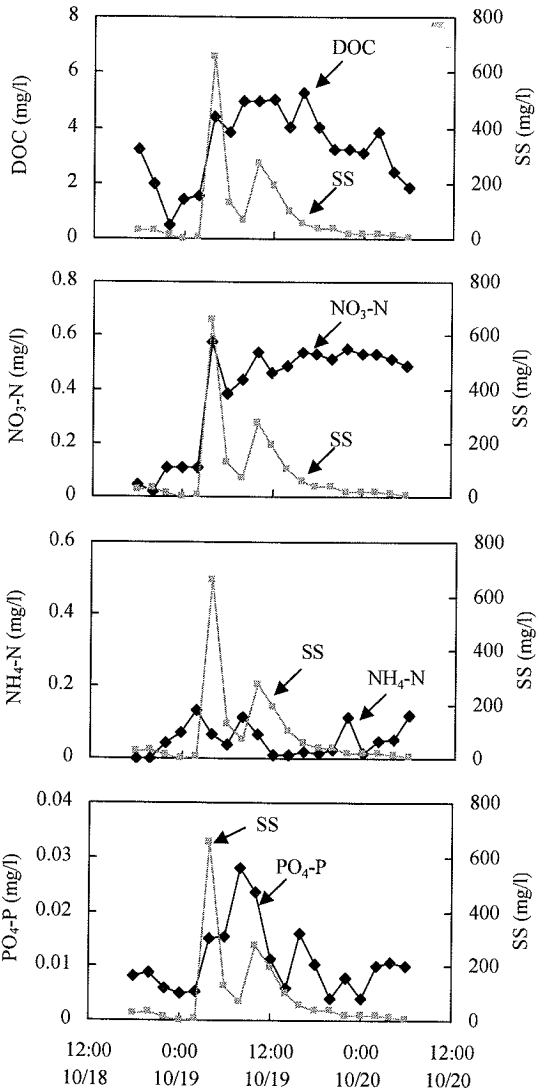


図-5 10月19日の出水時の神田橋における溶存態有機物・栄養塩濃度とSS濃度の時系列変化

図-6に10/18 18:00～10/20 6:00にかけての神田橋における粒子態有機物・栄養塩濃度（粒子態有機炭素POC、粒子態窒素P-N、粒子態リンP-P）とSS濃度の時系列変化を示す。粒子態の窒素濃度は溶存態の窒素濃度（硝酸態窒素、アンモニア態窒素）と同程度の濃度であり、SS濃度の増加に伴った増加はわ

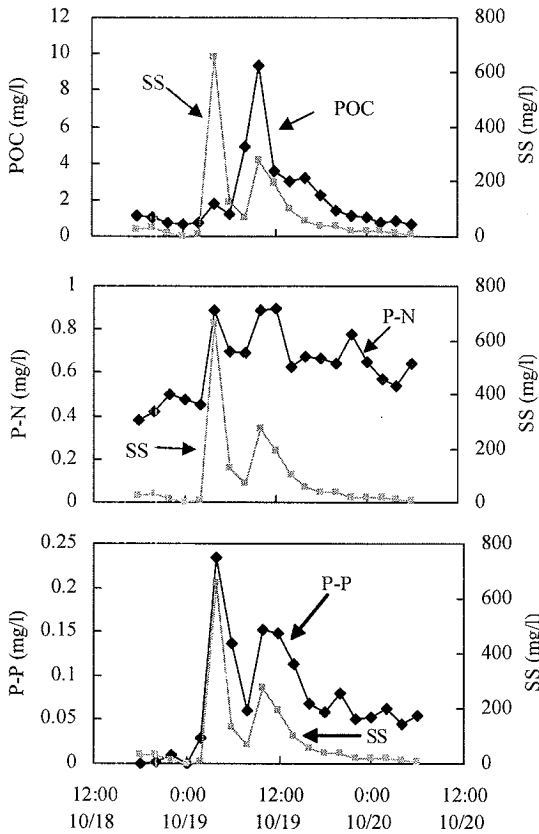


図-6 10月19日の出水時の神田橋における
粒子態有機物・栄養塩濃度とSS濃度の時系列変化

ずかに見られるものの、最大でも平常時の2倍程度の濃度である。これに対して、粒子態のリンおよび有機炭素濃度はSS濃度の増加ともなって、顕著な増加が見られ、その濃度は平常時にくらべて10倍以上の高い濃度となっている。また、出水時の粒子態のリン濃度は溶存態のリン濃度に比べて10倍程度高く、これは土砂に多くのリンが吸着して出水時に土砂とともに輸送されていたためであると考えられる。

図-7に10月8日～10月10日および10月18日～10月20日の出水におけるSS濃度と粒子態有機炭素、粒子態窒素、粒子態リン濃度の相関図を示す。なお、神田橋では潮汐の影響を強く受けるためここでは取水堰におけるデータを用いた。粒子態窒素濃度に関してはほとんど相関がないものの($P-N:R^2=0.007$)、粒子態有機炭素および粒子態リン濃度についてはSS濃度と強い相関があり($POC:R^2=0.80$, $P-P:R^2=0.58$)、出水時に土砂とともに輸送されていることがわかる。

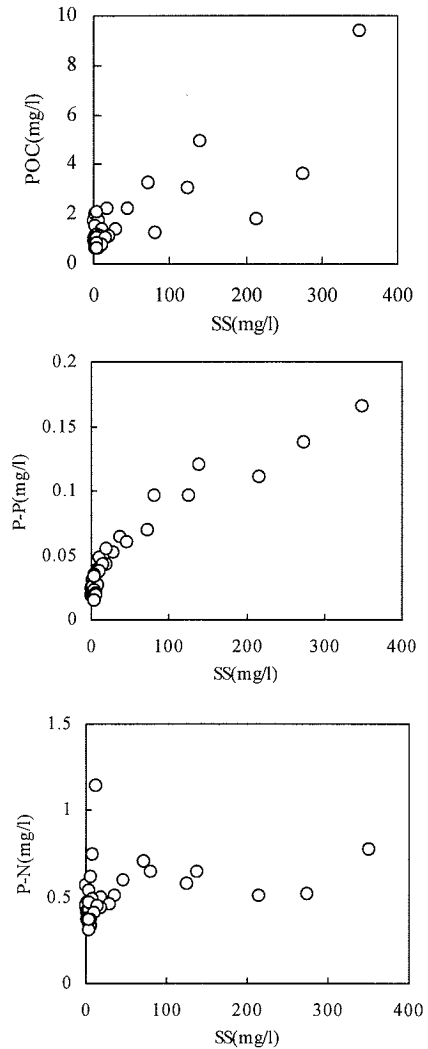


図-7 SS濃度と粒子態有機炭素、粒子態窒素、
粒子態リン濃度の相関図

(3) マングローブ林内土壌の変化

a) 土壌堆積厚

図-8にマングローブ林内における9/9,10/20,11/5の土壌堆積厚を示す。マングローブ林内においては10月22日には9月9日にくらべて全体的に堆積厚が増加している。9月9日～10月22日にかけては中規模の洪水が数回起こっており、その洪水による浮遊砂および掃流砂輸送によってマングローブ林内に土砂の供給があったと考えられる。それに対して、11月5日においては堆積厚が減少しているが、これは10月22日～11月5日には超過確率年10.4年に相当する大規模な洪水があったためマングローブ林内でも強い流れが生じ、林内土壌の流出

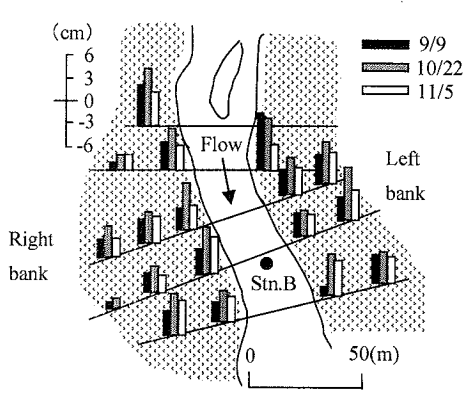


図-8 マングローブ林内の土壌堆積厚

が起こったためと推察される。

b) 有機物・栄養塩含有量

図-9 にマングローブ林内における 8/15,10/20,11/5 の土壌中の窒素・リン含有量(%)を示す。8月15日においてはそれ以前の2,3ヶ月間に大きな出水がなくマングローブ林内土壌は安定状態にあったと考えられ、8月15日の窒素・リン含有量は平水時の代表的な値として示した。窒素に関しては明確な傾向がみられないものの、リンに関しては10月22日において右岸の上流側を除いて全体的に土壌中のリンの含有量が増加していることがわかる。これは8月15日～10月22日にかけて数回の出水あり、リンは土砂に吸着して輸送されることから、出水に伴うマングローブ林内への土砂供給によって、林内の土壌中のリンの含有量が増加したものと考えられる。

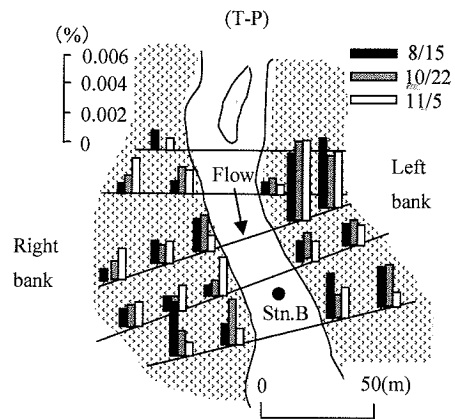
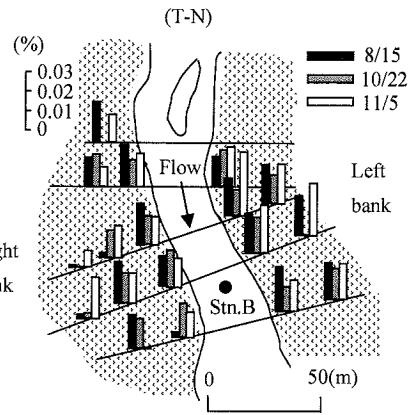


図-9 マングローブ林内の窒素・リン含有量

4. 数値計算モデル

(1) 流れの基礎方程式

河口に位置するマングローブ水域は塩水と淡水の混合する複雑な流れ場となっている。本研究で対象としたマングローブ水域の水深は小さく、強混合型の河川である。したがって、本研究においては、一般座標系で記述された水深平均のレイノルズ方程式を用いて流れ場の解析を行った¹¹⁾。河床せん断力は Manning 則より与え、マングローブ樹木による形状抵抗については抵抗係数と植生密度の関数として運動方程式内に取り入れている。乱流モデルとして 0 方程式モデルを用いている。流れに関する基礎方程式系を以下に示す¹¹⁾。

・連続式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

・運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\xi}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) \\ & - \frac{\tau_b^\xi}{\rho J} - \frac{F^\xi}{\rho J} + \frac{\xi_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u^2} h \right) + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u^2} h \right) \\ & + \frac{\xi_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v^2} h \right) + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v^2} h \right) \\ & + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'} h \right) + \frac{2\xi_x \xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'} h \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\eta}{J} \right) - \\ & \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -gh \left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) \\
&- \frac{\tau_b^n}{\rho J} \frac{F^n}{\rho J} + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u^2 h} \right) + \frac{\eta_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u^2 h} \right) \\
&+ \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v^2 h} \right) + \frac{\eta_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v^2 h} \right) \\
&+ \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v' h} \right) + \frac{2\eta_x \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v' h} \right)
\end{aligned} \quad (3)$$

ここで h : 水深, $(\xi_x, \eta_x, \xi_y, \eta_y)$: 変換のマトリックス, J : 座標変換のヤコビアン, M, N : デカルト座標系上の流量フラックス, u, v : デカルト座標系上の水深平均流速ベクトル, U, V : 流速ベクトルの反変成分, τ_b^x, τ_b^y : 底面せん断力の反変成分, F^x, F^y : 植生による抗力の反変成分である。

Rynolds 応力項に関しては, それぞれ以下の式で与えることとし,

$$\begin{aligned}
-\overline{u'^2} &= 2D_h \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2}{3}k \\
-\overline{u'v'} &= D_h \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\
-\overline{v'^2} &= 2D_h \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3}k
\end{aligned} \quad (4)$$

渦動粘性係数 D_h は水深と摩擦速度により与え, 時間水深平均乱れエネルギー k に関しては, Nezu and Nakagawa¹²⁾ により得られている等流状態の粗面開水路乱流の乱れエネルギーの鉛直分布を水深積分した以下の式で与えることとする。

$$\begin{aligned}
D_h &= \alpha hu^* \\
k &= 2.07u^{*2}
\end{aligned} \quad (5)$$

ここに u^* : 摩擦速度で, $u^* = \sqrt{\tau_b / \rho}$ である。また, 渦動粘性係数に関する係数 α は 0.3 とした。

(2) 浮遊砂輸送の基礎方程式

浮遊砂の輸送方程式および河床表層中の土砂堆積量の変化式は以下の通りである。

$$h \left(\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} \right) = \quad (6)$$

$$h \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{sh} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{sh} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + Er - De$$

$$\frac{d(sed)}{dt} = De - Er \quad (7)$$

ここに, C : 水深平均浮遊砂濃度, ε_{sh} : 水平方向浮遊砂拡散係数, Er : 浮遊砂巻き上げ速度, De : 浮遊砂堆積速度, sed : 土砂の堆積量である。

浮遊砂の巻き上げ速度 Er は, 一様粒径の浮遊砂で覆われた河床面上の浮遊砂巻き上げ速度式 (池田¹³⁾) でモデル化した。

$$Er = K \left(\frac{u_*}{V_s} \right)^2 V_s \quad (8)$$

ここに, K : 定数 ($=6.7 \times 10^{-5}$), V_s : 浮遊砂の沈降速度である。沈降速度 V_s は Rubey の式より算出した。

浮遊砂の堆積速度 De は, 河床近傍の浮遊砂濃度 C_b に浮遊砂沈降速度 V_s を乗じることにより算出した。

$$De = C_b V_s = \alpha_s C V_s \quad (9)$$

ここに α_s : 定数であり, 浮遊砂の鉛直方向濃度分布に平衡状態を仮定することにより, 以下のようにならされる (池田¹³⁾)。

$$\alpha_s = \frac{V_s h}{\varepsilon_z \left[1 - \exp \left(-\frac{V_s h}{\varepsilon_z} \right) \right]} \quad (10)$$

ここに ε_z : 鉛直方向浮遊砂拡散係数であり, $\varepsilon_z = 0.077u_* h$ で与えた (Ikeda and Izumi¹⁴⁾)。また, 浮遊砂の水平方向拡散係数 ε_{sh} は運動量の拡散係数 D_h と等しいものとした。

浮遊砂の輸送方程式についても, 流れ場の基礎方程式同様に, デカルト座標系 (x, y) から一般曲線座標系 (ξ, η) に変換すると以下の式が得られる。

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Ch}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{CQ^x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{CQ^y}{J} \right) = \\
&\frac{\partial}{\partial \xi} h \left(\frac{\varepsilon_{sh} \xi_x^2 + \varepsilon_{sh} \xi_y^2}{J} \frac{\partial C}{\partial \xi} + \frac{\varepsilon_{sh} \xi_x \eta_x + \varepsilon_{sh} \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial C}{\partial \eta} \right) \\
&+ \frac{\partial}{\partial \eta} h \left(\frac{\varepsilon_{sh} \xi_x \eta_x + \varepsilon_{sh} \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial C}{\partial \xi} + \frac{\varepsilon_{sh} \eta_x^2 + \varepsilon_{sh} \eta_y^2}{J} \frac{\partial C}{\partial \eta} \right) \\
&+ \frac{Er}{J} - \frac{De}{J}
\end{aligned} \quad (11)$$

(3) 離散化手法・境界条件・初期条件

基礎方程式の離散化は有限体積法を用い, 移流項の離散化は一次精度の風上差分, 他の項に関しては二次精度中央差分を用いた。時間積分には Euler の完全陰解法を用い, 各時刻における収束計算は SOR 法を用いた。

境界条件は以下のように与えた。上流端では、観測値より与えられる流量を Manning 則に従って、横断方向の水深の 5/3 乗に比例するように配分し、下流端では、観測で得られた水位を与えた。浮遊砂濃度に関しては、上流端境界においては観測から得られた値を、下流端境界では流れが下げ潮の時は浮遊砂濃度の流下方向勾配をゼロとして、流れが上げ潮の時は沿岸域からの浮遊砂の流入を正確に見積もるために観測から得られた値を用いた。潮汐に応じて移動する水陸境界部では、境界と判定された地点において周辺計算格子との水位勾配を算出し、水位勾配と底面せん断力が釣り合うように流量フラックスを算出した。

初期条件は以下のように与えた。河道中央部の水位は、計算下流端の水位を計算区間の平均的な河床勾配に沿って上流方向に延長して与え、横断方向には各横断面内の河道中央部の水位と等しく与えた。初期流量フラックスの流下方向成分については、各横断面内において計算初期の流入流量 Q_{in} を Manning 則に従って水深の 5/3 乗に比例するように配分し、流量フラックスの横断方向成分はゼロとした。初期の浮遊砂濃度は観測で得られた上流端および下流端の濃度を線形補完で与えた。なお、これらの初期値を用い計算期間の一潮汐前から計算を行った。

(4) 計算条件

計算は沖縄県石垣島名蔵川河口域を対象として行い、図-10 に示す計算格子を用いた。計算対象域は沿岸域との境界である名蔵大橋から上流の神田橋までの約 1km 区間とした。計算は現地観測において詳細な境界条件データが得られている 10 月 8 日および 10 月 19 日の出水を対象として計算を行った。なお、ここでは出水時の上流端の神田橋の流水中の代表的な粒径である $10\mu\text{m}$ の浮遊砂を対象として計算

を行った。

5. 計算結果および考察

(1) 出水時の流速分布

図-11 に 2002/10/8 0:00 ~ 10/9 12:00 および 2002/10/19 0:00 ~ 10/20 6:00 にかけての Stn.B (図-10) での計算から得られた流速および水深の時系列変化を示す。また、堰で計測された降雨量も同時に示す。10 月 8 日の午後の降雨によって Stn.B における下げ潮流速は最大約 0.4(m/s) まで増加しており、それに対して、上げ潮流速は約 0.1(m/s) と非常に小さくなっている。この程度の降雨では河口に近い Stn.B においては降雨による顕著な水深の増加は見られない。また、10 月 19 日の 3:00 ~ 5:00 にかけての Stn.B における流速は、時間降水量 40mm 以上のはげしい降雨の影響で、上げ潮時にもかかわらず流下方向の最大流速は 0.5(m/s) まで達し、平水時の下げ潮最大流速の 2 倍以上の値になっていることがわかる。10 月 19 日の日中の干潮時においては河口に近い Stn.B においても明らかな水深の上昇が見られ、午前中の集中的な降雨の影響が河口近くまで及んでいたことがわかる。10 月 8 日および 10 月 19 日の出水における河川流量最大時の流速の空間分布および水際線を図-12 に示す。10 月 8 日の河川流量最大時 (13:45) は下げ潮であり、そのためマングローブ林内への海水の氾濫は見られなかった。10 月 19 日の河川流量最大時 (4:15) は上げ潮であったが、この時期潮位が低かったため、10 月 8 日の出水同様にマングローブ林内の浸水はほとんど見られない。

(2) 浮遊砂濃度および土砂堆積厚

図-13 に 2002/10/8 0:00 ~ 10/9 12:00 にかけての R-B, Stn.B, L-B (図-10) での計算によって得られた

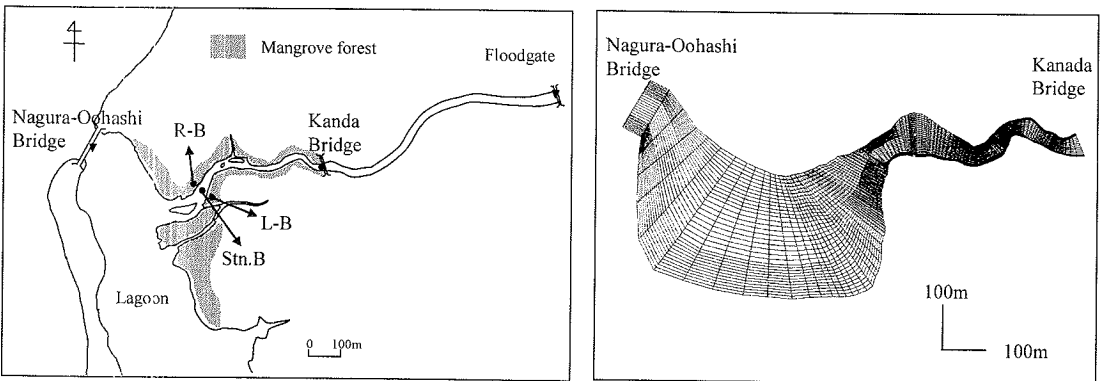


図-10 計算対象域および計算格子

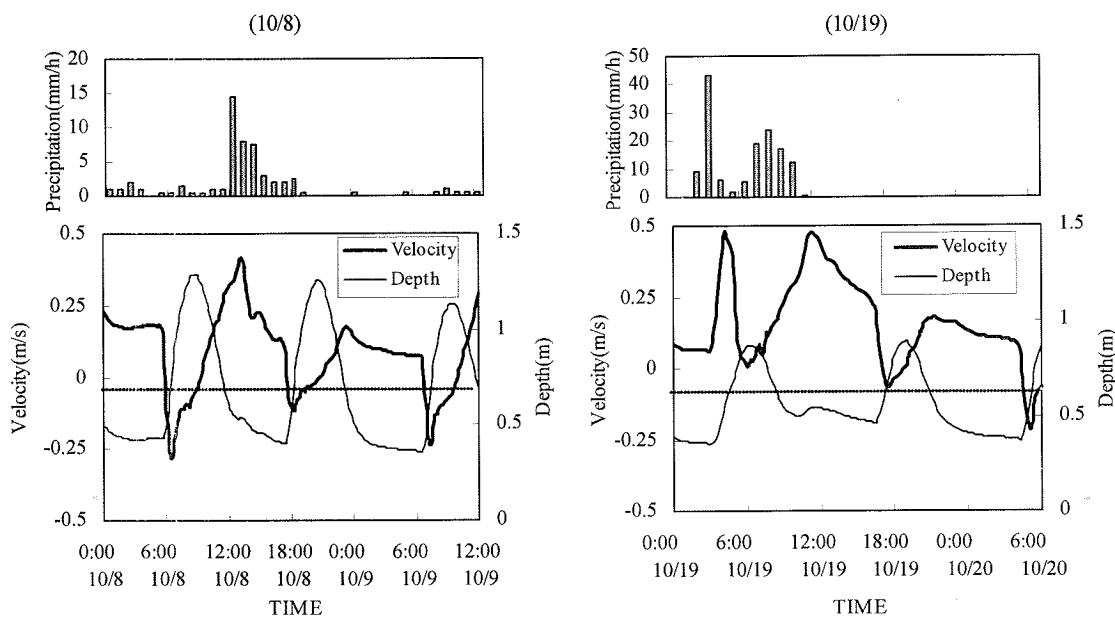


図-11 Stn.Bにおける計算から得られた流速および水深の時系列変化

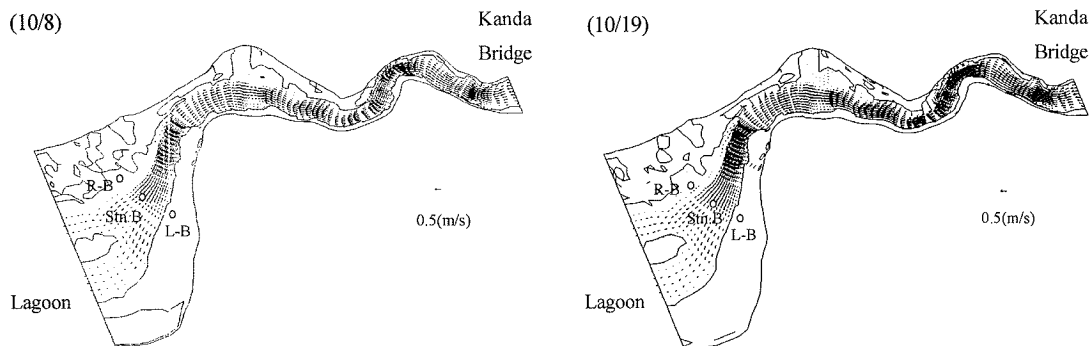


図-12 流量最大時の流速の空間分布および水際線

10 μ m 粒径の浮遊砂濃度および土砂堆積量の時系列変化を示す。Stn.Bにおける水深変化および取水堰で計測された降雨量も同時に示す。また、図-14に10月8日の干潮（流量最大）時(13:45)および満潮時(20:30)のSS濃度の空間分布を示す。10月8日の午後の降雨時は干潮であったため、土砂は速やかに河口に近いStn.Bまで輸送されており（図-14）、Stn.BにおけるSS濃度の顕著な増加が見られる。また、河川内では流量の増加する降雨時には河床の土砂堆積量が減少し、その後流速の低下とともに土砂の沈降によって土砂堆積量が増加している様子が見られる。マングローブ林内の右岸、左岸に位置するR-B、L-Bにおいては、10月8日の午後の降雨直後は下げ潮であり、林内への氾濫はなくSS濃度はゼロ

である。降雨後の上潮時には、出水時にラグーンおよび沿岸域に運ばれた土砂を多く含んだ海水の浸入によって、R-B、L-BにおけるSS濃度は上昇し、林内に土砂が供給されていることがわかる。

図-15に2002/10/19 0:00～10/20 6:00にかけてのR-B、Stn.B、L-Bでの計算によって得られた10 μ m粒径の浮遊砂濃度および土砂堆積量の時系列変化を示す。Stn.Bにおける水深変化および取水堰で計測された降雨量も同時に示す。また、図-16に10月19日の流量最大時(4:15)、干潮時(11:15)、満潮時(18:30)のSS濃度の空間分布を示す。10月19日の深夜の時間降水量40mm以上の激しい降雨によって、河川内のStn.BにおけるSS濃度は5時前後に15mg/l程度まで増加している。また、10月19日の午前中の降雨

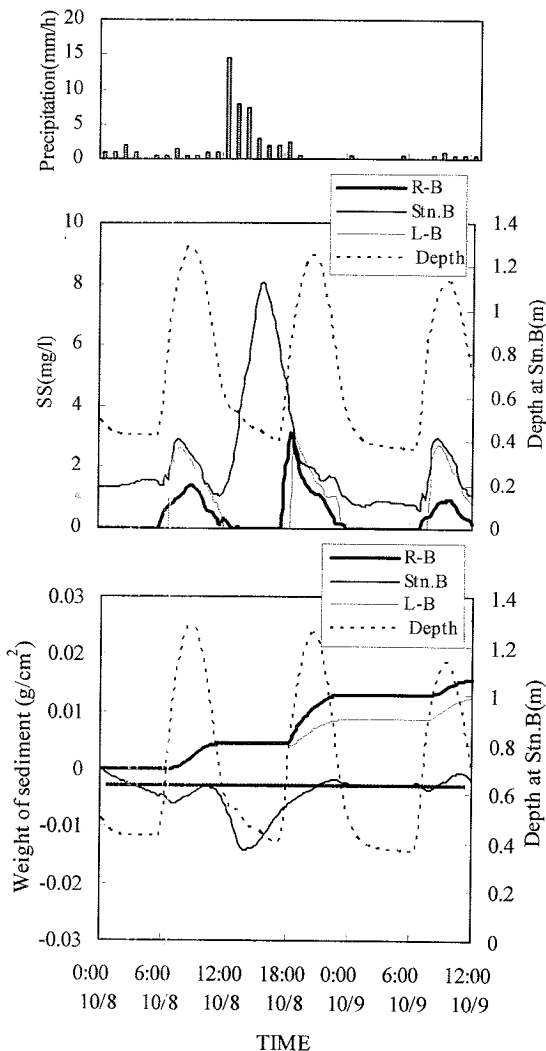


図-13 2002/10/8 0:00～10/9 12:00にかけてのR-B, Stn.B, L-Bでの計算によって得られた $10\mu\text{m}$ 粒径の浮遊砂濃度および土砂堆積量の時系列変化

によって、Stn.BのSS濃度は 20mg/l 近くまで上昇しており(図-15)、図-16からもわかるように10月19日の日中の干潮時(11:15)にはラグーンおよび河口域に多量の土砂が輸送されていることがわかる。10月19日の河川内のStn.BにおいてはSS濃度が非常に高く土砂沈降量が多かったため流量最大時においても土砂の堆積量の減少はほとんど見られず、10月19日の満潮時(18:30)まで堆積量は急激に増加している。また、10月19日夜の時間降雨量 40mm 以上の激しい降雨は上げ潮時に起こっており、そのため直後の満潮時には土砂を多く含んだ水塊がマングローブ林内に氾濫したと考えられ、林内のR-Bの土砂堆積量の顕著な増加が見られる。10月19日

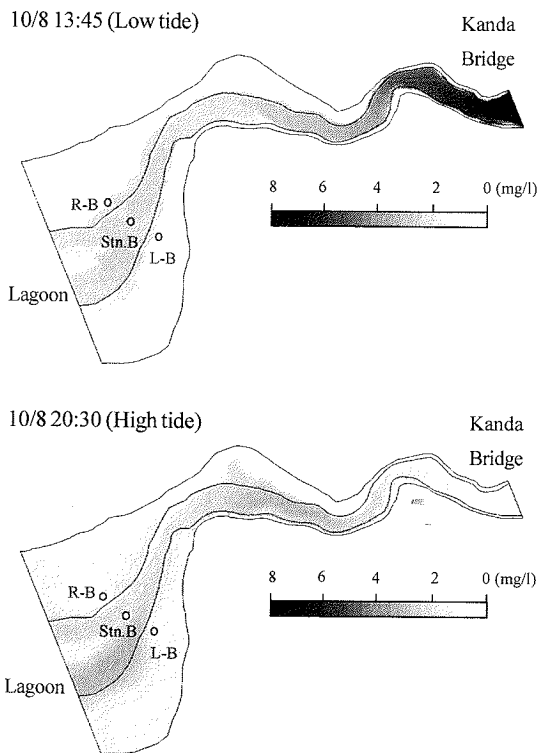


図-14 10月8日の干潮(流量最大)時(13:45)および満潮時(20:30)のSS濃度の空間分布

の午前中の降雨によって、日中の干潮時にはR-BでのSS濃度の増加が見られるものの、土砂堆積量の増加はみられない。これは干潮時に流量の増加により、マングローブ林内への河川水の氾濫があったものの、流速が大きかったためほとんど沈降が起こらなかったものと考えられる。また、10月19日は中潮であったため、マングローブ林内への氾濫は大潮期にあたった10月8日に比べて小規模であった。そのため、右岸のR-Bに較べて標高の高い左岸のL-Bでは10月19日の出水においては海水の氾濫が起こらず、土砂堆積はまったく起こらなかった。また、10月19日の出水の方が規模が大きいかかわらず、林内のR-Bでの土砂堆積量は大きな差が見られない結果となった。

(3) 栄養塩供給

数値計算結果から10月8日および10月19日の出水においてマングローブ林内への細粒土砂の供給があることがわかった。先述のように河川内に流出した細粒土砂には多くのリンが吸着しており、出水によってこれらのリンが細粒土砂とともにマングローブ林内および河川内に供給されていると

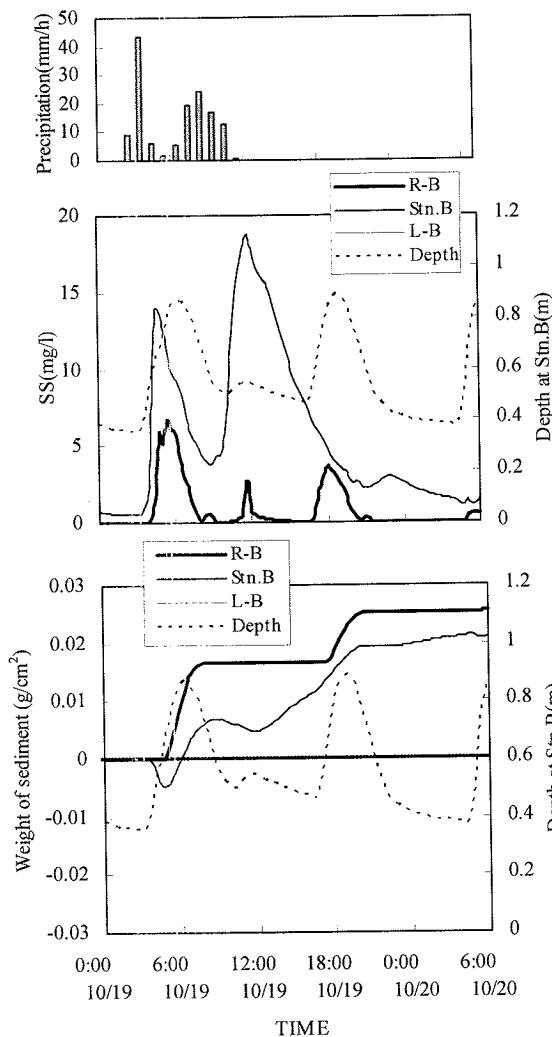


図-15 2002/10/19 0:00～10/21 6:00にかけてのR-B, Stn.B, L-Bでの計算によって得られた10 μ m 粒径の浮遊砂濃度および土砂堆積量の時系列変化

考えられる。そこで、19日の出水後にマングローブ林内で採取した堆積微細土砂中のリンの含有率(0.005%)と、数値計算結果から得られた土砂の供給量を用いて、10月8日および10月19日の出水においてマングローブ水域に供給されたリンの量を見積もった。

図-17に10月8日および10月19日の出水においてマングローブ水域に供給されたリンの量の空間分布を示す。なお一回の出水の影響を見積もるために、降り始めから降雨後の一潮汐経過後までの期間における土砂の堆積量を算出した。すなわち、10月8日の午後の出水においては10/8 12:00～10/9 3:00の期間での堆積量を、10月19日の午前中の出水では10/19 0:00～10/20 0:00の期間での堆積量を用

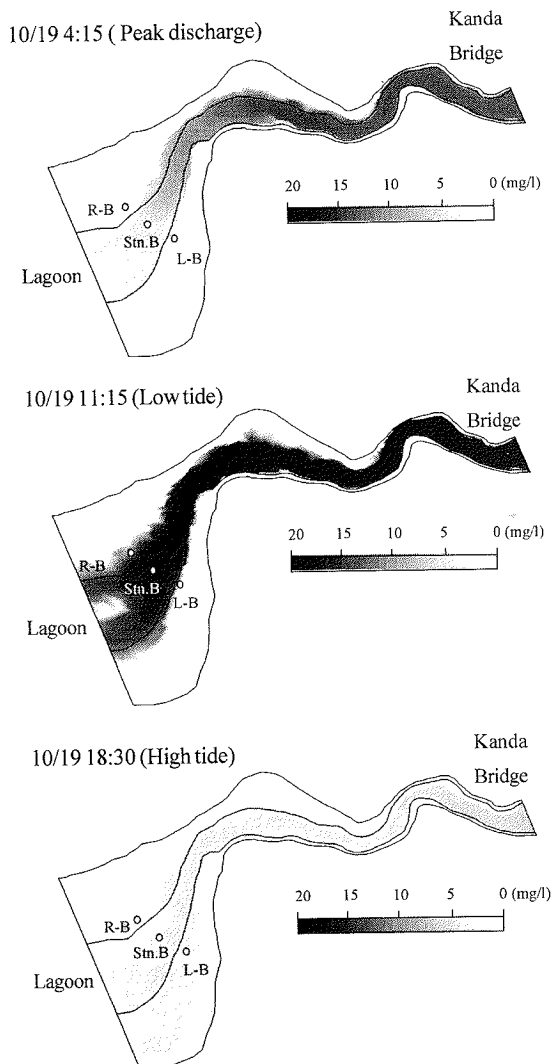


図-16 10月19日の流量最大時(4:15), 干潮時(11:15), 満潮時(18:30)のSS濃度の空間分布

いた。10月8日の出水においては河口近くの左岸側で顕著なリンの供給があり、河口近くの右岸側でも岸付近ではリンの供給が見られる。それに対して、上流域ではほとんど堆積が見られず、マングローブ林内へのリンの供給はラグーンや沿岸域に運ばれた土砂が上げ潮によって林内に輸送されることによって起こることがわかる。10月19日においては10月8日にくらべて潮位が低く、林内への氾濫が小規模であったため、10月8日に見られたような河口付近の左岸側への広範囲にわたるリンの供給は見られない。

表-1に神田橋から河口(ラグーンの入り口)までのマングローブ林内、河川内、林内+河川内の1ha当りのリンの供給量を示す。規模の大きい洪水

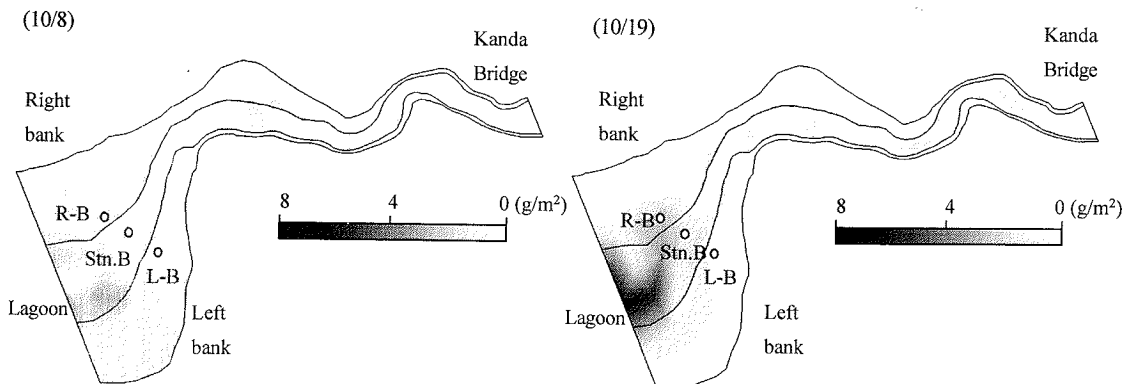


図-17 10月8日および10月19日の出水におけるマングローブ水域へのリン供給量の空間分布

表-1 神田橋から河口までのマングローブ林, 河川内, 林内+河川内の1 ha当りのリンの供給量

	Mangrove forest	Riverbed (kg/ha)	Average
10/8	4.3	5.1	4.6
10/19	5.0	16.3	9.3

であった10月19日の出水によるリン供給量は全体(林内+河川内)としては大きいですが、マングローブ林内への供給量をみてみると、大きな潮位変動のあった10月8日とほとんど差がないことがわかる。つまり、河口に存在するマングローブ水域への出水の影響は出水の規模だけではなく、出水が起こった時の潮汐の状態にも大きく依存していることがわかる。また、10月8日および10月19日の出水におけるマングローブ林内へのリンの供給量は平水時のマングローブ林内の表層10cmの土壌中のリン含有量が61kg/haであったのと比べて有意なものであり、出水によってマングローブ林内の生物活動に必要な不可欠なリンが供給されていると考えられる。

6. 結論

出水時のマングローブ水域における物質循環について、粒子態物質に着目して、現地観測および数値計算により検討した。ここで得られた主要な結論は以下の通りである。

- (1) 出水時には土砂とともに粒子態の有機物やリンが大量に輸送される。
- (2) 出水が頻繁に起こる時期においてはマングローブ林内表層土壌のリンの含有量が増加する。
- (3) 出水時のマングローブ水域への土砂供給は主に出水時にラグーンや沿岸域に運ばれた土砂が上

げ潮によって林内に輸送されることによって起こる。つまり、河口に存在するマングローブ水域への出水の影響は出水の規模だけではなく、出水が起こった時の潮汐の状態にも大きく依存している。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A)(2) (課題番号：14205070, 研究代表者：池田駿介), 並びに鹿島学術振興財団研究助成金(研究代表者：池田駿介)の補助を受けている。

参考文献

- 1) 酒井一人, 吉永安俊, 島田正志, 翁長謙良: 浮遊土砂濃度と河川流量の関係から考察する沖縄県における浮遊土砂特性, 農業土木学会論文集, No.208, pp.165-172, 2000.
- 2) 南哲行, 小山内信智, 山田孝, 黒澤靖介, 中村勝正, 与那嶺淳: 沖縄島における流域単位での赤土砂の流出特性について, 砂防学会誌, Vol.54, No.3, pp.39-46, 2001.
- 3) 南哲行, 山田孝, 溝口昌晴: 赤土砂の生産実態とその要因に関する基礎調査, 砂防学会誌, Vol.54, No.4, pp.77-81, 2001.
- 4) 酒井一人, 吉永安俊, 島田正志, 翁長謙良: 浮遊土砂濃度流出解析モデルにおける時変パラメーターの検討, 農業土木学会論文集, No.201, pp.43-51, 2000.
- 5) 比嘉榮三郎: 降雨量と土壌流出量予測方法, 沖縄県衛生環境研究所報告, No.35, pp.79-85, 2001.

- 6) Enrico Paringit, 灘岡和夫:衛星画像解析による植生指標と分布型物理モデルに基づいた表層土壌流出モデリング, 海岸工学論文集, No.48, pp.666-670, 2001.
- 7) 大澤和敏・酒井一人:降雨-土砂流出解析のための浮遊土砂流出モデルの構築, 農業土木学会論文集, No.217, pp.65-70, 2002.
- 8) Larcombe, P. and Ridd, P.V.:Megaripple dynamics and sediment transport in a mesotidal mangrove creek implications for palaeoflow reconstructions, *Sedimentology*, Vol.42, pp.593-606, 1995.
- 9) 中須賀常雄, 大山保表, 春木雅寛:マングローブに関する研究 I, 日本におけるマングローブの分布, 日本生態系学会誌, Vol.24, pp.237-246, 1974.
- 10) 赤松良久:マングローブ水域の水理と物質循環, 東京工業大学学位論文, 2003.
- 11) 長田信寿:一般曲線座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値計算, 水工学における計算機利用の講演会講義集, 土木学会, pp.45-72, 1999.
- 12) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in open-channel flows*, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, pp.53-56, 1993.
- 13) 池田駿介, 太田賢一, 長谷川洋:側岸部植生帯が流れ及び粒子態物質の輸送に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.473, pp.25-34, 1992.
- 14) Ikeda, S. and Izumi, N.: Effect of pile dikes on flow retardation and sediment transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.117, No.11, pp.1459-1478, 1991.

(2003. 5. 8 受付)

TRANSPORTS OF PARTICULATE MATERIALS IN A MANGROVE AREA DURING FLOOD

Yoshihisa AKAMATSU, Syunsuke IKEDA, Yohei NAKASHIMA and Yuji TODA

A field observation was performed to know the transports of particulate materials in a mangrove area. In the observation, the concentrations of dissolved and particulate materials and the temporal and spatial variations of soil environment in the mangrove forest were measured. A numerical computation for the transport of suspended sediments and the associated transport of nutrients during flood was performed for two different types of flood. The results of the observation and the computation have revealed that the movement of particulate materials in the mangrove area is much influenced by the phase-lag between the peak of flood and the tide. It was also found that phosphorous is provided to the mangrove forest by floods.