

宮良川マングローブ水域における土砂輸送特性 に関する長期連続モニタリング

二瓶 泰雄¹・関 康太²

マングローブ水域における土砂輸送特性を把握するために、石垣島・宮良川マングローブ水域を対象として濁度の長期連続調査や氾濫原の土砂沈降量調査を実施した。その結果、氾濫原上の土砂堆積速度は 4.7cm/year となり、他のマングローブ河川と比べて数倍程度大きい。降雨時マングローブ水域における土砂輸送特性は、出水と潮汐のタイミングや規模の影響を大きく受け、ここでの土砂トラップ率（土砂流入量と流出量の差を流入量で基準化した値）は-13～66%と降雨イベント毎に大きく変化した。氾濫原への土砂供給経路として、上流域からの土砂流入に加えて河道部底質の再懸濁が大きな役割を果たすことが明らかとなった。

1. はじめに

陸域と海域のバッファゾーンに位置するマングローブ水域は、陸域開発行為の影響を直接的に受け易い立地条件である。そのため、農地造成による赤土流出に伴うマングローブ水域での赤土堆積や陸地化の問題は、沖縄本島・慶佐次川や石垣島・名蔵川、宮良川など多くのマングローブ河川において生じている（例えば、下地ら、1993）。この問題を取り扱う上では、農地を含む流域からの赤土流出量を把握することやマングローブ水域における土砂輸送特性を明らかにする必要がある。このうち前者に関しては、大見謝（1992）や灘岡・田村（1992）による精力的な研究が行われている。一方、後者に関しては、土砂輸送量の実測データ自体が少なく、特に赤土流出量が大幅に増大する降雨時を対象とした土砂動態調査は赤松ら（2004）を除くと皆無に等しい。また、赤松ら（2004）ではマングローブ水域内における調査地点が少なく、マングローブ水域の土砂収支や土砂トラップ機能に関する検討を十分行うには至っていない。

本研究では、赤土流出が顕著となる降雨時のマングローブ水域における土砂輸送特性や土砂収支を把握するために、石垣島・宮良川マングローブ水域を対象とした現地調査を長期間にわたり実施している。調査内容としては、河道沿いに繁茂するマングローブ林の上・下流部に自記式濁度計を設置し、濁度の長期連続モニタリングを行うとともに、マングローブ氾濫原全体にわたる土砂沈降量調査を行い、氾濫原における土砂堆積特性を把握する、という 2 種類の現地観測を行っている。これらの観測結果に基づいて、氾濫原（swamp）上における土砂沈降フラックス、降雨時における土砂輸送特性、マングローブ水域全体における土砂収支特性、に関して得られた知見を示す。

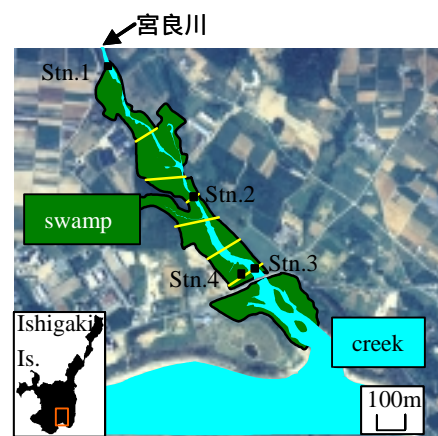


図 - 1 宮良川マングローブ水域の位置と観測点

2. 現地観測概要

(1) 観測サイト

観測サイトは図 - 1 に示すように石垣島南部を流れる宮良川である。宮良川の流域面積は 35.4km²、流路延長は 12.1km である。宮良川の上流域には、農業用水ダムとして、底地ダムと真栄里ダムが存在する。流域土地利用特性としては、農地が 46%、森林が 36%を占める。宮良川の下流域約 1km 区間には、国の天然記念物に指定されているマングローブ林が繁茂しており、その卓越種はヤエヤマヒルギとオヒルギである。

(2) 観測概要

宮良川マングローブ水域において、自記式測器による濁度・水位・流速の連続調査と 氾濫原上の土砂堆積量調査、という 2 種類の現地観測を行っている。これらの観測は 2005 年 9 月 3 日から現在まで行われているが、本論文では 2005 年 9 月 3 日から 12 月 9 日までの約 3 ヶ月間のデータのみを解析対象とする。まず、の観測における自記式測定器の設置地点は、図 - 1 に示すように、河道部（creek）3 地点（Stns.1~3）、氾濫原では Stn.3 と同

1 正会員 博（工） 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科
2 学（工） 大成建設（株）

じ横断面上 1 地点 (Stn.4) とする。ここで Stn.1 はマングローブ水域上流端に位置し横断面内に氾濫原は存在しないのに対して、Stn.3 はマングローブ水域下流部に位置し左右岸に氾濫原を有する。この上・下流部の横断面における土砂輸送量を計測し、マングローブ水域全体の土砂収支を検討する。観測項目は、濁度と水位 (Stns.1 ~ 4)、流速 (Stn.1 のみ) とする。用いる自記式測定器は、水位、濁度、流速に関して、それぞれ小型水位計 (Diver, Eijikelkamp 社製)、ワイパー付光学式濁度計 (Compact-CLW)、小型電磁流速計 (Compact-EM, 以上アレック電子(株)) である。

次に の観測として、氾濫原上における土砂堆積特性を調べるために、氾濫原上の 6 つの測線 (図 - 1 中の実線) 上の 60 地点において土砂沈降量計測を行った。この計測には、簡易セディメントトラップ (口径 5.7cm, 深さ 12cm) を用いる。簡易セディメントトラップは、2005 年 9 月 3 日から継続的に設置されているが、ここでは、9 月 3 日から 10 月 20 日までの結果のみを示す。セディメントトラップで捕集された土砂の質量を求め、土砂沈降フラックスを算出する。また、その堆積土砂の粒径分布を、レーザー回折式粒度分析装置 (SALD-3000S, (株)島津製作所製) により分析する。

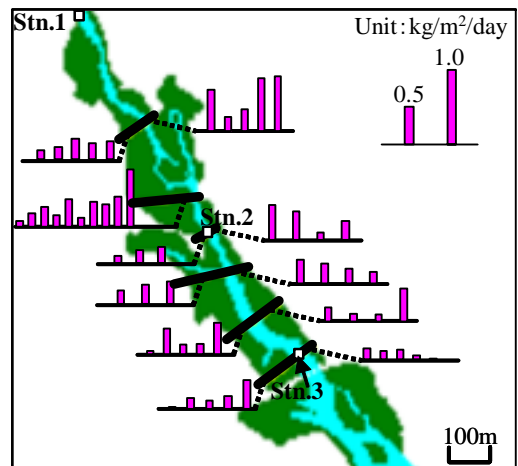
(3) 土砂輸送量算定方法

これらの測定結果より、SS と流量の積である土砂輸送量を算定する。まず、得られた濁度から SS に変換するために、キャリブレーション試験を行った。この試験では、まず、宮良川マングローブ水域にて採取された底質を水槽内に混入し、SS 分布がほぼ一様となるように攪拌する。その水槽内に自記式濁度計を挿入し水中の濁度を計測するとともに、濁度センサー付近の濁水を採取し、そのサンプル水に対して SS を分析し、両者の相関関係を得る。次に流量算定手順を述べる。まず、流速計測を行っている Stn.1 では、流速と水位、断面測量結果を入力データとして、離散的に計測された流速データから横断面内の流速分布や流量の推定が可能な力学的内挿法 (二瓶・木水, 2005) により流量を求める。得られた Stn.1 の流量と Stns.1 と 3 の水位を用い、連続式を介して、Stn.3 における流量 Q を算出する。このようにして得られる SS と流量の積として土砂輸送量を算定する。

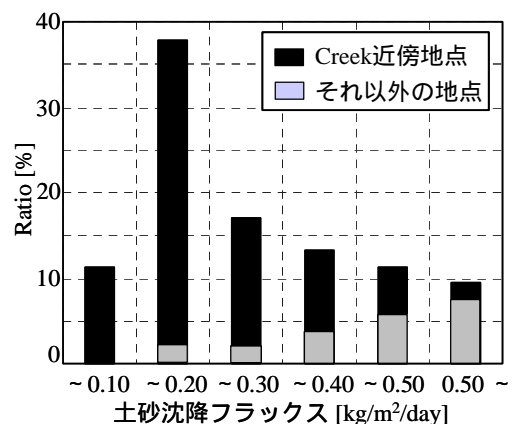
3. 観測結果と考察

(1) 氾濫原上の土砂沈降特性

氾濫原上の土砂沈降特性を把握するために、氾濫原における土砂沈降フラックスの空間分布を図 - 2 (a) に示す。ここでは、各測線における計測結果を右岸・左岸側に分け、横断方向には相対的な位置関係のみ考慮して表示しており、棒グラフ間は横断距離を表していないこと



(a) 空間分布



(b) 頻度分布 (河道部より 1m 以内の地点を Creek 近傍地点とする)

図 - 2 氾濫原上の土砂沈降フラックス (9/3 ~ 10/20)

に注意されたい。また簡易セディメントトラップが紛失もしくは埋没したもののデータは除外されている。これより、全般的には、河道部に近いほど、また、河川上流側ほど土砂沈降量は大きくなる傾向がうかがえる。このように、河川上流部において土砂沈降量が大きいことは、陸域からの土砂供給の影響が強いことを示唆する。

この土砂沈降フラックスの頻度分布を図 - 2 (b) に示す。ここでは、土砂沈降フラックスを $0.1\text{kg/m}^2/\text{day}$ 毎に分割し、また河道部近傍地点 (河道部より 1m 以内の地点) とそれ以外の地点に分けて表示する。土砂沈降フラックスの大きさは $0.10 \sim 0.30\text{kg/m}^2/\text{day}$ に集中し、また大きな土砂沈降フラックスは河道部近傍地点で生じている。河道部近傍において土砂堆積量が大きくなる要因としては、氾濫原では河道部に近いほど地盤高さが相対的に低く冠水頻度が多くなることや、河道部から高濁度水塊が流入する影響を直接的に受け易いためであると考えられる。これらの土砂沈降フラックスの中央値は $0.21\text{kg/m}^2/\text{day}$ となっている。この中央値から、空隙率を 0.4、土砂密度を $2,650\text{kg/m}^3$ として求められた土砂堆積速度は

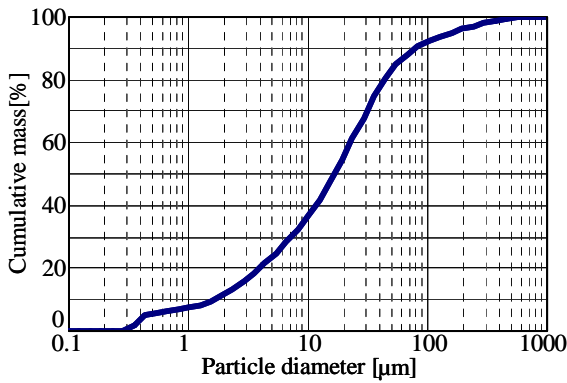


図-3 堆積土砂の粒径分布（最下流部10地点の平均値）

氾濫原全体において 4.7cm/year となる。この地盤高さの上昇速度は、Saad ら（1998）の調査結果（0.7～1.5cm/year）よりも数倍も大きく、宮良川マングローブ水域では土砂堆積が顕著であることが分かる。なお、今回の計測結果は秋季 1.5 ヶ月分のみのもので、年間土砂堆積量を議論する上では、1年以上の実測値を用いる必要があり、現在そのための調査を継続している。

図-3 はセディメントトラップに堆積した土砂の粒径分布を示す。ここでは一例として最下流部の測線上 10 地点における結果の平均値を示す。これより、堆積土砂の粒径分布は幅広いものの、大部分は 100 μm 以下の微細土砂であり、その中央粒径は約 17 μm となっている。同じ傾向は他の地点でも確認されている。このような中央粒径の大きさは、畑地からの流出土砂の平均粒径（約 10 μm）と同程度か若干大きい。

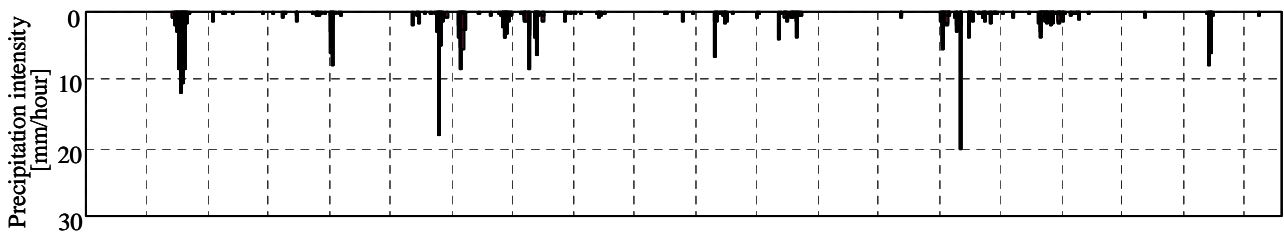
(2) 降雨時の土砂輸送特性

観測期間中の降雨概況や SS の時間変化を見るために、

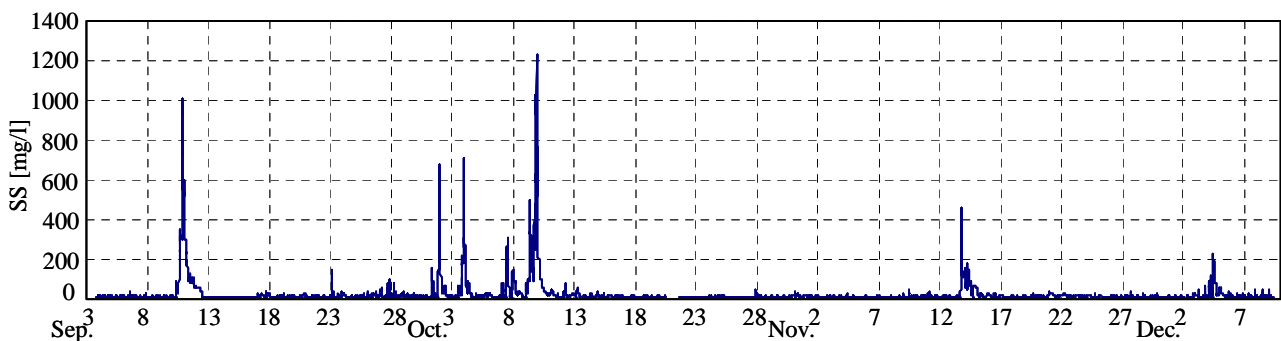
全期間中の時間雨量と SS (Stn.1) の時間変化を図-4 に示す。ここで時間雨量に関しては、石垣島における 3 つの気象庁アメダス観測地点（石垣、川平、伊原間）の結果の平均値である。これより、雨量が多いと SS も大きく増加し、1000mg/l を超える非常に高い SS 値が現れている。このような SS 変化をもたらす降雨イベントを、ここでは図中に示すように、 から まで番号付けする。全降雨イベントの中で、総雨量では降雨イベント が最も大きいものの、SS の最大値は降雨イベント で現れており、単純な雨量と土砂濃度の大小関係となっていない。

これらの期間中におけるマングローブ上・下流部の土砂輸送量を比べるために、Stns.1 と 3 における累積 SS フラックスの時間変化を図-5 に示す。これを見ると、両地点ともに、降雨時において土砂輸送量が大きく増加しており、特に、その様子は降雨イベント , , において顕著である。また、全般的には Stn.1 の累積 SS フラックスが Stn.3 の値を上回っており、上流域から供給された土砂はマングローブ水域においてトラップされていることが分かる。調査を行った約 3 ヶ月の間に、Stn.1 と 3 の累積 SS フラックスは、それぞれ 662t, 562 t であり、その差 100t がマングローブ水域に堆積したこととなる。

より詳細に土砂輸送特性を検討するために、降雨イベント毎の総土砂輸送量や土砂トラップ率を比較したものを図-6 に示す。ここで土砂トラップ率とは、両地点間の総土砂輸送量の差を Stn.1 の総土砂輸送量で基準化したものであり、正の値はマングローブ水域において土砂がトラップされていることに相当している。これより両地点間の総土砂輸送量を比べると、降雨イベント では



(a) 時間雨量（石垣、川平、伊原間 3 地点の平均値）



(b) SS (Stn.1)

図-4 全観測期間中における雨量と SS の時間変化

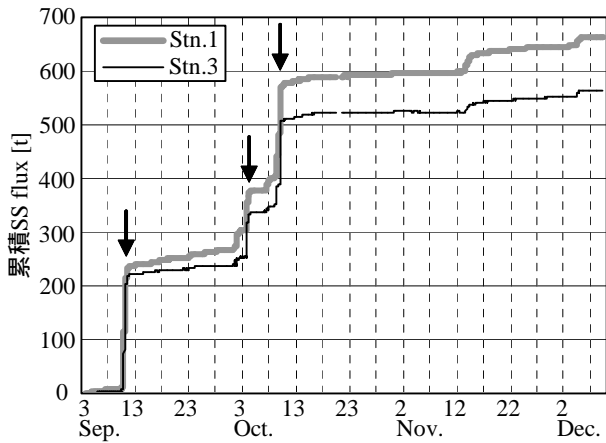


図-5 マングロープ上・下流部における累積 SS フラックスの比較 (Stns.1 と 3)

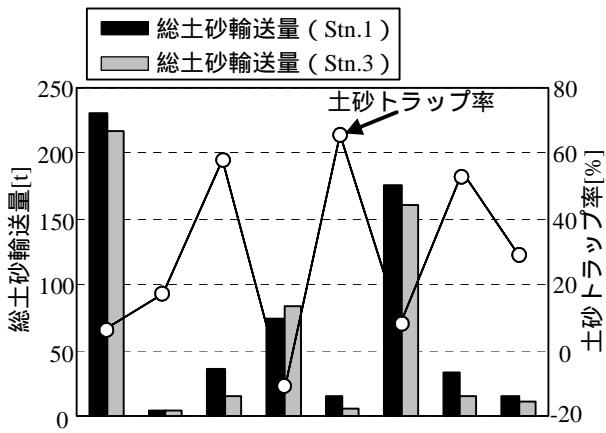
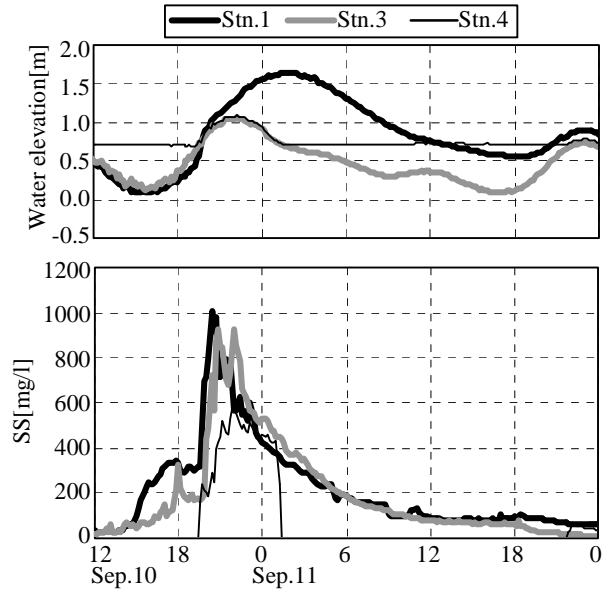


図-6 降雨イベントにおける総土砂輸送量とトラップ率

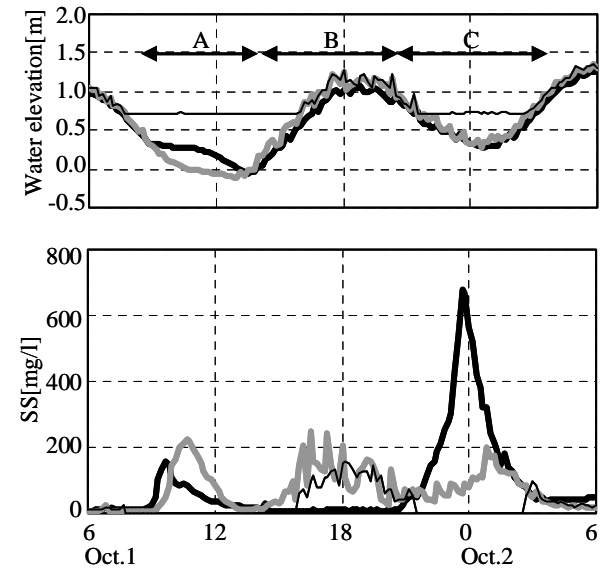
Stn.3 の総土砂輸送量が Stn.1 の結果を上回るものの、それ以外の7つのイベントではその逆の傾向となっており、マングロープ水域での土砂トラップ機能が大部分の降雨イベントにおいて作用していることが分かる。このときの土砂トラップ率は、降雨イベント毎に異なり、13~66%と大きく変化している。全体的には、土砂輸送量が大きい降雨イベント(,)のトラップ率は、土砂輸送量が小さい他のイベントよりも小さい傾向が見取れる。このように、マングロープ水域における土砂トラップ機能は存在することが示唆されたが、その様子は降雨イベント毎に変化し、土砂輸送量(もしくは流量や出水規模)の大小と関係していることが示された。

(3) 降雨時の土砂濃度変化

マングロープ水域における土砂輸送特性が降雨イベント毎に異なる要因を探るために、降雨時における水位とSSの時間変化を図-7に示す。ここでは、代表例として降雨イベント , を選定し、そのときの Stns.1, 3, 4 のSSと水位(基準面 T.P.)が示されている。イベントでは、上流側の Stn.1 では水位上昇に伴いSSが大きく増大し、最大で 1000mg/l まで達している。一方、下流側・



(a) 降雨イベント



(b) 降雨イベント

図-7 降雨時における水位とSSの時間変化

河道部の Stn.3 における SS は全般的に Stn.1 の SS よりも小さく、また氾濫原 (Stn.4) の SS は、河道部 (Stn.3) の値よりもさらに小さい。これより、この降雨イベントでは、氾濫原に冠水した濁水中の一部の土砂が沈降し、下流域へ行くと SS が減少していることが示された。次に降雨イベント では、下げ潮時(期間 A)、上げ潮時(期間 B)、干潮時(期間 C)という3つの期間において顕著な SS ピークが生じている。これらのうち、期間 B では台風 0519 号が最接近したため、外海より高波浪がマングロープ水域まで来襲していた。各期間の SS の大小関係を見ると、期間 A では $Stn.1 < Stn.3$ 、期間 B では $Stn.1 < Stn.3, 4$ 、期間 C では $Stn.1 > Stn.3$ となり、期間毎に濁水挙動が大きく変化している。SS 変化の要因として

は、氾濫原が冠水しない期間 A では河道部の再懸濁，期間 B では高波浪来襲による海側からの土砂供給，出水と海水遡上のタイミングが一致する期間 C では河道部における土砂沈降，であると考えられる。

以上より，マングローブ水域において上流側からの土砂流入量の方が下流側での流出量よりも大きくなる素過程としては，氾濫原が冠水し浮遊土砂が氾濫原上に堆積する（イベント），出水と海水遡上のタイミングが一致し上流河川からの流入土砂が海まで到達できず河道部に沈降する（イベント 期間 C），高波浪来襲に伴い海側から高濁度水がマングローブ水域に遡上する（イベント 期間 B），ということが挙げられる。一方，マングローブ水域にて土砂流入量よりも流出量の方が大きくなる要因としては，氾濫原に冠水せず，かつ，出水と下げ潮時のタイミングが一致し流速が増大し，それに伴い底質の再懸濁が顕著となる（イベント 期間 A）ということが考えられる。このように，出水と潮汐のタイミングや大きさにより，マングローブ水域における土砂輸送・堆積特性が大きく変化することが示された。

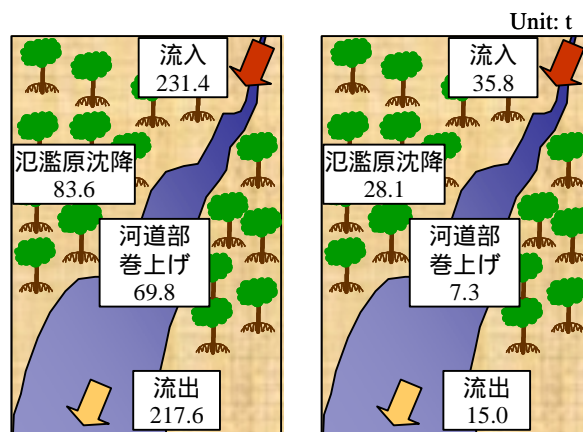
(4) 土砂収支解析

次に，マングローブ水域全体における土砂収支解析を実施する。土砂収支としては，上流側（Stn.1）からの流入，下流側（Stn.3）からの流出，氾濫原での沈降，河道部における正味の巻上げフラックスを考慮し，流入と氾濫原の沈降は実測値を，河道部巻上げ量は土砂収支式からの残差として算出する。図-8は降雨イベントに対する土砂収支解析結果を示す。降雨イベントでは，上流側からの土砂流入量は231.4t，下流側での流出量は217.6tであり，また，氾濫原での土砂沈降量は83.6tである。このように氾濫原での土砂沈降量の大きさは，単に土砂流入量と流出量の差（13.8t）では説明できず，河道部での巻上げ量（69.8t）が重要な役割を果たしている。また降雨イベントにおいても，河道部での正味の底質巻上げ量は他のフラックスと比べて有意な大きさとなっている。このように，氾濫原上の堆積土砂の供給源としては，従来から指摘されている上流域からの流入土砂のみならず，再懸濁する河道部底質が大きな役割を果たしている。これらのイベントでは，河道部での正味の底質巻上げ量が土砂流入量の20～30%にも達する大きな値となっていることが明らかとなった。

4. おわりに

宮良川マングローブ水域における濁度や土砂沈降量の長期観測を行ったところ，以下の結果が得られた。

(1) 氾濫原上の土砂沈降フラックスの中央値より得られた土砂堆積速度は4.7cm/yearとなり，他のマングローブ河川と比べて数倍程度大きいことが示された。



(a) 降雨イベント (b) 降雨イベント
図-8 降雨時におけるマングローブ水域の土砂収支

(2) マングローブ水域における土砂輸送・堆積特性は，出水と潮汐のタイミングや規模の影響を大きく受けることが示された。その結果として，マングローブ水域における土砂トラップ率（土砂流入量と流出量の差を流入量で基準化した値）は-13～66%と降雨イベント毎に大きく変化することが示された。

(3) 氾濫原への土砂供給経路としては，上流域からの土砂流入と河道部底質の再懸濁が挙げられる。また，河道部での正味の巻上げ量は土砂流入量の20～30%もの大きなフラックスとなっていることが明らかとなった。

謝辞：現地観測の実施に際して，東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏には大変お世話になった。また，東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻鯉淵幸生講師には，自記式濁度計をお借りし，また粒径分析に御協力して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 赤松良久・池田駿介・中島洋平・戸田祐嗣（2004）：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，土木学会論文集，No.768 / - 68，pp.179-191。
- 大見謝辰男（1992）：沖縄県における赤土汚染の現状，沖縄県公害衛生研究所報，Vol.26，pp.87-96。
- 下地邦輝・大山峰吉・高平兼司（1993）：赤土の流入及び物理的な環境変化がマングローブ生態系に与える影響，「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.219-254。
- 灘岡和夫・田村英寿（1992）：LANDSAT / TM データに基づいた沖縄赤土流出問題の解析の試み，日本リモートセンシング学会誌，Vol.12，No.3，pp.3-19。
- 二瓶泰雄・木水啓（2005）：新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案，土木学会論文集，No.803 / - 73，pp.155-160。
- Shahbudin Saad・浅野敏之・Mohd Lokman Husain（1998）：潮流と降雨によって流送されるマングローブ湿地帯の底質の堆積特性，海岸工学論文集，Vol.45，No.2，pp.1246-1250。