

陸域環境負荷に晒された河川型マングローブ水域 における土砂堆積特性

DEPOSITION RATE OF SEDIMENT IN A RIVERINE-TYPE MANGROVE AREA UNDER ENVIRONMENTAL IMPACT FROM INLAND

色川有¹・二瓶泰雄²

Yuu IROKAWA and Yasuo NIHEI

¹ 学生員 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 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

² 正会員 博 (工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (同上)

To clarify the deposition process in a riverine-type mangrove area which is directly influenced by terrestrial water with rich nutrients and high suspended-sediment concentration (SSC), we have conducted field measurements on suspended-sediment transport and deposition process in the Miyara River, Ishigaki Island, Okinawa, which has a typical riverine-type mangrove forest. The observed SSCs in the swamp are relatively lower than those in the creek under hydrologic events. The observed results reveal that the accretion rates of ground level are 3.1 and 1.3 cm/year in the upstream and downstream regions of the swamp, respectively. These facts demonstrate that the deposition rate of sediments are dominant in the upstream regions due to the huge environmental impact from inland and the mangrove swamp may capture a large amount of suspended sediments.

Key Words: mangrove, sediment transport, deposition rate, sediment trap, red slit

1. はじめに

樹木が繁茂する氾濫原 (swamp) と氾濫原の間を流れる河道部 (creek) からなるマングローブ水域は、熱帯・亜熱帯の河口域や汽水域に分布している¹⁾。マングローブ水域は、成立形態により、河川沿いに形成される「河川型」、沿岸を縁取る「フリンジ型」等に分類される²⁾、³⁾。このうち「河川型」は、河川両岸にマングローブ林が分布するため、潤沢な栄養塩や土砂が供給され、大規模で多様なマングローブ林が形成される。この河川型マングローブ水域は、その立地条件に加え、樹木の流体抵抗により、流入土砂は堆積しやすいものと考えられる。

マングローブ水域は、一般に、潮間帯上部におけるわずか 2m 程度の高さの範囲内において、環境傾度に対応した形で群落を形成している¹⁾。そのため、地球温暖化問題等に起因する海面上昇に加えて、上流部からの流入土砂の堆積・地盤上昇の影響を大きく受けやすい。特に後者に関しては、農地開発等による陸域環境負荷が顕著な場合には、陸域からの土砂 (赤土) 流出により、河川型マングローブ水域では多量の土砂が堆積し、マングローブ林の地盤高さが著しく上昇することが指摘されている (例えば、沖縄県・慶佐次川⁴⁾)。このような土砂堆積が継続すると、マングローブ林の陸地化が生じ、結果として、マングローブ生態系が劣化・消滅する。

このことから、河川型マングローブ水域における土砂堆積・地形変化に関する調査研究を行うことは必須である。既存の研究としては、陸域環境負荷の少ないマングローブ水域の地形変化に関する調査は行われているものの (例えば、Sadd ら⁵⁾)、陸域環境負荷が著しい流域を抱えるマングローブ水域における調査例は少なく、前述した下地らによる慶佐次川の調査⁴⁾ や赤松らによる石垣島・名蔵川における研究⁶⁾ が挙げられる程度である。

本研究では、マングローブ水域における陸地化プロセスの把握を目標とし、その第一歩として、農地開発が進む石垣島・宮良川マングローブ水域における土砂流入・流出・堆積調査を 2 年間にわたり実施した。それらの結果に基づいて、マングローブ水域全体における土砂動態や地盤高さ変化の実態を明らかにする。なお、本観測結果の一部を既に報告しているが (二瓶・関⁷⁾、前報)、ここではわずか 3 ヶ月間の観測結果しか用いておらず、長期データに基づいて議論できていない。

2. 現地観測概要

観測対象サイトである宮良川マングローブ水域は、図-1 に示すように、河川両岸にマングローブ植物が繁茂している swamp が存在する典型的な河川型マングローブ水域である。この河口約 1km 区間にオヒルギとヤエヤマ

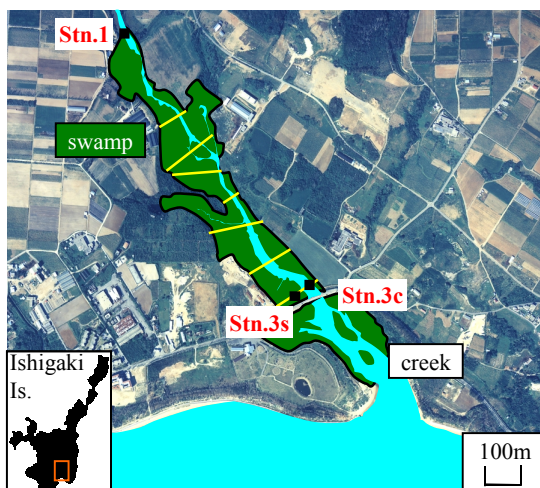


図-1 宮良川マングローブ水域と観測点

ヒルギが主として繁茂している。面積 35.4km²の宮良川流域では農地開発が進行し、流域の46%が農地である⁷⁾。このため宮良川は農地開発に伴う赤土流出による陸域環境負荷に長年晒されたマングローブ水域であると言える。

この宮良川マングローブ水域において、①土砂流入・流出量調査と②土砂堆積・沈降量調査、という2種類の調査を長期間にわたり実施した。まず①の調査では、マングローブ水域の土砂流入・流出量を把握するために、自記式測器による濁度・水位・流速の長期連続観測を行った。観測地点としては、上流部1地点(河道部のみ、Stn.1)と下流部2地点(河道部 Stn.3c, 氾濫原 Stn.3s)とした(図-1)。なお、中流部においても観測していたが、ここでは省略する。用いた測器は、水位には小型水位計(U20 Water Level Logger, Onset社製)、濁度と流速にはワイパー付光学式濁度計(Compact-CLW)、小型電磁流速計(Compact-EM, 共にアレック電子(株)製)である。上・下流断面における流量と土砂輸送量の算出方法は、前報と同じとする。すなわち、Stn.1を含む上流側では、水位・流速・断面形から流量を算出し、連続式を用いて下流断面(Stn.3c, 3s)の流量を求める。この流量に各々の断面で計測された濁度から変換されるSSを掛けて、土砂輸送量を求める。観測期間は2005年9月3日から2007年8月27日までの約2年間である。なお、濁度計に関しては、センサー清掃用ワイパーが付いているが、この水域ではセンサー面にワイパーでも除去できないほど付着性藻類が繁茂するケースがいくつか見られた。その影響が顕著であった期間のデータは解析対象から除外した。その結果、解析対象期間は2005年9月3日から2006年2月24日(期間A)と2006年7月27日から2007年5月29日(期間B)である。

次に、②の調査では、氾濫原全体の土砂沈降・堆積特性を把握するために、図-1に示す7つの横断面(図中黄色の実線)において、各断面10地点、合計70地点で地

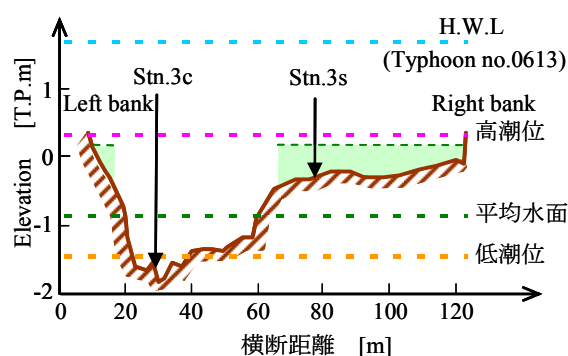


図-2 断面形と水位の関係(Stn.3c, 3sを通る横断面、緑色の反転部分はマングローブ植物の生息範囲を示す)

盤高さ変化と土砂沈降フラックスを調査した。地盤高さ変化を計測するために、直径1.8cm、長さ30cmの塩ビパイプを地面に突き立てて、塩ビパイプ上端から地面までの高さを計測する。また、簡易セディメントトラップとして500mlのペットボトル(口径2.2cm、深さ20cm)を地中に埋め込み、土砂沈降量やその粒径分布等を計測した。これらの観測期間は、2006年7月24日から2007年8月27日であり、合計3回地盤高さの計測とセディメントトラップの回収・再設置を行った。なお、セディメントトラップは、ある時点での土砂沈降フラックスを測っており、沈降した土粒子には、本来その後浮上するものも含まれている。そのため、セディメントトラップでの土砂沈降量は、必ずしも堆積量とは対応しない。

3. 結果と考察

(1) 水位と断面形、マングローブ植物の生息域の関係

宮良川マングローブ水域における断面形と水位の関係を把握するために、下流側の観測地点(Stn.3c, 3s)を通る横断面の形状を図-2に示す。ここでは、マングローブ植物が存在する範囲(図中の緑色で反転した部分)も表示している。また、Stn.3cにおける水位データ(後述する図-3を参照)を用いて計算された高潮位、平均水面、低潮位、観測期間中のH.W.L.(台風0613号出水時)も合わせて図示している。なお、平均水面と低潮位の差は、平均水面と高潮位の差と比べて小さい。マングローブ水域の河口前面域では干潟が形成され、干潮時には干潟が干出しマングローブ水域と海域に水位差が生じる。そのため、低潮位と平均水面の差が高潮位との差と比べて相対的に小さい。なお類似した水位変動現象は、宮良川のみならず多くのマングローブ水域で観測されている^{8), 9)}。

この横断面では、左岸側のswampでは、幅が狭く勾配が極めて急である(約1/10)のに対して、右岸側のswampでは幅60m程度と相対的に広く、その勾配も左岸側よりも緩やかである(約1/200)。この横断面では、図-1に示すように、蛇行するcreekの外岸側が左岸側、内岸側が

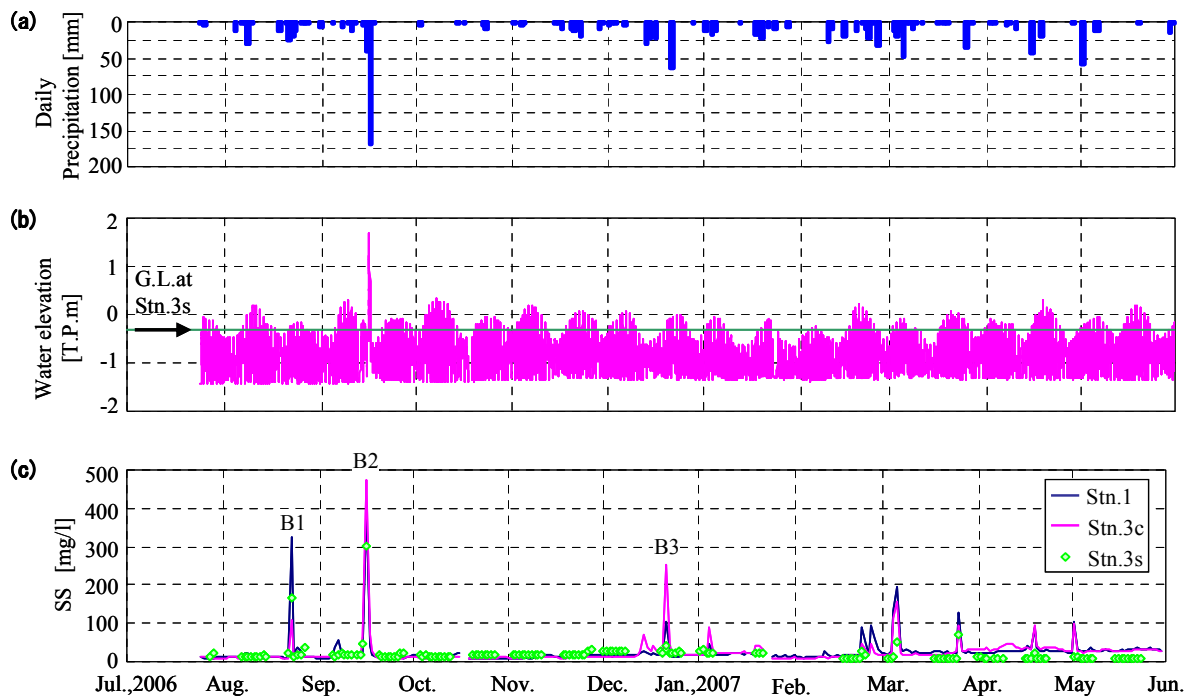


図-3 期間Bにおける日雨量 (a) と水位 (b), 日平均SS (c) の時間変化 (水位: Stn.3c, SS: Stns.1, 3c, 3s)

右岸側に相当しているのので, creek の蛇行形状と対応して氾濫原地形が形成されている. この断面における creek 地形も蛇行形状の影響を受け, creek の外岸側が深掘れしている. また, 低潮位となる干潮時には, creek においても干出部分が多く出現し, また冠水部分の水深も浅い.

注目のこととして, swamp の地盤高さは, 平均水面よりも高く, その差は 0.4~1.0m 程度である. さらに, マングローブ植物が繁茂する地盤高さは T.P. - 0.5~0.1m である. マングローブ植物が一般に平均海面と高潮位の間分布することを考慮すると¹⁾, 宮良川マングローブ水域では, 極めて狭い範囲内にマングローブ植物の生息域が限定されている. 以上より, この水域では, 河道部と氾濫原の比高差が顕著であり, 氾濫原における顕著な土砂堆積や地盤高さの著しい上昇が生じることが示された.

(2) 河道部・氾濫原における SS 環境の比較

長期間にわたる河川水位や河道部・氾濫原の SS 環境を調べるために, 期間 B (2006 年 7 月 27 日~2007 年 5 月 29 日)における日雨量と水位 (Stn.3c), 日平均 SS (Stns.1, 3c, 3s) の時間変化を図-3 に示す. ここで, 日雨量は, 3つの気象庁アメダス観測点 (石垣, 川平, 伊原間) の平均値であり, また水位と共に Stn.3s の地盤高さ (図-2) も示す. これより, 大きな降雨に対応して, 上流側 (Stn.1) と下流側 (Stn.3c) における日平均 SS も大きく上昇し, この期間では SS 値が 100mg/l を超える出水イベントが 6 つ存在する. この期間の SS 最大値は, 最大風速 50m/s, 最低気圧 924hPa が観測された台風 0613 号に伴う出水イ

ベント (B2) であり, 河道部 (Stn.1 と Stn.3c) では日平均 SS が 400mg/l を超えている.

このようなマングローブ水域内における日平均 SS を比較する. まず, 同じ横断面内における河道部 (Stn.3c) と氾濫原 (Stn.3s) の日平均 SS に着目すると, 出水時では, 図中 B1 の出水イベントを除いて, 河道部の SS が氾濫原の値よりも大きい. これは, 氾濫原に流入した高濃度の浮遊土砂の一部が氾濫原上に沈降・堆積したため, SS レベルが低下したものと考えられる. これらの結果より, マングローブ植物が繁茂する氾濫原は一定の土砂トラップ効果が存在することが分かる. 一方, マングローブ上流側 (Stn.1) と下流側 (Stn.3c) における日平均 SS を比べると, 出水イベントによりその大小関係が大きく異なる. 例えば, 台風 0613 号による出水イベント (B2) では, 下流側 (Stn.3c) の日平均 SS の方が相対的に大きいものの, その直前の出水イベント (B1) ではその逆の大小関係となっている. 以上より, 上流部からマングローブ水域に流入した高濁度水塊はマングローブ水域を通過して, その SS レベルを減少させるだけでなく, 上昇させることもあることが示された. なお, ここでの氾濫原上の堆積土砂の中央粒径は, 19~25 μm である.

(3) 長期間にわたるマングローブ水域全体の土砂収支

上述したように, マングローブ水域の上・下流部では, SS の大小関係が出水イベントにより変化する. そのため, 氾濫原では明確に土砂トラップが生じるものの, 河道部を含めたマングローブ水域全体では, 上流側からの流入

土砂がトラップされるかどうかは不明である。そこで、Stn.1を含む上流側断面とStn.3s, 3cを含む下流側断面における累積SSフラックスの時間変化を図-4, 5に示す。両図はそれぞれ期間A, Bの結果である。まず、期間Aに関しては、出水イベントに対応して、上・下流側共にSSフラックスが大きく増加している。特に、出水イベントA2(2006年1月11~14日)では、上流側848t, 下流側785tのSSフラックスが通過した。上・下流側の累積SSフラックスを比較すると、この期間の前半では両者はほぼ同程度であるが、出水イベントA1とそれ以降において上流側の累積SSフラックスが下流側よりも大きくなり、出水イベントA2においてその差がより顕著となった。最終的には、上流側(Stn.1)では1477t, 下流側(Stn.3c)では1273tとなり、この期間全体では204tの土砂がマングローブ水域全体に堆積したこととなる。

それに対して期間Bでは、期間Aと異なり、下流側(Stn.3c)の累積SSフラックスが上流側(Stn.1)の値を全般的に上回り、この期間ではマングローブ水域全体において「侵食」傾向となる。特に、出水イベントB3では下流側のSSフラックスが上流側よりも大きく、侵食傾向が顕著である。最終的な累積SSフラックスは、上

流側では599t, 下流側では647tとなり、その差48tの土砂がマングローブ水域全体で侵食されたこととなる。このように、マングローブ水域全体では、土砂トラップ効果が現れる時(=堆積傾向)とそうでない時(=侵食傾向)が存在する。このことから、マングローブ水域は一般に土砂トラップ機能を有すると言われているが、水域全体の土砂収支を取ると一概にマングローブ水域全体が土砂トラップ効果を有していると言えないことが分かる。

(4) 出水時における土砂動態

図-4, 5に示したように、水域全体における土砂堆積・侵食特性は出水イベントにより大きく異なっている。そこで、出水時における土砂動態を把握するために、侵食傾向が顕著であった台風0613号出水時(B2)における水位とSS, 累積SSフラックスの時間変化を図-6に示す。ここで、水位とSSは上流側(Stn.1)と下流側(Stn.3c)の結果、累積SSフラックスに関しては、それらの地点を含む横断面を通過する結果である。この台風時には全期間のH.W.L.を記録しており、その水位最大値は高潮位(T.P.0.32m, 図-2)を大きく上回るT.P.1.66mに達している。通常の出水イベントでは、Stn.3cのような下流断面の水位変動には出水影響は現れないが、この台風出水時には水位変化は潮汐とは大きく異なっているので、このイベントでは出水規模や気圧変化の影響が顕著であったことが分かる。このときのSSに関しては、下流側(Stn.3c)の方が上流側(Stn.1)よりも先にSSの上昇が起こっている。これは、台風接近に伴う高波浪来襲により、海側からSSが供給されているためである。その後、Stn.1においてもSSは上昇し、水位ピーク付近では両地点ともに700mg/lを越えている。これは、平常時のSS(=約10mg/l)の70倍である。海側への流出を正とする累積SSフラックスは、Stn.1では出水とともに徐々に増加しているが、Stn.3cでは一度負となり、その後急激に増加する。これは、前述した高波浪来襲によりSSフラックスが負となるものの、その後上流側やマングローブ水

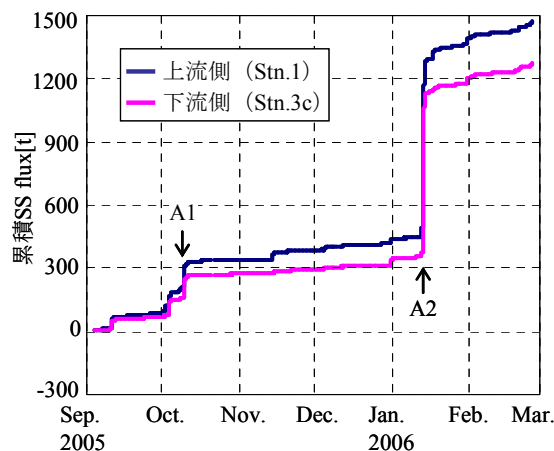


図-4 期間Aにおける累積SSフラックスの時間変化

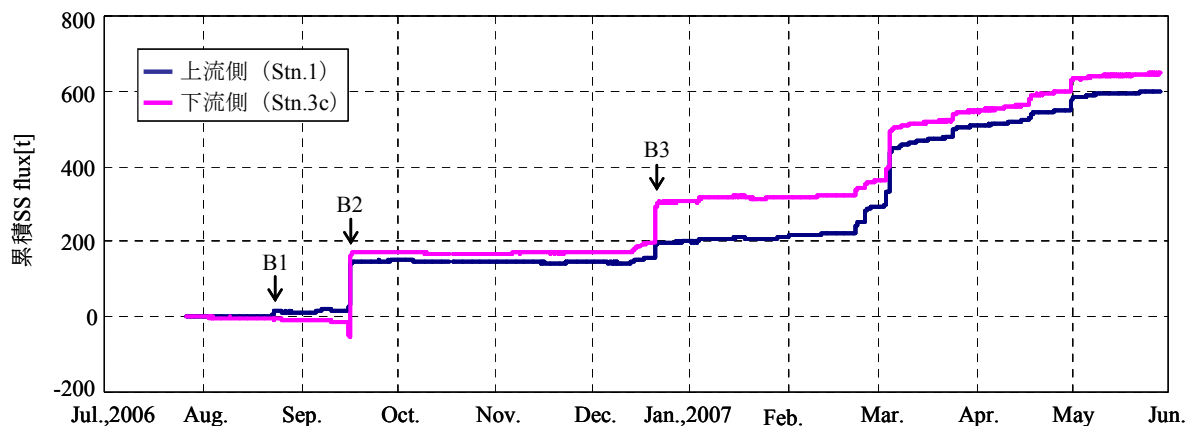


図-5 期間Bにおける累積SSフラックスの時間変化

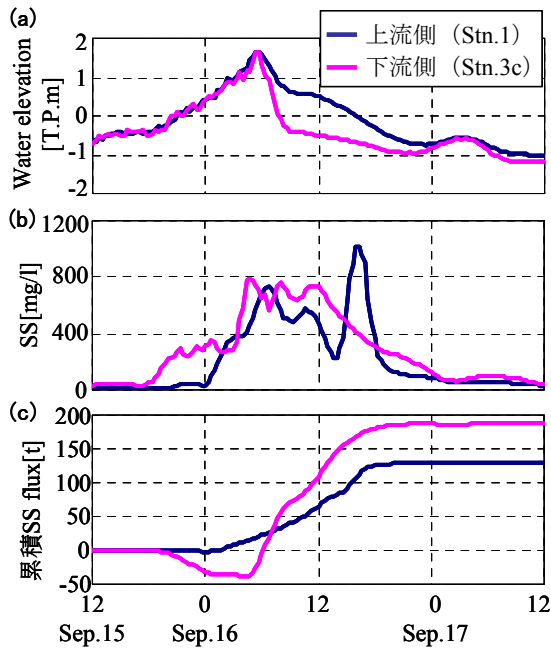


図-6 台風0613号出水(B2)における水位(a)・SS(b)・累積SSフラックス(c)の時間変化

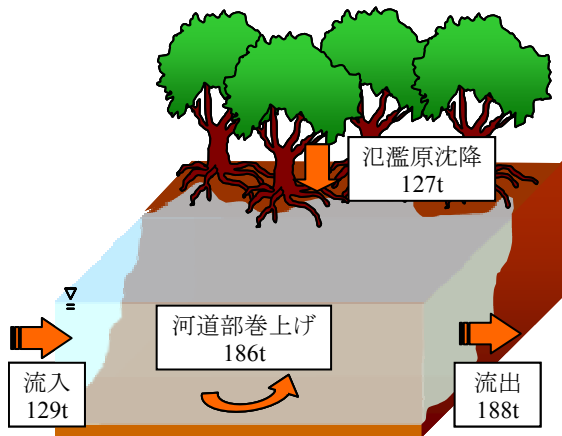


図-7 マングローブ水域全体の土砂収支(イベントB2)

域からの流出土砂が顕在化したものと考えられる。

この出水イベントB2全体における土砂収支を図-7に示す。ここでの土砂収支としては、上流側からの流入、下流側からの流出、氾濫原での土砂沈降、河道部での正味の巻き上げを考慮する。各フラックスの算出法としては、前報と同じく、土砂流入・流出・沈降フラックスは観測値を与え、残差として河道部での正味の巻き上げフラックスを求める。上流からのSS流入量は129tであるのに対し、SS流出量は188tと大きく、マングローブ水域全体として侵食傾向が卓越している。また氾濫原における沈降量は127tと流入量とほぼ同程度となるのに対して、河道部での巻き上げ量は流入量の約1.4倍の186tと多量の土砂が河道部から流出している。このような河道部の堆積土砂が大規模洪水時に巻き上げられることにより、マングローブ水域全体で侵食傾向を示したものと考えられる。

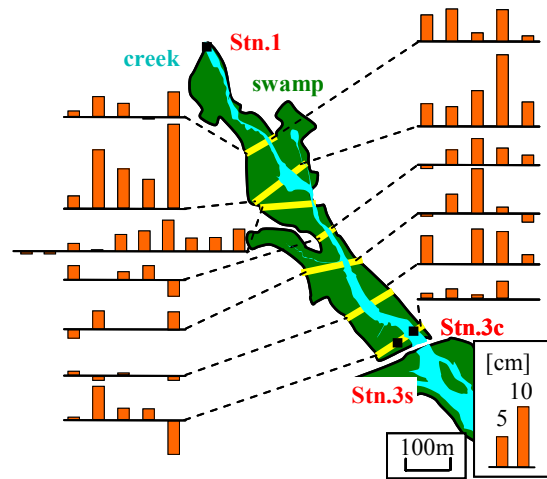


図-8 氾濫原70地点における地盤高さ変化分布(2006年7月24日～2007年8月27日、図の青・緑は河道部・氾濫原を示す)

マングローブ水域全体の土砂堆積・侵食傾向が出水イベント毎に変化する要因を調べるために、本観測で得られた23回の出水イベントを対象として、土砂収支(上流側と下流側のSSフラックスの差)と流量規模、先行降雨状況、氾濫原の冠水状況等を比較・検討した。その結果、現段階では、それらの明確な関連性を示す指標は見られない。今後、詳細に観測データを再整理・検討し、出水時における土砂収支の実態把握に努める予定である。

(5) 氾濫原における地盤高さ変化

図-3(c)に示したように、氾濫原におけるSSは河道部よりも低く、氾濫原において土砂堆積が顕著に生じていることが示唆された。そこで、氾濫原上における地盤高さの上昇量を調べるために、氾濫原上の計70地点において行われた地盤高さ変化の調査結果を図-8に示す。ここでは、調査を行った2006年7月24日から2007年8月27日(399日間)における地盤高さの変化量を表しており、正は地盤高さの上昇を示す。また、ここでは、7つの横断面で行われた観測結果を、各断面の右岸・左岸に分け、横断方向の相対的な位置のみを考慮して表示しており、各棒グラフ間の距離が横断距離と対応していないことに注意されたい。これより、河道部近傍の地点を除いて、多くの地点において地盤高さは上昇している。その大きさとしては、-5.5cmから13.9cmとなっており、観測地点により地盤高さの変化量は大きく異なっている。全般的には、上流部の方が下流側よりも上昇量は大きいことが分かる。また、横断方向の地盤高さ変化量の違いは断面毎に異なっており、特定の変化傾向は見られない。

次に、地盤高さ変化量の時間変動傾向を見るために、上流側3ラインと下流側4ラインにおける地盤高さ変化量の中央値の時間変化を図-9に示す。図中には、氾濫原全体の結果に対する中央値も合わせて示す。なお、観測

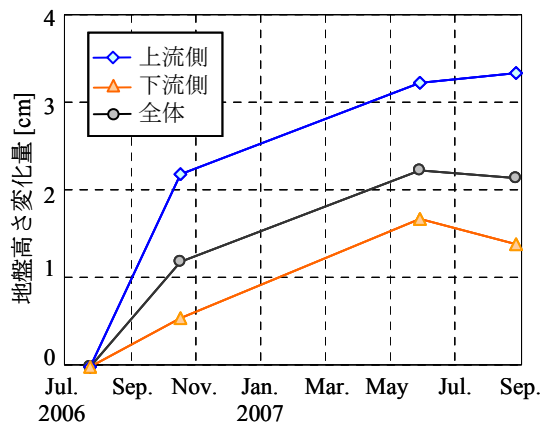


図-9 氾濫原における地盤高さ変化量の時間変化 (氾濫原の上流部・下流部・全体の中央値を示す)

データの中央値を用いるのは、局所的に地盤高さが著しく上昇もしくは低下した結果を取り除くためである。これより、上流側における地盤高さの上昇量は、全般的に、下流側よりも著しく大きくなっている。これは、上流部からの流入土砂の影響がマングローブ水域の上流側ほどより直接的に受けやすい、ということに加えて、マングローブ水域における出水時の水位変動は上流側ほどより大きく上昇し、結果として上流側ほど出水時の冠水頻度が多いためであると考えられる。また、上流側では、2006年7月から10月の間に、地盤高さの上昇量が大きくなっている。これは、前述した台風出水時 (イベントB2) による影響が現れたためである。

期間全体の地盤高さ上昇量としては、上流側、下流側、全体では、それぞれ3.4、1.4、2.2cmとなっている。これを単純に年間の地盤高さ上昇速度に換算すると、上流側、下流側、全体において各々3.1、1.3、2.0cm/yearとなる。一般的なマングローブ水域における地盤高さの上昇速度が0.5~1.5cm/yearであることを考慮すると⁵⁾、宮良川マングローブ水域における地盤上昇速度は大きい方に分類され、その傾向は上流部において顕著である。以上のことから、顕著な陸域環境負荷に晒され続けている宮良川マングローブ水域では、氾濫原における土砂堆積量や地盤高さの上昇速度は大きく、特に陸域負荷の影響を直接受ける上流側においてその傾向が顕著となっている。

4. 結論

農地開発が進んだ流域を抱える宮良川マングローブ水域において約2年間にわたる土砂流入・流出・堆積調査を実施した。そこで得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 氾濫原と河道部の比高差は高いため、マングローブ植物が繁茂する地盤高さが狭い範囲に限定される。
- (2) 出水時における氾濫原上のSSは、多くの場合、

河道部よりも低く、氾濫原における土砂トラップ効果が顕在化していることが示された。一方、マングローブ水域全体の土砂収支結果より、上流側からマングローブ水域への流入土砂量が必ずしも下流側から海への土砂流出量を上回っておらず、水域全体では一概に土砂トラップ効果を有していると言えない。

(3) 氾濫原における地盤高さの上昇速度は、全体では年間2.0cmと大きく、特に上流側における上昇速度が年間3.1cmと顕著であった。これは、上流域の方が陸域からの流入土砂の影響を直接受けやすく、また、出水時における冠水頻度が多いためであると考えられる。

(4) 以上の結果より、顕著な陸域環境負荷の影響を受ける宮良川マングローブ水域では、氾濫原における地盤高さの上昇速度は大きくなっており、マングローブ水域上流側では陸地化する可能性が高く、今後、上流からの流入土砂対策を検討する必要がある。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金・若手研究 (A) (研究代表者：二瓶泰雄) による成果である。東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻鯉渕幸生講師には、自記式濁度計をお借りした。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 宮城豊彦, 安食和宏, 藤本潔: マングローブ 一なりたち・人びと・みらい, 古今書院, pp.1-56, 2003.
- 2) Lugo, A. E. and Snedaker, S. C.: The ecology of mangroves, *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol.5, pp.39-64, 1974.
- 3) Robertson, A. I. and Alongi, D. M.: Tropical Mangrove Ecosystems, *American Geophysical Union*, pp.1-329, 1992.
- 4) 下地邦輝・大山峰吉・高平兼司: 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, 1993.
- 5) Shahbudin Saad, 浅野敏之, Mohd Lokman Husain: 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, 1998.
- 6) 赤松良久, 池田駿介, 中島洋平, 戸田祐嗣: 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/II-68, pp.179-191, 2004.
- 7) 二瓶泰雄, 関康太: 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, *海岸工学論文集*, Vol.53, No.2, pp.1086-1090, 2006.
- 8) 松田義弘: マングローブ水域の物理過程と環境形成 ー自然の保護と利用の基盤ー, 黒船出版, pp.1-103, 1997.
- 9) 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, No.2, pp.1121-1125, 2003.

(2007. 9. 30 受付)