

石垣島名蔵川における 土砂・栄養塩の流出に関する現地観測

中嶋洋平¹・池田駿介²・赤松良久³・宮本泰章⁴・山口悟司⁴・戸田祐嗣⁵

¹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)

²フェロー会員 工学博士 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 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)

⁴学生会員 学士(工) 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻

⁵正会員 博士(工) 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻

近年、沖縄地方では降雨による土砂流出が沿岸域の生態系の破壊、畠地土壤の流亡などの問題を引き起こしており、盛んに研究が行われているものの、有効な解決策を見出せていない。また、生態系に大きな影響を与える栄養塩動態に関して行われた調査・研究は僅かである。そこで本研究では、土砂のみならず栄養塩の流出動態の把握を目的として現地観測を行った。その結果、約 16km² の流域において、3 ヶ月間で 134ton、単位面積あたりでは 8.3gr/m² の土砂流出が発生し、土砂流出とともに多くの粒子態栄養塩の流出が確認された。土地利用別に見ると畠地からは溶存態栄養塩の流出が多くなっており、栄養塩は溶存態としても多く流出していることがわかった。また、降雨発生時が満潮であるか干潮であるかのタイミングが河口域への土砂流出量に影響を与えることが示された。

Key Words : soil erosion, sediment transport, field observation, nutrients, Ishigaki island, mangrove

1. 序論

沖縄地方では、農地の造成、土地改良事業、リゾート開発などを主な原因として大量の赤土が流失し、河口・沿岸域の生態系や漁業、観光産業に影響を与えている。これは赤土流出問題と呼ばれ、社会的に深刻な問題となっている。この問題の対策として、1994 年に「赤土等流出防止条例」が発令され、最終処理施設より流出する土砂濃度を 200mg/l に抑えることが義務付けられた。そして赤土流出をこの規制値以下に抑えるために、沈砂井、沈砂池の設置といった農業土木的対策やマルチングなどの営農的対策が沖縄地方の各地で行われている。しかし、これらの対策は、防止効果が弱い、普及しない、などの理由から十分な効果を発揮していないのが現状である。

畠地のような面からの土砂流出に関する研究は数多く行われている。土砂の生産量に関しては、表面流摩擦や雨滴衝撃による土粒子の剥離量を力学的に算出しようとする試み（例えば深田ら¹⁾、村上ら²⁾）や、土壤流亡算定式（USLE）の係数を同定する試み（例えば Roy ら³⁾）などが行われている。流域からの土砂流出量の調査もわが

国では全国的に多く行われており、沖縄地方に関しては酒井ら⁴⁾、南ら⁵⁾、満本ら⁶⁾の調査を代表として多くの河川で測定が行われ、その流出特性や土地利用形態による土砂生産量の違いが明らかになっている。さらに、流出モデルの構築（例えれば大澤・酒井⁷⁾、Paringit・灘岡⁸⁾）や、赤土の沈降特性に関する研究⁹⁾、海域における赤土汚染に関する調査・研究^{10), 11)}も盛んに行われている。

以上のように、土砂の生産と流域からの流出に関する調査・研究は数多く行われている。しかし、土砂流出が河口・沿岸域の生態系に対して与える影響は単純に土砂の量だけで決まるものではなく、土砂と共に流出する物質、たとえば有機物や窒素、燐を代表とする栄養塩を考慮に入れる必要がある。栄養塩動態に関する調査は近年全国的に行われているものの、沖縄地方において土砂・栄養塩濃度を測定した例は僅かである^{12), 13)}。その既往の調査では降雨期間中の濃度に関するものが多く、流出量を測定するまでには至っていない。このように、赤土の流出防止対策を科学的に策定するに当たって、土砂・栄養塩の流出量を把握する必要があるが、実測例が少ない状況である。

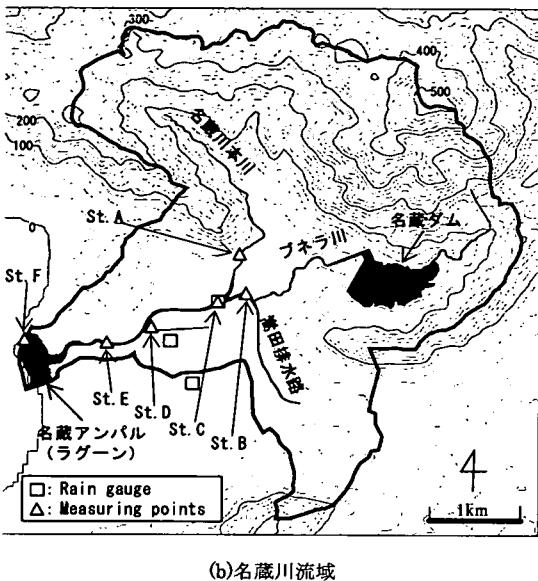
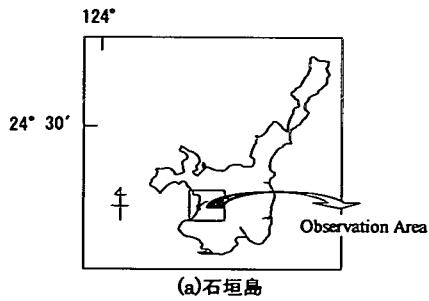


図-1 観測地地図

本報では、土砂流出に加えて、栄養塩の流出に関する現地観測を行い、名蔵川流域の土砂・栄養塩の流出量に関して得られた実測値を報告し、名蔵川流域における土砂・栄養塩の流出動態について考察する。

2. 現地観測

(1) 観測地概要

沖縄県石垣島西部に位置する名蔵川流域を対象として、降雨の多い時期である8月、9月を含む2002年8月13日～11月4日に現地観測を実施した。

名蔵川は石垣島最高峰である於茂登岳(560m)から発する全長4.6km、流域面積16.14km²の小河川である。河口部にマングローブ域と名蔵アンパルと呼ばれる約1000haの干潟(ラグーン)が広がっていることが大きな特徴である。名蔵川の支流には1997年に供用を開始した農業用水用の名蔵ダムがある(図-1)。於茂登岳山頂から中腹にかけて森林が広がっており、流域の約70%を占めて

表-1 各観測点毎の集水域面積と土地利用

	St.A	St.B	St.C	St.D	St.E	St.F
Forest	5.9 (97.6%)	4.3 (65.1%)	10.3 (79.8%)	0.04 (5.5%)	11.0 (72.6%)	11.4 (72.1%)
Rice field	0.02 (0.3%)	0.17 (2.5%)	0.19 (1.5%)	0.19 (23.9%)	0.49 (3.3%)	0.49 (3.1%)
Farm	0.0 (0.0%)	1.4 (21.5%)	1.5 (11.4%)	0.53 (65.3%)	2.7 (17.5%)	2.7 (17.3%)
River-Dam	0.01 (0.1%)	0.42 (6.4%)	0.45 (3.47%)	0.01 (0.9%)	0.51 (3.4%)	0.68 (4.3%)
Others	0.12 (2.0%)	0.29 (4.4%)	0.47 (3.75%)	0.04 (4.3%)	0.51 (3.1%)	0.50 (3.2%)
Total	6.1 (100%)	6.6 (100%)	12.9 (100%)	0.8 (100%)	15.1 (100%)	15.9 (100%)

unit:km²

表-2 観測項目

Items	Date	Method
Flow velocity	2002/8/13 ～2002/11/4	Electromagnetic velocimetry (Alec Electornics Co.)
Turbidity		Turbidity meter (Alec Electornics Co.)
Depth		Water level meter (Daiki Rika Kogyo Co.)
SS		Filtration
Carbon	P-C	SSM-5000A (SHIMADZU Co.)
	DOC	TOC-5000A (SHIMADZU Co.)
Nitrogen	T-N	2002/10/6 ～2002/10/9
	NO ₃ -N	
	NO ₂ -N	
	NH ₄ -N	2002/10/18 ～2002/10/19
Phosphorus	T-P	
	PO ₄ -P	
Sediment size distribution		AACS-II (BRAN LUBBE)
		SAUD-3000 (SHIMADZU Co.)

いる。現在、名蔵ダム供用開始と共に灌漑地区整備事業が進められており、水田や畑地の面積は増加傾向にある。

(2) 観測方法

現地観測では設置型観測機器による連続計測および降雨期間中における水質の測定を行った。測定地点を図-1に示し、各測定地点を末端とした場合の集水域面積およびその土地利用を表-1に示す。なお、地点Cの約300m下流側から感潮域である。

2002/8/13～2002/11/4に、あらかじめ横断面形状を測定してある河川6地点(St.A～St.F)で、流速、濁度、水深を計測し、流域内3地点において雨量を計測した。流速は電磁流速計 ACM - 16M, CompactEM(共にアレック電子製)、濁度は光学式濁度計 ATU3 - 8M, CompactCLW(共にアレック電子製)、水深は圧力式水深計 Diver(大起理化工業製)を用いて15分ごとに測定した。これらの測器は測定地点にある橋などから吊るし、底面に錐で固定して設置した。横断面内において、横断方向は流心、鉛直方向は降雨がない期間の最低水深より10～40cm程度低い位置とし、横断面内1点で測定を行った。雨量は転倒

折式雨量計(栄弘精機製)を用いて10分間隔で測定した。St.Cでは名蔵ダム管理事務所によって流量が測定されているため、流速は測定せずこのデータを用いた。

2002/10/6～2002/10/9, 2002/10/18～2002/10/19にSt.C, St.D, St.E, St.Fにおいて採水を行い、栄養塩の計測を実施した。St.C, St.Eでは自動採水機6712 Portable Sampler(Isco製)を設置して吸引採水を行い、その他の地点においてはバケツによる表層採水を行った。2002/10/18～2002/10/19は自動採水機を遠隔操作して採水したため、

St.C, St.E以外の地点では採水は行われていない。採水サンプルは実験室に空輸し、栄養塩濃度($\text{PO}_4 - \text{P}$, $\text{P} - \text{P}$, $\text{T} - \text{P}$, $\text{NH}_4 - \text{N}$, $\text{NO}_3 - \text{N}$, $\text{NO}_2 - \text{N}$, $\text{P} - \text{N}$, $\text{T} - \text{N}$), 溶存態有機炭素濃度(DOC), 粒子態炭素濃度($\text{P} - \text{C}$), 懸濁物質濃度(SS)を測定した。栄養塩濃度はAAC-S-II(BLAN-LUEBBE製), 溶存態有機炭素濃度, 粒子態炭素濃度はTOC-5000A(島津製作所製)を用いて測定した。表-2に観測期間、項目、方法の一覧を示す。また、測定項目の表記法を付録に示す。

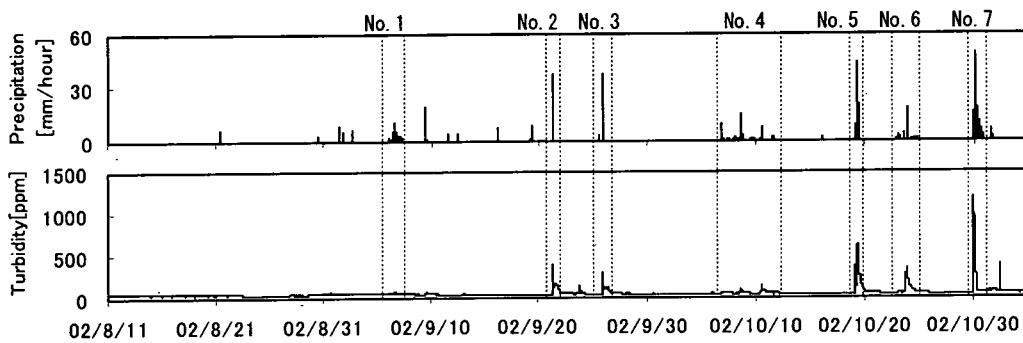


図-2 観測期間中のSt.Cにおける雨量および濁度

表-3 土砂流出量

Rain No.	Point	Area [km ²]	Precipitation		Flow Discharge			Turbidity Max [ppm]	Weight of sediment	
			Total [mm]	Hourly-max [mm/hour]	Total [10 ³ m ³]	Max [m ³ /s]	Unit area Max [m ³ /s/km ²]		Total [t] [*]	Unit area [g/m ²]
No.1	A	6.1	87	10.5	3.4	0.7	0.1	73	0.6	0.09
	B	6.6			2.9	0.5	0.1	135	0.6	0.09
	C	12.9			14	1.6	0.1	57	2.7	0.21
	D	0.8			0.0	0.2	0.3	71	0.1	0.13
	E	15.1			35	6.0	0.4	81	8.5	0.56
	F	15.9			-66	91	5.8	200	-126	-7.9
No.2	C	12.9	45	40	13	7.4	0.6	387	11	0.89
	E	15.1			7.1	5.0	0.3	196	8.3	0.55
	F	15.9			12	52	3.3	132	27	1.7
No.3	C	12.9	46	38.5	12	5.7	0.4	288	8.3	0.64
	E	15.1			15	5.9	0.4	231	13	0.86
	F	15.9			12.7	39	2.5	152	19	1.17
No.4	C	12.9	92.5	14.5	52	6.2	0.5	125	12	0.96
	D	0.8			1.9	0.27	0.3	219	0.8	0.96
	E	15.1			70	11	0.7	192	15	0.96
	F	15.9			211	76	5	248	87	5.5
No.5	C	12.9	118	43.5	33	9.9	0.8	615	65	5.0
	D	0.8			1.2	0.5	0.6	733	2.0	2.5
	E	15.1			29	8.7	0.6	688	49.9	3.3
	F	15.9			108	49	3.1	509	209	13
No.6	C	12.9	79	18.5	41	9.6	0.7	341	36	2.8
	D	0.8			0.7	0.3	0.3	381	0.81	1.00
	E	15.1			69	13	0.8	259	43	2.9
	F	15.9			68	57	3.6	176	53	3.4
No.7	C	12.9	210.5	49.5	/	/	/	1189	/	/
	D	0.8			8.3	3.3	4.1	1362	44	54
	E	15.1			/	/	/	845	/	/
	F	15.9			/	/	/	679	/	/

*1 : 1[t]=1000[kg]

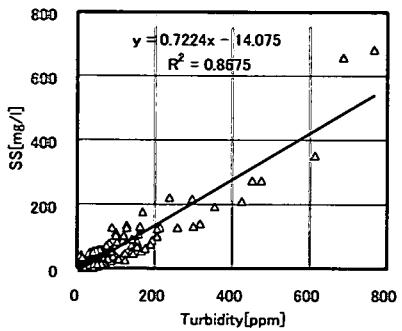


図-3 濁度とSS濃度の関係

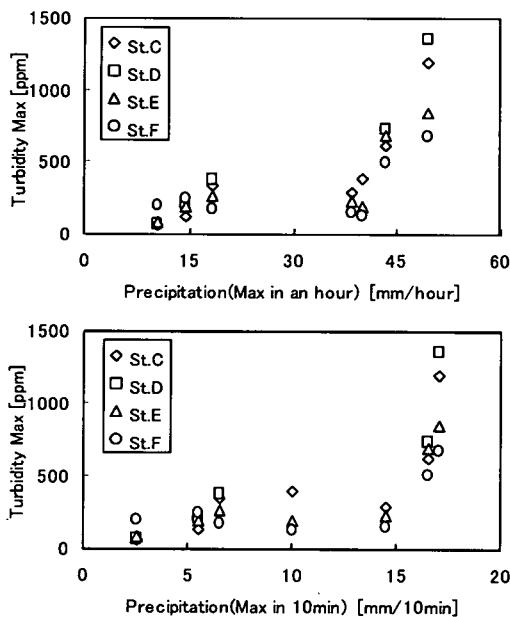


図-4 降雨強度と濁度の最大値の関係

3. 観測結果

(1) 土砂流出

a) 観測期間中の降雨と土砂流出量の算出

図-2に2002/8/11～11/4のSt.Cにおける雨量と濁度を示す。雨量は3地点で測定を行ったが、ほぼ同様な結果を得られたため、地点C付近の結果を用いて以降の考察を行っている。観測期間中に連続降雨は合計33回あったが、そのほとんどが総雨量10mm以下であり、大きな土砂流出は確認されなかった。これらの降雨の中で濁度に変動が見られ、河口まで土砂が流出したものが7回あり、それらを発生した順番にNo.1～7として土砂流出量を算出した。感潮域である地点D, E, Fは上流側に流れることがあり、これは負の流出量として取り扱っている。これらの中でも降雨No.5は1年に1回起こる程度、降雨

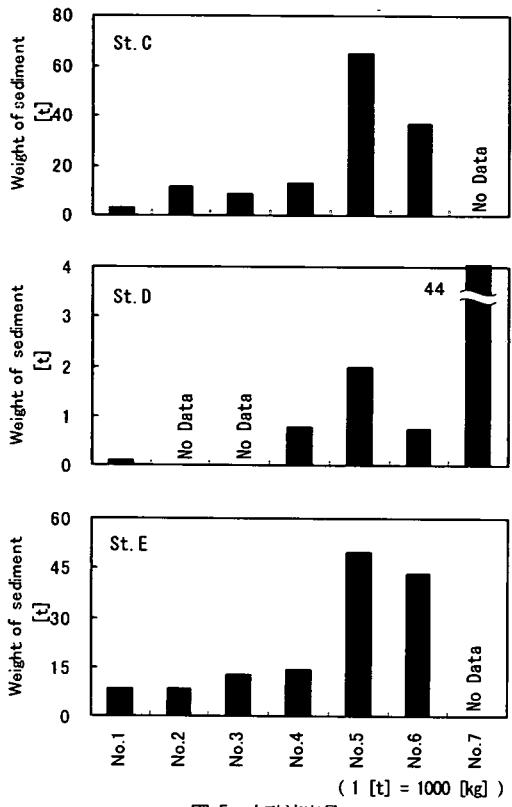


図-5 土砂流出量

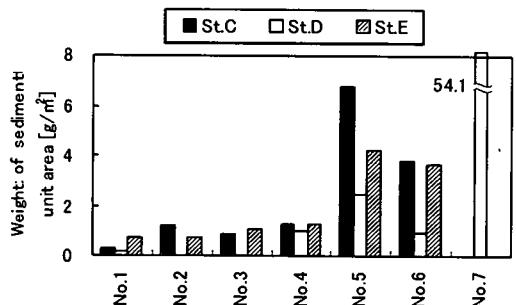


図-6 単位面積あたりの土砂流出量

No.7は9年に1回起こる程度と非常に強い降雨であった。濁度から土砂の重量濃度に換算するため、採水サンプル306個のSS濃度と、その採水時間における濁度から、濁度とSSの関係を求めた。SS濃度と濁度の関係を図-3に示す。測定した流速に水深から算出される通水断面積を乗じることで流量を算定し、それと濁度から換算されたSSの積からSSのフラックスを求めた。そして、このフラックスから土砂の流出量を算出した。その結果と降雨に関する主な項目を表-3に示す。

b) 濁度の変動

図-2, 表-3より、降雨No.5と降雨No.7において500ppm

を超える非常に高い濁度が発生している。残り 5 つの降雨でも最大値が 60~400ppm 程度の平水時に比べて数倍~数十倍の濁度が観測された。図-4 に降雨 No.1~No.7 のそれぞれの降雨強度の最大値と濁度の最大値の関係を示す。これより、1 時間最大雨量、10 分間最大雨量のどちらにおいても最大雨量が大きくなれば濁度の最大値が増加するという傾向が見られ、ある降雨強度（1 時間最大雨量の場合 40mm/hour）（10 分間最大雨量の場合 15mm/10min）以上になると急激に濁度の最大値が増加することがわかる。降雨強度が大きい場合は畠地から発生する濁度が高くなることが報告されており²⁾、これが降雨強度の増加とともに濁度の最大値が大きくなつた一因と考えられる。しかし、地点 D と比較して畠地面積が占める割合が小さい地点 C においても濁度の最大値は高いことから、畠地のみではなく他の土地利用からも降雨強度が多くなれば高い濁度が発生すると考えられる。降雨強度がある値を超えると急激に濁度の最大値が大きくなるのは、降雨強度の高い場合、土砂発生源で発生した高濃度の濁水を下流に押し流すほどの表面流が発生するためであると考えられる。

但し、上記の考察では土砂流出の発生地点から河道内の測定地点までの輸送過程を考慮に入れていないため、土砂のピーク濃度やピーク時間の詳細について議論することはできない。今後、土砂発生源から河川の間に存在する農業排水路網や沈砂地などの効果を把握することが必要である。

c) 土砂流出量

図-5 に St.C, D, E の土砂流出量を示す。降雨 No.1~No.4 の合計雨量は約 270mm で No.5 の総雨量 118mm の約 2.5 倍になる。しかし、どの地点においても No.1~4 の合計土砂流出量と No.5 の土砂流出量は同程度であった。これは、No.5 は降雨強度が大きく、高い濁度が発生していたためであると考えられる。土砂の流出量は総雨量によって決定されるのではなく、濁度の増加の一因とされる降雨強度も関係しているといえる。

9 月 1 日~10 月 29 日の St.E における全土砂流出量は 134ton であったが、1 年に 1 回生起する程度の降雨 No.5 で 50ton が流出しており、その約 4 割を占めている。さらに No.7 では土砂流出量は測定できていないものの、総雨量、降雨強度から判断すると No.5 以上の土砂の流出があったと予想される。土砂の流出は、降雨強度が大きく、流出した土砂を下流へ流すのに十分な雨量が発生した降雨に集中して起こっていると考えられる。このように非常に強い降雨に対して対策を練ることが河口域への赤土砂流出を抑制することにつながるといえる。

既往の調査³⁾では、本観測における No.5 と同程度の降雨においてパイナップルが主作物の流域から単位面積あたりの土砂流出量 87.2g/m² が観測されている。本研究で

対象とした名蔵川流域では 1~5g/m² であり、沖縄地方で特に流出が多い地域ではないと考えられる。しかし、マンゴープローブ域へ流入する St.E において規制値 200ppm を超える濁度が 3 ヶ月の間に 5 回発生しており、明らかに対策は不十分である。

d) 土地利用と土砂の流出量の関係

図-6 に St.C, St.D, St.E を末端とする集水域における単位面積あたりの土砂流出量を示す。既往の調査³⁾では森林の方が畠地からの流出量よりも少ないことが報告されているが、本観測では集水域中に森林が占める割合が高い St.C で最も大きな土砂流出が観測されている。表-3, No. 5, 6 の比流量を見ると、畠地の多い地点 D は森林の多い地点 C のそれぞれ 75%, 43% であり、流量が低く測定されている可能性がある。しかし、No.5, 地点 D の単位面積当たりの土砂流出量は No.5 で地点 C の 50%, No.6 で 38% と、比流量以上に少なく測定されている。このことより、森林が多い地点 C で単位面積あたりの土砂流出量は多くなっていると考えられる。名蔵川流域では現在土地改良事業や河川改修工事が進められており、土地利用面積では 1% にも満たない工事現場からの流出がその原因のひとつとして考えられる。満本ら⁹⁾によって沖縄本島の様々な土砂流出源における流出水の SS 濃度が測定されているが、特に工事現場において高い濁度が確認されている。このように、局所的に土砂流出が発生する工事現場のような点源負荷の影響も考慮に入れる必要がある。

(2) 栄養塩流出

本研究では土砂の流出量だけでなく、栄養塩の流出量も同時に測定している。本節では降雨期間中の栄養塩濃度の変動と総流出量を溶存態・粒子態別に考察し、栄養塩の流出動態に関して記述する。

a) 粒子態栄養塩濃度の変動

図-7 に降雨 No.4 (2002/10/7 12:00 ~ 2002/10/9 12:00) および降雨 No.5 (2002/10/18 12:00 ~ 2002/10/20 12:00) について St.E の SS 濃度、流量、および粒子態栄養塩濃度の変化を示す。これを見ると、P-C, P-P, は SS の増加に対応して降雨時に増加しているが、P-N は SS が増加する際に多少の増加が見られるものの、P-C や P-P のように明確ではない。図-8 に降雨 No.4, No.5 の期間に採取したサンプル 94 個の SS 濃度と粒子態栄養塩濃度の関係を示す。これを見ると図-7 で見られたように、P-C, P-P は SS と正の相関があり、特に P-P に関しては非常に高い相関関係にある。P-P は粒子に吸着して存在する量が多いことが一般に知られており、SS が増えることによって吸着する面積が増加したことが P-P 増加の原因として考えられる。P-C は主に有機物として濁水中に存在しており、SS 濃度の増加と共に有機物量も増加したこと

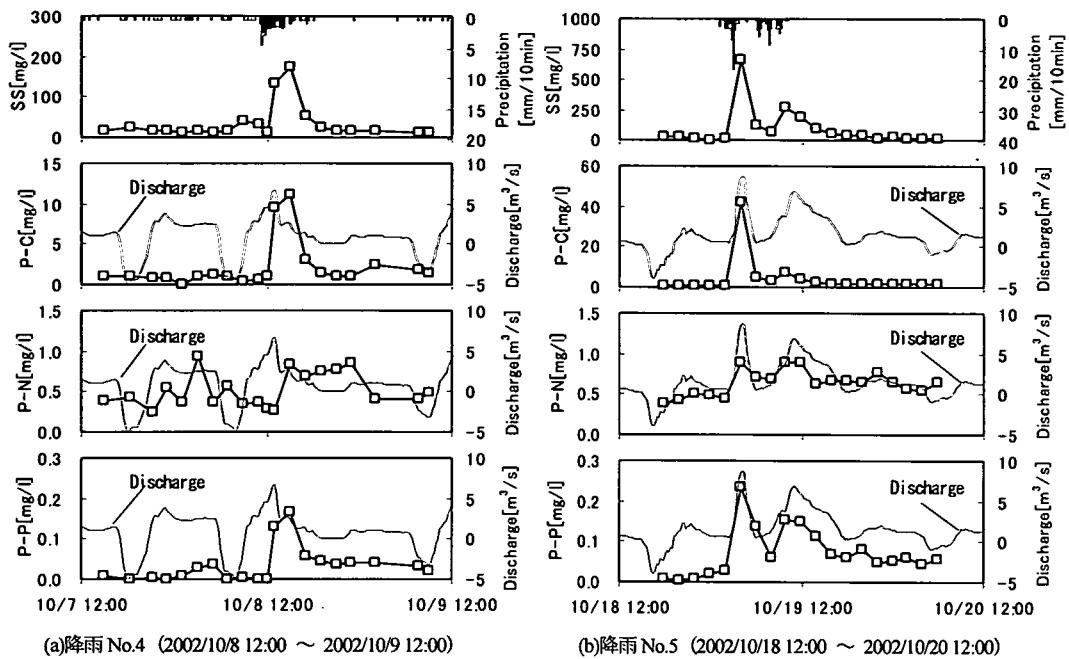


図-7 St.E における SS, 流量および粒子態栄養塩濃度の変化

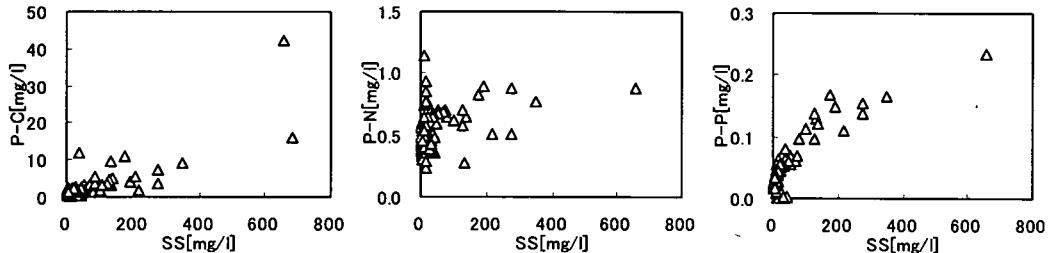


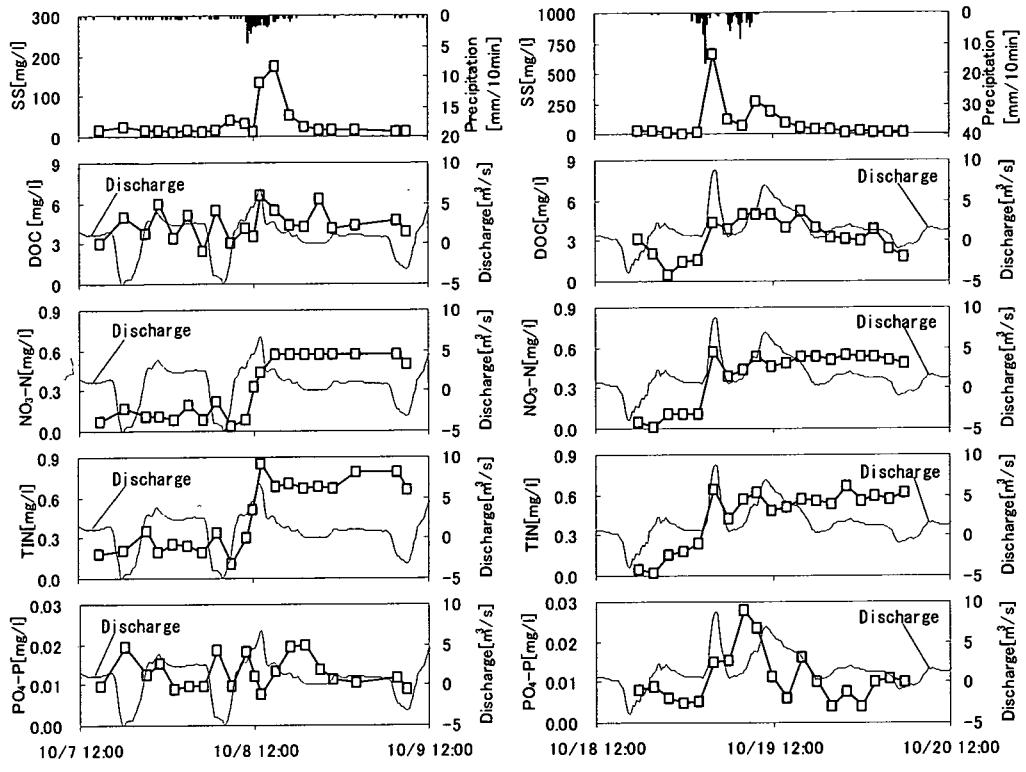
図-8 SS と粒子態栄養塩の関係

とが原因と考えられる。しかし、SS に対する有機物の量が一定ではないために、P - C は P - P よりもばらつきが生じており、P - P ほど相関がみられていない。つまり、P - P は土砂の量と関係しているのに対し、P - C は土砂の質と関係していると考えられる。土砂の質は土砂起源の違いにより現れると考えられ、土砂発生源別に詳細に見ていく必要がある。これらに対し、P - N は SS と明確な相関関係が見られず、SS 濃度が低い時でも高くなる場合があり、単純に土砂の量と関連付けることはできない。

b) 溶存態栄養塩濃度の変動

図-9 に降雨 No.4 (2002/10/7 12:00 ~ 2002/10/9 12:00) および降雨 No.5 (2002/10/18 12:00 ~ 2002/10/20 12:00) について St.E における濁度、流量、溶存態栄養塩濃度の変化を示す。ここで TIN は全無機態窒素であり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の総和として算出した。この図より、DOC に大きな変動は見られないが、降雨 No.4、No.5 における $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TIN の濃度と、降雨 No.5 における $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度が明確に増加していることがわかる。

降雨 No.5 の $\text{PO}_4\text{-P}$ に関しては、流量がピークに達した後、4 時間ほど遅れてからピークが現れており、2 回目の流量のピーク後も同様に 4 時間後にピークが生じている。 $\text{PO}_4\text{-P}$ の変動は流量の変動に対して若干の遅れが見られる。降雨 No.4 でも、流量のピーク 10/8 12:00 に対して 4 時間後の 10/8 16:00 に濃度の上昇が見られる。降雨 No.5 と比較して濃度の上昇が明確ではないが、これは降雨 No.4 は発生流量が小さく、潮汐による海水の影響を受けたためであると考えられる。このように、表面流による流量のピークの増加には対応せず、その後に遅れて増加する傾向が見られることから、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は表面流による流量増加よりも遅れてピークが現れる中間流出や地下水流出に高濃度で含まれている可能性が高い。しかし、本観測では流域内に観測井戸を設けておらず、地下水の採取・分析を行っていないため、ここで断定することはできないが、このような $\text{PO}_4\text{-P}$ のピーク時間遅れは地下水流出の可能性が高いと考えられる。



(a)降雨No.4 (2002/10/8 12:00 ~ 2002/10/9 12:00)

(b)降雨No.5 (2002/10/18 12:00 ~ 2002/10/20 12:00)

図-9 St.E におけるSS, 流量および溶存態栄養塩濃度の変化

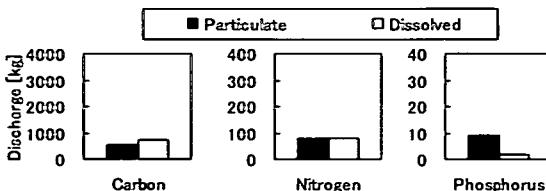
表-4 栄養塩流出量

Rain No.	No.4			No.5	
Point	C	D	E	C	E
Area [km ²]	12.9	0.8	15.1	12.9	15.1
Precipitation	Total [mm]	92.5			118
Weight of sediment	Total [ton]	12 (0.96)	0.8 (0.96)	15 (0.96)	65 (5.0) 50 (3.3)
	Particulate [kg]	619 (48)	20 (25)	520 (34)	1170 (90) 2463 (163)
	Dissolved [kg]	960 (74)	39 (48)	721 (48)	1076 (83) 1107 (73)
Carbon	Total [kg]	1579 (122)	59 (73)	1241 (82)	2246 (174) 3570 (236)
	Particulate [kg]	7.2 (0.56)	0.7 (0.84)	9.4 (0.62)	32 (2.5) 31.8 (2.1)
	Dissolved [kg]	2.4 (0.19)	0.47 (0.58)	1.8 (0.12)	8.6 (0.67) 3.5 (0.23)
Phosphorus	Total [kg]	9.6 (0.74)	1.2 (1.4)	11.2 (0.74)	40.6 (3.1) 35.3 (2.3)
	Particulate [kg]	104 (8.0)	2.5 (3.1)	80 (5.3)	178 (14) 202 (13)
	Dissolved [kg]	97 (7.5)	16 (19)	77 (5.19)	164 (13) 140 (9.2)
Nitrogen	Total [kg]	201 (16)	18.5 (22)	157 (10)	342 (26) 342 (23)

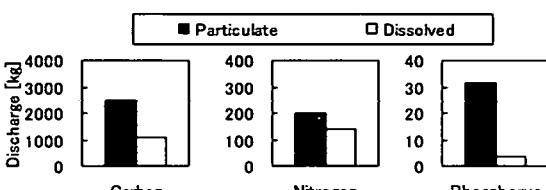
():unit area [mg/m²]

$\text{NO}_3\text{-N}$ に関しては、流量増加直後に増加していることから、表面流出水に高濃度で含まれていると考えられる。しかし、流量が減少した後においても高濃度を維持しており、降雨後に徐々に流出する地下水流出水にも高い濃

度で含まれていたと考えられる。窒素はリンと比較して水に溶出しやすいため、地下水だけでなく、表面流にも溶出し河川中の濃度の増加を引き起こしていると考えられる。



(a)降雨No.4



(b)降雨No.5

図-10 StEにおける粒子態、溶存態栄養塩の流出量

このように、溶存態のリンは $\text{PO}_4 - \text{P}$ を多く含んだ地下水が降雨によって押し出されることによって流出し、溶存態窒素は土壌から地下水や表面流のどちらにも溶出し、河川に流出していると考えられる。降雨期間中の溶存態栄養塩濃度は雨水によって希釈され、減少する場合もあることが報告されている¹⁴⁾が、本研究で対象とした名蔵川流域では、降雨による地下水の流出と土壌からの雨水への溶出によって溶存態窒素、溶存態リン濃度が増加することがわかった。

c) 土砂流出量と栄養塩流出量の関係

栄養塩濃度と流量を乗じることにより栄養塩の総流出量を概算した。その際、流量よりも測定時間間隔の広い栄養塩濃度は線形補完して計算した。このようにして得られた降雨 No.4, No.5 における栄養塩流出量を表-4 に示す。また、この 2 つの降雨における StE での粒子態、溶存態別の栄養塩流出量を図-10 に示す。降雨 No.4 における総流出量は、炭素は溶存態が多く、リンは粒子態が多く、窒素は粒子態、溶存態が同程度である。それに対し、降雨 No.4 よりも土砂の流出量が多い降雨 No.5 では、炭素、リン、窒素のすべてにおいて粒子態の流出量が多い。リンは粒子への吸着性が強いため土砂流出の規模に関係なく、主に粒子態として流出するが、炭素、窒素に関しては土砂流出の規模によって粒子態、溶存態の比率が変化すると考えられ、特に炭素や窒素は土砂の流出規模が小さければ粒子態と同程度の溶存態栄養塩が流出していることがわかる。

既往の調査¹²⁾では、沖縄本島の 98 河川において数回の降雨において採水を行い、粒子態と溶存態の流出割合は窒素で 4:6、リンで 7:3 という結果が得られている。本研究では流量測定も同時に実行して栄養塩の流出量を算出したところ、粒子態と溶存態の流出量の割合は炭素で 7:3、窒素で 4:6、リンで 9:1 と物質ごとに違いが見られた。特

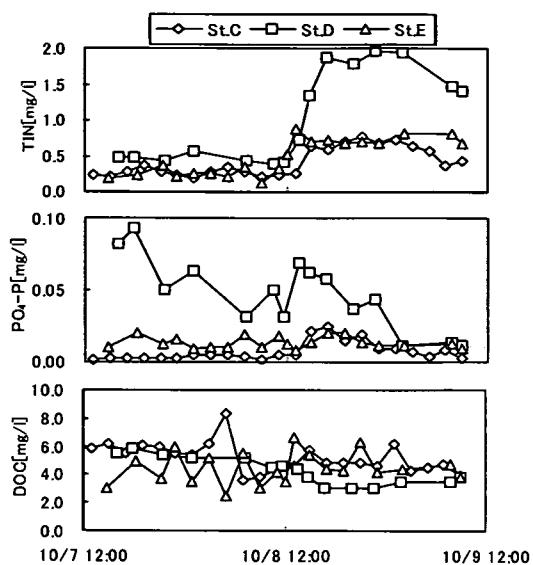
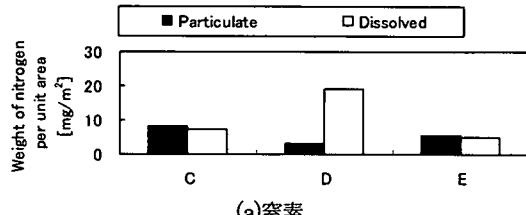
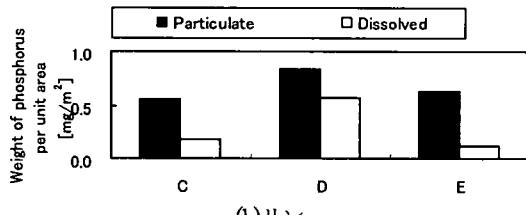


図-11 StC, StD, StE における全無機態窒素濃度および溶存態炭素、リン濃度の変化



(a)窒素



(b)リン

図-12 StC, StD, StE における単位面積当たりの栄養塩流出量

にリンは粒子態として多く流出していることが本観測においても確認された。

d) 土地利用による溶存態栄養塩流出量の違い

2002/10/7 12:00 ~ 2002/10/9 12:00 の StC, StD, StE における全無機態窒素(TIN)と $\text{PO}_4 - \text{P}$ および DOC の変化を図-11 に示す。上流側集水域が畠地約 65%、水田約 25% である StD において TIN, $\text{PO}_4 - \text{P}$ が非常に高くなっている。StC, StE の上流域は森林が約 70~80%，畠地が約 15~25%，水田が 2~5% の面積を占めており、StD の上流域は StC, StE の上流域に比べて畠地が占める割合が

高い。のことから StDにおいて TIN や $\text{PO}_4 - \text{P}$ が高くなる原因の一つとして畑地の影響が考えられる。この地域のサトウキビ畑では、植えつけ前に除草剤が散布されており、これらが表面流や地下水に溶け込むことで溶存態窒素が増加したと考えられる。 $\text{PO}_4 - \text{P}$ は降雨前の地下水に多く含まれているが、吸着性が高く降雨期間中に新たに溶出して濃度増加を引き起こすことはなかった。そのため $\text{PO}_4 - \text{P}$ 濃度は、降雨により地下水が徐々に河川中へ押し出されていく過程で希釈され、徐々に減少したと考えられる。これに対し、DOC は降雨による大きな増加を見せず、地点ごとに大きな差が生じていない。原因を考える場合、地下水分析などの詳細な観測を行う必要があるが、DOC に関しては土地利用ごとに大きな差がないといえる。

表-4 の単位面積当たりの栄養塩の流出量を見ると、溶存態窒素や溶存態リンは畑地面積が 65%近くを占める StD で他の地点と比較して 3 倍近く多い。図-12 に、降雨 No.4 における単位面積あたりの窒素流出量とリン流出量を地点別に示している。これを見ても、StD では他の地点に比べて溶存態窒素、溶存態リンの流出量が特に多いことがわかる。これは図-11 でも示したように、地下水の影響を受けて降雨期間中に濃度が増加するためであると考えられる。これに対して炭素は、地点 C で他の地点の約 1.7 倍程度多くなっているものの、地点間の差は窒素やリンと比較して小さい。図-11 で示したように DOC 濃度には地点ごとの差が見られないことから、窒素やリンのような地点ごとの差が明確に存在するとは断定しにくい。このことから、炭素にも地点ごとの違いが確認されたが、土地利用による違いを議論するにはさらに精度の良い観測を必要とする。

以上より、炭素に関しては明確な結論を導くことができなかつたが、畑地からの流出水には溶存態リンと溶存態窒素が多く含まれており、その結果、畑地が多い流域では溶存態リンと溶存態窒素の流出量が多くなることがわかった。

(3) 降雨ごとに見た土砂動態

a) 総雨量による流出動態の違い

総雨量が 45mm の降雨 No.2 と 118mm の降雨 No.4 での St.E, St.F における雨量、濁度、水深を図-13(a), (b) に示す。降雨 No.2 の場合、河口の St.E では降雨後の下げ潮時に濁度が増加し、満潮で濁度の減少、干潮で濁度の増加を 2 回ほど繰り返している。これは、濁質がすべて流出する前に満潮になり、海水が浸入することによって土砂を含んだ河川水が上流側に押し戻されたためであると考えられる。St.F でも St.E と同様に 1 回目の下げ潮時に大きな濁度の増加があり、その後 2 回の下げ潮時にわずかではあるが濁度の増加が見られる。このことから、降

雨後 1 回目の下げ潮だけでは濁質が河口域のラグーンへ完全に流出していないことがわかる。この降雨では、土砂は降雨直後だけでなくその後数回の下げ潮によって上流域から河口域へ徐々に供給され、数回の潮汐の間ラグーンやマングローブ域に滞留しているものと判断される。

これに対し降雨 No.4 の場合、St.F では降雨直後とその後数回の下げ潮時に濁度の増加が見られるが、St.E では降雨直後の干潮時に 1 回だけしかない。この降雨では総雨量が多く St.E 付近では 1 潮汐間を通じてほとんど下流側に流れしており、満潮による海水の浸入によって河川水が St.E まで押し戻されることがなかった。そのため、St.F で見られた 2 回目以降の濁度の増加は、降雨 No.2 のように上流から徐々に供給されたものではなく、沈殿せずに沿岸域に残留していた土砂が上げ潮時に再び河口域に流入し、St.E まで達することなく次の下げ潮で流出することで起こっている。つまり降雨後 1 回目の下げ潮によって上流域からの土砂が河口域・沿岸域へ供給され、その後、それらの土砂が徐々に沈降しながらラグーンと沿岸域間を往復運動しているものと思われる。

このように、出水規模によって感潮域での挙動に違いが見られた。降雨 No.2 のように降雨強度が大きく、短時間に集中して降る降雨では、濁質はマングローブ域やラグーンなどの河口域へ一度に流出せず、数回の下げ潮で徐々に供給されることがわかった。

b) 潮汐による流出動態の違い

降雨 No.4 では干潮時に出水が起ったが、それに対して満潮時に出水が起った降雨 No.5 の雨量、濁度、水深を図-13(c) に示す。降雨 No.4 は出水時が干潮であったことから、上流で発生した土砂は速やかに河口まで流出している。それに対して降雨 No.5 では、マングローブ域より上流側の St.E において 2 回の濁度のピークがあるにもかかわらず、下流側の St.F では 1 回のピークしか現れていない。つまり、St.E で 1 回目の濁度の増加を引き起こした浮遊土砂は下げ潮になるまで干潟やマングローブ水域で一時的に滞留していたと考えられる。降雨 No.5 のように、降雨による出水が満潮時であれば濁質がこれらの水域に滞留する時間が長くなり、沈殿しやすい状況になるとを考えられる。

c) マングローブ水域への土砂の堆積

この観測結果を基に赤松¹⁵⁾は現地地形に基づいた数値計算を行い、出水時が干潮の降雨 No.4 と満潮の降雨 No.5 におけるマングローブ域への土砂堆積量を求めている。この計算が行われた領域の地図を図-14 に示し、2002/10/8 0:00～10/9 12:00 および 2002/10/19 0:00～2002/10/20 6:00 の St.E, St.F での濁度、水深およびマングローブ域への土砂堆積量の変化を図-15 に示す。図中で用いられている R - B はマングローブ水域の右岸側を代表する点、L - B はマングローブ水域の左岸側を代表する点での土砂堆積量

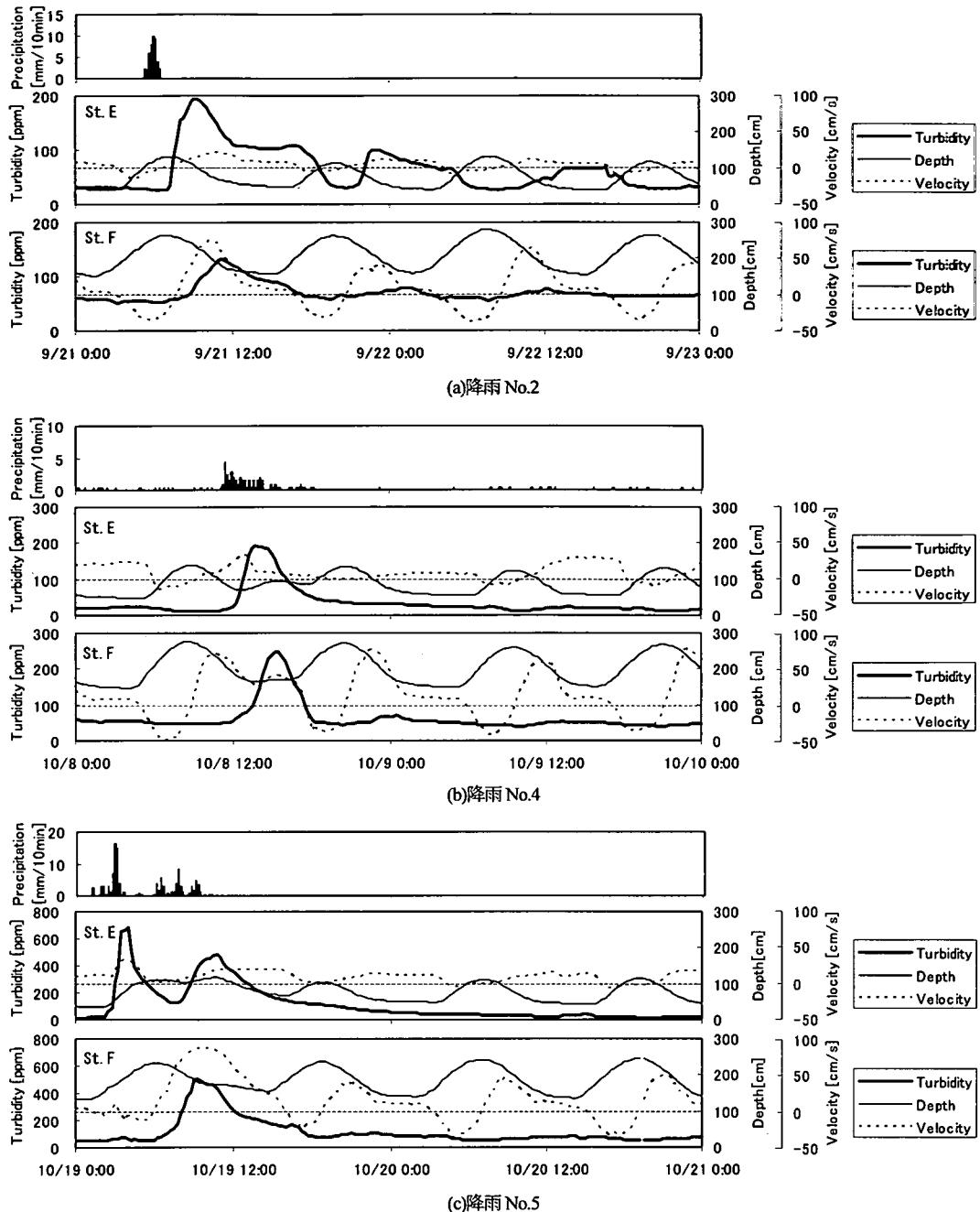


図-13 St.E, St.Fにおける雨量、濁度および水深の変化

を表している（位置は図-14）。降雨No.5は中潮期に発生しており、マングローブ域の中でも標高の高い左岸側には海水がほとんど氾濫しなかったため、L-Bでは土砂の堆積は起こらなかった。

降雨No.4では、出水時が干潮であり、下流に向かう流れがあるため濁度が増加した直後では土砂堆積量は少ない。しかし、次の満潮時に一度外海へ流出した土砂が再

び上げ潮に乗ってマングローブ域に侵入していくことにより、濁度が最も高い時よりも多くの浮遊土砂が堆積している。この降雨は大潮期に発生しており、満潮時にマングローブ域に氾濫する海水が多くなったため、外海から戻ってきた多くの土砂が堆積したと考えられる。

降雨No.5は降雨直後が満潮であり、流出してきた濁水がマングローブ域に滞留する時間が長く、そのため最初

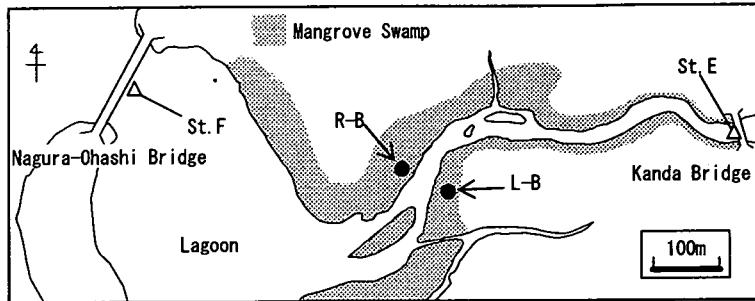


図-14 河口域の地図

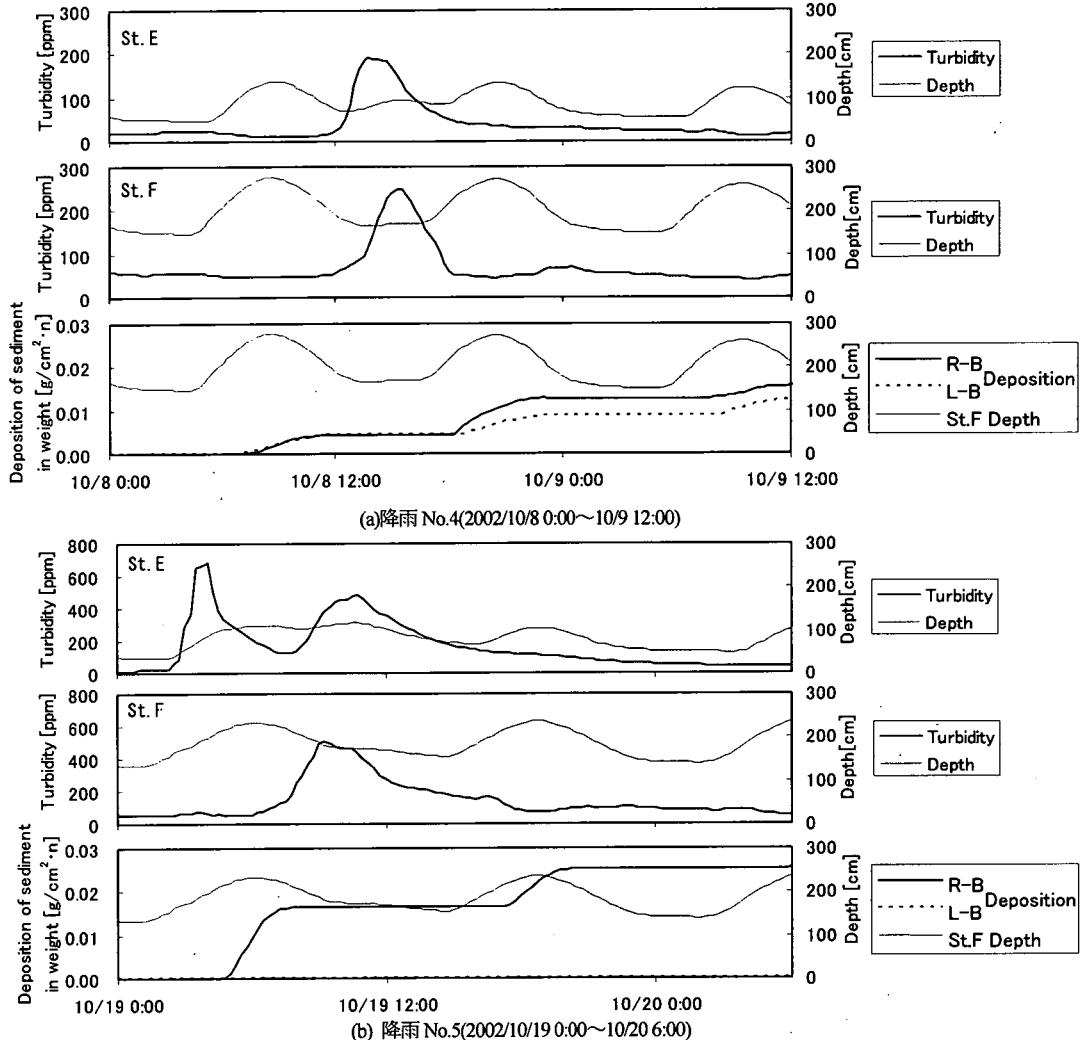


図-15 St.E, St.Fにおける濁度、水深およびマングローブ水域における土砂堆積量の変化¹⁵⁾

の満潮時に多くの土砂が堆積している。降雨直後の満潮時における堆積量は全土砂堆積量の6割を占めており、降雨No.4と違って土砂の堆積は降雨直後に起こっている。このように、降雨の規模や出水時の潮汐とのタイミングによって土砂の動態に違いが確認された。本研究で対象とした名蔵川流域は河口部に浅くて広いラグーンを有

しており、貯留効果が起こりやすい状況にある。今後、数値計算のみでなく詳細に観測を行うことで、干潟やマングローブ水域への土砂・栄養塩の堆積量を把握し、赤土流出がマングローブ域などの河口域に与える影響を明らかにしていく必要がある。

4. 結論

名蔵川流域において、土砂・栄養塩の両方に着目して現地観測を行った結果、1降雨ごとの土砂流出量と栄養塩流出量を同時に測定することができた。さらにラグーンやマングローブ水域における土砂流出動態が、降雨規模や潮汐とのタイミングにより異なることが確認された。

本研究は現地観測により沖縄地方で問題となっている赤土流出現象の実測データを得ることを目的として行い、多くの実測データを得ることができた。特に数年スケールでのマングローブ水域やラグーンの環境変化を捉える上で、本研究による観測結果は有用である。

この観測結果により得られた知見を以下に記す。

- (1) 年に1回生起する程度の降雨によって全観測期間中の総土砂流出量の約4割が流出していた。土砂流出は強い降雨時に集中して起こる。
- (2) 土砂流出量が多い降雨では栄養塩は主に粒子態として流出するが、土砂流出量が少ない降雨では炭素と窒素に関しては粒子態と同程度の溶存態栄養塩が流出する。
- (3) 畑地が多い流域からは溶存態窒素と溶存態リンが多く流出する。
- (4) 総雨量や潮汐とのタイミングによって、1回の降雨でマングローブ水域やラグーンへ堆積する土砂量が異なる。

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。現地観測では東京大学大学院 農学生命科学研究科 島田研究室の方々にご協力をいただいた。また、名蔵ダム管理事務所には流量データを提供していただいた。記して謝意を表します。

付録

本論文で用いた表記法を以下に示す。

SS	: 浮遊物質量 (Suspended Solid) [mg/l]
T - P	: 全リン (Total Phosphorus) [mg/l]
T - N	: 全窒素 (Total Nitrogen) [mg/l]
P - P	: 粒子態リン (Particulate Phosphorus) [mg/l]
P - N	: 粒子態窒素 (Particulate Nitrogen) [mg/l]
P - C	: 粒子態炭素 (Particulate Carbon) [mg/l]
PO ₄ - P	: リン酸態リン (orthophosphate) [mg/l]
NH ₄ - N	: アンモニア態窒素 (ammonia) [mg/l]
NO ₃ - N	: 硝酸態窒素 (nitrate) [mg/l]
NO ₂ - N	: 亜硝酸態窒素 (nitrite) [mg/l]
TIN	: 全無機態窒素 (Total Inorganic Nitrogen) [mg/l]
DOC	: 溶存態有機炭素 (Dissolved Organic Carbon) [mg/l]

参考文献

- 1) 深田三夫, 藤原輝男, 日下達郎 : 水圧力積の考え方による湛水土壌面での土粒子剥離のモデル化, 農業土木学会論文集, No.158, pp.17-27, 1992.
- 2) 村上正吾, 辻本哲郎, 中川博次, S.Makhanu : 降雨による裸地斜面の土壤浸食に関する基礎的研究, 水工学論文集, No.40, pp.855-862, 1996.
- 3) Kingshuk Roy, 日下達郎, 深田三夫 : 作物の生長に伴う被覆係数および歛状係数の定数化について, 農業土木学会論文集, No.180, pp.29-37, 1995.
- 4) 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.
- 5) 南哲行, 小山内信智, 山田孝, 黒崎靖介, 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.
- 6) 満本裕彰, 大見謝辰男, 比嘉榮三郎, 仲宗根一哉 : 流出源濁水のSS濃度について, 沖縄県衛生環境研究所所報, 第34号, pp.125-127, 2000.
- 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) Enrico Paringit, 瀧岡和夫 : 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壤流出モデリング, 海岸工学論文集, No.48, pp.666-670, 2001.
- 9) 比嘉榮三郎, 満本裕彰 : 沖縄に分布する土壤等の沈降特性(第2報), 沖縄県衛生環境研究所所報, 第34号, pp.77-84, 2000.
- 10) 仲宗根一哉, 大見謝辰男, 満本裕彰, 上原睦男, 大城哲 : 海域における赤土汚染モニタリング, 沖縄県衛生環境研究所所報, 第34号, pp.86-96, 2000.
- 11) 瀧岡和夫, 二瓶泰雄, 横山智子, 大見謝辰男, 下池和幸 : 海底分光反射特性に基づくサンゴ礁海域衛星モニタリングの一般化の試み, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1291-1295, 1997.
- 12) 仲宗根一哉, 比嘉榮三郎, 大見謝辰男, 安村茂樹, 瀧岡和夫 : 石垣島轟川のSSと栄養塩濃度, 沖縄県衛生環境研究所所報, 第35号, pp.93-101, 2001.
- 13) 比嘉榮三郎, 仲宗根一哉, 大見謝辰男, 満本裕彰 : 沖縄島の河川河口から海域へのSSおよび栄養塩の流出, 沖縄県衛生環境研究所所報, 第35号, pp.111-119, 2001.
- 14) 武田育郎, 國松孝男, 小林慎太郎, 丸山利輔 : 降雨時における水田群からの汚濁負荷流出 -水田群からの汚濁負荷流出に関する研究(1)-, 農業土木学会論文集, No.147, pp.79-85, 1990.
- 15) 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.

(2003. 3. 11 受付)

FIELD OBSERVATION ON THE EFFLUENT OF SEDIMENT AND NUTRIENT
IN NAGURA BASIN, ISHIGAKI ISLNAD

Youhei NAKASHIMA, Syunsuke IKEDA, Yoshihisa AKAMATSU,
Yasuaki MIYAMOTO, Satoshi YAMAGUCHI and Yuji TODA

Field observation on the supply of sediment and nutrients from Nagura river basin, Ishigaki island, was studied in this paper. They were estimated by measuring water velocity, depth, turbidity, concentrations of carbon, nitrogen and phosphorous, in which the former 3 items were measured continuously for 3 months and the concentrations of latter 3 materials were observed only for rainy days. The result has revealed that the sediment yield from the basin in these 3months is 134 tons, and the specific sediment yield in this basin is 8.3gr/m^2 for the 3months. It was found that heavy rains yield nutrients mainly in particulate type. However, sugar cane field yields dissolved nutrients gradually after the rain. The timing of flood and tide is an important factor to control the discharge of sediment and nutrients to the tidal area such as lagoon and river mouth.