

沖縄島の河川河口から海域へのSS及び栄養塩の流出

比嘉榮三郎・仲宗根一哉・大見謝辰男・満本裕影

Pollutants Run-off from Mouth of Rivers to Sea in Okinawa Island

Eisaburo HIGA, Kazuya NAKASONE, Tatsuo OMIJA and Hiroaki MITHUMOTO

要旨：沖縄島北部地域を流れる82河川と沖縄島南部地域の16河川を対象に、河口から海域への浮遊物質(SS)や窒素、リンなどの栄養塩の流出状況を調査した。降雨時の河口での全窒素(T-N)、全リン(T-P)の濃度は、SSが高くなると増加傾向を示し、特にT-PはSSとの相関性が高くなる。降雨時のSSの主たる成分が土粒子であることを考えると、N、Pの増加は、赤土等の流出が原因となっている。また、全窒素の約60%が溶存態の形で流出するのに対し、全リンは約70%が土粒子などに吸着して流出していることが明らかになったが、この結果はこれまでの本土での報告と同じような傾向を示している。T-N、T-Pとも、沖縄島北部地域の河川に比べ、沖縄島南部地域の河川濃度が高くなるが、この理由として流域の土壌・土質、土地利用形態などの違いや生活廃水などの流入の影響が考えられる。

はじめに

本土では1960年代頃から、主に湖沼などの閉鎖性水域や海域において窒素・リンによる富栄養化が問題になっている。

最近では、農地などから降雨時に高濃度の窒素、リンが表面流出し下流域の水環境への影響が懸念されるなど、栄養塩の流出に関し多くの調査研究¹⁾が実施されている。

沖縄県においても、赤土等と同様に栄養塩の流出は、降雨時に著しいことが予測され、海藻類の分布域の拡大に伴うサンゴ群落の衰退が懸念されるなど総合的な流出調査が必要となっている。

沖縄県では、水質汚濁防止法に基づき、公共用水域の水質汚濁状況を常時監視する目的から比謝川など25河川、中城湾など13海域を指定し水質測定を実施しているが、栄養塩の測定は、河川では全く実施されておらず、海域で晴天時に11海域で実施されているに過ぎない。

このように、河川や海域における栄養塩の測定データ数は少なく、降雨時の全県的な調査となると、これまでほとんど実施されていないのが現状である。

そこで沖縄島北部、南部地域に分布する河川を対象に、河口域での降雨時と平常時の浮遊物質量(SS)及び栄養塩濃度のモニタリングを実施し、海域への流出状況について調査研究を行った。

なお、本研究は、サンゴ礁に関する調査研究「陸上起源の濁水、栄養塩類等のモニタリング手法に関する研究」

(沖縄開発庁委託事業)として(財)亜熱帯総合研究所と共同で実施した調査である。

方法

1. 調査方法

調査期間：2000年6月～2001年3月

調査河川：沖縄島北部の国頭マ・ジ地域に分布する82河川(準用河川などを含む)、沖縄島南部のジャ・ガル・クチャ地域の16河川(準用河川などを含む)及び沖縄島南部の湧水2カ所を対象に行った。

採水方法：採水は、降雨中又は降雨後すぐに河川河口付近で、全窒素、全リン測定用をガラス瓶にSSなどの測定用としてポリビンにそれぞれ採水した。晴天時の採水は、干潮時の前後に行った。

2. 測定方法

測定項目：懸濁態の全窒素(T-N)、全リン(T-P)、浮遊物質(SS)、濁度、粒度分布及び溶存態の窒素(DTN)、リン(DTP)を測定した。

分析方法：全窒素はアルカリ性ペルオキシニ硫酸カリウム分解-カドミウム還元法、全リンがペルオキシニ硫酸カリウム分解-モリブデン青吸光光度法で行った。溶存態の窒素、リンは、降雨時のサンプルを0.45 μmメンブランフィルタ-でろ過後、ろ液を全窒素、全リンと同様

な方法で分析した。

浮遊物質はJIS K 0102に準じ、ろ過材はガラス繊維ろ紙GS25を用いた。濁度は、東京電色社製積分球光電散乱光度計MODEL T - 2600Dを、粒度分布は島津製レザ - 回析装置SALD - 3000を使用して行った。

結果

1. 検体採取状況

市町村別の検体採取状況を表1に示した。

表1. 市町村別の検体採取状況。

市町村名	検体数	河川			湧水	流域土壌
		降雨時	平常時	河川数		
国頭村	15	5	10	9		国頭マージ
大宜味村	10	4	6	5		国頭マージ
東村	25	14	11	8		国頭マージ
今帰仁村	6	1	5	5		国頭マージ
本部町	16	9	7	6		国頭マージ
名護市	72	41	31	29		国頭マージ
恩納村	20	10	10	10		国頭マージ
宜野座村	6	3	3	2		国頭マージ
金武町	14	7	7	7		国頭マージ
石川市	2	1	1	1		国頭マージ
那覇市	4	3	1	1		ジャーガル
豊見城村	11	6	5	3		ジャーガル
糸満市	25	2	2	1	21	ジャーガル
佐敷町	20	14	6	5		ジャーガル
知念村	11	9	2	3		ジャーガル
玉城村	3	2	1	1		ジャーガル
具志頭村	9	6	3	2		ジャーガル
合計	269	137	111	98	21	

沖縄島北部地域の土壌は、主に千枚岩や砂岩、国頭礫層などを母岩とする国頭マ - ジ (赤黄色土) が広く分布し、南部地域ではクチャ (島尻層群泥岩) を母岩とする灰色系のジャー - ガルが分布している。

2. 測定結果

河川河口で降雨時、平常時に採水したサンプルの測定結果を表2に示す。

表2. 河川河口でのSS、全窒素、全リンの測定結果。(単位:mg/l)

流域土壌	天候	数	SS		全窒素		全リン	
			最低	最高	最低	最高	最低	最高
国頭マージ	降雨時	96	9.8	3,100	0.22	5.40	0.016	1.110
	平常時	91	0.4	42.6	0.13	8.50	0.001	2.290
ジャーガル	降雨時	42	40.0	4,730	0.99	31.90	0.170	7.650
	平常時	20	0.2	41.0	0.99	11.90	0.022	3.250

考察

1. 河口でのSS、窒素、リンの挙動

a 窒素の挙動

1) 濃度レベル

沖縄島北部地域 (石川市を含む) では、82河川で採水を行ったが、そのうち降雨時、平常時とも採水できたのは70河川で、南部地域の河川では16河川中14河川となっている。北部、南部地域における全窒素の測定結果のヒストグラムを図1、2に示した。北部地域は測定数 (N = 185) も多く測定値は対数正規分布を示し、南部地域も測定数 (N = 59) はやや少ないが対数正規分布を示すため、平均値は幾何平均を用いた。

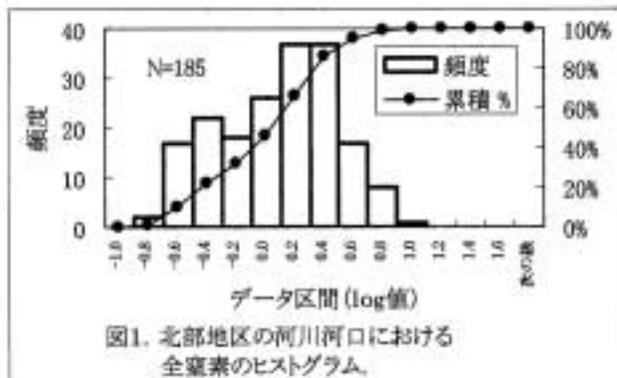


図1. 北部地区の河川河口における全窒素のヒストグラム。

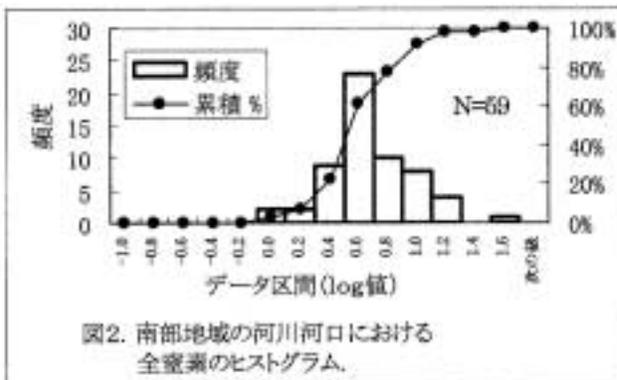


図2. 南部地域の河川河口における全窒素のヒストグラム。

河川別の全窒素の測定結果を図3、4、5に示した。

沖縄島北部地域の82河川では、降雨時の全窒素の最高値が5.40mg/lで最低値が0.22mg/lとなり、幾何平均値が1.37mg/lとなっている。南部地域の16河川では、最高値31.9mg/l、最低値0.99mg/lで幾何平均値は3.71mg/lとなり、北部河川に比べ窒素濃度が高くなっている。

一方、平常時では、北部地域の最高値が8.50mg/l、最低値が0.13mg/lで幾何平均値は0.65mg/lとなり、南部地域ではそれぞれ11.90mg/l、0.99mg/l、4.25mg/lとなっている。平常時でも、南部河川の窒素濃度が高くなっている。

降雨時の河口における、全窒素 (T - N) と溶存態窒素の関係を図 6 に示したが、両数値間には高い相関性 (R = 0.803) がみられる。全窒素に対する溶存態窒素の濃度割合は17 ~ 100%の範囲にあり、平均では61%と窒素の多くが溶存態の形で流出している。また、流域土壌別の平均値では、北部地域の国頭マ - ジ土壌が64%に対し南部地域のジャ - ガル土壌は58%となり、濃度割合の範囲や平均値からみる限り土壌間による差はほとんどみられない。

s リンの挙動

1) 濃度レベル

北部、南部地域における全リンの測定結果のヒストグラムを図 7, 8 に示した。北部地域は検体数 (N = 183) も多く、測定値は対数正規分布を示し、南部も検体数

(N=59) は少ないが対数正規分布に近くなるため、平均値は幾何平均を用いた。

沖縄島北部地域の70河川と南部地域14河川の全リンの測定結果を図 9 . 10 . 11 に示した。

降雨時における河川の全リンは、沖縄島北部地域の最高値が1.110mg/lで最低値が0.016mg/lとなり幾何平均値が0.163mg/lとなっている。南部地域の河川では、最高7.650mg/l、最低0.170mg/lで幾何平均値は0.865mg/lとなっている。

一方、平常時では、沖縄島北部の最高値が2.290mg/l、最低値0.001mg/lで幾何平均値が0.032mg/lとなり、南部地域では最高値が3.250mg/l、最低値0.022mg/lで幾何平均値は0.604mg/lとなっている。

降雨時と平常時の全リンを比較した場合、沖縄島北部

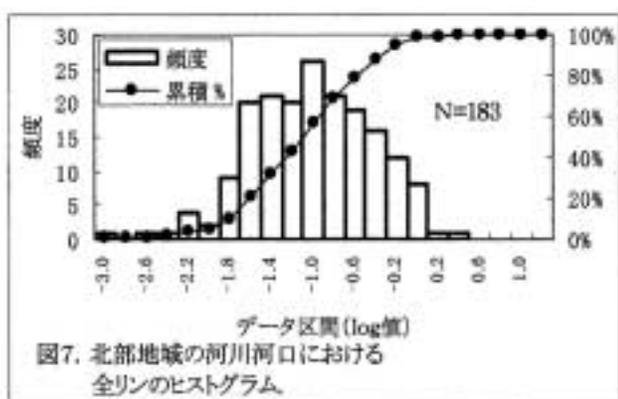


図7. 北部地域の河川河口における全リンのヒストグラム。

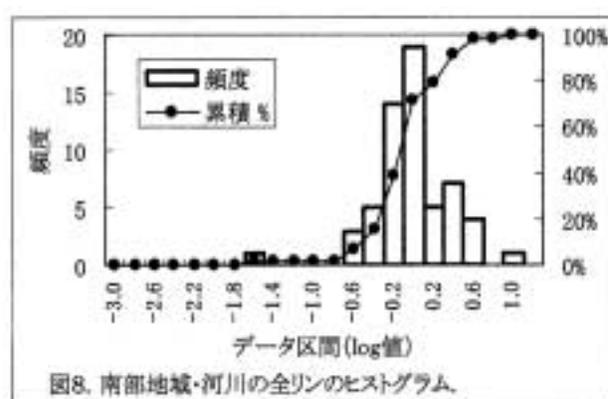


図8. 南部地域・河川の全リンのヒストグラム。

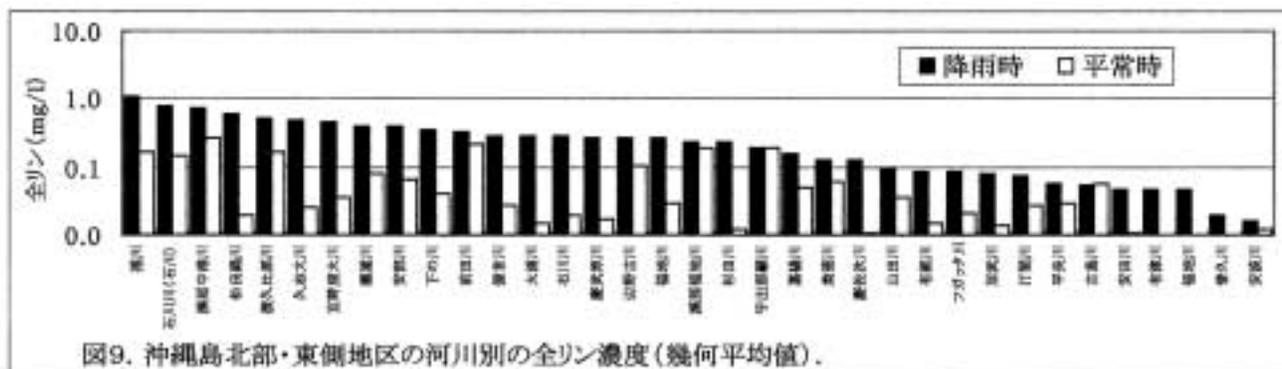


図9. 沖縄島北部・東側地区の河川別の全リン濃度(幾何平均値)。

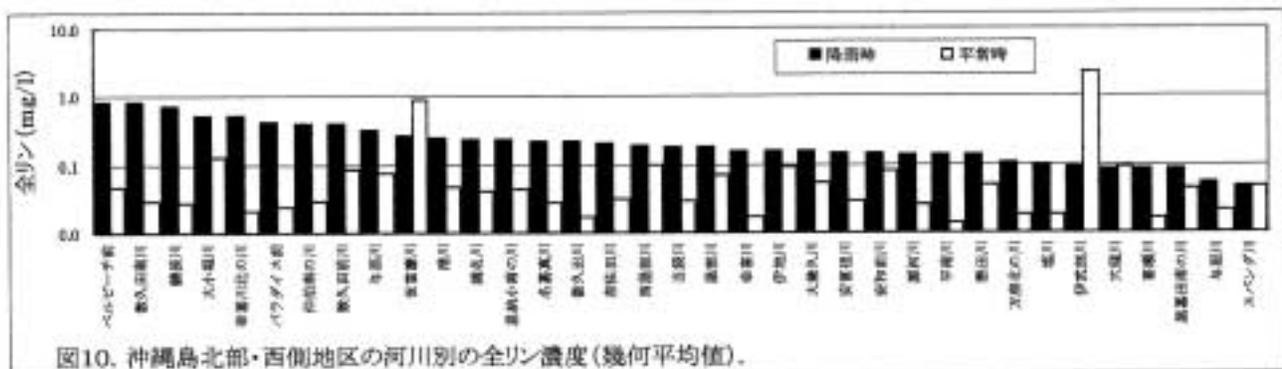


図10. 沖縄島北部・西側地区の河川別の全リン濃度(幾何平均値)。

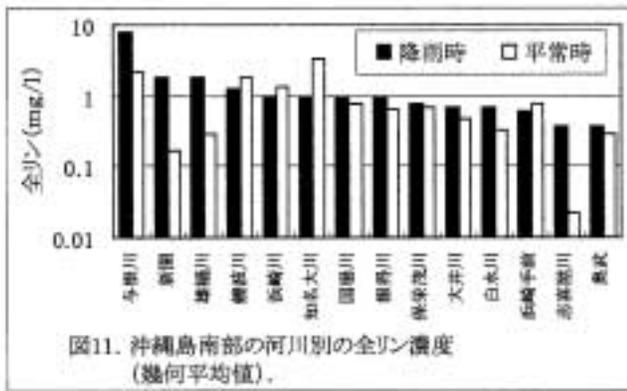


図11. 沖縄島南部の河川別の全リン濃度 (幾何平均値)。

地域では70河川の内68河川で降雨時が高く、河川全体の幾何平均値も高くなることから、降雨に伴うリンの流入が明らかである。

また、南部地域でも、14河川中10河川で、全河川の幾何平均値でも降雨時が高くなり、降雨によるリンの流入が認められる。平常時でもリン濃度が高くなっている河川では、窒素と同様に生活排水や畜舎排水などの流入が影響しているものと考えられる。

2) 全リンと吸着態リンの挙動

リンの場合、窒素とは異なり全リンに対する溶存態の濃度割合は低く、大半は土壌等に吸着した状態で河川から海域へ流出している。これまで、リンは土壌に吸着した状態で流出するとの報告²⁾があるが、本県でも同様な流出特性を示している。

そこで全リンに対する吸着態の濃度割合をみると24～99%の範囲にあり、平均では68%となっている。土壌別の平均値でも国頭マ - ジ、ジャ - ガルとも68%となり、土壌間による差はみられない。

降雨時の河口における、全リン (T - P) と吸着態リンの濃度の関係を示したのが図12である。

全リンと吸着態リンの相関性 (R = 0.922) は高く、窒素の相関 (R = 0.803) よりもさらに高くなっている。

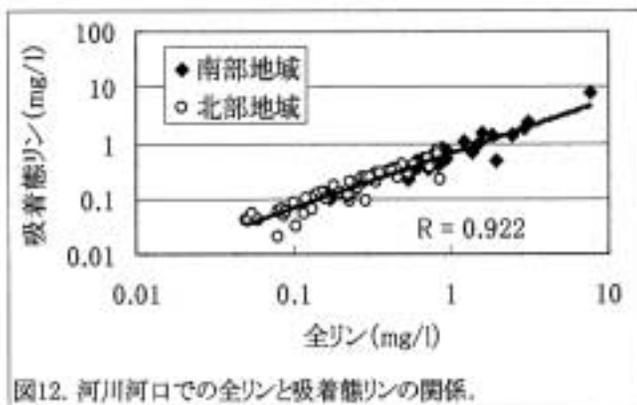


図12. 河川河口での全リンと吸着態リンの関係。

国頭マ - ジとジャ - ガルでは、その粘土鉱物組成や CEC (陽イオン交換容量) などの理化学特性がかなり異なることから、リンの吸着にも何らかの影響があるものと考えられるが、今回の調査結果からはその原因を明らかにすることができなかった。

d 海域における全窒素、全リンの環境基準値

水質汚濁防止法では、海域における溶存酸素 (DO) や化学的酸素要求量 (COD) などの項目について環境基準値が設けられている。全窒素、全リンに関しては4つの類型に区分され、その中で最も悪い 類型では、年間の平均値で全窒素が1mg/l以下、全リンが0.09mg/l以下となっている (表3)。この数値は、年間を通して底生生物が生息できる限度となっている。

表3. 海域における環境基準値。 (単位:mg/l以下)

類型	利用目的	基準値	
		全窒素	全リン
I	自然環境保全及び水産1種	0.2	0.02
II	水産1種、水浴	0.3	0.03
III	水産2種	0.6	0.05
IV	水産3種、工業用水 生物生息環境保全	1.0	0.09

水産1種：底生魚介類を含め多様な水産生物が安定して漁獲される。

水産2種：一部底生魚介類を除き、魚類を中心とした水産生物が漁獲される。

水産3種：汚濁に強い特定の水産生物が漁獲される。生物生息環境保全

：年間を通して底生生物が生息できる限度。

この法律に基づき本県では、13海域76地点で全窒素、全リンの水質測定が行われている。その中でも国場川の西側に位置する那覇港入口のポイントが栄養塩濃度は最も高く、平成10年度の水質調査結果では、全窒素が1.0mg/lを超え全リンも0.036～0.075mg/lとなっている。

今回の国場川の調査では、降雨時の全窒素は3.10mg/l、全リンが1.600mg/lとなり、平常時でもそれぞれ2.82mg/l、0.770mg/lと高く推移している。このような栄養塩濃度の高い河川水の流出が、海域の濃度を高くする原因の一つだと考えられる。栄養塩が河川から海域へ流出すると希釈・拡散などにより濃度がかなり低くなると思われるが、閉鎖性海域などでは外洋への拡散効果が少なく、河口からの流入による影響が強くなることが予測される。

(3) SSの挙動

降雨時における沖縄島北部地域の河川のSSは、最高値が3,100mg/lで最低値が9.8mg/lとなり、幾何平均値は174mg/lとなっている。

沖縄島北部の東側と西側の河川を比較すると、降雨時は西側河川が最高値、平均SSとも若干高くなる傾向にあるが、平常時は両地区間に有意差 (P>0.01) は認められなかった (表4)。

表4. 沖縄島北部の地区別河川水のSS測定結果.
(単位:mg/l)

地区別	天候	最高値	最低値	幾何平均
東側河川	降雨時	2,480	58.0	272
	平常時	42.6	0.8	5.5
西側河川	降雨時	912	19.3	140
	平常時	60.0	0.7	6.6

一方、南部地域の河川では、最高4,730mg/l、最低40.0mg/lで幾何平均値は357mg/lとなっている。また、降雨時に1,000mg/l以上を超えたデ-タ数は、沖縄島北部地域が94デ-タのうち6デ-タで6.4%、南部地域では43デ-タのうち11デ-タで25.6%となっている。このように幾何平均値や1,000mg/lを超える割合などを比較すると、南部地域の河川SSが高くなっている。

これ対し平常時のSSの濃度を比較すると、沖縄島北部地域の河川では最高値が42.6mg/lで最低値が0.4mg/lとなり、幾何平均値は5.6mg/lとなる。南部地域の河川では、最高41.0mg/lで最低0.2mg/l、幾何平均値は8.8mg/lとなる。SSが20mg/lを超えるデ-タ数は、沖縄島北部地域が8デ-タ (測定数91) で8.8%、南部地域が7デ-タ (測定数20) で35.0%となっている。このように平常時においても、SSは南部地域の河川が若干高くなる傾向にある。南部地域の河川水では、藻類などの有機物が含まれることもあり、この場合にはガラス繊維の紙が薄緑色に染まる。これは、窒素やリンなどの栄養塩が平常時でも高く推移しているためだと考えられる。

(4) 河口河川水の粒度分布

降雨時の河川水の粒度分布を示したのが図13, 14, 15である。粒径画分は国際土壌学会法に準じて行った。沖縄島北部地域、南部地域の河川とも粘土、シルトと粒径の小さい粒子の割合が高く、特にシルト割合が高くなっている。粗砂は、全く含まれなかった。

沖縄島北部地域の河川では粘土、シルトの合計量が62.4~99.9%の範囲にあり、南部地域の河川でも67.5%~98.3%の範囲で、ほぼ同じような傾向を示した。

また、河川水の粒度分布の平均値を示したのが図16で、土壌地域別の差はほとんどみられない。

このように降雨時の河川水に含まれる粒子の粒度分布は、流域の土壌・土質などにほとんど影響されことなく粒子径の小さい粘土・シルトが60%以上を占めている。

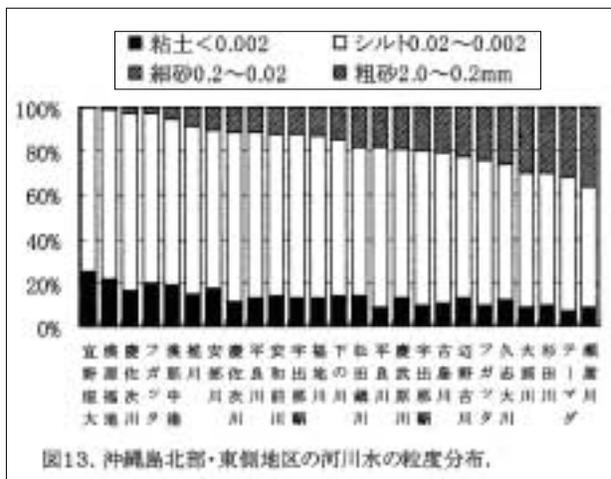


図13. 沖縄島北部・東側地区の河川水の粒度分布。

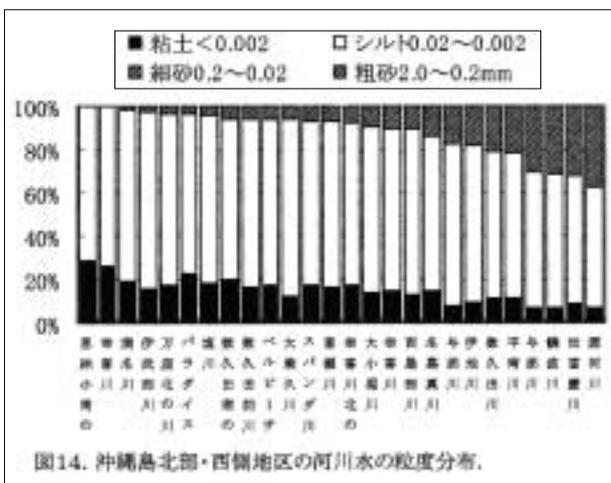


図14. 沖縄島北部・西側地区の河川水の粒度分布。

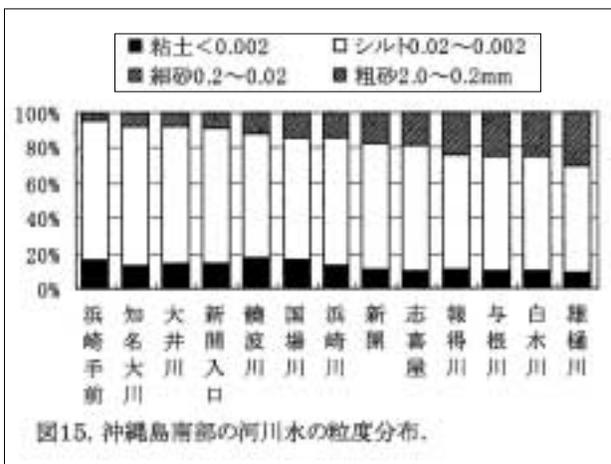


図15. 沖縄島南部の河川水の粒度分布。

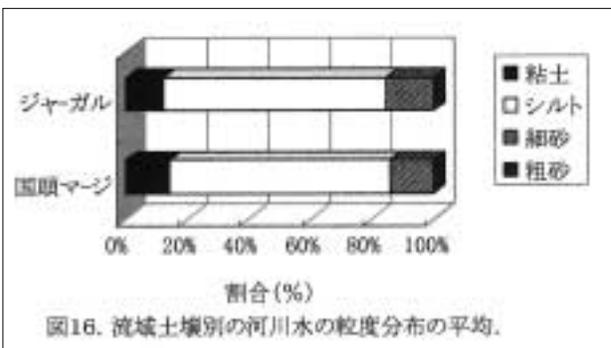


図16. 流域土壌別の河川水の粒度分布の平均。

2) 河口河川水のSS, 全窒素, 全リンの関係

a SSと全窒素 (T-N) の関係

河口におけるSSと全窒素 (T-N) の濃度の関係を示したのが図17, 18である。

平常時に比べ降雨時はSSの増加に伴い, 全窒素も増加傾向を示している。また, 土壌地域別ではジャ - ガル地域 (南部地域) に比べ国頭マ - ジ地域 (北部地域) の河川が相関性 ($R=0.564$) は高くなっている。これは, ジャ - ガル地域 (南部地域) の河川が平常時, 降雨時ともに全窒素が高く推移しているためである。

降雨時の採水は, 降雨が始まってから採水までの時間のバラツキや, 降雨が河口まで到達する時間にかなり差があるにもかかわらず, SSと全窒素の間の関連性は高くなっている。

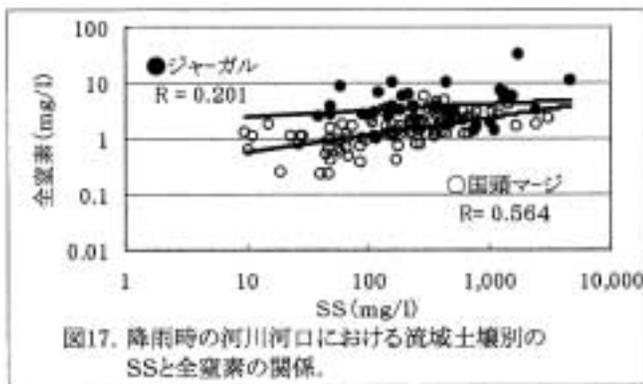


図17. 降雨時の河川河口における流域土壌別のSSと全窒素の関係。

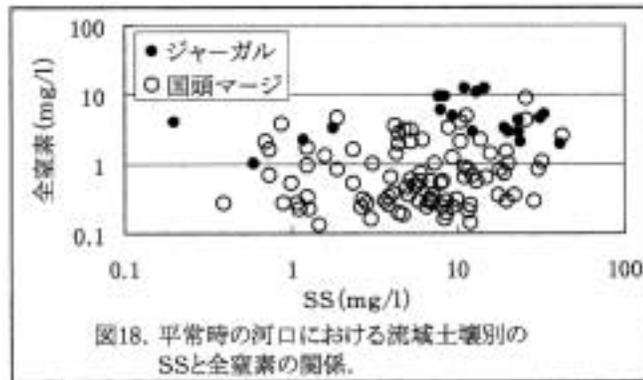


図18. 平常時の河口における流域土壌別のSSと全窒素の関係。

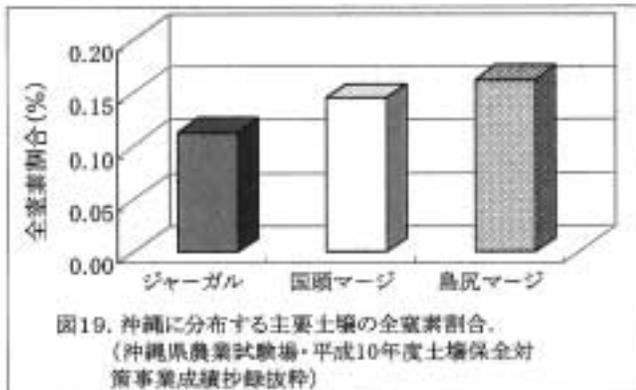


図19. 沖縄に分布する主要土壌の全窒素割合。
(沖縄県農業試験場・平成10年度土壌保全対策事業成績抄録抜粋)

土壌地域別の全窒素濃度を, 同じSS濃度で比較した場合, 国頭マ - ジ地域 (北部地域) の河川に比べジャガル地域 (南部地域) の方が降雨時, 平常時とも全窒素が高くなる傾向にある。異なる土壌地域を流れる河川での窒素流出の違いについて, これまでの研究報告³⁾⁴⁾などでは, 原因の一つとして土壌・土性や植生などの違いが指摘されている。本県に分布する主な土壌の窒素量を比較したのが図19である。

ジャ - ガルに比べむしろ国頭マ - ジの方が窒素量は高くなっており, 土壌の違いだけで河口での濃度差を, 単順に説明することはできなくなっている。

この他にも生活廃水や畜舎排水の混入など複合的な要因が考えられるため, 土壌・土質などとの関連性については今後の研究課題の一つとなっている。

s SSと全リン (T-P) の関係

河口におけるSSと全リン (T-P) の濃度の関係を示したのが図20, 21である。

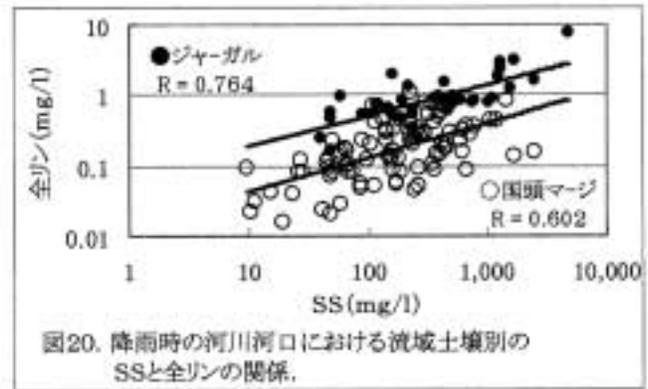


図20. 降雨時の河川河口における流域土壌別のSSと全リンの関係。

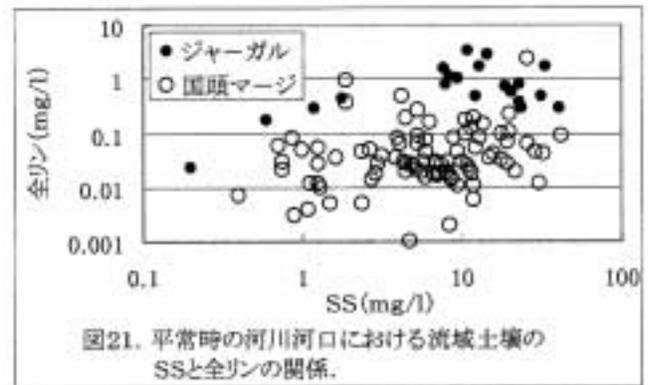


図21. 平常時の河川河口における流域土壌のSSと全リンの関係。

全窒素と同じように河口でのSSの増加に伴い, 全リンも増加傾向を示している。特に降雨時は平常時よりもSSとの相関性が高く, 土壌別では国頭マ - ジ地域 (北部地域) の相関 ($R=0.642$) に比べジャ - ガル地域 (南部地域) の河川の方が相関性 ($R=0.764$) は若干高い。また, 全窒素に比べSSとの相関性が高くなっているが, 河口での窒素, リンの挙動でも触れたように, 窒素に比

ペリンは土粒子等に吸着した状態で流出するためだと考えられる。

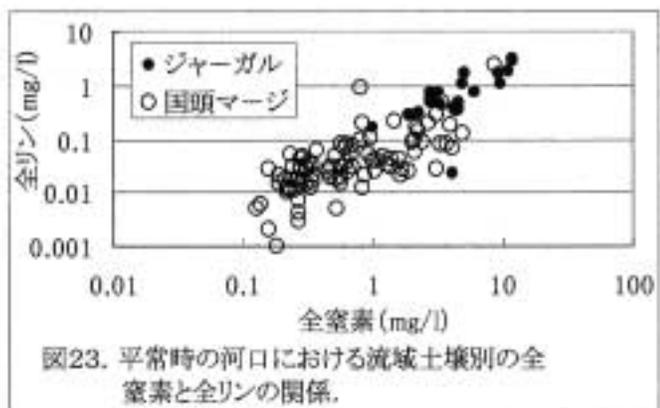
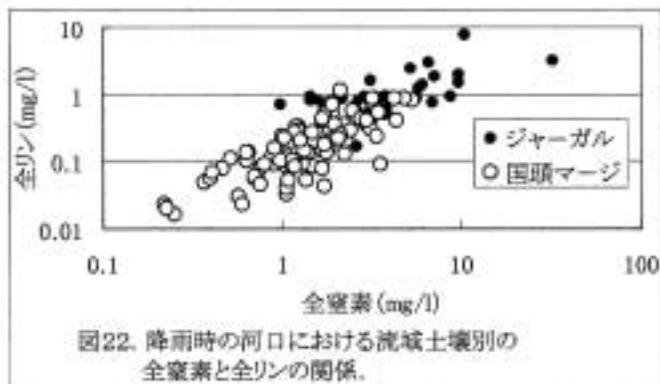
土壌地域別では、国頭マ - ジ地域の河川に比べジャ - ガル地域の方が、同じSS濃度で比較した場合降雨時、平常時とも全リンが高くなる傾向にある。

本県に分布する主要土壌のリン酸量を比較すると、ジャ - ガルよりもむしろ国頭マ - ジのほうが高く、全窒素と同じような傾向となっている。

d 全窒素と全リンの関係

河口における全窒素 (T - N) と全リン (T - P) 関係を示したのが図22, 23である。

全窒素の増加に伴い、全リンも増加傾向を示している。



採水時の天候状況や流域土壌に関係なく、降雨時の全窒素と全リンの相関は、降雨時 ($R = 0.828$)、平常時 ($R = 0.826$) とも高くなっている。河口におけるT - NとT - Pの比率は、10 : 1となり海域での環境基準値とほぼ同じ比率となっている。

まとめ

今回、沖縄島の河川河口から海域へ流出するSSや窒素、リンの測定から次のような結果が得られた。

1. SSと窒素、リンの関係

降雨時の河川河口では、北部地域 (国頭マ - ジ土壌)、

南部地域 (ジャ - ガル土壌) ともSS濃度が高くなると窒素、リンが高くなる傾向を示す。特に、リンはSS濃度との相関性が高くなる。平常時は、南部地域の河川が窒素、リンとも高くなり、生活廃水や畜舎排水などの影響が示唆された。

このようなことから、降雨時に全窒素、全リンが増加するのは農地や林地などの面源からの土壌流出が原因であり、平常時は生活廃水や畜舎排水などの点源が主な流出源になると結論づけられた。

2. 窒素、リンの流出特性

全窒素の約60%が溶存態の形で流出するのに対し、全リンの約70%が土粒子や有機物などに吸着した状態で流出することが明らかになった。この結果は、本土でのこれまでの報告と同様な結果となっている。

3. 流域土壌による窒素、リンの違い

全窒素、全リンとも南部地域 (ジャ - ガル土壌) の河川が北部地域 (国頭マ - ジ土壌) に比べ高くなるが、原因の一つとして河川流域の土壌・土質や土地利用などの違いが指摘されている。しかしながら今回の調査では、その原因を明らかにすることができなかった。今後、現地調査を踏まえた総合的な調査研究が必要である。

4. 今後の課題

今回は、河川水の水質濃度を中心に調査を行ったが、流域における土地利用状況や河口での流量変化を測定し海域への流出負荷量を予測することが必要であり、今後、モデル流域を設定した調査が必要である。

沖縄島北部地域の億首川や喜瀬川、南部地域の国場川や報徳川などの比較的河口域が広い河川では、干潮時でも塩分濃度が高く海水の影響を強く受けている。このため、平常時における採水方法や海水による影響について十分検討することが必要である。

また、沖縄島北部地域の河川では平常時に河口閉塞を起こしている場合があり、砂層のろ過効果により、河口付近で土粒子などに吸着し堆積した窒素、リンが降雨時に一気に海域へ流出することが予測される。

同様に、南部地域の河川でも、河口付近で堆積した土壌粒子等が大雨時のまきあげにより栄養塩などとともに流出し負荷量の増大が予測されるなど、海域への影響について調査が必要である。

河口から海域に流出した土壌粒子等は、やがて河口付近の海底に堆積するが、特にリンは土粒子などに吸着した状態で行動する割合が高いため、一度堆積した土壌粒子等からの溶出によるサンゴ礁海域への影響について今後の研究が必要である。

参考文献

- 1) 坂西研二・芝野和夫・大嶋秀雄(1998) 農村地域小河川における水質モニタリングに関する調査事例．
土壤の物理性．80：49 - 54．
- 2) 鶴木啓二，長澤徹明，井上京，梅田安治(1996) 複合型土地利用の農業流域河川における水質特性．
農業土木学会大会講演会講演要旨集．34 - 35．
- 3) 上遠野健，長澤徹明，井上京，山本忠男(1998) 河川水質による土地利用評価と地域環境の保全に関する研究()．
農業土木学会大会講演会講演要旨集．278 - 279．
- 4) 上野貴司，三原真智人，安富六郎(1999) 畑地土壤の侵食過程における富栄養化成分の流出特性と削減対策．
農業土木学会大会講演会講演要旨集．412 - 413．

