

水工学シリーズ04-A-3

河川環境と栄養塩

名古屋大学大学院工学研究科 助教授

戸 田 祐 嗣

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会
2004年7月

河川環境と栄養塩

Role of Nutrient in River Environments

戸 田 祐 嗣

Yuji TODA

1. はじめに

河川の流れは地形や河床材料の特性を決定するとともに、有機物や栄養塩などの生態系の基礎物質を輸送する。それら生態系の基礎物質は、植物の一次生産活動や食物連鎖に伴う生物間のエネルギーの流れの中に取り込まれ、河川生態系を築き上げる。このように、流れ場の水理現象、生態系の基礎となる有機物や栄養塩の輸送特性および生物一次生産といった要素は、河川の環境基盤を構成するものであり、その特性を解明することは河川生態系の中でのエネルギーの流れを把握する糸口を与えるものと期待される。自律性のある河川環境を保全する、あるいは築いていくためには、まずはその環境基盤に位置する物質やエネルギーの流れの自律性を確保する必要があるであろうし、そのためにも、河川の中の栄養塩の動態やその生態系への取り込みの窓口となる生物一次生産に関する理解を深めていかなくてはならない状況にある。

河川工学においてはここ 10 年近くの間、河川の水環境あるいは生物相を意識した研究が数多く行われるようになっていく。そこでは、植生、水制、ワンド、魚道などの水理について数多くの成果が挙げられるとともに、魚類や水生昆虫の生息場特性などについても精力的な研究が行われた。最近では、食物連鎖上位の生物の生息場に関する研究は 10 年程前と比べると格段に進歩し、同時に河川生物が生息していくために必要となる食べ物（エネルギー）の流れにも注目が集まるようになっていく。上述のとおり、河川の栄養塩や一次生産は、まさにこの河川生態系の中でのえさの生産源であり、このことから近年、栄養塩や一次生産について数多くの研究が行われるようになりつつある。

以上のことから、本稿では河川の栄養塩動態とその生態系への取り込み口である生物一次生産について、最近の研究事例を中心に紹介することとする。但し、筆者の力量の問題と内容が発散的になるのを避けるため、河川中流部付近の礫床河川の話題を中心として、平水時の栄養塩輸送、洪水時の栄養塩輸送、河床付着藻類の一次生産を取り上げることとする。

2. 河川の栄養塩輸送

2. 1 平水時の河川の栄養塩動態

2. 1. 1 河川栄養塩濃度の大局的变化

図-1(a), (b)は 1979~1981 年および 1995~1997 年の全国河川 (449 地点) の全窒素、全リン濃度のヒストグラムである (河川環境管理財団 (2003))。両図を比較することにより、ここ 20 年間で平水時の河川水中栄養塩濃度の大局的な変化を知ることが出来る。全窒素濃度については、1979~1981 年調査の中央値が 1.24mg/l であるのに対して、1995~1997 年調査の中央値は 1.10mg/l であり、大きな変化が見られない。また、全窒素濃度が 1mg/l を越える地点が整理対象地点の 59%以上と多く、この傾向は 20 年前から大きな変化が見られない。全窒素で 1mg/l 以下の水域は、湖沼の環境基準としては V 類型に指定されている値であり、この値は水稻の障害を示す農業用水基準や、悪臭を放つ湖沼環境を勘案して最低の基準として定められたもの

に属する。このことからわが国の河川の多くは窒素に関しては高濃度の水準にあることが分かる。一方、リンについては、20 年前と比較して最近年で 0.05mg/l 以下の範囲の地点が多くなり、ここ 20 年間で濃度の減少が見られる。窒素と同じく湖沼の環境基準の V 型（全リン濃度 0.1mg/l 以下）を高濃度の水準と考えると、この水準を超える割合が 20 年前の 32%から最近年で 28%に減少し、改善の傾向が見られる。河川水中の窒素、リン濃度の減少を引き起こす要因としては、下水道の整備進捗による効果、窒素・リンの排出基準の適用、あるいは無リン化合成洗剤

の普及等が考えられ、増加を引き起こす要因には流域人口の増加、大気汚染による降水中の窒素濃度の上昇、畑地への施肥量や産業廃棄物起源の窒素負荷量の増加などが考えられる。

2. 1. 2 平水時の水域の生物・化学的活動と栄養塩濃度

上述のように河川水中の栄養塩濃度は流域の特性や流域での人間活動の影響を強く受ける。一方で、河川水域の生物は、その生理的活動に水中の栄養塩を利用することにより、栄養塩濃度に影響を与える。表-1 は、南浅川を対象として下水や視線の流入のない河川の上流と下流の 2 地点間での物質濃度の変化を測定した例を示している（小倉ら（1988））。調査では各水質項目を数時間間隔で 24 時間計測し、流量と水質濃度の積より各物質の 1 日の平均通過量を求め、上下流での変化が調べられた。流量は流下に伴い 0.56 倍に

減少し、この間で約 40%の水が地下へ伏流したことが分かる。各成分の流出量/流入量比をみると、水の流出入比と比較して明らかに小さい成分として、SS、TOC、 $\text{NH}_4\text{-N}$ があり、これらが流下に伴い水中から選択的に除去あるいは形態変化したことがわかる。一方、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は水域で増加し、Cl、T-P などは流下に伴う変化が小さい。これらの水質変化は基本的には区間内での生物・化学的变化に起因するものであると

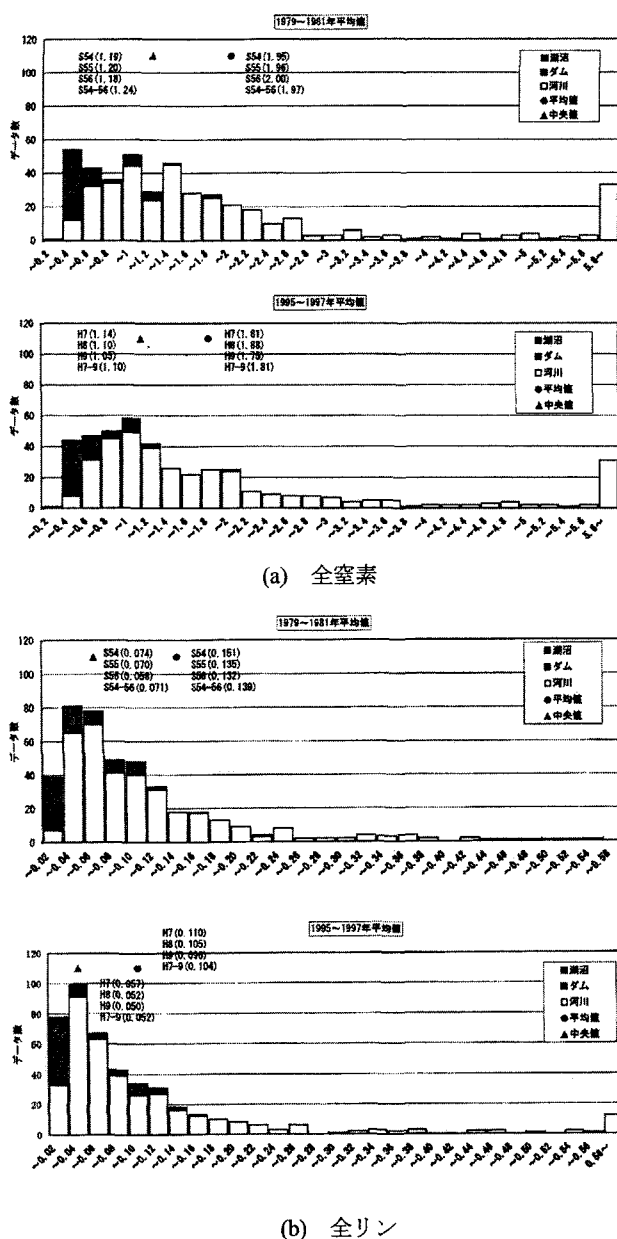


図-1 1979～1981 年および 1995～1997 年の全国河川の栄養塩濃度ヒストグラム（河川環境管理財団（2003））

表－1 河川2点間の物質収支（南浅川，小倉ら（1988））

成 分	インプット (t)/kg day ⁻¹			アウトプット (t)/kg day ⁻¹		O/I
	MA-4	Sw	MA-4+Sw	MA-5		
SS (懸濁物)	41	65	106	26		0.25
TOC (全有機炭素)	109	161	270	105		0.39
NH ₄ -N (アンモニア性窒素)	107	38	145	59		0.41
NO ₃ -N (亜硝酸性窒素)	2.5	0.9	4.4	6.4		1.46
NO ₂ -N (硝酸性窒素)	62	11	73	69		0.96
TP (全リン)	18	5	18	8.6		0.48
Cl (塩化物イオン)	311	201	512	203		0.51
H ₂ O (水: 10 ⁶ m ³ day ⁻¹)	14	4	18	10		0.56

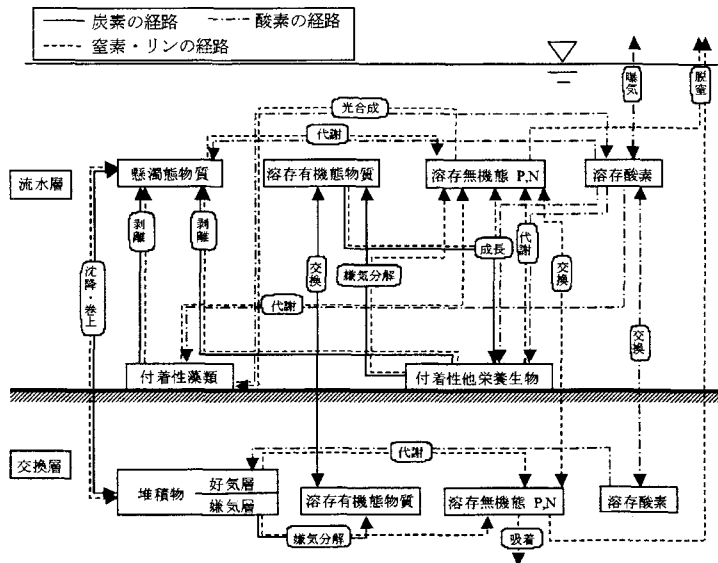
a) 1987年7月22日10時～24日10時まで1時間ごとに測定した結果。

表－2 霞ヶ浦に流入する河川における炭素濃度変化と脱窒量（川島・鈴木（1986））

unit	Area F.R. Grad. L.W.				C/Cin		Nde/Nin	Alg
	km ²	m ³ /s	l/1000km	m	—	—		
Sakura	349	5.58	1.9	46.5	54.0	.72	.22	11400
Shintone	180	2.88	0.09	24.0	32.1	.64	.067	1310
Ono	172	2.92	0.67	24.3	37.3	.68	.109	3320
Koiso	153	2.89	4.0	24.1	24.7	.74	.059	2410
Sonobe	82	1.23	2.7	10.3	22.0	.78	.079	670
Amano	73	0.88	7.1	7.3	14.0	.82	.035	356
Hanamura	40	0.72	2.1	6.0	15.0	.83	.060	212
Ichinose	29	0.38	1.9	3.2	14.7	.84	.058	78
Kajinashi	30	0.45	3.2	3.8	11.1	.84	.037	123
Hishiki	24	0.41	2.0	3.4	12.3	.86	.046	70
Seimei	26	0.62	2.2	5.2	11.3	.82	.037	186
Sakai	30	0.42	3.5	3.5	7.1	.90	.020	44
Sannou	13	0.39	3.3	3.3	7.6	.89	.023	46

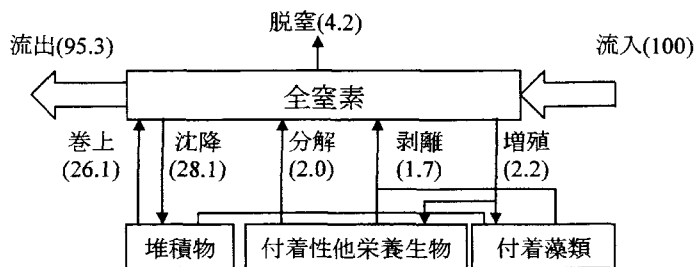
判断されるが、支川の流入や流域の人間活動の影響を受けやすいわが国の河川においては、水質変化を引き起こす河川内の様々なプロセスを現地調査だけでは区分して把握することは難しいものと思われる。

栄養塩濃度と河川生物生理、化学的物質変化の関係を詳細に把握することを目的として、河川内で生じるさまざまな生物・化学的反応を定式化し、数値解析的に解明する試みが行われている。例えば、川島・鈴木（1986）では、比較的浅い中小河川を対象として、濁質、炭素、窒素、リン、酸素の物質収支モデルを構築し、河川のもつ浄化能力を



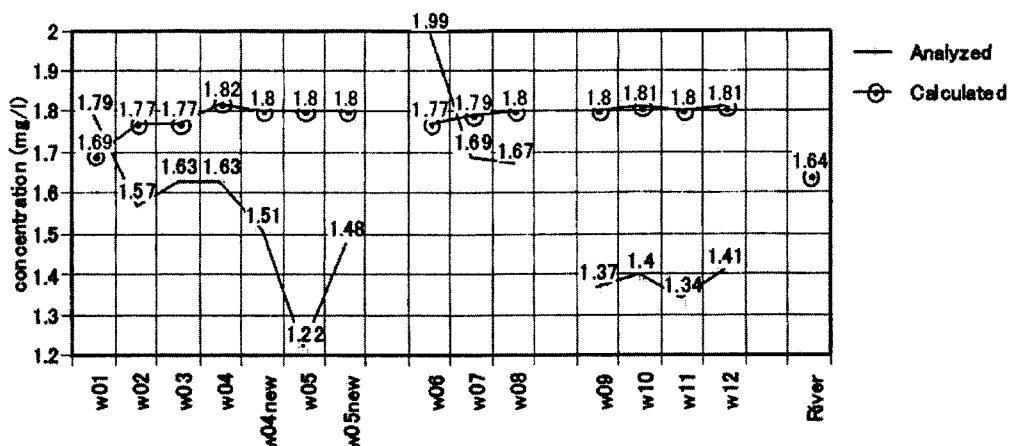
図－2 礫床河川の物質循環（戸田・池田（1999））

定量的に示している。表－2は霞ヶ浦（西浦）に流入する13の河川について、流入・流出炭素量比と脱窒による窒素除去率を示したものである。また、戸田・池田（1999）は比較的浅い礫床河川を対象として、炭素、窒素、リン、酸素の循環モデル（図－2）を構築し、2kmの河道区間での物質収支を示し



図－3 礫床河川における全窒素の収支（戸田・池田（1999））

ている（図－3）。これらの解析には計算上のパラメータが数多く含まれており、その全てが現段階において定量的に明らかにされていないわけではない。そのため、解析結果はあくまでも考慮した物質循環システムと仮定された数値パラメータの信頼性の範囲内での議論に留まるものの、観測で直接計測することが難しい河



図－４ 砂州伏流水における脱窒（木津川，Analyzed の線と Calculated のシンボルとの差が脱窒量と見積もられる，中島ら（2004））

道内での生物・化学的プロセスと水質変化の関係を定量的に表現することが出来るため，各生物プロセスが物質負荷量や自浄作用能力へ及ぼす影響をある程度把握することが出来ることや，各プロセス間の相互的作用を知るために有用なツールであるものと思われる。

平時の河道内の物質収支について，川島・鈴木（1986），戸田・池田（1999）の解析のいずれにおいても，脱窒や一次生産による栄養塩除去の割合は，流入する物質量の 1 割以下程度である。このことは，わが国のように比較的急勾配で流路沿長の短い河川では，流入した物質の大部分はそのまま流下することを意味するものであり，滞留時間の長い大陸型河川のような自浄能力は期待されないことを示すものである。さらに，沖積平野に人口の集中するわが国では，河川中下流部において，小さな自浄能力に比べて大きな負荷が流入する傾向にあり，平時の水質改善の根本は流域からの流出源抑制に負わせるを得ないことを示している。また，このように流下する物質の大部分が流出してしまうという事実は，河川生態系への栄養塩の取り込みの量を実測の物質フラックスの差し引きから間接的に求めることが困難であることを示しており，それを把握するためには，生物による一次生産量そのものを直接計測していく必要があることを示している。

上記の研究の成果は基本的には河川水中で生じる現象に着目したものであったが，近年では自然河川中に見られる砂州を伏流することによる物質濃度の変化についても研究が行われるようになった。例えば，中島ら（2004）は木津川砂州において，窒素の安定同位体を用いた砂州伏流中の窒素動態について調査を行い，冬季の砂州においても脱窒による窒素除去が生じていることを示している（図－４）。これらの研究は未だ緒についたところであるが，砂州も含めた河道全体での栄養塩動態を把握するための糸口を与えるものとして注目される。

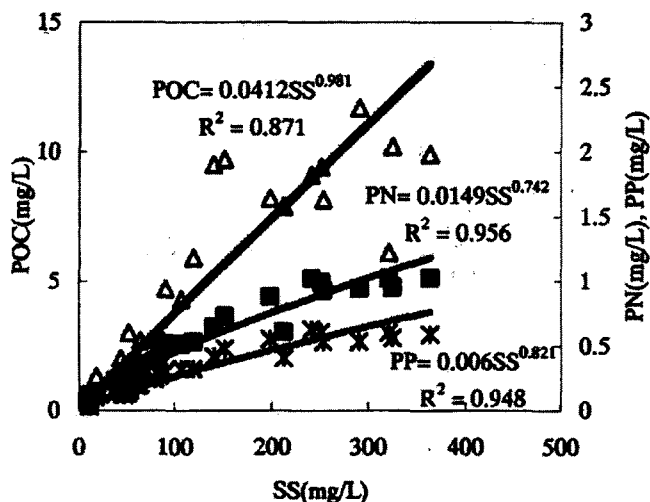
2. 2 洪水時の栄養塩輸送

2. 2. 1 洪水時の栄養塩負荷

洪水時の栄養塩輸送の特性は，溶存態と粒子態といった栄養塩の形態によって異なってくる。溶存態の栄養塩濃度については，洪水期間中に変化するものの，その範囲はせいぜい 1 オーダーレベルの範囲での変化であるのに対して，粒子態の栄養塩濃度は，洪水期間中に 100 倍，1000 倍といった範囲で変化する。また，Walling et al.（1997），Walling et al.（2001）による UK の河川での栄養塩負荷に関する報告によると，河川が

らの年間リン負荷量の 26～75%が粒子態リンとして洪水時に輸送されているものと報告されている。このように洪水時の栄養塩輸送においては粒子態栄養塩の輸送量が極めて大きくなるという特徴がある。

洪水期間中の粒子態栄養塩濃度は、懸濁態物質濃度との相関性が高いことが知られており（例えば、山本ら（2003）（図－5）、村上ら（2003））、洪水時には懸濁態物質とともに粒子態の有機物、栄養塩が輸送されていることが示されている。またこれらの研究から、河川流量と濁度の計測に基づく粒子態栄養塩負荷量の推定式が提案されている。流量計測は国内の多くの河川で行われており、濁度の計測は、懸濁態物質濃度や栄養

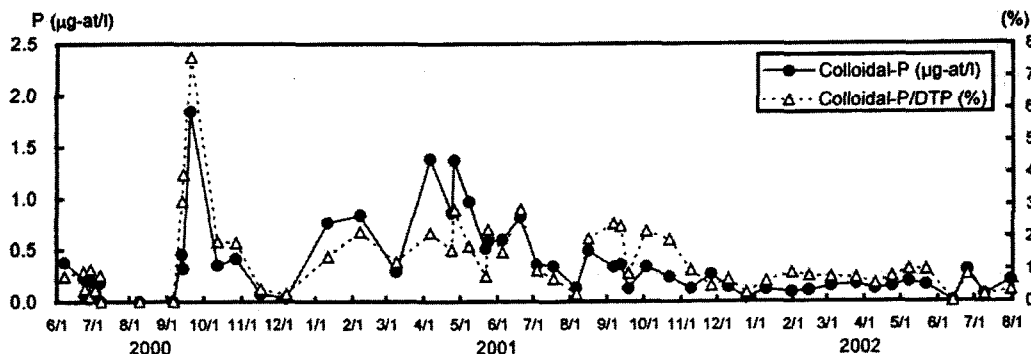


図－5 懸濁態物質濃度と有機物、粒子態栄養塩濃度の関係（△：POC，■：PN，×：PP，山本ら（2003））

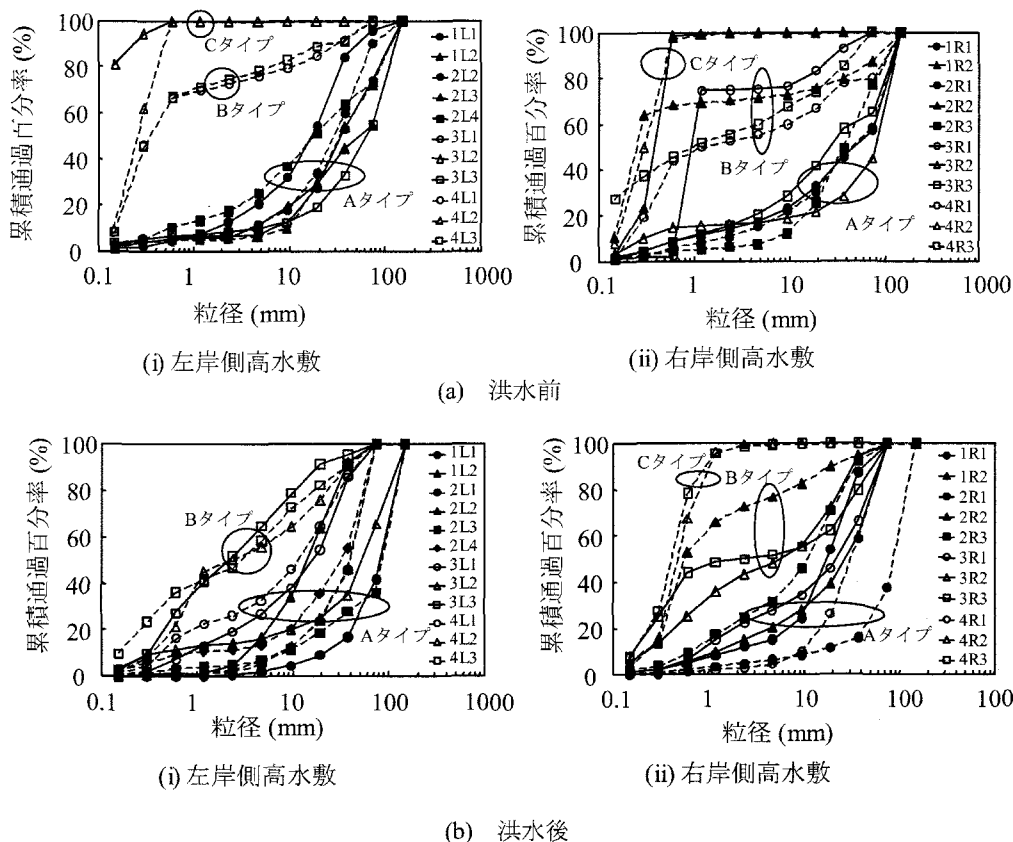
塩濃度の計測に比べるとかなり負担が小さい。濁度と栄養塩濃度の関係は、基本的には各流域の土地利用や土砂・栄養塩の生産源の特性と関係するため、負荷量推定式はそれぞれの河川で立てなくてはならないが、多くの河川においてこのような推定式が立てられることは、流域全体としての栄養塩動態の解明や、河川につながる水域に対する物質負荷を評価するのに極めて有用であると判断される。また近年では、懸濁態物質の粒径に着目した負荷特性（図－6、児玉ら（2004））や洪水期間中の懸濁態物質中の栄養塩組成の変化（Pilailar et al. (2004)）などについても調査が行われ、濁質の物理的性質（サイズ）と栄養塩負荷の関係や、洪水波形と負荷特性の関係などについても実証的知見が蓄積されつつある。

2. 2. 2 洪水による河川氾濫原の栄養塩環境の形成

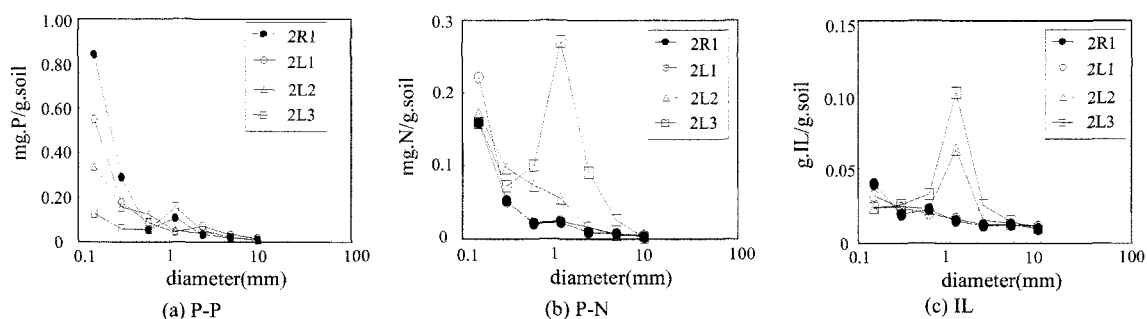
洪水流は、氾濫原と河川の間での土砂・物質の交換を引き起こすため、氾濫原の土壤環境に影響を与える。



図－6 矢作川におけるコロイド P (0.1～0.45μm) 濃度およびその DTP (<0.45mm) に対する割合 (%) の時系列変化、児玉ら（2004）



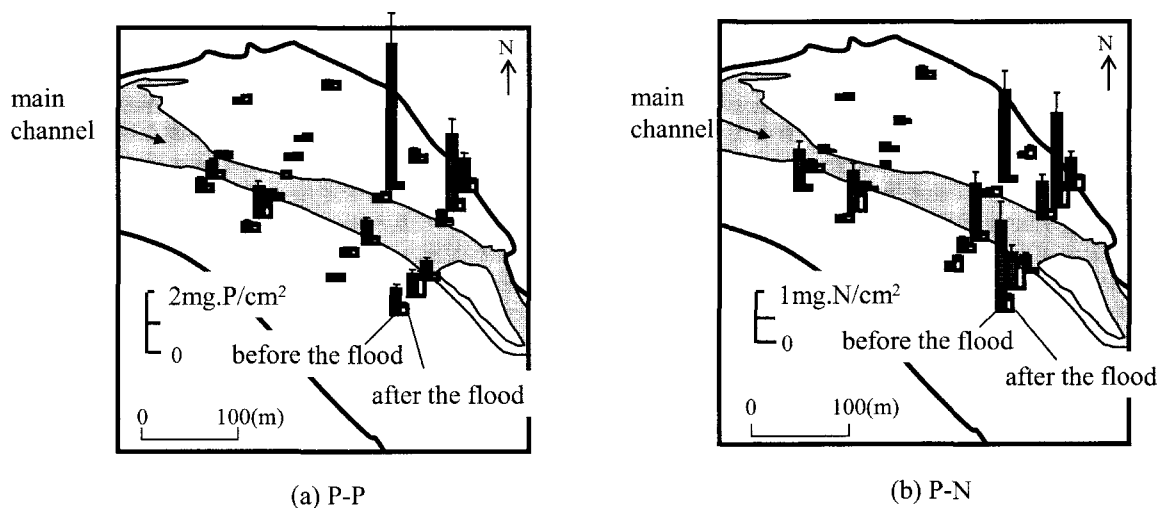
図ー7 洪水前後の高水敷表層土壌の粒度分布の変化（多摩川，戸田ら（2000））



図ー8 土壌中の粒度別栄養塩，有機物含有量（多摩川，戸田ら（2000））

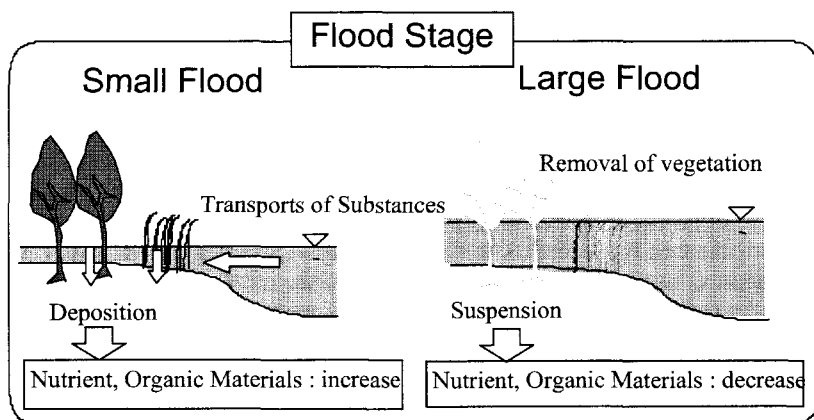
ここでは，洪水時の流れが氾濫原土壌の栄養塩環境に与える影響について報告する。

図ー7は，多摩川中流部（東京都青梅市，河口より58～59km地点）における1999年の洪水前後の高水敷土壌の粒度分布を示している。観測対象域の高水敷土壌の50%粒径は，0.1～50mm程度の広い範囲に分布しており，空間的に表層土壌の粒径が大きく変化していることが分かる。洪水前後の粒度分布を比較すると，全体的に1mm以下の細粒分が減少しており，1999年の洪水流によって，高水敷表層土壌から小さな粒径の成分が流出したことが分かる。図ー8に，高水敷土壌の粒径別の強熱減量，粒子態窒素，粒子態リン含有



図－9 洪水前後の土壌中栄養塩量の変化（多摩川，戸田ら（2000））

率を示す。図より粒径が小さくなるほど、有機物、栄養塩の含有率が高くなっていることが分かる。図－9には、洪水前後における単位面積高水敷土壌中の粒子態リン量、粒子態窒素量を示す。洪水前後を比較すると、おおむねの地点において、高水敷土壌中の栄養塩が減少していることが分かる。このことは、1999年の出水では、高水敷土壌から

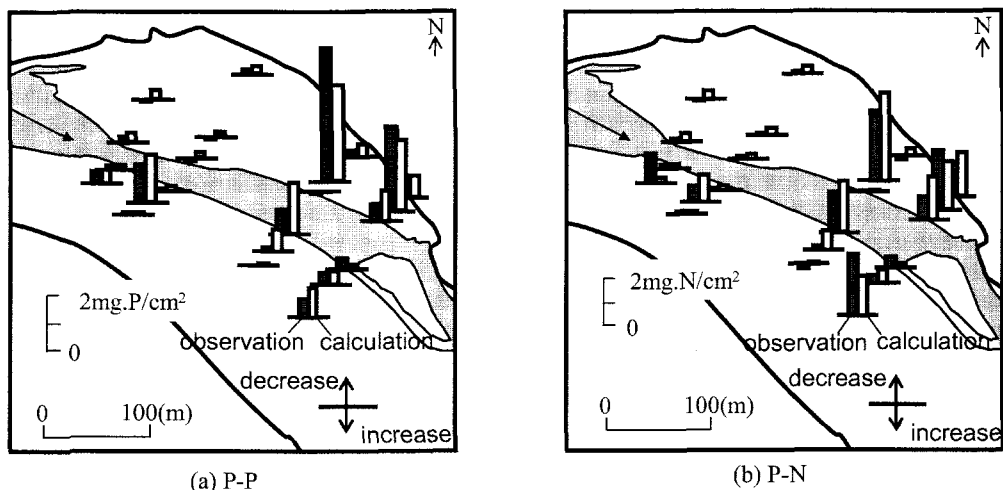


図－10 洪水規模と栄養塩輸送の関係

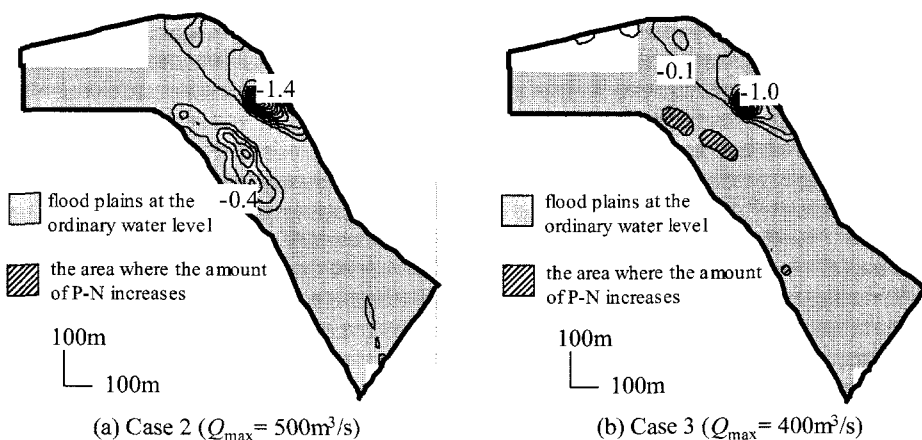
細かな粒径成分の土砂が流出したこと、細かな粒径成分の土砂は粗い成分の土砂と比較して多くの栄養塩を含有していることより、結果として高水敷土壌中の栄養塩量が減少したものと判断される。

これらの観測は、河川高水敷の土砂輸送を細粒土砂と栄養塩の相関性に着目して、洪水が高水敷栄養塩環境に与える影響を見たものである。しかし、洪水の影響は洪水自体の特性によって大きく変化することが予測される。たとえば、比較的大きな洪水が生じた場合には、洪水時の流れによって、高水敷の植物や土砂が流送され、土壌中の有機物や栄養塩が減少することが予測され、一方、逆に比較的小さな出水が生じた場合には、地形や植生の効果によって、高水敷土壌中に栄養塩を豊富に含む細粒土砂の堆積が生じ、高水敷土壌中栄養塩量が増加することが予測される（図－10）。

このような観点から、洪水のピーク流量を変化させ流れと細粒土砂輸送に関する数値計算を実施し、その結果に観測で得られた微細土砂中の栄養塩含有率を乗ることより、洪水規模による高水敷土壌中の栄養塩の増減に関して検討が行われている（戸田ら（2002））。解析対象とした地形は多摩川 58.0km から 59.0km 地点の間であり、河床高さは現地測量から得た値を用いている。計算対象としている洪水は、1999年に生じた



図－1 1 洪水前後の栄養塩量変化に関する実験と計算の比較（戸田ら（2002））



図－1 2 ピーク流量の違いによる高水敷土壌栄養塩量増減の変化（戸田ら（2002））

洪水および洪水ピーク流量を変化させた4ケースであり、その流量を上流端で与えている。土砂輸送の解析では、粒子態栄養塩輸送に支配的な役割を果たすと考えられる微細な粒径の土砂に着目し、 $450\mu\text{m}$ 、 $225\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ の3粒径の土砂輸送の解析を行っている。

図－1 1 には洪水前後の高水敷土壌中栄養塩量の観測および計算結果の比較を示す。数値解析では、1) 流れの解析に単純に水深平均された Reynolds 方程式、浮遊砂輸送方程式を用いていること、2) 礫河床からの細粒土砂の巻上げをかなり単純化したモデルで取り扱っていること、3) 流れや土砂輸送に対する植生の効果を単なる円柱群の抵抗と同様に定式化していること、などのかなりの単純化が行われているため、計算結果は定量的にはまだまだ十分な精度で観測結果を再現しているとはいいがたいが、堆積土砂量や栄養塩量の増減については定性的には再現しているものといえる。

図－1 2 に異なるピーク流量の洪水に対する洪水前後の単位面積土壌中の窒素量の増減を示す。最大流量が $400\text{m}^3/\text{s}$ では、右岸側高水敷の一部で栄養塩量の増加が生じている。このことは、右岸側高水敷は、左岸

側と比較して、冠水時の流速が小さく、低水路内から運ばれた浮遊砂が堆積したためである。一方、洪水のピーク流量が $500\text{m}^3/\text{s}$ 程度になると、右岸側高水敷上でも冠水時の流速が大きくなり、その結果、栄養塩を多く含有する粒径の小さな堆積土砂が流出し、土壤中の栄養塩量が減少する。以上の結果より、研究対象とした河川では、洪水時の最大流量が $500\text{m}^3/\text{s}$ を上回ると、高水敷全体にわたり栄養塩量の減少が生じることが分かる。この高水敷の栄養塩量の増減を分ける洪水規模は調査対象地では確率年 2 年程度の出水に相当する。

赤松（2003）は河川の下流部の氾濫原における土壤中栄養塩の環境について、沖縄県石垣島の名蔵川マングローブ水域を対象として、同様の数値計算を実施している。図-13は、マングローブ林内（図中 R-B、L-B）および河川内（Stn.B）における洪水期間中の SS 濃度、 $10\mu\text{m}$ 粒径の浮遊砂堆積量をしめす。出水後のマングローブ林内では、潮汐に対応した SS 濃度の変動が見られるとともに、出水によってマングローブ林内の微細土砂堆積量が増加していることが分かる。表-3には、2002

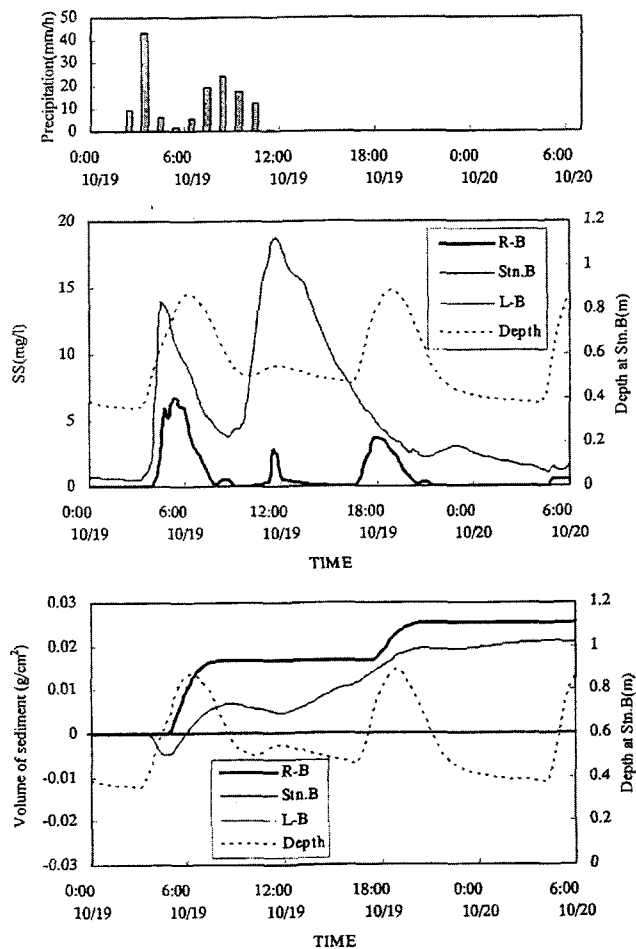


図-13 マングローブ域への微細土砂の堆積（赤松（2003））

表-3 マングローブ域への粒子態リン堆積量（1ha 当り、赤松（2003））

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

年 10 月 8 日および同年 10 月 19 日に生じた出水を対象として、数値計算によって予測されたマングローブ林およびマングローブ河道内への林供給量である。計算対象とされた 10 月 19 日の出水は、対象河川における確率年で 10 年規模の出水であったが、出水によってマングローブ水域にリンが供給されていることが分かる。

河川中流域に位置する礫床河川では、確率年で 2 年程度を境に、それより大きな出水があると高水敷の栄養塩量が減少したのに対して、下流域のマングローブ水域では確率年 10 年程度の出水でも以前、氾濫原で微細土砂と栄養塩の堆積が生じている。このように、河川の上・下流を比較すると、河川下流域のほうが、氾

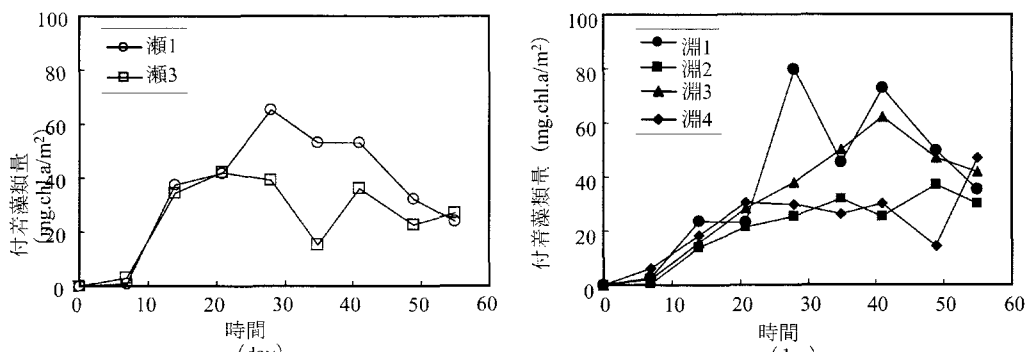


図-1 4 瀬と淵の付着藻類の増殖 (戸田ら (2002))

氾濫原の土壌栄養塩量の増減を分ける洪水規模が大きいことを示しており、同じ規模の洪水が生じた場合には、上・中流域の氾濫原は栄養塩のソースとして機能し、下流域はシンクとして機能することとなる。近年では、国内の多くの礫床河川において、高水敷への細粒土砂の堆積とハリエンジュに代表される樹林の生息域拡大が報告されているが、これを河川の上・下流の栄養塩動態の観点から見ると、中流域の礫床河川でさえ、氾濫原が栄養塩のシンクとして機能する頻度が上昇したものと言え、中流域の氾濫原が下流域のそれに近い状態へと変化しつつあることを示唆している。

このような洪水による氾濫原の栄養塩環境形成については、洪水のピーク流量以外にも様々な要素の影響を受けることが示唆される。例えば、洪水全期間を通しての全流下流量が等しい場合でも、短時間に鋭いピークを持つ洪水波形が流下したのか、ピーク流量は小さいが長時間増水期が続く洪水波形が流下したかでも、高水敷への栄養塩輸送の特性は変化してくるものと思われる。単純に考えると、洪水のピーク流量の抑制は高水敷への微細土砂と栄養塩の堆積を促進するものと考えられるが、このような洪水波形の変化に対する応答については、まだ十分な検討が行われておらず、今後の課題である。また、集水域の土地利用の変化は流入条件の変化を通じて、氾濫原の栄養塩環境に影響を与えることが予想される。その特性の把握のためには、

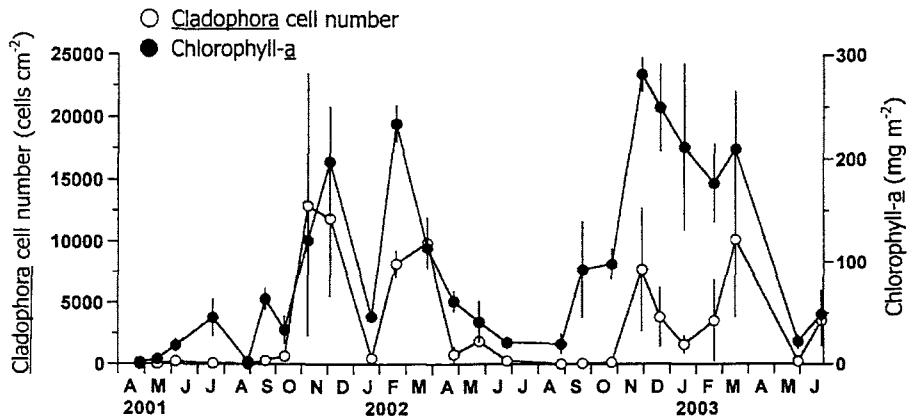
3. 付着藻類による生物一次生産

3. 1 藻類種に関する研究

河床付着藻類に関する既往の研究については陸水生態学や藻類学の分野で数多くの研究が実施されており、例えば、Hoagland et al. (1982) は付着藻類が河床に定着・繁茂する過程に関して、初期段階では単細胞型の珪藻綱の平面的な繁茂が生じ、その後、ロゼットを有する珪藻綱や糸状体の緑藻綱・藍藻綱が侵入し優占的に繁茂するようになることを報告している。また、Lobo et al. (1995) は河床付着珪藻種と水温、水深、BOD等の水質値の関係に関する多変量解析を行い、珪藻類の種の多様性を表す指数 (species richness) がある水質条件の下で最大の値を取ることを示している。以上のような藻類種に関する研究成果から、ある環境条件下で出現する藻類種を予測することが将来的に可能となることが期待される。

3. 2 藻類量・一次生産量に関するフィールド調査

河川の中での栄養塩やエネルギーの流れを把握する観点から付着藻類の生態に着目した場合、上述のような藻類種に関する研究以外に藻類現存量や一次生産量といった量的な把握が必要となる。Biggs et al. (1998) はニュージーランド中の4河川において付着藻類量と藻類付着基盤上部における流速の計測を行い、藻類一



図－1 5 矢作川中流域におけるカワシオグサの細胞数変化（野崎（2004））

次生産活動は藻類付着基盤近傍の水理特性の影響を受けることを明らかにしている。戸田ら（2002）は東京都の多摩川を対象として、瀬、淵といった流れ場の違いによる付着藻類の増殖過程の違いについて現地観測を実施している。観測では、観測対象河川の河床にモルタル製の模擬石を多数設置し、定期的にサンプリングすることで、藻類量の時間変化を明らかにしている。図－1 4 に瀬、淵のそれぞれでの藻類の増殖過程を示す。観測データのばらつきも大きいですが、大局的な傾向として、瀬では増殖開始より 10～20 日付近で、藻類量の大きな増加が見られるが、淵では増殖開始より 30～40 日後までゆっくりと増加していく傾向が見られる。このことから、瀬と淵を比較すると瀬の方が増殖速度（一次生産力）が大きい、最終的な藻類量（環境容量）には大きな違いが見られないものと思われる。

Biggs et al. (1998) や戸田ら（2002）の研究は、比較的流量の安定した期間を取り出し、その期間での藻類量の変化を調査したものであるが、藻類の生産特性は、河川の流量変化や季節による長期的な水温等の変化の影響をうける。例えば、野崎（2004）は矢作川中流域におけるカワシオグサ（*Cladophora glomerata*）の現存量（細胞数）について 2 年以上にわたる現地調査を実施しており（図－1 5）、季節による水温変化がカワシオグサの増殖に与える影響などについて検討を行っている。そこでは、カワシオグサの増殖特性が各年によって大きく異なっていることが示されており、短期間の調査のみでは、藻類増殖を支配する要因を誤って判断してしまう危険性があることが示されている。このような長期的な視点に立った継続調査のデータは極めて少なく、今後のデータの蓄積が強く望まれる。

河川的环境管理という視点から考えると、人為的インパクトに対する付着藻類群集の応答特性を知ることが重要である。皆川ら（2004）は、東京都の多摩川永田地区を対象として、土砂投入が付着藻類に及ぼす影響について現地調査を実施している。また、いくつかのダムではダム下流部の河川環境の改善を目的としたフラッシュ放流が計画されている（田中ら（2003））。これらについては、まだ調査結果が十分には上ってきていないが、今後の成果が期待される。

3. 3 藻類量・一次生産量に関する室内実験

各種藻類の一次生産速度や代謝速度は、培養された藻類を用いた明瓶・暗瓶法などによって数多くの計測がなされ、種毎の生理的特性に関する知見が蓄積されてきた。一方で、実河川中の付着藻類群集は日射、水温、栄養塩などの明瓶・暗瓶法で制御できる環境要因以外に、河川の水理特性の影響を強く受けることが指摘されている。このような水理特性と藻類一次生産特性の関係について、実験的に把握しようという試みがなされている。Hondzo and Wang (2002) は流れの特性以外の環境要因（水質、日射、水温）が全く等しくな

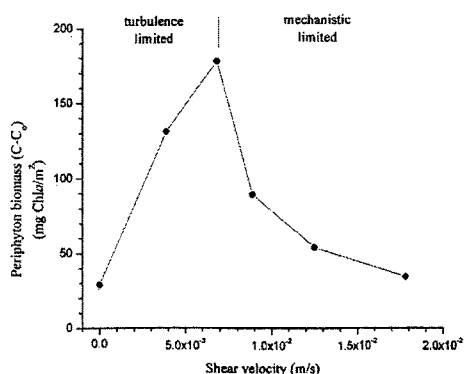


図-1 6 摩擦速度と藻類現存量の関係
(Hondzo and Wang (2002))

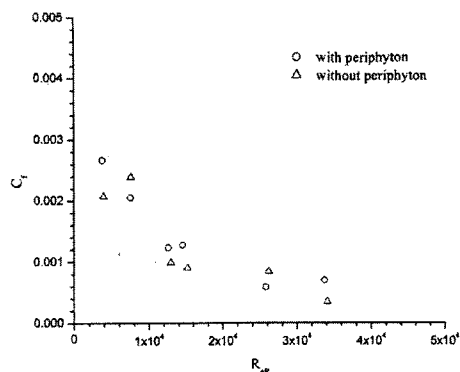


図-1 7 藻類群落が繁茂した水路の摩擦抵抗係数 (Hondzo and Wang (2002))

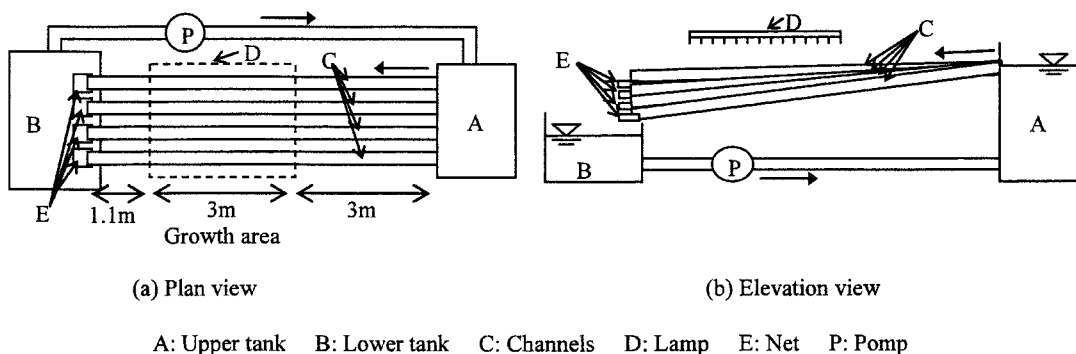


図-1 8 藻類増殖実験に用いた開水路群 (戸田 (2002))

るように制御された開水路を用いて、藻類の増殖実験を実施し、摩擦速度と一定期間後の藻類現存量との関係を示している (図-1 6)。また、藻類群集の繁茂が流れに与える影響について、摩擦抵抗係数の変化から検討を行っている (図-1 7)。戸田ら (2002) は、上下流端を共有する 4 本の開水路群 (図-1 8) を用いて、付着藻類の増殖・剥離実験を実施し、摩擦速度の増加とともに、藻類一次生産力が増加すること (図-1 9)、増殖の進行とともに糸状藻が優占することおよび摩擦速度の大きな水路ほど糸状藻の優占率が大きくなることなどを示している。以上述べた Hondzo and Wang (2002)、戸田ら (2002) の実験では、一定の水流量が与えられた場合の藻類群集の増殖・剥離特性が計測されたが、実河川では、流量の増加によって、河床礫表面への土砂の衝突が生じ、それが付着藻類の剥離に影響を及ぼすものと思われる。北村ら (2000) はカワシオグサの繁茂した礫を実験水路床に設置し、水路に砂礫を投入することによって、砂礫の衝突によるカワシオグサの剥離量を計測し、砂礫の衝突による仕事量と藻類剥離特性値の関係を定量的に明らかにしている (図-2 0)。

以上のべた室内実験は、現地観測では把握することが困難である増殖・剥離特性の細部に関する知見を与えてくれるとともに、次節に述べられる数値解析の生理パラメータや検証データを提供している。一般に付着藻類量の増減は一次生産、代謝、剥離、移入の収支に支配されているが、現在までの実験では、藻類の移入過程に関する定量的実験は行われていないように思われる。数値計算を実施すると分かるのだが、藻類の

増殖特性は増殖初期の藻類量に非常に敏感であり、増殖初期の藻類量は藻類移入量の影響を強く受ける。このことから、藻類の移入過程に関する実験的アプローチが必要であるが、筆者の感じるところでは、移入の定量計測は極めて難しいように思える。是非とも画期的なアイデアの実験結果が出てくることを期待する。

3. 4 藻類量・一次生産量に関する数値解析

近年では、藻類増殖に関する数値解析モデルを構築し、様々な環境条件に対する藻類量、一次生産量の応答を把握する試みが行われている（例えば、DeAngelis et al. (1995), Momo (1995), Saravia et al. (1998), 浅枝ら (2000), Son ら (2001), Asaeda and Son (2000), Asaeda and Son (2001)）。例えば、Son ら (2001) は、付着藻類のバイオマスの時間変化を定着、成長、剥離の収支から予測する数値解析モデルを構築している。そこでは糸状藻類、非糸状藻類の毎の成長パターン、群落の形成、外部栄養塩、流れのせん断力による剥離を考慮したモデルが構築されている。図-21に Son ら (2001) による数値解析による各種藻類量の変動と実験結果 (Peterson and Stevenson (1990), Peterson and Stevenson (1992)) との比較を示す。図中の線が計算値でシンボ

ルが実験値を示し、SYN および AM で標記されるものが非糸状藻の典型種として取り上げられた *Synedra spp.*, *Achnanthes minutissima* であり、SP が糸状藻の典型種として解析対象とした *Spirogyra* である。Son ら (2001) の数値解析で用いた藻類生理に関するパラメータは、増殖速度で5倍程度、移入に関するパラメータ値が1000倍以上、藻類種によって異なっており、その値の信頼性には若干の疑問は残るものの、解析結果の藻類バイオマスは実験で得られた種毎の増殖過程を定量的に再現していることが分かる。戸田ら (2003) は、Son ら (2001) と同様に付着藻類群集を糸状藻と非糸状藻に分けモデル化を行い、糸状藻・非糸状藻の生理パラメータがあまり異ならない条件下で数値計算を実施している。戸田ら (2003) の数値モデルは、実験データとの比較においては Son ら (2001) ほどの実験結果の再現性を有していないものの、藻類増殖の大局的特長や糸状藻・非糸状藻間の種の遷移過程について、定性的には再現可能なモデルとなっている。しかし、上記の数値モデルのいずれにおいても、移入過程のモデル化を裏付ける実証的な知見が少なく、そこがモデル開発

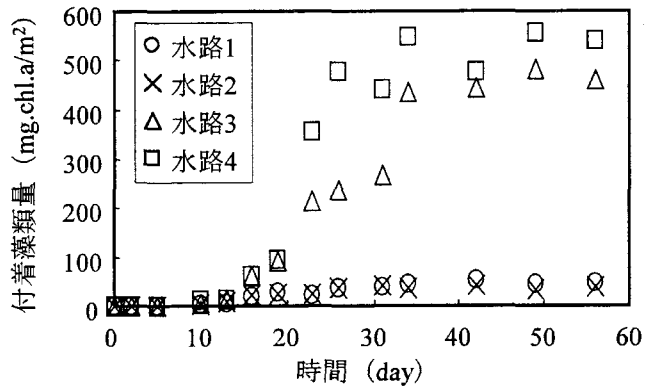


図-19 実験水路における藻類の増殖 (戸田 (2002))

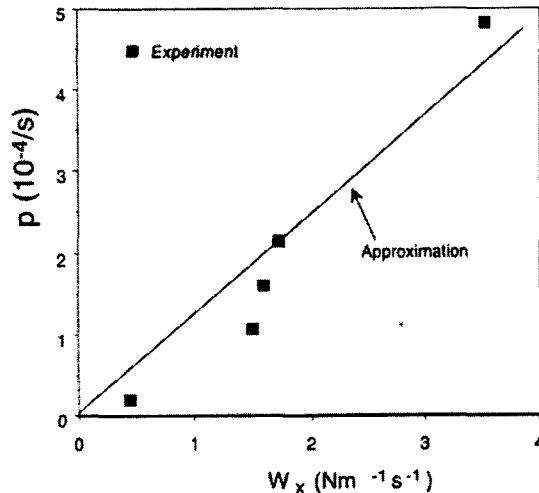


図-20 砂礫の衝突による仕事量と藻類剥離特性値の関係 (北村ら (2000))

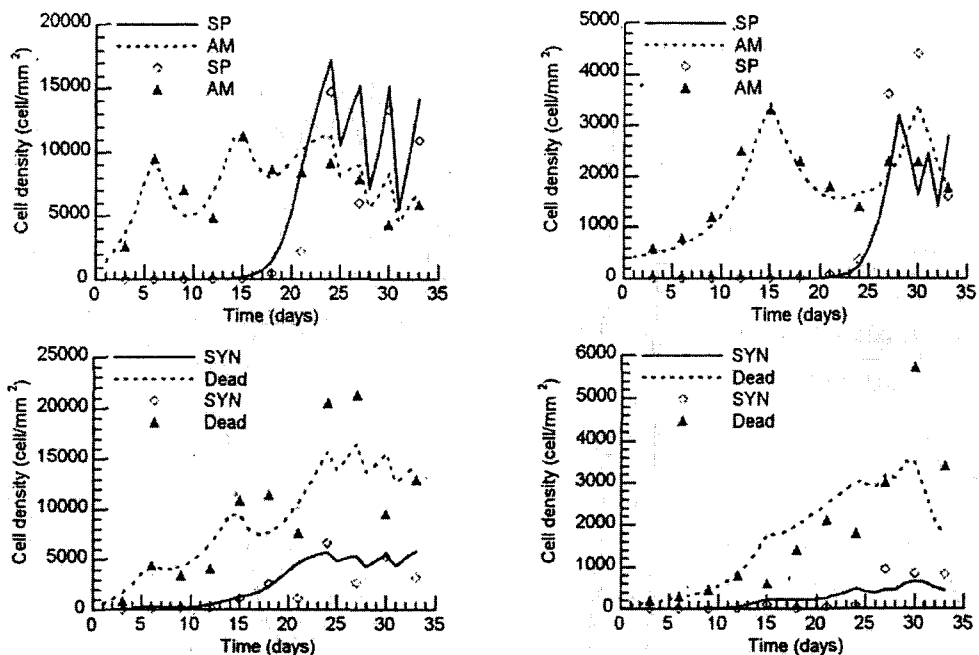


図-2 1 実験水路内の藻類増殖に関する数値解析 (Son ら (2001))

のネックとなっているように思われる。上記のモデルが基本的に実験水路での藻類増殖に適用されたのに対して、実河川での藻類動態を予測するモデルが田代ら (2003) によって提案されている。そこでは、サルテーション運動する砂が礫表面に衝突することによる藻類の剥離効果が入り入れられている (図-2 2)。

藻類増殖に関する数値計算の動向について、モデル自体はどんどん複雑な現象を取り込む方向に動いている。一方で、数値計算結果

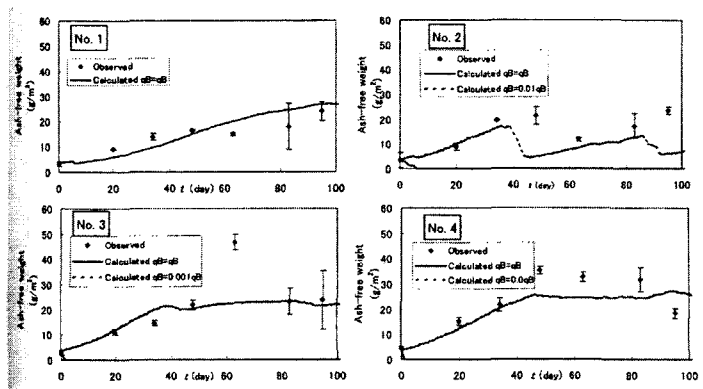


図-2 2 実河川の付着藻類の繁茂動態解析 (田代ら (2000))

は、水理、水質、日射などの条件が既知の実験に対する検証を行う場合においてさえも、相当数の仮定したパラメータを含んでいる。しかし、そのパラメータをしっかりと自前で計測する努力は十分には行われていないものと思われ、実験や観測によるデータの収集が必要となっている。その際、全ての藻類種について生理パラメータを収集することは困難であるため、種ごとの違いを許容される範囲で単純化することが必要となるが、現段階では、その許容範囲に関する十分な議論がなされていない状態である。今一度、河川工学的な視点から藻類種を機能群に分類し、機能群毎にこれまでに得られている知見を整理することが必要である

ものと思われる。

4. おわりに

本稿では、河川の栄養塩輸送とその生態系への取り込み窓口である一次生産について、礫床河川の話題を中心にごく最近の研究をレビューした。本文中では取り上げなかったが、栄養塩動態や一次生産について今後重要と思われるいくつかの視点を記述して本稿の結びとしたい。

(1) 流域負荷：本稿中では、懸濁態物質濃度と粒子態栄養塩の相関関係に基づく栄養塩負荷量推定について述べたが、この相関関係や流量と懸濁態物質濃度の関係は基本的に流域と土砂生産源の特性に関係している。とりわけ、流域の人間活動が河川、湖沼、海域に与える影響を見る場合には、流域の土地利用などに応じた河川への物質負荷特性を明らかにしていく必要がある。

(2) 上・下流の連続性：本稿で紹介した事例は、河川のある限られた区間で生じる現象（物質循環、一次生産など）についてであるが、実際の河川は上流～中流～下流が連続している。この連続して変化するシステムの中で栄養塩や一次生産が与える影響については十分な研究がなされていないものと思われる。例えば、礫床河川の付着藻類が増水によって剥離した時に下流側河川や海域にどのような影響を与えるか、など上・下流の連続性を強く意識した栄養塩・有機物動態の把握が必要である。

(3) 食物連鎖上位の生物の生理：栄養塩や一次生産に着目した河川環境把握の試みは、いわゆるボトムアップの視点である。一方、河川生態系では魚類や水生昆虫といった食物連鎖上位の生物による捕食で一次生産量が大きく異なってくる場合がある。上位生物者を含めた物質動態の把握が必要である。

参考文献

- 1) Asaeda, T. and Son, D. H.: A model of the development of a periphyton community: resource and flow dynamics, *Ecological Modelling*, 137, pp.61-75, 2001.
- 2) Asaeda, T. and Son, D. H.: Spatial structure and populations of a periphyton community: a model and verification, *Ecological Modelling*, 133, pp.195-207, 2000.
- 3) Biggs, B. J. F., D. G. Goring and V. I. Nikora: Subsidy and stress responses of stream periphyton to gradients in water velocity as a function of community growth form, *Journal of Phycology*, No.34, pp.598-607, 1998.
- 4) DeAngelis, D. L., M. Loreau, D. Neergaard, P. J. Mulholland and E. R. Marzolf: Modelling nutrient-periphyton dynamics in streams: the importance of transient storage zones, *Ecological Modelling*, 80, pp.149-160, 1995.
- 5) Hoagland, K. D., S. E. Roemer and J. R. Rosowski: Colonization and community structure of two periphyton assemblages, with emphasis on the Diatoms (Bacillariophyceae), *American Journal of Botany*, 69, pp.188-213, 1982.
- 6) Hondzo, M. and Wang, H.: Effects of turbulence on growth and metabolism of periphyton in a laboratory flume, *Water Resources Research*, AGU, 38, 12, pp.1277-1285, 2002.
- 7) Hong Son Duong, 浅枝隆, 田中規夫, 谷本勝利: 種間の競争を考慮した付着藻類群集の変動解析, 土木学会論文集, No.677, pp.151-161, 2001.
- 8) Lobo, E. A., K. Katoh and Y. Aruga: Response of epilithic diatom assemblages to water pollution in rivers in the Tokyo Metropolitan area, Japan, *Freshwater Biology*, 34, pp.191-204, 1995.
- 9) Momo, F. R.: A new model for periphyton growth in running water, *Hydrobiologia*, 299, pp.215-218, 1995.
- 10) Peterson, C. G. and Stevenson, R. J.: Post-spate development of epilithic algal communities in different current environments, *Can. J. Bot.*, 68, pp.2092-2102, 1990.
- 11) Peterson, C. G. and Stevenson, R. J.: Resistance and resilience of lotic algal communities: importance of

- disturbance timing and current, *Ecology*, 73, pp.1445-1461, 1992.
- 12) Pilailar, S., Sakamaki, T., Hara, Y., Izumi, N., Tanaka, H., and Nihimura, O.: Effects of hydrologic fluctuations on the transport of fine particulate organic matter in the Nanakita river, *水工学論文集*, 第 48 巻, 1519-1524, 2004.
 - 13) Saravia, L. A., F. R. Momo and L. D. B. Lissin: Modelling periphyton dynamics in running water, *Ecological Modelling*, 114, pp.35-47, 1998.
 - 14) Walling, D. E., M. A. Russel and B. W. Webb: Controls on the nutrient content of suspended sediment transported by British rivers, *The Science of the Total Environment*, 266, pp.113-123, 2001.
 - 15) Walling, D. E., Webb, B. W., and Russell, M. A.: Sediment-associated nutrient transport in UK rivers. In *Freshwater contamination*, Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ. No. 243, pp. 69-81, 1997.
 - 16) 赤松良久：マングローブ水域の水理と物質循環，東京工業大学博士論文，2003.
 - 17) 浅枝隆，ズン・ソンホン，藤野毅：河床のペリファイトンの遷移過程の解析，*河川技術に関する論文集*，第 6 巻，pp.119-124，2000.
 - 18) 小倉紀雄，高田秀重，小川浩史：文部省「環境科学」報告書，B341-R02-2，84，1988.
 - 19) 河川環境管理財団：栄養塩濃度が河川水質環境に及ぼす影響に関する研究，河川環境管理財団河川整備基金事業研究報告書，2003.
 - 20) 川島博之，鈴木基之：負荷解析のための河川水質シミュレーションモデル，*水質汚濁研究*，第 9 巻，pp.707-715，1986.
 - 21) 北村忠紀，加藤万貴，田代喬，辻本哲郎：砂利投入による付着藻類カワシオグサの剥離除去に関する実験的研究，*河川技術に関する論文集*，第 6 巻，pp.125-130，2000.
 - 22) 児玉真史，田中勝久，澤田知希，都築基，柳澤豊重：河川水中におけるコロイドリンの動態，*水工学論文集*，第 48 巻，pp.1513-1518，2004.
 - 23) 田中則和，浦上将人，宮川勇二：生物の生息環境改善に資するフラッシュ放流計画手法，*河川技術論文集*，第 9 巻，pp.103-108，2003.
 - 24) 戸田祐嗣，池田駿介：礫床河川の物質循環シミュレーション，*土木学会論文集*，No.635，pp.67-83，1999.
 - 25) 戸田祐嗣，池田駿介，浅野健，熊谷兼太郎：礫床河川における出水前後の高水敷土壌の変化に関する現地観測，*河川技術に関する論文集*，第 6 巻，pp.71-76，2000.
 - 26) 戸田祐嗣，池田駿介，熊谷兼太郎：礫床河川における洪水時の流れおよび浮遊砂・栄養塩輸送に関する数値計算，*水工学論文集*，第 46 巻，pp.1121-1126，2002.
 - 27) 戸田祐嗣，赤松良久，池田駿介：水理特性が付着藻類の一次生産特性に与える影響に関する研究，*土木学会論文集*，No.705，pp.161-174，2002.
 - 28) 中島治美，鷺見哲也，辻本哲郎：木津川裸地砂州における伏流水の水質特性，*河川技術論文集*，第 10 巻，pp.381-386，2004.
 - 29) 野崎健太郎：矢作川中流域における大型糸状緑藻群落の発達，*河川技術論文集*，第 10 巻，pp.49-54，2004.
 - 30) 皆川朋子，福嶋悟，天野邦彦：土砂投入が付着藻類に及ぼす影響—多摩川永田地区を事例に一，*河川技術論文集*，第 10 巻，pp.477-482，2004.
 - 31) 村上泰啓，中津川誠，高田賢一：沙流川における洪水時の負荷量観測とダムへの水環境の影響について，*河川技術論文集*，第 9 巻，pp.511-515，2003.
 - 32) 山本浩一，二村貴幸，坂野章，日下部隆昭，末次忠司，横山勝英：濁度計による懸濁態栄養塩負荷推定に関する研究，*河川技術論文集*，第 9 巻，pp.515-560，2003.