

水工学シリーズ04-B-1

河川水質と流域特性 ー海域環境との関わりー

北海道大学大学院工学研究科 助教授

橘 治 国

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会
2004年7月

河川水質と流域特性—海域環境との関わり—
Water quality and characteristics of watershed area
—How those effect sea environment—

橘 治国
 Harukuni Tachibana

1. はじめに

1. 1 自然生態系の保全

海洋環境、特に沿岸域の生態系は、陸域環境と密接に関連していることはいままでもない。特に沿岸河口域は、海洋からの影響が大きいので湖沼ほど流入水の影響は鋭敏でないが、陸水の影響が顕著に認められることが多い。昭和30年代の公害が問題になったころは、河口部の汚染は相当のものであった。江戸川区における工業排水による漁業被害は、一連の公害運動の始まりである。沿岸の生態系や漁業は、日本の環境汚染と切り離しては考えられない。石狩川の汚染の歴史は図1に示すとおりで環境基準のBOD 3 mg/l をはるかに越え、漁業自体の問題を除いても、生態系への影響は相当なものであったに違いない。現在は、環境基本法の遵守によって石狩川は清澄になり石狩湾に入る水のBODは 1 mg/l に近いとされている。この石狩川に見られた汚染の様相は全国共通である。図2は、河川の水質環境基準BODの達成率である。基準達成率は80%を越え、戦後の汚染形態の変化は新しい視点への転換を要求されている。すなわち汚れの時代を何とか通り抜け、本来の持続可能な自然環境あるいは健全な人間環境を考慮すべき時代になった。自然の生態系、安定した生態系を基本に、海洋生産を考える時代になった。

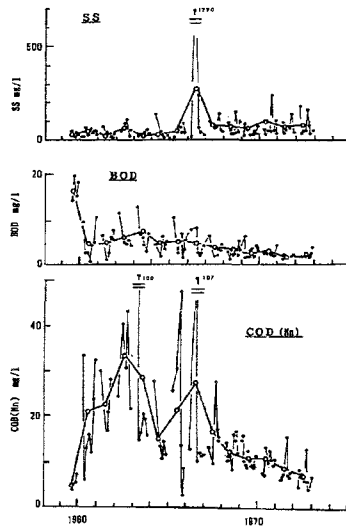
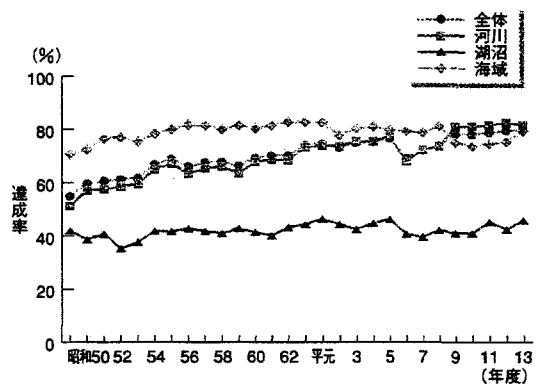


図1 石狩川の汚染



注1：河川はBOD、湖沼及び海域はCOD

2：達成率(%) = (達成水域数 / あてはめ水域数) × 100

出典：環境省『平成13年度公共用水域水質測定結果』

図2 環境基準達成率(平成15年度環境白書)

1. 2 人間を中心とした物質循環系の保全

人間環境は自然生態系を基本としなければ、将来に持続可能なものとできない。これが無理な場合には、当面人間活動の環境負荷を生産物として回収することが合理的である。そのためには図3に示すように、海洋を含めた広域的な循環環境が必要である。安易な手段、例えば栄養塩供給のための深層水の利用も、自然のバランスを壊し、その影響は広範に及び取り返しのつかない地球環境破壊に発展する可

能性があり、慎重でなければならない。人間活動を、地球レベルで考え、自然環境の変貌レベルを意識しなければならない時代になった。

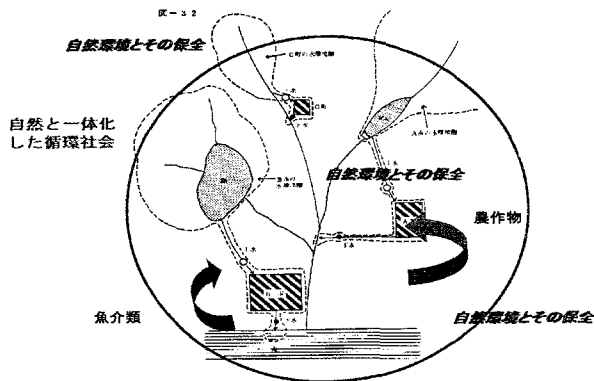


図3 資源回収型広域循環図

2. 河川環境の水質支配要因

1.でわが国の環境が、目に見える汚染、すなわち有機汚濁や酸素欠乏といった汚染は低減して来たことを示した。しかし湾内や湖沼など閉鎖性の高い水域では、規制項目から漏れた物質による二次的な環境変化が顕著に認められるようになった。それが、栄養塩による赤潮であり、アオコである。これは農業や畜産業での過剰な肥料の使用や畜産廃棄物の投棄にあることはいまでもない。そこで漁師は農家に被害を訴え、一方農家も環境のことを真剣に考えるように変化してきた。この地域内での直接的な対話は、周囲の水環境を着実に改善してきた。しかし一度、農地に散布され拡散した肥料の回収や牧草地での牛馬のし尿の処理は難しい。いろいろな改善や対策が試みられるようになってきたが、現在はとりあえずこれらを流出制御が難しいノンポイントソースとして定義づけ、資源として活用するのも積極的な沿岸漁業の資源評価として意義がある。

またこれまで評価されてこなかった森林からの栄養塩負荷も話題になるようになった。これは森林の伐採など、森林の保全状態によって変化することと密接に関係している。人為的な汚濁負荷が低減されて、占有率の高い森林の影響が無視できなくなってきた。

いずれも社会の水質への関心の高まりによって水環境の汚染状態は変化し、目的とする保全環境や資源環境と関連ずけて、自然の状態に近い水質の低濃度レベルでのチェックが必要となってきた。汚染者（ポイントソース）と環境被害が直接対応する時代ではなくなってきた。

3. 水環境と水質

ここでは有機的な河川汚濁は一段落したものととらえ、栄養塩を対象にその生物影響について考えてみたい。石狩川の窒素、リンの形態と濃度は図4のとおりである。栄養塩の形態はStandardMethods (20th Edition, APHA, AWWA, WEF, 1999) に従って分画したが、水域や排水の特性に従って特徴的である。窒素化合物については、多くが溶存態であり、また硝酸態（図4では $\text{TIN} - \text{NH}_4 + \text{N}$ ）で生物にはそのまま利用しやすい形態である。一方、リン化合物は、排水を除くと懸濁態が優占し、従来の知見では生物による摂取が難しい。各種排水は、アンモニア態がまたリン酸態が優占し、生物が容易に利用されやすい形態で栄養塩が含まれており、自然環境とは大きな差があるようにみえる。しかし溶存態栄養塩のみが生物に利用されやすいという過去の考え方は変えなければならない。栄養塩が豊富でない水域では、生物は栄養の摂取をあらゆる機会に狙っている。図5は、懸濁態リン濃度と $\text{AGP}(\text{ASS}) + \text{N}$ （水試料に過剰の窒素成分を供給した場合の懸濁態リンによって増殖した藻類量）と PP （懸濁態リン）濃度の関係を示したものである。接種藻類は *Microcystis aeruginosa* で、25℃、1000Lux 条件下での培養実験である。両者の回帰直線は

AGP(ASS)+N (Cmg/l) = 257PP (mg/l) - 0.22 で、C/P (*Microcystis aeruginosa*) が約 260 となり、矢木ら (矢木修身等、国立公害研究所研究報告、No.25, 31-58, 1981) の実験による藻体収率約 350 と比較すると、懸濁態リンのうち 74% が利用されたことになる。洪水時には、懸濁態リン化合物の利用率は低下する。(橘 治国他、土木学会北海道支部論文報告集、43 巻、p309~314、1987) 藻類が利用するメカニズムとしては、増殖による高 pH やフォスホターゼ活性によるとされている。通常は藻類増殖による高 pH が理由として一番妥当である。藻類増殖には懸濁態の反応リン (PRP) が利用されていることは明らかになっており、図 4 に示されているように、自然界には利用可能な懸濁態リンは多い。

河川水質の沿岸及び海洋生態系への影響については、筆者の知識は乏しいが、河口部でのこれら遅効性栄養塩については、滞留時間が長い場合何らかの影響を及ぼすであろうし、陸水域でのリン化合物の藻類への転換はそのまま魚類の餌として有効であろう。

河 川	月 日	Q m ³ /s	SS mg/s	TOC mg/l	TN mg/l	DN mg/l (%)	TIN mg/l	NH ₄ -N mg/l	TP mg/l	DP mg/l (%)	Cl ⁻ mg/l	溶存態*					懸濁態*		
												DO _p	DCP _p	DRP _p	POP _p	PP _p	DO _t	DCP _t	DRP _t
<河 川>													0 50 100 %						
石狩川 (St.1)	4/23/83	132	27	2.9	0.47	0.36 (77)	0.23	0.01	0.031	0.009 (29)	3.0								
	8/17/83	20.5	12	4.1	0.55	0.53 (96)	0.25	0.03	0.041	0.010 (24)	3.0								
	9/13/83	70.5	31	6.4	0.71	0.68 (96)	0.53	0.04	0.044	0.012 (27)	6.7								
石狩川 (St.3)	4/23/83	317	17	5.6	0.73	0.53 (73)	0.36	0.12	0.035	0.012 (34)	5.9								
	8/17/83	60.1	15	5.9	1.02	0.84 (82)	0.42	0.04	0.067	0.027 (40)	15.0								
	9/13/83	289	77	7.4	1.53	0.82 (54)	0.31	0.10	0.096	0.020 (21)	17.0								
石狩川 (St.6)	4/23/83	1118	91	4.9	0.70	0.62 (89)	0.42	0.11	0.040	0.008 (20)	6.7								
	8/17/83	91.8	11	4.6	0.86	0.82 (95)	0.34	0.02	0.078	0.031 (40)	13.3								
	9/13/83	86.6	44	9.5	1.38	1.26 (91)	0.65	0.08	0.246	0.016 (7)	18.7								
<都市河川>																			
創成川 (St.SF)	12/23/81		19	9.1	9.73	9.09 (93)	8.75	7.10	0.294	0.041 (14)	53.5								
<湖沼(冬期)>																			
茨戸湖 (St.B 4)	12/23/81		18	8.1	8.53	8.08 (95)	7.68	6.10	0.180	0.034 (19)	67.0								
茨戸湖 (St.B12)	12/23/81		11	11.8	1.80	1.75 (97)	1.20	0.29	0.119	0.017 (14)	38.5								
<各種排水>																			
A (乳業)	12/22/82	0.008	47	36.3	7.58	2.84 (37)	0.28	0.18	5.74	4.72 (82)	346								
B (醸造)	12/24/82	0.008	23	21.4	1.81	0.67 (37)	0.10	0.01	1.85	1.40 (76)	48.0								
C (油脂)	12/18/82	0.063	173	81.2	44.3	8.99 (20)	5.57	5.45	9.98	4.86 (49)	38.7								
D (パルプ)	11/4/83	3.00	85	74.5	3.33	2.54 (76)	1.90	0.02	0.235	0.043 (18)	163								
<下水・し尿処理場>																			
E 処理 (旭川・下水処理場)	11/4/83	0.155	7	14.8	27.5	(100)	27.5	22.8	4.10	3.49 (85)	150								
F 処理 (江別・下水処理場)	9:00 11/30/83	0.083	430	224	56.4	(100)	55.6	55.0	10.3	7.07 (69)	59.0								
	18:00 11/29/83	0.053	204	145	27.5	(100)	24.8	24.5	4.58	2.78 (61)	76.3								
G 処理水 (旭川・し尿)	11/4/83	0.038	11	15.4	35.6	(100)	35.6	32.8	5.99	4.99 (83)	182								

* OP: 有機性リン, CP: 縮合性リン, RP: 反応性リン

図 4 石狩川の栄養塩分析結果

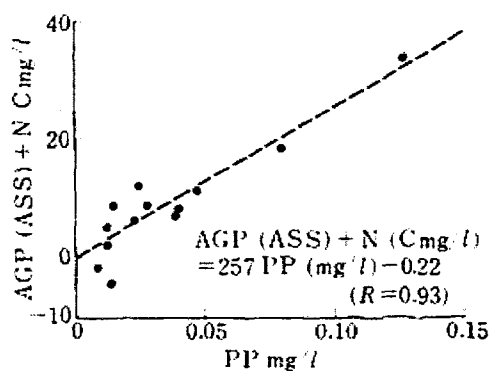


図 5 懸濁態リン (PP) と藻類増殖量 (AGP)

4. 水質変化特性と流出源

前述のごとく、石狩川の下流のBODが環境基準値(3 mg/l)より低くなり、人為的汚染の程度が低くなり、自然状態での水質成分の起源について検討できる環境になってきた。そこで石狩川の融雪期(1989年)の水質を例に、その水質特性と流出源について考えてみよう。石狩川の中流域深川市の納内橋地点St.3と下流域の奈井江大橋St.6の流量変化を図6に、代表成分についての濃度変化は図7、主要成分については図8(納内橋)と図9(奈井江大橋)にそれぞれ示した。融雪とともにpHが低下し、電気伝導度はじめ、無機イオン濃度が低下する。SSは融雪初期の多流量時に著しく増加するが、この傾向は下流部で著しい。ノンポイント汚染源からの寄与が大きいためといえる。有機汚濁成分については、懸濁態有機炭素TOC_{ss}がSSに対応した変動が認められるが、溶存態有機炭素TOC_fは変動が少なく、逆に希釈の傾向が認められる。一方、窒素化合物は融雪初期の濃度増加とその後の低濃度が顕著で蓄積性の栄養塩であること、リンについてはほとんどが懸濁態で、これがSSや懸濁態有機物に近い挙動を示し、土壌粒子に均等に含有され、無尽蔵に近い形でノンポイントソースとして存在していることがわかる。このリン化合物の莫大な存在は、肥料として畑に利用されて、これらが生物に摂取されることなく土壌に吸着保存されることと対応している。(図10 浮田正夫、山口大学衛生工学シンポジウム論文集、175-184,1995) 3. で述べたようにこれらが生物に利用可能となるので、沿岸での生物生産には無視できない栄養源となろう。

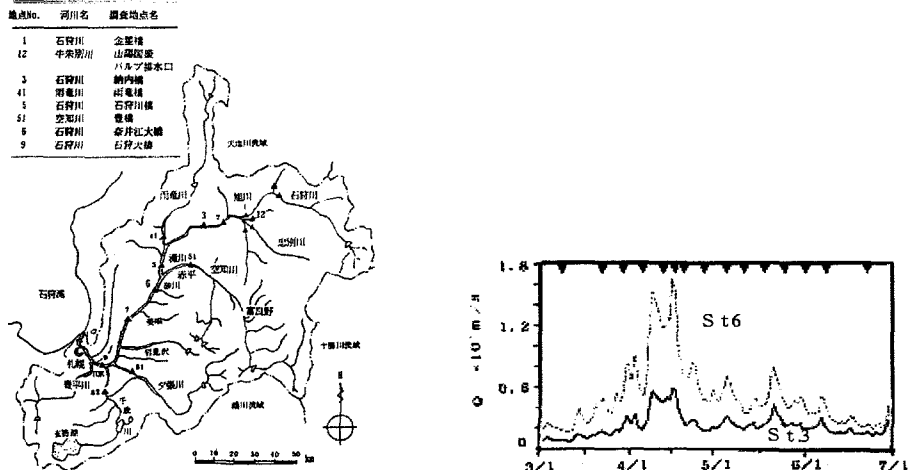


図6 石狩川流域の概略と流量変化

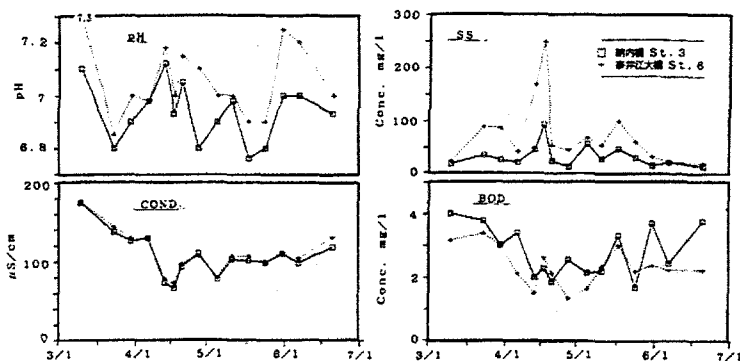


図7 代表成分の濃度変化

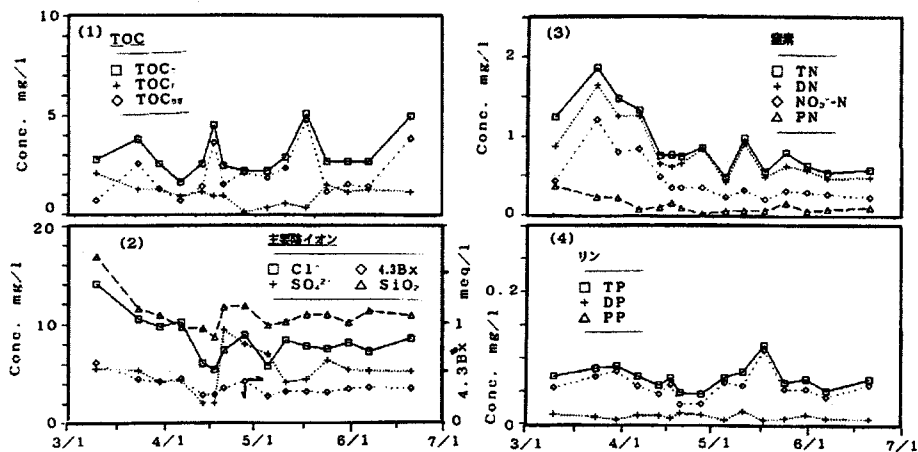


図8 主要成分の濃度変化 (納内橋 St.3)

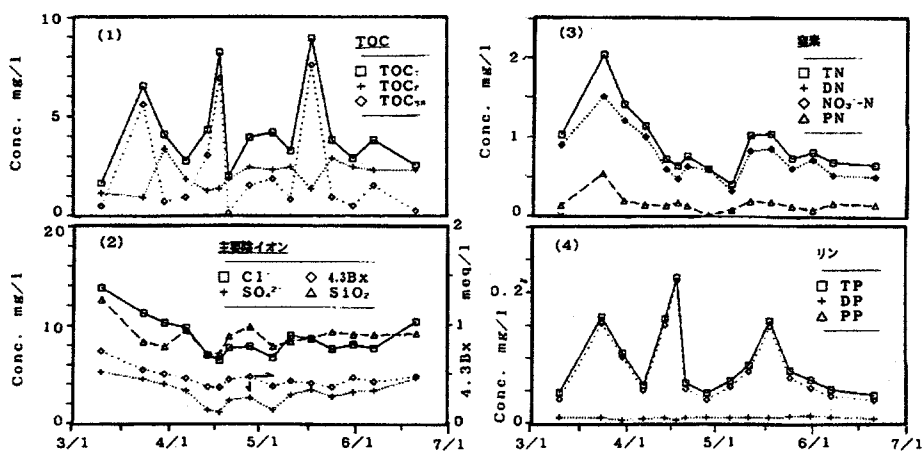


図9 主要成分の濃度変化 (奈井江大橋 St.6)

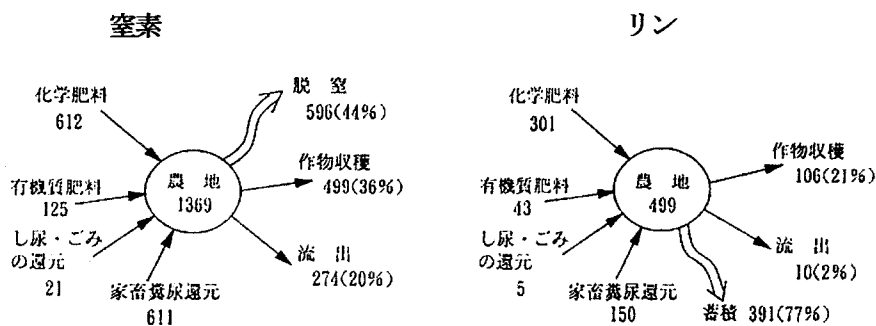


図10 農地の栄養塩収支 (x1000 t/年)

融雪期間中の水質変化を主成分分析したものが図11、図12である。両図とも、上に主成分負荷量、下に主成分得点を示した。両図には、ほぼ同じ傾向が認められ、これは汚濁のパターンが河川で一様になってきたとすいえる。第一主成分は、 Cl^- や SO_4^{2-} が正に、SSや懸濁態リン（PP）が負に分布し、流量変動と関連した成分、すなわち洗い出し効果に関連している。第二主成分は、懸濁態有機炭素（TOCs）、懸濁態窒素（PN）やBODなど人為汚濁物質が正に、ケイ酸や溶存態リンなど自然汚濁が負に分布し、汚濁源の性格を示している。主成分負荷量において、St. 6でTOCFが負域に属し、下流ほど上流パルプ工場の汚染の影響が小さくなりノンポイント汚染の影響が強くなっていることがわかる。ここで主成分得点を見ると、両図とも図の破線で囲んだように3グループに分けることができる。第1象限の3月中旬から4月上旬のグループ（Ⅰ群；汚濁物質希釈流出群）、第2象限の4月中旬から5月初旬のグループ（Ⅱ群；面源洗い出しグループ、4/21、4/28を除く）、例外は多いものの5月中旬から6月下旬のグループ（Ⅲ群；非汚濁物質流出群）である。第3グループは主に森林負荷あるいは山岳負荷とも考えられよう。このように明確に流出特性を分けることができるのは、これまでの人為的汚濁負荷の減少にあると思われる。栄養塩汚濁負荷の大きい流出初期は都市地上や河床の蓄積物が含まれる。この時期の汚濁物質を古川（三日月湖）やラグーンで確保するのは汚濁軽減と資源確保という意味から価値があるかもしれない。

いずれにしても、海域に対しては陸水からの負荷源が、時期によって相当異なることがわかる。

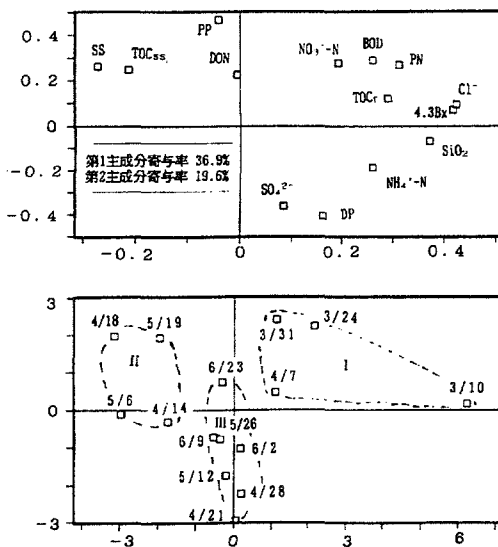


図11 融雪期水質についての主成分分析結果
(納内橋 St.3)

上：負荷量分布、下：主成分得点分布

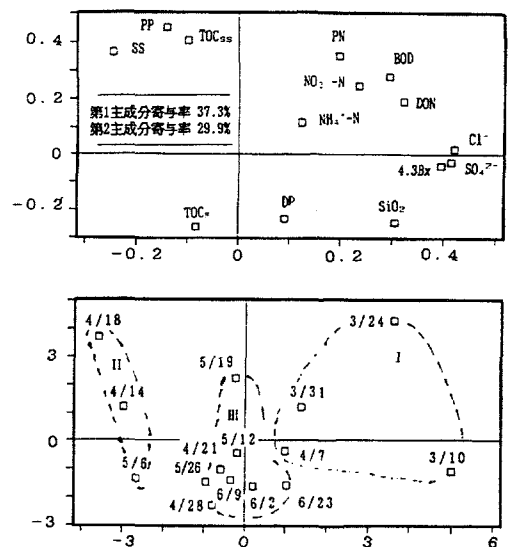


図12 融雪期水質についての主成分分析結果
(奈井江大橋 St.6)

上：負荷量分布、下：主成分得点分布

5. 森林からの栄養塩負荷（一魚付林の意味一）

北海道に限らず日本の沿岸は、森林からの流出河川水の直接的影響を受けている。また最近では、漁獲への森林河川の影響が叫ばれるようになり、北海道を中心に森林の造成や植樹活動が社会的活動になってきた。

4. で森林河川水質の影響も大きいことが認められている。そこで土木学会誌叢書1緑に掲載した森林河川水質とその保全（土木学会丸善2004、あるいは土木学会誌、37巻、11月号、45-48、2002）を紹介し、森林流出水の特長について解説したい。

第7回 森が水を富ます

森林河川水質とその保全

橋 治国

TACHIBANA Harukuni

正会員 博（工学） 北海道大学大学院助教授 工学研究科環境資源工学専攻水環境保全工学研究室

山田俊郎

YAMADA Toshiro

正会員 博（工学） 豊橋技術科学大学助手 建設工学系環境工学講座

多くの化学物質が、森林内の樹木間を、そして広く大気-森林系、森林-土壌系として、移動・循環している。森林を中心とした循環系は、主に生態系によって維持されており、自然の状態では安定した状態で循環している。河川水や地下水には、これらの物質が漏れ出ると考えてよいだろう。

Kimmins は著書“Forest Ecology”¹⁾で、森林内の栄養塩の循環を図-1のようにまとめている。栄養塩の主たる循環を、異なる生態系間を移動する地球化学的循環、一つの生態系内を移動する生物地球化学的循環、そして生物の組織内を移動する生物化学的循環の三種に分類している。この循環のなかで、一部が土壌へ漏出し、そして、河川へ流出するとしている。Kimmins は栄養塩ごとに、自然状態での物質収支を計算しているが、われわれもこのような視点で自然の森林生態系を評価し、人間の手が入ったときの状況を考える必要がある。この漏水としての河川水水質成分に影響の現われることは容易に想像できる。

ヨーロッパやカナダでは、酸性雨によって枯れた樹冠の、そして生物のいない澄みきった湖の無惨な姿を写真で見ることができる。今のところこのような被害は大陸の内陸部に限られており、わが国においてはまだ大事故

には至っていない。わが国で問題となっているのは、森林地域内の林道を含めた道路建設、さらにゴルフ場や住宅地建設のための用地造成等による樹木の伐採や土の掘り起こしに伴う土砂の流亡である。これらの状況は見た目にすさまじい。例えば、北海道の桂沢ダム湖では、建設当初はあまりにも清澄で、隣接する浄水場では、凝集効果を高めるため懸濁物の添加も考えたという。しかし森林土壌が人間活動でいったんその安定を失うと、ダム湖の水は濁りに濁った。さらに、われわれが注意してゆかなければならないのは、酸性雨による被害と同様、土砂の流亡等とともに進行する森林環境の不安定化や生態系の破壊に伴う長期的な水質成分の流出異常である。長期的な濁水や水の流出経路の変化は、水質を変化させ、水生生物の優占種を変える。少しずつの環境変化が、長い時間の経過の後に、森林内外の水循環系や生態系を変化させ、最終的には森林そのもの、そして周囲の環境をも変えてしまう。

次に、このような著者の認識に至った調査例を紹介しよう。

森林の状態と森林河川水質

筆者は、ノンポイント汚染研究の一例として、森林域

表1 調整森林河川の比較

河川名	小川（実名）	試験地小川
集水域名	小川集水域	北海道大学演習林鹿舞試験地
流域	豊平川別別川流域	豊平川鹿舞川流域
集水域面積	1.1 km ²	0.191 km ²
河川流路延長	7.0 km	0.3~0.4 km
平水量	0.2~0.3 m ³ ・s ⁻¹	0.001~0.002 m ³ ・s ⁻¹
最高峰	無患根山（1461 m）	焼山（562 m）
森林	エゾマツ・シラカバ・ハンノキ （営林署による生産・造林事業、林道あり）	ミズナラ・シナノキ・イタヤカエデ・ハルニレ、一部カラマツ人工林 （調査地点より上流は自然林に近い二次林）
岸辺の植生	ヤナギ・ヤチタモ	クマザサ（下層植生が安定）
地質	新第三紀火山岩・堆積岩に新第四紀安山岩質溶岩で脆弱で崩壊しやすい	新第三紀~第四紀の堅牢な安山岩質
河川の特徴	荒廃河川（土砂が流出しやすい）砂防ダム8か所	清澄で濁りが少ない。
居住地	なし	なし

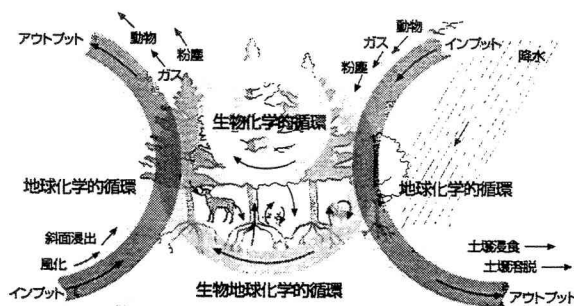


図1 Kimminsによる森林内の栄養塩の循環（文献（1））



写真-1 小川調査地点



写真-2 篠簾試験地小河川周囲

河川を対象に、栄養塩を中心とした水質成分の動態を調査している。ここで石狩川水系の豊平川上流域での観測例を紹介する。取り上げた2森林河川の流域の概況は表-1のとおりである。豊平川支流の小川（実名）は、写真-1のとおり、増水時に岩塊や土砂が流出する荒廃河川であり、北海道大学農学部篠簾試験地小河川は写真2のとおり鬱蒼とした樹木（上層植生）に下草（下層植生）が繁茂し、水面は見えないほどである。図-2には、両河川の降雨時の水質変化を示した²⁾、両者の水質を比較すると、試験地河川では、普段は栄養塩は高濃度で溶存態が優占し（溶存態窒素DN、溶存態リンDP）、また降雨時の流量変化に対してその濃度変化が小さい。一方、荒廃河川の小川では、平時時には栄養塩濃度が低く、降雨時の高流量時にSS（懸濁物質）や懸濁態栄養塩（懸濁態窒素PN、懸濁態リンPP）濃度が急激に増し、濃度変動が大きい。これらは明らかに土壌面の降雨による洗出しの差によるといえる。下草の繁茂した試験地河川は、森林の水涵養機能によって、小さな水量変化で高濃度の安定した水質で流出する。無機態窒素やリンは、富栄養化レベルに達している。SSが少ない水ではあるが、栄養塩に富み、下流の湖沼に豊かな生態系を保証する。

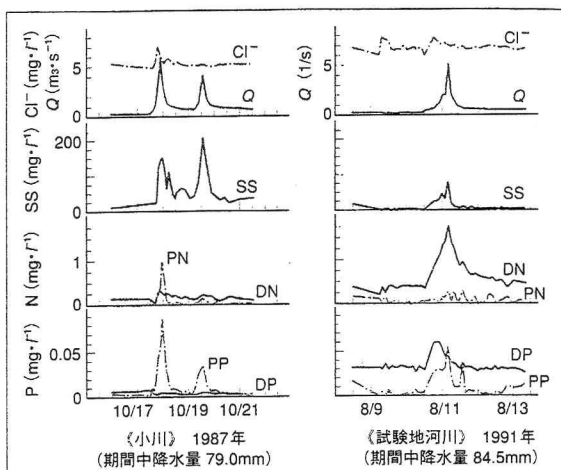


図-2 降雨増水時の水質変化

表2 森林からの全窒素、全リン発生負荷量の比較

TN kg・km ⁻² ・yr ⁻¹	TP kg・km ⁻² ・yr ⁻¹	出典
694	18.4	土木学会 (1970) ³⁾
258	13.5	// (1975) ⁴⁾
405	13.5	// (1978) ⁵⁾
245	21.5	中西 他 (1973) ⁶⁾
340	32.5	//
720	—	和田 (1978) ⁷⁾
360	12.0	渡辺 他 (1979) ⁸⁾
445	9.5	国松 他 (1986) ⁹⁾
358	11.3	//
186~420	13.0~55.0	堤 (1987) ¹⁰⁾
390	32.3	本報告 (小川集水域) ²⁾
520	11.5	// (試験地河川) ²⁾
353	23.0	// (滝川)
249	27.0	// (モイチャン川)

一方、荒廃河川では、通常の栄養塩濃度は低く、降雨時のみ洗い出された栄養塩は湖沼を短い滞留時間で通過してしまい、貧弱な生物層になることが容易に想像される。

森林河川は、森林が自然の安定した状態では、高い蒸発散と対応して、栄養塩が高濃度で漏れだし、豊かな湖沼・河川生態系を維持する。自然的であれ人工的であれ、林相（上層植生）はもちろん下草（下層植生）が不安定な森林河川は、降雨時に大量の懸濁物質と懸濁態栄養塩などを流しだし、普段は低濃度のために、下流域の貧困な生態系の出現となる。

栄養塩の年間発生負荷量

森林河川の下流生態系への影響は、どのくらいなのだろうか、地域によってどのくらいの差があるのだろうか。このことを、表-2の1年間の栄養塩発生負荷量から考えてみた。林地の発生負荷量は畑地や市街地等に比べて1/10~1/100と小さい¹¹⁾が、その負荷はダム湖や湖沼を考えると無視できないこと、もう一つ、全国的には発生負荷量に大きな差のないことがわかる。森林はその状況がどうあれ、例えば針葉樹であろうが広葉樹であろうが、また下草（下層植生）が安定していようがなかる

うが、発生負荷量に大きな差がない。このことは森林河川水質が、管理あるいは維持状態に基づく森林の状況や気象条件に大きく左右されることを示唆している。森林河川が湖沼のような大きな閉鎖性水域に流入するとき、安定した自然の森林として保全されていれば、流入河川の栄養塩濃度は高くなってプランクトンが増殖し、清流を好む魚類が豊富に育つことになる。しかし開発によって、樹木を伐採したり土壌面を破壊すると、前述のように洪水時に一時的に、栄養塩濃度が増すが、滞留時間が短いために、平常時には栄養が乏しい貧困な生物層の湖沼になる。自然の森林河川が、湖沼の貴重な生態系をコントロールしていることを意識しておく必要がある。

森林からの栄養塩の流出機構

森林からの栄養塩の流出の機構を、私どもが調査している石狩川水系漁川ダムの流入河川を例に、説明する¹²⁾。表3には、対象とした漁川、モイチャン川の、概況、流況そして晴天時平均水質としてまとめた。流入河川流域の林相や地質には大きな差異はない。流域面積、河況係

表3 調査森林河川の比較

概況		漁川	モイチャン川
流域面積	km ²	40.2	8.1
本流流路長	km	18.4	5.1
流域平均幅	km	2.2	1.6
砂防ダムの数		7	3

流況 (1997.6~11)

		漁川	モイチャン川
最大比流量	m ³ ・km ⁻² ・s ⁻¹	0.58	0.34
平水比流量	m ³ ・km ⁻² ・s ⁻¹	0.10	0.07
低水比流量	m ³ ・km ⁻² ・s ⁻¹	0.07	0.06
最小比流量	m ³ ・km ⁻² ・s ⁻¹	0.04	0.03
河況係数		15.6	10.2

晴天時平均水質 (1991~1997.n=41)

		漁川	モイチャン川
SS	mg/l	2.2	2.0
TOC	mg/l	0.8	1.3
DOC	mg/l	0.7	0.9
TN	mg/l	0.12	0.17
DN	mg/l	0.10	0.14
TP	mg/l	0.008	0.019
DP	mg/l	0.004	0.013

数等には両者の森林の状況の相違が認められる。河川の性状については漁川本流には、砂防ダムが6か所設置されるなど、前述の小川と同様に荒廃河川の様相を呈しており、モイチャン川は豊かな森林内を流れ、年中水温が低く、濁ることの少ないことが観察されている。筆者らは水質成分の流出特性をマクロ的に $L=C \cdot Q^n$ (L : 比水質成分流出負荷量 濃度×流量, Q : 比流量, C , n : 定数) で整理することを提案してきた。流量を降水量や流速の指標とし、これらが水質成分の流出を支配するという考えである。 n 値は、各水質成分固有の流出特性を、 C はこれら土壌での存在状態を示しているものと考えている。そして $n>1$: 洗い出し (濃度増加) 型, $n \approx 1$: 濃度一定型, $n<1$: 希釈 (濃度減少) 型として分類することができる。SS, Cl^- , $NO_3^- - N$ を例に両者の関係を図3に示した。また表4に栄養塩を中心に回帰式から求めた C と n そして両者の対数値から求めた相関係数 R を示した。 R が小さいことは、一般には対象とした水質成分の質的变化が著しいと解釈できる。SS や懸濁態栄養塩の n 値が大きく降雨に伴って洗い流されること、溶存成分についても希釈されることなく流出すること、特に窒素とリンで代表される栄養塩については 1.2

表4 比流量と比水質成分流出負荷量の関係 (1997)

漁川	n	R	C	モイチャン川	n	R	C
TOC	1.3	0.82	0.55	TOC	1.3	0.76	0.90
DOC	1.1	0.91	0.70	DOC	1.3	0.74	0.56
POC	1.5	0.62	0.12	POC	1.1	0.34	0.27
SS	2.8	0.62	0.58	SS	1.8	0.40	2.2
SiO_2	0.8	0.93	41	SiO_2	0.8	0.90	49
4.3Bx	0.9	0.98	0.48	4.3Bx	1.0	0.98	0.40
Cl^-	0.9	0.93	5.0	Cl^-	0.9	0.90	5.6
TN	1.6	0.65	0.078	TN	1.2	0.63	0.151
DN	1.4	0.72	0.064	DN	1.2	0.64	0.102
PN	2.3	0.52	0.087	PN	1.4	0.35	0.027
$NO_3^- - N$	1.9	0.83	0.009	$NO_3^- - N$	1.5	0.76	0.031
$NO_2^- - N$	0.7	0.46	0.039	$NO_2^- - N$	0.3	0.11	0.008
$NH_4^+ - N$	0.9	0.35	0.015	$NH_4^+ - N$	1.0	0.27	0.013
TP	1.5	0.55	0.0058	TP	1.2	0.61	0.0170
DP	0.9	0.49	0.0046	DP	1.2	0.67	0.0084
PP	1.9	0.54	0.0019	PP	1.1	0.36	0.0076
DRP	1.1	0.55	0.0017	DRP	1.5	0.65	0.0031

$L=C \cdot (Q/A)^n$ (L : $kg \cdot km^{-2} \cdot day^{-1}$, Q : $m^3 \cdot day^{-1}$, A : km^2) R : 相関係数

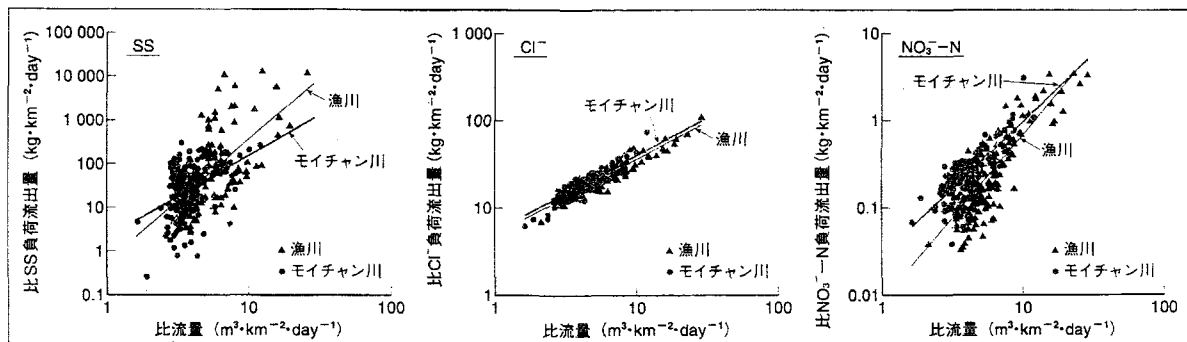


図3 比流量と比水質成分流出負荷量の関係



写真-3 藤舞試験地河川調査地点

～1.4 と濃度増加型ともとれるようで、土壌に豊富に存在していることがわかる。また河況係数が大きく、流量や水質変動が大きい漁川では、SS や PP 等の懸濁態栄養塩の n 値がモイチャン川より大きく、また逆に溶存態栄養塩ではモイチャン川で大きいように、荒廃河川での懸濁物質、自然森林河川では溶存態の流出が優先することが明らかとなった。このように隣接した流域でも、水質成分の流出には差異が認められる。筆者らが、降雨時を含め森林河川の調査結果からまとめた水質成分の流出パターンを表-5 にまとめた。森林河川の多くは I から IV のパターンでまとめられ、いわゆるポイント汚染による希釈型 VI は森林河川では認められない。

森林河川の水質保全

森林の保全状態、いいかえれば管理は、そのまま河川水質の組成やその変化特性に表われる。下草（下層植生）の安定した土壌からは、栄養塩は自然水としては高濃度の状態で流出し、豊かな生態系を作る。一方、人間がその安定した状態を乱すと、一時に懸濁物質とともに

表 5 $L=C \cdot Q^n$ による森林河川水質成分流出特性（原図は参考文献（13））

流出タイプ	n	C	R	流出の特徴	存在状態	成分
I 洗い出し型	>2	変動大	○	流量増加に 対応して著 しく流出	堆積量大	懸濁成分 (SS, PN, PP)
II 安定流出型 (貯留型)	$2 \sim 1$	変動大	○	流量増加に 対応して流出	蓄積量大 (速度)	NO_3^- -N, DP, DOC等
III 安定流出型 (非貯留型)	≤ 1	変動小	◎	流量との相関 がよい(濃度 変化が小さい)	広範囲に分布	一般無機イオ ン (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} 等)
IV 非安定流出型	1前後	変動大	×	流量との相関 が低い(溶存 変動が大きい)	化学反応性 に富む	NH_4^+ -N, S; O_2
(V 濃度減少 希釈型)	$0 < n < 1$	—	—	—	—	—
(VI 希釈型)	≈ 0	—	—	—	—	—

栄養塩が流出し、普段は生態系の貧困な水系となる。その栄養塩負荷発生量は、どの森林域でも大差なく、栄養塩レベルとしては人間が汚染したものよりはるかに低い。微妙な森林河川の水質は、人間活動と密接に関連している。

参考文献

- 1— Kimmins, J. R.: Forest Ecology, Macmillian Publishing Company, pp.531, USA, 1987
- 2— 橘 治国: 森林河川における栄養塩の流出と懸濁物質の役割, 水環境学会誌, Vol.16, No.7, pp.450-456, 1993
- 3—5— 琵琶湖の将来水質に関する調査報告書, 土木学会, 1970, 1975, 1978
- 6— 中西弘・浮田正夫: 内湾へ流出する窒素, リンの汚濁 負荷解析, 建設省霞ヶ浦工事事務所 霞ヶ浦汚濁制御報告書 (1973, 1978), 海洋科学, 10, pp.831-840, 1978
- 7— 和田安彦: 河川上流部の自然負荷の定量化とその特性, 用水と廃水, 20 (4), pp.50-60, 1978
- 8— 渡辺義人他: 富栄養化対策調査報告書, 関東農政局計西部資源課, 1979
- 9— 国松孝男・吉良竜夫: 山林からの栄養塩の流出と対策, 水処理技術, 27, pp.721-730, 1986
- 10— 境利夫: 森林の水収支と水質への影響, 水資源の保全, pp.78-96, 人文書院, 1987
- 11— 建設省編 流域別下水道整備総合計画調査一指針と解説—2刷, 日本下水道協会, 2001
- 12— 山田俊郎・大江史江・清水達雄・橘治国: 森林集水域からの栄養塩負荷流出とその特性に関する比較研究, 環境工学研究論文集, 35巻, pp.85-93, 1998
- 13— 橘 治国: 積雪期の河川における汚濁物質の流出機構について, 第29回土木学会年次学術講演会概要集, 第2部, pp.635-636, 1974

本論文に対し以下のようなモニターの声が寄せられた。

○森林におけるノンポイントソースや平常時と降雨時の栄養塩の水質の変化を紹介されており、興味を引いた。下水道では高度処理を普及させることにより栄養塩を除去しようとしているが、「森林の水涵養機能によって、小さな水量変化で高濃度の安定した水質で流出する。無機態窒素やリンは、富栄養化レベルに達している」、「栄養塩濃度は高くなってプランクトンが増殖し、清流を好む魚類が豊富に育つことになる」との記述に、水質の総合的な管理——総合治水で取り組まれている河川と下水の連携だけでなく、それに森林や農業用排水を加え、降雨時だけでなく平常時の栄養塩の管理をする必要があると感じた。この問題を土木学会としてどのように取り組むのかという提案があればさらに充実すると思う。最後に僕の勉強不足ですが、「森林河川」という言葉の解説があれば助かります。(O. P. O氏)

森林河川の生態系は絶妙なバランスで保たれており、人間が関与するとそのバランスが崩され、生態系に打撃を与える。これからも森林河川の調査、管理の重要性はますます高まるだろう。

環境改変を行った場合、改変を行う以上、様々な面に影響が出るのは自明の理である。問題は、改変を行う側が、その影響をきちんと認識し、必要な対策、対応を行うかどうかという点にあると思う。そういう意味で、今回の記事のような基礎的なデータによる状況整理は、非常に重要であり、直接役立つかどうかは別として、改変の影響認識に資する記事である。(K. E P. M氏)

森林の生態系がいかに関人の活動と微妙なバランスをとりながら成り立っているかを知った。しかし、林業の担い手不足や材の価格下落等の理由から放置され、荒廃している森林が多いと聞いているので、今後が懸念される。利便性ばかりを追求した身勝手な活動は慎み、自然といかに共生するかをみんなで考えていく時代になってきていると痛感した。(匿名希望)

森林があれば栄養塩濃度が増加し、生物にとってはかっこうの生息場所となる。はたしてこの研究だけでそこまで言うていいのでしょうか?例えば、いくら栄養塩が流下してきても魚類や川虫の棲家となるような礫の下の流れが緩やかなところなどがなければこれらの生物は棲む事ができない! 荒廃河川であっても生物にとっては棲み良い環境であることも十分考えられる。もう少し河床形態、河床材料なども考慮に入れた上で議論していただきたい。(K. Y. K氏)

6. さいごに

海域環境、特にその生態系への影響を念頭に、陸水の水質特性について、筆者の経験を中心に書かせていただいた。筆者自身は、海域の研究を自ら実施したことはなく、海洋研究者や農学者の研究にアドバイスさせていただいた程度である。河川や湖沼の研究についても、特に生態系とノンポイント汚染負荷との関連についての研究は始まったばかりであり、またこれらの知見は沿岸域汚染に通じると信じている。そこで発見的次元であるが、筆者のこれは!と思ったことを書かせていただいた。海域を念頭には書かなかったが、きっと感ずいていただけたと思う。例えば、海の生産に対して森があればいいのではなく、それに加え、リンを多く含む土壌が流出しない森林でなければならないことである。

今後は、我々、陸水の研究者も、塩類濃度が高く、また目的成分である栄養塩が低濃度の複雑な化学環境である海洋に目を向けなければならない。陸域環境と海域環境を循環系と考え、資源を有効に活用し、生態環境の保全に務めなければならない。海は廃棄物の処分場でなく、その資源化によって我々の生存を保障してくれる環境として、見直さなければならない。そのための陸水の水質管理は重要である。