

濁度計による懸濁態栄養塩負荷 推定に関する研究

ESTIMATION OF PARTICULATE NUTRIENTS LOADS USING TURBIDITY METER

山本浩一¹・二村貴幸²・坂野章³・日下部隆昭³・末次忠司⁴・横山勝英⁵

Koichi YAMAMOTO, Takayuki FUTAMURA, Akira SAKANO,
Takaaki KUSAKABE, Tadashi SUETSUGI, and Katsuhide YOKOYAMA

1正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究室 研究官(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

2正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究室 研究官(同上)

3正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究室 主任研究官(同上)

4正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究室 室長(同上)

5正会員 工博 東京都立大学大学院土木工学専攻 講師(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

The relationships between turbidity and particulate nutrients concentrations in river water were studied to develop the methods for the estimation of nutrient loads in river water. We observed linear relationships between turbidity and particulate phosphorous concentration. It was clarified that this linearity was caused by the influence of particle size on turbidity output and accumulation of nutrients on the smaller particles ($d < 23\mu\text{m}$). A new method for estimation of nutrient loads using regression function between turbidity and concentrations of particulate nutrients (*L-Q-Tb* method) was developed. This method could raise the precision of estimation of nutrient loads even if they had strong hysteresis.

Key Words: Turbidity, Particulate nutrient, Nutrient load, *L-Q-Tb* method, Hysteresis

1. はじめに

閉鎖性水域の富栄養化防止にとって、河川を通じて流入するリンをはじめとする栄養塩負荷量の正確な算定は重要な課題である。栄養塩負荷は洪水時や、人為的な活動によって突発的に流出する。したがって年間の栄養塩流出負荷量の正確な算定のためには10分程度の短い間隔で栄養塩濃度データを自動的に取得できることが望ましいが、現状では年に数回、洪水時に河川水を採水し、流量(Q)と栄養塩負荷量(L)の関係を $L = CQ^n$ の形で整理した経験式(以下「*L-Q*式」と略する)によって年間の栄養塩負荷量を算定する手法¹⁾が広く用いられている。しかしながら*L-Q*式による栄養塩負荷量の算定は、河川流量に関係しない人為的な流出を計算に入れることが出来ないため、実際の流出負荷量に対して大きな誤差を生じるおそれがある。

現在、閉鎖性水域のCOD、全窒素、全リンに係る第5次総量規制に伴い、全窒素・全リンの現場設置型自動分析装置が各社から市販されている。この装置を用いれば、

1時間に1回程度全窒素・全リンを現場で無人自動分析することは技術的に可能であり、河川からの栄養塩流出負荷量を把握するためには河岸に自動分析装置を設置し、河川水の栄養塩濃度データを常時取得させることが理想的である。

しかし中小河川を含めあらゆる河川に自動分析装置を普及させることはコストが高く現実的とはいえず、また自動分析装置が河川に導入されたと仮定しても、例えば河道内の数地点で10分間程度の短い時間間隔で採水し、自動分析させることは試薬コスト・分析装置の能力の限界から現在は難しい。

栄養塩のうち懸濁態は懸濁物質に含有・付着するものであるから、濁度計により濃度を推定できる可能性がある。濁度計は懸濁粒子の濃度を直接測定しているため、突発的な懸濁態栄養塩の流出にも対応でき、従来よりも高い精度で流出負荷量を把握することが可能になることが期待できる。

現在、濁度計は河川水のSS(懸濁物質)濃度を自動測定する装置として広く普及している。濁度計はメモリー

内蔵型でワイパーなどの光学センサーの清拭装置が付属していれば1ヶ月程度の無人自動観測が可能である。濁度はカオリン換算で20000mg/L程度まで測定可能なものが市販されており、データ取得間隔も任意に設定することが可能である。

そこで本研究では従来の栄養塩流出負荷量の推定精度向上、および現場設置型栄養塩自動分析装置のサブシステムとしての濁度計による懸濁態栄養塩濃度・負荷算定について検討した。

2. 研究方法

(1) 対象流域、分析方法

表-1に示す6観測地点にて合計9洪水時系列について流量観測、採水作業を行った。このうち涸沼川水系は主に農耕地を流下する農地河川である。白川は主たる集水域が阿蘇カルデラであり、上流域は山地が70%を越えるがそのうち60%は崩壊地および牧草地である。

表-1 調査対象流域と解析対象洪水時系列

対象地点	流域面積 (km ²)	対象洪水時系列
涸沼川水系（茨城県）		
涸沼川（28KP）	190	2002.9.12-9.13 2002.9.30-10.2
涸沼前川	80	2002.9.30-10.2
稲田沢川	4.5	2002.9.30-10.2
片庭川A地点	1.1	2002.7.10-7.11 2002.9.30-10.2
片庭川B地点	3.4	2002.7.10-7.11 2002.9.30-10.2
白川水系（熊本県）		
白川（代継橋）	480	2002.6.24-6.25

採水作業は洪水時に行い、採水には自動採水機（ISCO社製）、バケツおよび柄杓などを用いた。採取されたサンプルについては冷蔵して実験室に持ち帰った後、粒径分布、SS（懸濁物質）、TN（全窒素）、DN（溶存態全窒素）、NO₃-N（硝酸態窒素）、NO₂-N（亜硝酸態窒素）、NH₄⁺-N（アンモニア態窒素）、TP（全リン）、DP（溶存態全リン）、DRP（溶存態反応リン）、TOC（全有機炭素）、DOC（溶存態全有機炭素）を分析した。懸濁成分については、PP（懸濁態リン）=TP-DP、PN（懸濁態窒素）=TN-DN、POC（懸濁態有機炭素）=TOC-DOCとして算出した。

(2) 使用計測機器

濁度計はアレック社製の後方散乱方式の濁度計で、測定濃度範囲は0~2000ppm（稲田沢川に設置の濁度計については0~20000ppm）、使用波長は880nmである。

(3) 水質負荷ヒステリシス係数

洪水時には流量の変動とともに水質負荷は変動する。水質負荷は主に流量に対応して増減するが、流量にかかわらず一定の負荷が流出する場合や、流量の累乗に比例する場合などがある。

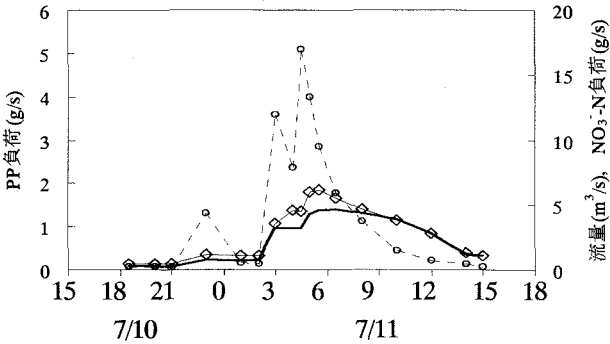


図-1 水質負荷（PP：○，NO₃-N：◇）の変動（流量：—；片庭川B地点；2002年7月10日～11日）

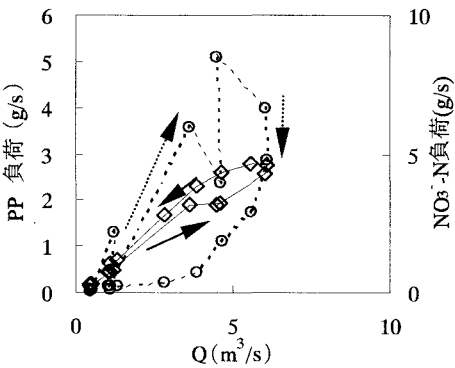


図-2 水質負荷（PP：○，NO₃-N：◇）の流量依存特性（片庭川B地点；2002年7月10日～11日）

図-1に洪水時の水質負荷（PP，NO₃-N）の変動例、図-2に負荷の流量依存特性の例を示す。図-2のPP負荷の変動特性（流量に対してPP負荷はループを描きながら推移）に代表されるように懸濁成分（SS，PP，PN，POC）負荷は流量に対してヒステリシス（履歴現象）を有していることが多く、流量の1価の関数に近似して負荷量を求めると大きな誤差を生じると思われる。一方、NO₃-N（硝酸態窒素）成分負荷はヒステリシスが小さいことが図-2から読みとれる。

本研究では洪水時における水質負荷時系列の“ヒステリシスの大きさ”を定量化するため、（1）および（2）式で定義される「水質負荷ヒステリシス係数」を考案した。

$$\sum_{k=1}^{n-1} (L_k + L_{k+1})(Q_{k+1} - Q_k) \geq 0 \text{ のとき}$$
$$H = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} (L_k + L_{k+1})(Q_{k+1} - Q_k)}{\sum_{k=1}^{M-1} (L_k + L_{k+1})(Q_{k+1} - Q_k)} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^{n-1} (L_k + L_{k+1})(Q_{k+1} - Q_k) < 0 \text{ のとき}$$

$$H = - \frac{\sum_{k=1}^{n-1} (L_k + L_{k+1})(Q_{k+1} - Q_k)}{\sum_{k=M}^{n-1} (L_k + L_{k+1})(Q_{k+1} - Q_k)} \quad (2)$$

ただし H : 水質負荷ヒステリシス係数, L_k : k 番目の試料採取時の水質負荷, Q_k : k 番目の試料採取時の流量, M : 水質時系列のうち試料採取時の流量が最大であるときの試料の順番, n : 試料数+1

H は図-3において面積 $S_1 / (S_1 + S_2)$ を計算したものであり, ヒステリシスが無い状態では $H=0$ となり, ヒステリシスが大きいほど H の絶対値は1に近づく。

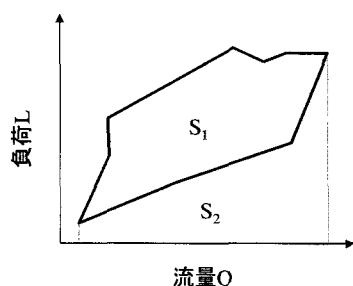


図-3 水質負荷ヒステリシス係数の概念図

H が正の場合には図-3 上で時計回りのループを, 負の値の場合には反時計回りのループを描くことを意味する。なお, H を計算するためには図-3 において曲線が閉じている必要がある。このため洪水時の水質時系列の観測はピーク流量を経て初期河川流量に戻るまで採水を継続することが必要であるが, 実際には困難である。したがって本研究では, 河川水質は洪水発生後, いずれ初期状態に近くなると仮定して $L_n = L_1$, $Q_n = Q_1$ としている。

3. 洪水時における栄養塩負荷の変動特性

(1) 洪水時における河川水の水質組成

表-2 に各河川における洪水時の水質の流量加重平均濃度を示す。SS濃度は稲田沢川, 片庭川地点Bで濃度が

1000mg/L以上と高く, これは稲田沢川では流域の24.1%が, また片庭川地点Bでは26.5%が植生の存在しない裸地となっていることが原因である²⁾。

流域によって差はあるものの, 表-2 のPOC, PP, PNデータから, 洪水時にはTOCの88.4%, TPの96.7%, TNの33.6%が懸濁態であることがわかる。したがって全有機炭素, リンについては懸濁態負荷を正確に推定することによって洪水によるそれぞれの流出負荷量を把握することが可能であるといえる。

(2) L - Q 式, ヒステリシス係数による水質負荷流出特性解析

負荷量を流量の関数として統計モデル (L - Q 式) を作成し, 流量から負荷量を与える手法は歴史があり, 計算が簡単なことから多数の研究例がある³⁾。本研究においても流量を Q , 水質負荷量を L とし, C, n を定数として

$$L = CQ^n \quad (3)$$

に回帰させることにより指数 n (定数) を求めた。この n およびヒステリシス係数 H の値によって水質負荷流出特性を以下のように分類した。

・ n による分類 (流量増加に伴う水質濃度変動特性)

$n > 1.1$:	I	(濃度増加型)
$0.9 \leq n \leq 1.1$:	C	(濃度一定型)
$n < 0.9$:	D	(濃度減少型)

・ H による分類

(水質負荷ループの回転方向; ヒステリシスの程度)

$H > 0.25$:	++	(時計回り; 大)
$0.1 < H \leq 0.25$:	+	(時計回り; 中)
$-0.1 \leq H \leq 0.1$:	無印	(ループ無し; 小)
$-0.25 \leq H < -0.1$:	-	(反時計回り; 中)
$H < -0.25$:	--	(反時計回り; 大)

表-3 に表-2 の9洪水水質時系列から求めた n , H , およびこれらから求めた分類を示す。濁度, SS, PN, PP, POC等の懸濁態成分はいずれも n , H が大きく, 濃度増加型でかつ増水初期に高負荷となるヒステリシス特性を有しI++に分類される (例えば図-2 のPP)。また溶

表-2 洪水時における河川水の水質 (流量加重平均濃度)

河川 単位	洪水	総降水量 mm	時間最大 降水量 mm/h	サンプリング 数	Turb. ppm	SS mg/L	NH ₄ ⁺ -N mg/L	NO ₂ ⁻ -N mg/L	NO ₃ ⁻ -N mg/L	DN mg/L	TN mg/L	PN mg/L	DRP mg/L	DP mg/L	TP mg/L	PP mg/L	TOC mg/L	DOC mg/L	POC mg/L
湊沼川	2002年9月	21	14	12	390	419	0.011	0.001	1.85	2.07	3.31	1.24	0.016	0.019	0.511	0.491	13.0	1.4	11.6
	2002年10月	80	14	19	273	258	0.002	0.002	1.76	1.93	2.62	0.68	0.018	0.019	0.266	0.247	10.1	2.2	7.9
片庭川地点A	2002年7月	121	18	8	359	392	0.001	0.001	0.90	1.17	2.29	1.11	0.001	0.001	0.180	0.179	34.9	1.6	33.3
	2002年10月	80	14	16	98	90	0.001	0.001	1.08	1.17	1.63	0.47	0.001	0.001	0.053	0.052	8.4	1.8	6.6
片庭川地点B	2002年7月	121	18	17	813	1498	0.001	0.001	0.81	0.92	1.97	1.05	0.001	0.001	0.480	0.479	20.1	0.6	19.5
	2002年10月	80	14	15	640	1188	0.001	0.001	0.96	1.00	1.62	0.62	0.001	0.003	0.290	0.287	10.8	1.0	9.9
稲田沢川	2002年10月	80	14	12	1614	2444	0.001	0.003	0.43	0.54	1.72	1.18	0.001	0.002	0.313	0.311	28.5	2.0	26.5
湊沼前川	2002年10月	80	14	15	299	377	0.002	0.005	4.28	4.69	6.12	1.43	0.039	0.043	0.591	0.549	22.8	6.7	16.1
白川	2002年6月	118	22	27	156	202	0.001	0.002	1.27	1.43	2.17	0.74	0.037	0.045	0.489	0.444	7.9	0.7	7.2

存物質においてもDP, DRPは濃度減少型であるものの増水初期に高負荷となるヒステリシス特性を有し, D⁺, D⁺⁺に分類された。Hが0.1より大であるこれらの成分は降雨時において表面流出などで流域から短期的に供給されやすい成分であると考えられる。

一方NO₃-N, DNは濃度一定型でかつHの絶対値が小さく, すなわちヒステリシスは懸濁成分に比較して小さい。これらは基底流出時の河川水に豊富に含まれており, 降雨時において表面流出により供給されにくい成分であるといえる。

以上より, 懸濁成分負荷は流量に対して大きなヒステリシスを持っているため, 流量の時系列からL-Q式を用いて, 全リン負荷に対して支配的である懸濁態リン負荷を算出することには限界があるといえる。一方, 全窒素負荷に対して支配的である溶存成分のNO₃-N, DNの場合はヒステリシスが小さく, 流量から負荷を比較的精度良く求めることが可能であるといえる。

表-3 L=CQⁿ式におけるn, 水質負荷ヒステリシス係数H, 水質負荷変動特性の分類結果(澗沼川水系; 8洪水時系列, 白川; 1洪水時系列, 試料数=139)

	n				H				分類
	Max.	Av.	Min.	S.D.	Max.	Av.	Min.	S.D.	
Turb.	2.13	1.67	1.18	0.25	0.86	0.48	0.00	0.29	I ⁺⁺
SS	2.29	1.83	1.05	0.34	0.86	0.53	0.19	0.27	I ⁺⁺
NH ₄ ⁺ -N	1.33	1.05	1.00	0.10	0.61	-0.03	-0.51	0.30	C
NO ₂ ⁻ -N	1.61	1.16	1.00	0.22	0.27	-0.02	-0.73	0.30	I
NO ₃ ⁻ -N	1.37	1.04	0.88	0.21	0.13	-0.14	-0.44	0.21	C ⁻
DN	1.33	1.04	0.87	0.18	0.15	-0.12	-0.41	0.20	C ⁻
TN	1.40	1.20	1.06	0.11	0.48	0.20	0.10	0.13	I ⁺
PN	2.07	1.57	1.04	0.28	0.73	0.46	-0.01	0.27	I ⁺⁺
DRP	1.19	0.89	0.21	0.28	0.74	0.19	-0.07	0.24	D ⁺
DP	1.38	0.91	0.35	0.30	0.97	0.34	-0.21	0.37	D ⁺⁺
TP	1.91	1.51	0.91	0.26	0.82	0.52	0.07	0.26	I ⁺⁺
PP	1.94	1.59	0.92	0.30	0.82	0.52	-0.04	0.29	I ⁺⁺
TOC	2.04	1.62	1.04	0.29	0.82	0.30	-0.59	0.50	I ⁺⁺
DOC	1.67	1.14	0.95	0.21	0.73	-0.05	-0.83	0.58	I
POC	2.24	1.75	1.06	0.32	0.84	0.34	-0.61	0.53	I ⁺⁺

Max.: 最大値, Av.: 平均値, Min.: 最小値, S.D.: 標準偏差

4. 濁度計による懸濁態栄養塩濃度の推定可能性

(1) 濁度と懸濁態栄養塩濃度の関係

濁度とSS濃度の相関係数は一般的に高く, 濁度をSS濃度に換算して年間の土砂フラックスを求めるために用いることが多い。これと同様に懸濁態栄養塩濃度との関係を整理することにより濁度計を使用して濁度から懸濁態栄養塩濃度を推定する方法を検討する。図-4に白川6月24日洪水時における洪水時系列のSS濃度と懸濁成分(POC, PN, PP)濃度の関係を整理したもの, 図-5に同一時系列について濁度と懸濁成分濃度の関係を示す。

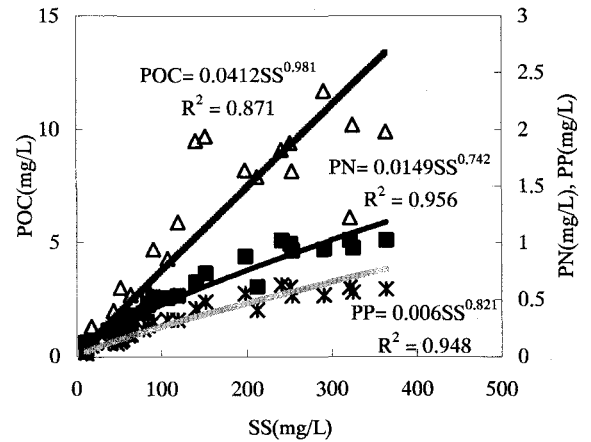


図-4 SS濃度と懸濁成分濃度(■: PN, △: POC, *: PP)の関係(白川, 2002年6月24日-25日)

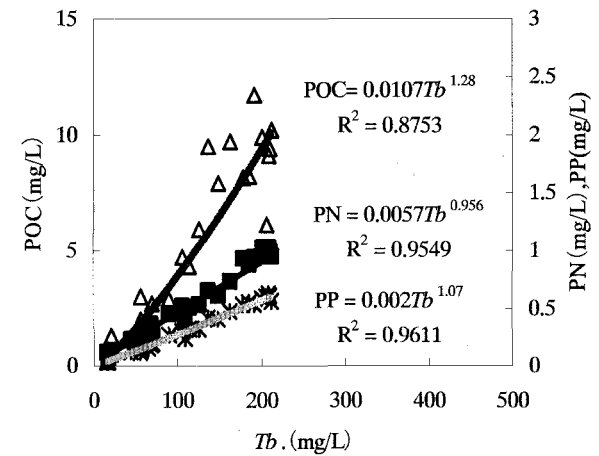


図-5 濁度(Tb)と懸濁成分濃度(■: PN, △: POC, *: PP)の関係(白川, 2002年6月24日-25日)

また表-4に, 対象とした9洪水についての各指数の平均値を, 表-5に相関係数をまとめた。

表-4 水質項目の近似式C = Tb^m, C = SSⁿにおける指数m, nの平均値(全9洪水, 試料数=139)

	Tb	SS	PN	PP	POC
m	1.00	1.21	0.812	0.994	1.11
n	0.798	1.00	0.689	0.867	0.911

表-4からPN, PP濃度はそれぞれSS濃度の0.689乗(R²=0.925), 0.867乗(R²=0.966)に比例し, SSが高濃度になるにつれPN/SS, PP/SSは低下することがわかる。一方, PN, PP濃度はそれぞれ濁度の0.812乗(R²=0.890), 0.994乗(R²=0.946)に比例し, それぞれ濁度と線形の関係に近くなった。特にPP濃度については濁度の一次関数として表現することが可能であるといえる。表-5に示すように, PN, POCについては濁度との相関係数はPPに比べて若干低い。

表－5 水質項目の近似式 $C = \text{Turb}^n$, $C = \text{SS}^n$ の相関係数Rの平均値, (全9洪水, 試料数=139)

	Tb	SS	PN	PP	POC
R (Tb)	1.00	0.963	0.890	0.946	0.906
R (SS)	0.963	1.00	0.925	0.966	0.914

(2) 懸濁態栄養塩の粒径分布特性

懸濁態リンは生物の構成成分として存在するだけでなく、鉄の水酸化物や鉱物粒子表面に吸着されるなど、様々な形態で存在している⁴⁾。鉱物粒子表面に吸着された形態の場合、その吸着量は懸濁粒子の比表面積に依存すると考えられ、リンは鉄の水酸化物にも吸着されやすいことから、シルト・粘土成分に比較して細砂(75 μm 以上)の粒径におけるPP/SS比は小さくなると予想される。吉田らが降雨時の河川水中の懸濁物質を粒径分画し、PRP(懸濁態反応リン)濃度を測定した結果によれば、粒径が8 μm ~44 μm のPRP/SS比はそれより粒径が大であるもの(44 μm 以上)に比較して高かった⁵⁾。

本研究では粒径別のPP濃度の分析を行っていないものの、多変量解析によりPP濃度を支配する粒径集団をある程度把握することが可能である。そこでサンプルに粗砂程度の粒径も含まれる涸沼川の洪水時系列を検討対象として、粒径別のSS濃度、POC濃度を説明変数として、またPP濃度、PN濃度を目的変数とし重回帰分析を行った。

涸沼川における9月、10月洪水時の懸濁態栄養塩濃度(リン、窒素)を各粒径分画のSS濃度(0 μm < d <23 μm , 23 μm < d <54 μm , 54 μm < d <103 μm , d >103 μm)およびPOC濃度の5変数を説明変数として重回帰分析を行い、表－6の結果を得た。

表－6 懸濁態栄養塩濃度の重回帰分析結果

(説明変数：粒径別SS濃度およびPOC濃度, 目的変数：PPおよびPN濃度, 試料：涸沼川2002年9月：試料数12, 涸沼川2002年10月：試料数17)

項目	成分	粒径 (μm)	PN	PP
単相関係数 **：1%有意 *：5%有意	SS	0< d <23	0.935*	0.952**
		23< d <54	0.842	0.851
		54< d <103	0.464	0.461
		103< d	0.195	0.187
	POC		0.811*	0.735
偏相関係数 **：1%有意 *：5%有意	SS	0< d <23	0.418*	0.580**
		23< d <54	0.240	0.151
		54< d <103	-0.297	-0.157
		103< d	0.0758	-0.0288
	POC		0.498*	0.105
標準偏回帰 係数 **：1%有意 *：5%有意	SS	0< d <23	0.524*	0.795**
		23< d <54	0.370	0.225
		54< d <103	-0.284	-0.157
		103< d	0.0326	-0.0121
	POC		0.286*	0.0516
修正済決定係数			0.891	0.887

0 μm < d <23 μm の画分のSS濃度が1%有意にてPP濃度と相関があり、偏相関係数は0.580であった。よって、細粒土砂成分のSS濃度が懸濁態リンの挙動をほぼ支配することが確認できた。

一方、懸濁態窒素(PN)についてはほぼ全量が有機物の構成成分と考えられることから、表－6の通り、細粒成分(0 μm < d <23 μm)と同様にPOC濃度の影響も大きいことがわかる。

(3) 濁度の粒径依存特性

濁度には粒径依存性があり、濁度Tbと懸濁物質濃度SSの間には

$$Tb = aSS^b \quad (4)$$

の関係がある。

横山⁶⁾によれば、混合粒径土砂の場合、濁度はSSのうち細粒分(約20 μm 以下)の濃度に支配され、シルト、砂分の構成比には影響を受けず、細粒成分ほど同濃度のSSに対する濁度の値が高く、かつ直線性が高く(式(4)のbが1に近く)なることが示されている。前節において懸濁態栄養塩(特にリン)はSSのうち細粒分(粒径23 μm 以下)に含有される率が高いことを述べたが、懸濁態栄養塩の細粒成分への集中と濁度計の粒径依存特性によって、濁度と懸濁態栄養塩濃度は線形の関係に近くなると考えられる。以上より、濁度と懸濁態栄養塩濃度の関係式を求めることによって、濁度から懸濁態栄養塩濃度を推定することが可能であると言える。以上の結果を利用し、栄養塩負荷を流量と濁度の時系列から求める方法を提案する。

5. 濁度計を用いた栄養塩負荷の推定法

(1) L-Q-Tb 法 (L-Q式, 濁度による負荷推定法)

洪水時の栄養塩負荷を溶存態栄養塩と懸濁態栄養塩に分けてそれぞれ以下のように求める。

a) 溶存態栄養塩負荷の算定

溶存態栄養塩負荷の流量への回帰式(5), (6)を作成し, C_{DN} , n , C_{DP} , p を求める。

$$\cdot \text{溶存態窒素負荷} : L_{DN} = C_{DN} Q^n \quad (5)$$

$$\cdot \text{溶存態リン負荷} : L_{DP} = C_{DP} Q^p \quad (6)$$

b) 懸濁態栄養塩濃度の算定

懸濁態栄養塩濃度の、濁度への回帰式(7), (8)を作成し, α_{PN} , β , α_{PP} , γ を求める。

$$\cdot \text{懸濁態窒素濃度} : C_{PN} = \alpha_{PN} T_b^\beta \quad (7)$$

$$\cdot \text{懸濁態リン濃度} : C_{PP} = \alpha_{PP} T_b^\gamma \quad (8)$$

c) 栄養塩負荷の算定

ある時刻tでの栄養塩負荷は溶存態栄養塩負荷と懸濁態栄養塩負荷の和として(9), (10)式で求める。

・全窒素負荷：

$$\begin{aligned} L_{TN}(t) &= L_{PN}(t) + L_{DN}(t) \\ &= C_{PN}(t)Q(t) + C_{DN}Q^n(t) \\ &= \alpha_{PN}T_b^\beta(t)Q(t) + C_{DN}Q^n(t) \end{aligned} \quad (9)$$

・全リン負荷：

$$\begin{aligned} L_{TP}(t) &= L_{PP}(t) + L_{DP}(t) \\ &= C_{PP}(t)Q(t) + C_{DP}Q^p(t) \\ &= \alpha_{PP}T_b^\gamma(t)Q(t) + C_{DP}Q^p(t) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで

L_{TN} ：全窒素負荷 (g/s)， L_{DN} ：溶存態窒素負荷 (g/s)， C_{DN} ， n ：定数， L_{TP} ：全リン負荷 (g/s)， L_{DP} ：溶存態リン負荷 (g/s)， C_{DP} ， p ：定数， Q ：流量 (m³/s)， L_{PN} ：懸濁態窒素負荷 (g/s)， T_b ：濁度 (mg/L)， C_{PN} ：懸濁態窒素濃度 (mg/L)， α_{PN} ， β ：定数， L_{PP} ：懸濁態リン負荷 (g/s)， C_{PP} ：懸濁態リン濃度 (mg/L)， α_{PP} ， γ ：定数

(2) L - Q - T_b 法の栄養塩流出負荷量推定精度

区間代表法 (実測値)， L - Q 式， L - Q - T_b 法により求めた負荷量計算値を対象9洪水について表-7にまとめた。

表-7 L - Q 式， L - Q - T_b 法の，洪水時における栄養塩流出負荷量の算定結果の比較 (2002年)

		実測値		L-Q式		L-Q-Tb法	
地点	洪水	負荷量 (t)	負荷量 (t)	誤差 (%)	負荷量 (t)	誤差 (%)	
TN負荷量							
濁沼前川	10月	9.65	9.65	0.0	9.49	1.7	
片庭川A地点	7月	0.126	0.105	16.9	0.134	5.9	
片庭川A地点	10月	0.166	0.179	8.0	0.158	4.7	
白川	6月	17.2	17.4	1.5	17.2	0.1	
片庭川B地点	7月	0.311	0.297	4.6	0.284	9.4	
片庭川B地点	10月	0.269	0.286	6.2	0.259	3.9	
濁沼川	9月	2.39	2.12	11.2	2.28	4.7	
濁沼川	10月	15.1	14.9	1.1	15.1	0.0	
稲田沢川	10月	0.309	0.310	0.2	0.261	18.6	
平均		5.05	5.03	5.5	5.02	5.5	
TP負荷量							
濁沼前川	10月	0.845	0.792	6.3	0.760	11.2	
片庭川A地点	7月	0.00974	0.00340	65.2	0.00902	8.0	
片庭川A地点	10月	0.00537	0.00553	2.9	0.00507	5.9	
白川	6月	3.50	3.40	2.8	3.10	12.9	
片庭川B地点	7月	0.0698	0.0358	48.7	0.0640	9.1	
片庭川B地点	10月	0.0462	0.0336	27.2	0.0577	19.9	
濁沼川	9月	0.375	0.154	58.9	0.330	13.9	
濁沼川	10月	1.58	1.70	7.7	1.71	7.7	
稲田沢川	10月	0.0553	0.0508	8.1	0.0316	74.8	
平均		0.720	0.686	27.5	0.674	18.2	

計算の結果，TN負荷量の推定では L - Q 式による実測値に対する推定誤差は L - Q - T_b 法による推定誤差とほぼ同じで5.5%であった。TNの負荷量の推定に際しては L - Q 式で十分であるといえる。一方TP負荷量の推定では， L - Q 式による推定誤差は平均27.5%であるのに対して， L - Q - T_b 法では推定誤差が18.2%と L - Q 式に比較して小さかった。TP負荷量など，細粒土砂の負荷ヒステリシスに大きく依存する成分については L - Q - T_b 法が有効である。

6. 結論

本研究では河川における栄養塩負荷量の推定精度向上を目的として，濁度計を使用した懸濁態栄養塩濃度の推定法について検討し，濁度計を用いた洪水時の栄養塩負荷流出量推定法を提案した。本研究で得られた結論は次の通りである。

(1) 洪水時における水質成分負荷のヒステリシスを定量化する“水質負荷ヒステリシス係数”を考案し，従来から用いられている経験式 $L=CQ^n$ 式の指数 n を併用して各水質項目の負荷変動パターンを15種類に分類し，懸濁成分のヒステリシスが溶存成分に比較して大であることを示した。

(2) 懸濁態リン濃度は濁度の1次関数に近く，これは濁度の粒径依存特性と，懸濁態リンの細粒土砂成分 (23 μ m以下) への集中が主な理由であると考えられた。懸濁態窒素濃度は細粒土砂成分以外にもPOC (懸濁態有機炭素) 濃度の影響を受ける。

(3) 濁度計を用いた栄養塩負荷量推定法 (L - Q - T_b 法) を提案した。これは，溶存態栄養塩負荷を L - Q 式で推定し，濁度によって推定した懸濁態栄養塩濃度と流量の積から懸濁態栄養塩負荷を求め，溶存態負荷の推定値と懸濁態負荷の推定値を合算するものである。この結果，洪水時の河川水について，TNの推定誤差は L - Q 式とほぼ同じ5.5%であったが，TPの推定誤差は L - Q 式で27.5%であったのに対して L - Q - T_b 法では18.2%と精度の向上が認められ，特にTP負荷流出量の推定について有効であった。ただし河川によっては，例外的に誤差が70%以上になる場合もあり，河川流域の負荷流出特性に応じて本法の採用の可否を判断すべきであろう。

参考文献

- 1) 海老瀬潜一 (1981) 5.「流出負荷量の解析モデル」，陸水域の富栄養化に関する総合研究 (V) -霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価，国立公害研究所研究報告，21。
- 2) 二村貴幸，諏訪義雄，谷口丞，末次忠司，平舘治 (2002) 細粒土砂動態観測により明らかになった濁沼川流域の細粒土砂供給特性，河川技術論文集，第8巻，pp213-218。
- 3) 橘治国，清水達雄，中川佳久 (1996) 石狩川の融雪期水質，水文・水資源学会誌，Vol. 9，No. 5，pp444-456。
- 4) 川辺英行，会田丘，橘治国，吉田邦伸 (1997) 懸濁態リン化合物の組成と藻類増殖能力，土木学会第52回年次学術講演会講演要旨集第7部門，pp172-173。
- 5) 吉田邦伸，橘治国，川辺英行，岩竹貴則 (1996) 懸濁態栄養塩の粒径別特性と藻類増殖能力，土木学会大51回年次学術講演会講演要旨集第7部門，pp334-335。
- 6) 横山勝英 (2002)：濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察，土木学会論文集II，Vol. 698，No. 58，pp93-98。(2003. 4. 11受付)