



Title	森林河川からの水質成分の流出特性-漁川ダム湖を対象として-
Author(s)	山田, 俊郎; 杉山, 直樹; 清水, 達雄 他
Description	第7回衛生工学シンポジウム (平成11年11月11日 (木) -12日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 5 水環境・リスク評価 . P5-8
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 7, 187-192
Issue Date	1999-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7290
Type	departmental bulletin paper
File Information	7-5-8_p187-192.pdf



5-8

森林河川からの水質成分の流出特性

-漁川ダム湖を対象として

山田俊郎、杉山直樹、清水達雄、橘治国（北海道大学大学院）

1. はじめに

森林域から流れる清澄な河川には栄養塩などの水質成分が豊富に含まれる。これらの成分は安定して下流へ供給され、河川や湖沼、海域の生態系を育ててきた。下水道や工場排水を中心とした特定負荷源対策が進んだ現在、非特定負荷源の一つである森林からの流出負荷を把握し管理することが、これからの水環境保全対策の中で必要である¹⁾。非特定負荷源の中で、森林は農地や都市域に比べると単位面積当たりの負荷発生量は小さいが、わが国の森林の占める割合を考えれば、森林からの発生負荷対策は決して軽視できるものではない。森林河川の流出や水質の形成には、降水や降雪などの水文条件、気温、水温そして蒸発散量などの気象条件、地形、地質、植生等の立地環境条件や、伐採・施肥等の人為的な条件など様々な要因が考えられ²⁾、森林域からの水質成分負荷流出の実態を把握するためにはケースバイケースの基礎的な調査・研究が必要である。特に降雨出水時には多量の懸濁物と共に高濃度の栄養塩が流出する³⁾ため、降雨増水時における水質成分流出に関する知見を得る必要がある。そこで本研究では、1997年の夏期の降雨時に行った森林河川の調査結果をもとに、出水時において森林から流出する水質成分の特性を明らかにすることを目的とした。

2. 研究方法

2. 1 調査対象水域の概要

調査対象としたのは、北海道恵庭市西部に位置する石狩川水系千歳川支流の漁川とモイチャン川である（図1）。これらの河川は漁川ダム湖への主な流入河川となっている。漁川の集水面積は40.2km²、流路長は18.6km、モイチャン川の集水面積は8.1km²、流路長は7.5kmであり、集水域は隣接している。集水域の森林は全て針広葉混交の原生林と人工林で占められる。林床にはクマイザサなどが繁茂しているが、漁川は河道沿いに礫が多く、植生が疎になっている部分が目立つ。

2. 2 調査期間と調査方法

調査は1997年7月下旬から9月下旬にかけて実施した。採水は自動採水器（ISCO 3700型）を用いて同時刻に行った。採取した試料は実験室に持ち帰り、分析まで-30℃で保存した。窒素とリン、有機炭素、SS、一般無機イオンなど約30項目について分析を行った。分析方法は主に「水の分析第4版」⁴⁾によった。調査地域の降雨量と河川流量は、北海道開発局漁川ダム管理所と千歳川放水路建設事務所の観測データによった。

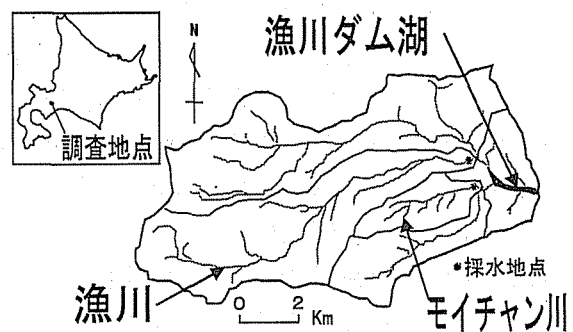


図1 調査対象水域

3. 結果と考察

3. 1 調査期間の水文状況

調査対象とした降雨について、降雨の時期、降雨継続時間、総降雨量、最大降雨強度、及び先行晴天日数を表1に、また降雨調査期間中の水文状況を図2に示す。

降雨1は総降雨量96mmと、本年度の降雨の中では2番目の規模である(97年度漁川ダム管理事務所観測値より)。最大降雨強度も24mm/hと強い。降雨2は、総降雨量が91mmで降雨1と同規模であるが、本降雨の24時間前に24mmの降雨があり、流域の土壌中の水分量は比較的多い状態である。漁川のピーク時の最大比流量は $1.12\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ で、モイチャン川の比流量($0.64\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)の2倍近くあり、漁川流域がモイチャン川流域よりも保水能力が低いといえる。降雨3は、降雨2の影響が河川流量にまだ残っている時期のものであり、総降雨量は62mmと降雨1(96mm)の65%程度であるが、ピーク時の比流量は降雨1と同程度まで増加している。降雨4は総降雨量18mmと小規模の雨である。降雨5は、総降雨量が50mmで中規模の雨であるが、降雨1や降雨2と比べ降雨強度が小さく降雨期間が長い。総降雨量では降雨4の3倍近いが、ピーク時の比流量は同程度で、本降雨の前の21日間は無降雨であったため流出量が少ない。

表1 調査対象降雨イベントの概況

	降雨1	降雨2	降雨3	降雨4	降雨5
降雨期間	7月29日	8月9~10日	8月11~12日	8月22日	9月16~17日
降雨継続時間 h	10	15	28	5	20
総降雨量 mm	96	91	62	18	50
最大降雨強度 mm/h	24	15	8	7	5
先行晴天日数 日	22	0	1	8	21

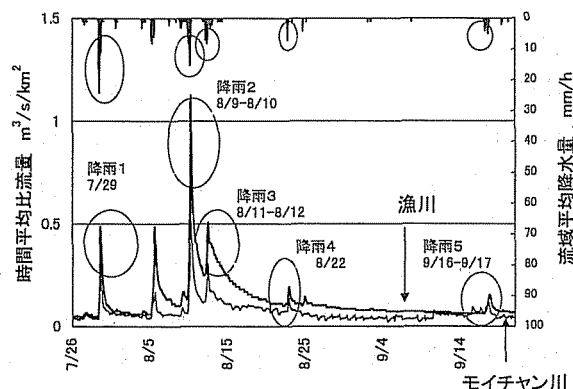


図2 降雨時調査期間中(1997年)の水文状況

3. 2 降雨時における水質成分の流出

降雨に伴う増水によって水質成分は森林域から多量に流出するが、その流出パターンは様々である。この水質成分の流出特性を把握するため、比流量と比水質成分流出負荷量の経験式(LQ式)から、水質成分の流出特性について検討した。

経験式は、 Q は比流量($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)、 L は水質成分比流出負荷量($\text{g}/\text{s}/\text{km}^2$)、 C と n を係数として $L=C \times Q^n$ で表される。ここで係数 n は水質成分発生負荷量の流量との対応を示し、どのように流出してくるかという流出の特性を示すパラメーターといえる。一般的には、 n 値が1以上の時は流量が大きくなると共に濃度も大きくなる洗い出し型、 n 値が1以下の時は流量が大きくなると濃度が小さくなる希釈型、 n 値が1付近の時は流量の増減にかかわらず濃度が変化しない濃度一定型に分類される⁹⁾。係数 C は、負荷量の絶対量を決めるパラメーターであり、流域ごと、また成分ごとの特徴を示すパラメーターと考えられる。 C と n の値は、比流量と水質成分比流出負荷量を両対数グラフにプロットして回帰直線を求めるという統計的処理によって求められる。そのとき C 値は、比流量 Q と水質成分比流出負荷量 L をそれぞれ対数を取り、 $x(x=\log Q)$ 、 $y(y=\log L)$ としたときの回帰直線の y 切片にあたる⁹⁾。そこで漁川、モイチャン川の調査期間中における最小比流量 Q_0 (漁川： $0.067\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ・モイチャン川： $0.054\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)で比流量 Q を割ったものを単位比流量 Q' ($Q'=Q/Q_0$)とし、この単位比流量 Q' と比流出負荷量 L の関係を求めると、新たに係数 k を用いて $L=k \times Q'^n$ と表すことができる。この k 値は基底流量に対応する負荷量で、流域の特性を示している係数であるといえる。また、設定した最小比流量は2河川間で差が小さく、 k 値の大きさを河川間で比較しても良いと思われる。比流量と比流出負荷量の関係の例として、SS、Cl、硝酸態窒素について図3に示した。漁川とモイチャン川の各水質成分について求めた係数 n 、係数 C 、係数 k 、及び $\log Q$ と $\log L$ の相関係数 R を降雨毎に表2に示す。また各水質成分の流出の特徴を表3にまとめ、以下にその特徴を述べる。

1) 洗い出し型(流量増大時に水質成分流出負荷が著しく増加する): 懸濁態成分

SSの回帰式の n 値は両河川で3~6であり、降雨毎にその値は変化するが、一般河川⁹⁾と比

表2 降雨毎の水質成分のn,C,k値及び相関係数(R)

$L=C \times Q^n$, $L=k \times (Q/Q_0)^n$, $R: \text{Log}L - \text{Log}Q$
 Q:比流量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) L :水質成分比流出負荷量 ($\text{g}/\text{s}/\text{km}^2$) C, n, k:係数
 Q_0 : 調査期間中の最小比流量 (漁川: $0.067\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 、モイチャン川: $0.054\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) R:相関係数

成分	漁川					モイチャン川						
	降雨1	降雨2	降雨3	降雨4	降雨5	降雨1	降雨2	降雨3	降雨4	降雨5		
SS	n	3.3	4.5	5.7	4.9	4.9	n	4.0	2.8	5.1	4.8	4.4
	k	1.0	0.03	0.002	0.03	0.27	k	0.09	0.26	0.001	0.11	0.39
	c	6699	7209	10010	20726	165561	c	11134	832	35444	109238	134320
	R	0.99	0.98	0.96	0.85	0.97	R	0.98	0.89	0.94	0.78	0.97
4.3Bx	n	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	n	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0
	k	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	k	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	c	0.30	0.31	0.28	0.35	0.35	c	0.21	0.22	0.21	0.25	0.39
	R	0.99	0.99	0.95	0.97	0.99	R	0.99	0.99	0.96	0.97	0.99
PN	n	2.9	2.8	3.1	2.2	1.5	n	2.6	2.3	1.8	1.9	2.0
	k	0.001	0.0003	0.0002	0.002	0.004	k	0.003	0.002	0.001	0.002	0.005
	c	2.14	0.72	0.99	0.54	0.25	c	5.52	1.10	0.13	0.43	1.45
	R	0.88	0.93	0.69	0.53	0.51	R	0.97	0.88	0.56	0.72	0.78
NO ₃ ⁻ -N	n	1.3	1.5	1.0	1.5	4.1	n	1.4	1.6	0.9	1.1	1.1
	k	0.007	0.004	0.009	0.003	0.001	k	0.006	0.004	0.009	0.005	0.005
	c	0.28	0.20	0.13	0.22	42.33	c	0.30	0.40	0.14	0.12	0.11
	R	0.98	0.99	0.80	0.83	0.79	R	0.99	0.97	0.74	0.97	0.59
NH ₄ ⁺ -N	n	0.8	1.2	1.7	0.9	1.6	n	1.3	1.1	0.8	2.0	0.6
	k	0.001	0.0004	0.0002	0.001	0.0004	k	0.0008	0.0005	0.001	0.0006	0.0003
	c	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	c	0.03	0.01	0.00	0.17	0.00
	R	0.54	0.92	0.35	0.23	0.48	R	0.83	0.81	0.33	0.65	0.25
DON	n	0.9	1.3	1.0	2.3	1.4	n	1.6	1.5	1.9	2.2	1.2
	k	0.007	0.003	0.002	0.001	0.004	k	0.006	0.003	0.002	0.002	0.005
	c	0.09	0.08	0.03	0.63	0.16	c	0.68	0.23	0.42	1.06	0.19
	R	0.95	0.81	0.33	0.69	0.54	R	0.95	0.93	0.83	0.44	0.50
DP	n	0.7	1.3	1.5	1.1	0.9	n	0.8	0.7	0.5	1.2	1.0
	k	0.0004	0.0002	0.0001	0.0003	0.0002	k	0.0008	0.0007	0.001	0.0007	0.0007
	c	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	c	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01
	R	0.93	0.92	0.64	0.67	0.65	R	0.95	0.93	0.70	0.82	0.88
PP	n	3.1	2.7	4.8	4.1	4.0	n	3.6	2.8	3.8	4.4	3.8
	k	0.0003	0.00004	0.000003	0.00003	0.0002	k	0.0002	0.00010	0.00003	0.00007	0.0006
	c	1.29	0.06	1.19	2.15	12.51	c	7.03	0.43	1.75	27.73	33.66
	R	0.97	0.90	0.84	0.86	0.96	R	0.99	0.91	0.94	0.85	0.96
SiO ₂	n	0.8	0.7	1.2	1.1	0.8	n	0.5	0.3	0.7	1.1	0.5
	k	1.76	1.99	0.71	1.49	2.05	k	1.34	1.91	1.92	1.40	1.19
	c	13.75	12.37	18.13	26.96	15.73	c	6.07	1.91	15.06	31.34	4.97
	R	0.88	0.99	0.73	0.71	0.96	R	0.36	0.31	0.77	0.37	0.40
Cl ⁻	n	0.9	0.8	0.8	1.0	0.9	n	0.8	0.8	0.6	1.0	1.1
	k	0.24	0.25	0.31	0.24	0.24	k	0.25	0.21	0.31	0.23	0.24
	c	3.16	2.38	2.58	3.81	3.12	c	2.60	2.19	1.72	4.26	5.80
	R	0.99	0.99	0.84	0.97	0.99	R	0.97	0.99	0.90	0.96	0.99
SO ₄ ²⁻	n	0.9	0.8	0.8	1.0	1.1	n	0.8	0.7	0.5	0.8	0.8
	k	0.91	1.01	1.01	0.98	0.93	k	0.25	0.24	0.37	0.29	0.26
	c	11.21	8.96	8.60	14.44	16.05	c	2.30	2.10	1.73	2.61	2.83
	R	0.99	0.99	0.90	0.99	0.99	R	0.94	0.96	0.79	0.97	0.98
Na ⁺	n	0.9	0.8	0.8	1.0	0.8	n	0.8	0.7	0.7	0.8	0.9
	k	0.43	0.40	0.40	0.37	0.36	k	0.36	0.33	0.46	0.37	0.33
	c	4.95	3.32	3.47	4.99	3.22	c	3.87	2.69	3.43	4.14	4.09
	R	0.99	0.98	0.81	0.98	0.99	R	0.93	0.97	0.85	0.97	0.97
K ⁺	n	1.0	0.9	0.8	1.2	1.0	n	1.0	1.1	0.9	1.2	1.3
	k	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	k	0.05	0.06	0.05	0.05	0.08
	c	0.83	0.87	0.60	1.62	1.18	c	1.08	1.45	0.75	1.46	3.66
	R	0.97	0.98	0.79	0.95	0.96	R	0.97	0.97	0.84	0.94	0.99
Ca ²⁺	n	0.9	0.8	0.9	1.1	1.1	n	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9
	k	0.58	0.64	0.56	0.79	0.55	k	0.19	0.24	0.20	0.26	0.23
	c	6.10	5.95	5.89	16.74	9.53	c	1.30	2.28	2.01	3.91	3.11
	R	0.99	0.99	0.77	0.86	0.99	R	0.94	0.99	0.93	0.95	0.99
DOC	n	1.3	1.6	1.0	0.6	1.2	n	1.5	1.6	2.2	1.8	4.1
	k	0.06	0.04	0.07	0.08	0.06	k	0.06	0.06	0.02	0.05	0.04
	c	1.84	2.60	1.08	0.42	1.36	c	3.95	5.64	14.25	8.99	7334.70
	R	0.93	0.98	0.29	0.41	0.74	R	0.92	0.95	0.96	0.85	0.91
POC	n	1.3	3.0	2.6	3.2	4.3	n	1.9	2.1	3.2	4.8	2.7
	k	0.03	0.005	0.004	0.003	0.005	k	0.01	0.03	0.002	0.003	0.03
	c	0.87	14.06	4.24	14.66	626.77	c	3.89	11.71	26.23	3576.70	64.03
	R	0.61	0.90	0.54	0.48	0.70	R	0.70	0.78	0.78	0.80	0.65

降雨1、2、3、4、5: 表1参照

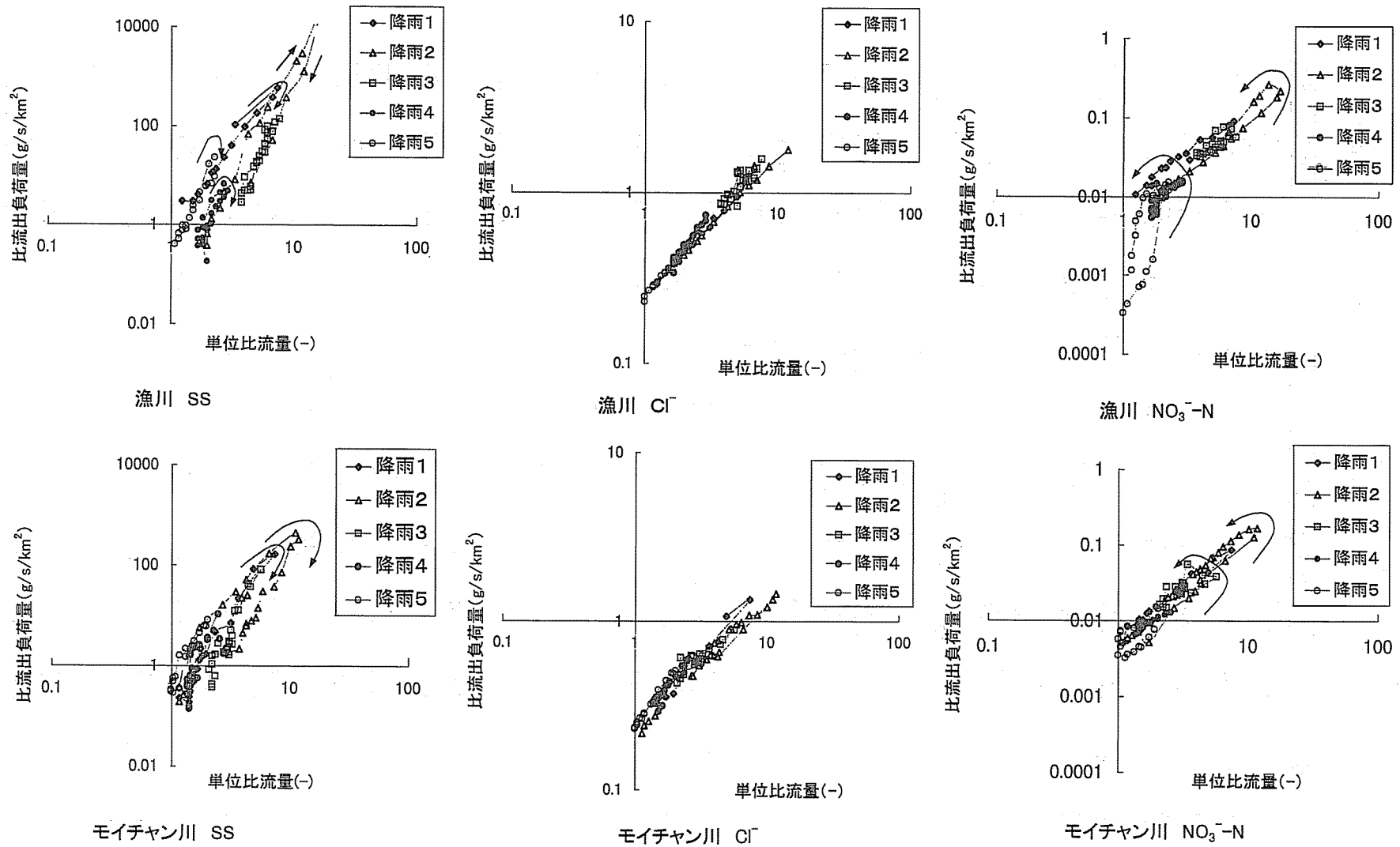


図3 単位比流量と水質成分比流出負荷量の関係

(単位比流量: Q' ($Q'=Q/Q_0$, Q_0 : 調査期間中の最小比流量(漁川: $0.067\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 、モイチャン川: $0.054\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$))

(降雨1、2、3、4、5 : 表1参照)

べて大きな値であり、増水時に大量のSS負荷を流出する洗い出しの特徴が森林河川では顕著であるといえる。また、同じ流量においても、流量増加時は流量逓減時よりも流出する負荷量が多く、比流量と流出負荷量の関係を示す図（図3）において、経時的にプロットすると時計回りのループを描く。一般には森林河川の流域内にSSは無尽蔵にあると考えられているが、本調査対象の流域の面積が小さいためにループが描かれるものと思われる。降雨規模の大きい降雨2においてループがはっきりと確認でき、流量増加時に流域に蓄積された分が容易に洗い出され、流量減少時において降雨3は直前の大規模降雨（降雨2）によって大量のSS成分が洗い出されているため、この時期の流出量が少ない。k値についてみるとn値と同様に降雨毎に変化しており、SSは降雨条件などの水文的な影響を非常に受けやすい成分である。漁川において、無降雨期間の長い降雨1と降雨5において他の降雨よりもk値は大きく、流域における蓄積量が大きく関与していると考えられる。モイチャン川は漁川に比べてk値の変化が小さく、またn値も若干小さい。前述したように漁川と比べてモイチャン川の保水能力も良く、モイチャン川流域の土壌が安定しているといえる。

懸濁態リンのn値は3~4と洗い出し型の特徴が顕著で流量との相関も良く、懸濁態リンの流出特性はSSと同様に水文的变化に影響を受けると言える。

懸濁態窒素の比流出負荷量と比流量の相関性はSSと比べて低く、またn値はSSよりやや小さいため、懸濁態窒素成分の流出はSSと同じとは言えない。しかし懸濁態窒素のn値は2~3と洗い出し型で、降雨毎にk値が変化しており、SSと同様に懸濁態窒素の流域での蓄積量が流出量に関係している。

2) 安定流出型Ⅰ（貯留型：流量増加とともに流出負荷が増す〔1〕ほどではない〕が両者の相関性が悪い）：硝酸態窒素、溶存態有機炭素、溶存態リン

硝酸態窒素の回帰式のn値は1かそれよりやや大きく、流域全体に豊富に貯留される成分と思われる。比流量と比流出負荷量の相関は懸濁態窒素と比べて高い傾向が見られ、また図3において反時計回りのループを示し、流量の増加と共に濃度は上昇して流出負荷は上昇するが、流量減少時において流量増加時よりもさらに多量の負荷が流出する。このように一般河川と同様⁵⁾に、森林河川における降雨時の硝酸態窒素の流出特性は懸濁態成分とも一般無機成分とも異なる。溶存態有機炭素はn値が1以上で降雨によって変動し、流出特性は硝酸態窒素と同じ反時計回りの流出ループを描き、硝酸態窒素と同じ傾向が認められる。溶存態リンは、漁川ではn値が1以上、モイチャン川では1付近か1以下となり、流出特性が降雨や流域によって異なるが、このことは流域全体にリンが分布せず、流域内に貯留され、貯留されている量が状況によって異なると考えられる。

3) 安定流出型Ⅱ（非貯留型：流量増加とともに流出負荷が増し〔1〕ほどではない〕また両者の相関性がよい）：一般無機イオン

アルカリ度（4.3Bx）の流出特性はSSと異なり、降雨毎でnやkの値が大きく変化せず、流量との相関性も良い。アルカリ度のn値は両河川で約0.8~約0.9で、やや希釈型と言える。またk値は両河川とも0.028前後であり、河川間や降雨間に差はない。アルカリ度の流出特性は、流域の状態や水文条件には左右されず、調査対象地域一帯の地質的な特徴と降雨の流出状況に支配されていると考えられる。同様にナトリウムイオンや塩化物イオンのn値やk値もSSほど大きな変化はなく、降雨規模などでは流出特性が変化しにくい成分である。ナトリウムイオンや塩化物イオンのn値は1以下であり希釈型といえるが、総降雨量の少ない降雨4や降雨量に対して流出量が少ない降雨5においては1付近（濃度一定型）となり、一般河川におけるアルカリ度や塩化物イオンのn値（0.6~0.7）⁵⁾と比べて大きい。これらの成分の流出は降雨

による希釈効果を受けにくいといえ、森林河川の特徴であるといえる。k 値は 2 河川でともに約 0.2~約 0.3 で地域的な差異はなく、ナトリウムイオンや塩化物イオンはこの流域に広く分布しているといえる。同様にカルシウムイオン、硫酸イオンの流出負荷量も流量との相関性が良く、降雨毎で流出特性の変化は小さく希釈型であり、塩化物イオンと同じ降雨時流出特性であるといえる。しかし、漁川のカルシウムイオンや硫酸イオンの k 値は 1.0 前後でモイチャン川の k 値は 0.3 前後と異なり、地質的な差異がある。

表3 降雨時における水質成分流出特性による分類

流出タイプ	n	k	R	流出の特徴	存在形態	成分
I 洗い出し型	>2~1	変動大	○	流量増加に伴い多量に流出	蓄積量が無尽蔵 (易流出型の場合は蓄積量に制限)*	懸濁成分 (SS,TN,TP)
II 安定流出型 (貯留型)	2~1	若干変動あり	○	流量増加に伴い流出	流域に十分貯留されている (貯留速度に限界がある)*	硝酸態窒素、 溶存態有機炭素、 溶存態リン
III 安定流出型 (非貯留型)	≤1	変動小	◎	やや希釈されて流出 流量との相関がよい	流域に広く分布する	一般無機イオン (ナトリウムイオン、 塩化物イオン、硫酸イオン)
IV 非安定流出型	1前後	変動大	×	化学反応などが流出量を制限	反応性に富む	アンモニア態窒素、 ケイ酸

* () : 高流量時に観測される状態

4) 非安定流出型 (比流出負荷量と比流量の相関性が悪い成分) : ケイ酸、アンモニア態窒素
ケイ酸は、漁川において降雨 1、2、5 のとき、n 値は約 0.8 で、一般無機イオンと同じ流出特性であるといえる。一般河川におけるケイ酸の流出は流量との相関が良いが、モイチャン川のケイ酸は漁川よりも流量との相関が悪く、他の無機イオンと流出特性が異なる。ケイ酸の水への溶出速度が流出に関係していると考えられる。アンモニア態窒素も比流量と比流出負荷量の相関が悪く、n 値は 0.8 から 2.0 まで大きく変動するため、アンモニア態窒素の流出には生化学的反応が強く関係すると考えられる。

4. 結論

汚濁負荷発生源対策として点的なものから面的なものへとその重要性が問われるようになった今日、森林河川から流出する負荷を量的・質的にとらえることが、今後の水環境管理についての課題となっている。本研究では隣接する集水域を持つ 2 つの森林河川を対象に、夏期の 5 回の降雨増水時における水質調査の結果より、降雨時における森林集水域からの水質成分負荷流出特性を明らかにし、流出特性を 4 つに分類した。隣接する集水域を同時に調査を行った結果、流域の差異によって流出特性が異なる成分はケイ酸と溶存態リンであった。流域内の森林、特に土壌の状態に起因すると思われる。今後は流域内の土壌状態と河川水質成分の流出特性の関係をさらに明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 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 巻、10 号、p59-68(1986)
- 2) 堤利夫：森林の物質循環、東京大学出版会、p100-117(1987)
- 3) Harukuni TACHIBANA, Fumie OE, Atsushi OKASHITA: A comparison of the water quality of forest rivers in cold regions, Summary of The 6th International Conference on the Conservation and Management of Lakes, p673-676(1995)
- 4) 日本分析化学会北海道支部：水の分析・第 4 版、化学同人(1994)
- 5) 橋 治国：集水域の環境と河川水質、北海道土壌肥料研究通信一第 43 回シンポジウム、p31-42(1997)
- 6) 奥川光治・宗宮功・大西行雄：流域特性を考慮した流送能力型汚濁流出モデルの開発、水質汚濁研究、Vol. 14 No. 6、p385-394(1991)