

(24) 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

Storm run-off characteristics of loads of chemical components from forest basins

山田俊郎*、清水達雄*、井上隆信**、橘治国*

Toshiro YAMADA*, Tatsuo SHIMIZU*, Takanobu INOUE**, Harukuni TACHIBANA*

ABSTRACT; The water quality of two forest rivers in central Hokkaido was surveyed in the period of storm events in the summer of 1997 to understand the run-off characteristics of the loads of water quality component from the rivers.

As the result, the run-off characteristics of the water components were classified into four groups:

- 1) WASH OUT type (SS, PN, PP); Most of loads are discharged with increased flow rate.
- 2) STEADY RUN-OFF type (Pool type)($\text{NO}_3\text{-N}$, DOC, DP); Run-off loads increase with increase of flow rate but there is a low correlation between flow rate and run-off loads.
- 3) STEADY RUN-OFF type (Non-pool type)(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}); There is a high correlation between flow rate and the run-off loads.
- 4) UNSTEADY RUN-OFF type (silicic acid, $\text{NH}_4\text{-N}$); There is a low correlation between flow rate and the run-off loads.

KEYWORDS; Storm run-off, Forest basin, Water quality.

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¹⁾。これらの成分は安定して下流へ供給され、河川や湖沼、海域の生態系を育んできた。わが国の集水域における森林の割合が6割程度であることを考えると、森林集水域からの水質成分流出に関する情報を把握することは下流水域の生態系を保全するために重要である。森林域からの水質成分負荷流出の実態把握のためにケースバイケースの基礎的な調査・研究が必要となる²⁾。とくに降雨に伴う出水時には多量の懸濁物ととも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。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

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を調査対象とした(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。集水域は針広葉混交の原生林と人工林が繁茂する林野で占められる。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河川の集水域の表層土壌は主に森林褐色土と黒ボク土から

*) 北海道大学大学院工学研究科。(Graduate School of Eng., Hokkaido Univ.)

なり、また地質は基礎の新第三紀層とその上の第四紀洪積世火山岩火山砕屑岩類および火山灰の支笏火山噴出物、さらにその上の地表面の火山灰層からなる。漁川の両岸は急峻な基盤斜面からなる溪谷となっており、そのため土砂流亡が著しい。

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。期間中の降雨時に、2河川を対象に1~2時間間隔で採水を行った。採水地点は2河川ともに、ダム湖流入部付近のバックウォーターの影響がないところとし、自動採水器（ISCO 3700型）

を用いて同時刻に採水を行った。また同時に降水も採取した。採取した試料は実験室に持ち帰り、 $0.45\mu\text{m}$ メンブランフィルターによりろ過水と未ろ過水に分離し、分析まで -30°C で保存した。富栄養化関連成分として全窒素、全リン、形態別の窒素とリン、有機炭素、SSなど、主要無機成分として塩化物イオン、硫酸イオン、ナトリウムイオン、カルシウムイオン、アルカリ度、珪酸など約30項目について分析を行った。降水はろ過水のみを分析した。窒素とリンについてはオートアナライザー（ブランルーベ AACS-II）、有機炭素については全有機炭素計（島津製作所 TOC-5000A）、主要イオンについてはイオンクロマトグラフィー（横河アナリティカルシステムズ イオンクロマトアナライザー Model IC7000 シリーズII）により測定した。そのほかの分析方法は主に「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。

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。漁川の比流量はモイチャン川の比流量と比べてどの降雨時においても大きな値を示し、特に降雨2においてはその差が顕著で、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。漁川ではこの増水（降雨2）時に多量の土砂が流出して、河道が変化し、そのため8月10日6:00以降は採水不能となった。8月10日19:00に直接サンプリングを行い、もとの採水場所から数メートル離れたところに新しい採水場所を変更し、連続自動採水を8月11日12:00から再開した（本論文では採水不能になるまで得られたサンプル及び8月10日19:00のサンプルを降雨2の漁川におけるデータとして扱った。）降雨3は調査地域においては中規模の降雨で、28時間に断続的に降った。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

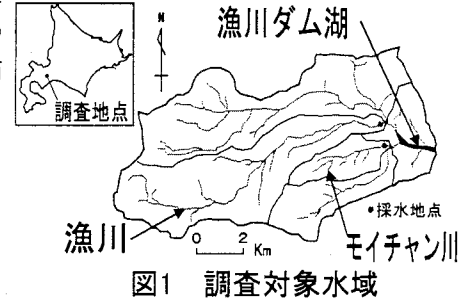


表1 調査対象降雨イベントの概況

	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

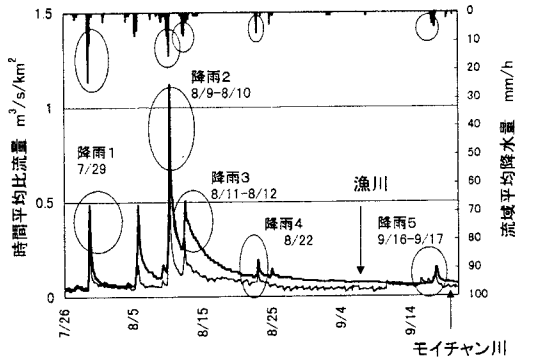


図2 降雨時調査期間中(1997年)の水文状況

表2 降雨時河川水質の概況

	漁川					モイチャン川					降雨				
	平水時		平水時		試料数	平水時		平水時		試料数	平水時		平水時		試料数
	平均値	最大値	平均値	最大値		平均値	最大値	平均値	最大値		平均値	最大値	平均値	最大値	
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
比流量	109	0.25	0.08	1.12	0.07	0.16	0.14	0.06	0.64	0.05	0.09				
SS	103	150	2.8	2794	0.05	876	60.4	1.0	745	0.43	241				
pH	109	6.9	7.1	7.1	6.6	0.00	6.8	7.1	7.2	6.5	0.00				
4.3Bx	109	0.37	0.40	0.52	0.28	0.00	0.35	0.40	0.52	0.23	0.01				
E.C.	109	84.0	93.3	98.6	59.6	1.01	61.2	68.8	72.1	40.6	1.03				
TN	106	0.30	0.13	1.21	0.07	0.14	0.37	0.17	1.95	0.12	0.21				
DN	109	0.19	0.12	0.49	0.01	0.04	0.25	0.13	0.58	0.08	0.05				
PN	106	0.11	0.01	0.94	0.00	0.26	0.12	0.04	1.40	0.00	0.37				
NO ₂ ⁻ -N	109	0.002	0.001	0.010	0.000	0.001	0.002	0.002	0.047	0.000	0.009				
NO ₃ ⁻ -N	109	0.12	0.08	0.41	0.01	0.04	0.14	0.09	0.40	0.05	0.03				
NH ₄ ⁺ -N	107	0.01	0.00	0.10	0.00	0.01	0.02	0.00	0.08	0.00	0.01				
DON	109	0.06	0.05	0.33	0.00	0.04	0.10	0.04	0.35	0.00	0.04				
TP	106	0.036	0.007	0.371	0.005	0.11	0.049	0.018	0.584	0.014	0.11				
DP	109	0.006	0.003	0.100	0.001	0.02	0.012	0.014	0.020	0.005	0.00				
PP	106	0.031	0.004	0.361	0.000	0.13	0.037	0.004	0.574	0.001	0.15				
SiO ₂	107	20.7	26.1	30.3	2.6	1.84	21.9	27.5	39.0	1.3	5.19				
Cl ⁻	104	3.5	4.0	5.5	2.2	0.06	3.8	4.2	6.3	1.9	0.16				
SO ₄ ²⁻	104	13.1	15.6	17.6	8.6		4.3	5.6	10.6	2.0	0.37				
Na ⁺	104	5.1	5.2	7.2	3.1	0.11	5.7	6.1	8.2	2.6	0.23				
K ⁺	104	1.0	0.9	1.3	0.6	0.02	1.2	1.1	1.9	0.7	0.08				
Ca ²⁺	104	9.2	8.8	15.4	5.8	0.71	3.8	4.0	9.1	2.0	0.33				
Mg ²⁺	104	1.2	2.0	1.9	0.0	0.09	0.8	1.4	2.2	0.4	0.07				
TOC	103	2.0	0.9	15.2	0.4	1.73	3.2	1.2	18.0	0.5	3.04				
DOC	103	1.1	0.8	3.5	0.3	0.25	1.7	1.0	5.1	0.5	0.52				
POC	103	0.9	0.1	12.8	0.0	2.80	1.5	0.2	14.6	0.0	4.08				

*) 文献1)

**) 比流量: m³/s/km²、4.3Bx: meq/l

であるが、ピーク時の比流量は漁川で $0.50\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 、モイチャン川で $0.31\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ と、降雨 1 ($0.49\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 、 $0.40\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) と同程度増加している。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 と比べて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。

3. 2 降雨水質と河川水質

表 2 に調査期間中における河川及び降水の水質の概況を示した。降雨時の SS や懸濁態栄養塩の平均濃度は平水時より大きく、降雨時に多量の懸濁物質が流出していることがわかる。なお、降水中に含まれる主要無機イオンの平均濃度は河川水より低い。降雨時の主要無機イオン平均濃度が平水時より低くなるのは、降水によって河川水の無機イオンが希釈されたといえる。硝酸態窒素、有機態窒素、溶存態有機炭素の濃度は平水時より降雨時の方が高く、流域に蓄積されたこれらの成分が降雨時に流出するといえる。降水中のアンモニア性窒素濃度は $0.1\text{mg}/\text{l}$ で、河川水は $0.01\sim 0.02\text{mg}/\text{l}$ と低くなり、河川への流出過程で土壌への吸着ないし硝化されたものといえる。降雨時の溶存態リンの平均濃度は、漁川では平水時より高く、モイチャン川では平水時より低くなるなど、流域の差異が見られた。

3. 3 降雨時の水質成分流出特性

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⁵⁾。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⁶⁾。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 3 に示す。また各水質成分の流出の特徴を表 4 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⁵⁾ と比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、流量増加時は流量減小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 においてループを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

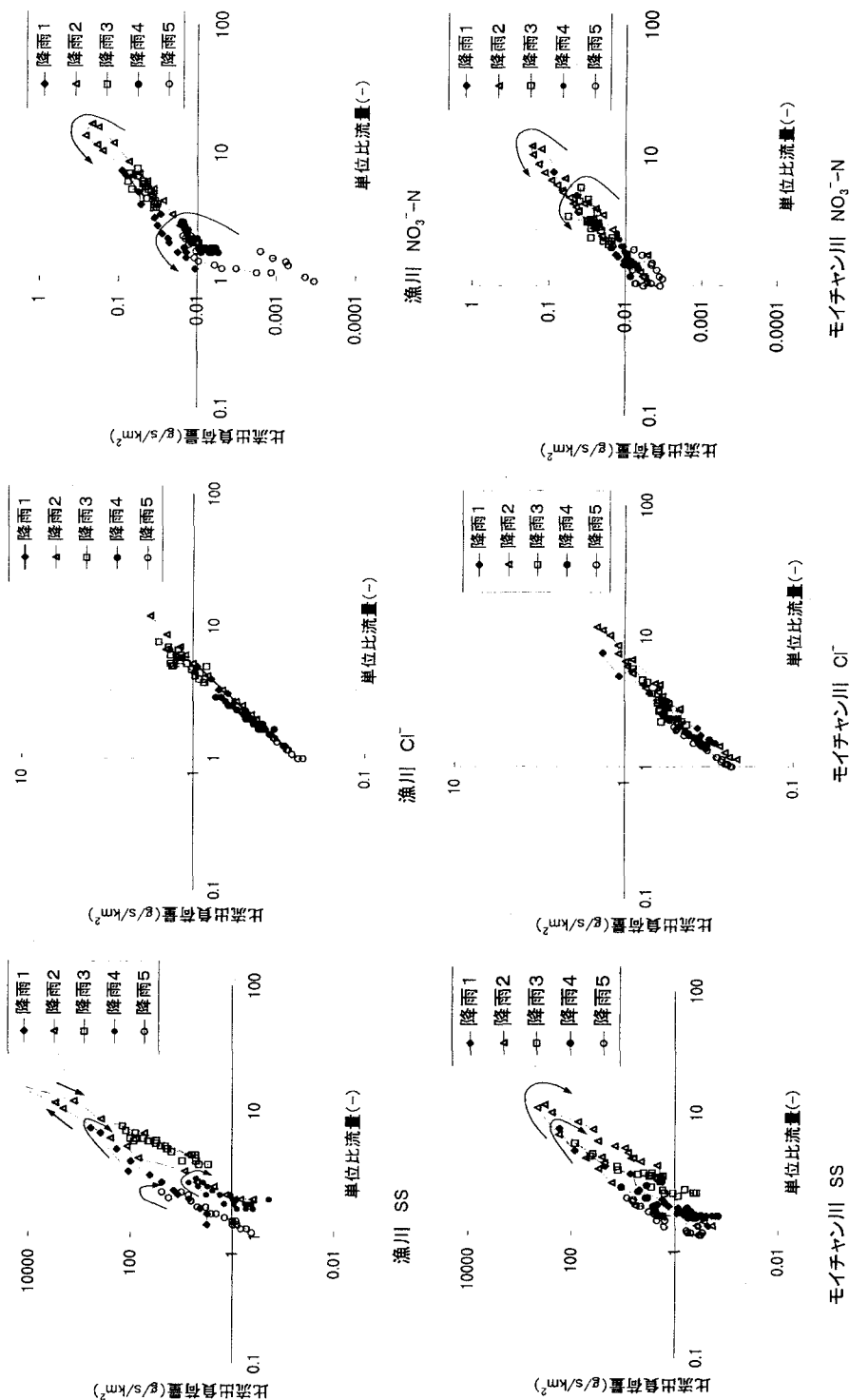


図3 単位比流量と水質成分比流出負荷量の関係

(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)

表3 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 ($\text{g}/\text{s}/\text{km}^2$)
 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 C, n, k : 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

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(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³⁾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思われる。

3) 安定流出型(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)³⁾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。

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

北海道の中央部の漁川ダムに流入する森林河川を対象に、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つに分類することができた。流量増大時に多量に負荷を流出する「洗い出し型」(SS、PN、PP)、流量に従って負荷が流出するが、流量に対する流出量が流量増加時と流量減少時において異なる「安定流出型(貯留型)」(溶存態窒素、溶存態リン、溶存態有機炭素)、流量に従って負荷が流出する「安定流出型(非貯留型)」(主要無機イオン)、化学反応などによって流出量が変化し制限される「非安定流出型」(ケイ酸、アンモニア態窒素)であった。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著しく異なる成分があり、それら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。

以上のことを基本に、ノンポイント汚染の流出過程のモデル化に発展させていきたい。

本研究を遂行するにあたり、北海道開発局石狩川開発建設部漁川ダム管理所の御協力を得た。また、文部省科学研究費補助金(基盤研究B(2)、研究課題番号08454126、研究代表者:小林大二)及び地球環境財団(平成9年度)の助成を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 山田俊郎・大江史恵・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、p85-93(1998)

2) 加藤正樹・池田重人・伊藤優子・金子真司・吉永秀一郎・生沢均・佐々木重行: 森林と溪流水質-その形成メカニズムと実態-(1999)、財) 林業科学技術振興所

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(1993)

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) 橘 治国: 集水域の環境と河川水質、北海道土壌肥料研究通信-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)

表4 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(易流出型のものは蓄積量に制限)*	懸濁成分(SS,TN,TP)
II 安定流出型(貯留型)	2~1	若干変動あり	○	流量増加と伴に流出	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