

(9) 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

A comparison of the runoff characteristics of nutrient loads from forest basins

山田俊郎*、大江史恵**、清水達雄*、橘治国*

Toshiro YAMADA, Fumie Oe, Tatsuo SHIMIZU, Harukuni TACHIBANA

ABSTRACT; The water quality of forest rivers in central Hokkaido was researched to understand the runoff characteristics of nutrient loads from forest basins. Four forest rivers whose basins are contiguous to each other were surveyed simultaneously. The results are as follows.

- 1) The concentrations of nitrogen and phosphorus are high enough (0.2-0.3mgN/l, 0.01-0.02mgP/l) to cause eutrophication downstream.
- 2) In the period of storm runoff, nutrient loads were discharged in abundance from the forest basin.
- 3) Types of nutrients in runoff were arranged by $L = C \times Q = c \times Q^n$ (L: specific nutrient load, C: concentration, Q: specific flow, c, n: constants). The runoff characteristic of nitrogen was WASH OUT type ($n > 1$, concentration increases with increase of flow). The characteristic of phosphorus was the same, especially particulate phosphorus ($n > 2$).
- 4) Principle component analysis of the data of water quality of four rivers suggested that the main factors that characterize the water quality of forest rivers are the condition of the surface soil layer at the forest basin and the degree of flow rate variation.

KEYWORDS; Forest river, Water quality, Nutrients, Runoff load

1. はじめに

これまでの調査・研究から、森林河川の栄養塩濃度は湖沼における富栄養化レベルにあることが示されている¹⁾。例えば、本研究の調査地である石狩川水系漁川ダム湖は集水域が全て森林であるが、今までにパンドリナの異常増殖などの障害が発生している²⁾。下水道や工場排水を中心とした特定汚染源対策が進んだ現在、非特定汚染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とされている³⁾。非特定汚染源の中で、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。森林湖沼やダム湖における水質や生態系を保全するために、詳細な森林集水域から発生する負荷を調査し把握する必要がある。

今まで森林内の水や物質の動態に関する様々な調査や研究が行われてきたが⁴⁾⁵⁾、森林を下流への栄養塩負荷発生源としてとらえた研究はあまり見られない⁶⁾⁷⁾⁸⁾。森林河川の流出や水質に影響を与える因子として、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・施肥等の人為的な要素が考えられる⁹⁾。森林河川水質への伐採や施肥による影響に関する研究は、Likens らの報告に代表されるように数多く見られるが¹⁰⁾¹¹⁾、立地環境条件や森林環境と水質成分の流出との関係はいまだに十分検討されていない¹²⁾。特に下流の閉鎖性水域の水質を保全する立場からは、

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

**) 大阪市 (Osaka City Office)

森林から流出する栄養塩に関する情報を把握することが不可欠であるが、このような観点での調査・研究はいまだに数が少なく、栄養塩流出のメカニズムや栄養塩流出に影響を及ぼす要因について共通の知見を得られるまでに至っていない。

本研究では、北海道の集水域が隣接した4つの森林河川を対象に、栄養塩の水質変動や流出負荷を調査解析し、栄養塩流出に対する集水域の環境、すなわち植生や表層土壌の管理状態等の影響について検討した。

2. 研究方法

2. 1 調査対象水域の概要

本論文において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、ラルマナイ川、イチャンコッペ川、モイチャン川の4河川である。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。図1に調査対象地区を示す。4河川の集水域は紋別岳(866m)の北西の山(753m)より恵庭岳(1320m)の一部、漁岳(1318m)、空沼岳(1251m)を通じて島松山(492m)に至る範囲内にあり、集水域は全て、原生林と人工林からなる。4河川の諸元を表1に示す。4河川の集水面積の和は約100km²で、漁川ダム湖の集水面積(113.30km²)の大半を占めている。集水域の地質はほぼ同様で

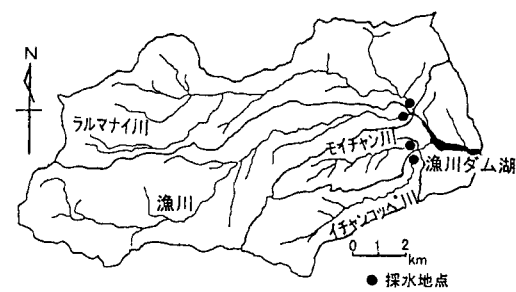


図1 調査対象地区

表1 調査対象河川

	漁川	ラルマナイ川	イチャンコッペ川	モイチャン川	
集水面積	km ²	40.2	39.8	14.8	8.1
流路長	km	18.6	15.1	9.5	7.5
平水量	m ³ /s	3.8	3.2	0.9	0.5
砂防ダムの数	1				
砂防ダム(小型のスチールダム)の数	6	17	2	3	

あり、基礎は新第三紀層で形成されるが、その上を第四紀洪積世火山岩火山砕屑岩類および火山灰からなる支筋火山噴出物が覆いさらにその上に火山灰層が地表面に広く堆積している形になっている。上層の透水性の強い豊平浮石層は水の浸食には弱く、そのため4河川集水域には火山噴出物で生じた丘陵の中に浸食作用による谷壁が多く見られ、漁川やイチャンコッペ川の河岸に灰色の浮石凝灰岩の露出が見られる。表層土壌は森林褐色土と黒ボク土によって占められている。集水域の植生の大部分は針広葉混交の天然林と一部の人工林で占められる。これらの林床には、クマイザサなどが繁茂しているが漁川、ラルマナイ川で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¹³⁾。漁川とラルマナイ川の両岸は急峻な基盤斜面からなる溪谷となっている。そのため土砂流亡が著しい。

2. 2 調査方法

水質調査は1997年5月～11月にかけて実施した。調査は目的に対応し定期採水、日採水、降雨時採水に区分した。調査地点は、4河川のダム湖流入部近く、バックウォーターの影響のないところとした。

1) 定期採水：漁川、ラルマナイ川、イチャンコッペ川、モイチャン川の4河川を対象に、一般的水質を把握するため多量の水を定期的にバケツにより採取した。採水は、1997年5月～11月の期間にほぼ2週間間隔で行った。

2) 日採水：水質の変動特性を考慮し、漁川、モイチャン川の2河川を対象に、1997年6月～10月に定時において一日一度、自動採水器(ISCO 3700型)により採水を行った。調査期間中、日中は林道整備などの工事の影響がでると予想されたため午前0時を定時とした。

3) 降雨時採水：漁川、モイチャン川において、97年6月下旬から9月下旬の降雨時に、1～2時間間隔で自動採水器による連続採水を計5回行った。降雨時には雨水も採取した。

2. 3 分析項目と水文データ

今回の調査においては、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項目を分析対象とした。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。調査地域の降雨量と流量のデータは、北海道開発局漁川川ダム管理所と千歳川放水路建設事務所より提供していただいた。

3 結果及び考察

3. 1 水文および水質の観測結果

(1) 調査対象河川の水文

対象河川である4河川（漁川、ラルマナイ川、イチャンコッペ川、モイチャン川）の流況を表す水文データを表2に示す。これらの値は、6月1日より11月15日の日平均比流量より算出したものである。

1997年は降雨量が例年に比べて少なく、4月中旬から11月中旬までに降った総降水量は1204mmであった。漁川、ラルマナイ川は、降雨時における比流量が残りの2河川に比べて大きく、降雨の河川流出に対する緩衝能力が低いといえる。4河川の平水時の比流量には大きな差がなく、一般河川に比べると若干小さい。4河川の河況係数は、日本の一般的な都市河川に比べてかなり小さく、森林内河川の特徴を示している。低水比流量、濁水比流量に河川間の差はみられないが、河況係数と最大比流量は、ラルマナイ川が最も大きく、ついで漁川、モイチャン川、イチャンコッペ川の順である。ラルマナイ川、漁川は流量変動が大きく、モイチャン川、イチャンコッペ川は変動の小さい安定した川であるといえる。ラルマナイ川と漁川は古く鉱山があり荒廃河川の様相を呈しており、モイチャン川とイチャンコッペ川は河岸まで下草が覆い典型的な森林内河川の様相で、これらのことが流況と対応している原因といえよう。

(2) 対象河川の一般的水質

4河川の主な水質成分濃度を13回の定期調査（融雪増水時2回を含む）によって求め、その平均値、最大値、最小値、変動係数（標準偏差を平均値で除したもの）を表3に示した。電気伝導度はいずれも100μS/cm以下で変動係数も0.05以下と小さく、SSは1～3mg/lと、森林河川水の清澄さを示している。SSの変動係数は幾分大きく、また漁川で大きく河川の流況と対応しているようである。一般無機成分のなかではアルカリ度（4.3Bx）が、4河川に共通して4.9meq/l前後の濃度レベルであり、変動係数も0.05以下で差がない。炭酸イオンは降水中には含まれず、地下土壤に接触しているうちに水に溶け込むものと考えられているので、4河川への地下水流出の寄与には大きな差がないと考えられる。塩化物イオンは4mg/l前後で4河川とも共通している。硫酸イオンはモイチャン、イチャンコッペ川では濃度が低く、低い塩化物イオン濃度を考えると雨水涵養型といえる。しかし漁川、ラルマナイ川では10mg/l以上で、カルシウムイオンマグネシウムイオンについても同様のことがいえることから、これらの河川水質には地質的要因が関連していることがわかる。ナトリウムイオンとカリウムイオンは、モイチャン、イチャンコッペ川で幾分平均濃度が高い。これら流況が安定した川では地下水が深く関わっていると判断される。栄養塩は、4河川ともに全窒素（TN）の平均値が0.2mg/l前後、最大値は約0.3mg/lと、下流の閉鎖性水域の生態系に対して無視できない濃度レベルである。またTNのほとんどがDNであり、DNの半分以上が無機態であった。無機態窒素は硝酸態窒素が優先し、亜硝酸態窒素やアンモニア態窒素はほぼ存在せず、TNやDNの濃度やその変動の4河川間の差はない。硝酸態窒素について存在割合が高いのは溶存態有機窒素（DON）で、森林土壤に豊富に含まれていることがわかる。溶存態有機窒素の平均値は漁川、ラルマナイ川がほかの2河川に比べてわずかに高いが、変動係数はイチャンコッペ川、モイチャン川で大きく、これらの流域の土壤に

表2 97年夏期における調査対象河川の流況

	漁川	ラルマナイ川	イチャンコッペ川	モイチャン川
集水面積	40.2	39.8	14.8	8.1
時間瞬間最大比流量	1.21	1.93	0.41	0.75
最大比流量	0.58	0.87	0.19	0.34
豊水比流量	0.12	0.12	0.07	0.08
平水比流量	0.10	0.08	0.06	0.07
低水比流量	0.07	0.06	0.05	0.06
濁水比流量	0.04	0.05	0.04	0.04
最小比流量	0.04	0.04	0.04	0.03
河況係数	15.6	20.1	4.3	10.2

＊ただしこのデータはすべて6月1日～11月15日の日平均流量を使用している（時間瞬間最大比流量のみ6月1日～11月15日の1時間間隔のデータを用いた）

表3 調査期間中の一般水質

	流量	比流量	水温	pH	EC	SS	DO	43Bx	SiO ₂	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
	m ³ /s	m ³ /s/km ²	°C		μS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
平均値	3.1	0.08	13.1	7.1	93.3	2.8	9.6	0.4	26.1	4.0	15.6	0.9	5.2	8.8	2.0
	漁川														
	ヲルマナイ川	3.1	0.08	13.4	7.0	77.5	1.5	9.4	0.3	28.1	4.1	10.8	0.9	5.4	1.8
	イチャンゴッヘ川	0.9	0.06	10.7	7.0	63.9	1.6	9.9	0.4	26.7	4.2	5.1	1.0	5.3	1.4
	モイチャン川	0.5	0.06	11.0	7.1	68.8	1.0	9.7	0.4	27.5	4.2	5.6	1.1	6.1	1.4
最大値	4.3	0.11	17.8	7.4	99.1	8.9	10.4	0.4	30.6	5.4	18.3	1.4	6.7	12.8	3.1
	漁川														
	ヲルマナイ川	4.8	0.12	17.9	7.4	83.2	2.9	10.2	0.4	34.7	5.0	12.1	1.3	6.2	2.3
	イチャンゴッヘ川	1.0	0.07	14.0	7.4	67.8	3.7	10.7	0.4	33.5	5.0	7.4	1.5	6.4	2.1
	モイチャン川	0.8	0.09	14.0	7.4	72.9	2.9	10.4	0.4	40.3	5.1	8.4	1.5	7.5	2.3
最小値	1.6	0.04	5.9	6.5	85.5	0.2	8.8	0.4	10.3	2.9	12.0	0.4	4.0	5.6	1.5
	漁川														
	ヲルマナイ川	1.8	0.04	5.8	6.5	70.7	0.2	8.6	0.3	5.1	3.3	9.7	0.5	4.8	1.5
	イチャンゴッヘ川	0.7	0.05	5.7	6.5	60.4	0.4	9.1	0.3	5.7	3.3	4.3	0.6	4.7	1.1
	モイチャン川	0.4	0.05	5.6	6.6	64.9	0.2	8.9	0.4	7.8	3.4	4.7	0.6	5.5	1.0
変動係数	0.27	0.27	0.30	0.04	0.04	0.96	0.06	0.06	0.22	0.20	0.11	0.28	0.14	0.22	0.24
	漁川														
	ヲルマナイ川	0.34	0.34	0.32	0.04	0.05	0.72	0.06	0.29	0.16	0.08	0.26	0.07	0.26	0.14
	イチャンゴッヘ川	0.10	0.10	0.22	0.04	0.76	0.06	0.04	0.29	0.16	0.19	0.28	0.08	0.32	0.21
	モイチャン川	0.22	0.22	0.24	0.04	0.89	0.06	0.04	0.39	0.16	0.18	0.25	0.10	0.31	0.32

	TN	DN	PN	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	DON	TP	DP	PP	PO ₄ ³⁻ -P	TOC	DOC	POC
	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	mg/l
平均値	0.13	0.12	0.01	0.08	0.001	0.004	0.05	0.007	0.003	0.004	0.005	0.9	0.8	0.1
	漁川													
	ヲルマナイ川	0.19	0.12	0.07	0.06	0.001	0.007	0.012	0.007	0.005	0.008	1.1	0.8	0.3
	イチャンゴッヘ川	0.18	0.13	0.05	0.08	0.001	0.003	0.012	0.008	0.004	0.008	1.3	0.8	0.4
	モイチャン川	0.17	0.13	0.04	0.09	0.002	0.003	0.017	0.014	0.004	0.014	1.2	0.9	0.2
最大値	0.30	0.30	0.05	0.28	0.002	0.012	0.08	0.012	0.005	0.008	0.007	1.4	1.2	0.3
	漁川													
	ヲルマナイ川	0.38	0.29	0.30	0.25	0.003	0.013	0.028	0.010	0.018	0.012	1.3	1.1	0.5
	イチャンゴッヘ川	0.29	0.24	0.16	0.23	0.002	0.007	0.018	0.013	0.009	0.013	2.0	1.0	1.2
	モイチャン川	0.28	0.28	0.10	0.26	0.003	0.011	0.023	0.017	0.009	0.017	2.2	1.5	0.7
最小値	0.06	0.03	0.00	0.00	0.000	0.000	0.02	0.005	0.000	0.000	0.001	0.6	0.5	0.0
	漁川													
	ヲルマナイ川	0.08	0.06	0.00	0.03	0.000	0.001	0.008	0.000	0.001	0.003	0.7	0.5	0.1
	イチャンゴッヘ川	0.08	0.05	0.00	0.04	0.000	0.001	0.008	0.004	0.001	0.004	0.9	0.6	0.0
	モイチャン川	0.09	0.08	0.00	0.05	0.001	0.000	0.012	0.010	0.000	0.010	0.8	0.6	0.0
変動係数	0.54	0.64	0.91	1.24	0.49	0.85	0.47	0.37	0.47	0.51	0.49	0.25	0.24	0.70
	漁川													
	ヲルマナイ川	0.42	0.53	1.20	1.02	0.74	0.51	0.46	0.25	0.31	0.31	0.15	0.25	0.59
	イチャンゴッヘ川	0.49	0.48	1.11	0.69	0.60	0.99	0.23	0.29	0.61	0.29	0.23	0.18	0.75
	モイチャン川	0.38	0.49	0.98	0.64	0.51	1.01	0.21	0.14	0.72	0.19	0.29	0.24	0.86

* 標本数14(BODとDOのみ8)

** 変動係数は標準偏差を平均値で除したものの

において土壌を分解する生物活動が盛んであることがうかがえる。リンについては、4河川の全リン（TP）濃度は平均値で0.01mg/l前後、最大値は約0.02mg/lであり、窒素と同様に下流の閉鎖性水域に対する影響が無視できない。4河川の中ではモイチャン川で濃度が高く漁川で濃度が低い。形態別には、懸濁態リン（PP）はどの河川も同じ濃度レベルであるが、溶存態リン（DP）の濃度がモイチャン川で大きく、これがモイチャン川での全リン濃度が高くあらわれる要因となっている。溶存態リンはリン酸態リンが優先し、4河川に共通している。変動係数は、リン酸態リン濃度の低い漁川で大きくまた高いリン酸態リン濃度を示すモイチャン川で小さく、リンの流出変動は懸濁態に支配されていることがわかる。モイチャン川やイチャンコッペ川のような流況が安定した森林河川では漁川のような荒廃河川に比べてリン酸態リンの保有量が多く、また容易に流出されないことがわかる。このように森林集水域の流況すなわち管理状態によって栄養塩の流出の様子が異なり、これが下流水系に大きな影響を及ぼすことがわかった。

3. 2 栄養塩の流出負荷量について

栄養塩を含めた河川水質は、融雪や降雨などによる流出条件に左右されるものが多く¹⁴⁾、水質成分の流出負荷量の変化、すなわち流出機構を把握するためには増水時も含めた連続した調査が必要である。4河川のうち水質の差異が大きい漁川とモイチャン川の2河川を対象とした日連続採水の結果より、栄養塩流出負荷量について検討した。河川水質の変化は主に増水時にあるので、平水時と増水時に分けて検討した。ただしここでは調査期間中のハイドログラフより判断して、漁川での流量4.5m³/s（豊水流量4.6m³/s）、モイチャン川での流量0.5m³/s（豊水流量0.6m³/s）を境に、日平均流量がそれ以上の場合を増水時とし、それ以下を平水時とした。各水質項目について、濃度と日平均比流量を掛け

表4 日採水における流出負荷量の平均値

		平水時				増水時			
		漁川		モイチャン川		漁川		モイチャン川	
		標本数	平均値	標本数	平均値	標本数	平均値	標本数	平均値
流量	m ³ /d/km ²	26	6000	27	3954	16	15026	16	7742
TN	kg/day/km ²	26	1.26	27	0.96	16	4.03	16	2.39
DN	kg/day/km ²	26	0.75	27	0.67	16	3.17	16	1.65
PN	kg/day/km ²	26	0.51	27	0.30	16	0.86	16	0.66
NO ²⁻ -N	kg/day/km ²	26	0.02	27	0.02	16	0.02	16	0.01
NO ³⁻ -N	kg/day/km ²	26	0.29	27	0.35	16	1.77	16	0.99
NH ₄ ⁺ -N	kg/day/km ²	22	0.10	27	0.07	16	0.17	16	0.10
DON	kg/day/km ²	26	0.36	25	0.27	16	1.21	16	0.54
TP	kg/day/km ²	19	0.09	20	0.11	16	0.23	16	0.18
DP	kg/day/km ²	14	0.02	20	0.06	16	0.08	16	0.11
PP	kg/day/km ²	19	0.07	20	0.05	16	0.15	16	0.08
PO ₄ ³⁻ -P	kg/day/km ²	26	0.01	27	0.03	16	0.05	16	0.07
4.3Bx	kg/day/km ²	26	2.5	27	1.6	16	5.5	16	2.8
SiO ₂	kg/day/km ²	19	173	20	134	16	350	16	217
Cl ⁻	kg/day/km ²	19	20	20	16	16	49	16	31
SO ₄ ²⁻	kg/day/km ²	19	86	20	21	16	192	16	37
Na ⁺	kg/day/km ²	19	31	20	25	16	69	16	45
K ⁺	kg/day/km ²	19	6.5	20	5.2	16	13.5	16	9.8
Ca ²⁺	kg/day/km ²	19	54	20	19	16	118	16	33
Mg ²⁺	kg/day/km ²	19	10	20	4	16	24	16	8
TOC	kg/day/km ²	19	9.0	20	6.8	16	21.3	16	14.6
DOC	kg/day/km ²	19	5.6	20	3.9	16	15.9	16	9.7
POC	kg/day/km ²	19	3.3	20	2.9	16	5.4	16	4.9
SS	kg/day/km ²	26	132	23	69	15	830	15	145

合わせ1日あたりの量に換算したものを比水質成分流出負荷量とし、平水時と増水時のそれぞれ比水質成分流出負荷量の平均値を表4に示した。

栄養塩は他の無機成分に比べて増水時の比水質成分流出負荷量が大きく特徴があるが、全窒素は漁川で3倍以上、モイチャンで2倍以上であり、増水時負荷発生の下流に与える影響が大きことがわかる。中でも特に硝酸態窒素と溶存態有機窒素の増水時の比水質成分流出負荷量は平水時に比べて大きい。懸濁態窒素の比水質成分流出負荷量も平水時に比べて増水時に増加しているが、溶存態窒素成分の比水質成分流出負荷量の増加に比べて小さい。これまでの報告では増水時に懸濁物質が大量に流出し、それに伴い懸濁態窒素の流出が多くなるといわれており¹⁵⁾、今回の結果はこれらの報告と異なる。アンモニア態窒素や亜硝酸態窒素について大きな負荷流出は見られず、流域内に存在している量が微量であるかもしくは反応性に富むためすぐに別の形態に変化していると思われる。漁川とモイチャン川の流域間で発生する平水時の比水質成分流出負荷量は、モイチャン川は漁川に比べて全窒素量は少ないが、硝酸態窒素は多い（0.35kg/d/km²）。増水時の硝酸態窒素の比水質成分流出負荷量は両河川で大きくなるが漁川で顕著である。安定した森林河川であるモイチャン川は硝酸態窒素を豊富に含み、増水時の流出負荷量は若干低くなるものの全体的には流出

変動が少なく、森林土壌は窒素成分を豊富に含み下流生態系の維持に大きく寄与していることがわかる。リンに関しては、全リンの比水質成分流出荷量は平水時においてモイチャン川の方が多いが、増水時には漁川の方が多。モイチャン川は溶存態リンを安定して流出していることがわかる。森林が荒れるとリンは懸濁物質とともに流出し、森林の栄養状態は貧困になるともいえる。

3. 3 降雨時における栄養塩流出パターン

漁川とモイチャン川を対象に1997年の7月から9月までの降雨のうち、5回の降雨イベントについて1時間ないし2時間おきに連続採水を行った。栄養塩の流出特性を把握するため、従来用いられている比

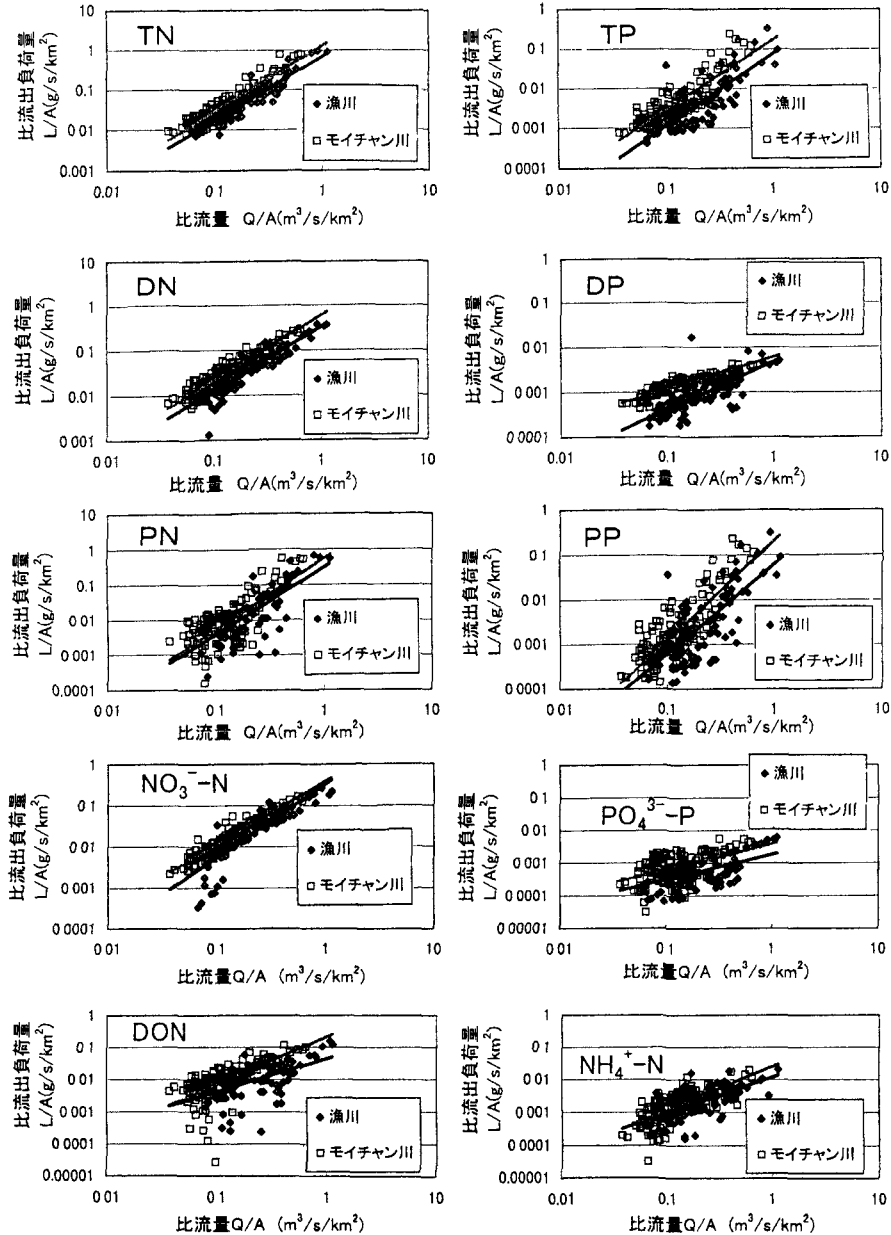


図2 比流量と比流出負荷量の関係

量と比水質成分流出負荷量の経験式を用いて、森林河川からの栄養塩の流出特性について検討した。栄養塩について比流量と比流出負荷量の関係を示したものを図2に示す。 $L = c \cdot Q^n$ 式を用いて行った回帰結果を、表5に示す。ここで、 Q は比流量 ($m^3/s/km^2$) で、 L は比流出負荷量 ($g/s/km^2$)、 c 、 n は係数である。解析結果の相関係数 R ($\log Q$ と $\log L$ について) より経験式の適用性がわかり、 n 値により各栄養塩成分の流出特性がわかる。

n 値によって分類される負荷流出特性は一般に以下のように考えられている¹⁶⁾。

- 1) $n > 1$: (洗い出し型)
- 2) $n = 1$: (濃度一定型)
- 3) $n < 1$: (希釈型)

n 値が1以上の場合、流量の増加に対し流

出負荷量が著しく増加することを示し、土壤中に大量に存在しており洗い出しを受けるタイプの成分であるといえる。 n 値が1近辺の場合は流量と比例して負荷量が増加することを示し、容易に水に溶けやすい成分である。 n 値が1以下の場合、流量増加に対して若干の負荷量増加が認められることを示し、発生負荷量に限界があり、増水により希釈を受ける成分といえる。窒素成分はどの成分についても n 値が1以上であり、洗い出しの効果を受けている。懸濁態窒素の n 値が漁川で1. 9、モイチャン川で2. 0と高く、また硝酸態窒素の n 値も漁川で1. 8、モイチャン川で1. 5と、流量増加に伴って窒素成分が大量に洗い出されていることがわかる。モイチャン川では回帰式との相関係数が多くの窒素成分で漁川より大きく、モイチャン川流域の土壤に豊富に窒素成分があるといえる。特にモイチャン川において硝酸態窒素を中心に溶存成分の相関係数が大きい、林相が安定すると極めてコンスタントに供給できる能力が形成されることがわかる。これは3. 2の推論と矛盾しない。濃度の低いアンモニア態窒素は相関が低い。懸濁態窒素については両河川で溶存態と比べて相関係数が小さいが、相関グラフから低比流量で回帰直線によりかなり低い比流出負荷量値の点がみられる。これは、ある流量を超えた時点で急激な流出が生じるという懸濁物の流出特性によるものと思われる。いずれにしても懸濁態窒素は土壤の優占的な構成成分であるからであろう。懸濁態リンは懸濁態窒素と同じく、 n 値が高く相関は0. 7付近であり、溶存態リンと比べて相関グラフにおいて回帰式からのばらつきがある。溶存態リンは窒素成分と異なり、漁川、モイチャン川の両河川において n 値が小さい。特にモイチャン川の溶存態リンの n 値は0. 7であり、希釈型といえる。土壤中に広く存在している窒素成分と違い、溶存態リンは負荷発生量に限界があり、森林土壤中ではリンが蓄積されている層が存在していると考えられる。

3. 4 主成分分析による森林河川の分類

定期調査からの水質データを基として主成分分析を行った。図3に各水質項目の主成分負荷量を示す。(第一主成分寄与率：28%、第二主成分寄与率：20%) 第一主成分としては、正の値を示す成分として電気伝導度、硫酸イオン、カルシウムイオンなど、負の値をしめすものとして溶存態窒素、溶存態リン、TOC などがみられ、負の方向に行くほど土壤表層部の寄与が強いといえる。第二主成分は、正の値を示している成分としてナトリウム、4. 3Bx、塩化物イオンなどがあり、負の値を示しているものには比流量、SS があり、河川水の流れの大きさと関連を持つものと考えられる。図4は主成分得点による4河川の散布図である。図では、漁川、ラルマナイ川、イチャンコッペ川、モイチャン川の順に第4象限から第2象限に移行している傾向が見られる。漁川は第一主成分軸（第一軸）の正の値に分布しており表層土壤の寄与が少ないことを示している。また増水時の2点が第二主成分軸（第二軸）において-2から-3あたりの特異な位置に分布

表5 回帰結果

	n^*		c^*		R^{**}	
	漁川	モイチャン川	漁川	モイチャン川	漁川	モイチャン川
TN	1.6	1.7	0.68	0.13	0.93	0.94
DN	1.4	1.4	0.33	0.60	0.90	0.93
PN	1.9	2.0	0.31	0.55	0.75	0.74
NO_3^- -N	1.8	1.5	0.34	0.39	0.87	0.95
NH_4^+ -N	1.1	1.3	0.01	0.03	0.66	0.72
TIN	1.6	1.5	0.32	0.42	0.89	0.95
DON	1.0	1.5	0.04	0.22	0.56	0.68
TP	1.8	1.8	0.07	0.16	0.82	0.87
DP	1.1	0.7	0.005	0.006	0.76	0.87
PP	2.0	2.2	0.06	0.21	0.75	0.82
RP	0.8	0.8	0.002	0.004	0.55	0.44

* $L = c \cdot Q^n$ (Q 比流量 ($m^3/s/km^2$)、 L 比流出負荷量 ($g/s/km^2$)、 c 、 n 係数)

** 相関係数

し、降雨時において流れの影響を受けやすい、すなわち土壌が不安定な河川であることがわかる。モイチャン川、イチャンコッペ川については、第一軸の負の値に分布しており、他の河川に比べて表層土壌の寄与が大きく、また第二軸において他の河川に比べて正の値をとって分布し、流量に影響を受けにくく、流域の森林土壌が豊かで安定して存在していることがわかる。全体として、モイチャン川流域の森林土壌の状態がもっとも良く、ついでイチャンコッペ川、ラルマナイ川、漁川の順であり、漁川はモイチャン川に比べて土壌が不安定であるといえる。また分布形状は、漁川、ラルマナイ川では流量の影響を強く受けると土壌表層部の影響があらわれる傾向が見られ、流量増加時の懸濁態栄養塩の洗い出しを確認できる。このように河川水質形成に森林の状態、特に土壌の状態が強く影響を与えていることがわかる。

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お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4河川の水質成分を、栄養塩を中心としてその水質変化特性や流出特性について同時に調査を行い、集水域環境による流出負荷量とその特性の差異について検討した。以下に本研究の結果をまとめる。

調査対象河川の水文

河況係数や最大比流量等を比較すると隣接する集水域であっても河川で異なり、モイチャン川、イチャンコッペ川は漁川、ラルマナイ川に比べて流量変動が小さく安定している。流況は森林の保全や管理状態により変化する。

調査対象河川の一般的水質

調査対象とした4つの森林河川に含まれる水質成分濃度は一般河川に比べて低いが、栄養塩レベルは下流域の富栄養化に対して無視できない。河川水中における栄養塩の形態は溶存態のものが大部分を占め、窒素に関しては硝酸態成分と有機態成分が、リンに関してはリン酸態成分が多くを占める。また地理的条件の差と関連して流域間に濃度レベル差のあることがわかった。

栄養塩負荷流出

栄養塩濃度は無機成分に比べて変動し、変動の大きさも河川により異なった。すなわち森林河川からは増水時において、流況や地理的状況と対応して平水時の2倍以上の栄養塩負荷が容易に流出していることが確認された。

降雨時における栄養塩流出

栄養塩の流出パターンを $L = c \cdot Q^n$ 式でまとめた。窒素成分は全て流量に対し濃度増加型を示した。リン成分もふくめて懸濁態成分でこの傾向が大きいことが認められた。一方、溶存態リン成分は流量に対して

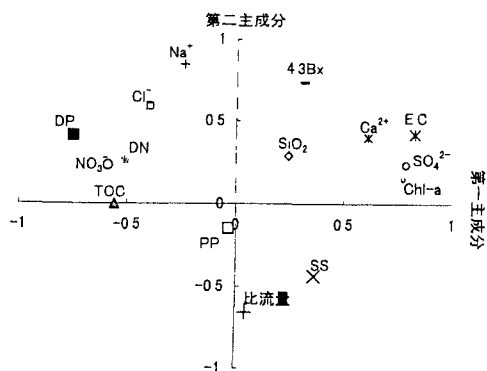


図3 各水質項目の主成分負荷量

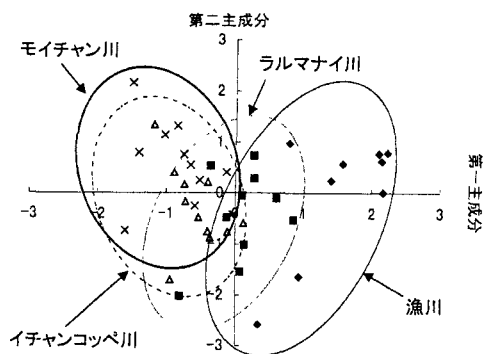


図4 主成分得点によるサンプル分置図

希釈型を示しており、集水域内にリンのプールが存在するものと推測された。2 河川間に降雨時の流出パターンに大きな差異は見られなかった。森林河川は、平時時に豊富な栄養塩を流出すると言える。

主成分分析による森林河川の分類

調査対象とした 4 河川の水質データより主成分分析をおこなった結果、4 河川の水質を分類することが出来、これらの河川水質は土壌表層部からの寄与と流れの影響を受けていることが示唆された。

今回、森林域からの栄養塩の流出特性についてまとめたが、栄養塩の負荷流出量は気象条件や流域の状況により異なることが分かった。また栄養塩の流出特性が流域内の土壌状態と密接に関係があると考えられた。今後は土壌における栄養塩の挙動を現場や室内実験により確認する必要がある。本研究を遂行するにあたり、北海道開発局岡下淳氏、また北海道開発局漁川ダム管理所、千歳川建設事務所、開発土木研究所の皆様、そして水質工学研究室の学生・卒業生諸氏の皆様のご協力・ご援助をいただきました。ここに記し感謝を表します。

<参考文献>

- 1) 橘治国、安藤正治、大森博之、飯田真也、梅本延彦：融雪期における山地森林域河川からの栄養塩流出、衛生工学研究論文集、27 巻、p33-43(1991)
- 2) 浦屋陽一・竹本成行・村上裕子：藻類による変色域と貯水池内の流れについて、第 3 4 回北海道開発局技術研究発表会、(1991)
- 3) 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)
- 4) A. J. Pearce, M. K. Stewart, M. G. Sklash: Storm Runoff Generation in Humid Headwater Catchments 1. Where Does the Water Come From?, Water Resources and Research, Vol. 22 No. 8, p1236-1272 (1986)
- 5) 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編：水文地形学(1996)、古今書院
- 6) 大類清和・相場芳憲・生原喜久雄：森林小水域での水質変化の過程、水文水資源学会誌、Vol. 8 No. 4、p367-381(1995)
- 7) 橘治国、大江史恵、風間信宏、岡下淳：森林河川の水質 森林環境と栄養塩流出、寒地技術論文・報告集、Vol. 10、p 208-215(1994)
- 8) 福島武彦、松重一夫：山林河川における流出特性と水質の関係について、水環境学会誌、Vol. 18 No 11、p909-916(1995)
- 9) 堤利夫：森林の物質循環、東京大学出版会、p100-117(1987)
- 10) G. E. Likens, F. H. Bormann, R. S. Pierce, D. W. fisher: The Effect of Forest Cutting and Herbicide Treatment on Nutrient Budget in the Hubbard Brook Watershed-ecosystem, Ecological Monograph, Vol. 40, p23-47 (1970)
- 11) 村岡浩爾・平田建正：渓流水質からみた森林浄化機能に関する研究 (第 3 報) 国立公害研究所研究報告、第 9 5 号、p53-74(1988)
- 12) 大類清和・生原喜久雄・相場芳憲：森林小集水域における渓流水質に及ぼす諸要因の影響、日本林学会誌、7 6 巻、No. 5、p383-392(1994)
- 13) 林野庁札幌営林局：札幌営林局土壌調査報告、第二報、p8-27(1966)
- 14) 橘 治国、那須義和：石狩川の水質一汚濁物質の流出機構を中心として一、衛生工学研究討論会講演論文集、第 14 回、p90-96(1978)
- 15) 橘 治国、安藤正治、大森博之：連続採水による森林小河川の水質特性 (9~11 月<1986,1987>)、土木学会北海道支部論文報告集、45 巻、p401-406(1989)
- 16) 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一第 43 回シンポジウム、p 31-42(1997)