

[原 著]

粟鹿山山林域（兵庫県丹波市）からの窒素およびリンの流出

梅本 諭^{1*} 駒井 幸雄² 竹田 洋子³ 平木 隆年⁴ 藍川 昌秀⁴

Nutrient Runoff from Forested Watershed at Mt. Awaga in Hyogo Prefecture

Satoshi UMEMOTO^{1*}, Yukio KOMAI², Yoko TAKEDA³,
Takatoshi HIRAKI⁴ and Masahide AIKAWA⁴¹*Water Environment Division, Hyogo Prefectural Institute of Public Health and Environmental Sciences, 3-1-27, Yukihiro-cho, Suma-ku, Kobe 654-0037, Japan,*²*Faculty of Engineering, Osaka Institute Technology, 5-16-1, Omiya, Asahi-ku,**Osaka 535-8585, Japan,* ³*Takarazuka Health and Welfare Office, 2-4-15,**Asahi-cho, Takarazuka 665-8567, Japan, and* ⁴*Atmospheric Environment Division,**Hyogo Prefectural Institute of Public Health and Environmental Sciences,**3-1-27, Yukihiro-cho, Suma-ku, Kobe 654-0037, Japan*

Nutrients and other pollutant runoffs from the stream in a forested area in the central eastern part of Hyogo Prefecture were investigated to estimate the specific pollutant loads for three years from 1999 to 2002. Small watershed located the east slope at Mt. Awaga which had no influence of artificial pollution was selected.

The mean stream flow volume was higher than that in Ikuno dam watershed located at a distance of 10 km of southwest selected in our previous report. The difference of slopes in the both areas causes the difference of stream flow volume. The water quality of the streams in the both area was usually stable in a low concentration, but it increased when the stream flow volume increased after the rain events. Significant differences were recognized between T-N and T-P loads in the both area. In particular, the difference of T-P loads among them was too big, and it was caused by the difference of the surface geology of each watershed. It was found from the balance between input loads by atmospheric deposition and output loads by stream flow from forest area that the forest area at Mt. Awaga watershed played a role as a purifier of T-N and TOC and as a discharger of T-P.

I はじめに

河川水域環境を保全するうえで、流域全体の水管理を行う必要がある。そのために流域に存在する種々な汚濁源からの汚濁物質の排出状況を的確に把

握することは重要なことである。これまで山林や農耕地等の面源（非点源ともいう）からの排出状況については、降雨などの自然的条件や植林・伐採あるいは農作業といった人為的条件によって大きく左右されるため十分に把握されていないのが現状である。特に山林域については調査頻度についてみても、週1回のもの¹⁾から数週間に1回のもの²⁾など、それぞれの研究方針に基づいて実施・評価されており、統一的方法が確立されていない。また、立地条件等が悪く試料採取におおくの労力がかかること、精度を高めるには長期にわたる高頻度の調査が必要であ

¹水質環境部 ²大阪工業大学工学部³宝塚健康福祉事務所 ⁴大気環境部

*別刷請求先: 〒654-0037 神戸市須磨区行平町3-1-27

兵庫県立健康環境科学研究センター

水質環境部 梅本 諭

ること等条件の厳しさにより、実施された例は少ない¹⁻⁴⁾。そのため、汚濁物質の排出負荷原単位についても統一されたものが無いのが現状である。筆者らは山林域からの排出負荷原単位を精度高く求めるため、人為的汚染の少ない山林域として兵庫県中央部に位置する市川流域上流の生野ダム銀山湖に流入する山林域小河川を対象に選定し、小集水域法により高頻度で長期にわたる調査を実施し、窒素やリン等の流出負荷量を求めてきている⁵⁻⁸⁾。

本研究では、兵庫県の中央東部に位置する粟鹿山東斜面の山林集水域を対象にして調査を行い、人為的汚染の影響をほとんど受けていない山林域の一例として、窒素およびリン等栄養塩類の流出負荷量を求めた。また、近接する生野ダム銀山湖へ流入する山林域小河川での汚濁物質流出量に関する研究で得られた結果との比較も行った。

II 材料と方法

1. 調査地点および調査時期

兵庫県にある一級河川である加古川の最上流部にある支川、稲土川の最上流部にある粟鹿山山林集水域（丹波市青垣町）を対象に調査を行った。当該集水域は粟鹿山の東斜面の標高280～962 mに位置し、集水域面積は4.1 km²で、植生はスギ・ヒノキの人工林（両者の比率はほぼ1:1）が主として分布し、アカマツ・サイゴクミツバツツジ群集やミズナラークリ群落がところどころ散在している⁹⁾山林域である。集水域内には居住者も農地もまったく無く、人的汚染源はほとんど認められない。表層地質は安山岩溶岩および火砕岩類が分布¹⁰⁾し、土壌は褐色森林土壌のみが分布¹¹⁾している。調査地点の概略をFig. 1に示す。

調査時期は1999年5月～2002年4月の3か年間で、原則として週1回の頻度で集水域の末端で河床に岩盤が露出しているところに測定点を定め、河川水を採取し分析に供した。

2. 分析項目および分析方法

分析項目および用いた分析方法をTable 1に示した。なお、調査地点における河川流量は、月1回実測（河川の流路断面積と流速を実施し流量計算式¹³⁾から算出）を行うとともに、他の日は河川内に水位測定点を定め、水位を測定した。月1回測定の実測流量（m³/sec）とそのときの実測水位（m）とから関係式を求め、水位測定点における水位H（m）から河川

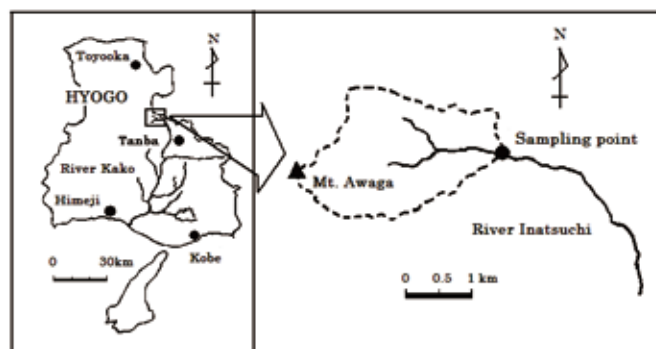


Fig.1 Schema of sampling point of forested watershed at Mt. Awaga catchment

○ District of forested watershed

Table 1 Measuring items and their methods

Item	Method
pH	Glass electrode method (Horiba M-13 pH meter)
EC	Electrode method (TOA conductivity meter CM-60S)
SS	Glass fiber filter paper method (Whatman GF/C)
NO ₂ -N	Calculation from the value of NO ₂ ⁻ measured by ion chromatography (Dionex DX-300)
NO ₃ -N	Calculation from the value of NO ₃ ⁻ measured by ion chromatography (Dionex DX-300)
NH ₄ -N	Indophenol blue absorptiometry (JIS K0102 ¹²⁾ 42.2) after filtration by Whatman GF/C
T-N	T-N analyzer (Yanagimoto TN-301P) method
PO ₄ -P	Molybdenum blue absorptiometry (JIS K0102 46.1.1) after filtration by Whatmen GF/C
D-P	The same method for T-P after filtration by glass fiber filter paper (Whatmen GF/C)
T-P	Potassium peroxodisulfate decomposition method (JIS K0102 46.3.1)
TOC	TOC analyzer (Shimadzu TOC-5000A) method

EC ; Electric Conductivity
SS ; Suspended Solids

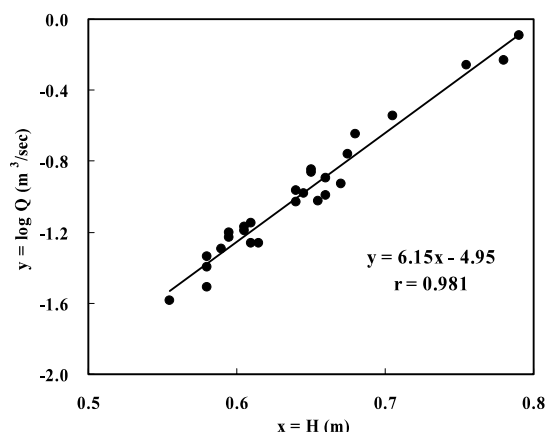


Fig.2 Relationship between water levels and flow rates at the sampling point

流量Q (m³/sec) を算出した。実測流量と水位の分布状況を Fig. 2 に示した。これらの分布から、最小二乗法で線形回帰して得られたH-Q関係式を求め以下に示した。

$$\text{Log } Q = 6.15 \times H - 4.95$$

(サンプル数 n = 27, 相関係数 r = 0.981)

日降水量は調査集水域の北西約7 kmにあるアメダス観測点(和田山)での値を用いた。また、調査地点の上流約200 mの地点に簡易型雨水採取装置¹⁴⁾を設置して、2000年5月~2002年4月の2年間、原則として1週間ごとにバルク降水を採取し、1か月ごとのコンポジット試料とした後、分析し、集水域への大気降水物による負荷量を求めた。

III 結果および考察

1. 降水量および河川流量

日降水量および河川流量を Fig. 3 に示した。年間降水量は1999年5月1日~2000年4月30日、2000年5月1日~2001年4月30日および2001年5月1日~2002年4月30日のそれぞれの1年間で1,856 mm, 1,223 mmおよび1,624 mmで、平均値は1,568 mmとなり当該地域における年間平均降水量と大きな違いは無かったが、調査年により20%前後変動していた。

河川流量は、0.02~3.26 m³/sec の範囲で変動しており、平均値は0.20 m³/sec であった。平均値から見た単位面積当たりの比流量は42.1 m³/ha/日となり、同時期に測定した生野地域における比流量(22.4~31.7 m³/ha/日)に比べて高かった。その一因としては、両集水域が分布する山林域の傾斜が、生野ダム集水域では108~172/1000であるのに対して、栗鹿山集水域では227/1000と約1.3~2.1倍と急傾斜になっており、降水が流出しやすくなっていることが考えられた。

2. 水質の変動状況

各水質の最大値、最小値および平均値を Table 2 に、T-N と T-P 濃度の変動状況を Fig. 4 に示した。

pH は7.20~7.83 の少しアルカリ側に偏っているがほとんど変動がなく、平均値は7.48であった。変動幅が少なく明瞭ではないが河川流量が多くなったときに低下する傾向が認められた。生野集水域における場合と同様に多量の降水により表層土壌との接触も少なくなり、土壌の緩衝作用の効果が無くなり、降水自体の低 pH の影響が現れ、低下したものと考えられた。

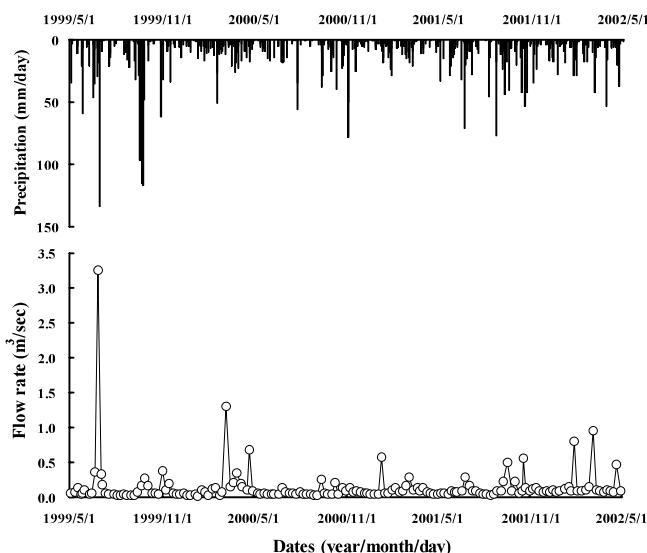


Fig.3 Daily variation of precipitations and weekly variation of flow rates
Precipitation: Data at Wadayama from AMeDAS, Japan Meteorological Agency

Table 2 The maximum, minimum and average concentration of each item in the river water at sampling point

(n = 160 for each item)

	pH	EC(mS/m)	SS(mg/L)	NO ₃ -N(mg/L)	NH ₄ -N(mg/L)
Max.	7.83	6.7	30	1.00	0.032
Min.	7.2	4.4	<0.1	0.18	<0.001
Ave.	7.48	5.8	0.4	0.40	0.007

	T-N(mg/L)	PO ₄ -P(mg/L)	D-P(mg/L)	T-P(mg/L)	TOC(mg/L)
Max.	1.64	0.019	0.019	0.061	2.5
Min.	0.12	0.007	0.007	0.007	0.2
Ave.	0.45	0.012	0.013	0.014	1.0

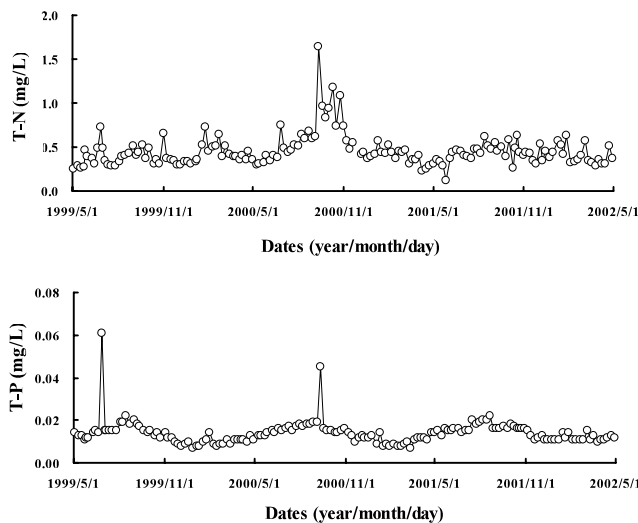


Fig.4 Weekly variations of T-N and T-P concentrations in river water

EC も 4.4~6.7 mS/m の狭い範囲で変動しており、平均値は 5.8 mS/m であった。河川流量が多くなれば低下していた。

SS 濃度は <0.1~30 mg/L の範囲で変動しており、平均では 0.4 mg/L であった。降雨により河川流量が増加したときのみ高くなり、これ以外の時にはほとんどが <0.1 mg/L と低濃度で、かつ安定していた。

無機態窒素のうち NO₂-N はすべての試料で不検出、NH₄-N は <0.001~0.032 mg/L、平均で 0.007 mg/L と低濃度であった。一方 NO₃-N は 0.18~1.00 mg/L、平均値で 0.40 mg/L と高く T-N の 70 % 以上を占めていた。T-N は、0.12~1.64 mg/L の範囲で変動し、平均値は 0.45 mg/L で、それらに占める割合が高い NO₃-N に強く影響されて、その変動とほぼ同様なパターンを示した。T-N および NO₃-N は河川流量が多くなれば高くなる傾向が認められた。

T-P は 0.007~0.061 mg/L の範囲で変動しているが、ほとんどが 0.01~0.02 mg/L の値で、河川流量が調査前日の降水の影響を受けて多いときに高濃度になった以外は比較的安定した水質を示していた。平均値は 0.014 mg/L であった。T-P に占める D-P の割合は、平均値で見ると 50~70 % であるが、河川流量が多く SS 濃度が高い降雨時後の値を除く平水時ではそのほとんどが D-P であり、また、D-P のほとんどが PO₄-P であった。

TOC は 0.2~2.5 mg/L の範囲で変動し平均値は 1.0 mg/L と低濃度であった。

いずれの水質項目も、平水時のように河川流量が比較的少ないときには低濃度で安定しているが、多量の降雨のあった後の河川流量が増加したときに高くなっていた。

同時期に調査した生野ダム銀山湖周辺の山林集水域における結果と比べて、T-N と T-P の 2 項目に統計的に有意の差が認められた。特に T-P については本調査結果の方が数倍高い値を示した。水質に大きく影響すると考えられる因子として、集水域の地質が考えられる。そこで、両調査地点における河川底質と集水域内に主に分布する岩石を採取し、酸分解抽出処理^{15,16)}後、Table 1 に示す T-P の分析法で測定比較した。なお、岩石試料は風化された表面をカッティングして取り除き、新鮮な状態とした後上記と同様に測定した。別途それらの主要成分をエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置（日本電子製エレメントアナライザー JSX-3220）を用いて測定し、底質と集水域の地質との関係について検討した結果、両者に明らかな関係が認められ、底質を用いることによ

り集水域表層地質が代替できることが分かった。なお、測定方法は足立ら¹⁷⁾の測定条件に準じて行った。また、底質中の T-P 濃度と河川水中の T-P 濃度の間に相関係数 0.97 の強い正の相関関係が得られ、河川水中のリン濃度は集水域の表層地質に影響を受けていることが明らかになった。

3. 汚濁物質流出負荷量の算定

河川流量および水質分析結果から、区間代表法¹⁾により 1999 年 5 月 1 日~2000 年 4 月 30 日、2000 年 5 月 1 日~2001 年 4 月 30 日および 2001 年 5 月 1 日~2002 年 4 月 30 日のそれぞれの 1 年間の T-N、T-P および TOC の単位面積当たりの年間流出量（比流出負荷量）、流出水量を算出した。その結果を Table 3 に示した。

降水量と流出水量から求めた降水の流出率は 57.6~78.1 % と計算され、一般的にいわれている流出率と比べて大きな違いはなかった。本調査のように降雨時の影響を考えずに週 1 回の定期的調査データから区間代表法で計算される比流出負荷量には、流量が多くかつ濃度が高い降雨の影響を含む日のデータが欠けている可能性があり過少評価されると推察されたが、降雨時を加味して調査した生野集水域における結果と同程度であり、得られた数字は妥当なものであると考えられた。

一方、大気降下物による負荷量は 2 年間の調査ではあるが、T-N、T-P および TOC それぞれについて 751 kg/km²/年、12.3 kg/km²/年および 1,840 kg/km²/年と算出された。これらの値と Table 3 の平均値から考えて、生野集水域では T-N、T-P および TOC いずれも浄化型であった^{18,19)}が、本調査対象である栗鹿山山林集水域は、T-P 負荷については付加型であり、T-N および TOC 負荷については、既に報告した硫黄成分²⁰⁾と同様に、浄化型であることが分かった。

Table 3 Specific runoff loads of T-N, T-P and TOC, and runoff flow volumes

Period	Runoff water volume	Specific runoff loads (kg/km ² /year)			Precipitation mm/year
	mm/year	T-N	T-P	TOC	
1999.5.1.~2000.4.30.	1,450	764	38.1	1,850	1,856
2000.5.1.~2001.4.30.	704	424	10.2	779	1,223
2001.5.1.~2002.4.30.	1,155	555	16.7	1,220	1,624
Ave.	1,103	581	21.7	1,280	1,568

Precipitation : Data at Wadayama from AMeDAS, Japan Meteorological Agency

IV 要 旨

人為的汚染の影響をほとんど受けていない山林域の例として、兵庫県の中央東部に位置する粟鹿山東斜面の山林集水域を対象にして調査を行い、窒素およびリン等栄養塩類の流出負荷量を求めた。また、近接する生野ダム銀山湖流入の山林域での調査結果と比較した。

得られた知見は以下のようである。

1. 河川流量は、0.02~3.26 m³/sec の範囲で変動しており、平均値は 0.20 m³/sec であった。平均値から見た単位面積当たりの比流量は生野地域に比べて高かった。両集水域が分布する山林域の傾斜の違いが一因と考えられた。
2. いずれの水質項目も、河川流量が少ないときには低濃度で安定しているが、多量の降雨のあった後の河川流量が増加したときに高くなっていた。
3. 生野ダム銀山湖周辺の山林集水域における結果と比べて、T-N と T-P の 2 項目に統計的に有意な差が認められた。特に T-P については差が大きかった。この原因は集水域の表層地質に影響を受けていることが分かった。
4. 降雨時の影響を考えずに週 1 回の定期的調査データから区間代表法で計算される比流出負荷量は、降雨時を加味して調査した生野集水域における結果と同程度であり、過少評価は認められなかった。
5. 大気降水物による負荷量と本調査で得られた山林集水域からの流出負荷量から、本粟鹿山林集水域は T-N および TOC 負荷については浄化型、T-P 負荷については排出型であることが分かった。

謝 辞

本研究を実施するに際し、調査方法やデータの取り扱い等について滋賀県立大学國松孝男教授、豊橋技術科学大学井上隆信教授に種々ご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

本研究の一部は、ひょうご科学技術協会および河川環境管理財団の助成金を受けて実施した。

文 献

- 1) 國松孝男, 須戸幹: 林地からの汚濁負荷とその評価, 日本水環境学会誌, **20**, 810-815(1997)
- 2) 生田和義, 藤山英保, 長井武雄: 山林小流域からの窒素流出に影響をおよぼす溪流流量と土壤温度, 日本土壤肥科学雑誌, **66**, 348-355(1995)
- 3) 國松孝男, 須戸幹: 森林溪流の水質と汚濁負荷流出の特徴, 琵琶湖研究所所報, No.14, 6-15(1997)
- 4) 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, 日本水環境学会誌, **18**, 909-916(1995)
- 5) 梅本諭, 駒井幸雄: 山林小河川における栄養塩類の濃度変動と流出特性, 国立環境研究所研究報告, No.144, 101-113(1999)
- 6) Komai, Y., Umemoto, S. and Inoue, T.: Estimation for amount of annual runoff of major ionic species by regression model in forested watershed, Proc. of 1st World Cong. of Internal. Water Assoc., CD-ROM NP149(2000).
- 7) Umemoto, S., Komai, Y. and Inoue, T.: Runoff characteristics of nutrients in the forest streams in Hyogo Prefecture, Japan, *Water Sci. and Technol.*, **44**(7), 151-156(2001).
- 8) Komai, Y., Umemoto, S. and Inoue, T.: Runoff Characteristics of major ionic species during rain events in forested watershed, *Water Sci. and Technol.*, **44**(7), 105-112(2001).
- 9) 環境庁: 第 3 回自然環境保全基礎調査(植生調査), 昭和 59 年度調査, 現地植生図兵庫県 16, 環境庁, 東京(1984).
- 10) 兵庫県: 兵庫県地質産図, 同解説書, 兵庫県, 神戸(1973).
- 11) 経済企画庁総合開発局: 土地分類図(表層地質図, 土壤図)兵庫県, 経済企画庁, 東京(1974)
- 12) JIS K0102(工場排水試験方法), 日本規格協会, 東京(2008).
- 13) JIS K0094(工業用水・工場排水の試料採取方法), 日本規格協会, 東京(2004).
- 14) 小林禧樹, 中川吉弘: 1 ヶ月間採取法による雨水中水銀のモニタリング, 兵庫県立公害研究所研究報告, No.23, 21-26(1991).
- 15) 環境庁: 底質調査方法(昭和 63 年 9 月 8 日環水管第 127 号 環境庁水質保全局長通知)(1988).
- 16) 駒井幸雄: 神戸大学博士論文 加古川流域と播磨灘におけるリンの形態と移動に関する研究, 21-39(1994).
- 17) 足立光司, 田結庄良昭: 神戸市東部における表層土壌の重金属汚染, 神戸大学発達科学部研究紀要, **8**(1), 89-102(2000).
- 18) 駒井幸雄: 森林集水域におけるリンの収支と流出特性, 日本水環境学会誌, **27**(9), 591-594(2004)

- 19) 梅本諭, 駒井幸雄, 竹田洋子, 井上隆信, 今井章雄: 山林集水域からの汚濁物質の流出について, 第33回環境保全・公害防止研究発表会講演要旨集, 64(2006).
- 20) Aikawa, M., Hiraki, T., Komai, Y., Umemoto, S. and Tokuchi, N. : *J. Jpn. Soc. Atmos. Environ.*, 43(1), 23-30(2008)