〈論 文〉

山林河川における流域特性と水質との関係について

福島 武彦* 松 重 一 夫*

On the Relationship between Basin Characteristics and River Water Qualities in Forest Watersheds

Takehiko FUKUSHIMA* and Kazuo MATSUSHIGE*

* National Institute for Environmental Studies, 16-2, Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

Abstract

Statistical analyses were applied to data obtained from 9 watersheds, almost all of them forested in order to elucidate the relationship among basin characteristics such as land cover, geologic features, proportion of natural forest cover, forest age, river water qualities, etc. The water quality variables measured during dry weather periods were classified into 3 groups, i.e., 1) $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, DTN, DON, DOC, dry weight, POC, PON, 2) Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , 3) $\text{PO}_4\text{-P}$, DTP, TP, Si. The items of group 1) have positive correlations with the portion of the basin which was eroded; those of group 2) have negative correlations with annual rainfall; those of group 3) have positive correlations with mean forest age. For rainy periods, the items of group 1) exhibited positive relationships with water discharge; therefore a survey considering the discharge change is necessary to evaluate their loads. Higher concentrations of dry weight, $\text{NH}_4\text{-N}$, etc. were observed in the basin with more area in tree plantations during rainy periods, but not during dry periods.

Key words: forested watershed, classification of water quality, eroded area, tree plantation, forest age

1. はじめに

山林からの汚濁負荷の発生量は農地、市街地など他の土地利用からのものと比べてかなり小さいが、土地被覆、樹木の種類などによって大きく変化すると言われている。たとえば、伐採の影響に関しては、Likensら¹⁾以来、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の顕著な上昇をもたらすことが多くの森林で示されているが²⁾、その程度は堆積有機物の違いなどに大きく影響される³⁾。また、樹種の違いの影響に関しては、地中流に含まれる $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が広葉樹林に比べヒノキ林で高いこと⁴⁾、琵琶湖流入河川の解析から植林地面積率とは $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は正の、 K^+ 、 Cl^- 等は負の相関関係に

あること⁵⁾、が報告されているものの、その影響が顕著に見られない場合もある⁶⁾。さらに、林齢の影響は、老齢化するほど $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高い^{7),8)}、低い⁹⁾、などの報告があり、その真相は不明とといっていい。

ここでは、森林の特性と河川水質の関係を解析することを目的に、淡水赤潮の発生が問題となっているダム湖流域において、植生、崩壊地比率等が異なる集水域を有する数河川を選び、晴天時、降雨時に水質調査を行い、両者の関係を解析した。

2. 調査、分析方法

奈良県十津川村内の風屋ダム流域に、人工林と天然林の比率や崩壊地面積比率といった流域特性が異なる

* 国立環境研究所 〒305 つくば市小野川16-2

9つの河川測定点(No.表示)とそれに対応する集水域(面積180~2,640ha)を設定した(Fig. 1)。地質、植生自然度、崩壊地位置(Fig. 1にあわせて示す)、林班図、年間降水量などの空間分布、集水域境界線、それぞれの林班での植林年ごとの人工林比率、伐採年ごとの天然林比率(Fig. 2)、人口、土地利用、家畜頭数などの数値情報を収集し、地理情報処理のソフトウェアであるPC-Mapping(マブコン社)を用いて、パソコン(DECpcLPx466d2メモリ32MB搭載)に取り込んだ。そうして、PC-Mapping上のポリゴンデータベース生成機能を用いて、9つの集水域の特性を整理した(Table 1)。この機能は異なるポリゴンデータ間の変換を面積比率で行うものである。崩壊地は航空写真等をもとに地図上に谷筋として主に線状に図示されている(昭和56年度国土庁土地局土地保全図を一部修正した

十津川村資料)。ここではそうした谷筋が密集している場合には、一帯の領域を崩壊地域とした。このため、面積比率としては実際のものと比べて過大になっている可能性がある。すなわち、地図上のデータをポリゴン化する際の読みとり誤差が存在する。また、人工林はスギ、ヒノキといった針葉樹、天然林はクヌギ、コナラなど広葉樹が大半である。

各集水域の特徴を整理すると以下のようにまとめられる。崩壊地面積比率は集水域No. 1, 2で85%前後と高いが、他の集水域ではNo. 6を除くと10%未満である。また、集水域1では花崗斑岩比率が高い(他は砂岩)、集水域No. 2, 8, 9では自然度9の比率が50%を上回る、集水域No. 3, 4, 5, 6, 7では他に比べて年間

Fig. 1 Measurement sites of river water quality (open circle), their watersheds, and eroded area (hatched). The outer boundary line indicates the region of Totsugawa-village

Fig. 2 Percentage of natural forest cover

Table 1 Characteristics of 9 basins

Basin No.	Area	Pop. D. ¹	Geological features			Er. R. ²	Forest Rate		AF ³	Degree of natural vegetation				Rainfall
			Sandstone	Granite	Others		Natural	Artificial		4	6	9	Others	
No.1	11.6	0.00	27.3	72.7	0.0	85.1	91.2	8.8	47.7	58.7	0.0	41.3	0.0	3,421
No.2	3.8	0.00	81.9	18.1	0.0	86.8	60.1	39.9	31.3	22.3	0.0	77.7	0.0	3,265
No.3	4.4	8.70	100.0	0.0	0.0	8.3	61.5	38.5	40.5	63.3	36.7	0.0	0.1	2,427
No.4	3.6	8.31	97.7	0.0	2.3	0.0	42.9	57.1	38.5	1.8	73.4	15.8	9.0	2,410
No.5	12.6	1.35	99.1	0.0	0.9	8.8	79.3	20.7	46.9	58.4	25.7	13.8	2.1	2,424
No.6	8.9	0.00	100.0	0.0	0.0	17.5	47.7	52.3	37.9	0.0	81.9	18.1	0.0	2,441
No.7	1.8	0.00	100.0	0.0	0.0	7.7	76.4	23.6	38.8	0.0	50.8	12.3	36.9	2,400
No.8	26.4	1.51	75.1	24.9	0.0	7.0	78.0	22.0	77.0	15.2	23.1	59.9	1.8	3,282
No.9	8.1	0.00	85.9	14.1	0.0	9.4	91.5	8.5	78.9	30.0	0.0	70.0	0.0	3,347
	km ²	capita km ²	%	%	%	%	%	%	y	%	%	%	%	mm y ⁻¹

*1; Population density, *2; Eroded rate, *3; Age of forest

Fig. 3 Changes in daily rainfall and air temperature

Table 2 Summary of water quality analysis for dry weather periods

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
DW	0.61±0.73	0.54±0.06	0.20±0.04	0.28±0.10	0.17±0.09	0.29±0.19	0.30±0.26	0.11±0.06	0.29±0.06	mg l ⁻¹
NO ₃ -N	180±16	215±11	84±51	86±23	85±54	84±31	105±31	104±21	86±13	μg l ⁻¹
NH ₄ -N	5±5	8±3	3±3	3±2	3±3	3±3	2±3	3±3	4±5	μg l ⁻¹
DON	79±78	42±21	23±38	15±23	18±22	10±14	25±20	21±17	13±17	μg l ⁻¹
PO ₄ -P	7±2	3±1	5±1	8±1	3±1	2±1	3±1	8±0	17±3	μg l ⁻¹
DCOD	0.4±0.3	1.1±0.8	0.7±0.8	0.6±0.5	0.6±0.7	0.7±0.6	0.6±0.6	0.7±0.7	0.6±0.7	mg l ⁻¹
DOC	0.60±0.29	0.43±0.17	0.18±0.07	0.18±0.05	0.20±0.05	0.18±0.04	0.14±0.01	0.25±0.10	0.16±0.02	mg l ⁻¹
Cl	1.25±0.01	1.22±0.06	1.42±0.11	1.53±0.21	1.24±0.07	1.25±0.13	1.45±0.11	1.33±0.06	1.25±0.09	mg l ⁻¹
Ca	4.48±0.26	2.41±0.15	10.74±0.76	11.03±0.77	8.64±0.73	8.07±0.62	12.85±1.83	3.87±0.10	3.5±0.21	mg l ⁻¹
Discharge	3.89	1.14	1.26	2.77	0.35	2.54	1.00	2.34	3.00	mm d ⁻¹

降水量が少ない、などの特徴を持つ。なお、自然度4は二次草原(背の低い草原)、自然度6は造林地、自然度9は極相林またはそれに近い群落構成を示す天然林を表す。さらに、集水域 No. 3 と No. 4, No. 5 と No. 6 はそれぞれ隣り合う流域であり、流域特性も似ている点が多いが、集水域 No. 3, 5 では天然林比率が、集水域 No. 4, 6 では人工林比率が高い。林齢は20年以下のものが集水域 No. 2 で全体の65%を占めるが、他の集水域では30%未満である。人口密度は最大(集水域 No. 3)でも8.7人 km⁻²と少なく、栄養塩の原単位を考慮すると人からの負荷は無視しうることがわかる。また、家畜、田畑、事業場からの負荷も極めて小さいと推定される(十津川村環境保全基礎調査)。

河川水質は晴天時ならびに降雨時に調べた(Fig. 3)。まず晴天時河川調査は、日降雨量25mm以下の日が2週間以上続いた後の晴天日を選び、3回行った(D1; 1994年2月3日, D2; 3月30~31日, D3; 6月6~7日)。また、降雨時河川調査は5月11~12日(R1; 合計降水量43mm)にNo. 5, 6でそれぞれ7回、6月13~14日(R2; 35mm)に同じくNo. 5, 6でそれぞれ12, 13回のサンプリングを1時間間隔で行った。No. 2, 9では各降雨期間にそれぞれ1回サンプリングを

行った。また、R2ではNo. 5の地点で降水を採取した。

河川地点では水をサンプリングするとともに、流量(建設省水文研究会⁹⁾)、水温を測定した。汜過はGF/Fフィルター(ワットマン社)で行った。乾燥重量(DW)は汜過後のGF/Fフィルターを80°C 4時間乾燥後に再秤量することから、懸濁態炭素濃度(POC)、懸濁態窒素濃度(PON)はCHNコーダー(柳本MT-5)、NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、PO₄-Pは汜液を、溶存態窒素(DTN)、溶存態リン(DTP)は汜液に、全リン(TP)は原液にそれぞれペルオキシ二硫化カリウムを加えて加圧分解後に、オートアナライザー(テクニコン社Traacs-800)で測定した¹⁰⁾。溶存有機態窒素(DON)はDTNからNO₃-N、NO₂-N、NH₄-Nの和を差し引いて求めた。また、化学的酸素要求量(COD)、溶存態COD(DCOD)はJIS法、溶存有機炭素(DOC)は乾式酸化法(島津TOC-5000)、UV吸光度は1cm石英セルを用いて260nmの波長で(Beckman DU-7)、Cl⁻、SO₄²⁻イオンは陰イオンクロマトグラフィー(横河IC7000シリーズ)、Na⁺、Mg²⁺、K⁺、Ca²⁺イオンと溶存態Si濃度はICP(Jarrell-Ash Atomcomp Model-975)により測定した。

Table 3 Correlation coefficients among watershed characteristics and water qualities

	Erod	RNF	AF	DW	NO ₃ -N	PO ₄ -P	DCOD	DOC	Cl
Erod ^{*1}	1.00								
RNF ^{*2}	0.19	1.00							
AF ^{*3}	-0.30	0.62	1.00						
DW	0.91*	0.12	-0.39	1.00					
NO ₃ -N	0.96*	0.16	0.29	0.85*	1.00				
PO ₄ -P	-0.22	0.44	0.80*	-0.11	-0.23	1.00			
DCOD	0.28	-0.43	-0.29	0.09	0.41	-0.30	1.00		
DOC	0.93*	0.30	-0.14	0.82*	0.87*	-0.12	0.00	1.00	
Cl	-0.54	-0.43	-0.22	-0.34	-0.42	-0.03	-0.21	-0.46	1.00

*1; Eroded area rate, *2; Rate of natural forest, *3; Averaged age of forest

Asterisks (*) indicate significance at $P < 0.01$.

3. 結果と考察

3.1 晴天時の河川水質

Table 2 には晴天時 3 回の水質測定結果の平均と標準偏差を示す。変動係数は、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻等のイオン類で数%、NO₃-N、PO₄-P、DOC 等で数十%、NH₄-N、DON、COD 等で100%程度である。また、DON、DOC では 6 月の方が 2、3 月よりかなり高い傾向にあるが、他の項目では顕著な違いが見られなかった。時期的な違いより地点差の方が一般には大きかったため、以下には平均値を用いて解析を行う。なお、**Table 2** 中には晴天時の比流量を示すが、各集水域によって大きく異なることがわかる。一部の河川では測定地点でかなりの水が伏流しており、これが比流量の差の主たる原因である。

次に、流域特性として流域面積、人口密度、地質特性として砂岩比率、崩壊地面積比率、天然林比率、平均林齢、植生自然度 4、6、9 それぞれの比率（その他の自然度の面積比率は極めて小さいので省略）、年間降水量の10項目と、水質として DW、POC、PON、NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、DTN、DON、PO₄-P、DTP、TP、COD、DCOD、DOC、Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、Si、UV 吸光度の22項目、比流量（流量/流域面積）の合計33項目に関して、9 地点の平均値をサンプルとして相関行列を求めた。主要な項目間についての相関行列を **Table 3** に示す。また、それをもとに変数項目のクラスター分析を行い（クラスターの併合の指標は平均距離）、**Fig. 4** のようなトリート図を得た。主成分分析、主成分回帰分析の結果も含めて以下のようなことが言える。

クラスター分類から水質は、(1) NO₃-N、NH₄-N、DTN、DON、DOC、DW、POC、PON、(2) Ca²⁺、Mg²⁺、

Fig. 4 Classification of basin characteristics and water qualities by means of cluster analysis

Na⁺、K⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、(3) PO₄-P、DTP、TP、Si の 3 グループに分かれる。その他の水質、比流量、流域面積、人口密度、天然林面積比率といった項目はこうしたグループの水質とも、その他のものとも相関が極めて低く、地点間の変化の傾向が明白ではなかった。流域特性との関係では、グループ(1)の水質は崩壊地面

Table 4 Correlation coefficients (r ; a/b: a vs. b) and partial correlation coefficients (rP ; a/b-c: a vs. b exclusive of c influence)

(1)				
W	r ; Erod/W	rP ; Erod/W-Sand	r ; Sand/W	rP ; Sand/W-Erod
NO ₃ -N	0.96	0.93**	0.63	-0.26
NH ₄ -N	0.79	0.84**	0.33	-0.56
DON	0.85	0.67*	0.69	0.77*
DW	0.91	0.84**	0.66	0.01
(2)				
W	r ; Rain/W	rP ; Rain/W-Nat9	r ; Nat9/W	rP ; Nat9/W-Rain
SO ₄	-0.92	-0.62*	-0.89	-0.35
Mg	-0.83	-0.34	-0.83	-0.36

Erod; Eroded area rate, Sand; Sandstone rate, Rain; Annual rainfall, Nat9; Areal rate of degree 9 of natural vegetation

* and ** indicates significance at $P < 0.1$ and $P < 0.01$, respectively.

積 (Erod), 砂岩面積 (Sand) 比率と正の, グループ (2)は年間降水量 (Rain), 植生自然度 9 (Nat9) と負の, グループ(3)は林齢と正の相関関係を有していることがわかった。

次に, Erod と Sand, Rain と Nat9 は相互に高い相関関係をそれぞれ有しているので, どちらの因子の方が各グループの水質に影響が大きいのか偏相関分析で調べた (Table 4)。この結果, グループ(1)の水質には崩壊地面積比率, グループ(2)の水質には年間降水量の影響が本質的であると, 偏相関係数の有意性検定から推測された。Fig. 5, 6, 7 にはそれぞれ崩壊地面積比率, 年間降水量, 林齢の小さい順に地点を並べて, 水質の平均値の変化をあわせて図示している。3回の測定の標準偏差もあわせて図示した項目もあるが, その大きさは流域特性による変化の大きさと比べ小さく, 今回の解析で得られた関係がどの時期にも成立していることを示している。

まず, 崩壊地面積比率と NO₃-N との正の相関関係は, 皆伐により NO₃-N の流出量が増大するという現象と関連がありそうである¹⁾。この原因としては, 土壌温度の上昇に伴う有機物の分解量の増加, 樹木の吸収量の低下などが挙げられている¹¹⁾。植生の回復のしやすさ (崩壊地では極めて難しい), 地中での残根の存在 (皆伐地), 等の違いが崩壊地と皆伐地にあるものの, 生きた樹木が少ないという点では両者は似ているため, 土砂流出量の増加に伴う懸濁物質濃度の増大とともに, NO₃-N 濃度の増加が予想され, 先の結果を説明する。NO₃-N 以外に NH₄-N, DON, DOC も崩壊地面積率と正の相関関係にあり, 土地被覆, 物理, 化学, 生物学的な土壌の状態が溶存無機, 有機成分の土壌中での動態に大きな影響を与えていることが推測される。なお, DTN が高いのは NO₃-N が, POC, PON が高いのは DW が高いからである。

Fig. 5 Changes in DW, NO₃-N, NH₄-H, DON, and DOC concentrations in order of the proportion of eroded area **Fig. 6** Changes in Cl⁻ and Ca²⁺ concentrations in order of annual rainfall **Fig. 7** Change in PO₄-P concentrations in order of mean age of forest

次に, グループ(2)の水質と年間降水量の関係は, 土壌からの供給量とそれを希釈する水量との関係から導かれた可能性が高い。こうした水質項目では河川水質と降雨水質との比が10程度と高く, また比流量との相関が負であることによってこのことは裏付けられる (Cl⁻; -0.44, SO₄²⁻; -0.64, Ca²⁺; -0.57, Mg²⁺;

−0.55等)。しかし、年間降水量が多い No. 1, 2, 8, 9 では花崗岩比率が高いといった関係もあるので、地質も影響を及ぼしているものと考えられる（砂岩比率との相関係数； Cl^- ：−0.39, SO_4^{2-} ：−0.66, Ca^{2+} ：−0.59, Mg^{2+} ：−0.55）。また、林齢とリンの関係については報告例はないが、林齢と $\text{NO}_3\text{-N}$ との関係^{7),8)}と同様に、森林の遷移に伴う物質循環の変化に関係している可能性がある。

なお、天然林比率と水質との相関は晴天時にはあまり明白ではなかった。この関係については、流域特性が天然林・人工林比率のみ大きく異なる近接した2地点の比較（No. 3 と No. 4, No. 5 と No. 6）を行うこととし、降雨時も含めて次節で解析を行う。

Fig. 8(1) Relationship between discharge and DW concentration during a rainy period

Fig. 8(2) Relationship between discharge and $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration during a rainy period

3.2 降雨時の水質

降雨時には、流量と DW (Fig. 8(1)), $\text{NH}_4\text{-N}$ (Fig. 8(2)), DOC (No. 5, R2, $r=0.88$), SO_4^{2-} (No. 5, R2, $r=-0.87$) 等に有意な相関関係が見られた。その傾向は、海老瀬が霞ヶ浦に流入する山地河川で観測したものと同様であった¹²⁾。このため、降雨時の平均水質は流量重み付きの平均値とした。

次に、Fig. 9 には晴天時平均水質に対する降雨時平均水質（R1 と R2 の平均）の比を16の水質について示す。その比は、 Ca^{2+} , Mg^{2+} 等のイオン類で0.9程度になることを除くと、1を上回り、降雨時の方が晴天時より高濃度となった。特に、DW, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, TP, DTP, DOC では多くの地点で2を上回った。こうした傾向は霞ヶ浦に流入する山地河川でも観測されている¹³⁾。 $\text{NO}_3\text{-N}$ での濃度上昇は表層土壤中に蓄積された無機塩が降雨時に降水に押され、流出するためと考えられている¹⁴⁾。すなわち、こうした水質項目では降雨時の水質をかなり綿密に測定する必要があるといえよう。

隣り合う集水域 No. 5, 6 で、晴天時とあわせて降雨時にどの程度水質が異なるかを比較したのが Fig. 10(1), (2)である。DW, $\text{NH}_4\text{-N}$ とも晴天時の水質差は少ないが、降雨時になると No. 6 の方が No. 5 と比べかなり高い水質濃度を示す。他の水質では、DOC で晴天時も含めて No. 5 の方が高めであることを除くと、差はほとんど見られなかった。大きく異なる比流量の影響の可能性も否定できないが (Table 2), 流域特性としての違い、すなわち人工林比率の差の影響が原因している可能性が強い。琵琶湖流入9河川についての流域特性と水質測定結果の統計解析では、(1) 広葉樹

Fig. 9 Radar chart of the ratios of discharge-averaged water quality concentrations during rainy periods to the mean of those during dry weather periods

Fig. 10 Comparisons of water quality between the dry weather periods (D1, D2, D3) and the rainy periods (R1, R2)
(1) DW, (2) NH₄-N

林面積率と NH₄-N, NO₃-N, PO₄-P, K⁺, Cl⁻等は反比例の関係にあり, (2) 植林地面積率とは NH₄-N, NO₃-N, PO₄-P は正の, K⁺, Cl⁻等は負の相関関係にあることを示されている⁵⁾。また, 岩坪・堤⁴⁾は広葉樹林とヒノキ林を比較して, 地中流に含まれる NH₄-N, NO₃-N 濃度が後者の方が高いことを示した。この理由としては, スギ, ヒノキの方が樹表面にエアロゾルを吸着しやすいこと, リター層の厚さが広葉樹林の方が厚いこと, を考えている。本調査では, NO₃-N 濃度では差が見られず, NH₄-N 濃度では降雨時のみ, 人工林比率が高いとその濃度が高まる傾向が観察され, その特性は既報の結果と一致した。しかし, こうした特性の一般性を確かめるためには, 多くの地点での長期

的な調査が必要であるだろう。

なお, 流量の時系列では, No. 6 の R2 のみ, 際だったピークが観察された(最大値/平均値は R1; No. 5: 1.9, No. 6: 1.5, R2; No. 5: 1.5, No. 6: 3.1)。Fig. 10 (1)に示した DW の R2 での大きな差はこのピーク時の高濃度に基いている。NH₄-N では R1 の方が R2 より差が大きいが, これは流量平均値の No. 5 と No. 6 の差が, R2 より R1 で大きいためであろう (R1; No. 5: 0.25, No. 6: 1.69, R2; No. 5: 0.63, No. 6: 1.22 m³・s⁻¹)。すなわち, DW ではピーク流出量, NH₄-N では平均的な流出量の大小がその濃度に影響を与えていると考えられる。

4. 最後 に

人為的な負荷の影響がほとんど無視される地域において, 土地被覆, 土壌状態, 地質, 樹木, などが異なるいくつかの河川流域を対象に, 晴天時, 降雨時に河川水質を測定し, 流域特性との関係を解析した。この結果, 崩壊地面積率が高いと懸濁物質濃度や NH₄-N, NO₃-N 等の溶存窒素濃度が高くなること, 年間降水量が増加すると Ca²⁺, Mg²⁺, などのイオン濃度が減少すること, 林齢が増すとリン濃度が増加することなどの傾向が明らかになった。懸濁物, NH₄-N は下流の貯水池へ流入すると淡水赤潮が発生しやすい環境を生み出すといわれているので, その発生を抑制するためには崩壊地を減少させる必要がある。

また, 降雨時には DW, NO₃-N, NH₄-N などの濃度が増加することから, 山林からの負荷を考える場合には降雨時を的確に評価する必要があることを示した。

最後に, 人工林と天然林では降雨時に前者で NH₄-N が高くなった。この結果から, 一概に人工林の増加を抑制すべきであると断定はできないが, 下流への負荷をなるべく少なくするとの観点から人工林における適正な森林管理方法を検討する必要があるであろう。

謝 辞

本研究の実施に際し, 資料を提供していただいた十津川村役場に記して謝します。また, サンプルの採取, 送付にご協力いただいた(株)環境コーポレーションに感謝いたします。

(原稿受付 1995年 2月10日)

(原稿受理 1995年 7月28日)

参 考 文 献

- 1) Likens, G.E. et al. (1970) Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem, *Ecological Monograph*, 40, 20

- 47.
- 2) Vitousek, P.M. and Melillo, J.M. (1979) Nitrate losses from disturbed forests: patterns and mechanisms, *Forest Science*, **25**, 605-619.
 - 3) Sollins, P. and McCorison, F.M. (1981) Nitrogen and carbon solution chemistry of an old growth coniferous forest watershed before and after cutting, *Water Resources Research*, **17**, 1409-1418.
 - 4) 岩坪五郎, 堤利夫 (1968) 森林内外の降水量の養分量について(3)流亡水中の養分量について, 京大演習林報告, **40**, 140-155.
 - 5) 浜端悦治 (1989) 流域・水質評価モデル, 国松孝男・村岡浩爾編河川汚濁のモデル解析, pp.185-193, 技報堂出版, 東京.
 - 6) 大類清和, 生原喜久雄, 相場芳憲 (1994) 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, **76**, 383-392.
 - 7) Vitousek, P.M. (1977) The regulation of element concentrations in mountain streams in the north-eastern United States, *Ecological Monograph*, **47**, 65-87.
 - 8) 広瀬顕, 岩坪五郎, 堤利夫 (1988) 森林流出水の水質についての広域的考察(1), 京都大学演習林報告, **60**, 162-173.
 - 9) 建設省水文研究会 (1985) 水文観測, pp.294, 全日本建設技術協会, 東京.
 - 10) 大槻晃, 岩熊敏夫, 河合崇欣, 相崎守弘 (1981) 霞ヶ浦における富栄養化現象の傾向, 国立公害研究所研究報告, **51**, 1-10.
 - 11) 塚本良則編 (1992) 森林水文学, pp.319, 文永堂出版, 東京.
 - 12) 海老瀬潜一 (1988) 流域からの無機イオン流出原単位と流出特性, 国立公害研究所研究報告, **116**, 111-131.
 - 13) 海老瀬潜一 (1988) 小河川流域の流出負荷量と流出特性, 国立公害研究所研究報告, **116**, 132-147.
 - 14) Hirata, T. and Muraoka, K. (1988) Runoff of dissolved materials in Tsukuba experimental forest basin. in Proceedings of 6th Congress Asian and Pacific Regional Division, pp.113-120, IAHR.