

陸域から河川への溶存物質の流出量とその流出特性

— 神川上流域 (菅平高原) について —

渡 辺 義 人* · 山 本 満 寿 夫*

陸域から水域への物質の流出機構の解明は、地球化学的な立場からも、又環境科学的な面においても、水域の物質動態に関する研究を行なう上で、最も基本的な課題である。

現在、著者らは、上記の認識にたつて、菅平高原を集水域とする神川上流部において定期的に調査を行ない、陸域からの物質の流出機構について研究を進めているが、本報文ではこのうち、N、Pを含む主要無機溶存物質の流出量とそれらの流出特性を中心に報告する。

調査時期および調査地点

調査はいずれも1982年に行なったものである。

定期的な調査は、6月から12月にかけて、月に1~3回、計13回行なった。又降雨時の調査は、6月3日の8時から18時まで、経時的に行なった。そのほかに、小流域別流出調査を8月6日に行なっている。なお、晴天時の調査例として、主に6月25日のデータを用いている。

図1は、各調査地点と、A地点を基準点とする流域界を示したものである。地点Aは、神川が菅平ダム湖に流入する直前の大洞橋である。

調査地点B、C、Dは、地点Aにおける流域をさらに小流域に分けるために選ばれた基準点でもある。

地点Bは、神川の上流、羽根尾付近である。この流域には、菅平高原に存在する350haの農地の大部分が含まれている。この農地はすべて高原野菜畑である。地点Cは、神川の支流の一つである唐沢の下流で、“唐沢の滝”の下にあたる。この川筋をはさんで、ホテルなどの多くの宿泊施設があり、菅平高原の中でも、生活廃水の排出量が最も大きい地域である。この上流域は根子岳の山腹にあたり、頂上付近まで草原が広がっている。地点Dは、もう一つの支流である大明神沢の下流で、神川と合流する直前である。この流域は、菅平高原の中では、人為の影響が最も小さい。その源流は四阿山に発する。このように三つの基準点でわけられた各小流域は、それぞれ異なった自然的、社会的条件をそなえている。

各地点における流域面積(桜井ら、1982)は表1の通りである。

表1. 各地点における流域面積

河 川 (地点)	流域面積 km ²
神川・大洞橋 (A)	28.8
大明神沢 (B)	5.9
神川・羽根尾 (C)	11.8
唐 沢 (D)	8.8

調査および測定方法

定期的な調査は主に午前中に行ない、A、B、C、Dの4地点で採水した。降雨時の調査では、8時から12時にかけて、およそ1時間毎に採水した。雨量は長野測候所の長野気象月報によった。A地点の流量は、菅平ダム発電事務所の観測データを使わせていただいた。なお、8月6日の小流域別調査における流量は、地点毎に直読式の回転流速計により実測した値を用いた。

採水した各試水は、実験室にてGF/Cにより濾別し、その濾液について分析を行なった。各成分の分析法を表1に示す。

表2. 各成分の分析法

D T N (溶存態全窒素) : アルカリ性過硫酸カリウム加圧分解, 紫外部吸光法
N O ₃ - N : ブルシン法
N H ₄ - N : インドフェノール法
D T P (溶存態全りん) : 酸性過硫酸カリウム加圧分解, アスכולビン酸還元モリブデン青法
P O ₄ - P : アスכולビン酸還元モリブデン青法
Cl : チオシアン酸水銀法
S O ₄ : トリウム-モリン錯体を利用する吸光光度法
Na, K : 炎光光度法
Ca, Mg : 原子吸光法

降雨時のSS量は、試水をよく懸濁したのち、100mlずつ定量的にピーカーにとり、2昼夜、低温で静置し、デカンテーションにより残渣を集め、加熱乾燥して秤量した。又SSの一部については、CHNコーダーにより、N含量を分析した。

* 信州大学繊維学部

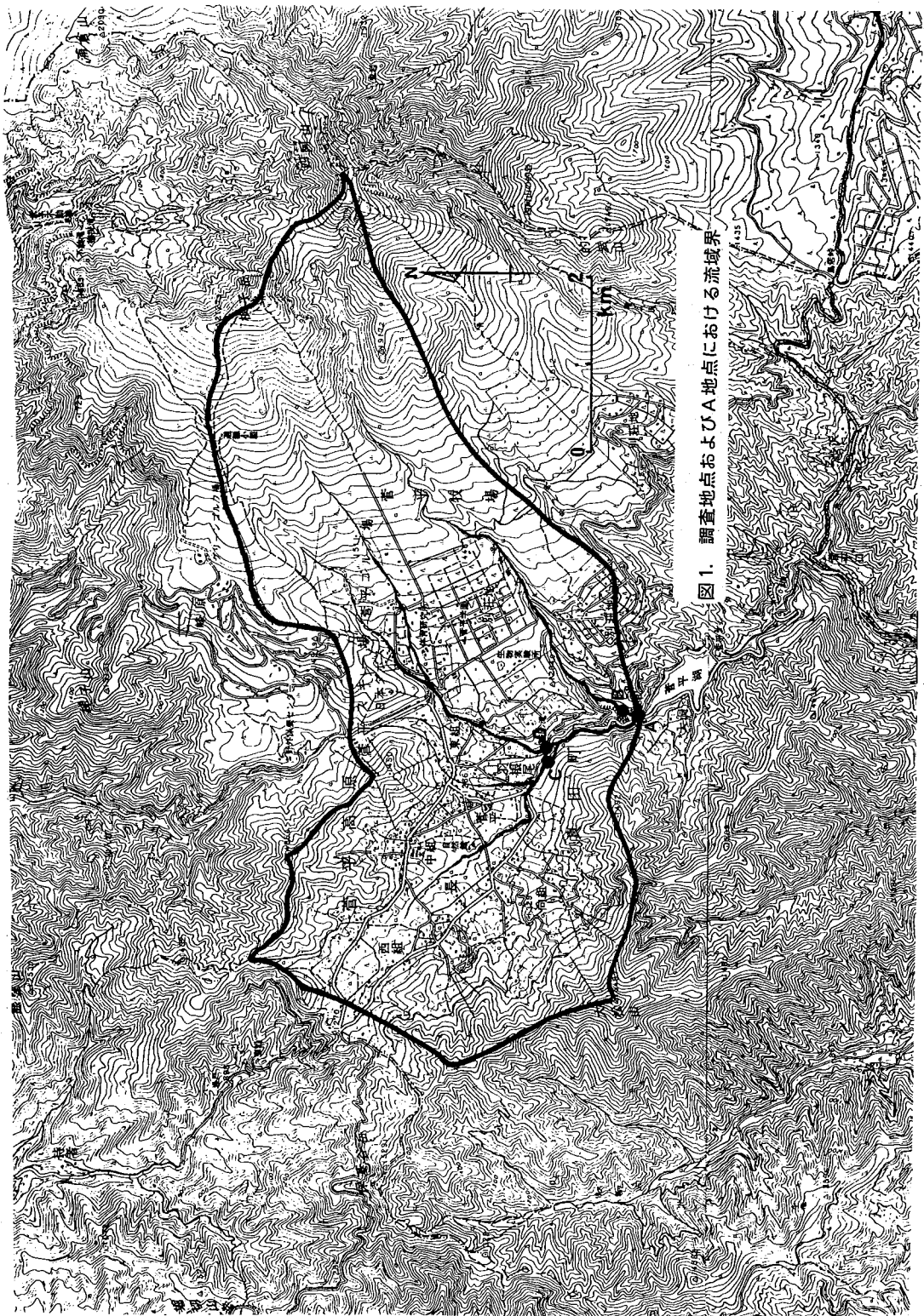


図1. 調査地点およびA地点における流域界

結果および考察

流量および溶存物質濃度の変動傾向

図2は、流量とともに、A地点における6月から12月までの溶存物質濃度の変動傾向を示したものである。流量は1日おきに図示してある。又図3には、本調査期間における10mm以上の降雨時の雨量が示されている。

流量についてみると、平常時では $1\text{ m}^3/\text{s}$ 前後で、降雨の少ない日が続いた時期では $0.6\sim 0.8\text{ m}^3/\text{s}$ である。流量が $1.5\text{ m}^3/\text{s}$ を越えるのは、図3からわかるように、多くは当日又は前日に20mm以上の降雨があった場合である。ちなみに流量が $3.1\text{ m}^3/\text{s}$ と高かった6月3日の雨量は43mmである。又8月2日と9月12日のピークはいずれも台風の影響によるものである。全体の傾向としては、降雨が多かった8月、9月に流量が多く、秋から冬にかけて減少しており、降雨の有無、雨量の大小が、その変動にきわめて敏感に反映していることがわかる。

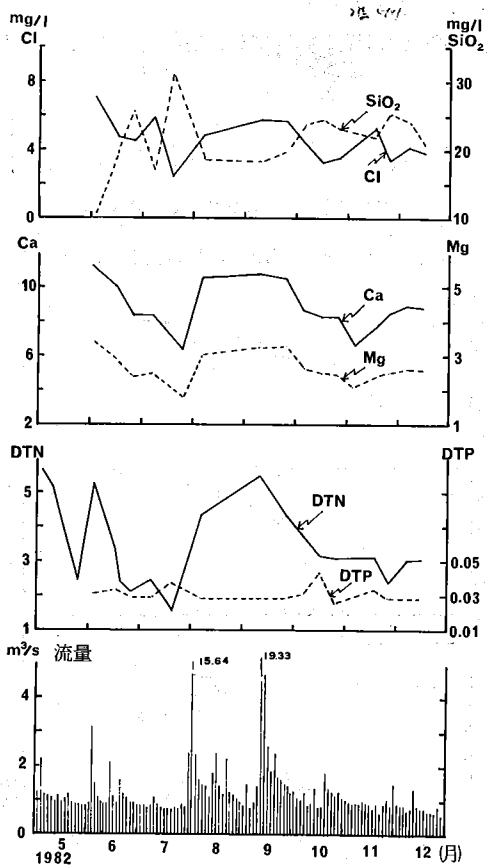


図2. 神川A地点(大洞橋)における流量および各溶存物質濃度(mg/l)の変動傾向

次に、各溶存物質の濃度についてみると、DTPおよび SiO_2 を除く、DTN、Ca、Mg、Clの4成分の変

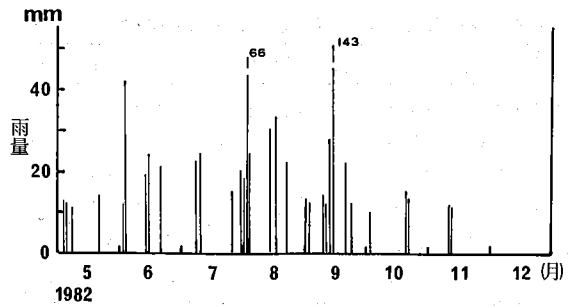


図3. 菅平高原における10mm以上の降雨日の雨量

動傾向はおたがいに良く似ており、その傾向は流量の変動傾向と正の関係にある。変動中はDTNが最も大きく、最小値と最大値の比は10倍以上にもなる。 SiO_2 濃度の変動は、上記4成分と異なり、流量が減少すると濃度が高くなり、流量が増加すると低くなる傾向を示し、流量の変動と負の関係にある。DTPは調査期間を通じて、 0.03 ppm 前後と変動が少く、流量の変動による影響はほとんどみられない。このように、成分によって、流量の変動と濃度の変動傾向が異なるという現象は、あとで述べるように、降雨時における両者の経時変化においても見られるところである。

図4は、その濃度の変動が、流量のそれと正の関係にある4成分のうち、DTNとClについて、両者の流出量と流量の関係のみたもので、かなり良い相関がみられる。

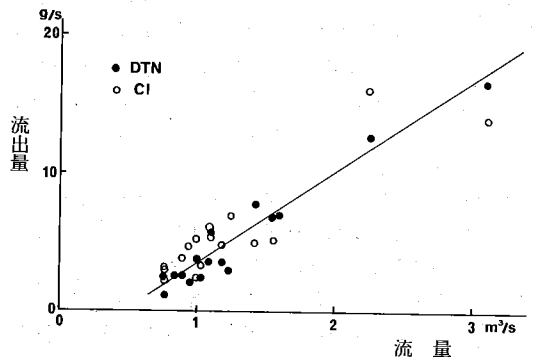


図4. DTNおよびClの流出量と流量との関係(A地点)

表3は、各調査地点の溶存物質の調査期間における平均濃度を示したものである。D地点では SiO_2 を除き、他の成分はすべて、他の地点にくらべて最も低く、B地点ではDTN、Cl、Ca、Mgが圧倒的に高い、又D地点ではDTPと SiO_2 において最も高く、他の成分はC地点に次いで高い値となっている。このように、各地点における溶存物質の濃度には特徴的なながい認められ、それぞれの流域の特性がよく現われている。

表 3. 各調査地点における溶存物質の平均濃度* (mg/l)

調査地点	DTN	DTP	Cl	Ca	Mg	SiO ₂
神川・大洞橋A	3.38	0.036	4.4	8.7	2.6	21.8
大明神沢B	0.83	0.021	1.5	5.6	1.3	24.0
神川・羽根尾C	6.69	0.031	8.0	13.5	4.7	12.2
唐沢D	1.65	0.041	2.7	6.2	1.7	27.3

1982年6月から12月までの13回の実測値平均

降雨時におけるSSおよび溶存物質濃度の経時変化

図5は1982年6月3日の降雨時における雨量と流量の経時変化である。図6～7は同日の8時から18時までのSSおよび各溶存物質濃度の経時変化を示したものである。

雨量は調査前日の夕刻から降り始め、調査を開始した直後の8時から9時にかけて急に雨足が激しくなり、9時すぎに最大雨量10mm/時に達している。その後、雨は弱まり、16時頃に小止み状態になっている。この日の総雨量は43mmである。

流量は、調査開始時には晴天時の約3倍程度であったが、雨が激しくなるにつれて増加し、雨量が最大になった時刻よりもややおくれでピークに達している。

図6のSS濃度の経時変化をみると、雨が激しくなるにしたがって、SS濃度は急激に増大し、そのピークは流量の最大値に達する時刻にはほぼ一致する。その後雨足が弱まるとともに急速に減少している。このように、SS濃度の変化傾向は、雨足の早さの度合とかなりよく一致しており、降雨の強度と、土砂の表面流出量に強い相関があることを示唆している。当然ながら、懸濁態の各物質の変動は、このSSの変化傾向に一致するものと思われる。

SiO₂についてみると、図2に示したのと全く同様に流量が増加するにつれて濃度は低下し、流量が減少しはじめると再び上昇するという変動傾向を示している。なお、図の右側には、比較のために、晴天時の濃度が記されている。このように、流量が増加すると濃度が減少するのは、雨水による希釈効果が、洗い出しによるSiO₂の溶出量を上まわるためであり、いわば希釈型の変動を示したもので、最小値は晴天時のほぼ1/3程度に低下している。

PO₄-Pは、不規則な変化を示しているが、全体的には減少傾向にあり、晴天時の濃度より高くなることはなかった。又、図2の場合と同様、流量の変動に対する影響はほとんど受けていない。これはPが土壌粒子に強く吸着されているため、降雨の洗い出しにより、溶存態のPとして溶出する割合が非常に少ないことを示すものである。

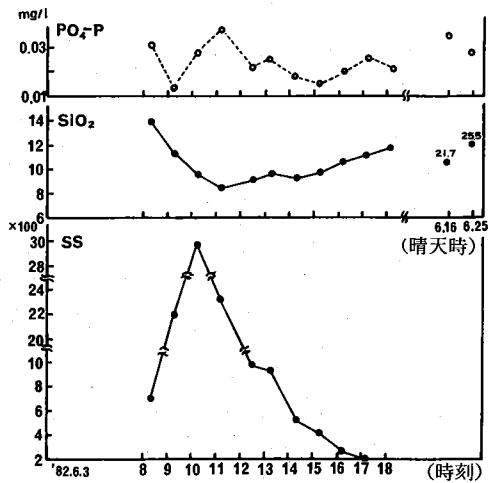


図 6. 降雨時におけるSS, SiO₂およびPO₄-P濃度の経時変化 (A地点)

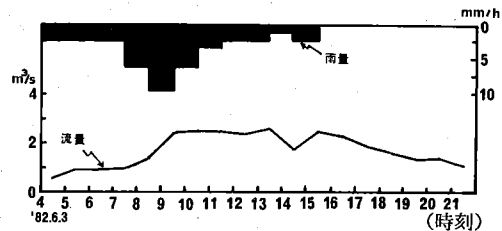


図 5. 雨量および流量の経時変化 (A地点)

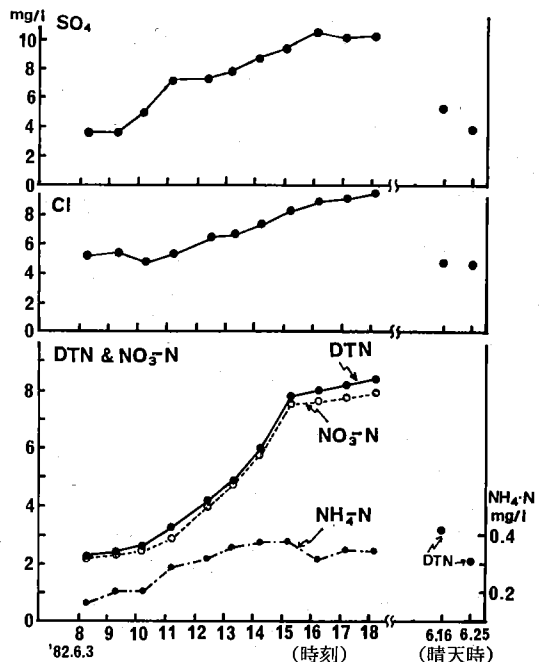


図 7. 降雨におけるSO₄, ClおよびN化合物濃度の経時変化 (A地点)

図7は、各形態のNおよびCl, SO₄の三成分の経時変化である。これらの成分は、これまで述べたSiO₂やPO₄-Pと異なり、いずれも流量の増加後、時間の経過とともに、徐々に濃度が上昇している。又、その上昇のパターンはSSの場合と明らかにちがいで、流量が最大になってから上昇しはじめており、各濃度がピークに達するのは流量が減少しはじめてからである。このように、流量が増加しはじめる時刻よりも、おくれて濃度が上昇するのは、SSが表面流出型であるのに対して、滲透溶出型であることを示している。

DTNは、その大部分がNO₃-Nであり、その濃度の増加率は溶存成分中で最も大きい。

図8は、Ca, Mg, NaおよびKの4種類のカチオンの経時変化をみたものである。Naを除くと、他のカチオンの濃度は、図4の三成分と非常に良く似た変動傾向を示している。Naの濃度は、初期に希釈型の変化傾向が認められる。その後も濃度の上昇は僅かであり、他のカチオンとは異なり、むしろSiO₂に近い変化傾向である。

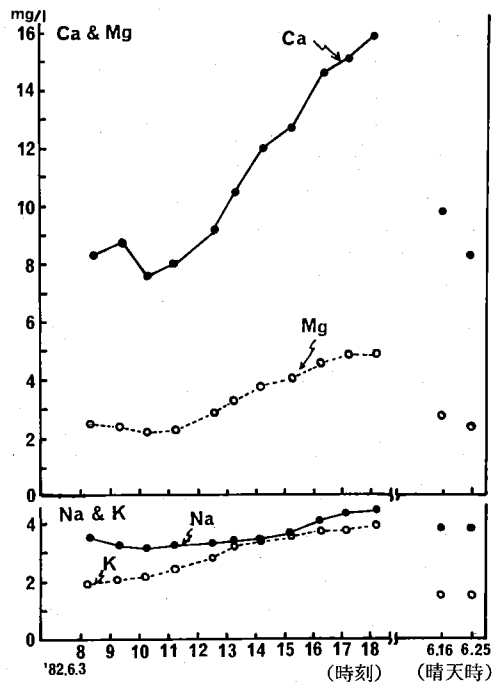


図8. 降雨時におけるCa, Mg, NaおよびK濃度の経時変化 (A地点)

図9は、各溶存物質の晴天時(6月25日)における濃度を1としたときの降雨時の濃度の比率を時刻ごとに図示したものである。流量についても同様に示してある。これで見ると、各溶存物質の濃度が大きく上昇しはじめるのは、成分によって多少異なるが、流量が最大になってから1~2時間後であることがわかる。又、Naはすでに述べたように明らかに希釈型の変動をしている。18時における各物質の濃度比は、Naが1.2倍程度であるのを除くと、DTNが4倍で最も大きく、SO₄とKがおよそ2.5倍、Ca, Mg, ClおよびNH₄-Nが2倍前後といずれも大巾に上昇している。このように2倍以上の濃度上昇を示した物質はいずれも肥料成分である。

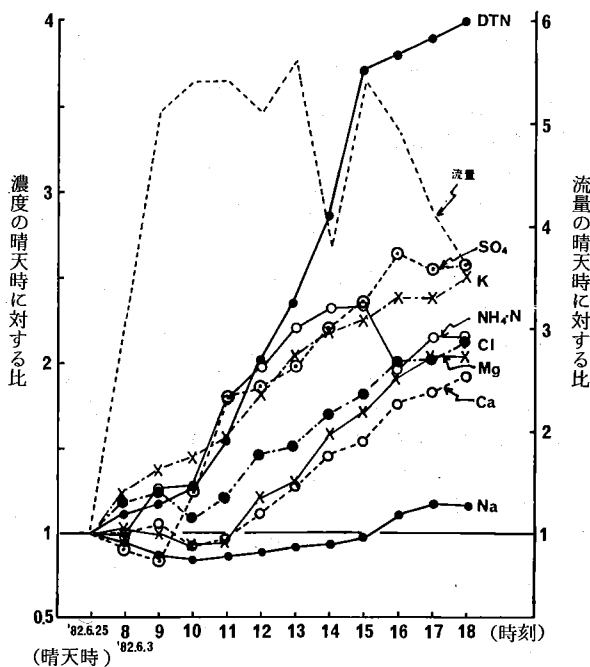


図9. 降雨時の各時刻における各成分の濃度と流量の晴天時に対する比 (A地点)

通常、河川水の溶存物質濃度は、流量が増加すると低下するという場合が多く、両者の間に負の相関があるという報告もある(後藤, 1957, 瀬野ら 1962, 小林 1979, 小倉 1982)。これらの知見は、今回の肥料成分についての調査結果と明らかに異なる。この原因の一つには、調査地点における流域の大きさのちがいにいるものと思われる。これまで報告されている調査は比較的大きな河川か、又は下流域を対象としている場合が多い。

この点、本調査では非常に限られたせまい範囲の上流域を対象としている。そのため、溶存物質の排出源と調査地点までの距離が短かく、それだけ雨水による希釈率も小さくなるので、流域の特性がまともに河川の濃度に反映するものと考えられる。したがって、今回の神川のように、流量の増加とともに、肥料成分の濃度が大巾に上昇するという傾向は、流域がせまいということ、菅平高原が傾斜地であり、その上毎年人為的に肥料成分が投下される畑地を有しているという流域特性によって生じた現象であると結論づけられる。このような現象は、流域特性がよく似ている宮川上流域の原村地域でも見られ、河川の流量が増加すると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度も上昇の傾向にあることが報告されている。

溶存物質の流出量と流域間における流出比率

ここでは、各溶存物質の降雨時、晴天時および全調査期間における平均流出量を比較するとともに、8月に行なった小流域別流出量調査から、流域間の流出比率を検討した。

(1) 溶存物質の流出量 A地点における降雨時のSSおよび溶存物質の流出量を晴天時の場合および平均流出量を比較して示したのが表4である。こゝにあげた晴天時の流出量は、6月25日の測定データにもとづいている。6月22日から6月25日まで、流量はきわめて安定しており、この時期の晴天時の典型的な流出量とみなすことができる。又、平均流出量は、すでに述べたように6月から12月までのデータにもとづいたもので、真の年間平均値とは云えないが、1月から5月までの流量から推定すると、年間平均値とそれ程大きな差はないと思われる。

SSについてみると、降雨時で225ton/dayと晴天時の320倍に達し、降雨時における土砂流出の大きさを物語っている。この流域には農地のほかに、テニスコート、

グラウンド、スキーゲレンデなど、裸地あるいはそれに近い状態の土地が330haほどあり、傾斜地という自然的な要因も含めて、土砂流出を起しやすいつまみを持っている。

降雨時の溶存成分についてみると、流出量が晴天時にくらべて最も大きいのは、DTNの1300kg/dayである。この流出量は桜井ら(1982)による融雪期の $\text{NO}_3\text{-N}$ の流出量に匹敵する。Nは溶存態のほかにSSに含まれる懸濁態の形で流出するので、全窒素としての流出量はさらに大きい値となる。ちなみに、降雨時のSS中のN含量の分析値0.5%から懸濁態のNの流量を算定すると、1100kg/dayとなり、DTNの1300kg/dayと合わせると、全窒素は2400kg/dayにのぼる。 SiO_2 は、流域の火山性地質を反映して、流出量としては最も大きい。晴天時とくらべると2.2倍とその増加率は最も小さい。その他の成分は、Naが比較的小さいのを除くと、5倍前後とDTNについて高く、農地からの流出の影響が大きいことを裏付けている。

(2) 小流域別流出量と流出比率 次に、8月に行なった小流域別の流出量調査から、各溶存物質の全流出量に対する各流域間の流出比率を検討した。地点B、C、Dにおける各流域は調査地点のところで述べたように、それぞれ異なった特性をもっている。

各地点の流量および各溶存物質の濃度の測定結果を表5に示した。流量および各濃度は8月2日の台風の影響を受けて、この季節の晴天時の値としてはかなり高く、表3に示した平均値よりもやゝ高い、これらのデータから、各地点における流出量と、各流域間の流出比率を算出したのが表6である。この流出比率は、地点B、C、Dの流出量の合計を100としたときの地点間の流出比率を%で示したものである。

表4. 神川A地点(大洞橋)における溶存物質の晴天時、降雨時および平均流出量とそれらの比率

成 分	SS	DIP	DTN	Cl	SO_4	Na	K	Ca	Mg	SiO_2
晴天時 (F) kg/day	710	2.3	182	333	361	269	128	666	191	1559
降雨時 (R) "	225×10^3	7.0*	1300	1800	1800	1000	760	3000	890	3400
平均 (M) "	-	3.8	356	464	-	-	-	917	274	2300
各 比 率 (R)/(F)	320	3.0	7.1	5.4	5.0	3.7	5.9	4.5	4.7	2.2
(R)/(M)	-	1.8	3.7	3.9	-	-	-	3.3	3.2	1.5

*降雨時のみ $\text{PO}_4\text{-P}$

注) 晴天時は1982年6月25日、降雨時は同年6月3日の調査による。

年間平均は6月から12月までの13回の調査データにもとづいている。

表 5. 各地点における溶存物質の濃度および流量

調査地点	DTN	DTP	Cl	Ca	Mg	SiO ₂	流量
大明神沢 B	0.81	0.007	1.3	7.5	1.8	25.3	0.261
神川 C	8.90	0.049	9.0	17.3	6.1	11.4	0.631
唐沢 D	1.66	0.047	3.1	5.9	1.5	25.6	0.578
神川 A	4.32	0.029	4.9	10.6	3.0	18.9	1.470

単位：濃度 mg/l, 流量 m³/s

これによると、流域に農地を有する C 地点の流出比率は、SiO₂を除き、DTN 84%をはじめ、P, Cl, Ca, Mg はいずれも 50%以上であり、この流域から流出する肥料成分の割合が大きいことを示している。逆に、大明神沢の B 地点における各成分の比率は最も小さい。唐沢の D 地点は、各成分とも C 地点について高くなっている。特に P は 48%と相対的に高く、P の生活排水からの影響の大きさをうかがわせている。SiO₂については、安山岩からなる上流域の地質に影響を受けて、唐沢が最も高い比率を占めている。

溶存物質の比流出量と流域特性

こゝでは各溶存物質の流出量を、流域の規模による相違を除去するために、単位流域面積当りの流出量、すなわち比流出量として算出し、各地点相互の流出量と流域特性について比較検討した。

表 7 は 6 月 3 日の降雨時と 6 月 25 日の晴天時の場合および平均値について、各溶存物質の比流出量 (g/sec・100 km²) を示したものである。B, C, D 各地点の比流出量は、表 6 に示した 8 月の調査における各地点の流出比率を用い、A 地点の各流出量を 3 地点にふり分けて算出したものである。各地点における流域面積は表 1 に示したものをを用いた。

N, Cl, Ca, および Mg の各比流出量をみると、神川 C 地点は他の地点にくらべて圧倒的に高く、農地、特に多肥栽培型の畑を有する流域の特徴を如実に示している。D 地点の唐沢流域は、N, P, Cl など生活排水の影響を受けやすい物質が相対的に高く、この流域の特徴を反映している。B 地点の大明神沢と D 地点の Ca, Mg, SiO₂ を比較すると、相対的に D 地点の方が高いものの、両地点におけるこれら三成分の比はよく似ているので、両地点の流域は本質的には同じ地質特性をもっているものと考えられる。又、大明神沢(B)の流域は、人為の影響が少く、かつ森林の少ない山地流域の典型的な例であり、N, P, Cl などの比流出量は最も小さく、値そのものもかな

表 6. 各地点における溶存物質の流出量と各流域間の流出比率

調査地点		DTN	DTP	Cl	Ca	Mg	SiO ₂
大明神沢 B	流出量 kg/日	18.2	0.2	29.0	170	41.0	572
	流出比率 %	32	3.8	43	12.2	9.2	23.1
神川 C	流出量 kg/日	481	2.6	486	934	329	616
	流出比率 %	82.6	50.0	72.5	66.7	73.9	25.0
唐沢 D	流出量 kg/日	83.0	2.3	155	295	75.0	1280
	流出比率 %	14.3	46.2	23.1	21.1	16.9	51.9
神川 A	流出量 kg/日	549	3.7	622	1346	381	2400

り低い。このように見てみると、各溶存物質の比流出量は、それぞれの流域の特性を相互に比較する指標として、非常に有効であることがわかる。

表 7. 菅平高原における溶存物質の比流出量

河川 (調査地点)		大明神沢 (B)	神川 羽根尾 (C)	唐沢 (D)	神川 大洞橋 (A)
DTN	降雨時	4.1	10.7	24.6	52.2
	晴天時	1.13	14.6	3.4	7.3
	平均値	2.2	28.8	6.7	14.3
DTP	降雨時*	0.05	0.34	0.43	0.28
	晴天時	0.02	0.11	0.14	0.09
	平均値	0.08	0.14	0.22	0.15
Cl	降雨時	15.2	12.8	54.7	72.3
	晴天時	2.5	23.7	10.1	13.4
	平均値	5.6	35.9	14.5	18.6
Ca	降雨時	71.7	19.6	83.4	121
	晴天時	15.9	43.6	18.5	26.8
	平均値	20.8	60.6	33.1	36.9
Mg	降雨時	16.1	64.5	19.8	35.8
	晴天時	3.4	13.8	4.2	7.7
	平均値	4.8	21.1	9.1	11.0
SiO ₂	降雨時	15.4	83.3	23.2	13.7
	晴天時	70.6	38.2	10.6	62.6
	平均値	89.5	54.8	14.6	92.4

(g/sec・100 km²)

* 降雨時のみ PO₄-P

注) 降雨時は 1982 年 6 月 3 日、晴天時は 1982 年 6 月 25 日の調査データによる。平均値は 1982 年 6 月から 12 月までの 13 回の実測値より算出したもの。

表8には、参考に他の地域の比流出量の報告例を示した。こゝにあげた宮川支川の三つの流域はいずれも人為の影響の少ない山地森林地域の例である。これら三つの流域のNの比流出量はほぼ同じ値を示し、大明神沢B地点の比流出量 $1.1 \sim 2.2 \text{ g/sec} \cdot 100 \text{ km}^2$ に近い値である。Pについても、DTPとTPの違いはあるが、ほぼ同じレベルとなっている。又、流域に多肥栽培型の野菜畑が広がっている宮川上流域(原村)と千曲川上流域(川上村)のNの比流出量 $7 \sim 8 \text{ g/sec} \cdot 100 \text{ km}^2$ は、同じような流域特性をもつ、神川上流部のそれとわけて近い値

であることは、興味あることである。これはCIについても同様のことがいえる。

このように各物質の比流出量は、流域の特性を比較したり、類型化するのにかなり有効な手段であることが示唆されるが、さらに特定の物質の比流出量は、同じような特性をもつ流域からのその物質の流出ポテンシャルを示す尺度、すなわち流出原単位でもあるので、水質保全の立場からも重要な意味をもつ。

今後、比流出量の精度を高めるためには流域の選定の基準や流量の測定条件など調査方法のマニュアル化を計るとともに、より多くのデータを蓄積することが重要である。

表8. 比流出量の報告例 ($\text{g/sec} \cdot 100 \text{ km}^2$)

河 川	TIN	TP	CI
宮川上流域(坂室) ¹⁾ 宮川支川 ¹⁾	7.1	0.20	25.3
大崩川(森林地域)	1.1	0.03	-
金川(")	1.4	0.05	-
大沢川(")	0.9	0.03	-
千曲川上流域(濁池) ²⁾	7.7	0.11	10.8
霞ヶ浦流域河川 ³⁾	4.6	0.17**	-

*10 河川の平均 ** $\text{PO}_4\text{-P}$

1) 渡辺ら(1979), 2) 渡辺ら(1982), 3) 田淵ら(1976)

文 献

小倉紀雄・北条敏彦(1982): 第16回水質汚濁学会講演要旨集, B-203
 後藤達夫(1957): 日本化学雑誌 78 1241-1246
 小林正夫(1979): 用水と廃水 21(11) 79-85
 桜井善雄・中本信忠(1982): 水温の研究 26(3), 11-18
 田淵俊雄・高村義親・久保田治夫・鈴木誠治(1976): 農業土木学会論文集第66号, 10-20
 渡辺義人・沖野外輝夫(1979): 富栄養化対策調査報告書, 諏訪湖地区(関東農政局), 20-38
 渡辺義人・桜井善雄(1982): 未発表