

森林及び果樹園からの無機イオン類の流出が 河川水質に与える影響について

INFLUENCE OF RUNOFF OF INORGANIC IONS FROM FOREST AND ORCHARD ON RIVER WATER CHEMISTRY

江種伸之¹・鷲田勉²・平田健正³

Nobuyuki EGUSA, Tsutomu WASHIDA and Tatemasa HIRATA

¹ 正会員 博(工) 和歌山大学助教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷 930)

² 学生会員 和歌山大学大学院 システム工学研究科 (同上)

³ 正会員 工博 和歌山大学教授 システム工学部 (同上)

In order to evaluate the relationship between land use and river water chemistry, inorganic ion concentrations were monitored in the Kishi and Zakuro Rivers. The drainage basin of the Kishi River is mainly covered with forest and the orchard is widely distributed in the lower stream of the Zakuro River. In the Kishi River, the concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} and NO_3^- gradually increased down the stream. On the other hand, the concentrations of Na^+ and Cl^- did not changed in the upper and middle streams and sharply increased in the lower stream where the residential area and paddy field made rapid progress. In addition, the concentration of NO_3^- increased and the others decreased with increasing flow rate due to rainfall. Contrary to this, in the Zakuro River, the fertilizer used in orchard has affected the concentrations of NO_3^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} and Ca^{2+} .

Key words: Runoff, Forest, Orchard, Fertilizer, River water chemistry

1. はじめに

河川の水質は、流域内の地形・地質条件、植生、土地利用、生活・産業活動などの影響を受けており、水循環の再生や水環境保全といった流域水マネジメントに取り組むには、流域の特性と河川水質の関係を明らかにしておくことが重要である。この場合、pH、BOD、SSといった環境基準項目だけでなく、無機イオンや安定同位体比などを指標にすれば水の循環経路や水質変化をより詳細に知ることができる。これまでにも、森林域の渓流水質を対象としたもの¹⁾、農業集水域小河川の水質を対象としたもの²⁾、都市域を流れる河川の水質を対象としたもの³⁾など、幅広い研究が行われている。

本研究では、2000年の夏から冬にかけて和歌山県北部を流れる紀の川流域の貴志川および柘榴川で現地調査を行い、流域特性の違いが河川水質に与える影響について検討した。調査対象流域では森林と果樹園の占める割合が大きいので、今回は特に森林および果樹園が河川水中の無機イオン濃度に与える影響に焦点を当てて考察した。

2. 調査流域の概要

図-1に調査流域の概略を示している。貴志川および柘榴川流域は和歌山市の東に隣接し、みかん、桃、柿などの果樹栽培が盛んな地域である。貴志川の流路長は約40km、柘榴川流域を除いた流域面積は約270km²である。上流は森林が広く分布する山間部であり、住宅地や農地は少ない。中流も山間部であるが、流下するにつれて河川沿いに住宅地や水田が現れ、また山の斜面には果樹園が点在するようになる。流れを西から北へ変える付近から平野部に入り、住宅地と水田が増えてくる。一方、柘榴川の流路長は約9km、流域面積は約25km²であり、上流が森林、中下流が果樹園と大きく2つの土地利用に分けられる。

図-2に貴志川および柘榴川流域における土地利用別の面積率を示している。貴志川流域は森林が大部分を占め、それ以外は4分の1程度にすぎない。森林以外では果樹園と水田の割合が大きく、果樹園は中流から下流にかけて、水田は下流に広く分布している。一方、柘榴川流域では、果樹園が流域全体の3分の1を占めている。貴志川および柘榴川流域ともに住宅地は少なく(全体の3%)、流域内人口の4分の3にあたる約27,500人が貴志川町、海南市および野上町に集まっている。その中でも最下流に位置する貴志川町の人口が一番多い(約19,000人)。

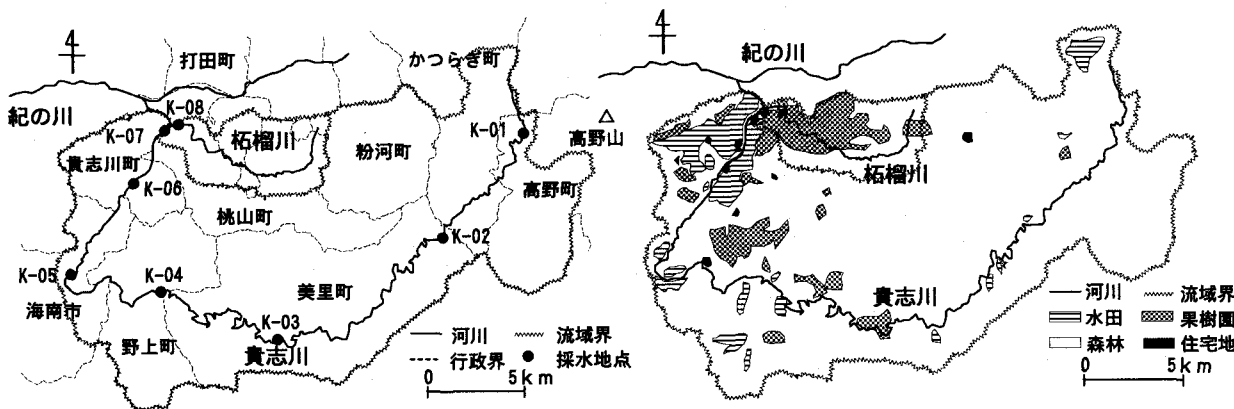


図-1 調査流域の概略(左：行政界及び採水地点，右：土地利用特性)

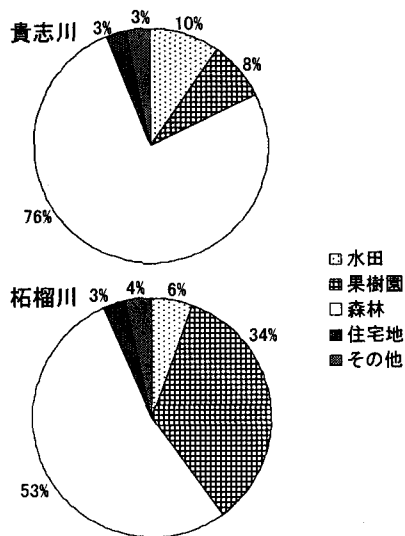


図-2 流域内の土地利用別の面積率

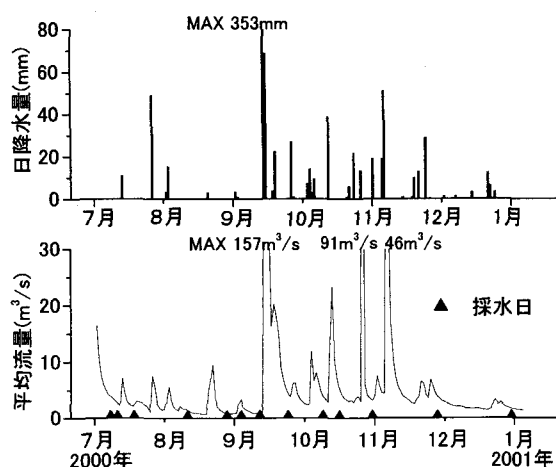


図-3 調査期間中の降水量と貴志川(K-06地点)の流量の変化

3. 調査方法

調査は2000年7月から12月にかけて実施した。期間中は月1～2回の頻度で貴志川と柘榴川の合流地点(図-1中のK-07およびK-08地点)の水質を分析した。なお、採水は降雨や表面流出の影響が見られない日の午前11時頃に行っている。また、8月9日と10月13日には貴志川の上流から下流(図-1中のK-01からK-08地点)までを一斉に調査した。基本水質項目の水温、pH、電気伝導度(EC)、溶存酸素濃度(DO)、および酸化還元電位(ORP)は携帯用水质モニター(HORIBA社U-22)を用いて現地で測定し、無機イオン類はポリ瓶(容量100mL×2本)に採水し、実験室に持ち帰ってから分析した。無機イオンのうち、カルシウムイオン(Ca^{2+})、マグネシウムイオン(Mg^{2+})、ナトリウムイオン(Na^+)、カリウムイオン(K^+)、硫酸イオン(SO_4^{2-})、塩化物イオン(Cl^-)、硝酸イオン(NO_3^-)はイオンクロマトグラフィー(DIONEX社DX-AQ)で、重炭酸イオン(HCO_3^-)は酸滴定で測定した。

4. 結果と考察

(1) 調査期間中の水文状況

図-3に調査期間中の降水量と貴志川(K-06地点)における流量の変化を示している。なお、降水量は和歌山地方気象台のデータを用い、流量は近畿地方整備局和歌山工事事務所の水位データを換算して用いている。調査を開始した7月初旬から日降水量353mmの大雨を記録した9月11日までの約2カ月間には、7月25日(日降水量49mm)を除いてほとんど雨が降っていない。9月11日の大雨以降は、11月下旬まで断続的に降雨があり、この期間の降水量738mmは大雨前の約8.4倍である。12月に入ると雨は再び少なくなっている。

降水量の変化は流量に影響を与えている。7月から12月までの月別の平均流量は、 $4.08\text{m}^3/\text{s}$ 、 $2.09\text{m}^3/\text{s}$ 、 $12.98\text{m}^3/\text{s}$ 、 $8.61\text{m}^3/\text{s}$ 、 $7.28\text{m}^3/\text{s}$ 、 $1.88\text{m}^3/\text{s}$ であり、雨の降らなかった7月、8月、12月、特に8月と12月の流量が少ない。大雨前後で比較すると、7月1日から8月31日までの2カ月間の平均流量 $3.1\text{m}^3/\text{s}$ は、9月1日から10月31日ま

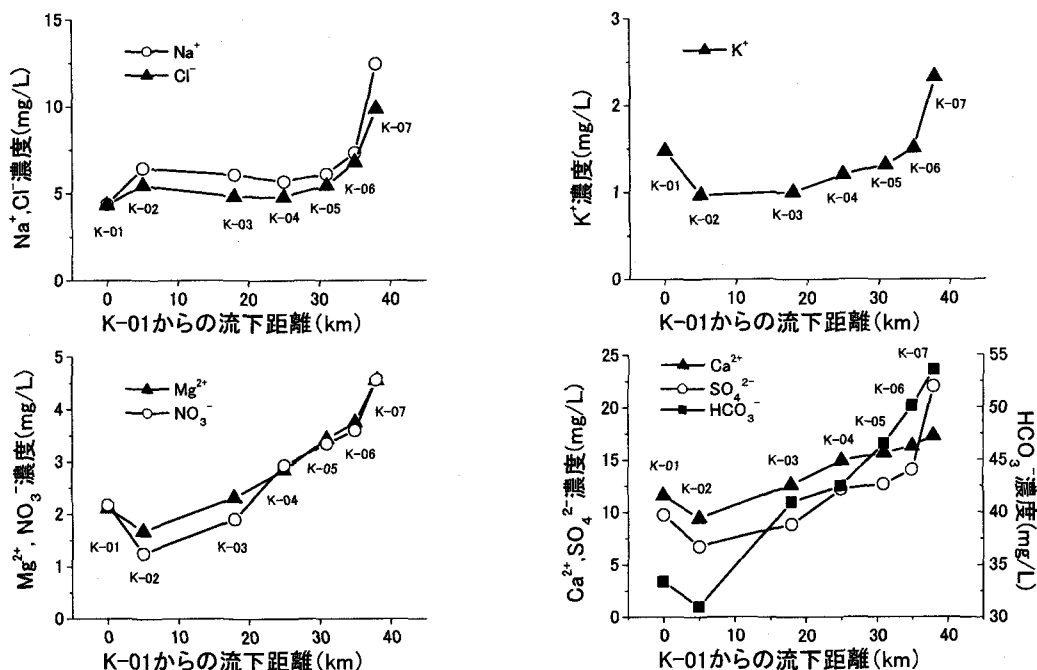


図-4 貴志川の流下にとまなう無機イオン類の濃度変化

での2カ月間の平均流量 $10.8\text{m}^3/\text{s}$ の3分の1程度である。1995年から1999年までの5年間の同時期の平均流量は $10.9\text{m}^3/\text{s}$ と $6.3\text{m}^3/\text{s}$ なので、2000年の夏は少雨の影響で流量が少なかったといえる。なお、柘榴川には流量のデータはないが、貴志川と同様な傾向を示していたものと推察される。

(2) 流下にとまなう水質変化

図-4には貴志川の流下にとまなう無機イオン類の濃度変化を示している。なお、図中の濃度は8月9日と10月13日の調査の平均値である。これによると、上流部の濃度は日本の河川の平均水質⁹⁾程度であり、下流部ではそれよりも高くなっている。流下にとまなう濃度変化は、上流から徐々に上昇していくタイプと上中流では変化せずに下流で上昇するタイプの2つに分けられる。このような変化は他の河川にも見られる特徴である³⁾。ただし、前者でもカリウムイオンと硫酸イオンの濃度は下流で大きく上昇している。

a) 上流から徐々に濃度が上昇するタイプ

このタイプには、カルシウムイオン、マグネシウムイオン、カリウムイオン、重炭酸イオン、硫酸イオン、および硝酸イオンが属している。ただし、カリウムイオンだけは他のイオンほど顕著には濃度が上昇していない。硝酸イオンは土壌由来、それ以外は主に岩石由来の物質である。森林が大部分を占めている貴志川の上中流域では人為的な影響が少ないので、これらのイオンの河川水濃度は流域の地質条件を反映したものになる。河川水は流下していく間に岩石の風化によって生じた無機イオン

を取り込んでいる⁴⁵⁾。また、流速の遅い地下水は岩石の風化や土壌からの溶脱の影響を十分に受けており、一般にその成分濃度は河川水より高く、さらに流下するにつれて高くなる傾向がある⁵⁴⁾。すなわち、河川水が岩石の風化によって生じた無機イオンを取り込む作用に加えて、流域から高濃度の地下水が流入する影響で、河川水中のイオン濃度が上流から徐々に上昇していると考えられる。ただし、多くのイオンでK-01の濃度がK-02より高くなっているが、これはK-01が集落や農地の中にあり、その影響と思われる。

b) 上中流で濃度が変化しないタイプ

このタイプには、ナトリウムイオンと塩化物イオンが属する。河川水中の塩化物イオンは主に人為由来の物質であり、人間活動によって排出される食塩(NaCl)が大きな原因になっている。また、塩安を肥料として使用している農地土壌からの流出といった特殊な状況では、土壌由来も考えられる。しかし、貴志川および柘榴川流域の果樹園では肥料として塩安を使用していない。また、貴志川の上中流部では人口が少なく、生活排水の流入量は多くない。すなわち、岩石の風化や土壌からの溶脱の影響が小さいことが、流下にとまなう濃度上昇が見られない原因と考えられる。

ナトリウムイオンは岩石由来の物質であるが、人為的な影響も強く受けている。ただし、人口の少ない貴志川の上中流部では、塩化物イオンと同様に人為的な影響は小さい。また、流下にとまなう濃度変化は塩化物イオンとほとんど同じであり、Na/Clの当量比が大きく変化していないことから(図-4では1.6-2.0)、岩石の風化の影響

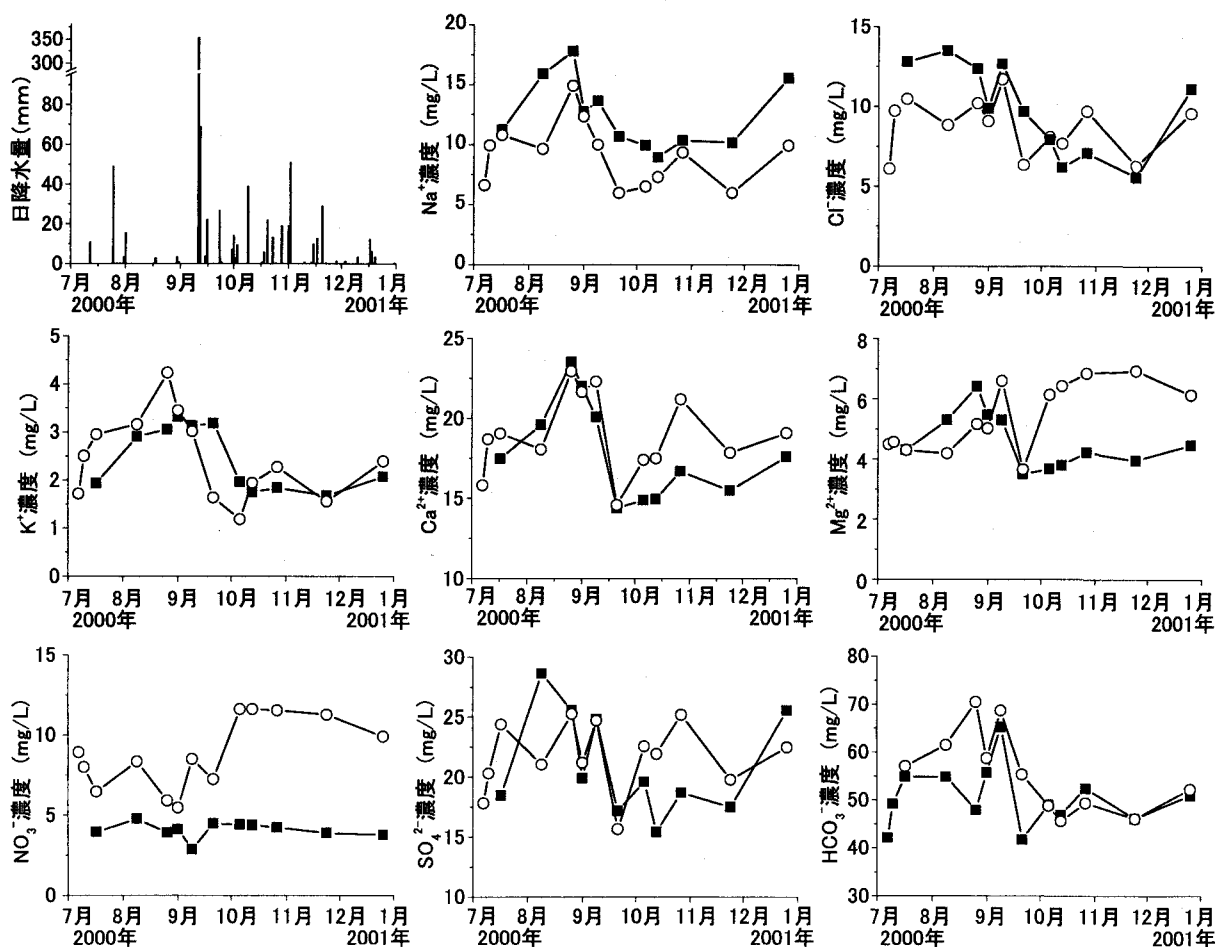


図-5 貴志川と柘榴川の合流地点における無機イオン類の濃度変化(■：K-07，○：K-08)

は大きくないといえる。

c) 下流での濃度変化

ナトリウムイオンや塩化物イオンだけでなく、上流から濃度が徐々に上昇していくカリウムイオンと硫酸イオン濃度も下流で大きく上昇している。下流に位置する野上町、海南市、貴志川町では人口が急激に多くなる。すなわち、人口増にともなう生活排水流入量の増加が、各イオン濃度の大きな上昇をもたらしていると考えられる。また、下流域に広く分布する水田の影響も考えられる。

(3) 土地利用と河川水質の関係

図-5に貴志川と柘榴川の合流地点における水質調査結果を示している。7月初旬から9月11日までの雨の少ない約2カ月間は、流量の減少にともなって濃度が上昇し、大雨前に最高を示すイオンが多い。特にほとんど雨のなかった8月からの上昇が顕著である。そして、9月11日の大雨で濃度が一気に低下する。ただし、硝酸イオンだけはこの傾向に当てはまらない。それ以降の11月末までの降水量の多い時期には、両河川に違いがみられる。

a) 硝酸イオン濃度

調査期間中の硝酸イオン濃度は、柘榴川が貴志川より

も常に高い状態にある。その他のイオン濃度は、後述する大雨後のいくつかのイオン(Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-})を除き、両河川で大きな差はない。通常、畑地や果樹園から流出する窒素量は森林や水田からよりも多いので、流域に占める畑地や果樹園の割合が大きいほど河川水中の窒素濃度が高くなる⁷⁾。本研究でも、流域に占める果樹園の割合は柘榴川のほうが大きく、同様の傾向が認められる。

b) 森林地帯を流れる河川(貴志川)の濃度変化

大雨後の流量の多い時期(9月末から11月末まで)には、硝酸イオン以外のイオン濃度が大雨前よりも低くなる。図-6に貴志川における流量とイオン濃度の関係を示している。硝酸イオン以外は流量の増加にともなって濃度が低下する傾向にある。図に載せていないイオンも同様である。硝酸イオンだけは、流量が増えても濃度が低下していない。このように硝酸イオン濃度が他のイオンと異なる傾向を示すのは森林が流域の大部分を占める河川の特徴であり、山田ほか⁸⁾や石塚ほか⁹⁾にも報告されている。

雨の多い時期には土壌水の河川への流出が多くなる。これにともない土壌からの無機イオン類の流出負荷量も増加する。硝酸イオンは土壌由来の物質なので、河川水中の濃度は土壌水濃度に左右される。一般に土壌水中の

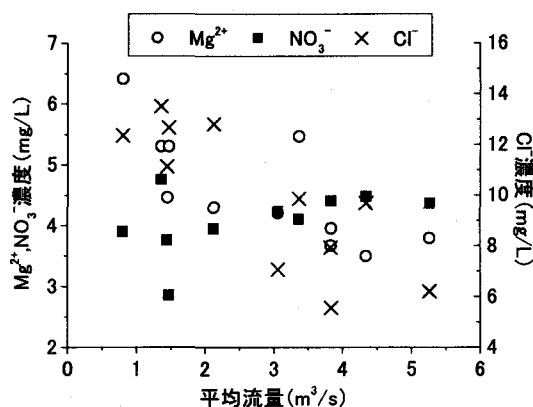


図-6 貴志川における流量とイオン濃度の関係

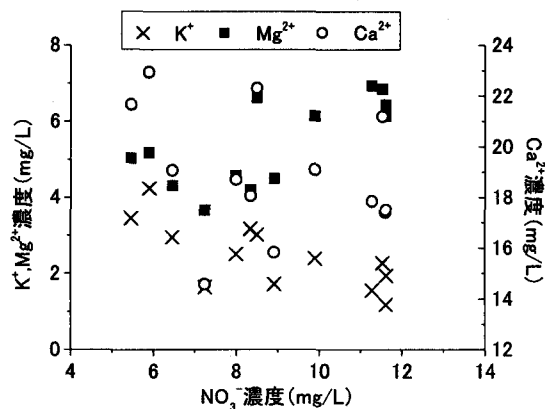


図-7 柘榴川における硝酸イオン濃度と他のイオン濃度の関係

表-1 1年間に使用される肥料に含まれている成分量(概算値)

	流域面積(km ²)	N(kg/km ²)	P(kg/km ²)	K(kg/km ²)	Mg(kg/km ²)	Ca(kg/km ²)	SO4(kg/km ²)
貴志川	267.9	467.9	566.9	387.9	352.0	1200.1	195.1
柘榴川	24.9	2699.6	3270.4	2237.8	2031.1	6924.1	1125.3

窒素濃度は河川水より高いので、多雨時期には窒素濃度の高い土壌水が大量に河川へ流出することになる。すなわち、9月下旬以降の流量の多い時期には、窒素濃度の高い土壌水が多量に流出する影響で河川水中の硝酸イオン濃度が他のイオンのようには低下していないと考えられる。一方、他のイオン濃度は、主に高濃度の地下水や生活排水の流入、そして河川水が流下していく間に岩石の風化によって生じた成分を取り込む作用によって決まる。言い換えると、土壌からの流出が河川水濃度に与える影響は小さいので、一般に土壌水濃度は河川水よりも低い。その結果、降雨によって土壌水の流出が増えて流量が多くなると、希釈効果で濃度が低下することになる。

c) 果樹園地帯を流れる河川(柘榴川)の濃度変化

柘榴川における無機イオン類の濃度変化は貴志川と異なった傾向を示す。大雨後の流量の多い時期に硝酸イオン濃度は上昇している。マグネシウムイオン濃度は大雨直前と同じ高い状態で維持される。また、カルシウムイオンと硫酸イオン濃度は貴志川ほど低下しない。その他のイオン濃度の変化は貴志川とほぼ同じである。

図-7に硝酸イオン濃度とカリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオン濃度の関係を示している。この図から、カリウムイオンは硝酸イオンと負の相関、マグネシウムイオンは正の相関のあることがわかる。また、カルシウムイオンは硝酸イオンと相関がないように見える。図には載せていないが、硫酸イオンはカルシウムイオンと同じ傾向を示す。ただし、カルシウムイオンと硫酸イオン濃度の変化は、流量の多い時期に硝酸イオン以外のイオン濃度が低下する貴志川とは明らかに異なっている。すなわち、柘榴川流域には、岩石由来と考えられるマグネシウムイオン、カルシウムイオンおよび硫

酸イオンの濃度を土壌由来の硝酸イオンと同じように変化させる要因があることを示している。

柘榴川流域と貴志川流域では、流域に占める果樹園の割合が大きく異なる。貴志川流域には果樹園は8%しか存在しないが、柘榴川流域では流域全体の3分の1(34%)を占めている。したがって、前述したイオン濃度の変化には、果樹園の影響が強く表れている可能性が高い。表-1に流域内で1年間に使用される肥料に含まれている単位面積あたりの各成分量(概算値)を貴志川と柘榴川流域に分けて示している。この表から柘榴川流域に投入されている単位面積あたりの成分量は貴志川流域と比べて非常に多いことがわかる。これは、作物への吸収分を除いても、柘榴川流域の果樹園土壌には多量の肥料成分が蓄積していることを意味している。この地域の施肥時期は1月から2月、6月、10月前後の年3回に分けられる。9月11日の大雨後の多雨時期はちょうど3回目の施肥時期にあたり、土壌に窒素および他の肥料成分が蓄積している。すなわち、この時期に雨が降ると果樹園土壌から大量の肥料成分が溶脱することになる。

窒素は肥料の主成分であり、硫酸(NH₄)₂SO₄や有機物肥料として果樹園で使用されている。果樹園土壌は酸化層なので、作物に吸収されなかった窒素は主に硝酸イオンとして土壌から溶脱する。硝酸イオンは陰イオンなので、土壌にほとんど吸着されることなく、降水により容易に溶脱する⁹⁾。すなわち、多雨時期における硝酸イオン濃度の上昇は、果樹園土壌から大量の窒素が河川に流出しているためである。

硫酸イオンは、一般には硫酸として農地に供給される。柘榴川流域でも10月前後の施肥時期に硫酸が使用されている。硫酸イオンも陰イオンなので、硝酸イオンほどで

はないが土壌には吸着されにくい¹⁰⁾。したがって、多雨時期には果樹園土壌からの溶脱量が多くなるために、硫酸イオン濃度の変化が貴志川とは異なったものになっている。ただし、平常時の硫酸イオン濃度が高いために、硝酸イオンのような濃度上昇が見られないのだろう。

マグネシウムイオンとカルシウムイオンは、酸性土壌の中和を目的とした土壌改良材として果樹園で使用されている。これらの陽イオンは土壌水中に溶解した状態または土壌表面に吸着した状態で存在するが、降水の浸透などによって容易に土壌から溶脱する¹¹⁾。特に、土壌から硝酸イオンなどの陰イオンが溶脱するときには同当量の陽イオンも溶脱するので、硝酸イオンや硫酸イオンの溶脱量の増加はマグネシウムイオンやカルシウムイオンの溶脱を促進することになる。これは、果樹園土壌に硝酸イオンが過剰に蓄積している場合には、降雨によって硝酸イオンだけでなく、マグネシウムイオンやカルシウムイオンの溶脱量も増加することを意味している。したがって、多雨時期にマグネシウムイオン濃度が高い状態で維持され、カルシウムイオン濃度が貴志川のように低下しないのは、果樹園土壌から大量のマグネシウムイオンとカルシウムイオンが河川へ流出しているためである。ただし、平常時のカルシウムイオン濃度がマグネシウムイオンよりも高いことが影響して、マグネシウムイオンのような濃度上昇が見られないのだろう。

カリウムイオンは、肥料の主成分なので農地に多量に施肥され、土壌に蓄積している。ただし、土壌中のカリウムイオンの大部分は作物に吸収される。また、残りは土壌へ吸着または固定された状態で存在するため¹¹⁾、カリウムイオンは土壌からほとんど溶脱しない。実際に農地土壌からの無機イオン類の溶脱量を調べた調査でも、カリウムイオンはほとんど溶脱しないことが確認されている⁹⁾。したがって、カリウムイオンは、果樹園土壌中に多く蓄積しているにもかかわらず、マグネシウムイオンやカルシウムイオンのように大量に流出しないので、希釈効果で濃度が低下している。

5. おわりに

和歌山県北部を流れる紀の川支流の貴志川および柘榴川で水質調査を行い、森林および果樹園からの無機イオン類の流出が河川水質に与える影響について、いくつか興味深い知見を得た。その中で特に興味深かったのは、流域内に果樹園が広く分布する柘榴川の水質変化である。1)柘榴川の水質は、降雨によって果樹園土壌から溶脱する肥料成分の影響を強く受けている。2)特に、果樹園土壌からの硝酸イオンの溶脱が河川水質に与える影響が大きく、多雨時期に流量が増えると濃度が大きく上昇する。3)また、硝酸イオンと同じ陰イオンの硫酸イオンや硝酸イオンや硫酸イオンの対イオンとして土壌からの溶脱が

促進されるマグネシウムイオンとカルシウムイオンの河川水濃度にも、果樹園土壌からの流出の影響がみられるなど、特徴的な傾向が明らかになった。

ただし、今回得られた結果はすべて定性的な評価にとどまっている。そこで、今後は果樹園からの肥料成分の流出量を算定するなどして、果樹園が河川水質に与える影響を明らかにしていきたい。また、今回は検討していないが、下水道普及率の低い本流域では、生活排水が河川水質に与えている影響も無視できない。その一端は、貴志川下流の塩化物イオンなどの濃度上昇に現れている。また、下流域に広く分布する水田の影響も考えられるが、現時点では不明である。したがって、生活排水や水田が河川水質に与えている影響についても調査を行い、貴志川および柘榴川流域の総合的な水環境保全に役立てていきたい。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、近畿地方整備局和歌山工事事務所およびJA紀の里から貴重なデータを頂きました。また、本大学院修士2年生の山口敦久君をはじめ多くの学生諸氏に現地調査を手伝って頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 辻村真貴・恩田裕一・小松陽介・清水卓弘・松村和也・服部重昭・中川有里・松井孝子：礫層および風化花崗岩からなる丘陵地源流域における流出・水質特性、水文・水資源学会誌, Vol.14, No.3, pp.229-238, 2001.
- 2) 村山重俊・駒田充生・馬場浩司・津村昭人：農業集水域小河川の平常流量時の水質とその時期的変動、日本土壤肥料学会誌, No.72, Vol.3, pp.409-419, 2001.
- 3) 平田健正・井伊博行・長谷部正彦・江種伸之・坂本康・桑川高德・西山幸治・酒井信行・岩崎宏和：土地利用特性の河川水質に及ぼす影響-大阪府石川流域-, 土木学会論文集, No.614/II-46, pp.97-107, 1999.
- 4) J.アンドリュース・P.プリンプルコム・T.ジッケルズ・P.リス著(渡辺正訳)：地球環境化学入門, Springer, 264p., 1997.
- 5) 日本化学会編：陸水の化学, 学会出版センター, 184p., 1992.
- 6) 小川吉雄：地下水の硝酸汚染と農法転換, 農文協, 200p., 2000.
- 7) 田淵俊雄・高村義親：集水域からの窒素・リンの流出, 東京大学出版会, 226p., 1985.
- 8) 山田俊郎・清水達雄・井上隆信・橘治国：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環境工学研究論文集, Vol.36, pp.217-224, 1999.
- 9) 石塚正秀・井伊博行・堤久行・平田健正：和泉山地小流域における地表水の水質特性, 水工学論文集, Vol.45, pp.1015-1020, 2001.
- 10) 中野政詩：土の物質移動学, 東京大学出版会, 189p., 1991.
- 11) 犬伏和之・安西徹朗編：土壌学概論, 朝倉書店, 219p., 2001.

(2001. 10. 1 受付)