土地利用の異なる隣接した二流域の河川水質特性

CHARACTERISTICS OF RIVER WATER QUALITY IN TWO ADJACENT WATERSHEDS WITH DIFFERENT LAND USE

江種伸之 [1]・三尾谷雅史 [2]・鷲田勉 [2]・平田健正 [3]
Nobuyuki EGUSA, Masashi MIONOYA, 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）

This paper evaluated the effects of land use on river water quality in the Kishi and Zakuro Rivers. Both basins are mainly covered by forest and orchards, and especially about 30% of the Zakuro River watershed is orchard. In the field observation, the concentrations of NO_3^- and Mg^{2+} in the Zakuro River were observed to be higher than those in the Kishi River from autumn to spring. However, there were no differences in the concentrations of the other ions and COD between both rivers. In order to examine these results, especially the effects on the concentrations of NO_3^- and COD, nitrogen and COD loadings were calculated using pollutant load factors. The calculation result of nitrogen loading implied that the discharge of nitrogen from the orchards played the most important role in the change in the NO_3^- concentration of the Zakuro River. In the meantime, there were no differences in COD loadings between both basins and therefore the COD concentrations would be approximately equal.

Key words: *Land use, river water quality, orchard, Runoff, COD loading, Nitrogen loading*

1. はじめに

河川の水質は流域内の地質，植生，土地利用，生活・産業活動等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ージメントに取り組むためには，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などの環境基準項目に加えて，無機イオンや安定同位体比を指標にすることで，水の循環経路や水質変化をより詳細に評価できる．これまでにも，森林域の渓流水質を対象としたもの[1]，農業集水域小河川を対象としたもの[2]，都市域を流れる河川を対象としたもの[3]，ダム湖への栄養塩の流出特性を検討したもの[4]など，幅広い研究が行われている．

著者ら[5]は2000年7月から和歌山県北部を流れる紀の川流域の貴志川と柘榴川で定期的に水質観測を行っている．2000年7月から12月までのデータを利用した前報では，秋から冬の柘榴川の硝酸イオン濃度に特異な変化が見られることを指摘し，果樹園からの肥料成分中の窒素流出がその原因であると推察した．本報では，それ以降も継続している約2年間の観測データに加え，物質負荷量解析を行って，土地利用の異なる隣接した二流域の河川水質特性及び水質に与える土地利用の影響を検討した．

2. 流域の概要

図-1に対象流域の概略を示している．対象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270km^{2}である．流域の土地利用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．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は平野部に入り，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25km^{2}である．流域は上流が森林，中下流が果樹園と大きく2つの土地利用に分けられ，果樹園が流域全体の3分の1を占めている．

両流域ともに住宅地は少なく，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最も多く，約19,000人である．

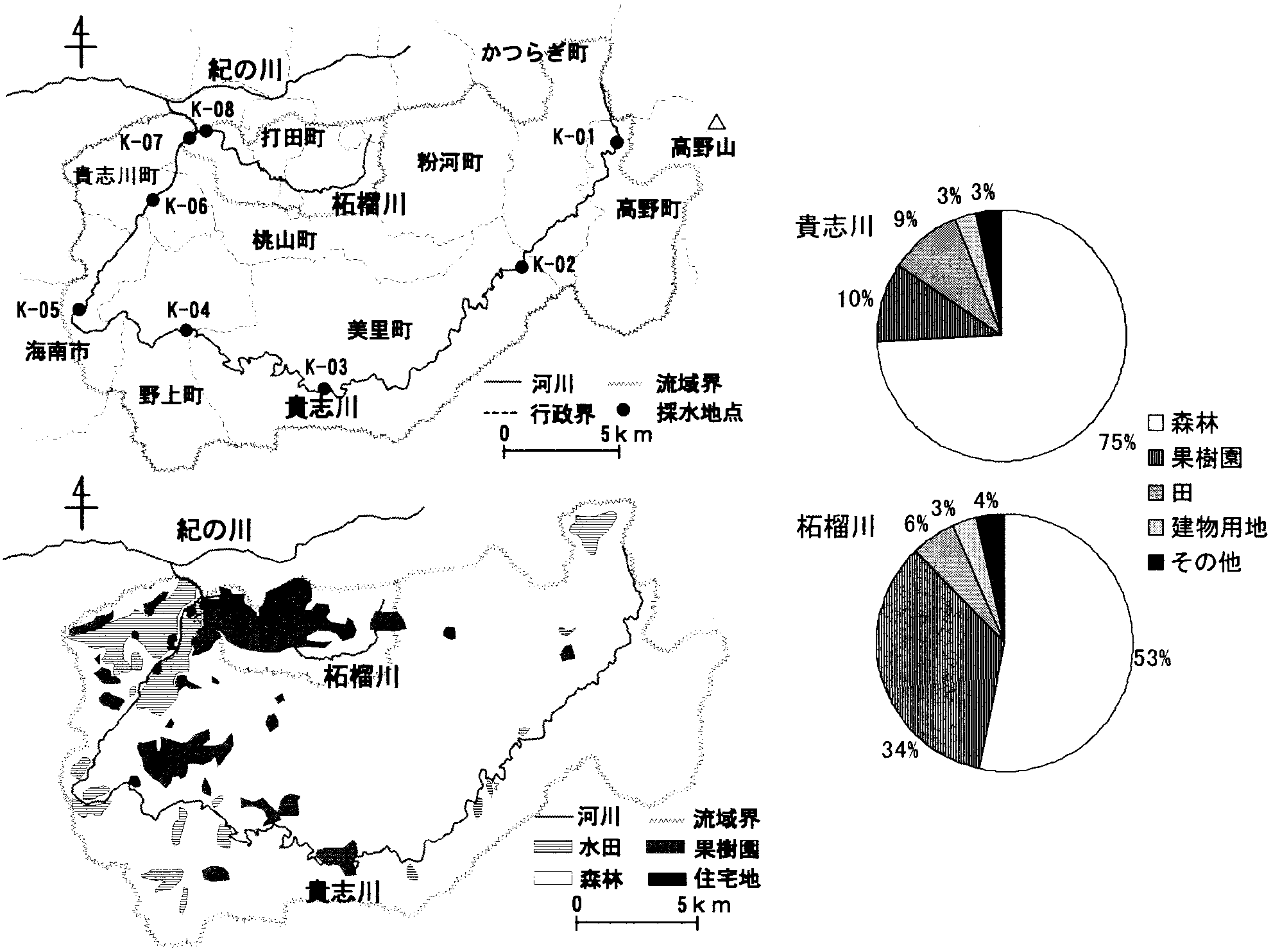

図-1　対象流域の概略（左上：行政界及び採水地点，左下：土地利用，右：土地利用の割合）

3. 水質モニタリング結果

図-2に両河川合流地点(**図-1**のK-07及びK-08地点)における硝酸イオン，マグネシウムイオン，カリウムイオンおよびCOD_{Mn}(以下COD)の濃度変化を示している．モニタリング項目の中では硝酸イオン濃度が最も特異な変化を示しており，秋から冬にかけて柘榴川(K-08地点)の濃度が貴志川(K-07地点)よりも高くなっている．硝酸イオンほどではないがマグネシウムイオンにも同じ傾向が見られる．それ以外のイオンは図には示していないが，カリウムイオンと同じように両河川で違いは見られない．また，CODに関しては柘榴川の値が若干大きいものの，両河川で明確な違いがあると言えるほどの差ではない．

柘榴川の硝酸イオンとマグネシウムイオン濃度が秋から上昇する原因として，前報[5)]では柘榴川流域の3分の1を占める果樹園からの肥料成分の流出を指摘した．すなわち，9月から11月までは施肥時期であると同時に多雨時期であり，流域の3分の1を占める果樹園土壌から肥料中の窒素が大量に流出して柘榴川の硝酸イオン濃度を高めていると推察した．また，マグネシウムイオンは硝酸イオンの対イオンとして果樹園土壌から流出して河川水濃度を高めていると推察した．ただし，前報では2000年7月から12月までのデータしか使用しておらず，12月以降の濃度変化は対象外であった．**図-2**によれば，両イオン濃度の高い傾向は春まで続くが，その後は低下して，貴志川と同程度の値で9月まで推移している．

図-3に流域内の果樹園及び水田の施肥時期を示している．これによると，果樹園では9月から3月まで断続的に施肥され，その後は6月に一度行われる．すなわち，柘榴川の硝酸イオン濃度が高い期間は施肥時期と一致しており，果樹園からの窒素流出が柘榴川の硝酸イオン濃度を高めている原因であると述べた前報の考察で春までの濃度変化を理解できる．しかし，これだけでは同じように多雨時期と重なっている6月の施肥時期に硝酸イオン濃度が上昇しない理由を説明するには不十分であり，より詳細な検討が必要である．

また，森林と果樹園の占める割合が多いとはいえ，下流部には水田が広く分布し，また人口も中下流部に集中している．すなわち，水田や人間活動も両河川合流地点の河川水質に何らかの影響を与えているはずである．そこで，物質負荷量解析を行って，果樹園だけでなく，森林，水田，生活排水などの流域の土地利用が河川水質に与えている影響を評価することにした．

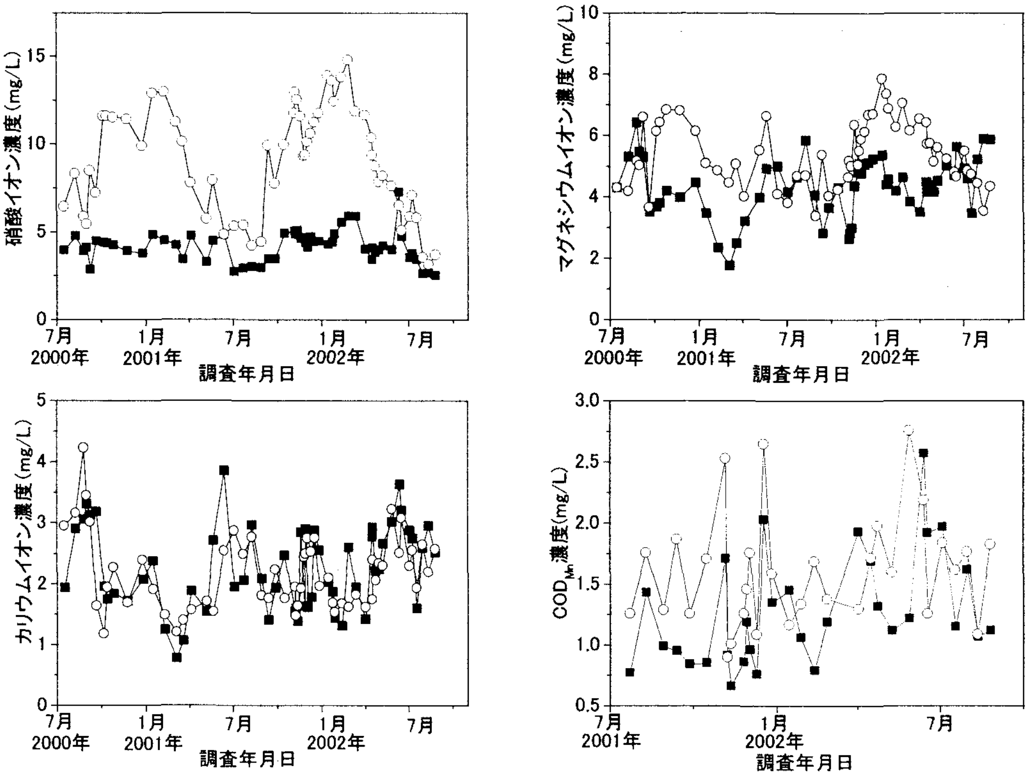

図-2 現地調査結果(■：K-07, ○：K-08)

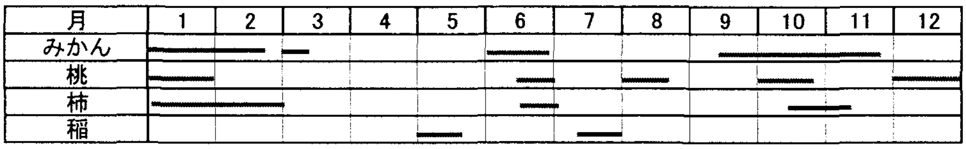

図-3 貴志川及び柘榴川流域の施肥時期

表-1 生活系の発生負荷量原単位及び生活排水の処理形態別排出率

	原単位(g/day/人)	排出率(%)				
		公共下水道	合併浄化槽	単独浄化槽	汲み取り式	農業集落排水施設
COD	27	21.0	16.0	74.5	62.5	16.0
窒素	11	61.0	49.0	76.7	16.9	49.0

4. 物質負荷量解析

(1) 排出負荷量の算定方法

流域内の負荷源は，生活排水(生活系)，工場排水(産業系)，および面源としての果樹園，水田，森林，畑，市街地に大きく分けられる．今回は原単位法を用いて負荷源毎のCODと窒素の排出負荷量を算定した．原単位法を用いた物質負荷量解析は河川水質と土地利用の関係を評価する手法としてよく用いられている[6]．

a) 生活系

生活系の発生負荷量は1人1日当たりの発生負荷量原単位に流域人口をかけて算定した．ただし，生活排水は公共下水道などの浄化処理を経て河川に放流される．そこで，排出負荷量は発生負荷量に各浄化処理の普及率と排出率を乗じて求めた．式(1)に算定式を示している．

$$D_L=\sum_i \sum_j (G_L \times P_i \times S_{ij} \times B_j \times 365/10^3) \quad (1)$$

ここで，下付きiは自治体，下付きjは生活排水処理形態，D_Lは生活系の排出負荷量(kg/year)，G_Lは生活系の発生負荷量原単位(g/day/人)，P_iは自治体iの流域人口(人)，S_{ij}は自治体iにおける処理形態jの普及率(%)，B_jは処理形態jの排出率(%)である．**表-1**に生活系の発生負荷量原単位と生活排水の処理形態別排出率を示している．

b) 産業系

産業系の排出負荷量は中分類別に出荷額に排出負荷量原単位と総事業所数に占める流域内事業所数の割合を乗じて求めた．式(2)に算定式を示している．

$$D_I = \sum_i \sum_j (G_{Ij} \times M_{ij} \times C_{ij} \times 365/10^6) \quad (2)$$

ここで，下付きiは自治体，下付きjは中分類，D_Iは産業

表-2 産業系の中分類別排出負荷量原単位

	中分類	原単位(g/day/百万円) COD	窒素
12	食料品	26.13	5.26
13	飲料・たばこ・飼料	11.61	1.42
14	繊維工業	56.41	13.15
15	衣服・その他の繊維製品	7.66	1.09
16	木材・木製品(家具を除く)	6.13	0.18
17	家具・装備品	1.58	0.10
18	パルプ・紙・紙加工品	13.73	0.80
19	出版・印刷・同関連産業	2.06	0.10
20	化学工業	24.51	9.75
21	石油製品・石炭製品	3.22	0.28
22	プラスチック製品	4.49	0.27
23	ゴム製品	2.74	0.14
24	なめし革・同製品・毛皮	177.21	13.32
25	窯業・土石製品	11.82	0.24
26	鉄鋼業	2.00	0.38
27	非鉄金属	—	—
28	金属製品	1.93	0.88
29	一般機械器具	4.03	0.76
30	電気機械器具	4.26	0.73
31	輸送用機械器具	6.42	1.13
32	精密機械器具	2.06	0.52
34	その他	21.48	9.72

系の排出負荷量(kg/year)，G_{ij}は中分類jの排出負荷量原単位(g/day/百万円)，M_{ij}は自治体iにおける中分類jの工業出荷額(百万円)，C_{ij}は自治体iにおける中分類jの総事業所数に占める流域内の事業所数の割合である．ここで，中分類jの排出負荷量原単位の算定には次式を用いた．

$$G_j = \frac{\sum_k (J_k \times K_k)}{\sum_k M_k} \tag{3}$$

ここで，下付きkは中分類jにおける細分類，J_kは細分類kの工場排水水質(mg/L)，K_kは細分類kの工場排水量(m^3/day)，M_kは細分類kの製造品出荷額(百万円)である．式(3)を用いて原単位を求めるには，細分類毎の工場排水水質，工場排水量，および製品出荷額が必要である．しかし，対象自治体の細分類別出荷額を得ることができなかったので，今回は流域別下水道整備総合計画調査・指針と解説[7]および平成12年工業統計調査・産業細分類別統計表[8]から和歌山県平均の原単位を求めて利用した．一方，事業所からの排水水質は水質汚濁防止法などの法律によって規制されている．しかし，流域内の規制対象事業所の情報は得られなかったので，今回は文献7)に載っている発生源水水質を各細分類の工場排水水質として利用した．ただし，和歌山県内の細分類の1事業所あたりの平均排水量が50m^3/day以上，かつ工場発生水質が排水基準値よりも高い細分類については，規制対象と考えて排水水質に排出基準値を用いることにした．**表-2**に中分類別の排出負荷量原単位を示している．

表-3 面源の排出負荷量原単位

土地利用	原単位(kg/km^2/year) COD	窒素
果樹園	2670	貴志川:10194 柘榴川:6646
水田	11110	1970
森林	3640	440
畑	2670	6900
市街地	10700	1620

c) **面源(果樹園，水田，畑，森林，市街地)**

面源の排出負荷量は各面源の排出負荷量原単位にそれぞれの面積を乗じて求めた．式(4)に算定式を示している．

$$D_i = G_i \times A_i \tag{4}$$

ここで，下付きiは面源，D_iは面源iの排出負荷量(kg/year)，G_iは面源iにおける排出負荷量原単位(kg/km^2/year)，A_iは面源iの面積(km^2)である．

表-3に各面源の排出負荷量原単位を示している．果樹園の排出負荷量原単位は，文献7)に作物や地域別に載っているが，その値は対象地域の気候，土壌，収穫量などの条件よって大きく異なる．そこで，窒素の原単位は，地元のJA紀の里が指導している肥料や栽培面積などのデータを利用して，果樹園に投入された肥料中の窒素量から作物による窒素吸収量を減じたものを果樹園の総面積で除して求めた．式(5)に算定式を示している．

$$G_o = \frac{\sum_i \sum_j (B_j \times A_{ij} - H_{ij} \times K_j) \times C_i}{A_o} \tag{5}$$

ここで，下付きiは自治体，下付きjは作物，D_iは土地，G_oは排出負荷量原単位(kg/km^2/year)，B_jは作物jの果樹園単位面積あたりの肥料中の窒素量(kg/km^2/year)，A_{ij}は自治体iにおける作物jの栽培面積(km^2)，H_{ij}は自治体iにおける作物jの収穫量(kg/year)，K_jは作物jの単位収穫量あたりの窒素量[9](kg/year)，C_iは自治体i内の総果樹園面積に占める流域内面積の割合(%)，A_oは果樹園の総面積(km^2)である．すなわち，$B_j \times A_{ij}$は自治体iにおける作物jの果樹園に投入された肥料中の窒素量，$H_{ij} \times K_j$は自治体iにおける作物jの果樹園における窒素吸収量である．なお，今回は肥料成分中の窒素は速やかに土壌から溶脱すると仮定しており，窒素の土壌中での滞留時間は考慮していない．また，作物の種類および収穫量は流域毎に異なるので，流域毎に原単位を求めた．一方，同じ方法を利用できなかったCODの原単位には畑地の文献値[7]を用いた．

水田からの流出経路には表面流出と地下浸透があり，

表-4 流達負荷量と水質成分負荷量の比較

	水質成分負荷量 (kg/year)	流達負荷量 (kg/year)	流達負荷量/水質成分負荷量
COD	680,330	1,142,063	1.68
窒素	312,999	298,850	0.95

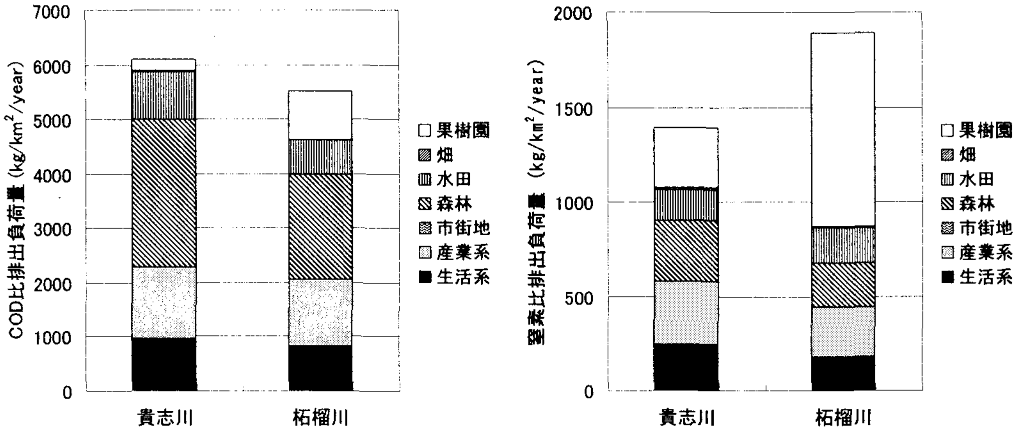

図 - 4 CODおよび窒素の比排出負荷量

果樹園のように単純ではない．また，総負荷に占める表面流出と地下浸透流出の割合等の利用可能なデータも少ない．したがって，現時点では果樹園と同じように投入施肥量から窒素の原単位を算定することは不可能であり，貴志川流域と同じ普通田の文献値[10]を用いることにした．また，CODの原単位には文献値[7]を用いた．

市街地，森林，および畑地の原単位には文献値[7]を用いた．なお，畑地の原単位は果樹園と同様に作物によって大きく異なるが，流域内に畑地はほとんどなく，その影響は非常に小さいので文献値[7]を用いることにした．

(2) 結果と考察

a) 解析精度

ここでは，解析精度を検証するために，貴志川最下流部での流達負荷量(=排出負荷量×流達率)と実測値から算出した水質成分負荷量を比較した．流達率の算定には文献10)の降雨時を含めた通年の流達率の調査事例結果の平均値(COD：69.83%，窒素：80.14%，ただしダム水，原水，湖流出水を除く)を利用した．なお，水質成分負荷量は国土交通省の観測点(K-07地点)における水質と流量のデータを用いてL-Q式から求めた．

表-4に流達負荷量と水質成分負荷量を示している．面源の原単位に文献値を用いたCODは流達負荷量が水質成分負荷量の1.68倍と大きくなったが，果樹園の原単位を投入施肥量から求めた窒素は0.95倍とほぼ等しくなった．COD負荷量に関しては，面源の原単位全てに文献値を用いたため解析値が大きくなった可能性があり，今後はより正確な原単位を求めて精度向上を図る必要があるだろう．一方，本研究で最も重要と考えられる窒素の負荷量に関しては，硝酸イオン濃度に与える土地利用の影響を評価するのに十分な精度が得られている．

b) CODと窒素の年間排出負荷量

図-4にCODと窒素の比排出負荷量(流域単位面積あたりの排出負荷量)を示している．負荷源毎に見れば違いはあるが，両流域のCODの比排出負荷量は窒素ほど差がない．また，調査時の比流量もほぼ等しく，貴志川が約0.023m³/s/km²，柘榴川が約0.020m³/s/km²である．すなわち，CODに関しては流域からの負荷が河川水質に与える影響は同程度であり，その結果，両河川のCOD濃度に大きな差が見られないと推察される．ただし，COD負荷量の解析精度は窒素より低いので，より正確な検討を行うためには精度の向上を図る必要がある．

一方，窒素に関しては柘榴川流域の比排出負荷量が貴志川流域の約1.36倍である．図より明らかであるが，この差は主に果樹園からの負荷量の差によって生じている．また，柘榴川流域では果樹園からの窒素負荷が総負荷量の約54%を占めているのに対し，貴志川流域では約23%にすぎない．すなわち，柘榴川の硝酸イオン濃度に特異な変化を生じさせているのは，総負荷量に占める割合の最も大きい果樹園からの窒素流出である可能性が高い．

c) 窒素の月別排出負荷量

果樹園からの窒素流出は，施肥時期，施肥量，作物の生育状況，降水量などの影響を受けており，年間の排出負荷量では果樹園の影響を厳密に評価するには不十分である．例えば，年間の排出負荷量では施肥時期と多雨時期が重なっている6月の柘榴川の硝酸イオン濃度が上昇しない原因を説明できない．そこで，月別の排出負荷量を求めて検討することにした．

果樹園からの月別排出負荷量は，施肥時期および施肥量がわかっているので，月別の投入施肥量と作物の吸収

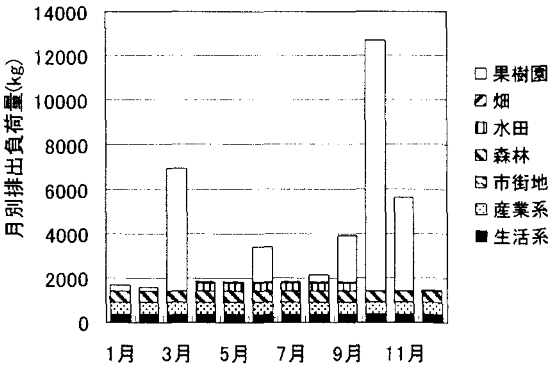

図-5 栢榴川流域の窒素月別排出負荷量

量から月別の原単位を求めて算定した．ただし，作物の吸収量は平均値しかわからなかったので，時期毎の吸収量は同じとした．また，肥料成分中の窒素は施肥された月に速やかに流出するとしており，土壌での滞留時間は考慮していない．一方，水田の原単位は文献値であり，果樹園のように投入施肥量と施肥時期を利用して月別の原単位を求めることは不可能である．そこで，水田からの負荷は灌漑期には均一として，総排出負荷量を灌漑期に均等配分した．したがって，代かき・田植時期や非灌漑期が河川水質に与える影響は考慮していない．その他の負荷源からの排出負荷量には年間を通じて大きな変化はないと仮定して，総排出量を12等分した．なお，厳密には市街地からの負荷は主に雨天時，畑地からの負荷は果樹園や水田と同じように主に施肥時期に生じるが，対象流域では両者の負荷は無視できるほど小さいので12等分しても問題ないと考えた．

図-5に栢榴川流域における窒素の月別排出負荷量を示している．結果を見ると，9月から11月の排出負荷量が果樹園からの排出負荷の影響で大きくなっている．このことから，流域の約3分の1を占める果樹園からの窒素流出が栢榴川の硝酸イオン濃度を9月から上昇させている最も大きな要因であると判断できる．また，実測データでは春まで濃度の高い状態が続いているが，これは秋から冬の施肥時期は作物の成長期でないために窒素が吸収されず土壌中に蓄積しており，それが断続的に続く降雨によって河川に流出しているためと思われる．一方，6月の施肥時期は，施肥量が秋と比べて多くないこと，また作物の成長期であり作物が土壌中の窒素を吸収していることから，秋ほど窒素が土壌中に蓄積しておらず，そのために硝酸イオン濃度が高くならないと考えられる．

ただし，今回の解析では作物の吸収量は一定としており，作物の吸収量の違いが排出負荷量に与える影響は考慮していない．また，窒素肥料の土壌中での滞留時間や流出以外による土壌からの損失も考慮していない．さらに，水田の原単位や水田からの流出負荷量についても多くの検討課題が残されている．したがって，これらの解明を進めて解析に組み込むことで，解析精度の向上が図られ，果樹園や水田からの負荷が河川水質に与える影響をより詳細に評価できるようになるだろう．

5. おわりに

本研究では，貴志川および栢榴川を対象に水質モニタリングおよび物質負荷量解析を実施して，土地利用の異なる隣接した二流域の河川水質特性および河川水質に与える土地利用の影響を評価した．その結果，流域の3分の1を果樹園が占める栢榴川流域では果樹園からの窒素流出が河川水中の硝酸イオン濃度に最も影響を与えていることが明らかになった．すなわち，秋から冬にかけては果樹園からの窒素流出の影響を受けて栢榴川の硝酸イオン濃度が貴志川よりも高くなっている．また，両河川のCODに顕著な違いが見られないのは両流域の比排出負荷に差がないためであるためと推察された．

今回の解析では果樹園の原単位を投入施肥量から求めたことで月別排出負荷量の算定が可能になり，窒素流出の時期毎の影響を検討できた．ただし，現時点では多くの仮定を設けて解析しているため，解析精度の向上に改善の余地が残されており，今後の課題である．

謝辞：JA紀の里から肥料に関する貴重なデータを頂きました．また，研究室の学生諸氏には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) 辻村真貴ほか：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) 村山重俊ほか：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，日本土壌肥料学会誌，No.72，Vol.3，pp.409-419, 2001.
3) 平田健正ほか：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) 片山精一郎ほか：釜房ダム流域における栄養塩の流出，水工学論文集，Vol.46, pp.223-229, 2002.
5) 江種伸之ほか：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，水工学論文集，Vol.46, pp.893-899, 2002.
6) 例えば，太田陽子・中津川誠：出水時を含む水質成分負荷量と流域土地利用との関係について，水工学論文集，Vol.48, pp.887-892, 2002.
7) 日本下水道協会編：流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説，pp.31-69, 1999.
8) 経済産業省経済産業政策局調査統計部編：平成12年 工業統計調査 産業細分類別統計表，p268, 2002.
9) 熊代克巳：果樹栽培の基礎，農文協，pp.67-68, 2000.
10) 国松孝男・村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，pp.13-14, 1989.

(2003.9.30受付)