

Concentration Change and Effluent Load Characteristics of N, P, and Inorganic Ions in a Watershed in the Shimanto River Basin, Shikoku, Japan

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-03-22 キーワード (Ja): キーワード (En): agricultural and livestock industries, catchment, concentration, effluent load, river 作成者: 吉田, 正則, 村上, 敏文, 吉川, 省子, 藤原, 伸介 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/00001675

四万十川の一流域における窒素，リン，無機イオンの濃度変動 および負荷流出特性

吉田正則・村上敏文*・吉川省子・藤原伸介**

Key words : agricultural and livestock industries, catchment, concentration, effluent load, river

目 次

I 緒 言	75	1 降水の水質	78
II 対象流域	76	2 手計測，手採取による水質評価	78
III 研究方法	76	3 自動測定と修正補完による流量， 水質評価	81
1 調査地点	76	4 物質収支	85
2 調査期間	77	5 農業集落の影響	87
3 流 量	77	V 摘 要	87
4 降 水 量	77	謝 辞	88
5 水 質	77	引用文献	88
6 日負荷量と比負荷	77	Summary	89
IV 結果と考察	78		

I 緒 言

四万十川は，四国山地の不入山に源を發し，高知県西部の5市町，愛媛県南部の3市町（合併後）を流域とし，四国第二の流域面積（2,270km²）を有する河川である。本河川は“日本最後の清流”として全国的にも名高いが，1980年代以降，支流における水量の減少，濁りの発生，漁獲高の減少などが契機となって水質の悪化が懸念されるようになった¹⁾。

そのため高知県は「四万十川清流保全計画」²⁾や「清流四万十川総合プラン」³⁾を策定し，市街地や事業所に対する排水浄化処理を重点的に進めてきた。しかし四万十川上流域は養豚を中心とする畜産業の盛んな地域であり²⁾，豚舎からは多量の汚水が直接川へ放流されている。これらの汚水は基本的に

曝気処理されたもので，国の排水基準⁴⁾からみても特に問題になるものではないが，そこに含まれる多量の負荷が四万十川の水質にどのような影響をおよぼしているかは不明のままといわざるを得ない。

また同地域は水稻のほか，ショウガや大豆の栽培が盛んな地域である。水稻に関しては春先の川の濁りと代かきとの関係が指摘されているが，これは単に懸濁物の流入ということだけでなく，窒素，リンなど肥料成分の流入問題としても捉えることができよう。

ショウガは近年，中国産などとの競争からより一層の高収量，高品質化が求められており，化成肥料や堆肥が増加する一因となっている。また大豆は米からの転換作物として栽培が盛んになりつつあるが，ここでも養豚から発生する大量の豚おん堆肥を投入している実態がある。

(平成20年9月1日受付，平成20年12月9日受理)

広域農業水系保全研究チーム

*現 東北農業研究センター

**現 中央農業総合研究センター

このように四万十川上流域では、畜産業のみならず耕種農業からも河川への窒素、リンの流出懸念が高まってきているが、農畜産業から流出する窒素、リンの実態や河川水質との因果関係については未解明な部分が多く、行政的にも具体的な対策が打たれないままとなっている。

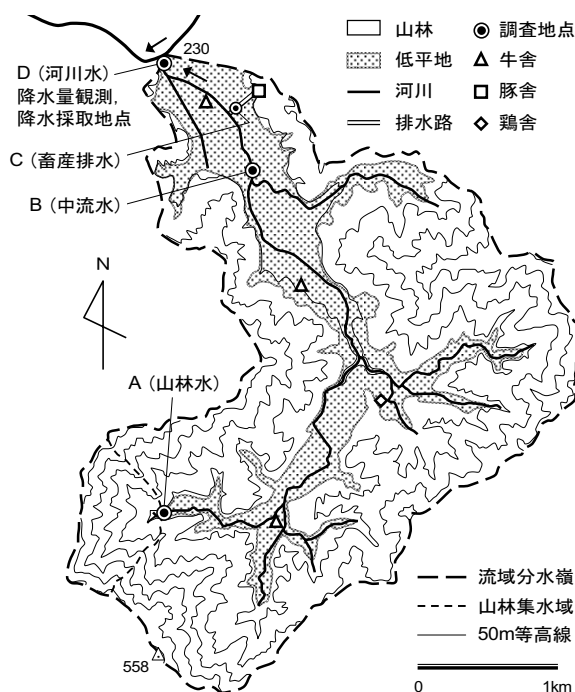
そこで前報⁵⁾では、農業活動による水質汚濁のおもな原因となる窒素、リン、およびこれらの流出特性を知る上で役立つ情報となる無機イオンの河川水質におよぼす影響を明らかにするため、流量、濃度、負荷量の測定・評価手法の確立を図ってきた。本報では、前報⁵⁾により確立された手法を用いて窒素、リン、無機イオンの濃度、負荷量の変動実態を明らかにする。そして各水質項目の変動特性や物質収支などから農畜産業と河川水質との関わりに関する定量的な評価を試みたので報告する。

Ⅱ 対象流域

対象流域は四万十川上流の少々支川に属する面積815haの流域である(第1図)。標高は230~558m、年間降水量は3,264mm、年平均気温は15.0℃である(降水量と気温は1990~1999年のアメダス平均値)。流域の76%(622ha)は山林が占め、残り24%(193ha)を川に沿う低平地が占める。山林はスギ・ヒノキの常緑針葉樹人工林で現在も伐採と植林が行われている。低平地には112haの耕作地が含まれるほか、耕作放棄地、遊休地、宅地、道路などが含まれる。

おもな作目は水稲(76.0ha)、ショウガ(7.3ha)、大豆(6.5ha)、タバコ(2.9ha)、施設ニラ(1.7ha)などである(カッコ内は作付け面積、2000年役場聞き取り)。水稲のかんがい水源は山林流出水、かんがい方式は用排水分離の水路かんがい以一筆ごとに掛け流しが行われる。水稲以外の作目は転換畑栽培である。畜産は酪農家2戸、肥育牛農家1戸、養豚農家1戸、ブロイラー農家1戸で、乳用牛34頭、肉用牛162頭、豚1,328頭、ブロイラー17,000羽が飼養されている。常住人口は270人である(ともに、2000年役場聞き取り)。

なお、上記の土地利用、作物栽培、家畜飼養状況は四万十川上流における農業地域の特徴をよく表し



第1図 調査流域の概要

たものであり、本流域で得られる知見が当該農業地域全体の評価に役立つと予想されることから本流域を選定した。

Ⅲ 研究方法

1 調査地点

調査地点は河川最上流の山林-低平地境界地点A(前報⁵⁾の山林水Aと同一地点)、中流地点B、豚舎からの污水が河川に流入する直前の排水路地点C、流域(低平地)末端地点Dとし、地点Aでは「山林水」、地点Bでは「中流水」、地点Cでは「畜産排水」、地点Dでは「河川水」と区分して調査した(第1図)。また地点Dでは降水量観測と降水採取を併せて行った。

畜産排水は豚舎から常時排出される污水をおもな給源とし、周辺農地の地表排水を交えながら河川へ流出する。中流水は畜産排水の河川出口から上流へ約500m遡った地点の河川水である。牛舎や鶏舎からの常時排水は認められなかったことから、中流水の水質は、これより上流に位置する面源からの水質を表わすとみなしてよい。

2 調査期間

調査期間は2000年3月16日から2003年3月15日の3年間である。本報ではこの期間を3分割し、2000年3月16日から2001年3月15日までを1年目、2001年3月16日から2002年3月15日までを2年目、2002年3月16日から2003年3月15日までを3年目と呼ぶ。

畜産排水と中流水については2001年5月23日から2002年9月25日までの1年4ヶ月間を調査期間とした。

3 流 量

河川水，山林水の流量 ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$) は前報⁵⁾の方法で測定した。欠測日の流量は、実測された流量から修正補完法⁵⁾を用いて推定した。手計測による全山林流量 ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$) (後述の第3図で使用) は、便宜上、前報⁵⁾の式(37)における修正補完流量に山林水の手計測流量を代入して求めた(山林水拡張法)。

畜産排水，中流水の流量 ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$) は原則2週間に1度、プロペラ式流速計(三光精密工業製SV101型)による流速・断面積計測法⁶⁾で測定し、1日当たりの流量に換算した。

4 降 水 量

日降水量 (mmd^{-1}) は転倒ます式雨量計(キャンベル製385型)により測定した。欠測日は、流域より5km離れたアメダス観測所の日降水量データを用いた。

5 水 質

1) 河川水と山林水

河川水，山林水の濃度 (mgL^{-1}) は前報⁵⁾と同様の方法で採水，分析した。河川水の濃度は自動採水により原則毎日測定したが、器械の不調などで採水ができなかった日は欠測日とした。山林水の濃度は原則2週間に1度の手採取しか行わなかったため、手採取日を含む調査期間すべての日を欠測日として扱った。これらの欠測日の濃度は、実測された濃度から修正補完法⁵⁾を用いて推定した。手採取による全山林濃度 (mgL^{-1}) (後述の第3図で使用) は、便宜上、前報⁵⁾の式(39)における修正補完

濃度に山林水の手採取濃度を代入して求めた(山林水拡張法)。

2) 畜産排水と中流水

畜産排水と中流水は原則2週間に1度、ポリ瓶で手採取した。畜産排水，中流水の濃度 (mgL^{-1}) は、前報⁵⁾と同様の方法で分析した。採水作業の不備から調査期間中9日の欠測日が生じたが、河川水や山林水のような濃度補完は行っていない。

3) 降 水

降水は地上3mに設けた直径180mmの漏斗で採取し、6Lポリ瓶に貯留したあと原則2週間に1度回収した。漏斗上面は常に開放し、湿性降水物(雨滴に取り込まれて降下する物質)と乾性降水物(粒子として降下する物質)を区別しなかった。この方法では任意日の降水濃度 (mgL^{-1}) は分析できないため、当該日のあとの直近回収日の濃度で代表させた。また回収日までの濃度変化や水質変化は無視した。

4) 水質項目と濃度分析法

分析する項目は全窒素(T-N)，全リン(T-P)，ナトリウムイオン(Na^+)，アンモニウム態窒素($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)，カリウムイオン(K^+)，マグネシウムイオン(Mg^{2+})，カルシウムイオン(Ca^{2+})，塩化物イオン(Cl^-)，硝酸態窒素($\text{NO}_3^- - \text{N}$)，亜硝酸態窒素($\text{NO}_2^- - \text{N}$)，リン酸態リン($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$)，硫酸イオン(SO_4^{2-})である。濃度分析法は前報⁵⁾に記したとおりである。

なお本報では、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ と $\text{NO}_3^- - \text{N}$ の合計を $\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ と表わし、T-N濃度から $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ および $\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ 濃度を差し引いた値を有機態窒素(Or-N)濃度と定義する。

6 日負荷量と比負荷

河川水，全山林の日負荷量 (kg d^{-1}) は前報⁵⁾に基づいて求めた。畜産排水，中流水の日負荷量 (kg d^{-1}) は、日流量に当該日の濃度を乗じて求めた。手計測，手採取による全山林負荷量 (kg d^{-1}) (後述の第3図で使用) は、前記の手計測全山林流量に手採取による全山林濃度を乗じて求めた。濃度が検出されなかった日は日負荷量を 0 kg d^{-1} とした。

降水の比負荷 ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) は、日降水量 (mmd^{-1}) に流域面積を乗じた水量にさらに降水濃度を乗じ、1 ha当たりの負荷量に換算して求めた。

IV 結果と考察

1 降水の水質

第2図に、降水中のT-N、T-Pの濃度と比負荷を期間降水量との関係で示す。ここでの期間降水量は、前回の降水回収日翌日から当該降水回収日までの日降水量合計値を表わす。

期間降水量が10mm以下の場合、T-Nが最大 5.40mgL^{-1} 、T-Pが最大 0.42mgL^{-1} と濃度が高まるときがあったが、期間降水量が10mmを上回る領域では、T-Nが 2mgL^{-1} 以下、T-Pが 0.1mgL^{-1} 以下でおおむね安定していた。少雨時に濃度が高まったのは大気中や漏斗面にあった乾性降水物が少量の降水に取り込まれたためと思われる。

期間降水量と降水比負荷との関係はT-N、T-Pとも250mm前後を頂点とする山型の分布を示したが、原因などの詳細は不明である。

3年間の年平均比負荷（3年積算値を3で除した値）を求めるとT-Nが 18.7kg ha^{-1} 、T-Pが 0.69kg ha^{-1} となった。また、3年間の降水量加重平

均濃度はT-Nが 0.60mgL^{-1} 、T-Pが 0.02mgL^{-1} となった。

2 手計測、手採取による水質評価

第3図には、手計測、手採取による濃度、負荷量の時系列変化、および流量に対する濃度の分布状況を示す。データは1～3年目の全期間を含むが、便宜上、各年の同一月日を重ねて示す。

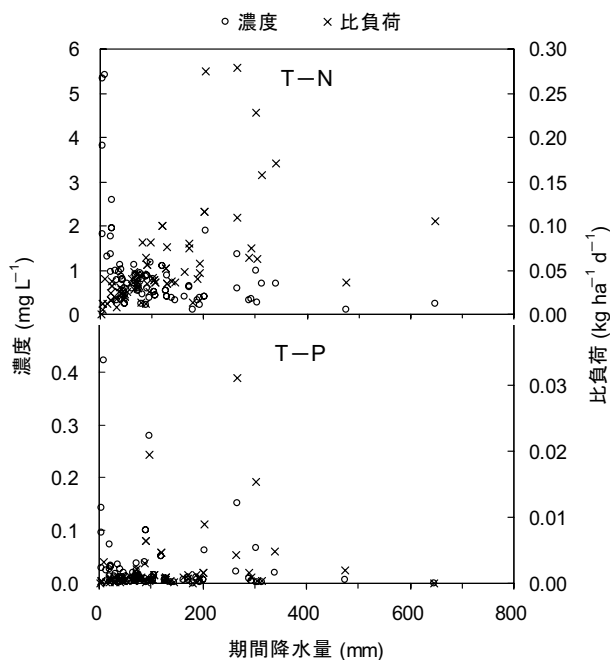
図中の近似曲線は、3次または4次の多項式による負荷量の変動傾向を示す。全山林負荷量の近似曲線は、プロットが低下したため途切れている部分がある。NH₄⁺-NとPO₄³⁻-Pの負荷量については、検出回数が少ないため近似曲線を一部省略した。低平地降水負荷量は、降水採取期間中の負荷量を期間日数で除した値をプロットした。

全山林のNH₄⁺-N、NO₂₊₃⁻-N濃度は、降水に比べ低い値を示した。これは降水として山林へ供給されたNH₄⁺とNO₂₊₃⁻が、前者については林内において酸化、吸収され、後者については前者の酸化生成成分を含め林内で吸収、固定、脱窒されたためと考えられる。一方全山林のNa⁺、Mg²⁺、Ca²⁺濃度は、降水に対し高い値を示した。これは、蒸発散による降水の濃縮や基岩の化学的風化の影響が関係していることを示す⁷⁾。

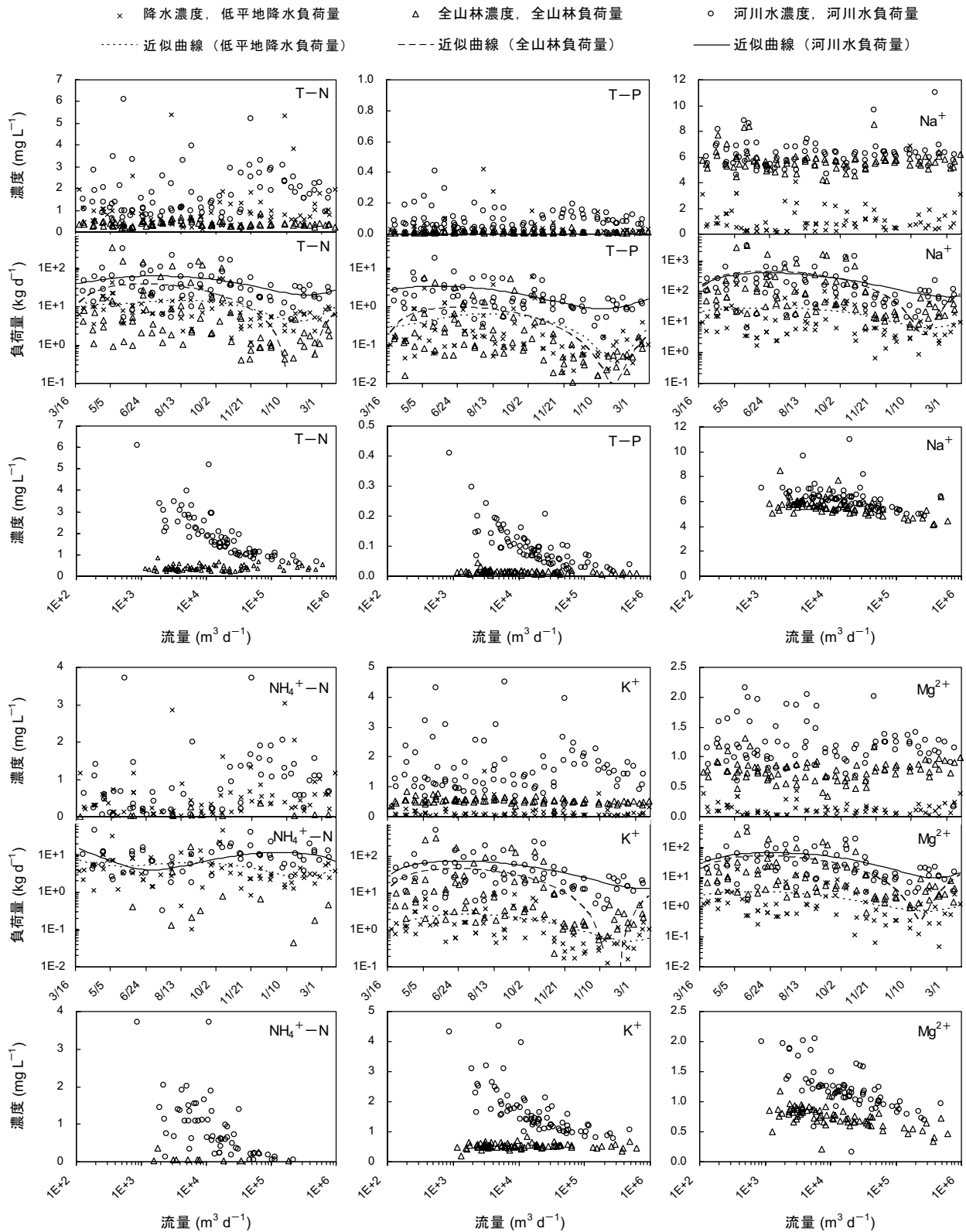
河川水に関しては、Na⁺、Cl⁻濃度の年間変動が小さく、その水準は全山林水と同等であった。しかしこれら以外の水質項目は濃度の年間変動が大きく、春から夏、および秋から冬にかけて濃度ピークがみられた。こうした濃度の高まりは、多くの場合、川の流量が低下したときに現れた。

河川水の負荷量をみると、降水量、流量の多い夏に増加し、それらの少ない冬に減少する傾向がみられた。しかしNH₄⁺-Nだけは例外的に夏に少なく冬に多い傾向がみられた。全山林にはこのような傾向がみられないことから、低平地由来NH₄⁺-Nの影響が示唆される。また、こうした季節的な変動とは別に突発的な濃度の高まりが認められることから、不定期的な人為起源の可能性がうかがわれる。

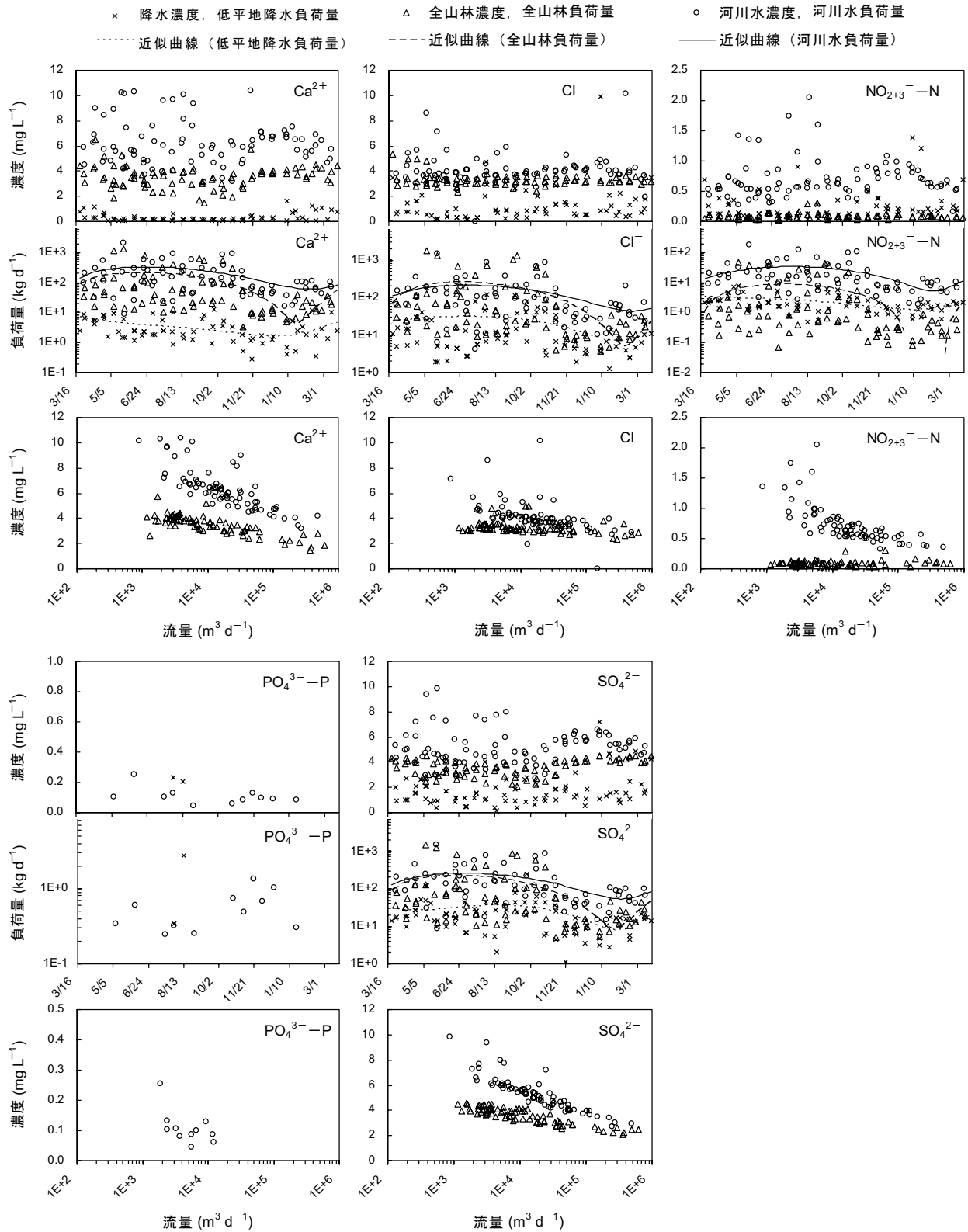
流量に対する濃度の関係は、全山林と河川水の分布パターンの違いからつぎのような三つのタイプに分けることができると考えられる。すなわち、山林水と河川水の分布が並行するタイプI (Na⁺、Cl⁻)、



第2図 降水の濃度、比負荷の対降水量分布



第3図 手計測，手採取による濃度，負荷量の時系列変化，および流量に対する濃度の分布
 曲線は3次または4次多項式による変動傾向を示す。全山林流量，濃度，負荷量は，河川水との比較のため手計測流量，手採取濃度を山林水拡張法で変換した値を示す。NH₄⁺-Nの全山林負荷量は検出回数が少ないため曲線を省略した。



第3図 (つづき) 手計測, 手採取による濃度, 負荷量の時系列変化, および流量に対する濃度の分布
 曲線は3次または4次多項式による変動傾向を示す. 全山林流量, 濃度, 負荷量は, 河川水との
 比較のため手計測流量, 手採取濃度を山林水拡張法で変換した値を示す. PO₄³⁻-Pの負荷量は検
 出回数が少ないため曲線を省略した.

第1表 T-N, T-P, 無機イオンのタイプ別特徴

判断基準	タイプI		タイプII				タイプIII				
	Na ⁺	Cl ⁻	T-N	T-P	K ⁺	NO ₂₊₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	Mg ²⁺	Ca ²⁺	PO ₄ ³⁻ -P	SO ₄ ²⁻
低平地での濃度上昇	×	×	◎	○	○	◎	○	○	○	○	×
低平地での負荷増大	×	×	◎	◎	◎	◎	○	×	×	○ ^a	×
渇水時の濃度上昇	×	×	◎	◎	◎	○	◎	○	○	○	○

◎：明瞭に認められる，○：少し認められる，×：認められない。

^a 山林負荷としては全く検出されず，河川水でもあまり検出されなかったため。

同分布が流量減少とともに明瞭に分かれるタイプII (T-N, T-P, K⁺, NO₂₊₃⁻-N), 同分布がタイプIとタイプIIの間にあるタイプIII (NH₄⁺-N, Mg²⁺, Ca²⁺, PO₄³⁻-P, SO₄²⁻) である。これらの三つのタイプの特徴をまとめたのが第1表である。ここでは，低平地での濃度上昇が認められるか，低平地での負荷増大が認められるか，渇水時の濃度上昇が認められるか，の三点を判断基準にし，それぞれの基準について，「明瞭に認められる」，「少し認められる」，「認められない」，の三段階に区分した。

タイプIの水質項目 (Na⁺, Cl⁻) は，どの判断基準も「認められない」項目である。タイプIIの水質項目 (T-N, T-P, K⁺, NO₂₊₃⁻-N) は，判断基準のうちふたつ以上が「明瞭に認められる」項目である。そしてタイプIIIの水質項目 (NH₄⁺-N, Mg²⁺, Ca²⁺, PO₄³⁻-P, SO₄²⁻) は，ほとんどの判断基準が「少し認められる」か「認められない」項目である。

これらの特徴から，タイプIIの水質項目において，低平地通過後の濃度上昇，負荷量増大傾向が強いことが判明した。またNH₄⁺-Nに関しては，低平地での濃度上昇，負荷量増大傾向は強くないものの渇水時の濃度上昇が明らかに認められることから，点源由来の可能性がうかがわれた。

3 自動測定と修正補完による流量，水質評価

第4図には，自動測定値と修正補完値⁵⁾を組み合わせた流量，濃度，負荷量の時系列変化を示す。ここでは分析した11水質項目の代表例としてT-Nの場合を示す。

1) 流 量

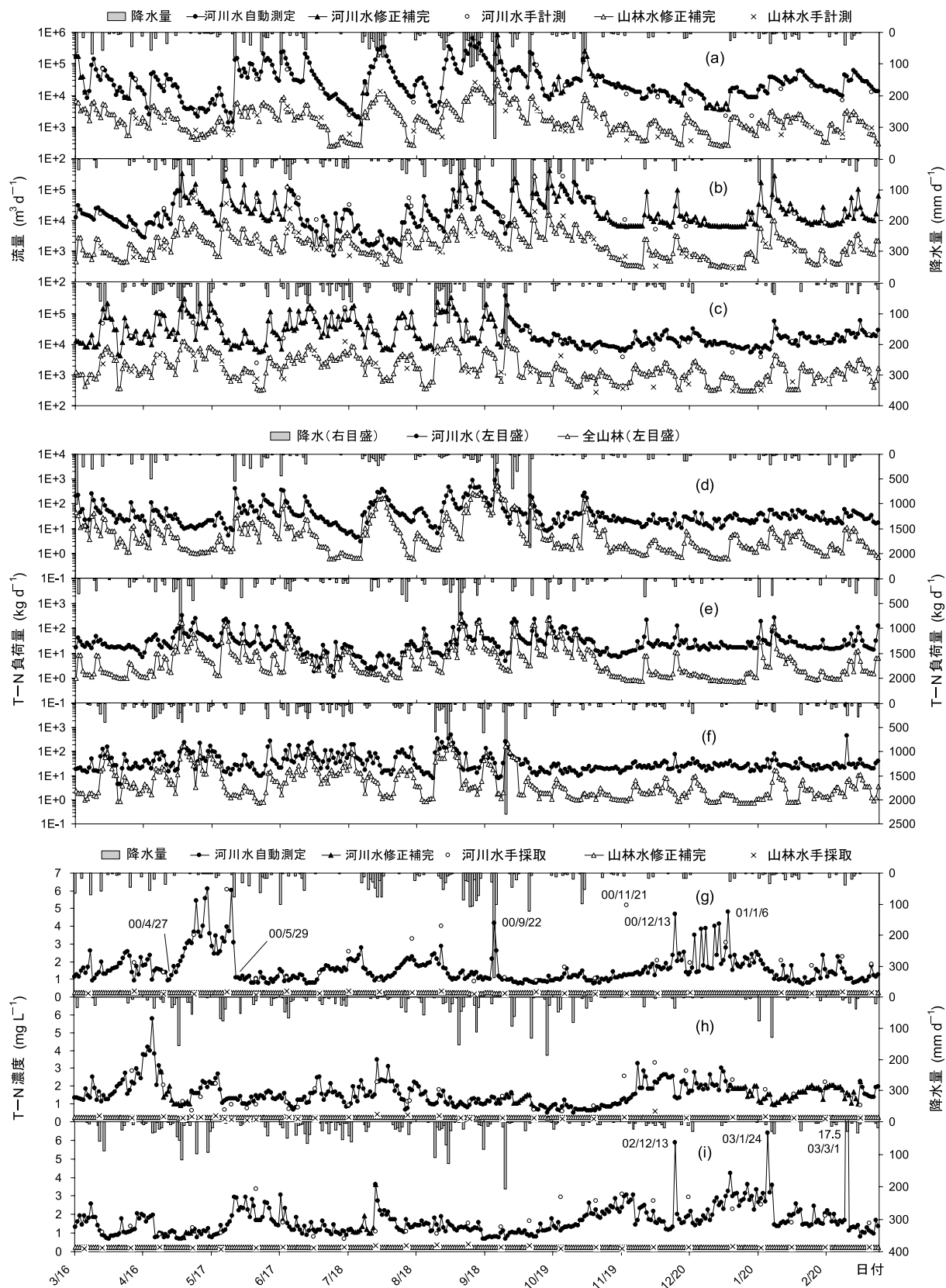
河川水の自動測定流量は降水量の変化によく対応している (第4図 a, b, c)。河川水の修正補完流量も降水量の変化によく対応しており，自動測定流量とのつながりにおいても大きな不都合はみられない。山林水における修正補完流量も河川水の流量に相似する形で降水量によく対応しており，手計測流量との対応もおおむね良好といえる。これらのことは，超音波流速センサーを用いた流量観測法⁸⁾が良好に機能していたことを示すとともに，欠測日における修正補完法の適用⁵⁾が適切に行われたことを示している。

2) 負 荷 量

負荷量の時系列変動をみても降水量との対応関係は良好といえる (第4図 d, e, f)。ただし全山林と河川水を比べると，全山林負荷量が河川水負荷量を超過する日が幾日かみられた (例えば第4図 d, 2000年9月25日~10月2日)。これら日数は3年間の全日数1095日中24日であり，この間の“過剰”流出負荷量は全山林負荷量に対し5%程度であった。

このような過剰流出負荷の発生が修正補完負荷量の評価誤差⁵⁾によるものでないとするれば，その過剰分がどこへ流出したかが問題となる。そこで以下のような考察を行った。

前報⁵⁾にも記した通り，本流域の地質は四万十帯北帯と呼ばれる砂岩，泥岩の互層からなっている^{7, 9)}。そのためこれらの岩石を母材とする堆積層は，泥質な砂層から形成されていることが推測される。本流域の低平地もこのような砂層から構成されると仮定すると，土層の地下水滲出率 (飽和した間隙水のうち重力によって排出される水の全容積に



第4図 自動測定値と修正補完値を組み合わせた (a) 1年目, (b) 2年目, (c) 3年目の流量, (d) 1年目, (e) 2年目, (f) 3年目のT-N負荷量, および (g) 1年目, (h) 2年目, (i) 3年目のT-N濃度の時系列変化
図中の00/4/27は2000年4月27日を示す。

対する%)は、大久保・藤田の文献値¹⁰⁾から15~20%と推定される。ここで土層の平面積を低平地に等しい193ha、地下水上昇高を現地井戸調査や所有者の聞き取り調査などから最大5mと仮定すると、本流域が地下に貯留できる水の量は最大 $5\text{ m} \times (0.15 \sim 0.20) \times 193 \times 10^4\text{ m}^2 = (1.4 \sim 1.9) \times 10^6\text{ m}^3$ と見積もられる。

一方、全山林流量と低平地流量の和を河川水流量と比較して、前者が後者より大きい日の差分(過剰流量)を1日当たり平均すると、 $7.0 \times 10^4\text{ m}^3\text{ d}^{-1}$ と計算される。ただし低平地流量には実測値がなく、降水日のため蒸発散量は少ないと推測されることから、ここでの低平地流量は低平地降水量の体積換算値で代用した。過剰流量が連続して発生した日の最長日数は2000年9月11日~10月2日の22日である。これらの値を用いると、過剰流量の最大量は $7.0 \times 10^4\text{ m}^3\text{ d}^{-1} \times 22\text{ d} = 1.5 \times 10^6\text{ m}^3$ と推定される。

地下貯水可能量 $(1.4 \sim 1.9) \times 10^6\text{ m}^3$ が過剰流量の最大量 $1.5 \times 10^6\text{ m}^3$ とほぼ等しい量になったことから、過剰流出日の全山林流量の一部が低平地の地下帯水層に一時的に貯留されている可能性が示唆された。

つぎに全山林負荷量のうち、どの程度の割合が地下へ貯留され得るかを試算する。まず過剰流量(=地下貯水量)に占める全山林由来分の比率を、過剰流量が発生した日の全山林流量と低平地流量の和に対する全山林流量の比率(63%)に等しいと仮定する。すると過剰流量のうちの全山林由来分は $7.0 \times 10^4\text{ m}^3\text{ d}^{-1} \times 0.63 = 4.4 \times 10^4\text{ m}^3\text{ d}^{-1}$ となる。過剰流量が発生した日の全山林流量は日平均 $13.4 \times 10^4\text{ m}^3\text{ d}^{-1}$ であったことから、全山林流量に占める全山林過剰流量の割合は33%となる。ここで地下浸透する負荷量の割合が地下浸透する流量の割合に等しいとすると、全山林負荷量のうち地下へもぐらずに速やかに流出する負荷量は全山林負荷量のうち $100\% - 33\% = 67\%$ 分となる。このような考えのもとで計算し直すと、全山林負荷量のうち地下へもぐらず流出する負荷量が河川水負荷量を上回る日数は(前記の24日に対し)わずか2日、この間の過剰流出負荷量が全山林負荷量に占める割合は(前記の5%に対し)0.2%とごくわずかになる。

以上の考察から、本流域においては、山林から流

出した負荷の一部が低平地の地下に一時的に貯留されることにより、全山林負荷量が河川水負荷量を超過する現象は説明できると考えられた。そして一旦地下に貯留された負荷は、降水後河川水位が低下すると、高度がより高い周辺地下水位とのあいだに生じる水頭差によって地下水とともに河床へと浸出し、河川水負荷の一部として系外へ流出するものと考えられた。

3) 濃 度

本流域の河川水濃度は、降水の継続とともに低下し、降水終了後徐々に上昇するのが一般的傾向であった(第4図 g, h, i)。ただし降水初日に関しては濃度が上昇する日と下降する日の両方がみられた。いずれの場合も降水2日目以降は降水の継続とともに濃度が低下した。すべての降水初日について、その日の濃度が前日(無降水日)濃度より高かったか低かったかをみると、191日中前者は110日、後者は81日だった。単に無降水日の濃度上昇が継続しただけとみられる日を除くと、降水初日の濃度の上昇、下降の頻度はほぼ同数とみられた。

降水初日における濃度変化の違いについてはつぎのような理由が考えられる。すなわち、河川水の濃度変化は降水初期における負荷物質の洗い出しによる濃度上昇期と、その後の流量増にともなう濃度希釈期の2期に分けられる。降水初日の平均濃度は濃度上昇期における濃度上昇の度合いとその継続時間、および濃度希釈期における濃度下降の度合いとその継続時間によって決まる。よって両者のバランスによって降水初日の平均濃度が上昇するか下降するかが決まる、と考えられる。

河川水濃度の基調的な変動パターンは上記のようであるが、時期や降水イベントによっては特異な水質変動が現れる。まず、代かきが行われる4~5月の時期である。この時期は雨の量や降り方が河川の水質に大きな影響をおよぼした。

比較的雨が少なかった1年目(第4図 g, 2000年4月27~5月29日, 期間降水量133mm)は濃度の上昇が大きく、 6 mgL^{-1} に達することもしばしばあった。しかし雨が多かった2年目, 3年目(第4図 h, i, 2001, 2002年4月27~5月29日, 期間降水量それぞれ491mm, 509mm)は、濃度が高くとも3

mgL⁻¹程度しか上がらなかった。特に3年目は、降水の頻度が大きかったことから、濃度は終始1 mgL⁻¹程度を推移した。同期中の河川水負荷量をみると、1年目は日平均負荷量が35kg d⁻¹、期間負荷量が1.2Mgであったのに対し、2年目、3年目は、日平均負荷量が67~81kg d⁻¹、期間負荷量が2.2~2.7Mgと約2倍に増えた(第4図 d, e, f)。

濃度の上昇とともに現れた河川の濁りが代かき直後の田面水の強制落水(代かき落水)によることを目視で確認したこと、そのときの田面水10サンプルの平均T-N濃度が12.8mgL⁻¹と比較的高い値を示したことから、この時期の河川水負荷量の相当部分は代かき落水によってもたらされていると考えられる。しかし代かき落水の河川水質への影響の仕方は降水量や雨の降り方によって異なっており、雨の少ない年は濃度が高く負荷量は少ない、雨の多い年は濃度が低く負荷量が多い、そして雨が頻繁に降るほど濃度は低下するという傾向を持っていた。

本流域では、河川水濃度が降水の継続とともに低下するのが一般的と述べたが、降水イベントによっては降水2日目以降に急激に濃度が上昇する例がみられた(第4図 g, 2000年9月22日)。この日は前日からの29mmd⁻¹に続き、337mmd⁻¹の集中豪雨が降った日である。この日採水した懸濁物質の濃度は61mgL⁻¹であり、平常時(2 mgL⁻¹)の約30倍に達した。また懸濁物中の窒素濃度は3.35mgL⁻¹であり、採水中のT-N濃度(4.19mgL⁻¹)の80%を占めた。このように通常の降水よりはるかに多い雨が集中的に降ると、河道や流域内に滞留していた堆積物が一気に押し流され、降水2日目にもかかわらず高濃度の河川水が発生したと考えられる。

その他、濃度が急激に上昇する日のなかには、降水とは全く関係のない日が幾日かみられた(例えば第4図 g, 2000年11月21日, 2000年12月13日~2001年1月6日, 第4図 i, 2002年12月13日~2003年1月24日, 2003年3月1日)。このことについては次項で詳しく述べる。

山林水濃度に関しては、河川水濃度と対照的に3年間ほとんど変化せず(0.22~0.27mgL⁻¹)、平均0.25mgL⁻¹の低い水準を維持していた。

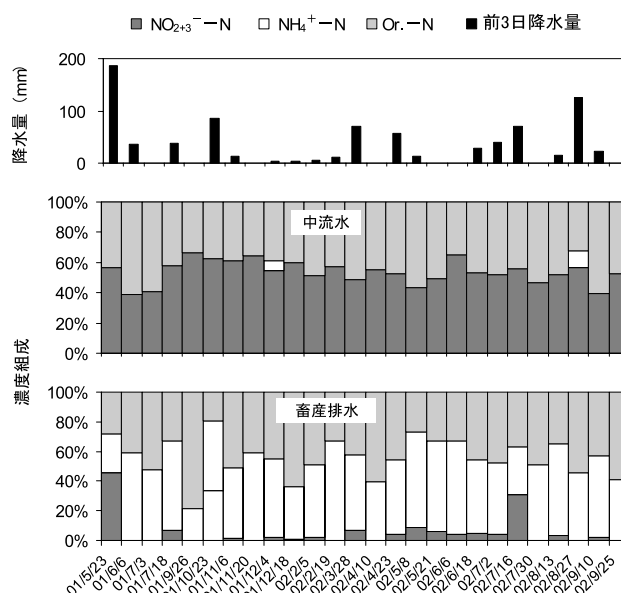
4) 畜産排水と代かき落水の影響

前項で述べた降水に無関係な濃度上昇の要因を検討するため、第5図に、中流水と畜産排水のT-N濃度に占めるNO₂₊₃⁻-N, NH₄⁺-N, Or.-N濃度の割合を示す。

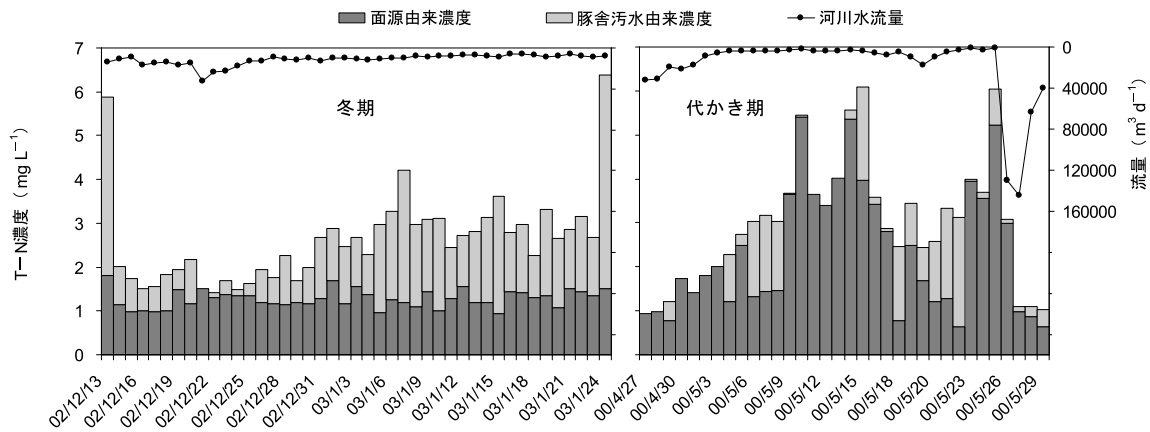
中流水のT-N濃度は、いずれの日もその大部分がNO₂₊₃⁻-NとOr.-Nから組成されていた。一方畜産排水のT-N濃度は、多くの日でNH₄⁺-NとOr.-Nから組成されるものの、一部にNO₂₊₃⁻-Nの組成割合が高まる日があった。このNO₂₊₃⁻-Nの割合が高まる日(2001年5月23日, 2001年10月23日, 2002年7月16日)は、当日以前の3日間に降った雨の量(前3日降水量)が比較的多い日に該当する。逆に前3日降水量が認められない日(例えば2001年7月3日, 2001年9月26日, 2001年11月20日など)は、NO₂₊₃⁻-Nが検出されないか検出されても組成割合が低い日であった。これらのことから畜産排水に含まれるNO₂₊₃⁻-Nの多くは豚舎からの汚水に由来するものではなく、排水路周辺にある農地からの混入によるものであることが推測された。

以上の知見を踏まえ、畜産排水が河川水のT-N濃度におよぼす影響を分析するため、つぎのような五つの仮定をおく。

仮定1: NH₄⁺-Nは豚舎汚水のみ由来し面源には由来しない。



第5図 中流水と畜産排水の成分別窒素濃度組成



第6図 冬期と代かき期における河川水中の面源由来T-N濃度と豚舎污水由来T-N濃度

仮定2： $\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ は面源のみに由来し豚舎污水には由来しない。

仮定3：河川水中の豚舎污水由来Or.-N濃度は、畜産排水中の平均Or.-N/ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 比（ただし $\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ の割合が高かった2001年5月23日，2001年10月23日，2002年7月16日は除く）に当該日の河川水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度を乗じた値に等しい。

仮定4：河川水中の面源由来Or.-N濃度は、中流水の平均Or.-N/ $\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ 比に当該日の河川水中 $\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ 濃度を乗じた値に等しい。

仮定5：豚舎污水由来Or.-Nと面源由来Or.-Nは河川水調査地点に流達するまでに形態変化を起こさない（畜産排水，中流水の流達時間はそれぞれ20，40分程度）。

ただし，これらの仮定から計算した豚舎污水由来Or.-N濃度と面源由来Or.-N濃度の和は，必ずしも実測された河川水中Or.-N濃度に一致しなかった。そこで両者の和が実測Or.-N濃度に等しくなるよう，つぎの式で補正した。

$$C_{t,h} = C \times C_t / (C_t + C_m) \quad (1)$$

$$C_{m,h} = C \times C_m / (C_t + C_m) \quad (2)$$

ここに， $C_{t,h}$ ：補正された河川水中豚舎污水由来Or.-N濃度， C ：実測された河川水中Or.-N濃度， C_t ：仮定3で求めた河川水中豚舎污水由来Or.-N濃度， C_m ：仮定4で求めた河川水中面源由来Or.-N濃度， $C_{m,h}$ ：補正された河川水中面源由来Or.-N濃度。

式(1)，(2)で計算した補正済みOr.-N濃度を河川水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度（豚舎污水由来），または

$\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ 濃度（面源由来）に加え，T-N濃度として表したのが第6図である。

冬期は一年で最も雨が少ない時期であるが，この時期に河川水中のT-N濃度が高まることはすでに述べた。T-N濃度の内訳をみると，面源由来濃度が $1.0 \sim 1.5 \text{ mg L}^{-1}$ とほぼ一定であるのに対し，豚舎污水由来濃度は，流量の減少とともに上昇する傾向をみせた。第4図fの2002年12月13日，2003年1月24日でみせた濃度ピークの原因が豚舎污水由来濃度にあることは第6図から明白である。同様の事情は2002年12月13日～2003年1月24日の連続的な濃度ピークにも認められる。

他方，代かき期をみると，流量減少にともなう濃度上昇の要因は豚舎污水にあるのではなく，むしろ面源由来にあることがわかる。この時期，流域内のあちこちでは代かき作業が行われていたことから，代かき落水の影響が現れたとみられる。通常代かき落水は面源負荷の一種とみなされるが，流量増加によって濃度が低下する点（第6図，2000年5月25日～27日）などは点源に近い性質といえる。このことは，一日一定の面積を約一ヶ月かけて順々に仕上げていく代かき作業の体系に密接に関連しているものと思われる。

4 物質収支

第2表には，本報で扱った全水質項目の年平均負荷量の収支を示す。全山林収支は全山林負荷量から全山林降水負荷量を差し引いた値，低平地収支は河川水負荷量から低平地降水負荷量と全山林負荷量を

第2表 水質項目別の年平均負荷量収支

水質項目	全山林降水	全山林収支 ^a	全山林			河川水
			低平地降水	低平地収支 ^b	(Mg)	
T-N	11.9	-5.9	6.0	3.7	9.5 (50)	19.1
T-P	0.4	-0.3	0.2	0.1	1.0 (77)	1.3
Na ⁺	19.2	50.6 (72)	69.8	6.0	14.8 (16)	90.6
NH ₄ ⁺ -N	5.7	-5.4	0.3	1.8	2.0 (49)	4.0
K ⁺	1.9	5.4 (74)	7.3	0.6	12.0 (60)	19.8
Mg ²⁺	2.1	6.1 (75)	8.2	0.6	7.3 (45)	16.1
Ca ²⁺	3.7	32.1 (90)	35.8	1.1	47.6 (56)	84.5
Cl ⁻	21.6	20.0 (48)	41.6	6.7	7.5 (13)	55.7
NO ₂₊₃ ⁻ -N	2.5	-1.0	1.5	0.8	3.6 (61)	5.8
PO ₄ ³⁻ -P	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.1 (84)	0.1
SO ₄ ²⁻	26.9	10.5 (28)	37.4	8.3	14.7 (24)	60.4

^a 全山林収支 = 全山林 - 全山林降水, ^b 低平地収支 = 河川水 - 低平地降水 - 全山林. カッコ内の数値は, それぞれ, 全山林, 河川水負荷量に対する全山林収支, 低平地収支の割合%を示す. ただし, 収支がマイナスのときは表示しない.

差し引いた値で, それぞれ全山林, 低平地における湧き出し (プラス), 吸い込み (マイナス) 量を示す. カッコ内の数値はそれぞれ全山林, 河川水負荷量に対する全山林収支, 低平地収支の割合%を示す. ただし収支がマイナスのときは表示しない.

全山林収支をみると, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻がプラスになったのに対しT-N, T-P, NH₄⁺-N, NO₂₊₃⁻-N, PO₄³⁻-Pはマイナスになった. 窒素を含む水質項目については, 手計測, 手採取による水質評価で述べた全山林濃度の特徴が裏付けられる結果となった. またT-N収支がマイナスになったことは, 溪流として山林から流出する窒素量が降水として山林に流入する窒素量より少ないとする西村¹¹⁾, 山田ら¹²⁾の見解を裏付けるものとなっている. リンを含む水質項目については, 手計測, 手採取による濃度解析では判然としなかったが, 物質収支的にはわずかにマイナス収支になっていることが明らかになった.

他方, 低平地収支をみると, すべての水質項目がプラスになった. 特に全山林収支がマイナスだったT-N, T-P, NH₄⁺-N, NO₂₊₃⁻-N, PO₄³⁻-Pにおいて河川水に占める低平地収支の割合が49~84%と大きかった. 言うまでもなくこれらの水質項目は動植物の栄養源となる窒素, リンを含む項目である. そのため全山林では動植物や微生物

による吸収, 固定などの影響を受けて流出しにくかったのに対し, 低平地では施肥や畜産排水の影響を受けて流出しやすかったと考えられる.

通常NH₄⁺-Nは土壤中で吸着, 酸化されるため面源負荷としては検出されにくい (第5図の中流水はその証左). しかし本流域では, 豚舎からの排水の影響を受けてNH₄⁺-Nの低平地収支が河川水の49%と高い割合を示したと考えられる. PO₄³⁻-Pについても同様の理由から, 低平地収支の割合が84%と非常に高くなったと考えられる.

Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺については, 全山林に対する全山林収支の割合が72~90%と顕著であり, 母材からの化学的風化の影響が裏付けられる. 他方, 河川水に対する低平地収支の割合は16~60%と全般に低くなっている. 低平地を構成する物質が山林からの二次堆積物のため, 化学的風化が進みにくかったことがうかがわれる. それにもかかわらずK⁺, Mg²⁺, Ca²⁺の割合がそれぞれ60%, 45%, 56%とある程度高くなったのは, カリ, 苦土, 石灰など農用資材の影響があったためと考えられる. 特にカリは窒素, リン酸とともに化成肥料の主成分であり, 畜ふん堆肥中にも多く含まれることから¹³⁾ K⁺の割合が最も高くなったと考えられる. 一方Na⁺は, 農用資材としての利用がないから河川水に対する低平地収支の割合が16%と最も低くなったと考えられ

る。

河川水に対する低平地収支の割合を第1表のタイプ別水質項目で整理すると、タイプⅠが平均15%、タイプⅡが平均62%、タイプⅢが平均52%（負荷量が少なく第3図および第1表での判断が難しかった $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ を除くと平均44%）となり、低平地における負荷流入の割合が低平地での濃度上昇や負荷増大に影響をおよぼしていることが確認された。

5 農業集落の影響

これまでの議論から、低平地より“湧き出す”窒素，リンを含む水質項目が農畜産業に由来する可能性を指摘してきた。本流域には農畜産業以外に窒素，リンを放出する産業が存在しないことがその主たる根拠であるが、この推論をさらに強化するためには、もうひとつの窒素，リン排出源である農業集落を検討しておかなければならない。そこで本節では、農業集落から排出される家庭下水中の負荷量を原単位法で見積もることとした。

役場からの聞き取りによると、本流域集落の家庭下水処理方式は、し尿がくみ取り方式で生活雑排水が無処理放流である。このうちし尿は全量流域外のし尿処理場へ持ち出され、流域内への排出はない。生活雑排水は1人1日当たりの基本原単位をT-Nが2g、T-Pが0.43g、流域内排出率をT-Nが0.8、T-Pが0.95と仮定し¹⁴⁾（原典では家庭内流出率を定義しているがここでは簡単のため流域内排出率に読み替える）、常住人口を270人として計算すると、T-N排出負荷量は年間当たり $2 \times 10^{-6} \text{ Mgd}^{-1} \times 0.8 \times 270 \times 365 \text{ d} = 0.2 \text{ Mg}$ 、T-P排出負荷量は年間当たり $0.43 \times 10^{-6} \text{ Mgd}^{-1} \times 0.95 \times 270 \times 365 \text{ d} = 0.04 \text{ Mg}$ と見積もられる。これらの値を第2表の低平地収支と比べると、T-Nは2.1%、T-Pは4.0%にしかならないことがわかる。

このように農業集落から排出されるT-N、T-P負荷量は低平地収支に比べてきわめて少ないことから、低平地収支の大部分（T-N、T-Pについてはそれぞれ9.3Mg、0.96Mg）が農畜産業に由来するとみて差し支えないことが確認された。

今後は主要な土地利用型作物である水稻、ショウガ、大豆における施肥量や堆肥投入量、および畜種別原単位と飼養頭羽数からみた排出負荷量などを精

査し、本報で示唆された農畜産業由来窒素，リン負荷量との照合を図るとともに河川水質に影響をおよぼす主要セクターの解析を進める予定である。

V 摘 要

四万十川上流の一流域（815ha）において、2000年3月16日から2003年3月15日にかけて窒素，リン，無機イオンの濃度，負荷量の変動実態を明らかにし、各水質項目の変動特性や物質収支などから農畜産業と河川水質との関わりに関する定量的な評価を試みた。以下にその要点をまとめる。

- 1) 降水の年平均比負荷はT-Nが 18.7 kg ha^{-1} 、T-Pが 0.69 kg ha^{-1} 、降水量加重平均濃度はT-Nが 0.60 mg L^{-1} 、T-Pが 0.02 mg L^{-1} であった。
- 2) 手計測、手採取による水質評価から、低平地通過後の河川水の濃度上昇や負荷量増大は、T-N、T-P、 K^+ 、 $\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ において顕著であることがわかった。また $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ は冬の渇水時に濃度上昇がみられるほか夏場にも突発的な濃度上昇が認められた。
- 3) 自動測定と修正補完による評価から、山林から河川へ流出するT-N負荷量の一部が地下帯水層へ一時的に貯留される可能性のあることが示唆された。河川水のT-N濃度変動は降水時に低下し、降水後に徐々に上昇するのが一般的であった。しかし代かき、集中豪雨、畜産排水の影響が加わると、それぞれ特異的な濃度、負荷量変動を示した。
- 4) 雨が少ない冬期の河川水T-N濃度の高まりは、多量の $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ を含む畜産排水の流入が原因と考えられた。一方雨の少ない春先に生じる河川水T-N濃度の高まりは、代かき直後の田面水の強制落水によるものと考えられた。
- 5) 低平地に主たる起源を持つ水質項目はT-N、T-P、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ で、その河川水負荷量に占める割合は49~84%であった。低平地における排出源のひとつである農業集落からのT-N、T-P排出負荷量がわずかであったことから、低平地起源負荷量の大部分は農畜産業に由来すると推定された。

謝 辞

本研究を実施するにあたりご指導をいただいた森林総合研究所の吉永秀一郎，鳥居厚志，山田毅，篠宮佳樹の各氏，現地調査でご支援をいただいた高知県土木事務所と自治体の皆様，現地調査や化学分析をご支援くださった近畿中国四国農業研究センターの森江昌彦，上枝博樹，岡田達典，大谷恭史，岡田洋子の各氏に深く感謝の意を表す。

引用文献

- 1) 浜田幸作 2002. 四万十川の環境問題. 四万十・流域圏学会誌 1: 45-54.
- 2) 高知県保健環境部環境対策課 1995. 四万十川清流保全計画. 高知県保健環境部環境対策課, 高知. 1-60.
- 3) 高知県文化環境部四万十川対策室 1996. 清流四万十川総合プラン21. 高知県, 高知. 1-170.
- 4) 水質環境学編集委員会 1998. 清らかな水のためのサイエンス-水質環境学-. 農業土木学会, 東京. 15-19.
- 5) 吉田正則・村上敏文・吉川省子・藤原伸介 2008. 四万十川の一流域における流量, および窒素, リン, 無機イオン負荷量の日単位連続評価法. 近中四農研報 7: 49-69.
- 6) 松田 周 2003. 農業土木分野におけるフィールド計測技術(その1)-水文計測技術; 河川流動編-. 農土誌 71: 755-761.
- 7) 吉永秀一郎・山田 毅・三浦 覚 1998. 高知県大正町葛籠川源流域における渓流水質の季節変動. 平成9年度森林総合研究所四国支所年報 39: 41-42.
- 8) 吉田正則・村上敏文 2002. 小規模河川の流量観測におけるドップラー式超音波流速センサーの簡易適用法. 四万十・流域圏学会誌 1: 25-33.
- 9) 高知県文化環境部四万十川対策室 1996. フィールドガイド四万十川. 高知県文化環境部四万十川対策室, 高知. 104, 110.
- 10) 大久保雅弘・藤田至則 1984. 新版地学ハンドブック. 築地書館, 東京. 188-189.
- 11) 西村武二 1999. 森と川-森林の機能. 流域圏(四万十)学会誌プレビュー号: 19-22.
- 12) 山田 毅・篠宮佳樹・吉永秀一郎 2001. 山地小流域におけるpHと硝酸イオン濃度. 四万十・流域圏学会第1回総会・学術研究発表会概要集: 47-48.
- 13) 小柳 渉・安藤義昭・水沢誠一・森山則男 2004. 家畜ふん堆肥中の塩類組成の特徴. 土肥誌 75: 91-93.
- 14) 國松孝男・村岡浩爾 1989. 河川汚濁のモデル解析. 技報堂, 東京. 11-12.

Concentration Change and Effluent Load Characteristics of N, P, and Inorganic Ions in a Watershed in the Shimanto River Basin, Shikoku, Japan

Masanori YOSHIDA, Toshifumi MURAKAMI*, Seiko YOSHIKAWA and Shinsuke FUJIHARA **

Summary

In the Shimanto River Basin in Shikoku, Japan, agricultural activity has been suspected to lead pollution of the Shimanto River. However, the causal relationships between the agricultural activities and changes in water quality are not evident. To reveal these relationships, we analyzed the concentrations and effluent characteristics of N, P, and inorganic ions in the waters of a river, mountain stream, and drainage ditch in an 815-ha watershed in the Shimanto River Basin. The results are as follows.

- 1) The annual mean specific loads of total N (T-N) and total P (T-P) in precipitation were 18.7 and 0.69 kg ha⁻¹, respectively. The corresponding precipitation-weighted average concentrations were 0.60 and 0.02 mgL⁻¹, respectively.
- 2) Manual measurement of data revealed that the concentrations and effluent loads of T-N, T-P, K⁺, and NO₂₊₃⁻-N increased markedly after the river flowed through a low, flat valley in the watershed, and that the concentration of NH₄⁺-N increased abruptly during the year and increased more gradually during the winter.
- 3) Analysis of automatically measured data revealed that a portion of the effluent T-N load from forested mountainous areas could be temporarily stored in the aquifer below the low, flat valley. The T-N concentration in the river water showed a typical pattern of variation in which the concentration decreased during rainy periods and increased during dry periods after rain. However, the T-N concentration in the river water also showed unusual changes during the drainage of flood water after paddling of paddy fields, drainage of wastewater from a pig barn, and drainage after a heavy rainstorm in which precipitation reached more than 300 mm day⁻¹.
- 4) Sudden or gradual increases in the T-N concentration of the river water in winter (i.e. the dry season) were ascribed to inflows of wastewater from the pig barn. Increases in the T-N concentration of the river water during the spring, when there was little rainfall, were ascribed to the drainage of flood water after paddling of paddy fields.
- 5) Water quality characteristics affected by flow through the low, flat valley were T-N, T-P, NH₄⁺-N, NO₂₊₃⁻-N, and PO₄³⁻-P. The proportions of these compounds added from the low, flat valley ranged from 49% to 84%. Most of these compounds were thought to be originated from agricultural and livestock industries, because effluent loads from rural communities (another potential source of these compounds) in the low, flat valley were negligible.

Research Team for Conservation of Agricultural Watershed

* National Agricultural Research Center for Tohoku Region

** National Agricultural Research Center