

## A Method for Evaluating Continuous Daily Discharge, Loads of N, P, and Inorganic ions in a Watershed on 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): catchment, concentration, data complementing method, forested area extending method, 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	<a href="https://doi.org/10.24514/00001648">https://doi.org/10.24514/00001648</a>

# 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

吉田正則・村上敏文\*・吉川省子・藤原伸介\*\*

Key words : catchment, concentration, data complementing method, forested area extending method, river

## 目 次

I 緒 言	49	IV 結果と考察	56
II 対象流域	50	1 コンポジット法による河川水濃度	56
III 研究方法	51	2 蒸発散量	57
1 調査期間と調査地点	51	3 補完値パラメータ	58
2 流量観測	51	4 修正補完値パラメータ	59
3 雨量観測	51	5 修正補完値の比率誤差	61
4 蒸発散量	51	6 河川水の実質的な積算誤差	63
5 流量補完法	52	7 山林水Aの全山林への拡張	65
6 水質測定	53	8 水収支	66
7 濃度補完法	53	V 摘 要	67
8 補完値の修正	54	謝 辞	67
9 日負荷量の計算	55	引用文献	67
		Summary	69

## I 緒 言

四万十川は、四国山地の不入山に源を発し、高知県西部の8市町村、愛媛県南部の4町村を流域とする四国第二の河川である(2000年現在)。本河川は、“日本最後の清流”として全国的に有名になったが、その背後には、流域面積の大半が山林であること<sup>2, 5, 13, 20</sup>、人口が少なく工業化が進みにくいこと<sup>2, 5, 21</sup>、川の水質浄化機能が高いこと<sup>2</sup>、などの要因があったとされる。

水質汚濁防止法に基づく1997年水質測定結果<sup>6</sup>で

は、四万十川本流の生物化学的酸素要求量(BOD)、全窒素(T-N)濃度の年間平均値は、下流域の共同でそれぞれ $0.6\text{mg L}^{-1}$ 、 $0.35\text{mg L}^{-1}$ 、中流域の大正流量観測所でそれぞれ $0.7\text{mg L}^{-1}$ 、 $0.32\text{mg L}^{-1}$ 、上流域の鍛冶屋瀬橋でそれぞれ $0.7\text{mg L}^{-1}$ 、 $0.39\text{mg L}^{-1}$ である。田渕ら<sup>17</sup>がまとめた全国主要11河川の平均水質(BODが $1.3\text{mg L}^{-1}$ 、T-Nが $1.36\text{mg L}^{-1}$ )と比べると、四万十川本流がなお良好な水質を保っていることがわかる。

しかしその一方で、四万十川の支流では1980年代以降、水量の減少、にごりの発生、漁獲高の減少などとともに水質の悪化が指摘されるようになり、そ

(平成19年9月14日受付, 平成19年12月11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

の影響が四万十川本流におよぶことが懸念されている<sup>2)</sup>。そこで高知県は、地域振興と調和した流域づくりを目指し、1991年10月に「四万十川清流保全計画」<sup>8)</sup>、1996年3月に「清流四万十川総合プラン21」<sup>7)</sup>を策定し、四万十川流域の総合的な環境保全対策に乗り出した。その結果、市街地からの家庭雑排水や事業所廃水に対する浄化処理施設などの整備は進んだものの、農地や林地など面源による負荷流出に対しては十分な措置が講じられていないのが現状である。

このように、面源負荷に対する抜本的な対策が講じられない理由のひとつとして、農業系負荷と河川水質の関連性を示すデータの不足が挙げられるが、その背後には、労力や経費などの制約から、往々にして2週間に1度や1ヶ月に1度など、離散的なデータしか取得できない事情がある。さらにこれらのデータのあいだを補って、日毎の連続したデータを生成・補完する方法が見当たらないこともこの問題を大きくしている、と著者らは考えている。

わが国でよく用いられる流出タンクモデルは、近年、専用の解析ソフト（例えばワコスジャパン製流出計算パッケージ）が市販されるなど、利用しやすいものにはなっているが、それでも日単位の流量を解析するには長期にわたる日毎の連続した実測データが必要である。窒素などの水質項目に対しては、流出タンクモデルに負荷物質の溶出過程を組み込んだ水質タンクモデルの開発例があるが<sup>11), 12)</sup>、これらもやはり、日単位の負荷量を解析するためには日毎の連続した実測データが必要である。

このように、これまで研究・開発されてきた解析モデルは、一定の期間にわたる連続した実測データを前提とするものが多く、離散的データや、何らかの理由で欠測が生じ連続性が途切れたデータなどに対しては適用しにくい面があった。

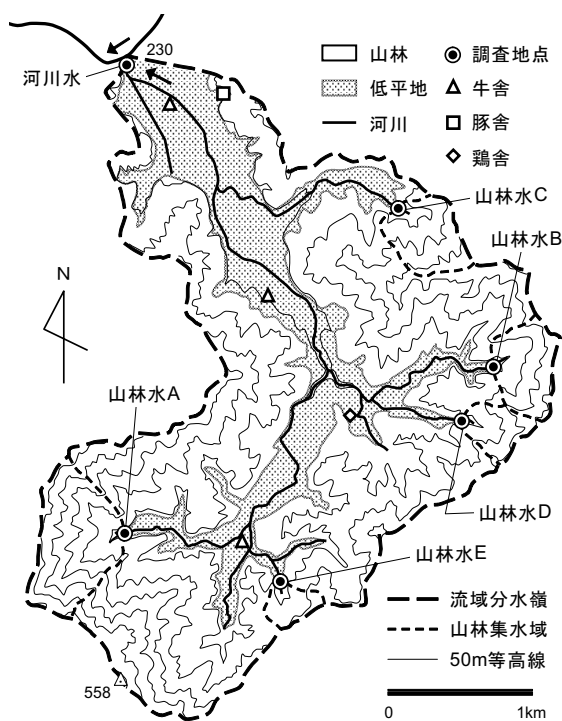
そこで本研究では、前段で述べた課題を有する四万十川の一流域において、農業活動による水質汚濁のおもな原因とみられる窒素、リン、およびこれらの流出特性を知る上で役立つ情報となる無機イオンの河川水質におよぼす影響を明らかにするため、欠測を含む離散的な日流量、濃度実測値から連続的な日流量、負荷量、およびそれらを積算した年間流量、負荷量を推定・評価する手法を検討したので報告する。

なお、本報では流量および窒素、リン、無機イオン負荷量の連続評価法の解説に力点を置き、その適用結果（流量、負荷量の時系列変化など）および農業活動との関連性については次報で検討する予定なので留意されたい。

## II 対象流域

対象流域は、四万十川上流の二次支川に属する面積815haの流域である（第1図）。標高は230～558m、年間雨量は3,264mm、年平均気温は15.0℃である（雨量と気温は1990～1999年のアメダス平均値）。

本流域の地質は四万十帯北帯と呼ばれ、白亜紀以降地下5～10kmで圧密を受けた砂岩・泥岩から成る。この地質を構成する岩石の透水係数は、西野らの文献値<sup>14)</sup>から $1 \times 10^{-8} \text{cm s}^{-1}$ 程度と推定され、本流域の地質が浅層地下水に対し不透水層として機能していることが推測される。また本流域の地形は、山の稜線が明瞭であり、流域末端の低平地も比較的狭い構造を維持していることから、多くの地下水は河床より浸出し、河川を通じて流域外へ流出するものと考えられる。以上のことから本研究では、流域外へ流出する項目としての地下浸透や地下水流動は



第1図 調査流域の概要

無視できると仮定する。

流域の地理的状況は、山林が全体の76% (622ha) を占め、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 (かっこ内は作付け面積, 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で、一筆ごとに掛け流しが行われている。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, プロイラー農家1戸で、乳用牛34頭, 肉用牛162頭, 豚1,328頭, プロイラー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域における農業活動の特徴をよく表したものであり, 本流域の知見が当該農業地域全体の流出負荷特性の解明に役立つものと期待される。

### Ⅲ 研究方法

#### 1 調査期間と調査地点

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。

定期調査は流域末端の「河川水」, および河川最上流の山林-低平地境界地点にある「山林水A (43ha)」で行った (第1図)。また, 山林水Aの全山林への拡張性を検討するため, 「山林水B (22ha), C (22ha), D (12ha), E (8ha)」についても2001年7月31日, 8月14日, 9月7日, 9月11日に調査を行った。

#### 2 流量観測

##### 1) 河川水

河川水の流量は, 流域末端に設置したドップラー

式超音波流速センサー (イスコ製 AVM750型) で自動測定した (詳細は吉田・村上<sup>22)</sup> を参照)。流速センサーによる30分毎瞬間流量に時間を乗じて30分間流量とし, それを0時から24時まで積算して1日当たりの自動測定流量 $Q_{am}$  ( $m^3 d^{-1}$ ) とした。流速センサーがゴミや泥に覆われて一時的に欠測した場合は, 欠測前後の水位, 流量データから欠測値を内挿した。欠測が1日以上にわたる場合は, 後述する修正補完法により流量を補った。2002年1月8日から9月25日までは護岸工事により観測が中断したため, やはり修正補完法により流量を補った。

##### 2) 山林水

山林水Aの流量は, 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<sup>9)</sup> で測定した (手計測法<sup>22)</sup>)。頻度は原則2週間に1度とし, 1日当たりの流量 ( $m^3 d^{-1}$ ) に換算して手計測流量とした。2001年7月31日から9月11日にかけては, 山林水B, C, D, Eについても4回, 同日観測を行った。手計測法は河川水に対しても行った。

#### 3 雨量観測

日雨量 ( $mm d^{-1}$ ) は, 流域末端に設置した転倒ます式雨量計 (キャンベル製 385型) により測定した。欠測日は, 流域より5 km離れたアメダス観測所の日雨量データを用いた。

#### 4 蒸発散量

今回の調査では, 自動測定流量 $Q_{am}$ に欠測が生じたため実測のみによる年間流量は得られなかった。そのため水収支法による年間蒸発散量の推定はできない。そこで本研究では, 以下に述べる方法で年間蒸発散量を推定した。

ある月の16日を起点とし翌月15日を終点とするひと月間のうち, 自動測定流量 $Q_{am}$ の欠測日数が5日以内で, どの欠測日も日雨量が $100mm d^{-1}$ を上回らない条件を満たすひと月間に対し, 次式により月平均日蒸発散量 $ET$  ( $mm d^{-1}$ ) を定義する。

$$ET = (\sum_{\text{mon}} P - \sum_{\text{mon}} Q_{am}) / N_d \quad (1)$$

ここに,  $\sum_{\text{mon}}$ : ひと月の積算,  $P$ : 日雨量 ( $mm d^{-1}$ ),  $N_d$ : 日数。

ただし, 日雨量 $P$ および日数 $N_d$ からは自動測定流量

$Q_{am}$ の欠測日数分を差し引く。ここでの自動測定流量は $\text{mm d}^{-1}$ で表示する。流域面積の76%を占める山林からの蒸発散量はおもに樹木の葉量に依存すると考えられる<sup>13)</sup>。そこで調査期間中の葉量を一定とみなし、1年目、2年目、3年目のそれぞれの年の同一のひと月間における $E T$ の分布から3年間を通じた代表的な月別日蒸発散量 $ET_{rep}$  ( $\text{mm d}^{-1}$ )を仮定し、それらの1年間の積算値を年間蒸発散量とする。

## 5 流量補完法

前述したように、河川水の自動測定流量や山林水Aの手計測流量には欠測日が含まれており、このままでは水収支や物質収支の評価に支障を来す。そこで欠測日の日流量に関しては、以下に述べる方法で補完することにした。一連の計算手順は河川水、山林水Aとも同じである。

### 1) 基底流量の推定

計算日以前に降った雨(先行雨量)の影響は、基底流量を支配する因子として大きいと予想される。そこで本研究では、式(2)、(3)に示すように、河川水の基底流量 $Q_b$  ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ )が、降雨日とその翌日を除く無降雨日の手計測流量と、その無降雨日から1~5日前、6~10日前、11~15日前、16~20日前の各先行雨量 $\Sigma_5 P$ ,  $\Sigma_{10} P$ ,  $\Sigma_{15} P$ ,  $\Sigma_{20} P$  (mm)の重相関関係から求められた流量 $Q_b'$  ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ )に補正係数 $a$ を乗じた値に等しい、と仮定する。

$$Q_b = a Q_b' \quad (2)$$

$$Q_b' = X_1 \Sigma_5 P + X_2 \Sigma_{10} P + X_3 \Sigma_{15} P + X_4 \Sigma_{20} P + X_5 \quad (3)$$

ここに、 $X_1, X_2, \dots, X_5$ :重回帰係数。

式(3)の重回帰係数 $X_1, X_2, \dots, X_5$ は重回帰分析から求め、補正係数 $a$ は、後述するように、表計算ソフト(マイクロソフト製エクセル)のソルバー解析から求める。

### 2) 洪水流量の推定

洪水流量は総合配分図法<sup>1, 15, 16)</sup>を応用して求める。

ある計算日の洪水流量がその当日、1日前、2日前、3日前、4日前に降った雨の洪水流出成分から構成されると仮定すると、洪水流量 $Q_s$  ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ )は次式のように表される。

$$Q_s = (p_0 P_0 + p_{-1} P_{-1} + p_{-2} P_{-2} + p_{-3} P_{-3} + p_{-4} P_{-4}) \times f_s S \quad (4)$$

ここに、 $p_0, p_{-1}, \dots, p_{-4}$ :それぞれ当日、1日前、 $\dots$ 、4日前の有効雨量配分率、 $p_0, p_{-1}, \dots, p_{-4}$ :それぞれ当日、1日前、 $\dots$ 、4日前の日雨量 ( $\text{mm d}^{-1}$ )、 $f_s$ :洪水流出率、 $S$ :流域または集水域の面積( $P$ と $Q_s$ の次元を合わせるため単位は $\text{ha} \times 10$ )。

$S$ はプラニメータ法(牛方製 XPLAN380F型)により25000分の1地形図から求める。

総合配分図法では、 $p_0, p_{-1}, \dots, p_{-4}$ は総合配分図を判読して求めることになっているが、本研究では式(2)の補正係数 $a$ とともにエクセルのソルバー解析から求めることにする。ソルバー解析においては、 $a = 1, p_0, p_{-1}, \dots, p_{-4} = 0.2$ を初期値とし、手計測流量と後述する日流量補完値 $Q_c$  ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ )の対数残差平方和が最小となるように $a, p_0, p_{-1}, \dots, p_{-4}$ を変化させる。次式はこのときの制約条件である。

$$a \geq 0 \quad (5)$$

$$p_0 + p_{-1} + p_{-2} + p_{-3} + p_{-4} = 1 \quad (6)$$

$$p_0, p_{-1}, p_{-2}, p_{-3}, p_{-4} \geq 0 \quad (7)$$

$f_s$ は次式より与える。

$$f_s = 1 - (\Sigma_{yr} ET_{rep} / \Sigma_{yr} P) - (\Sigma_{yr} Q_b / \Sigma_{yr} P) \quad (8)$$

ここに、 $\Sigma_{yr}$ :年間積算。

ところで上記の流量補完法では、式(3)の重回帰係数を求める際に使用した降雨終了後2日目以降の手計測流量が洪水流量の一部を含んでいることが問題となる。このことは、式(4)が降雨終了後4日目までの洪水流出成分を含むことから予想される。式(3)で一部洪水流出成分を含む手計測流量を用いたのは、先行雨量と手計測流量とのあいだによりよい相関が認められたからだが、そのことが実際の基底流量を過大に評価する可能性をもたらした。そこで本研究では、式(2)に示すような補正係数 $a$ を導入し、式(3)の重回帰流量 $Q_b'$ を補正することにした。こうすることにより、式(2)から求められる基底流量 $Q_b$ がより妥当な水準に落ち着くことが期待される。

### 3) 補完流量の計算

日流量補完値 $Q_c$ は、式(2)、(4)を用いてつぎのように計算される。

$$Q_c = Q_b + Q_s \quad (9)$$

## 6 水質測定

### 1) 河川水

河川水の採水は自動採水器（イスコ製 6700型）で行った。採水頻度は3時、9時、15時、21時の1日4回、採水量は1回250mLで定量、採水口の設置位置は流心付近の河床上5cmとし、底泥を吸い込まないように河床とのあいだに金属板を敷いた。1日のサンプルは4回の混合1Lとし（コンポジット法）、採水器内ポリ瓶に貯留後、原則2週間に1度回収し、濃度分析した（自動測定濃度）。採水から回収までの水質変化は無視した。

コンポジット法で測定した濃度が河川水の日平均濃度（流量を加重しない単純平均濃度）に一致するかを確かめるため、2001年6月20日、7月3日、7月18日、8月14日、8月29日、9月12日の各日に、1時間毎の24回連続採水を行った。

採水チューブの目詰まりなどで自動採水ができず欠測が生じた日は、後述する修正補完法により濃度を補った（補完濃度）。これらとは別に、原則2週間に1度、ポリ瓶で手採取し、濃度を分析した（手採取濃度）。

### 2) 山林水

山林水Aは原則2週間に1度の手採取とし、自動採水は行わなかった。2001年7月31日から9月11日にかけては、山林水B、C、D、Eについても手採取を行った。

### 3) 濃度分析

現地で採取した河川水、山林水、雨水サンプルは、実験室に持ち帰って速やかに分析した。全窒素（T-N）、全リン（T-P）濃度は、それぞれペルオキシ二硫酸カリウム分解・紫外線吸光光度法<sup>10)</sup>、同・モリブデン青吸光光度法<sup>4,10)</sup>（日立製 220A型）で測定した。ナトリウムイオン（Na<sup>+</sup>）、アンモニウム態窒素（NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N）、カリウムイオン（K<sup>+</sup>）、マグネシウムイオン（Mg<sup>2+</sup>）、カルシウムイオン

（Ca<sup>2+</sup>）、塩化物イオン（Cl<sup>-</sup>）、硝酸態窒素（NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N）、亜硝酸態窒素（NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N）、リン酸態リン（PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P）、硫酸イオン（SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>）の各濃度は、0.45μmガラス繊維ろ紙（アドバンテック東洋製 DISMIC25CS045AS型）通過後イオンクロマトグラフ法（ダイオネクス製 DXAQ2211型）で測定した。本報ではNO<sub>2</sub><sup>-</sup>-NとNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Nの合計をNO<sub>2+3</sub><sup>-</sup>-Nと表わす。

## 7 濃度補完法

濃度に関しても、採水チューブの目詰まりや護岸工事による採水中断（河川水）、2週間に1度の手採取頻度（山林水A）などから欠測日が生じている。そこで欠測した日の濃度は、以下に述べる方法で補完した。一連の計算手順は河川水、山林水Aとも同じである。

流量と負荷量の関係は、通常つぎのような流送モデル式で表すことが多い<sup>19)</sup>。

$$L = aQ^b \quad (10)$$

ここに、 $L$ ：日負荷量（kg d<sup>-1</sup>）、 $Q$ ：日流量（m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>）、 $a$ 、 $b$ ：定数。

濃度 $C$ （mg L<sup>-1</sup>）は、回帰分析により式(10)の $a$ 、 $b$ を求めたのち、次式のように両辺を $Q$ で除すことにより推定できる。

$$C = a Q^{(b-1)} \times 10^3 \quad (11)$$

ここに10<sup>3</sup>：単位の変換係数。

式(10)は総じて実測値との適合性がよく<sup>19)</sup>、非線形回帰分析を用いれば洪水時データとの適合性もよいとされる<sup>18)</sup>。しかし本流域に関しては、非線形回帰分析を用いた式(10)からの式(11)の導出はよい結果をもたらさなかった。 $CQ$ 曲線の勾配が高流量域の濃度に強く依存し、低流量域濃度のずれを大きくしたためと考えられる。

そこで本研究では、式(11)の $a$ 、 $b$ を線形回帰分析から直接求めることにした。 $a$ 、 $b$ を求めるための回帰分析用データとしては、河川水は自動測定濃度と自動測定流量を、山林水Aは手採取濃度と手計測流量を用いた。また式(11)で補完濃度を求める際の流量は、河川水については原則自動測定流量とし、欠測日に限り後述する修正補完流量を用いた。山林水Aについては全日、修正補完流量を用いた。

## 8 補完値の修正

流量、濃度補完法の概要は上記の通りであるが、本法により流量、濃度の補完値を計算したところ、実測値との対応は必ずしも十分とはいえなかった。補完流量は日雨量と年間蒸発散量のみを、補完濃度は日流量のみをおもな独立変数としていることから、補完値と実測値とのあいだにばらつきが生じることはやむを得ない。しかし両者のあいだに生じる“系統的な偏り”については、水収支や物質収支の確度を高めるため極力是正しなければならない。本研究では、以下に述べる方法で補完値、実測値間に生じる“系統的な偏り”を修正することにした。

### 1) 補完流量の修正

まず3年間の補完流量 $Q_c$ の流況曲線から、流量調査基準(昭和36年11月25日, 36公第6717号), 第2条に基づく渇水量 $U_1$ , 低水量 $U_2$ , 平水量 $U_3$ , 豊水量 $U_4$ , 35日流量 $U_5$ , 高水量 $U_6$ を求める<sup>3)</sup>。高水量以外のこれらの流量を境界値とする区間 $0 \sim U_1$ ,  $U_1 \sim U_2$ ,  $\dots$ ,  $U_4 \sim U_5$ ,  $U_5 \sim$  既往最大日流量を、ここでは流量区分と呼ぶ。各流量区分の階級値は次式で定義される。

$$u_1 = U_1 / 2 \quad (12)$$

$$u_{i+1} = (U_i + U_{i+1}) / 2 \quad (i=1 \sim 5) \quad (13)$$

ここに,  $u_1, u_2, \dots, u_6$ : それぞれ渇水量未満 (< 渇水量), 渇水量以上低水量未満 (~ 低水量),  $\dots$ , 35日流量以上 (35日流量 $\leq$ ) における各流量区分の中央値 (かっこ内は略号)。

ただし式(13)で $u_6$ を求める際は、本来35日流量 $U_5$ と既往最大日流量を用いるべきであるが、本流域の既往最大日流量が不明であることから便宜上35日流量 $U_5$ と高水量 $U_6$ を用いた。

さて、日流量は示量変数であり、月、年、またはそれ以上の長期にわたる日流量積算値をできるだけ正確に知ることが重要である。そこで補完流量の実測流量に対する偏りは、日流量の積算偏差率に基づいて修正するのが望ましいと考えられる。そこでまず、修正補完流量 $Q_{rc}$  ( $m^3 d^{-1}$ ) を次式により定義する。

$$Q_{rc} = \delta Q_c \quad (14)$$

ここに $\delta$ : 偏りを修正するための係数(修正係数と呼ぶ)。

$\delta$ の最適値は流量区分によって異なることから、式(14)をつぎのように場合分けする。

$$0 \leq Q_c < U_1 \text{ のとき } Q_{rc} = \delta_1 Q_c \quad (15)$$

$$U_i \leq Q_c < U_{i+1} \text{ のとき } Q_{rc} = \delta_{i+1} Q_c \quad (i=1 \sim 4) \quad (16)$$

$$U_5 \leq Q_c \text{ のとき } Q_{rc} = \delta_6 Q_c \quad (17)$$

ここに,  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$ : < 渇水量, ~ 低水量,  $\dots$ , 35日流量 $\leq$ の修正係数。

つぎに流量区分ごとの積算偏差率を次式のように定義する。

$$\text{流量区分別積算偏差率} = (\sum_i Q_{rc} - \sum_i \text{手計測流量}) / \sum_i \text{手計測流量} \times 100 \quad (18)$$

ここに $\sum_i$ : < 渇水量 ( $i=1$ ), ~ 低水量 ( $i=2$ ),  $\dots$ , 35日流量 $\leq$  ( $i=6$ )の各流量区分における積算。

式(15)~(17)を式(18)に代入し、修正係数 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$ の初期値を1, 数式入力セルを積算偏差率, 目標値を0, 変化させるセルを $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$ としてエクセルのゴールシーク解析を行うことにより,  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$ の最適解を求めることができる。ただしここで求めた $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$ を式(15)~(17)に導入すると, ふたつの流量区分にまたがる近接した補完流量 $Q_c$ 同士で, 修正補完流量 $Q_{rc}$ が大きく食い違うおそれがある。そこでこの種の不連続性を排除するため式(15)~(17)をつぎのように書き換える。

$$0 \leq Q_c < u_2 \text{ のとき } Q_{rc} = Q_c (\delta_1 + (Q_c - u_1) (\delta_2 - \delta_1) / (u_2 - u_1)) \quad (19)$$

$$u_i \leq Q_c < u_{i+1} \text{ のとき } Q_{rc} = Q_c (\delta_i + (Q_c - u_i) (\delta_{i+1} - \delta_i) / (u_{i+1} - u_i)) \quad (i=2 \sim 5) \quad (20)$$

$$u_6 \leq Q_c \text{ のとき } Q_{rc} = Q_c \delta_6 \quad (21)$$

式(19)は、補完流量 $Q_c$ が $0 \leq Q_c < u_2$ のとき、修正補完流量 $Q_{rc}$ が2点( $u_1, \delta_1$ ), ( $u_2, \delta_2$ )を通る直線で表した修正係数と $Q_c$ との積で表されること意味する。式(20)も同様である。式(21)については修正係数が極端に大きくなったりマイナスになったりすることを防ぐため、式(17)の $\delta_6$ を定数として与えている。

式(19)~(21)を用いることにより修正補完流量

の不連続性は回避できるが、ゴールシーク解析で求めた  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$  の最適性が崩れてしまう。そこでエクセルのソルバー機能を使い、もう一度  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$  の最適化を図る。まず全流量にわたる積算偏差率をつぎのように定義する。

$$\text{全流量積算偏差率} = (\Sigma_t Q_{rc} - \Sigma_t \text{手計測流量}) / \Sigma_t \text{手計測流量} \times 100 \quad (22)$$

ここに  $\Sigma_t$ ：全流量にわたる積算。

そしてゴールシーク解析で求めた  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$  を初期値とし、目的セルを全流量積算偏差率、目標値を 0、変化させるセルを  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$  としたソルバー解析を行い、 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$  の最適解を求める。このとき制約条件を設ける必要はないが、解が  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$  の初期値に依存するため、初期値は必ずゴールシーク解析による値を与える。

こうして求められた  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$  と式 (9) による任意日の補完流量  $Q_c$  を式 (19) ~ (21) に代入すると、任意日の修正補完流量  $Q_{rc}$  が求められる。

## 2) 補完濃度の修正

補完濃度の修正手順も、基本的には補完流量の修正手順と同じである。ここでは補完流量と異なる数式のみ記述する。

式 (15) ~ (17) はつぎのように書き換わる。

$$0 \leq Q < U_1 \text{ のとき } C_r = \delta_1 C \quad (23)$$

$$U_i \leq Q < U_{i+1} \text{ のとき } C_r = \delta_{i+1} C \quad (i=1 \sim 4) \quad (24)$$

$$U_5 \leq Q \text{ のとき } C_r = \delta_6 C \quad (25)$$

ここに、 $Q$ ：式 (11) で補完濃度を求める際に使った流量、 $C_r$ ：修正補完濃度、 $C$ ：補完濃度。

流量の境界値  $U_1, U_2, \dots, U_5$  は、式 (11) で補完濃度を求める際に使った流量の流況曲線から求める。 $u_1, u_2, \dots, u_6$  もこれにならう。

濃度は示強変数であり、月、年、またはそれ以上の長期にわたる平均濃度をできるだけ正確に知ることが重要である。そこで補完濃度の実測濃度に対する偏りは、次式のような流量区分ごとの平均偏差に基づいて修正するのが妥当と考えられる。

$$\text{流量区分別平均偏差} = \Sigma_i (C_r - \text{手採取濃度}) / N_i \quad (26)$$

ここに、 $N_i$ ：各流量区分のデータ数。

ゴールシーク解析による  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$  の最適解は、数式入力セルに式 (26) の流量区分別平均偏差を入力して求める。

式 (19) ~ (21) はつぎのように書き換えられる。

$0 \leq Q < u_2$  のとき

$$C_r = C (\delta_1 + (Q - u_1) (\delta_2 - \delta_1) / (u_2 - u_1)) \quad (27)$$

$u_i \leq Q < u_{i+1}$  のとき

$$C_r = C (\delta_{i+1} + (Q - u_i) (\delta_{i+1} - \delta_i) / (u_{i+1} - u_i)) \quad (i=2 \sim 5) \quad (28)$$

$u_6 \leq Q$  のとき

$$C_r = C \delta_6 \quad (29)$$

ソルバー解析によって式 (27) ~ (29) の  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$  を最適化する際、目的セルに入力する全流量平均偏差は次式のように与える (式 (22) に対する書き換え)。

$$\text{全流量平均偏差} = \Sigma_t (C_r - \text{手採取濃度}) / N_t \quad (30)$$

ここに、 $N_t$ ：全流量にわたるデータ数。

上記の数式書き換えのもと、ソルバー解析による  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$  と式 (11) による任意日の補完濃度  $C$  を式 (27) ~ (29) に代入すると、任意日の修正補完濃度  $C_r$  が求まる。

## 9 日負荷量の計算

### 1) 河川水

河川水の日負荷量は日流量に当該日の濃度を乗じて求める。日流量は原則として自動測定流量を用い、欠測日に限り式 (19) ~ (21) の修正補完流量を用いる。濃度は原則として自動測定濃度を用い、欠測日に限り式 (27) ~ (29) の修正補完濃度を用いる。

### 2) 山林水

全山林の日負荷量は、山林を構成するすべての集水域の日流量に平均濃度を乗じて求めるのが理想である。しかし実際には、調査要員や調査機材の制約からそれらを実測するのは難しい。そこで本研究では、山林水 A の修正補完流量、修正補完濃度から全山林の日流量、平均濃度を推定する方法を検討した (山林水拡張法)。

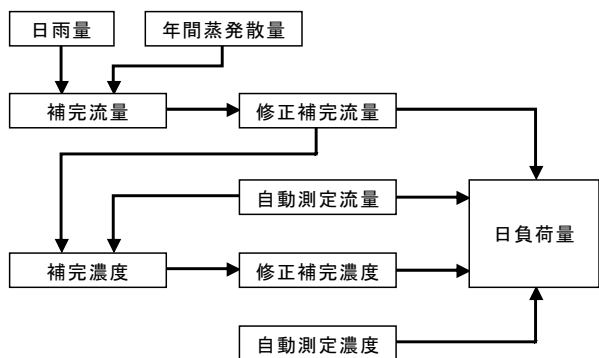
流量については、山林水 A, B, C, D, E の各手計測流量をそれぞれの集水面積で除した値 (比流量) の平均値を平均比流量と定義する。そして平均



比流量の山林水A比流量に対する比率を $\gamma$ と表し、 $\gamma$ と山林水A修正補完流量とのあいだにみられる関係を定式化した。

濃度については、全水質項目に対し山林水A, B, C, D, Eの手採取濃度の平均値を求めた。そしてその平均濃度の山林水A手採取濃度に対する比率を $\varepsilon$ と表し、 $\varepsilon$ と山林水A修正補完流量とのあいだにみられる関係を定式化した。

以上、補完法および修正補完法による日負荷量の



第2図 日負荷量の計算過程の模式図

計算過程を述べた。第2図にはこれらの計算過程の模式図を示す。

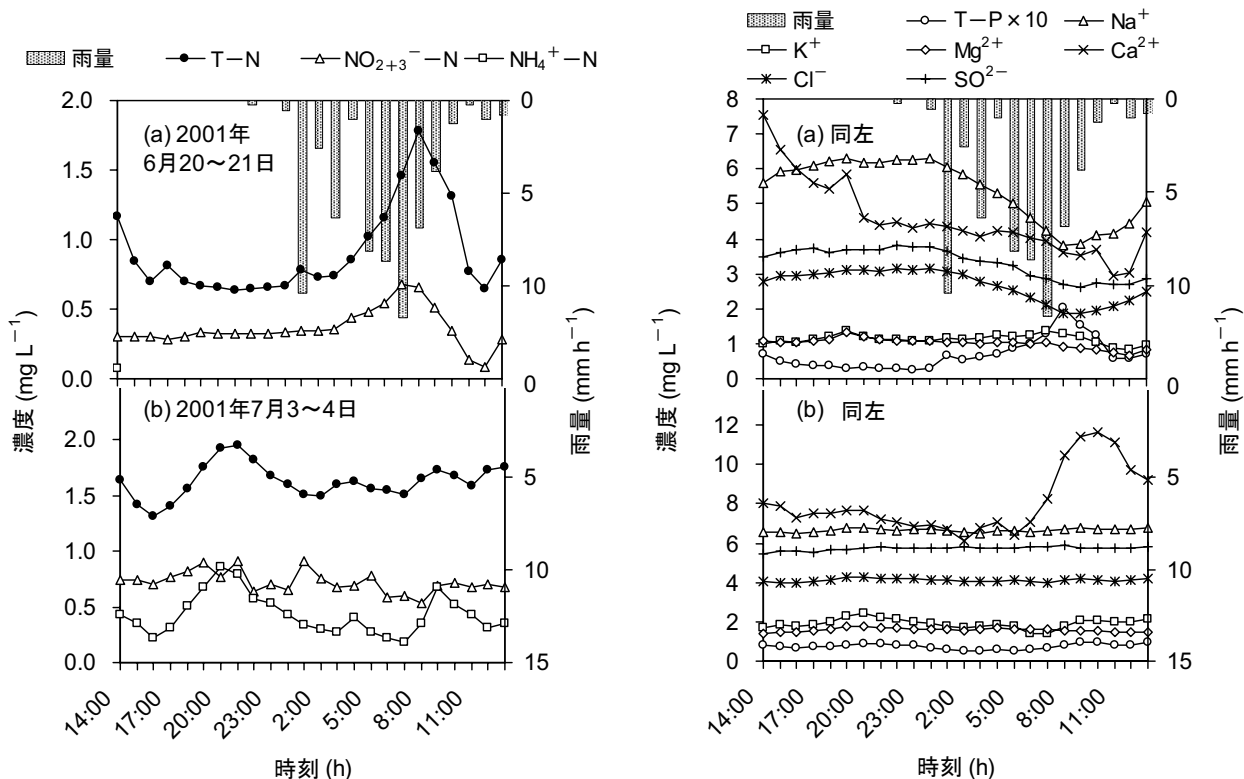
#### IV 結果と考察

##### 1 コンポジット法による河川水濃度

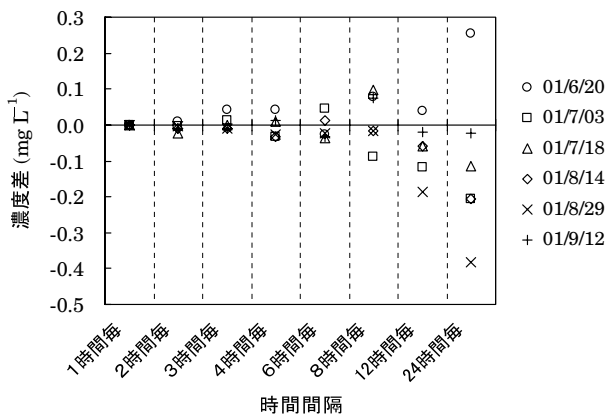
第3図には (a) 降雨日, (b) 無降雨日における河川水中T-N, T-P, 無機イオン濃度の時刻変動を示す。降雨日の14時以外の $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , および降雨日, 無降雨日のすべての時刻における $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ は無検出のため表示していない。またT-Pは濃度変化を見やすくするため10倍表示している。

降雨日のT-N濃度は降雨開始から約9時間後に明瞭なピークを示した。そのおもな要因は降雨にともなう $\text{NO}_2+3^--\text{N}$ の濃度上昇にあった。一方, 無降雨日におけるT-N濃度の変動は,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 濃度の変動パターンによく対応した。

他の水質項目では, 降雨日にT-Nや $\text{NO}_2+3^--\text{N}$ とよく似た変動を示したのはT-Pのみで, それ以



第3図 (a) 降雨日, (b) 無降雨日における河川水中T-N, T-P, 無機イオン濃度の時刻変動  
降雨日の14時を除く $\text{NH}_4^+-\text{N}$ と, 降雨日, 無降雨日の全時刻における $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ は, 無検出のため表示していない。T-Pの濃度は10倍表示している。



第4図 河川水 T-N の任意間隔濃度と24時間平均濃度の差

凡例の01/6/20は、採取期間が2001年6月20日14時～21日13時であることを示す。

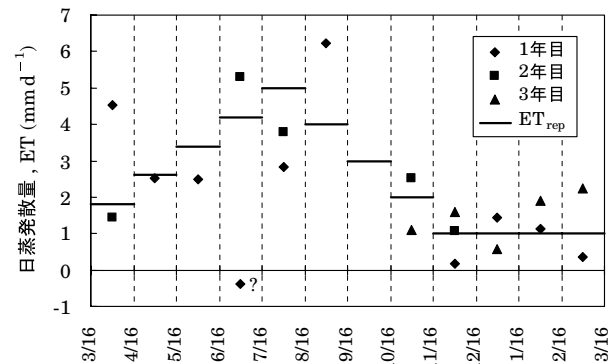
外の項目はほとんど変動しないか ( $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ), 降雨とともに濃度が低下した ( $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ). 無降雨日は,  $Ca^{2+}$  を除く水質項目でほとんど変化がみられなかったが,  $Ca^{2+}$  に限って8時から14時ごろに上昇する傾向がみられた (原因は不明).

第3図から明らかなように, 河川水は1日のなかで濃度が大きく変化する水質項目を含んでいる. このように変化する濃度から1日の平均濃度を検出するためには, 自動採水の頻度を最適化しておく必要がある. そこで第4図には, 降雨日, 無降雨日とも変化の激しかった T-N 濃度の1時間毎のデータから, 任意時間間隔の濃度を拾い出し, 24時間平均濃度との差をプロットした結果を示す. 時間間隔が6時間より短い場合, 24時間平均との濃度差は,  $\pm 0.05 \text{ mg L}^{-1}$  に収まる範囲であった. これに対し時間間隔が8時間より長くなると, 24時間平均との濃度差は徐々に拡大する傾向を示した.

以上の結果から, 採水頻度を1日4回(6時間毎)に設定した今回のコンポジット法は, 河川水の日平均濃度を検出する方法としては適当であったことがわかる.

## 2 蒸発散量

第5図には, 式(1)による1年目, 2年目, 3年目の月平均日蒸発散量  $ET$  と, 3年間を通じた代表的な月別日蒸発散量  $ET_{rep}$  を示す. 月平均日蒸発散  $ET$  は年によるばらつきが大きく, 高い精度を望



第5図 推定された日蒸発散量

図中の3/16は3月16日を示す。

むことは難しいが,  $ET$  プロットの分布からおよその年間蒸発散量は推定できた.

まず第5図プロットの目測判読から, 11月16日～3月15日の日蒸発散量を  $1 \text{ mm d}^{-1}$ , 7月16日～8月15日の日蒸発散量を  $5 \text{ mm d}^{-1}$  と仮定する. 両期間に挟まれた期間は, 月ごとに段階的に比例配分した値を日蒸発散量と仮定する. 図中の実線はこのようにして与えられた代表的な月別日蒸発散量  $ET_{rep}$  を示す. 第5図の3月16日から翌年3月15日までの各月の  $ET_{rep}$  に各月の日数を乗じて積算することにより, 年間蒸発散量は  $916 \text{ mm}$  と推定される.

つぎにこの年間蒸発散量が妥当な値かを検討する. 流量の欠測日数が365日中36日と最も少なかった1年目について, 河川水の自動測定流量を年間積算すると  $16,530,708 \text{ m}^3$  となる. 仮に欠測日の日流量が自動測定流量の1日当たり平均値  $50,245 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  ( $= 16,530,708 \text{ m}^3 / (365 \text{ 日} - 36 \text{ 日})$ ), およそ豊水量に相当) に等しいと仮定すると,  $50,245 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  に36日をかけて先の積算値に加えた  $18,339,528 \text{ m}^3$  が河川水のおよその年間流量となる. 1年目の年間雨量は  $26,883,966 \text{ m}^3$  だったので, 年間雨量から年間流量を差し引いて流域面積  $815 \text{ ha}$  で除すと, 年間蒸発散量は  $1,048 \text{ mm}$  と推計される (この間流域貯水量は変化しなかったと仮定). 欠測が生じた36日は総じて洪水出水日に当たるので, 36日間の日流量を豊水量より1段レベルの高い35日流量 ( $146,450 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ) と仮定すると, 年間蒸発散量は  $623 \text{ mm}$  と見積もられる.

先に示した916mmは、623mmと1,048mmの平均値 (836mm) より1割ほど大きい両者の範囲内には収まっている。

以上のことから年間蒸発散量の推計値916mmは、式(8)の $\sum_{yr} ET_{rep}$ として用いて差し支えないと判断された。なお式(8)で用いられる年間蒸発散量は補完流量を計算するための暫定値であり、修正補完法を経て最終的に求められる年間蒸発散量とは異なる点に留意されたい。

### 3 補完値パラメータ

第1表には式(2)の補正係数 $a$ 、式(3)の重回帰係数 $X_1, X_2, \dots, X_5$ とその決定係数 $R^2$ を、第2表には式(4)の有効雨量配分率 $p_0, p_{-1}, \dots, p_{-4}$ と各年の洪水流出率 $f_s$ 、1年目、 $f_s$ 、2年目、 $f_s$ 、3年目を示す。第1表の河川水1年目は、5つの係数で重回帰分析すると $X_5$ がマイナスになり、先行降雨が極端に少ないときに重回帰流量 $Q_b'$ がマイナスになるおそれがあったため $X_5=0.0$ と定義し、残る

第1表 式(2)の補正係数 $a$ 、式(3)の重回帰係数 $X_1, X_2, \dots, X_5$ と決定係数 $R^2$

	河川水			山林水A		
	1年目	2年目	3年目	1年目	2年目	3年目
$a$	0.71	0.71	0.71	0.92	0.92	0.92
$X_1$	456.4	245.4	577.5	24.9	15.0	32.3
$X_2$	100.7	150.0	-5.9	11.4	8.7	0.3
$X_3$	48.0	72.9	21.9	0.0	5.1	0.5
$X_4$	46.8	-12.6	53.1	0.0	-0.2	3.4
$X_5$	0.0 <sup>a</sup>	5614.2	2267.1	257.5	310.8	333.9
$R^2$	0.91	0.58	0.75	0.76	0.73	0.78

<sup>a</sup>  $X_5=0.0$ と定義した。

第2表 式(4)の有効雨量配分率 $p_0, p_{-1}, \dots, p_{-4}$ と洪水流出率 $f_s$

	河川水	山林水A
$p_0$	0.144	0.514
$p_{-1}$	0.765	0.407
$p_{-2}$	0.050	0.079
$p_{-3}$	0.040	0.000
$p_{-4}$	0.000	0.000
$f_{s,1年目}$	0.435	0.270
$f_{s,2年目}$	0.434	0.309
$f_{s,3年目}$	0.391	0.224

4つの係数について重回帰分析した。

式(3)の決定係数 $R^2$ は河川水2年目が0.58とやや低かったものの、それ以外は0.73~0.91と良好な相関性を示した。補正係数 $a$ は河川水、山林水Aとも1より小さかった。無降雨日の手計測流量が多少の洪水流出成分を含んでいたため重回帰流量 $Q_b'$ が実際の基底流量 $Q_b$ より大きく見積もられたためと考えられる。

山林水Aの有効雨量配分率は降雨当日( $p_0$ )と降雨1日後( $p_{-1}$ )がそれぞれ0.514, 0.407と高かったが、2日後( $p_{-2}$ ) 0.079と低くなり、3日後( $p_{-3}$ )、4日後( $p_{-4}$ )は0.000になった。山林からの洪水流出はその半分が降雨当日に集中し、残りの大半も降雨後1日で流出したことになる。これに対し河川水の洪水流出は、降雨当日( $p_0=0.144$ )より降雨1日後に集中し( $p_{-1}=0.765$ )、降雨3日後まで流出し続けた( $p_{-2}=0.050, p_{-3}=0.040$ )。

洪水流出率は山林水Aが22~31%、河川水が39~44%と、河川水の方が洪水流出の占める割合が大きかった。これは低平地からの洪水流出の寄与が大きかったためと考えられる。

第3表には式(11)のパラメータ $a, b$ を、第6図には式(11)の回帰分析のもとになるCQプロットの一例(T-N)を示す。第3表の $a, b$ は3年間の通算値である。

流量増加による濃度の変化は $b-1$ がプラスのとき上昇、 $b-1$ がマイナスのとき下降となる。第3表の $b-1$ は、山林水AのT-Pを除きすべてマイナスになったことから、流量増加にともなう濃度の低下、すなわち降雨による希釈作用の大きいことがわかる。これは第3図(a)で示したT-N、 $NO_{2+3}-N$ 、T-Pの降雨にともなう濃度上昇と矛盾するように見える。しかし2001年6月20日、21日の日平均濃度はT-Nがそれぞれ1.08mg L<sup>-1</sup>, 1.00mg L<sup>-1</sup>,  $NO_{2+3}-N$ がそれぞれ0.40mg L<sup>-1</sup>, 0.43mg L<sup>-1</sup>, T-Pがそれぞれ0.09mg L<sup>-1</sup>, 0.07mg L<sup>-1</sup>と、ほとんど変化していない。濃度がピークを過ぎた9時以降大きな流出が続いたにもかかわらず、濃度は急速に低下した。降雨時に上昇した濃度は降雨後の大きな流出によって希釈され、1日平均ではほとんど変化していない。

以上のことを踏まえると $b-1$ がマイナスになった

のは、降雨後流出にともなう濃度の希釈が降雨時における濃度の上昇を打ち消したため、と解釈できる。実際、第6図の河川水の200,000m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>以上の流量域をみると、流量の増加にともなう濃度のわずかな上昇がみられる。流量が200,000m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>を越えるような大雨になると、懸濁物の押し出しなどによる濃度の上昇が流量増加による濃度の希釈作用を上回るためと考えられる。

4 修正補完値パラメータ

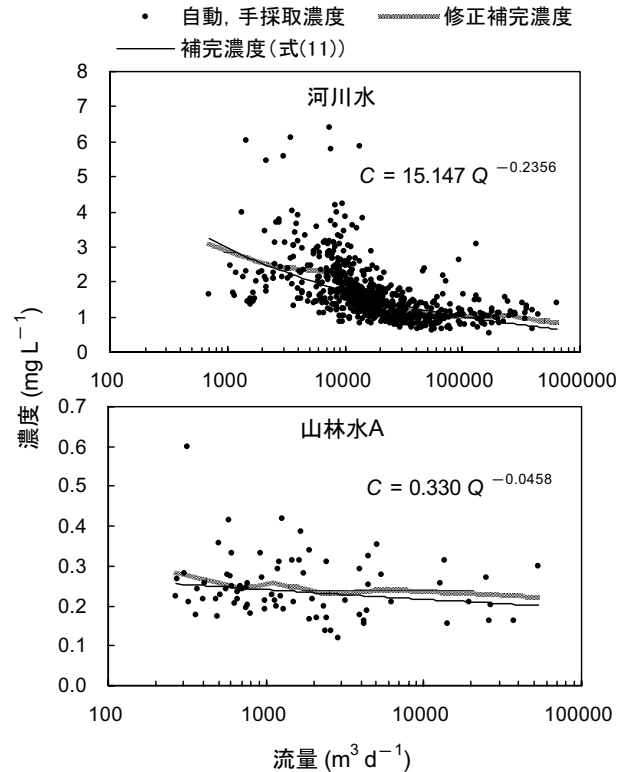
第4表には、補完流量を修正する際に使われた流

第3表 式(11)のパラメータa, b

水質項目	河川水		山林水A	
	$a \times 10^3$	$b-1$	$a \times 10^3$	$b-1$
T-N	15.147	-0.2356	0.330	-0.0458
T-P	0.517	-0.1958	0.011	0.0086
Na <sup>+</sup>	11.726	-0.0600	7.075	-0.0465
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N <sup>a</sup>	5.495	-0.2769	0.191	-0.2387
K <sup>+</sup>	18.068	-0.2423	0.510	-0.0128
Mg <sup>2+</sup>	4.087	-0.1221	1.343	-0.1002
Ca <sup>2+</sup>	31.792	-0.1575	11.279	-0.1433
Cl <sup>-</sup>	9.267	-0.0807	3.752	-0.0324
NO <sub>2+3</sub> <sup>-</sup> -N <sup>a</sup>	9.762	-0.3135	0.157	-0.1028
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P <sup>a</sup>	0.630	-0.2477		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	30.552	-0.1830	8.844	-0.1237

<sup>a</sup> 無検出日は除いて回帰分析した。山林水AのPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-Pは全日無検出のため回帰分析しなかった。

量区分境界値、階級値、修正係数、修正前後の積算偏差率を示す。修正前の流量区別積算偏差率は河川水が-72.5%から28.5%，山林水Aが-53.7%から33.4%と、流量区分によって大きく振れた。その結果全流量積算偏差率も河川水が21.5%，山林水A



第6図 T-Nにおける流量と濃度の関係  
河川水は自動濃度，山林水Aは手採取濃度の分布を示す。図中の曲線は式(11)を示す。

第4表 補完流量の修正に使われた流量区分境界値、階級値、修正係数と積算偏差率

流量名	流量区分	流量区分		修正係数 $\delta_i$	積算偏差率		
		境界値 $U_i$ (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	階級値 $u_i$ (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )		修正前 (%)	修正後 (%)	
河川水	渇水量	< 渇水量	2,440	1,220	3.641	-72.5	-11.7
	低水量	~ 低水量	10,118	6,279	1.065	-6.3	33.8
	平水量	~ 平水量	21,385	15,752	0.789	25.4	2.6
	豊水量	~ 豊水量	50,000	35,693	0.764	28.5	-0.4
	35日流量	~ 35日流量	121,667	85,834	0.916	6.0	-7.0
	高水量	35日流量 ≤ 全流量	442,750	282,209	0.744	27.6	0.7
山林水A	渇水量	< 渇水量	357	179	1.841	-45.6	-12.4
	低水量	~ 低水量	845	601	1.105	-8.7	8.0
	平水量	~ 平水量	1,550	1,198	0.785	33.4	11.3
	豊水量	~ 豊水量	3,100	2,325	1.031	1.6	-0.2
	35日流量	~ 35日流量	6,200	4,650	1.017	5.9	15.7
	高水量	35日流量 ≤ 全流量	15,475	10,838	2.269	-53.7	-4.6
						-33.1	-0.0

第5表 補完濃度の修正に使われた流量区分境界値と階級値

流量名	流量区分	河川水		山林水A	
		境界値 $U_i$ ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ )	階級値 $u_i$ ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ )	境界値 $U_i$ ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ )	階級値 $u_i$ ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ )
渇水量	<渇水量	3,167	1,584	541	271
低水量	~低水量	9,800	6,484	847	694
平水量	~平水量	17,179	13,490	1,315	1,081
豊水量	~豊水量	39,000	28,090	3,164	2,240
35日流量	~35日流量	107,375	73,188	8,250	5,707
高水量	35日流量 $\leq$	354,500	230,934	35,050	21,650

が-33.1%と大きく偏った。しかしここで適当な修正係数を用いて補完流量を修正補完流量に修正することにより、流量区分別積算偏差率は総じて0%に近づき、全流量積算偏差率はほぼ0%になった。

第5表には補完濃度の修正に使われた流量区分境界値と階級値を、第6表には修正係数と修正前後の平均偏差を示す。修正前の流量区分別平均偏差は河

第6表 補完濃度の修正に使われた修正係数と平均偏差

水質項目	流量区分	河川水			山林水A		
		修正係数 $\delta_i$	平均偏差		修正係数 $\delta_i$	平均偏差	
			修正前 ( $\text{mg L}^{-1}$ )	修正後 ( $\text{mg L}^{-1}$ )		修正前 ( $\text{mg L}^{-1}$ )	修正後 ( $\text{mg L}^{-1}$ )
T-N	<渇水量	1.004	-0.00	0.01	1.112	-0.03	-0.00
	~低水量	1.215	-0.40	0.01	0.998	0.00	0.00
	~平水量	1.070	-0.10	0.01	1.082	-0.02	0.00
	~豊水量	0.994	0.01	0.01	1.007	-0.00	0.00
	~35日流量	0.940	0.07	0.00	1.093	-0.02	0.00
	35日流量 $\leq$	1.308	-0.26	0.00	1.113	-0.02	-0.00
	全流量		-0.12	0.00		-0.01	0.00
T-P	<渇水量	1.438	-0.05	0.00	1.313	-0.00	-0.00
	~低水量	1.305	-0.03	0.00	1.115	-0.00	0.00
	~平水量	1.064	-0.00	0.00	1.018	-0.00	-0.00
	~豊水量	1.119	-0.01	0.00	1.015	-0.00	-0.00
	~35日流量	1.260	-0.02	0.00	1.120	-0.00	-0.00
	35日流量 $\leq$	1.628	-0.03	0.00	1.007	0.00	0.00
	全流量		-0.02	0.00		-0.00	0.00
$\text{Na}^+$	<渇水量	0.981	0.14	0.00	0.959	0.21	-0.00
	~低水量	1.044	-0.30	0.01	1.023	-0.13	-0.01
	~平水量	1.018	-0.11	0.01	1.009	-0.06	-0.01
	~豊水量	0.979	0.14	0.01	1.025	-0.13	-0.01
	~35日流量	0.999	0.01	0.00	1.019	-0.09	-0.00
	35日流量 $\leq$	1.059	-0.33	0.00	0.997	0.01	-0.00
	全流量		-0.07	0.00		-0.07	-0.00
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	<渇水量	0.798	0.14	0.01	1.000 <sup>a</sup>		
	~低水量	1.954	-0.44	0.01	1.004	-0.00	-0.00
	~平水量	1.504	-0.19	0.01	1.114	-0.00	-0.00
	~豊水量	1.275	-0.09	0.01	1.312	-0.01	-0.00
	~35日流量	0.940	0.01	0.00	0.836	0.00	0.00
	35日流量 $\leq$	1.968	-0.18	0.00	1.106	-0.00	0.00
	全流量		-0.18	0.00		-0.00	0.00
$\text{K}^+$	<渇水量	1.115	-0.33	0.00	1.014	-0.01	0.00
	~低水量	1.153	-0.32	0.01	0.974	0.01	0.00
	~平水量	1.016	-0.02	0.01	1.038	-0.02	0.00
	~豊水量	0.968	0.05	0.00	1.053	-0.02	0.00
	~35日流量	0.999	0.00	0.00	1.054	-0.02	0.00
	35日流量 $\leq$	1.294	-0.28	0.00	0.963	0.02	0.00
	全流量		-0.10	0.00		-0.01	0.00
$\text{Mg}^{2+}$	<渇水量	1.031	-0.05	0.00	0.966	0.02	-0.00
	~低水量	1.074	-0.10	0.00	1.038	-0.03	-0.00
	~平水量	1.009	-0.01	0.00	1.066	-0.05	-0.00
	~豊水量	0.992	0.01	0.00	1.020	-0.01	-0.00
	~35日流量	1.022	-0.02	0.00	1.099	-0.06	-0.00
	35日流量 $\leq$	1.104	-0.10	0.00	0.983	0.01	-0.00
	全流量		-0.03	0.00		-0.03	-0.00

<sup>a</sup> 無検出のため、修正係数は1.000と定義し、平均偏差のデータなし。

第6表（つづき） 補完濃度の修正に使われた修正係数と平均偏差

水質項目	流量区分	河川水			山林水A		
		修正係数 $\delta_i$	平均偏差		修正係数 $\delta_i$	平均偏差	
			修正前 ( $\text{mg L}^{-1}$ )	修正後 ( $\text{mg L}^{-1}$ )		修正前 ( $\text{mg L}^{-1}$ )	修正後 ( $\text{mg L}^{-1}$ )
Ca <sup>2+</sup>	< 濁水量	1.007	-0.06	0.01	0.937	0.29	-0.00
	~ 低水量	1.040	-0.31	0.01	1.030	-0.14	-0.01
	~ 平水量	1.019	-0.12	0.01	1.044	-0.19	-0.01
	~ 豊水量	0.997	0.03	0.01	1.095	-0.36	-0.00
	~ 35日流量	1.043	-0.24	0.00	1.087	-0.29	-0.00
	35日流量 ≤	1.041	-0.19	0.00	0.966	0.09	-0.00
	全流量		-0.14	0.00		-0.17	-0.00
Cl <sup>-</sup>	< 濁水量	1.046	-0.23	0.00	0.995	0.02	-0.00
	~ 低水量	1.034	-0.15	0.01	1.003	-0.01	-0.00
	~ 平水量	0.985	0.08	0.01	1.039	-0.12	-0.00
	~ 豊水量	1.008	-0.03	0.01	1.031	-0.09	-0.00
	~ 35日流量	1.009	-0.03	0.00	0.973	0.08	-0.00
	35日流量 ≤	1.049	-0.17	0.00	1.004	-0.01	-0.00
	全流量		-0.05	-0.00		-0.04	-0.00
NO <sub>2+3</sub> <sup>-</sup> -N	< 濁水量	1.289	-0.27	-0.00	1.040	-0.00	0.00
	~ 低水量	1.249	-0.16	-0.00	1.083	-0.01	0.00
	~ 平水量	1.172	-0.09	-0.00	1.036	-0.00	0.00
	~ 豊水量	1.088	-0.04	-0.00	1.138	-0.01	0.00
	~ 35日流量	0.998	-0.00	-0.00	1.246	-0.02	0.00
	35日流量 ≤	1.102	-0.02	-0.00	1.351	-0.02	0.00
	全流量		-0.08	-0.00		-0.01	0.00
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P <sup>a</sup>	< 濁水量	1.058	-0.00	0.00			
	~ 低水量	1.157	-0.01	0.00			
	~ 平水量	1.065	-0.00	0.00			
	~ 豊水量	1.000 <sup>b</sup>					
	~ 35日流量	1.000 <sup>b</sup>					
	35日流量 ≤	1.000 <sup>b</sup>					
	全流量		-0.01	0.00			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	< 濁水量	0.973	0.21	0.00	0.974	0.08	-0.00
	~ 低水量	1.022	-0.13	0.01	1.045	-0.18	-0.01
	~ 平水量	1.009	-0.04	0.01	1.042	-0.16	-0.01
	~ 豊水量	1.023	-0.10	0.01	1.035	-0.14	-0.01
	~ 35日流量	1.002	-0.01	0.00	1.018	-0.07	-0.00
	35日流量 ≤	0.985	0.05	0.00	0.985	0.03	-0.00
	全流量		-0.05	0.00		-0.11	-0.00

<sup>a</sup> 山林水Aは無検出のためデータなし。 <sup>b</sup> 無検出のため，修正係数は1.000と定義し，平均偏差のデータなし。

川水が $-0.44\text{mg L}^{-1}$ から $0.21\text{mg L}^{-1}$ まで，山林水Aが $-0.36\text{mg L}^{-1}$ から $0.29\text{mg L}^{-1}$ までと大きく振れた。そのため全流量平均偏差も河川水が $-0.18\text{mg L}^{-1}$ から $-0.01\text{mg L}^{-1}$ まで，山林水Aが $-0.17\text{mg L}^{-1}$ から $-0.00\text{mg L}^{-1}$ までと大きく偏った。しかしここで適当な修正係数を用いて補完濃度を修正補完流量に修正することにより，河川水，山林水Aのすべての流量区分別平均偏差，全流量平均偏差は $\pm 0.01\text{mg L}^{-1}$ の範囲内に収まった。

## 5 修正補完値の比率誤差

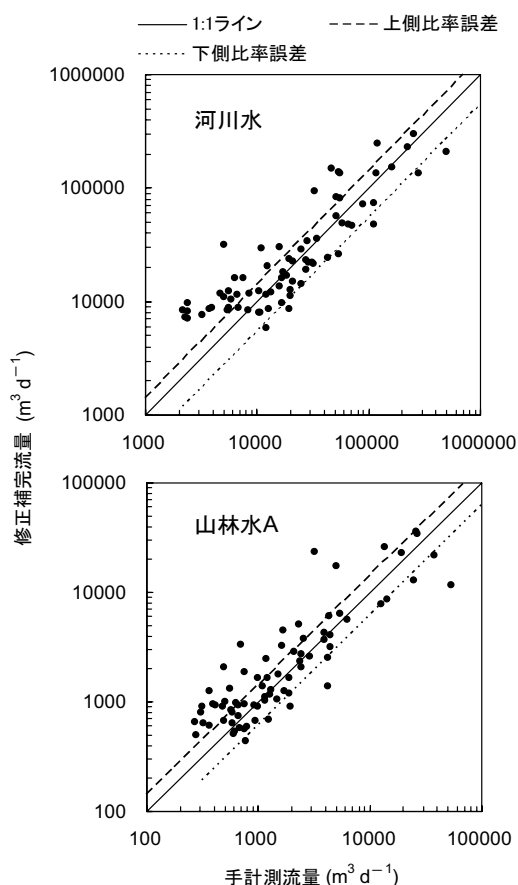
### 1) 流量

第7図には手計測流量に対する修正補完流量の関係プロットを示す。図中の破線と点線は次式で定義される比率誤差の範囲を示す。

$$\text{比率誤差} = M_t (\text{修正補完流量} - \text{手計測流量}) / M_t \text{手計測流量} \quad (31)$$

ここに， $M_t$ ：全流量にわたる平均。

式(31)では，修正補完流量 $>$ 手計測流量の値と修正補完流量 $<$ 手計測流量の値を区別し，前者を上側比率誤差，後者を下側比率誤差と呼ぶ。



第7図 手計測流量と修正補完流量の関係

第7表には修正補完流量の比率誤差を示す。河川水、山林水Aの比率誤差は、上側、下側とも40%前後の値となった。これは修正補完流量の手計測流量に対する振れ幅が平均して $\pm 40\%$ 程度あることを意味し、個々の日流量の推定精度が必ずしも高くないことを示している。しかし第7図にみられるように、 $2,000 \sim 500,000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ というかなり幅の広い流量変動域において修正補完流量の手計測流量に対するプロットが1:1ラインに沿う分布を示したことから、降雨に対する流量の変動傾向はおおむねよく捉えられたといえる。

## 2) 濃度

第8表には、次式で定義される修正補完濃度の比率誤差を示す。

$$\text{比率誤差} = \frac{M_t (\text{修正補完濃度} - \text{自動, 手採取濃度})}{M_t \text{自動, 手採取濃度}} \quad (32)$$

前項の流量と同様、修正補完濃度 $>$ 自動、手採取濃度と修正補完濃度 $<$ 自動、手採取濃度の比率誤差を

第7表 修正補完流量の比率誤差

河川水 比率誤差 (%)		山林水A 比率誤差 (%)	
上側	下側	上側	下側
41	46	42	39

第8表 修正補完濃度の比率誤差

水質項目	河川水 比率誤差 (%)		山林水A 比率誤差 (%)	
	上側	下側	上側	下側
T-N	22	33	19	25
T-P	34	58	22	23
Na <sup>+</sup>	8	15	5	6
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	45	70	11	6
K <sup>+</sup>	20	31	10	11
Mg <sup>2+</sup>	14	22	11	10
Ca <sup>2+</sup>	13	19	10	11
Cl <sup>-</sup>	9	14	6	7
NO <sub>2+3</sub> <sup>-</sup> -N	33	33	27	26
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P <sup>a</sup>	24	27		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	10	11	7	7
平均	21	30	13	13

<sup>a</sup> 山林水Aは無検出のためデータなし。

それぞれ上側、下側と区別する。

河川水の比率誤差は総じて下側の方が上側より大きくなった。これは第6図にみられるように、式(11)の補完濃度曲線から上側にずれたプロットが多数存在したためである。この点は補完濃度の修正によってある程度是正されたが(第6図の修正補完濃度曲線)十分とはいえない。補完濃度曲線から上側にずれた度合いはT-P、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nで著しかったため、補完濃度を修正したことにより上側比率誤差がそれぞれ34%、45%とやや大きくなった。山林水Aでは上側に大きくずれたプロットや下側比率誤差の増大がみられないことから、河川水が人為的負荷の影響を強く受けていることが推測される。また全水質項目の比率誤差を平均すると、河川水の比率誤差は山林水Aのそれよりも上側、下側の数値幅が大きい。これも人為的負荷の河川水に対する影響の現れとみられる。

3) 負荷量

第9表には、次式で定義される修正補完負荷量の比率誤差を示す。

$$\text{比率誤差} = M_t (\text{修正補完負荷量} - \text{実測負荷量}) / M_t \text{実測負荷量} \quad (33)$$

ここに、修正補完負荷量：修正補完流量×修正補完濃度、実測負荷量（河川水）：手計測流量×自動測定濃度、実測負荷量（山林水A）：手計測流量×手採取濃度。

河川水の $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ は手計測流量×自動測定濃度の組み合わせがほとんどなかったため手計測流量を自動測定流量で代替した。

河川水の比率誤差は上側が下側よりやや大きい傾向があった。特に $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ と $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ は、上側比率誤差がそれぞれ129%、142%とかなり大きくなった。これは、たまたま過大な修正補完流量や修正補完濃度が含まれたためで偶発的なものといえる。

全水質項目の平均をみると、河川水上側を除く比率誤差は39~41%であった。河川水上側の比率誤差も $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ を除けば64%から48%に低下する。すなわち、過大な修正補完流量や修正補完濃度の偶発的な組み合わせがなければ、修正補完負荷量の誤差範囲はおよそ±40%で修正補完流量の誤差範囲と同等レベルにあるといえる。

第9表 修正補完負荷量の比率誤差

水質項目	河川水 比率誤差 (%)		山林水A 比率誤差 (%)	
	上側	下側	上側	下側
T-N	63	32	40	36
T-P	48	59	41	51
Na <sup>+</sup>	48	32	41	45
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	129	54	31	5
K <sup>+</sup>	50	15	35	50
Mg <sup>2+</sup>	39	32	43	47
Ca <sup>2+</sup>	45	23	39	52
Cl <sup>-</sup>	38	36	36	35
NO <sub>2+3</sub> <sup>-</sup> -N	52	52	44	40
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P <sup>a</sup>	142	88		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	46	32	38	39
平均	64	41	39	40

<sup>a</sup> 河川水は手計測流量を自動流量で代替した。山林水Aは無検出のためデータなし。

6 河川水の実質的な積算誤差

河川水における流量、負荷量の計算では、修正補完流量や修正補完濃度は自動測定流量、自動測定濃度が欠測した日のみ使われる。そのためある日数を積算したときの修正補完流量、濃度の誤差の影響は、それが使われる日数や期間によって異なると考えられる。そこで以下では、修正補完流量、濃度を実測流量、濃度と組み合わせたときの実質的な積算誤差を検討する。ただしここでは、実測値に含まれる誤差は考慮しないものとする。

1) 流量

第10表には、1年目、2年目、3年目、および年平均（3年間の日数を3で除した期間）における河川水流量の実質的な積算誤差を示す。ここでの実質積算誤差は次式より定義される。

$$\text{実質積算誤差} = Q (D_{q1} + (1 \pm h) D_{q2}) / (Q D_t) - 1 \quad (34)$$

ここに、Q：日流量単位（例えば100とおく）、 $D_{q1}$ ：自動測定流量の日数、h：第7表の河川水の比率誤差（100%を1.00と表わす、以下同様）、 $D_{q2}$ ：修正補完流量の日数、 $D_t$ ：期間の全日数。

式(34)の符号±は+が上側、-が下側を示す。第10表中の実質積算誤差は計算値のパーセント表示とし、下側実質積算誤差のマイナス符号ははずして示す。

自動測定流量の欠測日が少ない1年目は、実質積算誤差が上側4%、下側5%と比較的高い精度が見込まれる。しかし欠測日数が多い2年目、3年目は、実質積算誤差が上側、下側とも20%台へと上昇し精度の低下が予想された。これは精度の低い修正補完流量の数が増えるほど積算流量の精度も低下することを意味する。ただし欠測日が多い2年目、3年目

第10表 河川水流量の実質積算誤差

期間	全日数 $D_t$	修正補完流量		実質積算誤差 (%)		
		日数 $D_{q2}$	比率誤差 h (%)	上側	下側	
1年目	365	36	41	46	4	5
2年目	365	204	41	46	23	26
3年目	365	194	41	46	22	24
年平均	365	145	41	46	16	18



であっても、第7表の比率誤差に比れば依然良好な精度を維持していることがわかる。このことからたとえ欠測日があっても、できるだけ多くの実測値を確保することが重要であることがうかがえる。最後に年平均の実質積算偏差をみると、上側16%、下側18%となり、3年間を通算してみれば積算流量の精度は比較的良好であることがわかる。

## 2) 負荷量

第11表には河川水負荷量の実質積算誤差を示す。ここでの実質積算誤差は次式より定義される。

$$\text{実質積算誤差} = L (D_{L1} + (1 \pm k_2) D_{L2} + (1 \pm k_3) D_{L3} + (1 \pm k_4) D_{L4}) / (L D_t) - 1 \quad (35)$$

ここに、 $L$ ：日負荷量単位（例えば100とおく）、 $D_{L1}$ ：自動測定流量×自動測定濃度の日数、 $D_{L2}$ ：

第11表 河川水負荷量の実質積算誤差

期間	水質項目	修正補完流量× 自動測定濃度			自動測定流量× 修正補完濃度			修正補完流量× 修正補完濃度			実質 積算誤差 (%)	
		日数 $D_{L2}$	比率誤差 $k_2$ (%)		日数 $D_{L3}$	比率誤差 $k_3$ (%)		日数 $D_{L4}$	比率誤差 $k_4$ (%)		上側	下側
			上側	下側		上側	下側		上側	下側		
1年目	T-N	36	41	46	0	22	33	0	63	32	4	5
2年目		131	41	46	7	22	33	73	63	32	28	24
3年目		181	41	46	0	22	33	13	63	32	23	24
年平均		116	41	46	2	22	33	29	63	32	18	17
1年目	T-P	36	41	46	0	34	58	0	48	59	4	5
2年目		131	41	46	7	34	58	73	48	59	25	29
3年目		181	41	46	0	34	58	13	48	59	22	25
年平均		116	41	46	2	34	58	29	48	59	17	20
1年目	Na <sup>+</sup>	36	41	46	0	8	15	0	48	32	4	5
2年目		131	41	46	7	8	15	73	48	32	24	23
3年目		181	41	46	0	8	15	13	48	32	22	24
年平均		116	41	46	2	8	15	29	48	32	17	17
1年目	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	36	41	46	0	45	70	0	129	54	4	5
2年目		131	41	46	7	45	70	73	129	54	41	29
3年目		181	41	46	0	45	70	13	129	54	25	25
年平均		116	41	46	2	45	70	29	129	54	23	19
1年目	K <sup>+</sup>	36	41	46	0	20	31	0	50	15	4	5
2年目		131	41	46	7	20	31	73	50	15	25	20
3年目		181	41	46	0	20	31	13	50	15	22	23
年平均		116	41	46	2	20	31	29	50	15	17	16
1年目	Mg <sup>2+</sup>	36	41	46	0	14	22	0	39	32	4	5
2年目		131	41	46	7	14	22	73	39	32	23	23
3年目		181	41	46	0	14	22	13	39	32	22	24
年平均		116	41	46	2	14	22	29	39	32	16	17
1年目	Ca <sup>2+</sup>	36	41	46	0	13	19	0	45	23	4	5
2年目		131	41	46	7	13	19	73	45	23	24	21
3年目		181	41	46	0	13	19	13	45	23	22	24
年平均		116	41	46	2	13	19	29	45	23	17	17
1年目	Cl <sup>-</sup>	36	41	46	0	9	14	0	38	36	4	5
2年目		131	41	46	7	9	14	73	38	36	22	24
3年目		181	41	46	0	9	14	13	38	36	22	24
年平均		116	41	46	2	9	14	29	38	36	16	18
1年目	NO <sub>2+3</sub> <sup>-</sup> -N	36	41	46	0	33	33	0	52	52	4	5
2年目		131	41	46	7	33	33	73	52	52	26	28
3年目		181	41	46	0	33	33	13	52	52	22	25
年平均		116	41	46	2	33	33	29	52	52	17	19
1年目	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	36	41	46	0	24	27	0	142	88	4	5
2年目		131	41	46	7	24	27	73	142	88	44	35
3年目		181	41	46	0	24	27	13	142	88	25	26
年平均		116	41	46	2	24	27	29	142	88	24	22
1年目	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	36	41	46	0	10	11	0	46	32	4	5
2年目		131	41	46	7	10	11	73	46	32	24	23
3年目		181	41	46	0	10	11	13	46	32	22	24
年平均		116	41	46	2	10	11	29	46	32	17	17

修正補完流量×自動測定濃度の日数， $D_{L3}$ ：自動測定流量×修正補完濃度の日数， $D_{L4}$ ：修正補完流量×修正補完濃度（=修正補完負荷量）の日数， $k_2$ ：第7表の河川水流量の比率誤差， $k_3$ ：第8表の河川水濃度の比率誤差， $k_4$ ：第9表の河川水負荷量の比率誤差。

式(35)の符号±は複合同順とする。第11表中の各期間の全日数 $D_t$ は第10表のそれに等しいので省略する。

各水質項目の実質積算誤差をみると， $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ と $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ の2年目が上側41~44%，下側29~35%とやや大きかった以外，ほとんどの水質項目，期間で河川水流量の実質積算誤差と同等の値を示した。特に自動測定流量，自動測定濃度の欠測が少なかった1年目は，すべての水質項目で上側が4%，下側が5%と高い精度を示した。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ と $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ の2年目の実質積算誤差が大きかったのは，修正補完流量×修正補完濃度（=修正補完負荷量）の比率誤差が大きかったのと，適用日数（73日）が1年目，3年目に比べて多かったことが要因とみられる。

山林水Aに関しては，自動測定流量，濃度が存在しないことから実質的な積算誤差を定義することはできない。全日にわたり修正補完流量，濃度を用いるため，前節で示した修正補完流量，負荷量の比率誤差が積算誤差の目安になると考えられる。

## 7 山林水Aの全山林への拡張

第8図は，山林水A，B，C，D，Eの平均比流量の山林水A比流量に対する比率 $\gamma$ を山林水Aの修正補完流量 $Q_{rcA}$  ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ ) に対してプロットした結果を示す。

修正補完流量が高水量を上回る2001年9月7日， $\gamma$ は0.987となり，平均比流量は山林水A比流量にほぼ一致した。しかし修正補完流量が減少するにつれ $\gamma$ は低下し，修正補完流量が渇水量に近づいた2001年7月31日， $\gamma$ は0.386となった。2001年8月14日と9月11日のデータは多少ばらつくものの，両者の中間点を想定すれば $\gamma$ と $Q_{rcA}$ の関係はつぎの回帰式で表せる。

$$\gamma = 0.162 \ln Q_{rcA} - 0.714 \quad (R^2 = 0.88) \quad (36)$$

よって全山林流量 $Q_F$  ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ ) は次式から推定できる。

$$Q_F = \gamma Q_{rcA} (622/43) = (2.34 \ln Q_{rcA} - 10.3) Q_{rcA} \quad (37)$$

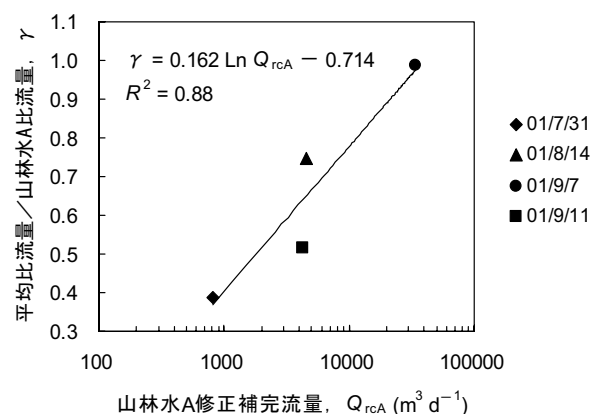
ここに，622：全山林の集水面積 (ha)，43：山林水Aの集水面積 (ha)。

第9図は，山林水A，B，C，D，Eの平均濃度の山林水A手採取濃度に対する比率 $\varepsilon$ を山林水Aの修正補完流量 $Q_{rcA}$  ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ ) に対してプロットした結果を示す。ここでは手採取濃度が検出されなかった $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ と $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ を除くすべての水質項目を示す。他の3点とのずれが大きかったT-Nの2001年9月11日データは回帰分析からはずす。流量のときと同じようなばらつきがみられる $\text{NO}_2 + 3^- - \text{N}$ の2001年8月14日，9月11日は両者の中間点を想定する。

以上のことを踏まえると， $\varepsilon$ と $Q_{rcA}$ の関係はつぎのような回帰式で表わせる（一例としてT-Nの場合を示す）。

$$\varepsilon = 0.159 \ln Q_{rcA} + 0.364 \quad (R^2 = 0.93) \quad (38)$$

$\varepsilon$ と $\ln Q_{rcA}$ のあいだに正または負の相関をもつT-N，T-P， $\text{NO}_2 + 3^- - \text{N}$ は概して決定係数 $R^2$ が高い。他方 $\varepsilon$ と $\ln Q_{rcA}$ のあいだに相関性がみられない $\text{Na}^+$ ， $\text{K}^+$ ， $\text{Mg}^{2+}$ ， $\text{Ca}^{2+}$ ， $\text{Cl}^-$ ， $\text{SO}_4^{2-}$ は当然，決定係数 $R^2$ も小さい。しかしこれらの水質項目においても $\varepsilon$ が1より大きいか（ $\text{Na}^+$ ， $\text{K}^+$ ， $\text{Mg}^{2+}$ ， $\text{Cl}^-$ ）小さいか（ $\text{Ca}^{2+}$ ， $\text{SO}_4^{2-}$ ）という特性の違いを $Q_{rcA}$ の関数として表現したり，相関関係が認められたT-N，T-P， $\text{NO}_2 + 3^- - \text{N}$ との数学的な統



第8図 平均比流量の山林水A比流量に対する比と山林水A修正補完流量の関係  
凡例の01/7/31は，観測日が2001年7月31日であることを示す。

一を図る上ですべての水質項目に式 (38) の関数形を用いることは有益である。

よって全山林の平均濃度  $C_F$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) は次式により推定できると考える (一例として T-N の場合を示す)。

$$C_F = \varepsilon C_{rA} = (0.159 \ln Q_{rcA} + 0.364) C_{rA} \quad (39)$$

ここに,  $C_{rA}$ : 山林水 A の修正補完濃度 ( $\text{mg L}^{-1}$ ).

任意日の全山林負荷量  $L_F$  ( $\text{kg d}^{-1}$ ) は式 (37), (39) を用いてつぎのように表される (T-N の場合)。

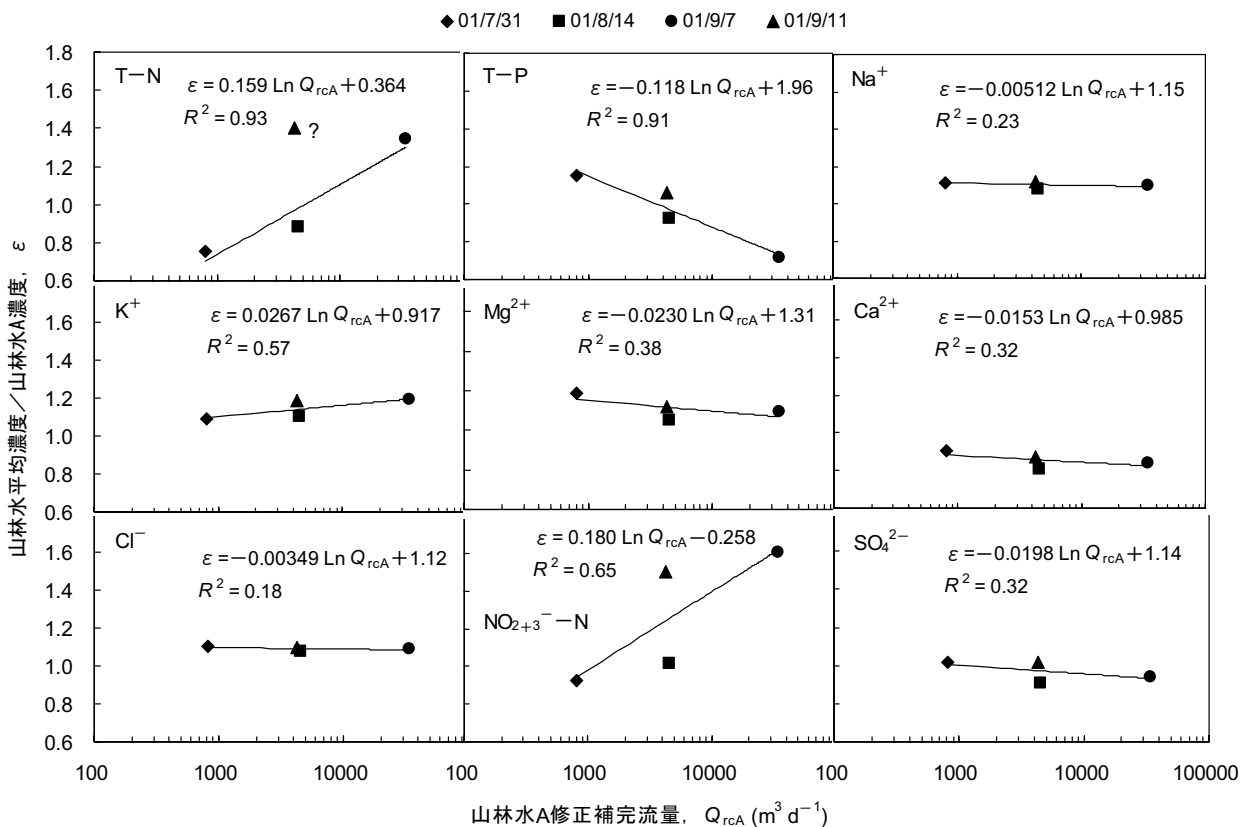
$$L_F = Q_F C_F = (2.34 \ln Q_{rcA} - 10.3) (0.159 \ln Q_{rcA} + 0.364) \times Q_{rcA} C_{rA} = (0.372 \ln^2 Q_{rcA} - 0.786 \ln Q_{rcA} - 3.75) L_{rA} \quad (40)$$

ここに  $L_{rA}$ : 山林水 A の修正補完負荷量 ( $\text{kg d}^{-1}$ ). T-N 以外の水質項目も式 (38) の勾配と切片を第 9 図中に示す値で書き換えれば同様の計算ができる. 手採取濃度が検出されなかった  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  と  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  については式 (38) を用いず,  $\varepsilon = 1$  を与える.

### 8 水収支

第12表にはこれまで述べてきた修正補完法, ならびに山林水拡張法を用いて算出した全山林, 流域 (全山林+低平地) の水収支を示す. 期間は1年目, 2年目, 3年目, および年平均である. 蒸発散量は雨量から流量を差し引いた値とし, 流域内の貯水量変化はないものと仮定する.

各年の雨量に対する流量の大きさは, 雨量の多い年に大きく雨量の少ない年に小さい関係が認められる. 蒸発散量も当初想定した値 (916mm) に近い値となった. 全山林1年目の蒸発散量が586mmとかなり小さくなったが, この年に蒸発散量が減少する理由が見当たらないことから流量の推定誤差の影響と考えられる. 逆に流域2年目は蒸発散量が1,116mmとやや大きめになったが, これもやはり流量の推定誤差の影響と考えられる. こうした流量の影響を受けて, 年平均蒸発散量は, 全山林が889mm, 流域が1,004mmとやや食い違う結果になったとみられる. ただ両者とも河川水の自動測定流量から見積もった蒸発散量の推定幅836~1,048mmには収まっている. 参



第9図 山林水平均濃度の山林水A濃度に対する比と山林水A修正補完流量の関係  
凡例の01/7/31は, 観測日が2001年7月31日であることを示す.

第12表 全山林および流域の水収支

期間	全山林				流域			
	雨量 ×10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	流量 ×10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	蒸発散量 <sup>a</sup>		雨量 ×10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	流量 <sup>b</sup> ×10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	蒸発散量 <sup>a</sup>	
			×10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	(mm)			×10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	(mm)
1年目	20.5	16.9	3.7	586	26.9	19.1	7.8	959
2年目	18.5	12.3	6.2	996	24.2	15.1	9.1	1,116
3年目	18.8	12.1	6.8	1,085	24.6	16.7	7.6	938
年平均	19.3	13.8	5.5	889	25.3	17.1	8.2	1,004

<sup>a</sup>蒸発散量 = 雨量 - 流量とし、貯水量変化はないと仮定する。 <sup>b</sup>河川水流量と同義。

考までに両者の年間流出率を計算すると、全山林が72%、流域が68%（いずれも年平均）となった。

以上のことを総合すると、流量に対する修正補完法および全山林拡張法を用いて算出した年間流量は、年によるばらつきはみられるものの3年を通じてみれば十分妥当性のある数値であることが明らかになった。なおこれらの流量に濃度を組み合わせて得られる各種水質項目の物質収支については次報で報告する予定である。

## V 摘 要

四万十川上流の一流域（815ha）河川において2000年3月16日から2003年3月15日の3年間に実測された離散的な日流量データ、窒素、リン、無機イオンの濃度データから連続した日流量、濃度を生成・補完する手法を考案、検討した。以下にその要点をまとめる。

- 1) 流量、濃度について2週間に1度の手計測データ、あるいは欠測のため連続性が絶たれた自動測定データから日単位の連続データを生成・補完する手法を考案した（補完法）。本法によって補完された数値と実測値のあいだにみられる“系統的な偏り”は、流量区分ごとに修正係数を導入することなどにより修正された（修正補完法）。
- 2) 修正補完法により修正された数値の比率誤差は、流量が±40%、濃度が-13～+30%、負荷量が±40%程度であった（負荷量は過大な修正補完流量と濃度の組み合わせを除いた場合）。また河川水の実質的な積算誤差は、流量が±17%、負荷量が±18%程度であった。
- 3) 山林水A（43ha）の流量、濃度は、5箇所にお

ける山林水の平均比流量、平均濃度を山林水Aの修正補完流量の関数として表わすことにより、全山林（622ha）へ拡張可能であることが明らかになった。

- 4) 修正補完法と山林水拡張法を用いて計算された全山林、流域の年間流量は、同法により計算された蒸発散量が実測流量より推定した蒸発散量に符合したことなどから、おおむね妥当な数値であると考えられた。

## 謝 辞

本研究を実施するにあたりご指導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) Bernard, M. M. 1935. An approach to determinate stream flow. Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 3.
- 2) 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.
- 3) 石原藤次郎・森 忠次 1965. 河川における水位. 新版測量学応用編. 丸善, 東京. 268-270.
- 4) 川村静夫 1994. リン酸. 日本分析化学会北海道支部, 水の分析 (第4版). 化学同人, 京都. 269-271.
- 5) 小谷英司 2003. G I Sを利用した原単位法に

- よる四万十川流域の全窒素 (TN) 排出負荷量の推定. 森林応用研究 12:99-107.
- 6) 高知県文化環境部環境保全課 1997. 平成9年度公共用水域及び地下水の水質測定結果. 高知県文化環境部環境保全課, 高知. 32-33, 44.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 松田 周 2003. 農業土木分野におけるワールド計測技術(その1) - 水文計測技術; 河川流動編 -. 農土誌 71:755-761.
- 10) 長田 隆 1997. 水質. 土壤環境分析法編集委員会, 土壤環境分析法. 博友社, 東京. 390-394.
- 11) 中曾根英雄・黒田久雄・鈴木光剛・久保田健蔵 1995. 灌漑用水のECフラックスの水田による削減とその予測モデルについて. 農業土木学会論文集 179:69-77.
- 12) 中曾根英雄・黒田久雄・加藤 亮 2000. 集水域からの窒素流出モデルの開発. 農業土木学会論文集 205:95-100.
- 13) 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.
- 14) 西野真一郎・堤 昭人・嶋本利彦 2001. 高知県手結周辺に分布する四万十帯北帯の透水性. 日本地質学会2001年金沢大会学術講演会要旨:263.
- 15) 野満隆治・瀬野錦蔵 1959. 洪水の予報. 新河川学. 地人書館, 東京. 151-171.
- 16) Snyder, F. F. 1938. Synthetic unit-graphs. Trans. Am. Geophys. Union Part 2: 447.
- 17) 田渕俊雄・安楽 敏・中曾根英雄・柚山義人 1998. 河川の水質. 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. 29.
- 18) 高橋順二・長谷部均・白谷栄作・吉永 育 2000. 河川流域における降雨時流出負荷量の算定に及ぼす影響要因. 水文・水資源学会誌 13:216-226.
- 19) 武田育郎 1993. 水質環境解析(その3) - 非定常汚濁負荷量の推定 -. 農土誌 61:1153-1158.
- 20) 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.
- 21) 横田和典 2002. 流域圏における施策評価 四万十川の総合対策から. 四万十・流域圏学会第2回総会・学術研究発表会概要集:23-24.
- 22) 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.

## A Method for Evaluating Continuous Daily Discharge, Loads of N, P, and Inorganic ions in a Watershed on the Shimanto River Basin, Shikoku, Japan

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

### Summary

In the Shimanto River basin, Shikoku, Japan, agricultural activities are suspected to lead pollution in water quality of the Shimanto River. However, causal relationship between the agricultural activities and the water quality is not evident. So, we developed a method for evaluating continuous daily discharge and effluent loads of N, P, and inorganic ions to analyze their effluent characteristics in a watershed (815 ha) located on the Shimanto River basin. The results are as follows.

1) As for discharge and concentration, complement of continuous daily data from discontinuously measured data such as once at two weeks or from automatically measured ones including failed-observation periods was revealed to be practicable by a method we designed in the present paper. “Systematic biases” arising in the complemented values were corrected by modification factors defined in each of discharge classes.

2) Relative errors in the complemented values were  $\pm 40\%$  for the discharge, from  $-13\%$  to  $+30\%$  for the concentration, and  $\pm 40\%$  for the effluent load. Cumulative errors when the complemented values linked with automatically measured ones were practically  $\pm 17\%$  for the discharge, and  $\pm 18\%$  for the effluent load.

3) The discharge and concentration of the whole forested area (622 ha) in the watershed were able to be estimated from the partial forested catchment A (43 ha), using correlative relationships between mean specific discharge, or mean concentration of five forested catchment samples and the complemented discharge of the forested catchment A (forested area extending method).

4) Annual discharge calculated from the data complementing and forested area extending methods was concluded to be an appropriate value, because evapo-transpiration obtained from a subtraction of the complemented discharge from precipitation coincided with that estimated from the automatically measured discharge.

---

Research Team for Conservation of Agricultural Watershed

\* National Agricultural Research Center for Tohoku Region

\*\* National Agricultural Research Center