

高精度測定法による多摩川水系の
水収支・物質収支の動態把握と河川水質形成機構の解明

2002年

大 森 博 雄

東京大学大学院新領域創成科学研究科教授

は し が き

本報告書は、平成11年度～平成13年度に、とうきゅう環境浄化財団の助成を受けて行った「高精度測定法による多摩川水系の水収支・物質収支の動態把握と河川水質形成機構の解明」（研究助成番号 1999-21号）の研究成果をまとめたものである。

研究組織

研究代表者 大 森 博 雄（東京大学大学院新領域創成科学研究科教授）

研究分担者 太 田 剛（東京大学大学院新領域創成科学研究科助手）

杉 盛 啓 明（東京大学空間情報科学センター助手）

研究経費	平成 11 年度	590.5千円
	平成 12 年度	627.5千円
	平成 13 年度	50千円
	計	1,268千円

研究発表

学会発表 太田 剛（1999）：多摩川水系における水質形成機構－河川流下区間における物質収支と浅層地下水質との比較検討－. 日本地理学会発表要旨集, 55, 298-299.

Ohta, T. (2000) : Mechanism for Generating the Water Chemistry in the Tama River System. Eos Trans. AGU, 2000 Western Pacific Geophysics Meeting Suppl., 81(22), 51-52.

太田 剛・大森 博雄・山口 歩（2001）：浅川主要合流点における流出負荷量収支の検討. 水文・水資源学会2001年研究発表会要旨集, 230-231.

太田 剛・大森博雄・杉盛啓明・山口 歩（2001）：浅川における水質の縦断変化と流域土地利用との関係. 日本地理学会発表要旨集, 60, 148.

目 次

I	はじめに	1
II	調査流域の概観	3
	1. 浅川水系の概要と調査対象支流	3
	2. 浅川流域における地形と地質	4
III	河川区間における物質収支の検討方法	7
	1. 溶存物質フラックスの測定方法をめぐる問題	7
	2. 測定方法の記述	8
	3. 測定精度の検討	11
IV	浅川水系の水質と流域における浅層地下水の水質	14
	1. 浅川水系の水質	14
	2. 残流域における浅層地下水の水質	17
V	浅川流域における人間活動と河川水質との関係	21
	1. 浅川流域における土地利用とその経年変化	21
	2. 主要支流域における土地利用と河川水質との関係	27
	3. 河川水質の縦断変化の要因と残流域における土地利用特性との関係	31
	4. 土地利用特性による河川水質の経時変化の推定可能性	32
VI	ま と め	34
	引用文献	36

I はじめに

河川水質は地形・地質・気候・植生・土地利用といった流域の諸特性を反映し、様々な時空間変動を示す。そのため、衛生工学、森林生態学、水文学、地球化学などの学問分野で、それぞれの研究目的に応じた指標物質を用いて解釈がなされてきた。とりわけ、1960年代以降水質汚濁が都市河川で顕在化したのを背景に、中下流域における人間活動に伴う水質汚濁メカニズムの解明を目的とする研究が増加する一方、源流域における水質保全機能と森林生態系との関係に注目が集まるようになった。その結果、河川流域における水質変化は森林源流域と都市中下流域という比較的単純な図式で捉えられがちになった。また、こうした図式とは別に、各種水質指標をトレーサーとして利用して河川への流出過程を明らかにしようとする研究が水文学や地球化学において発展した。このように河川水質研究の専門分化が進むにつれて河川水質の形成機構そのものに関する知見は精緻になってきたが、流域全体にわたる広域的な河川水質の動態把握は重要視されない傾向にあり、またその流域特性との関係については定量的検討がまだまだ不十分である。

近年、住宅地開発や熱帯林の伐採などの地域規模での人間活動によって、また温暖化のような人為的に誘引された地球規模での現象を通じて水循環様式を変化させた結果、河川の氾濫や少雨による河川の枯渇、またそれに伴う水質の悪化など様々な水環境問題が世界各地で引き起こされるようになった。温暖湿潤地域に属するわが国においては、水不足（水資源の量的な枯渇）は時間的にも空間的にも限定しうる一時的な問題として対応される。これに対し、水資源の質的な枯渇については、湖沼・河川水の富栄養化に伴う有機物質汚濁が改善されてきたものの、地域規模での人間活動の拡大と蓄積が予想以上に河川水質に影響を与えており、水質の変化は水量の変化以上に長期に及ぶため将来的に深刻な事態に直面する可能性が懸念される。

こうした状況から、地域規模における適正な水循環を計画的に再生・保全し、さらにそれを維持するような社会システムを構築することが求められつつあり、そのためには水循環および物質循環を流域全体、さらに広域的な視点から位置づけていくことが重要であると認識されるようになった（小倉，1997）。適正な水循環とは具体的に何かを検討するうえで河川流量・水質は基礎的なデータであるが、これらを地点データとして扱ってメカニズム解明を志向するのみならず、水収支・物質収支という視点から面的・空間的に把握・評価する方法を改良していくことが、水環境研究における緊急の課題である。

この課題を解決するためには、様々な流域特性をもつ実際の河川を対象に水収支および

物質収支を統一の方法を用いて高精度で明らかにした上で、河川水質の縦断変化を流域スケールで把握し、水質形成機構を類型化することが重要であると考え、実際の河川流域における水質の動態把握を困難にする具体的な要因として、海老瀬・井上（1991）は以下の4つを挙げている。

- (1) 支流の合流や人工的水利用システムに伴う多くの流出入。
- (2) 河川流量および水質の時間変動。
- (3) 流路横断面における水質分布の不均一性。
- (4) 伏流および湧水などによる河川水と浅層地下水との相互交流。

本研究では、多様な流域特性をもつ多摩川を代表する支流として浅川を調査対象に選定し、流域スケールでの河川水質の動態を把握するとともに、その流域特性との関係について定量的な検討を試みる。その過程において、上記の4要因をふまえて以下のように対処する。

- (1) 支流の合流や人工的流出入の影響については、浅川の水質形成に影響を及ぼしうる流域を流域面積に基準を設けて選び出すとともに、主要支流の合流点を両端とする河川区間およびその集水域についても検討対象とする。また、化学的な変動要因を限定するために、水質項目として保存性の高い主要無機成分8項目を用いる。
- (2) 河川流量および水質の時間変動については、降雨流出に伴う流量変動の影響を排除するために平水時を調査対象とするとともに、原則的に各季節1回以上の河川調査を実施してその結果の平均値を検討対象とする。
- (3) 流路横断面における水質分布の不均一性については、半谷（1972）や半谷・小倉（1985）によってもその重要性が指摘されていることから、溶存物質フラックスの測定法を改良し、その測定精度を確認したうえで適用する（第Ⅲ章）。
- (4) 河川水と浅層地下水との相互交流については、その重要性が従来から指摘されてきたものの、定量的な評価・検討が困難であるのが現状である（國松・村岡，1990，pp. 78-86）。支流の流入がないにもかかわらず著しい水質変化を生じる河川区間においては、その集水域における浅層地下水の水質を可能な限り明らかにし、水質変化量と定量的に比較する。さらに、地形・地質・土地利用などの流域特性との比較検討を通じて、浅層地下水との相互交流が河川水質形成に寄与する可能性を総合的に考察した（第Ⅳ章，第Ⅴ章）。

II 調査流域の概観

1. 浅川水系の概要と調査対象支流

本研究での調査対象河川は、多摩川の支流である浅川とその主要な6支流とした(図1)。

浅川は陣馬山(標高854.8m)の北東山腹に源を発し、ほぼ東流して八王子市街に至った後、南東、北東の順に向きを変えて多摩川に合流する。流路延長は32.8km、流域面積は155km²で、多摩川の支流の中で2番目に大きい流域面積をもつ。AMeDAS・八王子観測点における年平均気温は14.2℃であった(1993~1997年の平均値)。高村(1981)によれば、浅川流域における年降水量は1600~1700mm、年可能蒸発散量は600~650mmと見積もられており、流域水収支により浅川の年流出高は950~1150mmとなる。浅川最下流部の高幡橋地点における流量観測データ(国土交通省関東地方整備局京浜工事事務所による)から年流出高は1048mm(1993~1997年の平均値)と計算されることから、浅川流域においては流域水収支が保たれており、流域外への水の流出の影響は無視しうる。

浅川流域の土地利用構成は、山林・荒地等64.7%、農用地9.1%、工業用地2.1%、住宅地18.4%、商業・業務用地3.0%、その他2.8%となっている。第V章において詳述するが、1960年代以降、丘陵地を中心に住宅地開発が進行し、現在でもなお山林・農地が住宅地へと転換されてきている。標高200mの等高線以東に人口が集中し、八王子市街部における人口密度は1万人/km²をこえ、浅川における水質形成に流域での人間活動が大きな影響を及ぼしている。

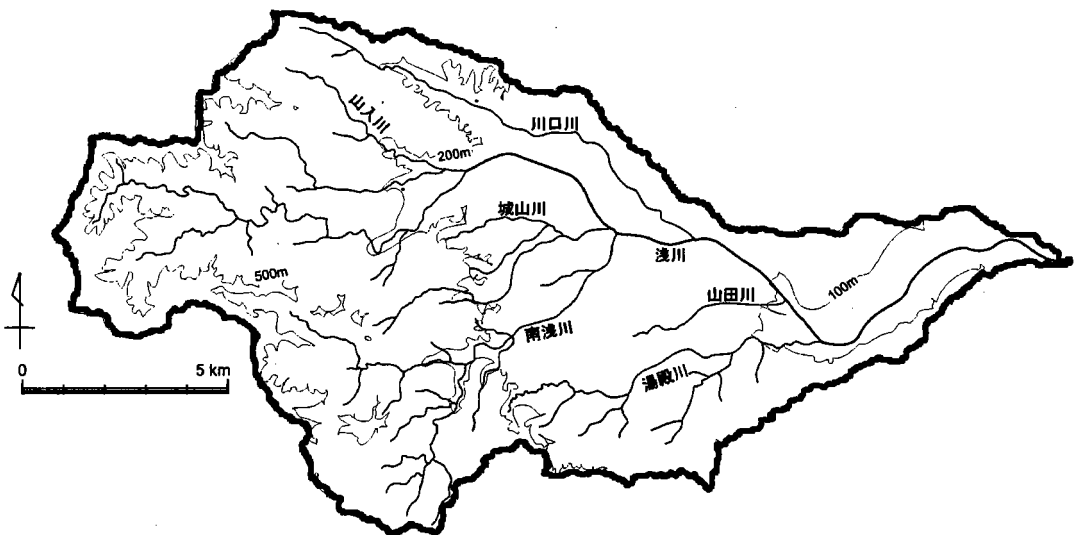


図1 浅川水系の概要と調査対象支流

浅川本流の水質に大きな影響を及ぼしていると考えられる支流を、次の2つの基準を設けて選定した。(1)浅川本流への合流点の標高が200m未満であること。(2)支流の流域面積が10km²以上であること。これらの基準を満たしたのは、山入川(16.3km²)、城山川(10.3km²)、南浅川(30.9km²)、川口川(16.4km²)、湯殿川(20.7km²)の5支流であった。なお、山田川は流域面積3.1km²の小河川で(2)の基準を満たさないが、流域の大部分が市街化されており水質汚染が著しいことから、浅川本流への影響が無視できないと予想されたため調査対象に加えた。

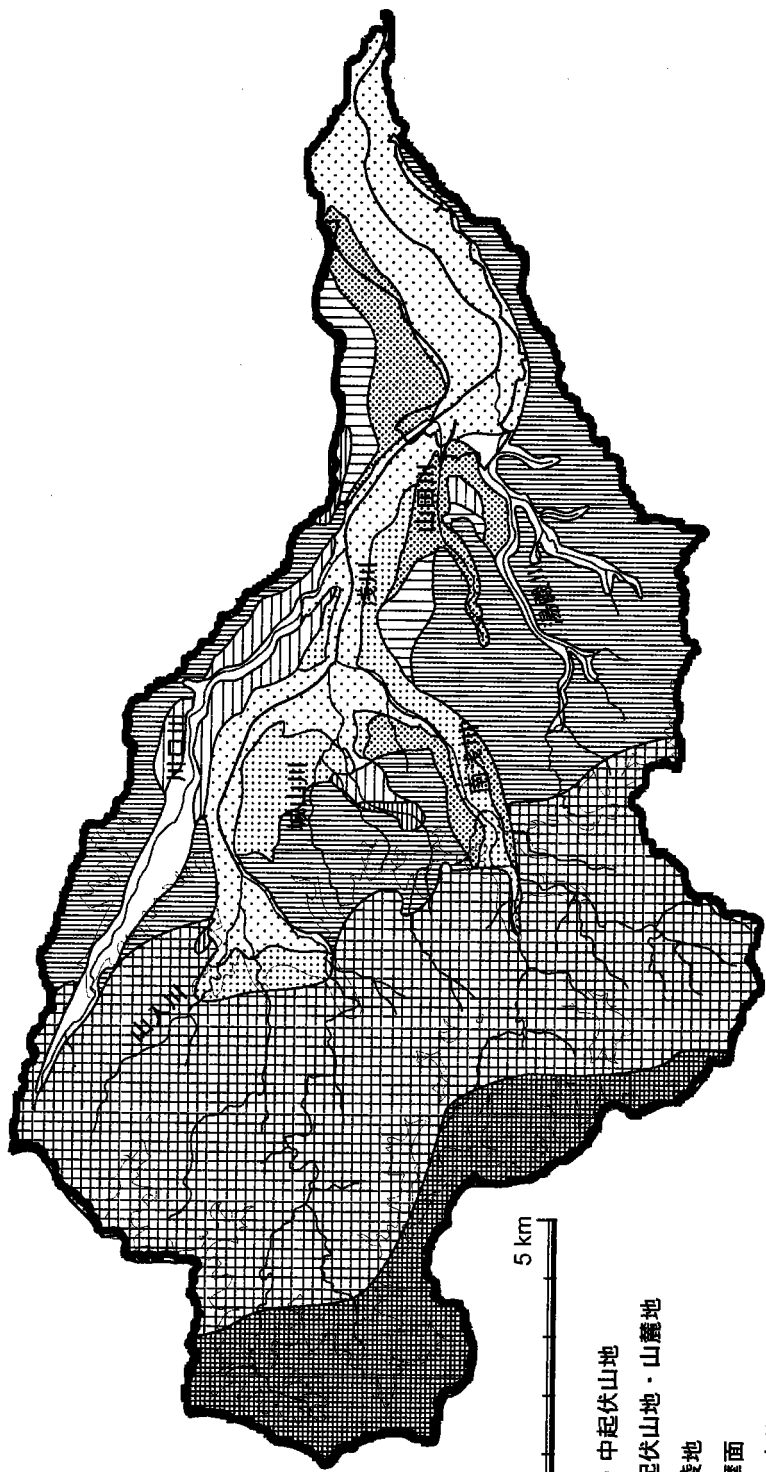
2. 浅川流域における地形と地質

浅川を含む多摩川流域における地形と地質については、寿円(1965)をはじめ多くの研究(例えば; 関東第四紀研究グループ, 1969; 貝塚, 1979; 阪口・大森, 1981; 高木, 1990)があるが、ここでは阪口・大森(1981)によって整理された地形分類図(図2)をもとに記述する。

地形と地質の分布は、ほぼ標高200m等高線を境として、西側においては中生界からなる山地および山麓地となっており、山入川と南浅川の流域の大部分はこれに属する。これに対し、東側においては丘陵地によって大半が占められるほか、河道に沿って形成時期の異なる段丘面および扇状地性低地が分布する。丘陵地の主要な構成地質は鮮新統であり、川口川左岸に位置し流域界北側を占める丘陵地を除き、ほとんどの丘陵地において鮮新統の上位を多摩ローム層以上のロームが覆っている。

段丘面の分布については、多摩面は山入川と城山川の流域の一部、流域界北側の一部に限られている。下末吉面は南浅川合流点より下流域に分布し、八王子市街地南西部と日野台地に連続する流域界北東部において発達がよい。武蔵野面は川口川に沿って連続的に分布する以外ではそれほど発達がよくなく、城山川流域などに断片的にみられる程度である。立川面は南浅川中下流部に沿って両岸に連続的に分布するほか、山田川流域から浅川下流部左岸にかけて西南西-東北東方向に連続するように分布する。これらの段丘面は、それぞれの形成年代に応じた層厚のローム層によって覆われている。最も新しい拝島面およびそれ以下の段丘は、山入川合流点から城山川合流点にかけての浅川本流区間の右岸側において最も発達がよい。また、南浅川中下流部から浅川中流部にかけて連続的に分布し、八王子市街地はこれらの低位段丘面上に立地している。

浅川本流の河谷は標高200m等高線以東においては扇状地性低地によって埋められており、この東側区間では河道に沿って高水敷と人口堤防が設けられている。これに対し、流



- 大・中起伏山地
- 小起伏山地・山麓地
- 丘陵地
- 多摩面
- 下末吉面
- 武蔵野面
- 立川面
- 拝島面およびそれ以下の段丘
- 扇状地性低地面
- 谷底平野など

図2 浅川流域地形分類図
阪口・大森(1981)を簡略化

域の大半が丘陵地によって占められる川口川と湯殿川の河谷は谷底平野となっており、河谷の横断形は舟底型となっている（恩田ほか，1996，p.208）。

以上のように、標高200m以東の浅川流域においては、浅川本流が扇状地河川としての性質をもち、主に礫によって構成される平坦な地形面が分布する。構成地質中には地下水の賦存に適した帯水層も存在するほか、丘陵地と段丘面との境界や段丘崖に沿って湧水が点在することが知られており（東京都環境保全局，1997）、帯水層深度が浅い扇状地性低地や拝島面およびそれ以下の段丘の分布域において、生活雑用水として浅層地下水の利用がみられる。

Ⅲ 河川区間における物質収支の検討方法

1. 溶存物質フラックスの測定方法をめぐる問題

単位時間にある河川流路横断面を通過する溶存物質の量、すなわち溶存物質フラックス M [g/s]は流量 Q [m^3/s]と横断面における平均物質濃度 \bar{C} [mg/L]との積で求めることができる。すなわち、

$$M = Q \cdot \bar{C} \quad (1)$$

また、流量 Q [m^3/s]は流路横断面積 A [m^2]と平均流速 \bar{V} [m/s]との積(2)式で求めることができるので、溶存物質フラックス M [g/s]は(3)式のように表される。

$$Q = A \cdot \bar{V} \quad (2)$$

$$M = A \cdot \bar{C} \cdot \bar{V} \quad (3)$$

流路横断面積 A は断面測量により求めることができる。流路横断面における物質濃度分布・流速分布が不均一であることから、平均物質濃度 \bar{C} と平均流速 \bar{V} は A に比べ正確な計測が困難である(例えば、山本, 1968, p.150-151; 半谷, 1972, p.23-25など)。しかしながら、平均流速 \bar{V} の測定方法については多くの研究があり、それらの結果は土木学会(1971, p.162-171)や春日屋(1990)に整理されているほか、新井(1991, p.51-60)により野外調査に適した簡易法も提示されている。こうした研究の蓄積により、 A と \bar{V} (すなわち流量 Q) を一定の精度で計測することは可能となった。

したがって、平均物質濃度 \bar{C} を精度よく測定できれば、溶存物質フラックス M も高い精度で求めることができることになる。しかし、実際の河川における \bar{C} の測定方法についての研究は少なく、電気伝導度や pH の測定によりあらかじめ物質濃度分布を把握することが重要であると半谷(1972, p.23-25)や半谷・小倉(1985, p.126-127)によって指摘されているのみである。具体的な測定方法を示した上でその精度を実例で検討した研究は皆無であった。

こうした背景から、横断面における物質濃度分布の不均一性を無視して測定がおこなわれたり、あるいは平均物質濃度 \bar{C} の計測が困難とみなされる場所は測定地点から除外されてきたりした。特に、支流が合流した直下の地点では河川水どうしが十分に混合せず横断面の濃度分布が著しく不均質であり、平均物質濃度 \bar{C} を得るのに不適當な地点として

水質測定を避けるべきとされた（半谷・小倉，1985，p.127）。しかしながら，本研究の対象河川である浅川のように，多くの流入を伴う実際の河川における水質形成機構を明らかにするためには，流路横断面における不均一な物質濃度分布を考慮して溶存物質フラックス M を高い精度で実測したうえで，物質収支を検討することが不可欠である。

本章の目的は，溶存物質フラックス M の精度が高く，かつそれを保証するうえでは最も簡便な測定法を提示し，それが本研究にとって十分な精度をもつことを検証することである。そのためにまず，横断面における不均一な物質濃度分布を考慮した新しい測定方法を従来の測定方法と比較して示す。次に，これらの方法で計測した合流点前後の物質収支を比較検討し，測定精度の改善効果を実証する。

2. 測定方法の記述

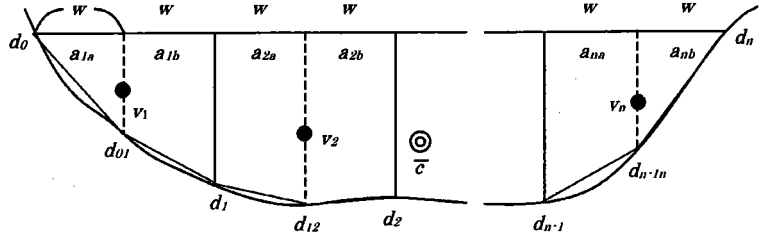
本研究における溶存物質フラックス M の測定方法は，新井（1991，p.51-60）による簡易流量観測法に，横断面における電気伝導度分布の測定を組み込んだものである。以下に，図3に基づいて測定方法を具体的に記述する。

- [1] 測線設定：水面が波立っておらず，逆流や側流がなるべく少ない箇所を選び，流れに直角に巻尺をはる。
- [2] 断面測量：測線に沿って測深棒を垂直に立て，等間隔で水深をcm単位で測定する。測深間隔は，川幅5m未満ならば25cm，川幅5～20mならば50cm，川幅20m以上ならば1mを目安とする。
- [3] 流速測定：水深測定位置の一つおきに，60%の深さで流速計にて流速を測定する。
- [4] 電気伝導度分布の把握：水深測定位置の一つおきに，60%水深で電気伝導度を測定する。電気伝導度の変動幅が平均値の10%未満の場合，横断面において物質濃度分布が「均一」と判定する。一方，10%以上の場合を「不均一」と判定し，横断面をパートに分け（後述），物質濃度測定用の試水の採取をパートごとに別とする。
- [5] 試水採取：
[1]～[4] の手順から，溶存物質フラックス M の基本的で実践的な計算式は次のようになる。

[1] 測線設定

[2] 断面測量

[3] 流速測定

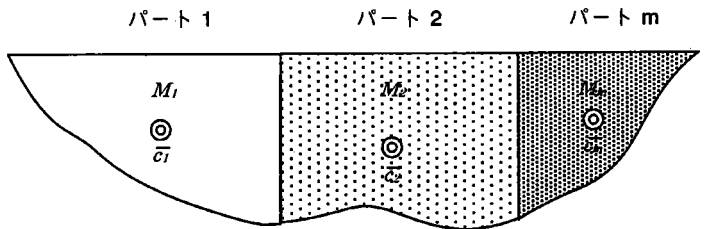


$$M = \bar{c} \cdot \sum_{j=1}^n [(a_{ja} + a_{jb}) \cdot v_j]$$

$$= \bar{c} \cdot \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{2} (d_{j-1} + 2d_{j-1-j} + d_j) \cdot w \cdot v_j \right]$$



[5] 試水採取
(a) 均一



$$M = \sum_{i=1}^m M_i$$

$$= \sum_{i=1}^m \left[\bar{c}_i \cdot \sum_{j=1}^{n_i} [(a_{ija} + a_{ijb}) v_{ij}] \right]$$

$$= \sum_{i=1}^m \left[\bar{c}_i \cdot \sum_{j=1}^{n_i} \left[\frac{1}{2} (d_{ij-1} + 2d_{ij-1-ij} + d_{ij}) w \cdot v_{ij} \right] \right]$$

[5] 試水採取
(b) 不均一

図3 溶存物質フラックスの測定方法

$$\begin{aligned}
 M &= \sum_{j=1}^n [(a_{ja} + a_{jb}) \cdot c_j \cdot v_j] \\
 &= \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{2} (d_{j-1} + 2d_{j-1,j} + d_j) \cdot w \cdot c_j \cdot v_j \right]
 \end{aligned} \tag{4}$$

a : 断面積 d : 水深
 c : 溶存物質濃度 w : 測深間隔
 v : 流速 j : 横断面の分割数を示す添え字

(a) 「均一」の場合、流心1点にて採水する。このとき、流心における物質濃度 \bar{c} とすれば、 $\bar{c} = c_1 = c_2 = \dots = c_n$ としてよいので、溶存物質フラックス M を求める式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 M &= \bar{c} \cdot \sum_{j=1}^n [(a_{ja} + a_{jb}) \cdot v_j] \\
 &= \bar{c} \cdot \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{2} (d_{j-1} + 2d_{j-1,j} + d_j) \cdot w \cdot v_j \right]
 \end{aligned} \tag{4-a}$$

(b) 「不均一」の場合、電気伝導度の変動幅が平均値の10%未満になるように横断面をいくつかのパートに分け、パートの中間位置でそれぞれ採水する。すなわち、「均一」な濃度分布をもつ流路の集まりとみなして測定を行う。パートを示す添え字を i とし、パート中間位置における物質濃度 \bar{c}_i とすれば、溶存物質フラックス M を求める式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 M &= \sum_{i=1}^m M_i \\
 &= \sum_{i=1}^m \left[\bar{c}_i \cdot \sum_{j=1}^{n_i} [(a_{ija} + a_{ijb}) \cdot v_{ij}] \right] \\
 &= \sum_{i=1}^m \left[\bar{c}_i \cdot \sum_{j=1}^{n_i} \left[\frac{1}{2} (d_{ij-1} + 2d_{ij-1,ij} + d_{ij}) \cdot w \cdot v_{ij} \right] \right]
 \end{aligned} \tag{4-b}$$

ちなみに従来は、流心は河川流路における溶存物質濃度を代表する位置とみなされ、流心で試水を採取することが勧められてきた (半谷・小倉, 1985, p.126; 新井, 1991, p.96)。

しかしながら、流心での採水は橋がないなどの理由で困難であり、実際には川岸近くで採水されている場合も多い。また、流路横断面のどこで採水および物質濃度の測定をおこなったかについての記述は、既往研究ではほとんどみることができない。これらの事実から、従来の方法では、横断面上の任意の1点で試水が採取されその物質濃度 $c_{arbitrary}$ に基づいていたと仮定すれば、溶存物質フラックス M の計算式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 M &= c_{arbitrary} \cdot \sum_{j=1}^n [(a_{ja} + a_{jb}) \cdot v_j] \\
 &= c_{arbitrary} \cdot \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{2} (d_{j-1} + 2d_{j-1,j} + d_j) \cdot w \cdot v_j \right]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

次節では、本研究で採用した方法による溶存物質フラックスと、従来の方法による溶存物質フラックスとを比較検討し、測定精度の検証を行ってみる。

3. 測定精度の検討

1) 検討方法

流路横断面における溶存物質濃度分布を考慮することによって溶存物質フラックス M の測定精度がどれだけ向上したかを吟味することは、河川区間での物質収支の評価に新しい方法を適用するにあたり重要である。また、このことは、既往研究における溶存物質フラックス M の測定値の信頼性を明らかにすることでもあり、きわめて意義があろう。

測定精度は、合流点前後での物質収支を評価することによって検討した(図4)。すなわち、溶存物質フラックスについて、合流前の本流 (upstream) でのそれを M_{us} 、支流 (tributary) でのそれを M_{tr} 、合流後の本流 (downstream) を M_{ds} とし、合流前のフラックスの和 $M_{us} + M_{tr}$ と合流後のフラックス M_{ds} とを比較する。合流点において凝集・沈殿・化学反応などによる溶存形態の変化がないと仮定すれば、両者は同じ値となるはずである。

また、溶存物質フラックス M の測定精度が流速分布の計測精度にどれだけ依存しているかを確認する目的で、合流点前後での水収支をあわせて評価した。す

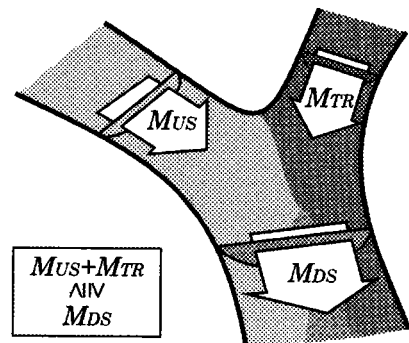


図4 測定精度の検討方法

なわち、合流前の本流と支流の流量和 $Q_{US} + Q_{TR}$ と合流後の流量 Q_{DS} とを比較し、両者の一致程度を評価する。

なお、評価対象とした合流点は浅川水系の5合流点である。

2) 結果

合流点前後での物質収支について、改良された測定方法を用いた場合を図5-aに、従来の測定方法を用いた場合を図5-bにそれぞれ示す。改良された測定方法では物質の種類によらず収支は±20%程度の範囲でよく一致している。これに対し、従来の測定方法では収支のつり合う直線から大きく外れている点が多く、最大で約80%もの差異を生じている。一方、図6に示すように合流点前後での水収支は±20%程度の差異を生じている。これらのことから、横断面における溶存物質濃度分布を考慮することによって、溶存物質フラックス M の測定精度は±80%から±20%へと大幅に改善されるとともに、改良された新しい方法の測定誤差要因が主に流速分布の計測精度に依存するものと判断される。

ただし、「合流点において凝集・沈殿・化学反応などによる溶存形態の変化がない」との仮定がそもそも成り立たない場合もある。その例として、図7に改良された測定方法による南浅川合流点での物質収支を、図8には水収支をそれぞれ示した。水収支の相対誤差が±15%に収まっており、 NO_3^- 以外の物質収支も相対誤差±20%でよく一致しているにもかかわらず、 NO_3^- 収支のみがつり合っていない。このことは、南浅川には生活雑排水の混入が多いことに起因していると考えられる。すなわち、南浅川の水には NO_3^- 以外の形態をとる窒素 (NH_4^+ ・ NO_2^- および有機態窒素) が多く含まれ、それらが合流点においてすみやかに硝化されて NO_3^- へ変化した結果、合流後における NO_3^- フラックスが大きく増加したのと推定される。このことは逆に、本研究で用いた測定方法により、上記のような検討・考察が可能になることを示している。

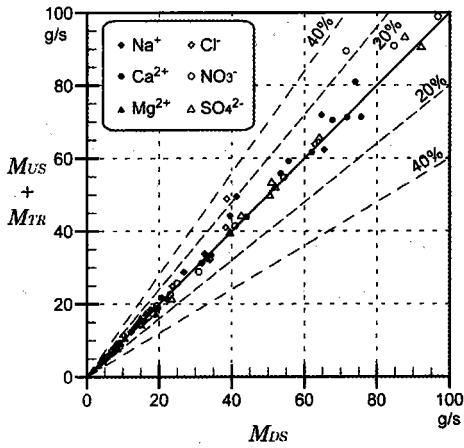


図 5-a 改良された測定方法の精度検討

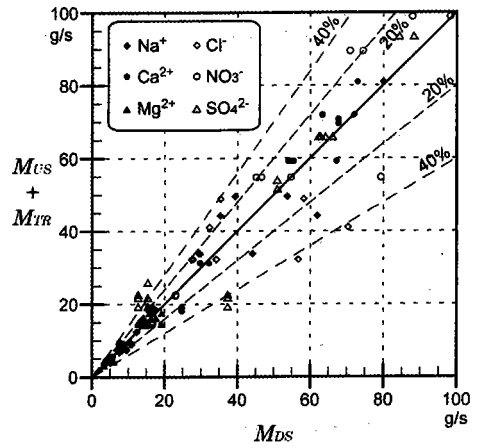


図 5-b 従来の測定方法の精度検討

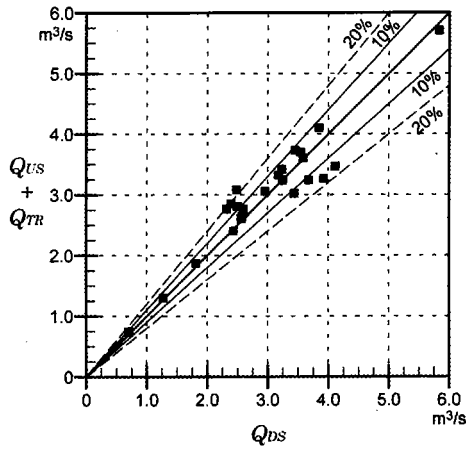


図 6 浅川水系主要合流点における水収支

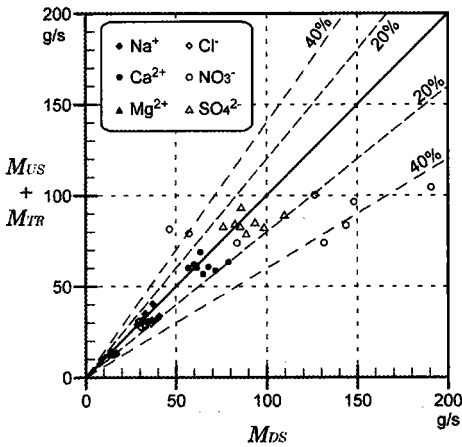


図 7 南浅川合流点における物質収支

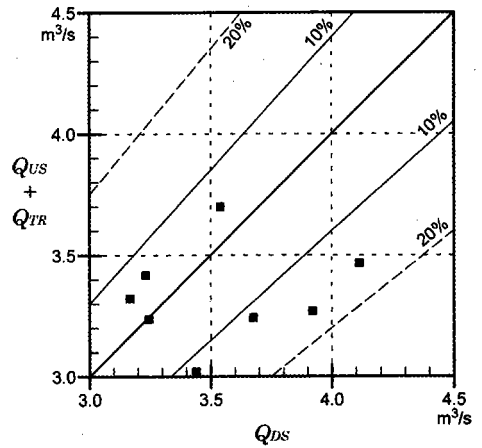


図 8 南浅川合流点における水収支

IV 浅川水系の水質と流域における浅層地下水の水質

本章では、前章で提示した溶存物質フラックスの高精度測定法を用いて、浅川水系の水質を明らかにし、支流の流入によってもたらされる水質の縦断変化を定性的に説明する。また、支流の流入がないにもかかわらず、著しい水質変化と流量増加が生じている河川区間が認められた。そこで、こうした区間における水質・流量変化要因を検討する基礎資料として、集水域における浅層地下水質の測定結果を提示する。

1. 浅川水系の水質

浅川水系の主要支流の合流点において、原則的に各季節1回以上、溶存物質フラックスを高精度で測定した。その平均値を流量の平均値で除することにより各測定地点の平均水質を求めた。図9には、電気伝導度 (EC : electric conductivity) と溶存イオン総量 (TDI : total dissolved ions) との関係を示した。回帰分析の結果、両者の関係は図示した直線によって回帰され、相関係数は0.99となったことから、本研究で扱う水質データには信頼性がおけることが確認される。

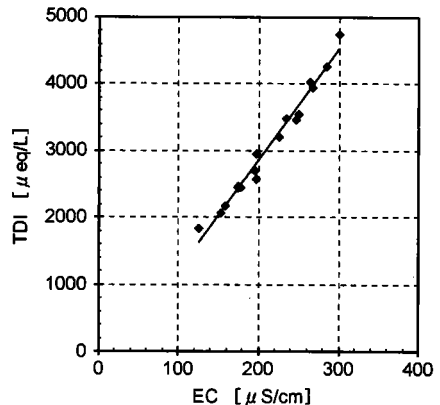


図9 電気伝導度と溶存イオン総量との関係

また、図10には各測定地点の平均水質をヘキサダイアグラムで示した。この図により浅川における水質の縦断変化を定性的に把握することができる。また、流域での人間活動と河川水質との関係を定性的に検討するために、図10には主要支流域における土地利用構成もあわせて図示した。なお、流域での人間活動と河川水質との関係については、次章においてより定量的な検討を試みる。

流域全体の水質の変化傾向をみると、流域の大部分が山林・荒地等によって占められる浅川上流と山入川においては、水質パターンは $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型および $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型を示す。浅川上流での電気伝導度は $127 \mu\text{S}/\text{cm}$ であり、流下とともに電気伝導度の高い(溶存イオン総量の大きい)支流を集め、ヘキサダイアグラムは面積を増すとともに $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ 型のパターンに変化する。この結果、浅川下流での電気伝導度は $250 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上に達する。

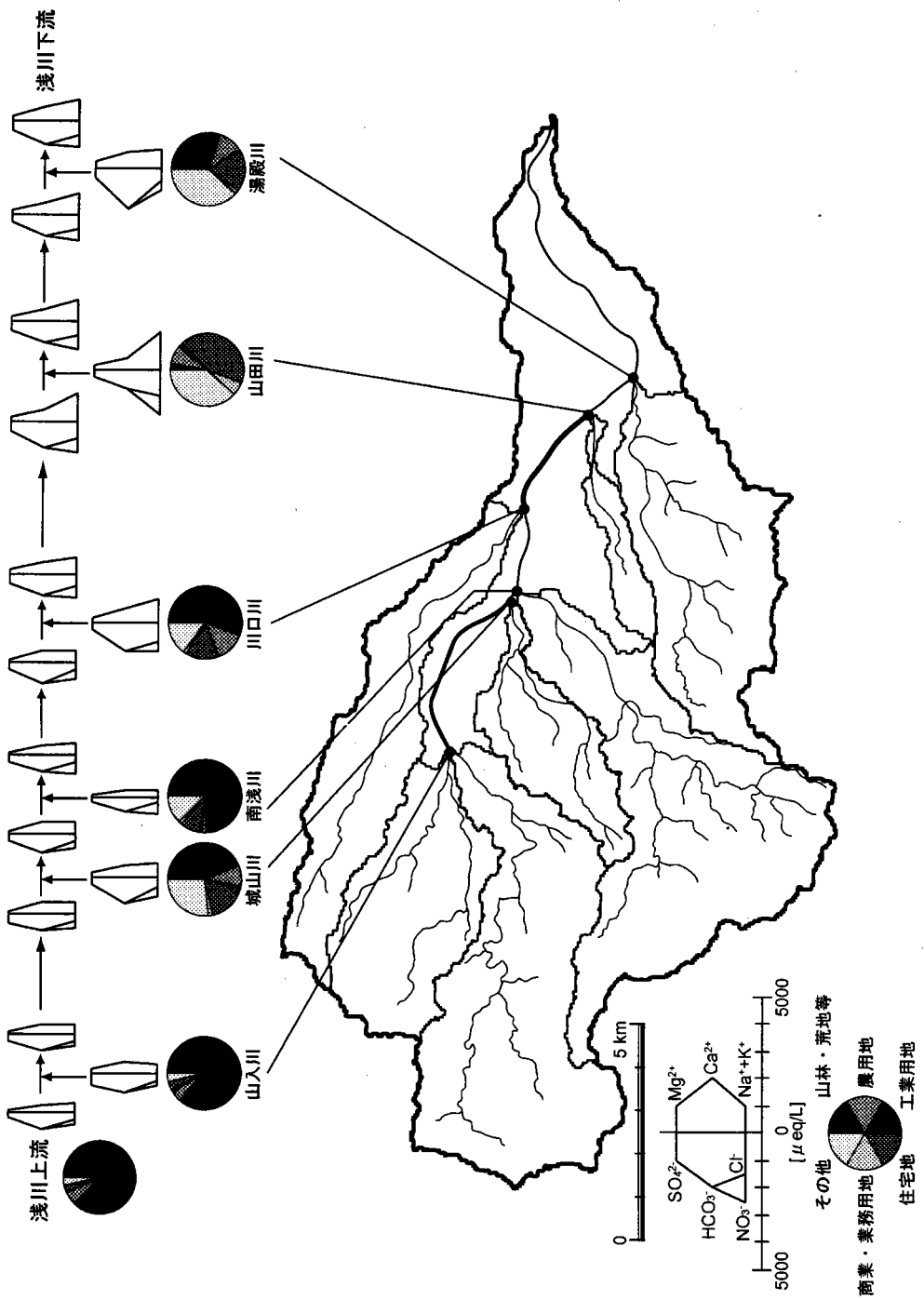


図10 浅川における水質変化と主要支流流域の土地利用構成

山入川 — 城山川区間では、支流の流入がないにもかかわらず下記のような顕著な水質変化が生じている。電気伝導度は $159\ \mu\text{S}/\text{cm}$ から $178\ \mu\text{S}/\text{cm}$ へと約 $20\ \mu\text{S}/\text{cm}$ も増大し、ヘキサダイアグラムの面積を増しつつ水質パターンが $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 型から $\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 型へ変化する。この区間における流量は $0.90\ \text{m}^3/\text{s}$ から $1.69\ \text{m}^3/\text{s}$ に増加し、増加率は187%を示す。さらに溶存物質フラックスの増加率は HCO_3^- (196%)を除く全項目で200%以上を示す。このことから、河川水とは異質の水塊が河川流路という明瞭な地形形態をもたずに流入している可能性が考えられる。

城山川は浅川本流よりも Na^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 HCO_3^- に富み、 $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 型の水質パターンを示す。合流に伴う水質変化は物質収支を保って生じ、特に HCO_3^- 濃度の増加が大きい。

南浅川は NO_3^- を除く全項目で浅川本流よりも濃度が低く、電気伝導度も $153\ \mu\text{S}/\text{cm}$ であり浅川本流よりも $20\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上も小さい。このためにヘキサダイアグラムの面積は浅川本流のものよりも小さいが、水質パターンは $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^- \text{-NO}_3^-$ 型と特徴的になっている。合流に伴う水質変化は、すでに前章の図7に示したように、 NO_3^- 以外の項目では物質収支を保つように生じるものの、 NO_3^- 収支のみが釣り合わず、 NO_3^- 濃度が大きく増加している。南浅川流域は他地域に比べて宅地開発の進行に対し下水道整備が遅れていることから生活排水および尿排水が直接流入しており、南浅川の河川水には NO_3^- 以外の形態をとる窒素($\text{NH}_4^+\text{・NO}_2^-$ および有機態窒素)が多く含まれる(小倉, 1980; 細谷・小倉; 1982)。それらが合流点においてすみやかに硝化されて NO_3^- へ変化した結果、 NO_3^- 濃度の著しい増加をもたらしたと考えられる。

南浅川 — 川口川区間では、支流の流入もなく、顕著な水質変化は認められない。

川口川は浅川本流よりも Na^+ 、 Cl^- 、 HCO_3^- に富み、 $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^- \text{-Cl}^-$ 型の水質パターンを示す。合流に伴う水質変化は物質収支を保つように生じており、とくに Na^+ 、 Cl^- 濃度の増加が大きい。

川口川 — 山田川区間では、支流の流入がないにもかかわらず下記のような顕著な水質変化が生じている。電気伝導度は $226\ \mu\text{S}/\text{cm}$ から $263\ \mu\text{S}/\text{cm}$ へと $30\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上も増大し、ヘキサダイアグラムの面積を増しつつ水質パターンが $\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 型から $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 型へ変化する。この区間における流量は $2.67\ \text{m}^3/\text{s}$ から $3.00\ \text{m}^3/\text{s}$ へ増加し、その増加率は117%と山入川 — 城山川区間ほど大きくはない。溶存物質フラックスの増加率については、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} で流量増加率とほぼ同じ110%台である一方、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- でそれぞれ171%、185%、177%、143%と大きな増加率を示す。このことから、河

川水とは異質の水塊が流入している可能性が考えられる。

山田川は他の流域に比べて流域の開発が非常に進行しており、水質では Na^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- が浅川本流よりもはるかに富み、極端な $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ 型のパターンを示す。しかし、山田川の流量は $0.41 \text{ m}^3/\text{s}$ と浅川本流の10%強であるために、合流に伴う水質変化は明瞭ではない。

山田川 — 湯殿川区間では、支流の流入もなく、顕著な水質変化は認められない。

湯殿川は浅川本流よりも Ca^{2+} 、 HCO_3^- に富んだ $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型の水質パターンを示す。湯殿川の流域は大部分が起伏のなだらかな丘陵によって占められ、流域面積のわりに流量は小さく $0.47 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。これは浅川本流の流量の10%強であり、合流に伴う水質変化は物質収支を保つように生じているものの、あまり明瞭な変化ではない。

浅川本流の水質の縦断変化をまとめると次のようになる。上流部では溶存イオン総量が小さく $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型の水質パターンである。支流の流入によって化学変化をほとんど伴わず物質収支を保って溶存イオンが付加され、水質パターンは $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ 型へ変化する。

南浅川合流点においては例外的に $\text{NH}_4^+ \cdot \text{NO}_2^- \cdot$ 有機態窒素の硝化反応による NO_3^- 濃度の増大が認められる。また、山入川 — 城山川区間、川口川 — 山田川区間においては、支流の流入がないにもかかわらず、明瞭な水質変化と流量増加を認めることができ、河川水とは異質の水塊が集水域から地下水として流入している可能性が示唆される。

なお、河川水質に何らかの形で大きく影響を及ぼしているこのような集水域は、浅川流域に属するものの主要流域とはみなされないことから、以後「残流域」とし、次節で取り扱う。

2. 残流域における浅層地下水の水質

前節において、支流の流入がないにもかかわらず、明瞭な水質変化と流量増加が生じている河川区間が2つ認められた。このような水質・流量変化をもたらす水塊の候補としてまず考えられるのは浅層地下水である。本節では、これらの2区間において浅層地下水涵養が水質・流量の変化をもたらす可能性を検討するための基礎資料として、残流域の地形・地質条件を述べるとともに、浅層地下水の測定結果を示す。なお、残流域からの流入水塊、土地利用およびそれらが浅川本流に与える影響については、第V章第3節で検討する。

1) 山入川 — 城山川区間

河道を軸とした場合、山入川—城山川区間の残流域は右岸側の幅が広い非対称の形状をなす(図11)。上流部は河道近くまで丘陵地がせまっておりが流域界をなしている。それより下流においては、河道沿いに扇状地性低地が分布するほか、河道からやや離れて段丘面が分布し、段丘面上に流域界がある。左岸側では比高約10mの段丘崖を伴って武蔵野面が分布する。これに対し、右岸側では拜島面およびそれ以下の段丘面によって占められる。段丘崖の比高は5m未満と小さく、その分布も断片的で不明瞭である。このように、山入川 — 城山川区間の残流域は、大部分が礫質な地質で構成されており、左岸側よりも右岸側の方で幅が広く低平という地形的特徴をもつ。

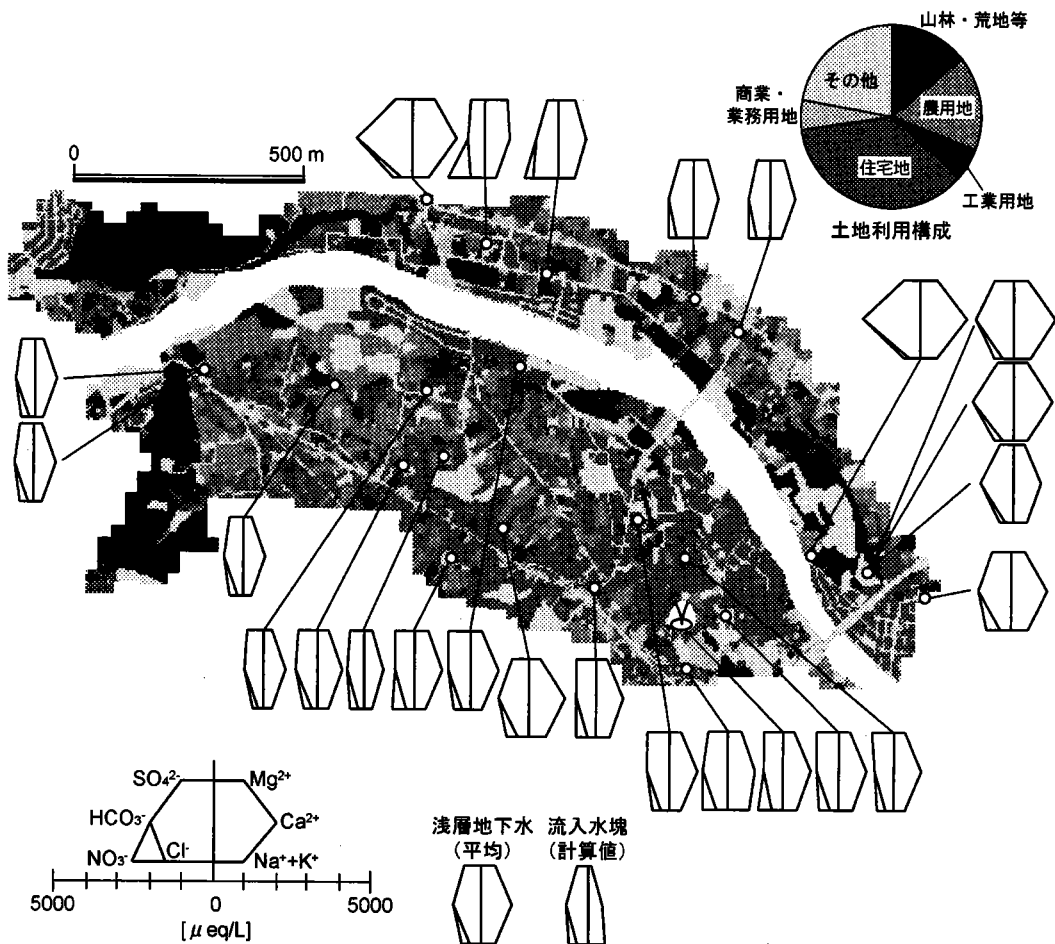


図11 山入川 — 城山川区間の残流域における浅層地下水の水質

残流域の構成地質が礫質であることから浅層地下水に恵まれ、植木への給水や洗車など生活雑用水として利用されることが多い。飲料用水としての利用は確認されなかった。残流域には畑地が多く分布することから、農業用水としての地下水利用も考えられたが、現地調査において実際の利用例を確認することはできなかった。

左岸側における浅層地下水の水質パターンは $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型を示す。武蔵野面上の採水地点よりも扇状地性低地面上の方がヘキサダイアグラムの幅が小さく溶存イオン総量が小さいという傾向がある。また、右岸側ではほとんどが $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$ 型の水質パターンを示し、西北西から東南東へ向かってヘキサダイアグラムの幅を増し溶存イオン総量が大きくなっていく傾向がある。

このような浅層地下水の水質パターンの地域差は、左岸側と右岸側、さらに左岸側では地形面によって取水する帯水層が異なることに起因していると考えられる。右岸側においては、扇状地性低地と拝島面およびそれ以下の段丘面との違いが不明瞭であることから、試水（井戸水）は同一の帯水層から取水している可能性が高い。仮に、同一の帯水層であるならば、水質パターンを変えずに西北西から東南東へ溶存イオン総量を増すという地域的な傾向は、浅層地下水が西北西から東南東へと河道に斜めに向かう方向へ流動することに起因する可能性がある。しかしながら、現地調査では取水深度に関するデータが得られなかったため、浅層地下水の流動について詳細な検討は困難である。

2) 川口川—山田川区間

川口川—山田川区間の残流域は、右岸側が南西に向かって大きく張り出した非対称の形状をなす（図12）。左岸側の上流部においては、河道沿いに扇状地性低地、河道からやや離れて丘陵地が分布し、丘陵地斜面下部には湧水がみられる。左岸側の下流部においては、河道沿いに扇状地性低地、河道からやや離れて丘陵地が分布する。これに対し右岸側においては、河道沿いに扇状地性低地、河道からやや離れて拝島面およびそれ以下の段丘が分布し、JR八王子駅北側の市街地はこの段丘面上に位置する。また、南西に大きく張り出した地域では下末吉面が分布し、下位の段丘面との比高は約35mにも及ぶ。

残流域の構成地質が礫質であることから浅層地下水に恵まれる。しかしながら、住宅地・商業地の開発が早くからなされ、上水道も完全に整備されていることから、一般家庭における浅層地下水の利用は少なく、採水地点の多くが寺社・墓地の井戸であった。

浅層地下水の水質については、左岸側の丘陵地からの湧水で $\text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型という

きわめて珍しいパターンを示す以外は、全て $\text{Ca}^{2+}-\text{HCO}_3^-$ 型となっている。右岸側に注目すると、南西から北東へ溶存イオン総量が増加する傾向を認めることができる。このような地域的な傾向は、浅層地下水が河道へ直角に向かって流動することに起因する可能性があるが、取水深度に関するデータが得られなかったことと観測地点数の不足により、詳細に検討することはできない。

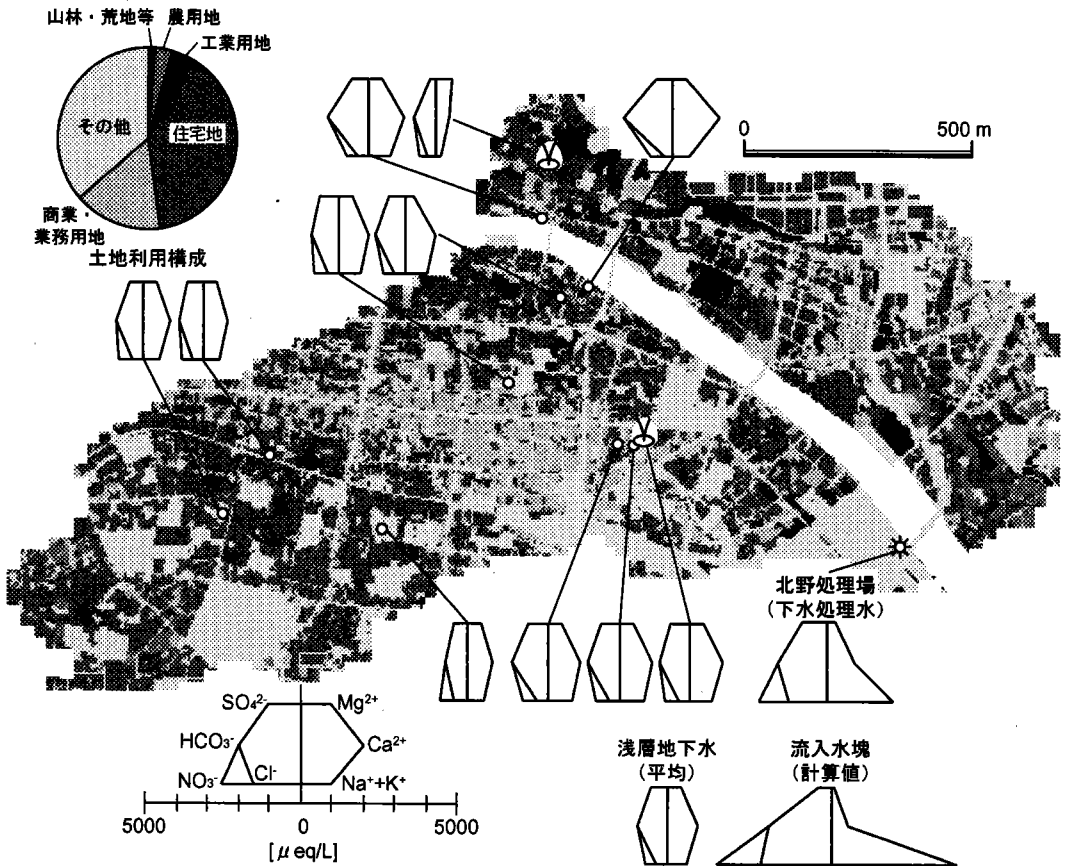


図12 川口川 — 山田川区間の残流域における浅層地下水の水質

V 浅川流域における人間活動と河川水質との関係

1. 浅川流域における土地利用とその経年変化

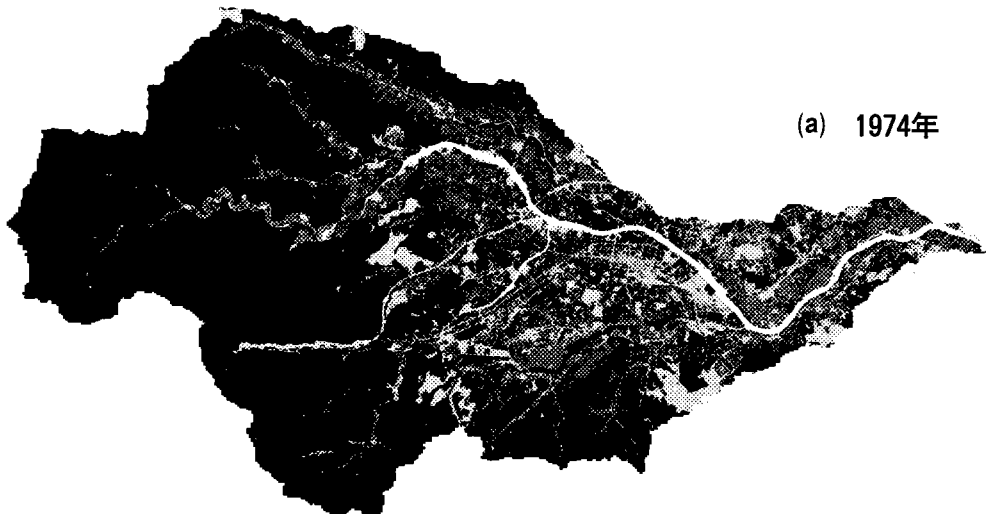
河川流域における人間活動を示す指標は様々であるが、河川水質へ及ぼす影響を検討するうえでは、人間活動の量と内容を同時に捉えられる指標を用いることが望ましい。そこで、人間活動を示す指標として本研究では「土地利用」に注目する。浅川流域における土地利用を把握するにあたり、国土地理院発行の細密数値情報（10mメッシュ土地利用・首都圏版，1974年版・1979年版・1984年版・1989年版・1994年版）をデータとして用いた。項目別面積の計測にはGISアプリケーション（MicroImages社・TNT mips Ver. 6.5）を使用した。なお、細密数値情報においては土地利用が16項目に分類されているが、流域における人間活動と河川水質との関係を検討する目的に添うよう、森林・荒地等、農用地、工業用地、住宅地、商業・業務用地、その他の6項目に整理した（表1）。

表1 土地利用分類項目の整理

細密数値情報での分類		本研究における分類
コード	土地利用分類	
1	山林・荒地等	山林・荒地等
2	田	農用地
3	畑・その他の農地	
6	工業用地	
7	一般低層住宅地	住宅地
8	密集低層住宅地	
9	中高層住宅地	
10	商業・業務用地	商業・業務用地
4	造成中地	その他
5	空地	
11	道路用地	
12	公園・緑地等	
13	その他の公共公益施設用地	
15	その他	
14	河川・湖沼等	

浅川流域における1974～1994年の20年間での土地利用変化を図13に示すとともに、構成率変化を図14に示した。高度経済成長に伴って1960年代から丘陵地における大規模な住宅地開発が始まるとともに、活発化する経済活動に対応する形で八王子市街地は拡大してきた。その結果、山林・荒地等と農用地が漸減する一方で、住宅地と商業・業務用地が増加している。工業用地とその他については横ばいである。また、1974年における面積を100%として、土地利用面積の経年変化を項目別に図15に示した。1994年には山林・荒地等は92.8%へ、農用地は77.2%へそれぞれ一定の割合で減少している。これに対し、住宅地は1974～1979年の5年間に10.5%増加し、それ以後は4.7%、3.7%、3.4%と増加率は次第に小さくなる。商業・業務用地の増加率は、8.7%（1974～1979年）、3.7%（1979～1984年）、7.9%（1984～1989年）、5.7%（1989～1994年）と段階的な変化を示す。

浅川の主要な支流の流域における土地利用構成率の経年変化を表2にまとめた。流域の大半が丘陵地である湯殿川流域においては、住宅地開発や東京都心からの大学移転などにより20年間で最も土地利用変化が著しい地域であった。次に土地利用変化が著しかったのは城山川流域で、湯殿川流域と同様に、山林や農用地は住宅地や公共施設に供された。八王子市街地の南縁部を流れる山田川の流域では、河川沿いに分布していた農用地が市街地の拡充により住宅地へと転換された。流域が北西－南東に細長く標高差も大きい川口川流域で、1994年においても山林・荒地等の構成率は約56%と比較的高いが、下流域は八王子市街地の北縁部にあたり山田川流域と同様に河川沿いの農用地が住宅地へと転換された。いびつな扇型の流域をもつ南浅川は、山地が流域の約75%を占めるために土地利用構成率に流域の土地利用変化が反映されにくいものの、下流域の丘陵地において住宅地開発が進められており、山林・荒地等と農用地が住宅地へと転換されている様子がうかがえる。主要な支流の中で最も上流に位置する山入川流域と浅川上流域においては20年間でほとんど開発は進んでおらず、住宅地面積の増加もせいぜい0.2km²にすぎない。



(a) 1974年



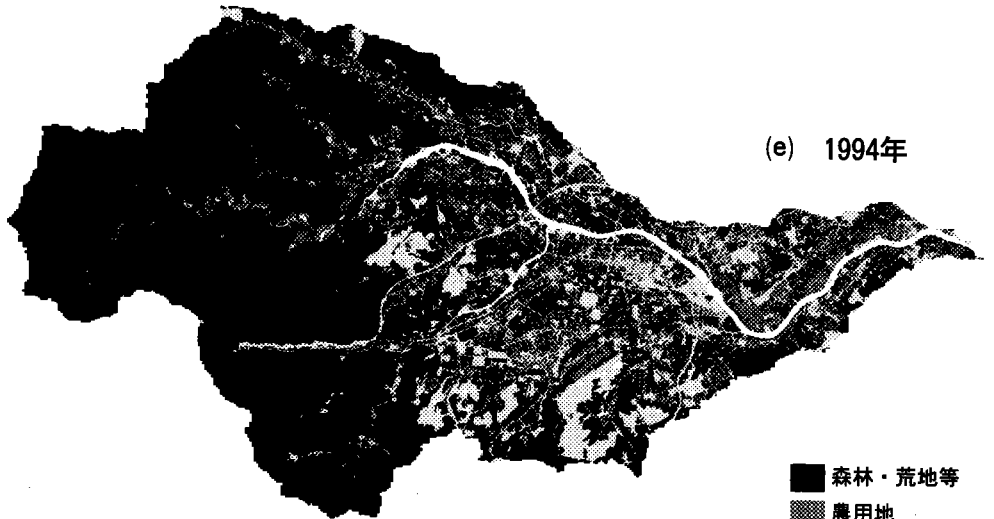
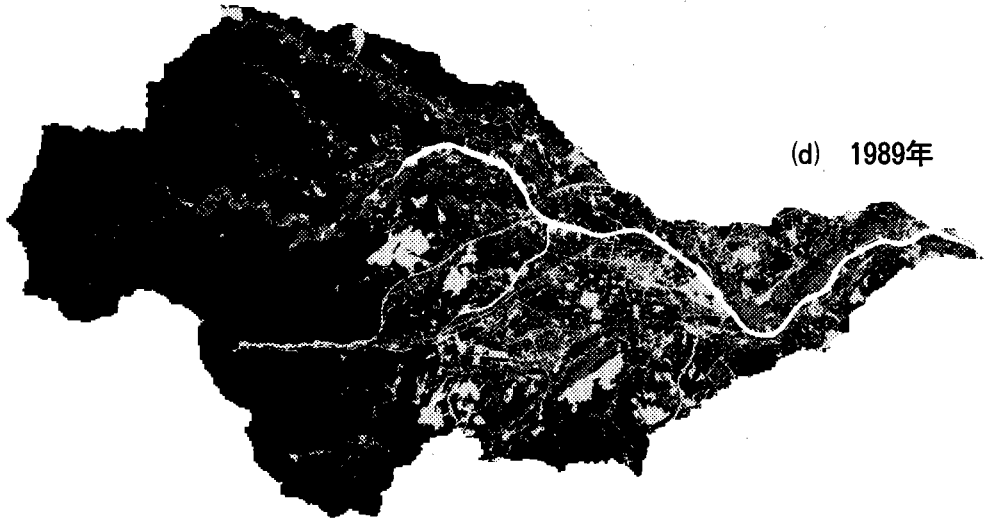
(b) 1979年



(c) 1984年

- 森林・荒地等
- ▨ 農用地
- 工業用地
- 住宅地
- ▨ 商業・業務用地
- ▨ その他

図13 浅川流域における土地利用変化



- 森林・荒地等
- 農用地
- 工業用地
- 住宅地
- 商業・業務用地
- その他

図13 浅川流域における土地利用変化（続き）

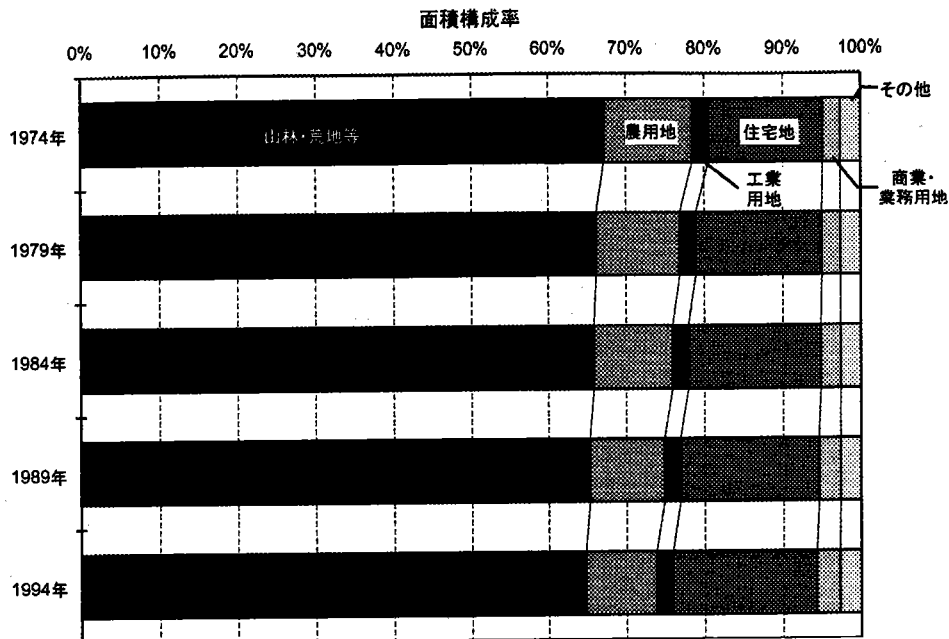


図14 浅川流域における土地利用構成率変化

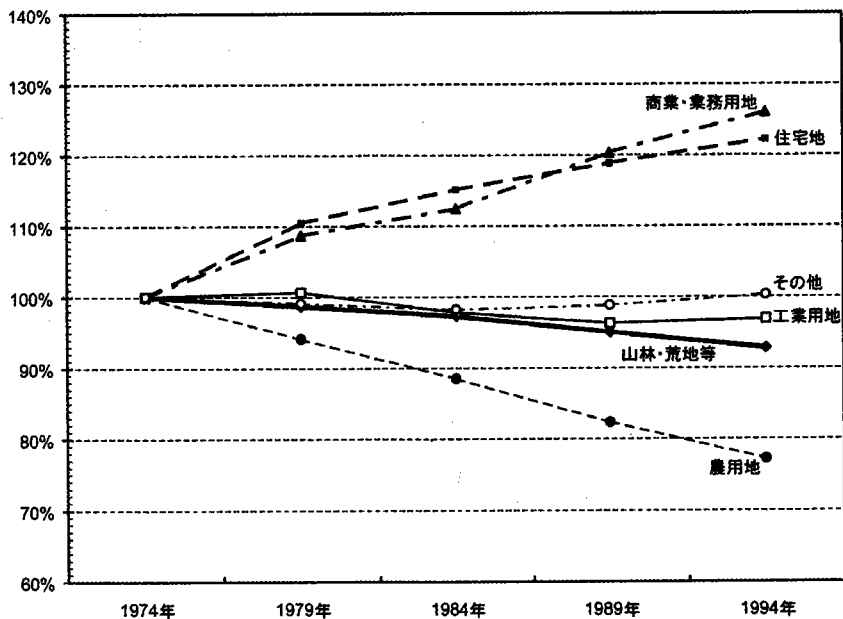


図15 浅川流域における土地利用面積の経年変化
(1974年を100%とする)

表2 主要支流域における土地利用面積構成の経年変化

年	1974	1979	1984	1989	1994
山林・荒地等	87.7%	87.8%	87.7%	87.6%	87.6%
農用地	6.0%	5.8%	5.8%	5.7%	5.5%
工業用地	0.3%	0.3%	0.2%	0.2%	0.3%
住宅地	2.4%	2.5%	2.6%	2.8%	2.9%
商業・業務用地	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%	0.3%
その他	3.4%	3.4%	3.5%	3.3%	3.4%

浅川上流域

年	1974	1979	1984	1989	1994
山林・荒地等	57.8%	57.4%	56.3%	55.8%	55.6%
農用地	15.9%	15.3%	14.4%	13.8%	13.2%
工業用地	1.0%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%
住宅地	11.3%	12.4%	13.1%	13.5%	14.0%
商業・業務用地	1.1%	1.2%	1.3%	1.4%	1.5%
その他	12.9%	12.8%	14.0%	14.6%	14.8%

川口川流域

年	1974	1979	1984	1989	1994
山林・荒地等	87.5%	87.6%	87.3%	86.4%	86.5%
農用地	5.1%	5.1%	5.0%	4.8%	4.7%
工業用地	0.7%	0.7%	0.8%	0.9%	1.3%
住宅地	2.7%	3.1%	3.2%	3.1%	3.2%
商業・業務用地	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
その他	3.7%	3.2%	3.4%	4.5%	3.9%

山入川流域

年	1974	1979	1984	1989	1994
山林・荒地等	3.7%	3.8%	3.3%	3.0%	2.9%
農用地	12.2%	10.8%	9.9%	8.6%	8.1%
工業用地	2.3%	2.2%	1.8%	1.9%	1.6%
住宅地	36.9%	39.7%	40.9%	42.5%	43.2%
商業・業務用地	4.4%	5.2%	5.3%	5.5%	6.0%
その他	40.5%	38.3%	38.7%	38.6%	38.3%

山田川流域

年	1974	1979	1984	1989	1994
山林・荒地等	49.9%	49.4%	48.0%	44.0%	43.8%
農用地	11.6%	10.7%	10.2%	9.6%	9.1%
工業用地	1.2%	1.4%	1.5%	1.6%	1.6%
住宅地	11.8%	14.0%	14.2%	16.1%	17.0%
商業・業務用地	1.4%	1.6%	1.7%	1.9%	1.9%
その他	24.0%	22.8%	24.4%	26.7%	26.6%

城山川流域

年	1974	1979	1984	1989	1994
山林・荒地等	51.3%	46.6%	43.6%	38.9%	30.2%
農用地	15.5%	14.0%	13.1%	11.7%	10.6%
工業用地	1.0%	1.1%	0.9%	0.9%	0.8%
住宅地	12.6%	15.3%	17.0%	17.8%	18.4%
商業・業務用地	0.9%	1.1%	1.2%	1.5%	1.6%
その他	18.7%	22.0%	24.0%	29.3%	38.5%

湯殿川流域

年	1974	1979	1984	1989	1994
山林・荒地等	75.9%	75.7%	75.3%	74.4%	74.0%
農用地	2.8%	2.5%	2.5%	2.4%	2.1%
工業用地	1.1%	1.1%	1.0%	1.0%	0.9%
住宅地	7.8%	8.5%	8.6%	8.7%	8.9%
商業・業務用地	1.4%	1.4%	1.5%	1.5%	1.5%
その他	11.0%	10.8%	11.1%	12.1%	12.4%

南浅川流域

2. 主要支流域における土地利用と河川水質との関係

1) 主成分分析による土地利用特性の把握

河川水質 9 項目とを比較検討する前段階として、土地利用種 6 項目に主成分分析を適用して新たな土地利用指標を導き出し、浅川支流域における土地利用特性を数量化して把握する。前述の主要 7 支流域における 1994 年の土地利用構成率を変量として相関行列による主成分分析をおこなった結果、第 1 主成分として「自然改変度」、第 2 主成分として「農地開発度」が得られ（表 3、図 16, 17）、それをもとに各支流域に主成分得点を付与した（図 18）。

表 3 に示すように、寄与率については、第 1 主成分が 70.3%、第 2 主成分が 17.0%、第 3 主成分が 8.3% であった。第 3 主成分までの累積寄与率が 96.3% であるものの、第 3 主成分は寄与率が 10% を下回ることから、第 3 主成分の説明する情報量は少ないと判断し、第 1 主成分と第 2 主成分のみを指標として用いることとした。

また、第 1、第 2 主成分について固有ベクトルを求め、図 16 に土地利用種 6 項目によって成分表示するとともに、図 17 には主成分負荷量を散布図として示した。これらの図から各主成分を以下のように解釈することができる。すなわち、第 1 主成分については、山林・荒地等が負の値をとる一方、それ以外の項目は正の値をとることから、流域に本来あったはずの自然地がどれだけ失われているかを示す「自然改変度」として捉えられる。また、第 2 主成分については、農用地が大きな正の値をとる一方、工業用地が負の値をとることから、流域における農業活動の多寡を示す「農地開発度」として捉えられる。

さらに、各主成分の固有ベクトルと土地利用構成率から各支流域の主成分得点を求め散布図で示した（図 18）。浅川上流域、山入川流域、南浅川流域においては、山地・荒地等が 70% 以上を占め、自然改変度が負の値をとる。特に山入川、南浅川の両流域においては、第 2 主成分が負の値をとっているが、これはもともと農用地が少ないのに加え、工業用地として分類される採石場が浅川上流域に比べて多く立地していることを反映している。城山川流域、川口川流域、湯殿川流域では同程度の自然改変度を示すが、農用地が 10% 未満でかつ工業用地構成率が 1.6% と大きい点で城山川は他の 2 流域と異なっている。山田川流域では自然改変度が大きく正の値を示し、流域の市街化が最も進んでいることがわかる。

表3 導出された主成分の固有値と寄与率

	固有値	寄与率	累積寄与率
第1主成分	4.218	70.3%	70.3%
第2主成分	1.022	17.0%	87.3%
第3主成分	0.537	8.9%	96.3%
第4主成分	0.222	3.7%	100.0%

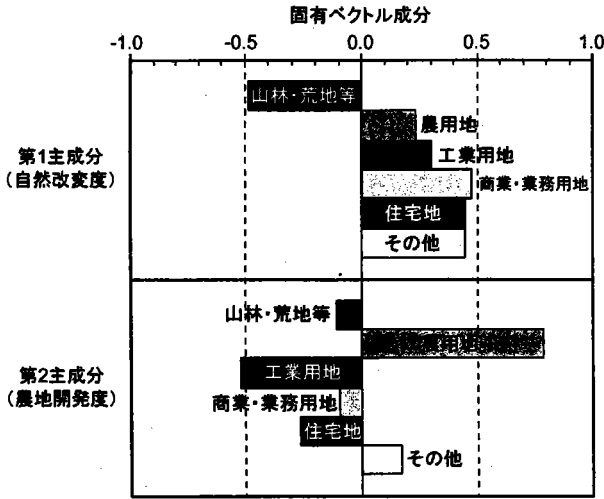


図16 固有ベクトルの成分

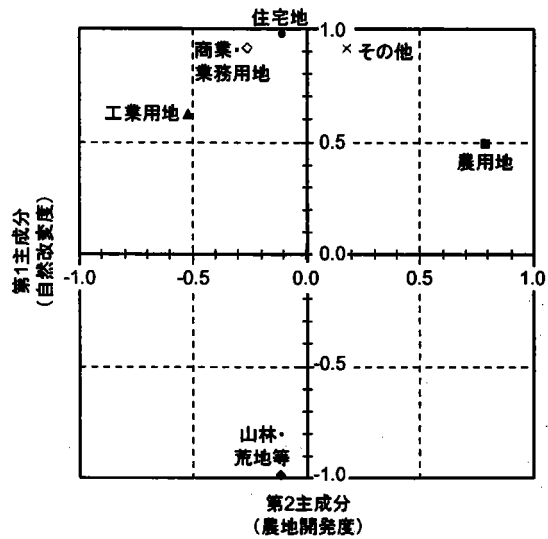


図17 主成分負荷量散布図

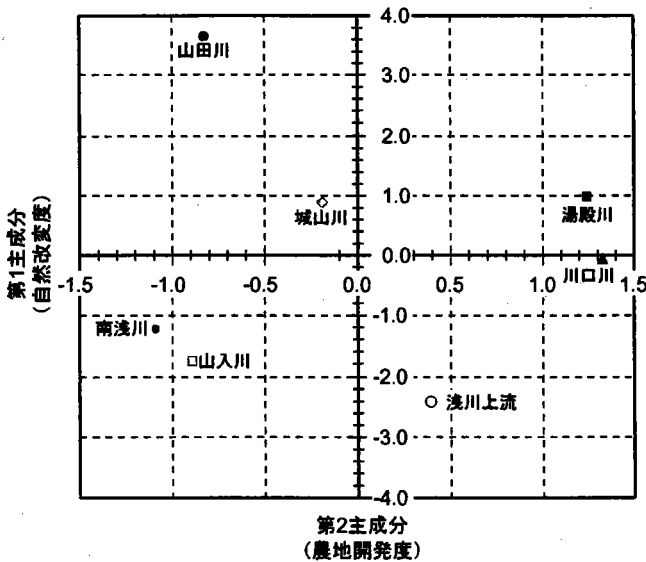


図18 主要支流域の土地利用特性

2) 土地利用特性と河川水質との関係

前項では、主成分分析によって流域の土地利用特性を示す2つの指標として「自然改変度」と「農地開発度」を導出した。これらの2指標と河川水質9項目との関係を検討するために相関分析をおこない、求められた相関係数を表4にまとめた。

表4 土地利用特性と河川水質との相関関係

危険率5%で有意なものは太字で示した。

	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDI
自然改変度 (第1主成分)	0.906	0.926	0.537	0.450	0.860	0.842	0.157	0.352	0.875
農地開発度 (第2主成分)	0.135	-0.092	0.512	0.613	0.153	-0.293	-0.034	0.779	0.342

自然改変度については、主要無機成分のうちNa⁺、K⁺、Cl⁻、NO₃⁻の4項目と溶存イオン総量(TDI)が強い正の相関をもち、流域における人間活動に伴う排出によって増大するという従来の研究事例(篠村, 2001など)と同様の結果を得た。また、Ca²⁺、Mg²⁺も高い正の相関があり(図19)、流域における開発に伴う地表面改変および攪乱が影響を及ぼしている可能性が示唆される。

農地開発度については、HCO₃⁻を除くいずれの水質項目も有意な相関関係を示さない。Na⁺、K⁺、Cl⁻の3項目については農地開発度-0.82の山田川流域のデータを除くと強い正の相関が認められるようになるが(図20)、自然改変度との相関が非常に強いことから、これは流域における農業活動を要因とするような本質的な相関関係ではないと考えられる。一方、Ca²⁺、Mg²⁺の2項目は高い正の相関を示す。石灰類(生石灰(主成分:CaO)・苦土石灰(主成分:MgO, CaO)など)を含む土壌改良剤の使用が浅層地下水中のCa²⁺、Mg²⁺濃度の増大を引き起こすという報告(永井, 1991; 寺尾, 1994など)もあることから、農地における施肥・土壌改良が河川水のCa²⁺、Mg²⁺濃度に影響を及ぼしている可能性は高い。また、Ca²⁺、Mg²⁺が溶脱する際に水中で対になるHCO₃⁻が農地開発度と有意な正の相関を示すこともからも、流域における農業活動の多寡が河川水中のCa²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻濃度に大きく影響することが考えられる。

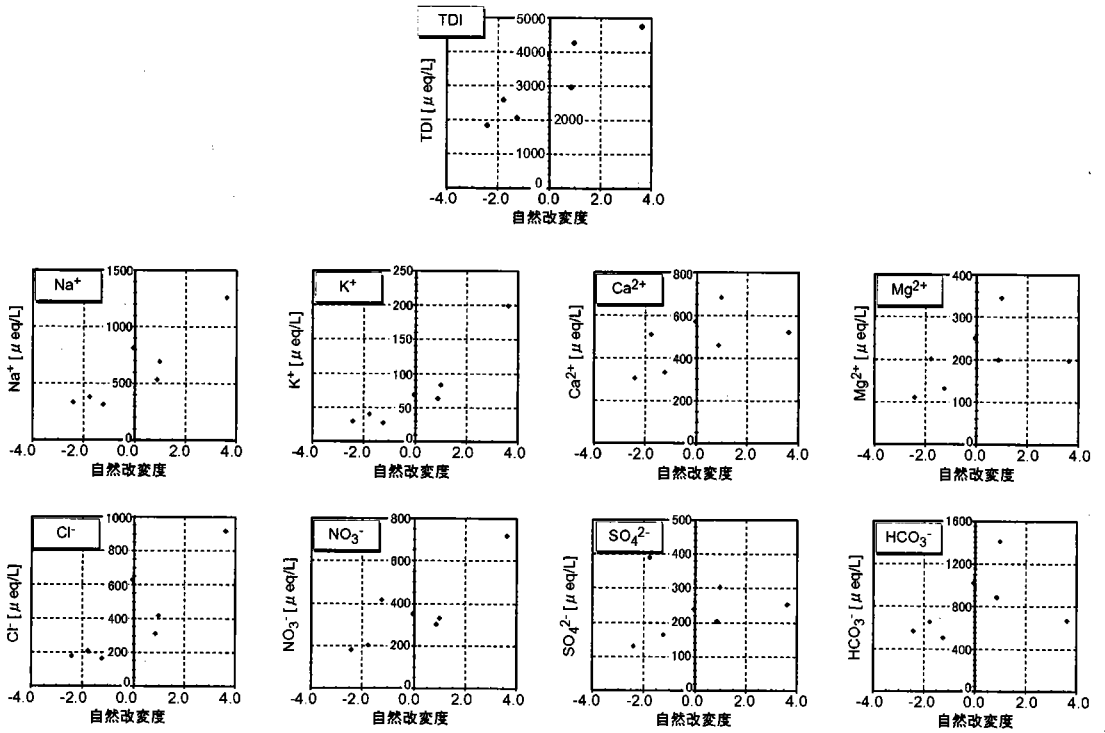


図19 自然改変度と河川水質との関係

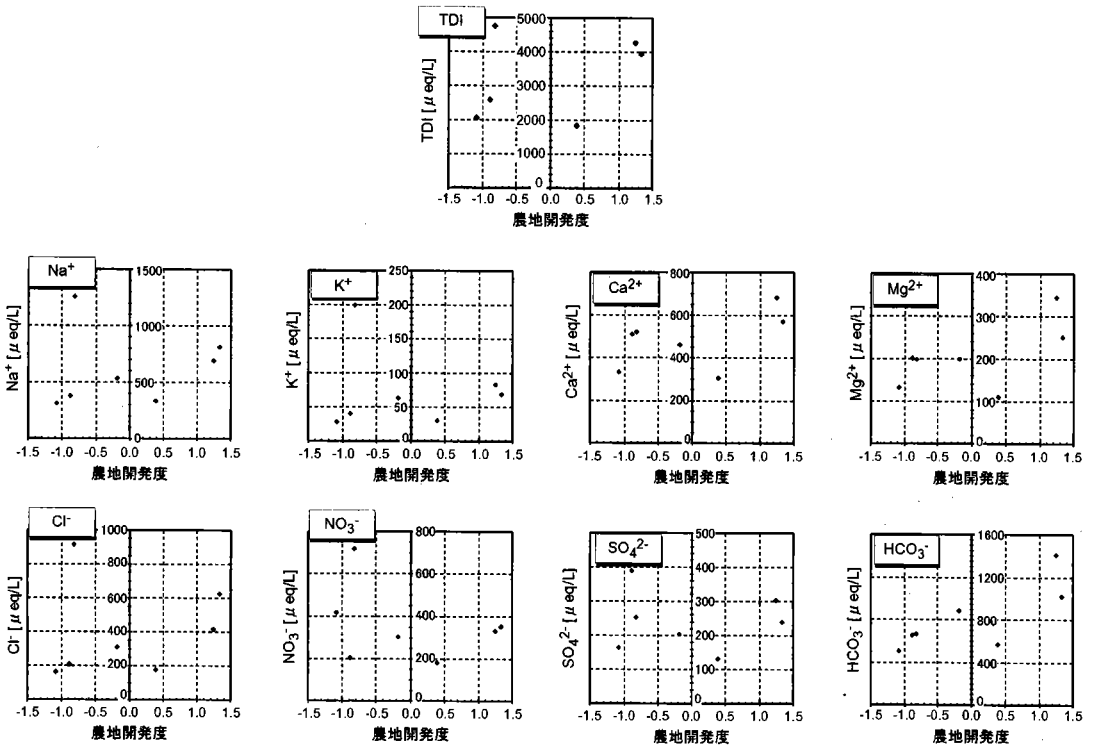


図20 農地開発度と河川水質との関係

3. 河川水質の縦断変化の要因と残流域における土地利用特性との関係

第IV章において支流の流入がないにもかかわらず、河川水質の縦断変化が顕著な区間が認められた。また、その残流域における浅層地下水の水質が明らかにされた。本節では、このような区間における河川水質の縦断変化の要因を考察するために、まず溶存物質フラックスの増加量 ΔM を増加量 ΔQ で除して流入水塊の物質濃度 C_{in} を計算することによって、流入水塊の水質を求めた。

$$C_{in} = \frac{\Delta M}{\Delta Q} = \frac{M_{DS} - M_{US}}{Q_{DS} - Q_{US}}$$

このようにして求められた流入水塊の水質（計算値）と残流域における浅層地下水の水質とを図11、12を用いて比較し、浅層地下水涵養の可能性を検討する。また、流入水塊の水質（計算値）と残流域における土地利用特性との比較検討から、残流域の人間活動が及ぼす影響について考察する。

1) 山入川 — 城山川区間

図11に示すように、この区間において推定される流入水塊の水質パターンは $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 型であるのに対し、残流域における浅層地下水の平均水質は $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 型である。浅層地下水を採取した全25地点で流入水塊の濃度（計算値）を下回った水質項目がないことから、この区間における水質変化を残流域からの浅層地下水涵養で説明することは可能である。

しかしながら、流入水塊の濃度（計算値）を上回った地点数に注目すると、 Na^+ ではわずかに1地点、 K^+ では3地点、 Cl^- では6地点と、前節において自然改変度との相関が高いとされた水質項目で非常に少なくなっている。一方、残流域の土地利用構成から自然改変度を計算すると5.68となることから、残流域の土地利用特性から予想される流入水塊の水質は、 Na^+ で約1500 $\mu\text{eq/L}$ 、 K^+ で約220 $\mu\text{eq/L}$ 、 Cl^- で約1100 $\mu\text{eq/L}$ となり、浅層地下水の値をはるかに上回る。

これらのことから、山入川 — 城山川区間における河川水質の縦断変化は、 Ca^{2+} と HCO_3^- に富む浅層地下水が河道へ漏出することによって全体的に主要無機成分濃度が高まるとともに、未確認の Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- に富む生活雑排水・工場廃水が混入することによってもたらされると考えられる。また、地質構造からは、川口川流域の浅層地下水が流域界を越えて流入することも予想され、この点については今後の検討課題である。

2) 川口川 — 山田川区間

図12に示すように、この区間における流入水塊の水質は極端な $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ 型を示すのに対し、残流域における浅層地下水の平均水質は $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型である。 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 HCO_3^- の5項目について、浅層地下水を採取した全11地点で流入水塊の濃度(計算値)を下回ったことから、この区間における水質変化を残流域からの浅層地下水涵養で説明することはできない。

残流域の土地利用構成から自然改変度は7.20と求められ、残流域の土地利用特性から予想される流入水塊の水質は、 Na^+ で約 $1700 \mu\text{eq/L}$ 、 K^+ で約 $270 \mu\text{eq/L}$ 、 Cl^- で約 $1200 \mu\text{eq/L}$ 、 NO_3^- で約 $890 \mu\text{eq/L}$ で、極端な $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ 型のパターンを示すのに十分な値である。また、残流域末端に位置する北野下水処理場からの排水を採取して分析したところ、その水質パターンは $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ 型を示し、計算によって求めた流入水塊の水質パターンと極めて酷似している。

これらのことから、川口川 — 山田川区間における河川水質の縦断変化は、残流域における人間活動に伴う排水が北野下水処理場へ一旦集められた後、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 HCO_3^- に非常に富む処理排水として流入することによってもたらされており、残流域からの浅層地下水涵養による水質改善効果はほとんどないと考えられる。

4. 土地利用特性による河川水質の経時変化の推定可能性

第2節において土地利用特性指標「自然改変度」と水質項目との関係が統計学的に示された。このような相関関係は、流域の開発段階によって過去から現在までの河川水質変化および今後の変化を推計学的に推定できる可能性をも示唆している。

篠村(2001)は、千葉市郊外に位置する谷津の湧水17地点を対象に、涵養域での土地利用構成から土地利用特性指標として「住宅地開発度」と「畑地開発度」を導くとともに、湧水の水質分析結果との相関分析の結果から、下総台地面上の開発段階に応じて湧水水質パターンが遷移していくことを明らかにした。それによると、涵養域が住宅地開発を受けるにつれて湧水では $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$ 型の水質パターンを示すようになるのに対し、涵養域に畑地が卓越するにつれて化学肥料・土壌改良剤の使用の影響を受けて $\text{Mg}^{2+} - \text{Na}^+ - \text{Cl}^- - \text{HCO}_3^-$ 型の水質パターンを示すようになる。このように涵養域が数ha規模の湧水においては涵養域の土地利用構成が水質に非常に反映しやすく、流域の開発段階と水質の経時変化との対応関係も比較的明瞭である。

下総台地とは地形・地質条件が著しく異なるものの、浅川流域においても主要支流の

「自然改変度」と河川水質との対応関係は比較的明瞭である。数～数10km²規模の流域においても、流域の開発段階から河川水質の経時変化を推定することは可能であると考えられる。しかしながら、このような推計学的な推定の可能性を制限する要因として、前節で考察した残流域の問題がある。

山入川 — 城山川区間のように、河川水が浅層地下水によって涵養される区間においては、浅層地下水流動の詳細が不明なうえ、流動過程で溶脱やイオン交換といった化学反応が伴うため、河川水質変化に残流域の土地利用特性が直接的に反映されるとは限らない。

また、川口川 — 山田川区間における下水処理水の流入による水質変化については、残流域の自然改変度から変化パターンを推定することは可能であったが、水質変化量ははるかに過小評価された。このような差異が生じる原因として、地形的に設定された残流域と人工的に設定された下水道処理域とが一致していないことが挙げられる。流域の土地利用特性指標には上水道・下水道を含む水利用システムの整備状況が必ずしも反映されるとは限らない。そのうえ、上水道網とその給水域および下水道網とその処理域は地形的流域界をまたいで設定されることもあり、こうした人工的な流域変更が河川水質のみならず河川環境全般に影響を及ぼす（原，1997；原，1998）。

以上のような制限要因を踏まえたうえで、土地利用特性値を用いて水質の経時変化を推定することが可能であり、特に丘陵地における住宅地開発が河川水質に及ぼす影響を予測・評価する場合などには有効であると考えられる。

VI ま と め

本研究では、多摩川を代表する支流として浅川流域を対象地域とし、新たに開発した溶存物質フラックスの高精度測定法を適用して、流域スケールでの河川水質の動態を明らかにした。また、河川水質の動態と流域特性（地形・地質・土地利用・浅層地下水）との関係について総合的に比較検討し、浅川水系における水質形成機構を考察した。本研究の結論は以下の通りである。

- (1) 流路横断面における溶存物質濃度分布を考慮した溶存物質フラックスの高精度測定法を開発した。主要合流点における物質収支および水収支を評価することによってその精度改善の効果を検討した結果、測定精度は±80%から±20%へと大幅に改善されるとともに、改良された測定方法の測定誤差要因が主に流速分布の計測精度に依存することが確認された。
- (2) 高精度測定方法により浅川水系の河川水質を明らかにした結果、著しい水質変化が生じている区間および合流点が認められた。また、それぞれの集水域における流域特性との比較検討から水質形成機構について以下のように推定された。

残流域の大部分が礫質の拝島面以下の低位段丘面群と扇状地性低地によって占められる山入川—城山川区間においては、 Ca^{2+} と HCO_3^- に富む浅層地下水が河道へ漏出することによって主要無機成分が増加するとともに、未確認の Na^+ に富む生活雑排水・工場廃水が加わることによって、河川水質パターンは Ca^{2+} - HCO_3^- 型から Na^+ - Ca^{2+} - HCO_3^- 型へ変化する。

流域の下水道整備の遅れている南浅川には生活排水および尿排水が流入しているため、 NO_3^- のほかに NH_4^+ ・ NO_2^- および有機態窒素の形態をとる窒素が多く含まれる。合流に伴いそれらがすみやかに硝化されて NO_3^- へ変化する結果、浅川の NO_3^- 濃度が大きく増加する。ほかの主要合流点における水質変化が物質収支を保つようにして生じているのに対し、南浅川合流点においては化学変化を伴うために NO_3^- 収支のみが釣り合わない点で極めて特徴的である。

残流域の大部分が高度に開発されて下水道が完備されている川口川—山田川区間においては、人間活動に伴う排水が北野下水処理場へ一旦集められた後、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 HCO_3^- に非常に富む処理排水として流入することによって、水質パターンが Na^+ - Ca^{2+} - HCO_3^- 型から Na^+ - HCO_3^- 型へ変化するるとともに総溶存イオン量が約21%増加する。

(3) 流域における土地利用構成比から、土地利用特性の数値指標として「自然改変度」と「農地開発度」を導出した。河川水質との相関分析の結果、自然改変度は Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- の4項目が強い正の相関をもつとともに、農地開発度は HCO_3^- 濃度と有意な正の相関をもつことが示された。このことは、流域の土地利用特性と河川水質とが大きく関係することを示すだけでなく、流域の開発段階によって過去から現在までの河川水質変化および今後の変化を推計学的に推定できる可能性をも示唆している。

本研究では、河川水質の動態把握の精度向上と、流域特性値との定性的・定量的比較による水質形成機構を中心に論じたが、今後の課題として、河川水質と土地利用特性指標との関係を吟味することが残されている。本研究では、浅川流域のみを調査対象としたために基礎データが7つの主要支流域となり、統計的処理・解釈に十分なデータ数とは言いがたく、調査対象を広げてデータを蓄積してゆく必要がある。それによって、今回詳細な検討を断念せざるをえなかった、「農地開発度」と河川水質（特に、石灰類の主成分となる Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）との関係についても整理されてくるであろう。

また、流域の開発段階による河川水質の経時変化の推定可能性については、推計学的なアプローチだけでなく、浅層地下水流動を把握するために水文地質学的な情報を援用することや、上水道・下水道を含む水利用システムの整備状況を検討する都市水文学的な手法も必要となる。本研究では、地形的流域界をもとに議論を進めたが、上水道網とその給水域および下水道網とその処理域は地形的流域界をまたいで設定されることもあり、こうした水循環様式の人工的な改変が河川の水質形成のみならず河川環境全般にどの程度の影響を及ぼすのか、既存資料の整理と丹念なモニタリングから推定していくことも重要であると考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、多大なるご支援をいただいた東京大学大学院新領域創成科学研究科の須貝俊彦助教授に心から感謝申し上げます。山口歩氏をはじめとする多くの新領域創成科学研究科大学院生、理学部地学科地理学コース学生には現地調査などでご協力をいただいた。ここに記してあわせて感謝申し上げます。

引用文献

- 新井 正 (1994) : 「水環境調査の基礎」. 古今書院, 168p.
- 海老瀬潜一・井上隆信 (1991) : 支川の合流を伴う河川流下過程における水質変化量の定量評価. 水質汚濁研究, 14, 243-252.
- 小倉紀雄 (1980) : 多摩川流域 (南浅川) における物質循環とそれに及ぼす人間活動の影響. 陸水学雑誌, 41, 138-146.
- 小倉紀雄 (1997) : 水・物質循環と河川の流域環境. 日本水文科学会誌, 27, 179-184.
- 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴 編 (1996) : 「水文地形学—山地の水循環と地形変化の相互作用—」. 古今書院, 267p.
- 貝塚爽平 (1979) : 東京の自然史. 紀伊国屋書店, 239p.
- 春日屋信昌 (1990) : 「流量測定」. コロナ社, 217p.
- 関東第四紀研究グループ (1969) : 南関東の第四系と海水準変動. 地学団体研究会専報, 15, 173-200.
- 國松孝男・村岡浩爾 編著 (1989) : 「河川汚濁のモデル解析」. 技報堂出版, 266p.
- 阪口 豊・大森博雄 (1981) : 多摩川流域の地形・地質. 「環境科学」研究報告集, B74-R12-4, 29-51.
- 篠村善徳 (2001MS) : 下総台地における開発にともなう谷津の水質の変化. 平成12年度 東京大学大学院新領域創成科学研究科修士論文. 50p.
- 寿円晋吾 (1965) : 多摩川流域における武蔵野台地の段丘地形の研究—段丘傾動量算定の一例—. 地理学評論, 38, 557-571, 591-612.
- 高木信行 (1990) : 多摩川の段丘地形とその形成過程. 第四紀研究, 28, 399-411.
- 高村弘毅 (1981) : 水文環境の地図化に関する研究. 昭和55年度文部省科学研究費補助金・総合研究 (A), 課題番号: 538023, 121p.
- 寺尾 宏 (1994) : 硝酸態窒素による地下水汚染—岐阜県各務原台地の汚染事例を中心に—. 環境と測定技術, 21, 37-48.
- 土木学会編 (1992) : 「水理公式集」. 土木学会.
- 東京都環境保全局 (1997) : 東京の湧水マップ.
- 永井 茂 (1991) : 地下水汚染の水文化学的アプローチ—無機汚染の実態と問題点—. 地下水学会誌, 33, 145-154.
- 原 美登里 (1997) : 神奈川県における都市用水事業・下水道事業の広域化と流域変更. 地理学評論, 70, 475-490.

- 原 美登里 (1998) : 神奈川県における流域変更が取水・排水河川に与える影響. 日本水文科学会誌, 28, 83-96.
- 半谷高久 編著 (1972) : 「水分析におけるサンプリング」. 講談社サイエンティフィック, 133p.
- 半谷高久・小倉紀雄 (1985) : 「水質調査法 改訂2版」. 丸善, 378p.
- 細谷 清・小倉紀雄 (1982) : 南浅川水質に及ぼすし尿排水の影響. 陸水学雑誌, 43, 199-207.
- 山本莊毅 編 (1968) : 「陸水」. 共立出版, 347p.

こうせい ど そくていほう た ま がわみずけい みずしゅうし
「高精度測定法による多摩川水系の水収支・
ぶつしゅうし どうたい はあく か せんすいしつけいせい きこう かいめい
物質収支の動態把握と河川水質形成機構の解明」

(研究助成・学術研究VOL. 31—No.227)

著者 おお もり ひろ お
大森博雄
発行日 2003年3月31日
発行 財団法人とうきゅう環境浄化財団
〒150-0002
渋谷区渋谷1-16-14(渋谷地下鉄ビル内)
TEL (03)3400-9142
FAX (03)3400-9141
