

32. 物質循環状態評価に基づく新しい流域環境指標の提案

PROPOSAL OF NEW ENVIRONMENTAL INDEX TO EVALUATE THE MASS CIRCULATION PROCESS IN A WATERSHED

篠田成郎*・守利悟朗*・和田祐典**・山川淳平**・田中雅彦***・渡辺美帆****・片桐 猛*****

Seirou SHINODA, Goro MOURI, Yusuke WADA, Junpei YAMAKAWA,
Masahiko TANAKA, Miho WATANABE, Takeshi KATAGIRI

ABSTRACT; A new index was proposed to evaluate the environmental condition in the watershed. Since this index was defined as the statistical variance of the amount of mass flow in the runoff process, it included effects of the continuity on the mass flow/circulation system and the various human activities. As the results of the investigating the definition of the index, it was found that spatial scales of non-point source such as cultivated lands and the runoff length where the natural purification was fully exhibited became important to the environmental assessment.

KEYWORDS; mass circulation, environmental assessment, environmental index, river basin environment

1. 緒言

自然界における環境問題と同様に、流域における環境問題のほとんどは、系内での物質循環が円滑に行われていないことに起因している。ある動的な平衡状態に対して、栄養塩類が過剰に供給されるとともに、それが滞留することになると、そこに富栄養化に伴う水質汚濁が発生することになる。また、魚類などの河川生物の生息に適した環境は、見かけ上の多自然ではなく、そこでの生物生産に適した栄養塩類収支の平衡状態および土砂移動の平衡状態の下に形成される。すなわち、良好な流域環境を創造するための基本原則は、物質収支に関する理想的な動的平衡状態の達成にあり、この意味で、物質移動の連続性確保という概念が重要になってくる。著者らは、こうした観点から、全窒素を例に取り、流域内の物質移動状態を表現できるモデルの構築^{1),2)}とこれにより推定される物質移動状態³⁾を用いて、物質移動の連続性⁴⁾と環境状態との対応関係について検討を進めてきた。

本研究では、良好な流域環境は物質移動の高い連続性の下に形成されるという新しい発想に基づき、物質移動の連続性の概念をどのように具体化することにより、流域における環境状態評価に用いることができるのかについて検討することを目的としている。解析対象としては、ダムなどの滞留が存在しない木曽川水系長良川全流域(約2000km²)を取り上げ、そこでの現地観測およびモデル解析結果を用いて、様々な視点から流域内全窒素移動の連続性を検討することを通じて、流域における環境状態を定量的に評価できる指標を提案する。

2. 物質流出モデルによる流域内物質移動量の推定

2.1 物質移動モデルの考え方

まず、流域内の特定領域(例えば、微小な矩形メッシュ領域)に着目し、領域に流路を経由して入る物質質量、領域内で排出される物質質量(領域外から持ち込まれる物質質量)、領域内で消費される物質質量(領域外に持ち出される物質質量)の総和が領域外に流路を経由して出る物質質量になるという領域内の物質収支を考える。領域内での排出物質質量については、物質排出に関する原単位を用いて評価する^{1),2)}。領域の上下流間の流路を経由する過程での物質質量変化については、自然浄化を考慮して、流路勾配や粗度に支配される空間変化係数を適用する³⁾。

長良川全流域における全窒素の移動を対象とした実際のモデルでは、流域全体を100m四方のメッシュ(1/10細分区画メッシュ)に分割し、各メッシュを上記の物質収支を考える単位領域として扱っている⁴⁾。また、各メッシュ

* 岐阜大学総合情報メディアセンター Information and Multimedia Center, Gifu University

** 岐阜大学大学院工学研究科 Graduate School of Eng., Gifu University

*** 中央コンサルタンツ株式会社 Chuoh Consultants Co., Ltd.

**** 株式会社創建環境エンジニアーズ Soken Environmental Engineers Co., Ltd.

***** 岐阜市人・自然共生部水自然室 Clean Water Preservation Division, Gifu City Environmental Preservation Department

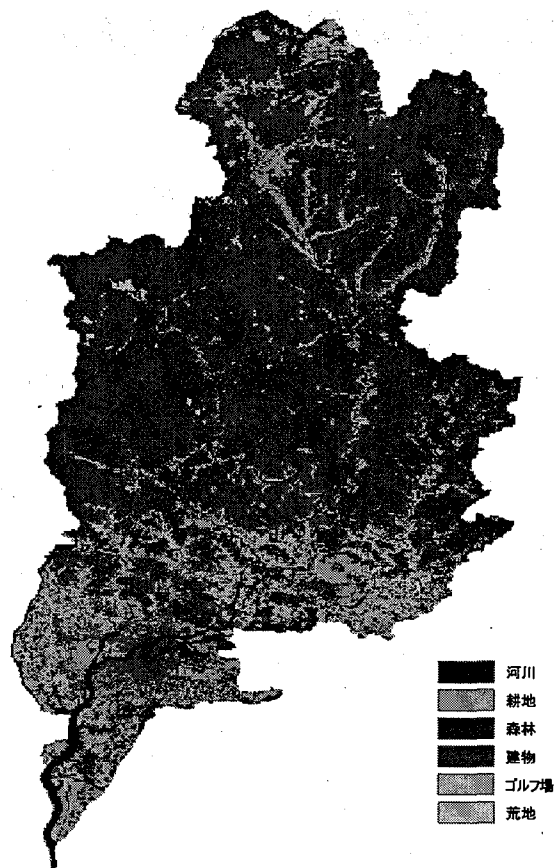


図-1 解析対象流域の土地被覆分布

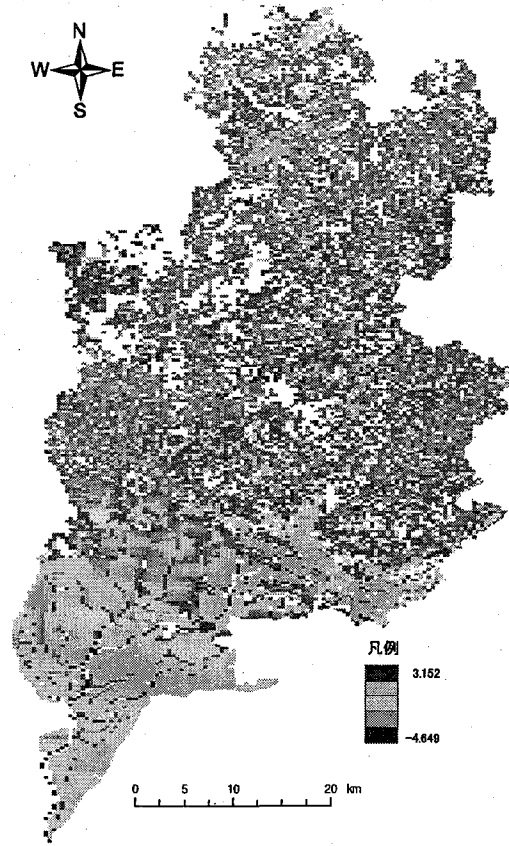


図-2 流域内全窒素移動量の推定結果

における土地被覆種別に基づき、植生特性量に応じた森林由来の排出負荷原単位^{5),6),7)}、下水処理方式に依存した生活系由来の排出負荷原単位、農業粗生産額に応じた農業系由来の排出負荷原単位、牛豚頭数に応じた畜産系由来の排出負荷原単位、および工場排水量に応じた工業系由来の排出源単位をそれぞれ求め、分布型流出モデルとして、落水線から推定される擬河道網を流下させることによって、各メッシュ間での単位時間当たりの物質移動量(物質移動速度)を推定している⁴⁾。

2.2 全窒素量に関する流域内移動量の推定結果

ここで解析対象とする長良川全流域における土地被覆分布を図-1に示す。この図は、国土地理院の1/10細分区画土地利用データに対して、Landsat/TMの人工衛星画像情報による推定結果を用いた補正を行うことにより得られている。図-2は、この土地被覆分布を基本としながら、森林簿による植生分布や市町村ごとの人口、下水道整備率、農業粗生産額、牛舎頭数、工場排水量などの行政データを上述の全窒素移動モデルに適用することによって得られた流域内全窒素移動速度 Ψ (g/s)の常用対数値 $\log \Psi$ の分布を示す。全体的には、河道位数が大きくなるほど物質移動量は増大し、本川や主要支川の河道部で最も大きな値を示しており、流域内各所から排出される全窒素成分が流下過程で集積していく様子が表れている。一方、集水域ごとの物質移動量を比較してみると、森林域が広がる上流域と人間活動が活発な都市域や農耕地を含む中流および下流域では、その分布状態が大きく異なる。とくに注目すべき点は、物質移動量が全体的に大きな値を示している地域だけでなく、周辺域と比べて極端に大きな物質移動量を示している場所である。例えば、最上流域は森林の占める割合が大きいにもかかわらず、高原野菜栽培の影響により、特定の支川とその下流本川において、周りと比べて相対的に大きな物質移動量が分布している。こうした場所では、物質が過剰供給されると同時に特定箇所に滞留することになっているため、物質移動の連続性が保たれておらず、環境としては良好でない状態が現出していると言える。そこで、以下では、物質移動の連続性を客観的に評価する方法について、様々な観点から検討してみることにする。

3. 物質移動量の空間的ばらつきによる環境状態の評価

3.1 物質移動量の空間的ばらつきに基づく連続性評価方法

上述のように、単位時間当たりの物質移動量 Ψ が流域内で同じであれば、物質の滞留や不足は生じないことになり、動的な平衡状態が形成されていることになる。この状態は、流域内各所から排出される物質が、排出点から下流直近の場所・区間で消費されることによって実現される。排出物の消費は流下過程での自然浄化によるため、局所的に見れば、排出量と自然浄化量が同等になっている場所が物質移動の連続性が高いと判断できる。ただし、面的な排出源の存在や自然浄化が点で行われるのではなく、ある程度の長さを持った区間で行われるために、こうした局所的な考え方を当てはめることはできない。つまり、物質排出源の面的な拡がりや有意な自然浄化の区間長に応じたスケールを持つ領域内での物質移動状態からその連続性を判断することが重要になる。

ここで検討対象としている長良川流域では、流下過程での物質変化係数 (1/km) は 10^{-3} のオーダーとなっており、1km の流下で 0.1～1 % 程度の浄化量と推定されている⁴⁾ ため、数 km 程度の流下経路が存在しなければ、有意な自然浄化量を見込むことはできない。また、全窒素に関する面的な負荷源の代表である耕地は、数 ha～数十 ha の規模となっている。これらの条件を満たす領域区分が物質循環の連続性を判定する最小スケールになる。

一方、物質移動量の連続性はその空間的一様性そのものに対応しており、物質移動量を確率変数としたときの確率分布の分布幅によって評価できると考えられる。つまり、物質移動量に関する確率分布の幅が小さいほど空間的一様性が高く (空間的ばらつきが小さく)、確率分布を考える対象母集団に相当する領域内での物質移動が連続的になっていると判断できる。

そこで、以下では、物質移動量の空間的ばらつき、すなわち物質移動量を確率変数としたときの分散値 σ^2 によって物質移動の連続性を評価することとし、その母集団となる流域内の領域の具体的な決め方について検討してみる。なお、この分散値 σ^2 を“連続性パラメータ”と呼ぶことにする。

3.2 支川集水域ごとの物質移動量の空間的ばらつき

最も単純かつわかりやすい領域の区分方法としては、支川集水域ごとに物質移動量の分散を求めるやり方であろう。長良川流域内の最大支川である板取川の流域面積は 298km² であり、主要支川の中の最小流域面積でも数 km² 程度となっているため、上述の領域スケールに関する条件を満足している。図-3 は、長良川における主要な支川流域内での物質移動量 Ψ に関する分散値を求め、支川流域ごとの分散値の分布を示したものである (“支川集水域法”と呼ぶことにする)。上流の森林域では分散値が小さく、連続性が高い状態となっていることに對し、下流の都市域や耕地域では分散値が大きく、連続性が低くなっていることがわかる。ただし、統計量としての分散値を算出する際の対象となる標本サイズが支川集水域ごとに大きく異なるため、統計学的には標本分散値同士を一樣に比べることはできない。大まかな物質移動の連続性状態を判断するには使えるかもしれないが、具体的な環境保全施策を検討する際には、問題が残される方法になっている。

3.3 矩形分割領域ごとの物質移動量の空間的ばらつき

物質移動量の分散値を算出する際の標本サイズを同一にするために、物質移動量の元メッシュ (100m 四方) を南北に 20 個、東西に 25 個の並べた矩形領域 (500 個 $\times$ 0.01km²) として構成し、この矩形領域内での物質移動量の分散値として連続性パラメータを算出してみる (“矩形分割領域法”と呼ぶことにする)。図-4 は、こうして得られた連続性パラメータの分布を示す。この方法では、分散値を算出する際の標本サイズは領域ごとに同等であっても、流下経路や支川集水域とは無関係に領域が分割されているため、物質移動特性の異なる複数の集水域が一つの領域内に含まれるケースが出てきてしまい、これにより物質移動量の分散値が異常に高くなって表れる箇所も発生している。分割単位とする矩形領域のサイズを小さくすることにより、多少の改善は図れるが、標本統計量の算出において、標本サイズが小さくなるために、うまい方法とは言えないと判断される。

3.4 等面積に分割された集水域ごとの物質移動量の空間的ばらつき

上述の矩形分割領域法の利点である標本サイズの同等化を残しつつ、流下経路に応じた領域分割を行うために、落水線から推定される無数の集水域の中から同程度の領域サイズとなる集水域を選び出し、この集水域における物質移動量の分散値によって連続性パラメータとする方法を考える (“等面積集水域法”と呼ぶことにする)。具体的には、流域全体を覆う全ての基本メッシュ (100m 四方) の一つづつについて、各メッシュを集水点とする集水域界を求め、これを基に、500 $\pm$ 50 個の基本メッシュ数を含む集水域としてグループ化し、ほぼ同じ面積を持つ集水域として領域分割を行う。こうして分割された等面積小集水域ごとの連続性パラメータの分布状態を図-5 に示す。これより、各小集水域ごとの人間活動状態と良く対応した分布図が得られており、数 km 程度のスケールで物質移

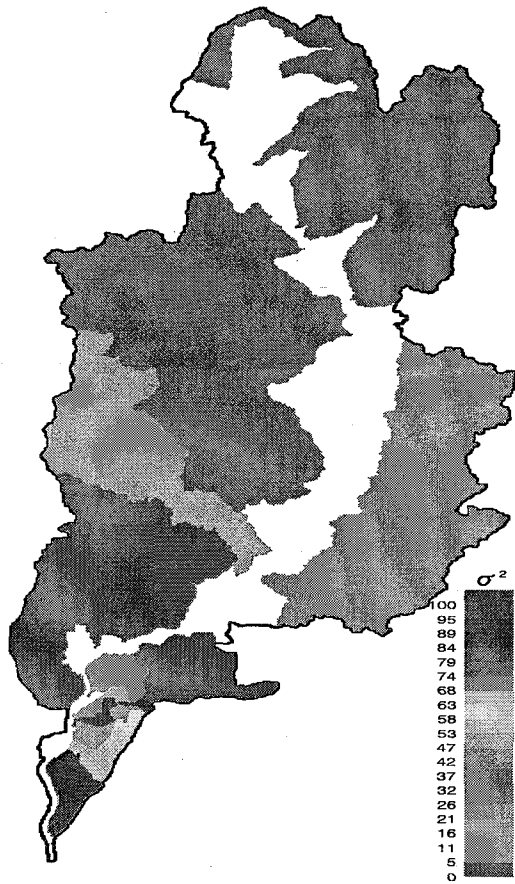


図-3 支川集水域法による物質移動の連続性パラメータ分布

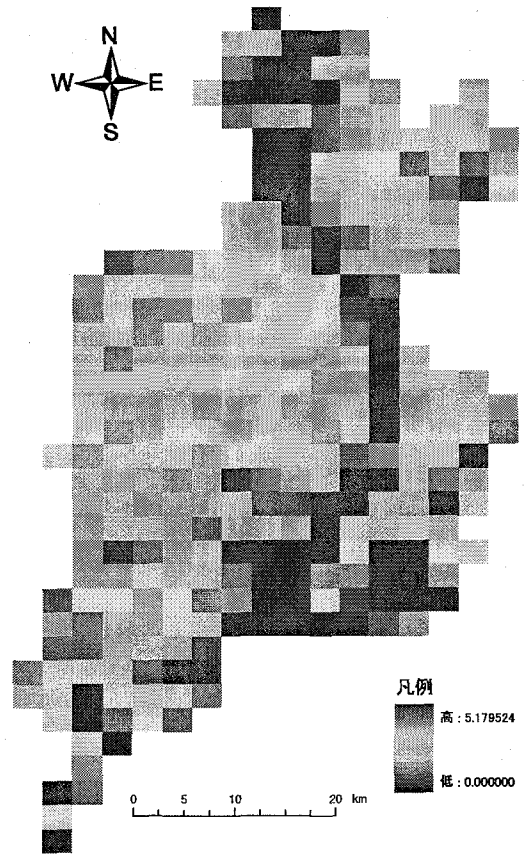


図-4 矩形分割領域法による物質移動の連続性パラメータ分布

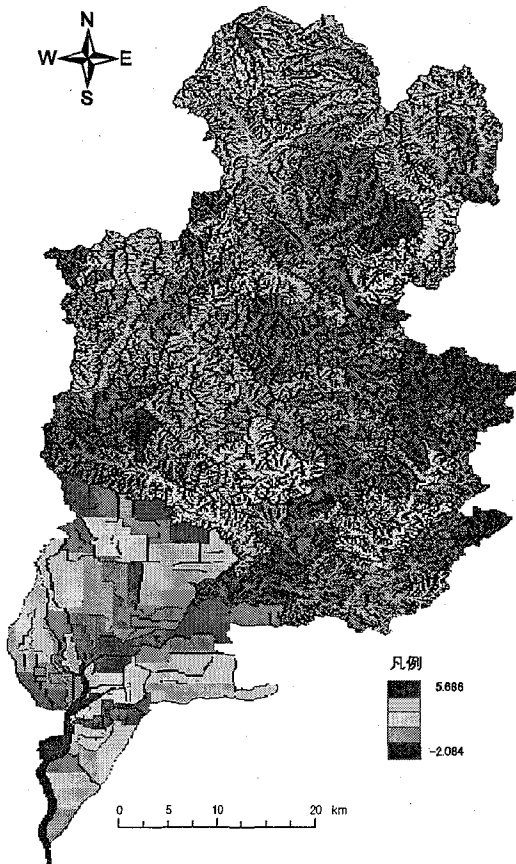


図-5 等面積集水域法による物質移動の連続性パラメータ分布

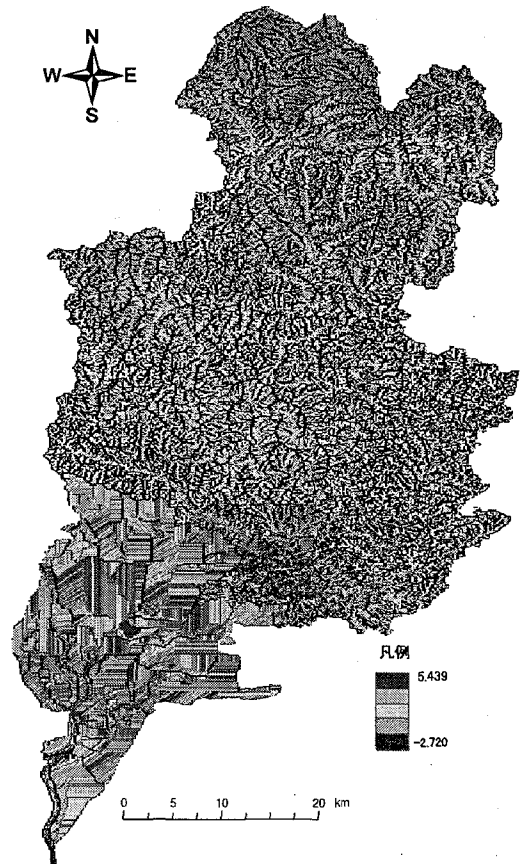


図-6 流下経路法による物質移動の連続性パラメータ分布

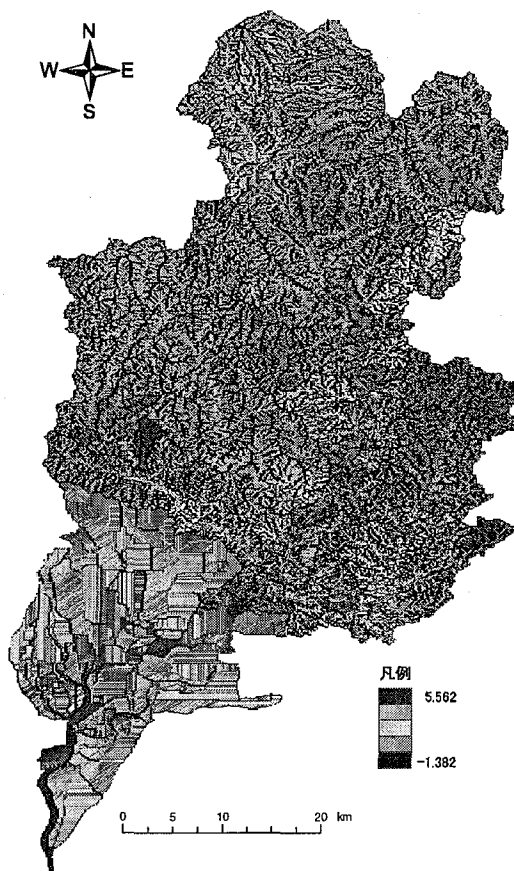


図-7 流域環境指標の分布

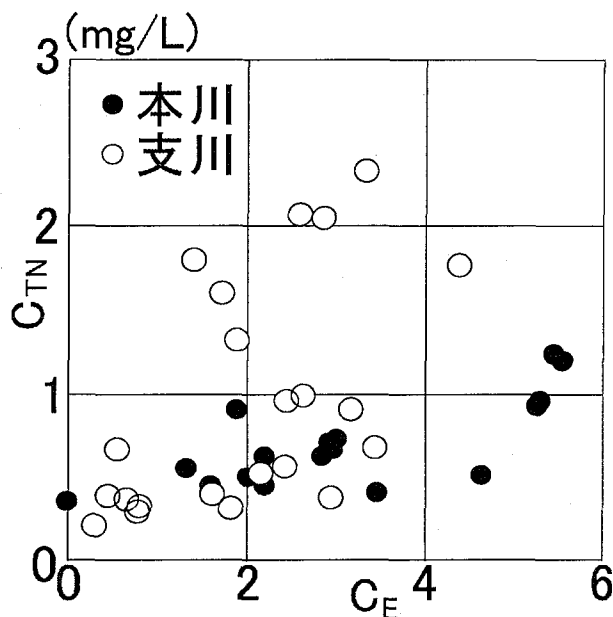


図-8 観測データから推定された年間の平均全窒素濃度と流域環境指標との関係

動状態を平均的に判定する場合に有用な情報が得られていると判断できる。ただし、本川と支川での物質移動量の相違をそのまま同一集水域として扱う場合も発生するため、本川に沿う地域での連続性パラメータが大きくなる傾向が出てきてしまっており、この点に対する若干の改善が必要と考えられる

3.5 流下経路に沿った物質移動量の空間的ばらつき

流下過程における物質移動量の空間的変化状態を直接的に評価するために、落水線のノード間ラインを一つの領域と考え、そこでの隣り合うメッシュ間に関する物質移動量の差の自乗和の平均値として空間的ばらつきを定義してみる（“流下経路法”と呼ぶことにする）。上述の当面積集水域法がマクロ的な物質移動状態の評価を可能にしていたことに対して、この方法では、局所的な物質移動状態を検討する際に有用となることが期待される。図-6は、こうして求められた連続性パラメータの分布を表す。全体的にはあまりコントラストがはっきりしていないように見えるが、局所的には物質移動の連続性が悪くなっている地点が明瞭となっており、ピンポイント的な環境保全策の検討において有効な情報になると思われる。

4. 流域環境指標の提案とその特性

4.1 流域環境指標の提案

以上、様々な視点から物質循環の連続性状態を評価する方法について検討してきたが、これらの方法の中で、等面積集水域法と流下経路法の2つが有効と判断できた。前者および後者は、それぞれマクロ的およびミクロ的な物質移動状態を評価することに適しており、これらの合成として、総合的な流域環境指標を定義することができると考えられる。そこで、次式によって、流域環境指標 C_E を定義することにする。

$$C_E = \exp(\sigma_A + \sigma_L) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 σ_A および σ_L は、それぞれ等面積集水域法および流下経路法によって算出される連続性パラメータの値、すなわち物質移動量の標準偏差を表す。

こうして求められる流域環境指標 c_E の分布を図-7 に示す。上流の高原野菜栽培耕地での水質汚濁問題、魚類生息数が激減していると懸念されている中流から上流域の本支川における生物環境の問題、都市化に下水道整備が追いついていない中流域の中都市域での水質汚濁問題、下流域での耕地に由来する農業系排水による汚濁と生物生息環境悪化の問題など、この図から広範な流域環境問題との関連性を読みとることができる。

4.2 流域環境指標と水質との関係

図-8 は、図-7 で示した流域環境指標 c_E が、河川水質の状態とどのように対応しているのかを示したものである。この図では、著者らによる長良川流域全体での水質観測³⁾ 結果に基づき、流域内の計 39 地点における観測結果から、観測実施年の流況曲線^{8),9)} を用いて全窒素負荷の年総量を推定し、各測点ごとの年間の平均全窒素濃度に換算したものを縦軸としてある。通常の水質基準点での計測と異なり、現地観測は、高水期、豊水期、平水期、低水期に同等に実施されており、降雨流出時の状態を含んだ年間の負荷総量に対応した結果が図にはプロットされていることになる。この図より、流域環境指標 c_E と年平均全窒素濃度 C_{TN} とは良好な線形関係を示していると判断できる。ただし、両者の値が大きくなるにつれて線形関係からのずれが大きくなる傾向や本川と支川とで傾きが異なる傾向も存在しており、式 (1) の定義方法を含めた微細な修正の必要性も伺える。

5. 結語

以上、本研究では、流域環境の状態は、そこでの物質移動の円滑さ、すなわち物質移動量の空間的連続性に依存しているとの発想から、この連続性の具体的な評価方法について検討した。その結果、物質移動状態の把握に際しては、流域における面的な物質発生源の分布状態を評価できるスケール設定と流下過程における自然浄化機能の効果を定量化できるスケール設定の両者が重要であり、こうしたスケール設定を満足させつつ、物理的な物質流下現象を表現できる方法で領域を分割することにより、領域内での物質移動状態を評価できることを明らかにした。また、こうした検討を通じて、流域環境状態の良好度を示す流域環境指標を具体的に提案し、その有効性について検証することができた。

最後に、本研究の実施に当たり、データ解析などに携わってくれた岐阜大学工学部 (当時) の野村祐司氏に深謝の意を表す。また、本研究が、科学研究費萌芽研究 (課題番号 16651012, 代表者: 篠田成郎) の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 篠田成郎・都築克紀・山内幸雄・高坂宗和・田中雅彦・野村一保・湯浅晶 (1999): 長良川流域での全窒素・全リン流出特性に及ぼす土地被覆状態の影響評価, 河川技術に関する論文集, Vol. 5, pp. 59~64.
- 2) 篠田成郎・都築克紀・湯浅晶・山内幸雄・野村一保・田中雅彦 (2000): 長良川流域における衛星リモートセンシング情報と人間活動情報を用いた全窒素・全リン流出負荷量分布の推定法, 第 2 回水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ論文集, pp. 13~22.
- 3) 都築克紀・篠田成郎・山内幸雄・田中雅彦・野村一保・湯浅晶 (2000): 長良川流域内の全窒素・全リン流出特性に及ぼす土地被覆空間配置の影響評価, 水工学論文集, Vol. 44, pp. 1143~1148.
- 4) 篠田成郎・下山耕輔・田中雅彦・野田幸嗣・湯浅晶 (2002): 流域内物質移動の連続性に着目した流域環境評価指針の提案, 第 6 回水資源シンポジウム論文集, pp. 171~176.
- 5) 都築克紀・篠田成郎・間野耕司・佐藤嘉則・湯浅晶 (1998): 山地森林内渓流水中全窒素濃度に及ぼす土地被覆分布特性の影響評価, 環境システム研究, Vol. 26, pp. 119~127.
- 6) S. Shinoda, K. Tsuduki, A. Yuasa, Y. Sato and K. Mano (1999): Influence of the vegetation distribution on the mass balance of total nitrogen in a forested mountain watershed, Jour. of Global Environment Eng., Vol. 5, pp. 127~137.
- 7) 篠田成郎・衣目純・福本圭子・前田敏昭・日置琢三・都築克紀 (2001): 山地森林流域での全窒素流出過程に及ぼす植生分布の影響評価, 京都大学防災研究所年報, No. 44(B-2), pp. 229~245.
- 8) 建設省河川局 (1997): 流量年表 (平成 9 年), 社団法人日本河川協会.
- 9) 建設省河川局 (1998): 流量年表 (平成 10 年), 社団法人日本河川協会.