

河川流域における環境影響物質発生領域の特定手法の開発

小尻利治・田中千尋*・田中賢治・浜口俊雄

* 株式会社 山武

要 旨

清浄な水資源循環の回復に貢献することを目的として、河川水質悪化の原因の1つであるノンポイント負荷の発生領域を特定する手法を提案する。本手法では、過去に計測された環境影響物質の時系列データとそのときの降雨量時系列データおよびGISを使うことにより、解析によって発生領域を短時間で特定する。ここで扱うノンポイント負荷は、対象流域に降雨があったときに環境基準点で環境影響物質が増加する分と定義している。本報では、環境影響物質としてCODを取り上げ、特定手法の開発とその適用例を示す。

キーワード：ノンポイント負荷，発生領域特定，積算降雨量，パターンマッチング，GIS

1. はじめに

河川や湖沼の水質汚濁の原因は、ポイント負荷と呼ばれる工場や下水処理場などの特定汚染源（点源）とノンポイント負荷と呼ばれる農地や市街地などの非特定汚染源（面源）に分けられる。ポイント負荷の発生源は、上記のように明確で、例えば水質汚濁防止法（環境省，1970）のように排出規制などの対策が実施されており、近年徐々に減少している。一方で、ノンポイント負荷の対策は重要な課題となっている（阿部，2006）。ノンポイント負荷は発生源が明確ではないため、河川流域などの広い領域の中で、どこが発生源なのか特定する手法の開発が必要になっている。湖沼については、環境省において2005年6月に湖沼水質保全特別措置法（通称：湖沼法）が改正され、市街地や農地などから汚濁物質が水域へと流れ出すノンポイント負荷対策の強化を講じることになった（環境省，2005）。

本研究では、清浄な水資源循環の回復に貢献することを目的として、河川水質悪化の原因の1つであるノンポイント負荷の発生領域を特定する手法を提案する。本手法は、過去に計測された環境影響物質の時系列データとそのときの降雨量およびGISを使って、短期間で発生領域が特定可能なものである。なお、降雨によって流出する環境影響物質を対象とする手法であり、ここではCODを例として発生源特定手法の提案と解析事例紹介を示す。

2. ノンポイント負荷の定義

ノンポイント負荷はポイント負荷の工場や下水処理場などからの排水と異なり、面的な広がりがある市街地・農地・森林などからの負荷であるため、環境影響物質の発生地点の特定ばかりでなく、その発生量を求めることすら難しい。

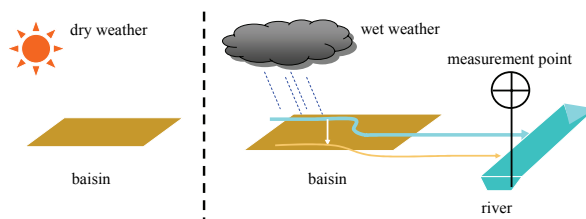


Fig.1 Target of nonpoint source

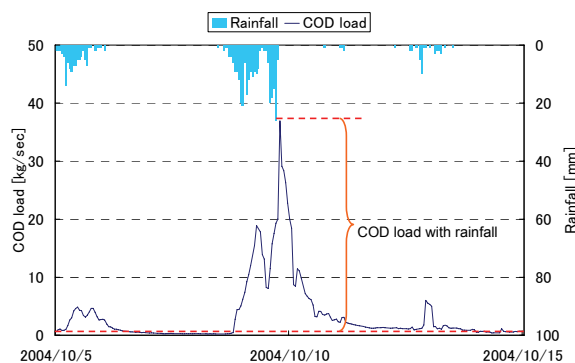


Fig.2 COD load with wet weather

本研究では、ノンポイント負荷をFig.1に示すように次のように“晴天時に地表にたまり、降雨によって地表や地下を経由して河川に流出する環境影響物質の負荷”と定義することで、計測点における発生量と流域内の発生箇所を推定する。Fig.2にCOD負荷量と降雨量の時間変化を示す。このグラフから、上記の定義が定性的に正しいことがわかる。

3. ノンポイント負荷量の算出

降雨がなかった場合に環境影響物質の負荷量がいくつになるかを推定し、実際の負荷量（計測値）から差し引くことによりノンポイント負荷量を推定する。本研究では、降雨による流出と定義したノンポイント負荷を対象としているため、データ解析の際には計測値から常時流出している環境影響物質の流出量を差し引いた時系列データを用いなければならない。常時の環境影響物質流出量を推定するためには、事例ベースモデリング（TCBM：Topological Case-Based Modeling）（筒井，1997）や、分布型流出モデル（Hydro-BEAM：Hydrological River Basin Environmental Assessment Model など）（小尻，1998）などが利用できる。TCBMは豪雨時の予測などのように事例となるデータが少ない場合には不利になる可能性があるが（小尻，2007），晴天時のようにある程度まとまったデータがある場合には安定した推定が可能である。

また、本報では環境影響物質としてCODを対象とする。CODは化学的酸素要求量であり、代表的な水質の指標の一つである。単位が[ppm]または[mg/l]であることからわかるように、降雨に伴う河川流量の増大により、同じ負荷量でも降雨が多いと数値が下がってしまう。そこで、解析ではCODに河川流量を掛け合わせたCOD負荷量として検討を行う。

$$L_{\text{COD}}[\text{kg/sec}] = C_{\text{COD}}[\text{mg/l}] \times Q[\text{m}^3/\text{sec}] / 1000[\text{kg/g}] \quad (1)$$

L_{COD} : COD負荷量
 C_{COD} : COD濃度
 Q : 河川流量

4. 重回帰式による負荷量の推定

本研究において、ノンポイント負荷を降雨による流出と定義したため、水質計測点における負荷量は流域を代表する降雨量データを変数とした線形式で推定できると仮定した。ここで、流域を代表する降雨量データとは、対象流域全体の平均降雨量やある

場所の降雨量を時間積算したそれぞれ時系列データから、環境影響物質の計測値時系列データと関連性が高いデータをステップワイズ法により求めたものである。環境影響物質負荷量が積算雨量を変数とした線型方程式で算出できることを示すために、重回帰式による環境影響物質負荷量の推定を行った。ここでは、線形式を作るために3つの変数を用意し、式(2)の重回帰式を算出した。

$$Y(t) = a_1 \times X_1(t) + a_2 \times X_2(t) + a_3 \times X_3(t) + b \quad (2)$$

Y : 環境影響物質負荷量
 X_1 : 24時間積算雨量
 X_2 : 6時間積算雨量
 X_3 : 12時間積算雨量
 $a_1 = 4.86 \times 10^{-2}$
 $a_2 = 3.43 \times 10^{-2}$
 $a_3 = 5.48 \times 10^{-3}$
 $b = 6.83 \times 10^{-2}$

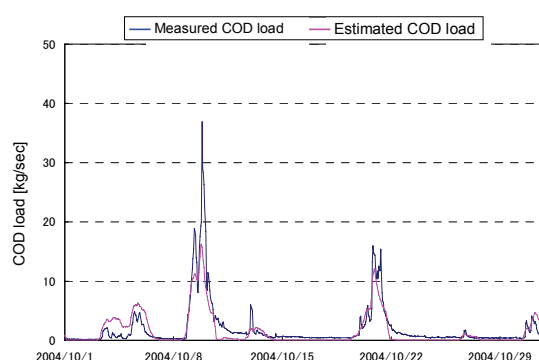


Fig.3 Estimated COD load

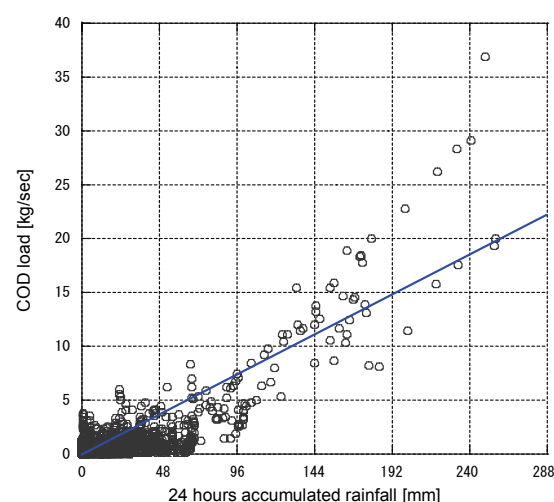


Fig.4 Scatter chart between an accumulate rainfall and COD load

式 (2) を用いて推定した環境影響物質負荷量の1つであるCOD負荷量の推定値をFig.3に示す。重相関は $R=0.824$ となった。単一領域の負荷量が、時間積算雨量を変数とした線型方程式で定性的に算出できることが確かめられた。また、Fig.4に最も相関値が高くなった24時間積算雨量とCOD負荷量の散布図を示す。積算雨量が50mmを超えるような降雨時にはCOD負荷量と高い相関関係があることがわかる。

5. 解析手法の原理

本研究で提案する新しい特定手法では、対象流域に降雨があったときに環境基準点で環境影響物質が増加する分をノンポイント負荷と捕らえ、ポイント負荷と区別している。前述のとおり、ノンポイント負荷はどこから発生しているのかわかりづらい。しかし、河川流域のいずれかの場所から発生している可能性は非常に高い。そこで、ノンポイント負荷の発生箇所を広い河川流域から特定する手法を検討した。まず、河川流域をメッシュに分割し、メッシュごとの降雨量を入力としてメッシュごとの環境影響物質負荷量を算出することを考える。調査対象とする流域において環境影響物質とその特性は以下の通りである。対象流域全体の環境計測点での時刻 t における環境影響物質流出量 $F(t)$ は、流域を構成する各メッシュ i からの環境影響物質流出量 $f_i(t)$ の和になる。

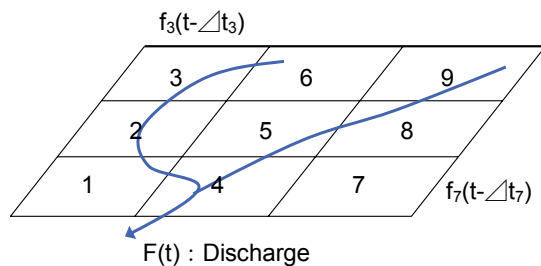


Fig.5 Discharge from each mesh

$$F(t) = f_1(t-\Delta t_1) + f_2(t-\Delta t_2) + \dots + f_n(t-\Delta t_n) \quad (3)$$

$F(t)$: 環境基準点での環境影響物質流出量
 $f_i(t)$: メッシュ i の環境影響物質流出量
 Δt_i : メッシュ i から環境基準点までの流達時間

各メッシュでは、環境影響物質流出量と降雨ごとの積算雨量に相関関係があるため、各メッシュの環境影響物質流出量 $f_i(t)$ は

$$f_i(t) = K_i \times R_i(t) \quad (4)$$

K_i : 環境影響物質流出率[-]

$R_i(t)$: 積算雨量[mm]

となる。ここで、メッシュごとに環境影響物質流出率 K_i を考える。雨が降りだしから降り終わるまでを1回の降雨と数え、各降雨に番号 j をつけることにより、流域全体の環境影響物質流出量 F_j は、求めたいメッシュ i の環境影響物質流出率 K_i と各メッシュの環境影響物質流出量の和として表せる。

$$\begin{aligned} F_j &= f_{1j} + f_{2j} + f_{3j} + \dots + f_{nj} \\ &= K_1 \times R_{1j} + K_2 \times R_{2j} + K_3 \times R_{3j} \\ &\quad + \dots + K_n \times R_{nj} \end{aligned} \quad (5)$$

j : 降雨番号

これは多元連立1次方程式なので、降雨回数 j がメッシュ数 i より多い場合に、理論的に浸入水比率 K_i を求めることができる。流域を構成するメッシュが10程度であれば、理論的に10回以上の降雨により各メッシュの浸入水比率を求めることができる。一般に安定解を得るには、これより多くの降雨回数を必要とする。

今回の対象のように、河川流域から発生領域を特定するためにはメッシュ数が多く必要となり、その

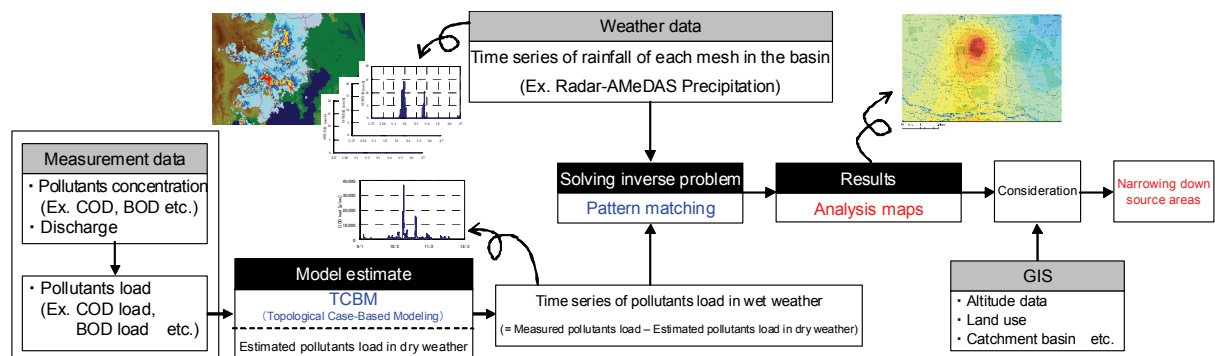


Fig.6 Overview of a method to specify source areas of environmental impacts

メッシュ数以上の多数の降雨回数が必要になる。降雨回数を増やすには調査期間を大幅に増やす必要があるが、それは実用的ではない。その対策として、環境影響物質の発生分布を定性的に求める以下の手法を考えた。発生領域を特定するという逆問題を解くことは、同定すべき未知数がメッシュ数だけ存在する必要があるため、非常に困難である。ここでは、工学的に直面した不適切な条件下の逆問題を、雨量データの時間積分によって観測情報を擬似的に増加させることで安定的に解こうとしている。提案する手法は、メッシュ毎の特徴的な積算雨量と計測点における環境影響物質負荷量のそれぞれの相関を比較することで、定性的な環境影響物質負荷量の分布を求めるものである。これはパターンマッチの考え方で、時系列データのグラフから特定のパターンが出現するかどうかを判断する手法である。本研究では、この手法をパターンマッチング手法と呼ぶ。

6. パターンマッチング手法による汚濁物質発生領域の特定

環境基準点の汚濁物質量を基準として、流域内全メッシュのレーダー雨量の時系列データをそれぞれパターンマッチ解析し、相関値を求める。その際、流出に伴う時間遅れを考慮して、その相関値が最大となる時刻を当該メッシュから環境基準点への流出の到達時間とする。式(6)に相関値算出の式を示す。

$$C_a = \max_{\Delta t=0, \dots, T_d} \left(\frac{\sum_{i=1}^n (R_{i-\Delta t}^a - \bar{R}^a) (L_i - \bar{L})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{i-\Delta t}^a - \bar{R}^a)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}} \right) \quad (6)$$

- a : 分割領域名
- Δt : 到達時間
- T_d : 到達時間の候補数
- n : 対象期間のデータ数
- R_{ia} : 領域 a における時刻 i の降雨量
- $\bar{R}^a$: 検討期間の領域 a における降雨量の平均値
- L_i : 計測点における時刻 i の汚濁物質量
- $\bar{L}$: 検討期間の計測点における汚濁物質量の平均値

降雨の影響が無い期間でも、環境影響物質量は0にはならない。これは、ポイント負荷など常時流出している環境影響物質が主な原因であると考え（第2章参照）。本研究では、環境影響物質の1つと

してCODを取り上げ、河川的环境基準点で1時間おきに連続計測されたデータを利用する。このデータを元に、まず降雨がなかった場合を想定し、降雨により流出するCOD負荷量を事例ベースモデリング(TCBM)により推定する。これと解析メッシュごとの降雨量の時系列データをパターンマッチングにより識別して、発生領域の解析マップを作成する。その場合、各メッシュによって流達時間の違いがあるため、それぞれのメッシュで最適な時間遅れを考慮する。最後に、出来上がった解析マップと標高分布図、土地利用図など流出に影響する資料を基に、汚濁物質発生領域を特定する。

7. 解析事例

7.1 解析条件

河川流域の対象はFig.7に示す多摩川流域とする。多摩川は、東京都、神奈川県、山梨県にまたがる1級河川で、上流は山間部、中流から下流は市街地が広がっている。水質計測箇所は下流部の環境基準点である多摩川原橋（国土交通省 水文水質データベース）。降雨量データは気象庁のレーダー雨量データ。期間は2001年～2005年。対象流域のメッシュ数は1147。環境影響物質として、DO、導電率、濁度、CODが1時間お

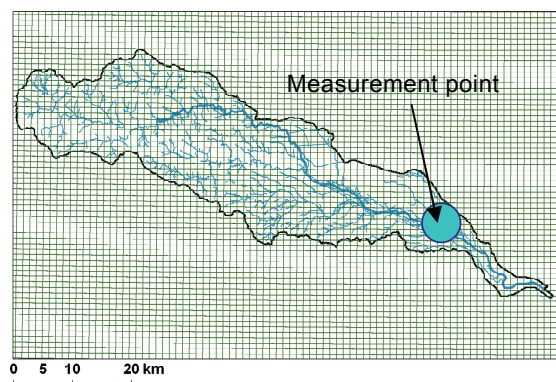


Fig.7 The Tama river basin

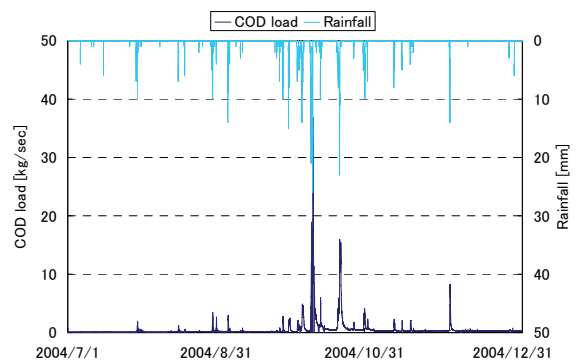


Fig.8 Measured COD load and Rainfall

きに自動で計測されている。本研究では、CODの時系列データを用意して、利用することとした。

7.2 解析結果

Fig.8にCOD負荷量と降雨量の時系列データのグラフの抜粋を示す。本解析事例では、雨天時のCOD負荷量に比べて、晴天時のCOD負荷量が1%程度であるので、晴天時のCOD負荷量は少量で一定とみなした。そのため、パターンマッチにはCOD負荷量そのものとレーダー雨量データで行い、常時流出しているCOD負荷量を差し引くことはしなかった。

流域内各メッシュのレーダー雨量データと環境基準点のCOD負荷量を利用して、パターンマッチングを行った。その結果をコンタ図で示したものがFig.9である。降雨量の変化とCOD負荷量の変化量の相関が強いメッシュでは、降雨があった場合にCOD負荷が多量に流出している領域となる。その部分は影響度が強く赤色で表されている。一方、その相関が弱く、影響度が低い領域が青色で示されている。本解析結果では、環境基準点のやや上流部（領域Ⅰ）と流域の上流部（領域Ⅱ）の大きくみて2箇所が赤色になった。

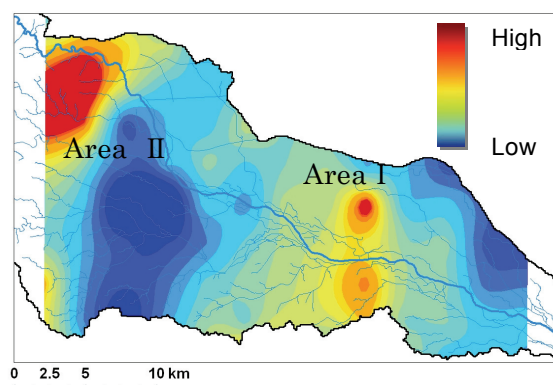


Fig.9 Pattern matching result

7.3 GISを用いた考察

パターンマッチの結果だけでは詳細な場所の特定ができないので、その結果にいくつかのGISを重ね合わせ、影響度が高くなった箇所の特色を調べた。まず①の領域に着目して考察する。Fig.10に領域Ⅰ周辺の地図と重ね合わせた解析結果、Fig.11に土地利用図、Fig.12に集水域図、Fig.13に標高分布図を示す（Fig.10からFig.13は同じ範囲の表示）。これらの図を用いて検討すると、影響度が高くなった領域Ⅰは、土地利用図を用いると建物用地（■）とその他の用地（■）

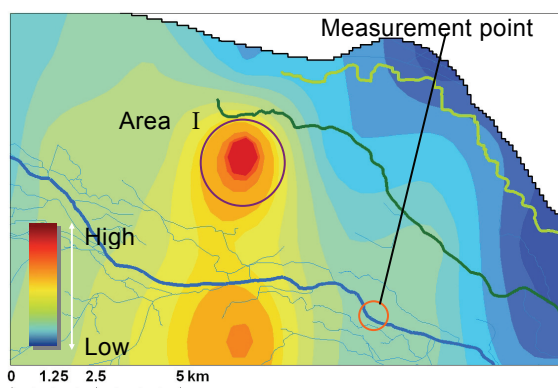


Fig.10 Pattern matching result (Area I)

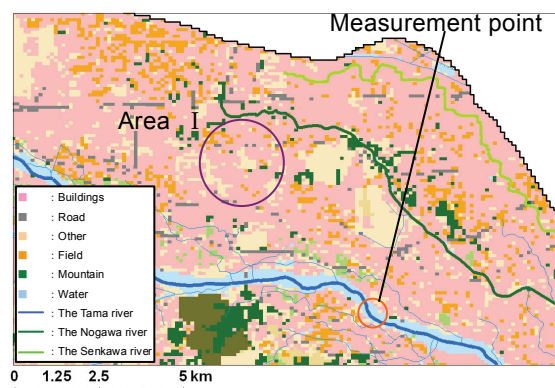


Fig.11 Land use (Area I)

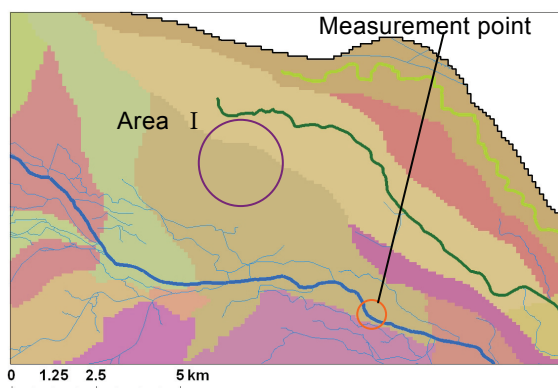


Fig.12 Catchment (Area I)

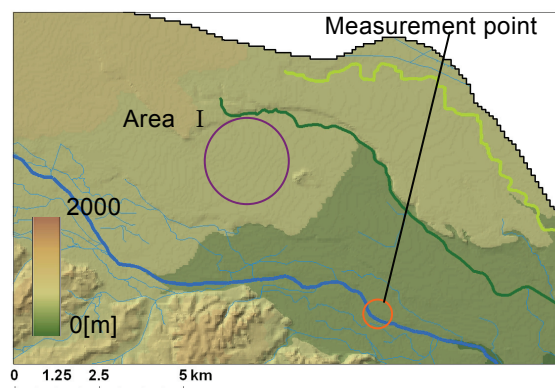


Fig.13 Elevation (Area I)

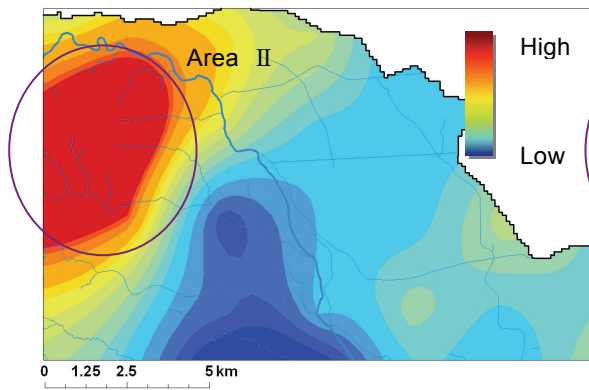


Fig.14 Pattern matching result (Area II)

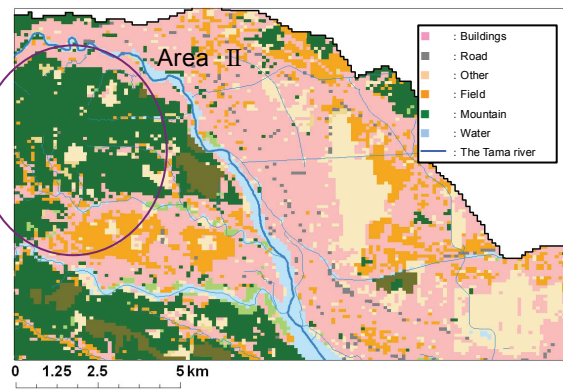


Fig.15 Land use (Area II)

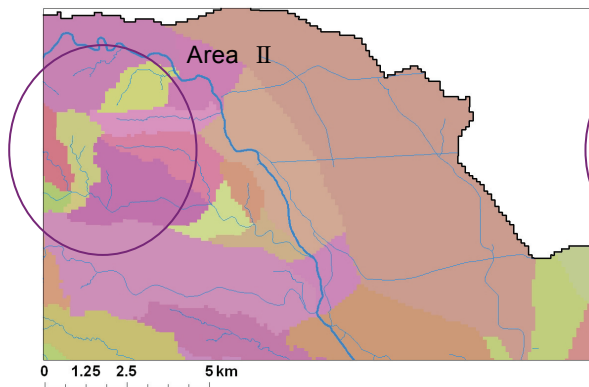


Fig.16 Catchment (Area II)

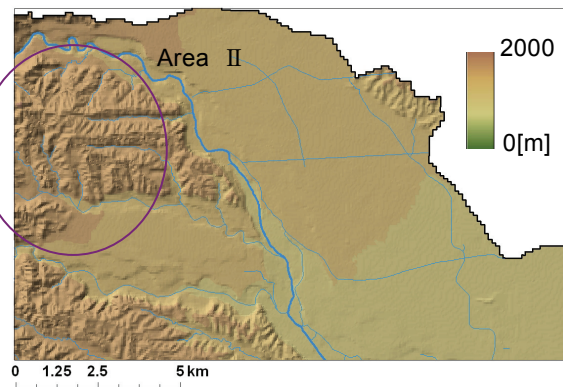


Fig.17 Elevation (Area II)

の部分であることがわかる。また、集水域図と標高図からは、この領域への降雨は計測点に流出している可能性が高いことがわかり、解析結果の信頼性が確認できる。今回の資料からではこれ以上の特定はできないが、より詳細なGIS資料を用いることにより、当該領域に何があって、環境影響物質がどんな流出状況か推測することもできると考えられる。また、都市計画の観点からも、この領域をどのように利用していくべきか検討する資料を提供できているのではないかと考える。

次に領域Ⅱについて考察する。Fig.14に領域Ⅱ周辺の地図とパターンマッチの結果を重ねた図、Fig.15に土地利用図、Fig.16に集水域図、Fig.17に標高分布図を示す（Fig.14からFig.17は同じ範囲の表示）。土地利用図と標高図から領域Ⅱは山岳部（■）であることがわかる。集水域図と標高図からはこのあたりに降った雨は多摩川に流出していることがわかる。以上の結果より、詳細なことはわからないが、この領域に何らかの散布があり、河川のCODを上昇させている原因になっていることが推定できる。

領域Ⅰ及びⅡの発生原因を特定するためには、今後より詳細な現地調査が必要となる。しかし、従来は環境影響物質の発生源を数km²の広さに絞り込む

手法がほとんどなく、この作業を解析のみで短時間で本手法に新規性を見ることができる。

7.4 実測値による比較検討

Fig.18に国立環境研究所で調査された水質測定データの年間最大CODの分布を示す。計測箇所が少ないため、詳細な検討はできないが、この資料からは環境基準点である多摩川原橋でCOD濃度が高くなっており、上流下流ともに低いので、環境基準点より上流部でCOD濃度を上昇させる環境影響物質が流出

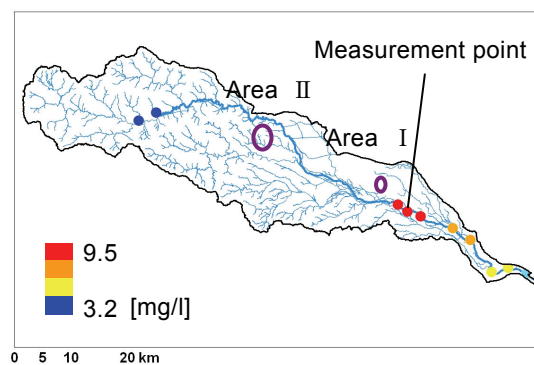


Fig.18 Annual maximum COD (2001)

していることがわかる。前節で示したパターンマッチによる解析結果で赤色になった領域Ⅰ及びⅡともに環境基準点と上流側の測定点の間にあることから、定性的には解析結果と実測結果はあっていることになる。

本手法の解析精度または信頼性を確認するため、今後は実測データの収集、メッシュ分割を工夫することによりメッシュ数を減らした重回帰分析、分布型流出モデルによる水質解析の検算などの別手法を検討しなければならない。

8. まとめ

本研究では、河川流域における環境影響物質発生領域の特定手法を開発し、環境影響物質（COD）の発生源を特定することを目指して、解析の一例を示した。今後は、今回解析した解析マップと国立環境研究所等の実測データや、分布型流出モデルによるシミュレーション結果を比較することで、本手法の精度を検証していく予定である。これにより本手法の信頼性が向上して汎用的に利用できるようになる。短時間で環境影響物質発生領域を特定できるようになる。その結果、清浄な水資源循環の回復に貢献するばかりでなく、環境アセスメントや都市計画への活用も期待される。

参考文献

- 阿部 徹・裴 義光・並木嘉男（2006）：面減負荷対策に関する研究，河川環境総合研究所報告第12号，pp.19-29.
- 環境省HP（2005）：改正湖沼水質保全特別措置法，<http://www.env.go.jp/>
- 環境省HP（1970）：水質汚濁防止法，<http://www.env.go.jp>
- 国土交通省HP：水文水質データベース，<http://www1.river.go.jp/>
- 国立環境研究所HP：環境データベース，<http://www.nies.go.jp/igreen/index.html>
- 小尻利治・東海明宏・木内陽一（1998）：シミュレーションモデルでの流域環境評価手順の開発，京都大学防災研究所年報，第41号B-2，pp.119-134
- 小尻利治・原山和也・田中賢治・浜口俊雄（2007）：事例ベースモデルと分布型流出モデルを併用した河川流量予測，京都大学防災研究所年報
- 筒井宏明・黒崎 淳・佐藤友彦（1997）：履歴データを事例として使用する非線形モデリング技術TCBM：Topological Case Based Modeling，計測自動制御学会論文集，Vol.33 No.9，pp.947-954

Development of a Method to Specify Source Areas of Environmental Impacts in a River Basin

Toshiharu KOJIRI, Chihiro TANAKA*, Kenji TANAKA and Toshio HAMAGUCHI

* Yamatake Corporation, Japan

Synopsis

In this research, the authors developed a method to estimate contaminant source areas of nonpoint load by analyzing the time series environmental impacts data in the river and the change of the time series rainfall distribution of the river basin, and focused on the outflow of nonpoint load mainly by the rainfall. In this research, TCBM, water quality data, RADAR rainfall data and GIS are combined. At first, the authors made a map that was colored in accordance with coefficients of correlation for each mesh to analyze, then considered the contaminant source areas by this map and GIS data (ex. Land used data, Altitude data etc.).

Keywords: Nonpoint load, Specifying source areas, Accumulate rainfall, Pattern matching, GIS