

自然－人間系水文・水質循環の共同集中観測と予測モデル開発

Intensive Observation and Model Development for Hydrological Cycle and Water Quality

研究代表者 椎葉充晴 教授 京都大学大学院都市環境工学専攻

Michiharu SHIIBA, Professor, Department of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University

アブストラクト：淀川水系の野洲川流域（387km²）を対象とし、水・物質循環への人為的なインパクトを明らかにするために水量・水質の共同集中観測を実施し、水・物質循環の動態を分析した。また、その観測結果をもとに、水・物質循環を表現する数値シミュレーションモデルを開発した。

Abstract: To clarify the impact of human activities on hydrological cycle and water quality, intensive observations on water quantity and quality were conducted at the Yasu River basin (387km²) in Japan. Based on the observation results, dynamic processes of water quality and quantity was analyzed, and numerical hydrologic simulation models were developed.

1. 研究目的

我が国における河川流域の水循環は、貯水池等による流水制御、農業による取水とその還元、上下水道の敷設など、人為的な効果が影響して非常に複雑なシステムを形成している。これまで、水・物質の循環機構を明らかにしようとする学問分野では、山地・農地・都市のそれぞれの地域における知見は確実に蓄積してきている。しかし、それらの地域が混在した流域という視点に立つと、自然の水・物質循環の上に人間活動がどのように影響を及ぼしているのかは明らかではない。このような水量・水質の循環・形成機構の理解や認識の不足のために、河川・湖沼、農業水路、上下水道等の各管理者間の関係が不十分となり、総合的・体系的な対策が講じられず、水・物質循環系に様々な弊害が生じつつあることが報告されている。

これらの問題点を解決するために、近畿圏のベッドタウンとして都市化が進行しつつある淀川水系野洲川流域（387km²、人口約20万人）を対象とし、水・物質循環への人為的な効果に焦点を当てつつ水・物質循環の共同集中観測を実施して、水循環の動態を明らかにすることを目的とした。また、その観測結果をもとに、人間活動の影響を陽に考慮する水・物質循環シミュレーションモデルを開発することを目的とした。

2. 研究経過

野洲川流域は琵琶湖に流入する最大の河川であり、琵琶湖の環境・水質を保全するためにも、その水量・

水質の循環の実態を把握し、予測モデルを開発することが非常に重要な課題となっている。また、野洲川が形成した扇状地の扇頂部では頭首工によって農業用水が取水され、下流での河川流量が減少している。そのため灌漑期には河川水が伏没して河道の一部が枯渇し、環境に悪影響を与える可能性が懸念されている。

これらの課題を解決するために、次の5課題を設定し、現地観測と予測モデル開発に取り組んだ。

- 1) 物理的基礎をもつ分布型流出モデルの構築
- 2) 河川水と地下水との相互作用の分析
- 3) 土壌・底質中ダイオキシン類分布とその挙動推定
- 4) 降雨に伴う懸濁態汚濁物質の流出機構の分析
- 5) 河川水質－汚濁物質の負荷源の解析

3. 研究成果

3.1 物理的基礎をもつ分布型流出モデルの構築

野洲川流域の石部地点よりも上流を対象とし地形(図1)や土地利用形態(図2)を陽に組み込んだ分布型流出シミュレーションモデルを構築した。このモデルでは流域を矩形の詳細なグリッドに分割し、その流れ方向を地形によって決定する。流れのモデルのパラメータは地形データと土地利用データから決定可能であり、Kimaro *et al.* (2003) はこのモデルを用いて土地利用の変化に伴う流出の変化を分析した。また、このモデルでは、農業取水などの人為的な効果や物質の循環を容易に取り込むことができるような機構を備えることも実現している。

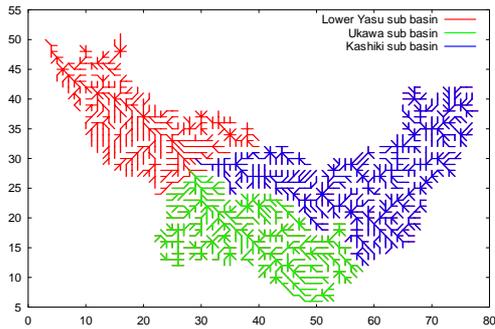


図1 野洲川流域の流域モデル(500m グリッド)

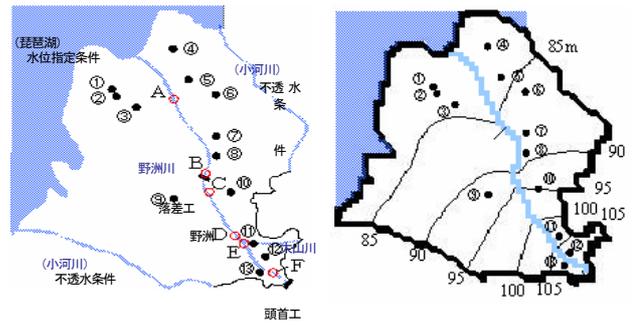


図3 野洲川下流域の流量観測点と計算結果

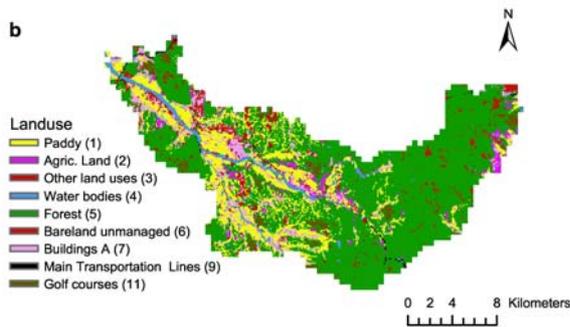


図2 野洲川流域の1997年における土地利用

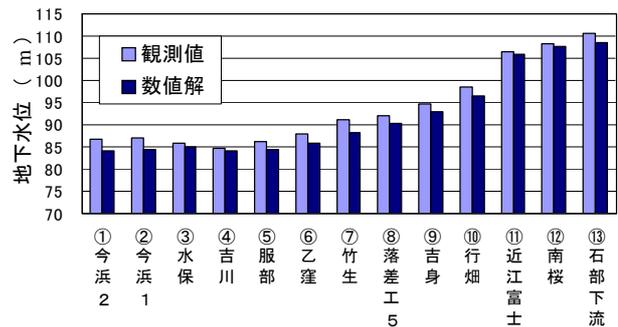


図4 地下水水位の計算値と観測値との比較

3.2 河川水と地下水との相互作用

低水時の河川流況を評価するために、河川と地下水との相互作用、特に両者の水交換に伴う河川流量の変化について、現地観測と水理解析の両面から検討した。

まず、頭首工の下流14 km区間での河道流量の変化を図3左に示す地点で観測し、地点DからBの区間において流量が減少することを明らかにした(原田ら, 2004)。この区間では支川の分岐がないため、この流量減少は河床への伏流浸透に起因する可能性がある。そこで、河川水と地下水との水交換を考慮しつつ、河道の流量変化および地下水水位の空間分布を計算することにより、河川水と地下水の相互作用に伴う河道の低水流況の再現を試みた。この現象は河川水と地下水の連成問題であるため、解析を行なう際には両者の支配方程式を同時に解く必要がある。図3右は現地観測を行った2002年9月3日の状況を想定して計算した地下水水位分布を示している。上流部では河道水位が周辺地下水水位よりも高く、河川水が地下へ伏流することを示している。一方、下流部では周辺地下水水位が河道水位よりも高くなるため、地下水が河道へ湧出することを表している。図4は地下水水位観測井(図3中の●印)における地下水水位の観測値と解析結果を比較したものである。観測値よりも解析結果がやや低くなっているが、

両者は全体的におおむね適合している。河川流量の計算結果も観測値とよい適合を示し、上流部では支川の合流部で流量が増加する以外は流量が減少する傾向にあること、中流部に位置する落差工より下流部では流量が回復するという結果が得られた(原田ら, 2004)。

3.3 土壌・底質中ダイオキシン類分布とその挙動推定

微量有機汚染毒性物質(以下、MOP)は一般に疎水性であることから、大気、土壌、底質、水の各相において粒子に収着した状態で存在し、化学・生物学的な分解を受けながら主に水流がドライビングフォースとなってゆっくりと輸送される。従って、大気以外の系でMOPが隣地の流域に自然輸送されることは考えにくく、表層土壌や底質には流域毎の特性が強く反映されることが推測される。これを明らかにするために、野洲川流域における表層土壌、河川底質及び河口底質のサンプリング調査を行い、MOPの代表格と言われるダイオキシン類(以下、DXNs)を測定項目としてその空間分布・移動特性を分析した(Sato *et al.*, 2003)。当該物質を選定した理由としては、分解性が非常に低いことから面源負荷の挙動を推測する指標物質として適当であること、起源の推定がある程度可能(主な起源は焼却由来と農業由来)であることなどが挙げられる。

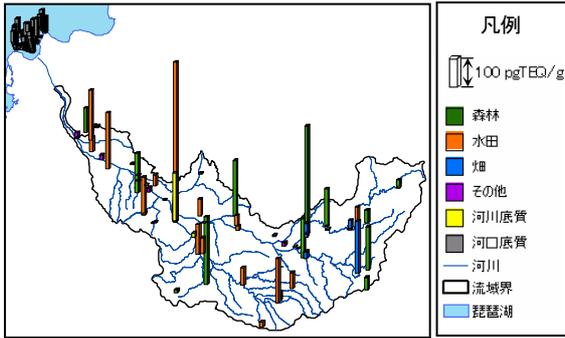


図5 DXNs 濃度の空間分布

図5に得られたDXNsの空間分布に示す。水田だけでなく森林にも、高濃度のDXNsが蓄積されていることが明らかとなった。また、河川・河口底質のDXNsは、表層土壌のそれに比べて低い値で分布していた。代表粒径を分析した結果からは、粒径が小さくなるほどDXNsを多く含む、つまり比表面積が増大するほどDXNsも増加するといった結果が得られた。

図6にはOC含有率とDXNs濃度との関係を示したが、この図から森林について両者の値に強い相関が見られた。これは焼却場から飛散するDXNsが大気を通して森林に供給される系(焼却由来)を表しており、図に示された線形性は長期間にわたるDXNsの大気-森林土壌間の分配が流域内で一定であることを示している。一方、水田については、OC含有率が低いにも関わらず高いDXNs濃度を検出した。これは、焼却由来に加えて、過去に散布された農薬(PCP, CNP)の副生成物による影響(農薬由来)が卓越していることを示している。

河川底質については、OC含有率とDXNsともに低く、DXNsを多く含む小さな粒子は、降雨による流出の際に、より下流へ運ばれていることが予測された。河口底質については、表層土壌と河川底質の中間付近に分布していた(図7)。これは河川から流入した懸濁物質の多くが河口付近で沈降しているためであり、より高濃度のDXNsを含む一部の粒子はさらに下流の琵琶湖あるいは、海域にまで輸送されている可能性が示唆された。また、図7の河口底質の分布域は水田の方にシフトした結果となっているが、これは土地利用などの流域・流出特性を反映したものであり、これらの特性がDXNsの分布・挙動に大きな影響を与えていることが分かった。なお、公定法による河口底質中のDXNsの異性体・同族体分布からは、水田土壌(農薬由来)の影響を明らかに受けていることが確認された。

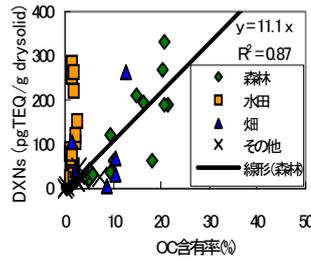


図6 DXNs VS. OC含有率 (表層土壌)

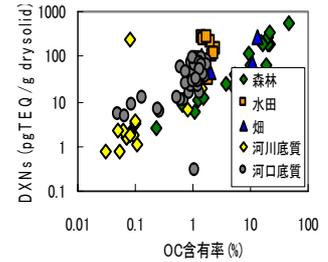


図7 DXNs VS. OC含有率 (表層土壌+底質)

3.4 降雨に伴う懸濁態汚濁物質の流出機構の分析

汚濁物質は溶存態と懸濁態に大別され、懸濁態汚濁物質は流出初期に流出しやすく、水溶性の低い一部の有害化学物質が土壌等の懸濁態粒子に吸着して流出する。このような汚濁物質の削減のためには濃度の高い初期流出水を貯留するなどの方策が検討されているが、浸水防止機能と協調した制御の検討や、沈殿処理の効率を評価するためには、粒径別に汚濁物質流出量を予測する必要がある。以上の観点から、雨天時の懸濁態汚濁物質の流出に関する現地調査を行い、その特性について検討し、モデル化を行った。

対象流域は野洲川水系の支流である磯尾川である。流域面積は5.4km²、森林域が約7割、河道沿いにある水田・畑が3割、集落域が1割を占める。下流と中流部の2点(新治橋・岩附橋)で2001年10月~12月に晴天時・雨天時の水位・水質観測を行った。従来、晴天時・雨天時を含めて、流出する有機汚濁物質(COD, TOC)や栄養塩(TN, TP)は溶存態のものが主であり、雨天時の懸濁態流出の比率はリンが高く、窒素は低いことが指摘されてきた。しかし、著者らが行った湖山池流域での観測では、窒素についても懸濁態比率が高く、流域によって流出機構の差異が予想された。磯尾川における雨天時観測ではの比率は12%と低かったが、直接流出開始時刻から流量ピークまでの間にほとんどの懸濁態物質は流出し、流量ピークよりも早い時間帯に流出していることがわかった。

これらの観測結果をもとに懸濁態汚濁物質の流出モデルを構築した。雨水流出のモデルとして基底流出にタンクモデル、直接流出にKinematic Runoffモデルを使用し、汚濁物質の流出モデルとして、溶存態物質についてはLQモデルを、直接流出の懸濁態についてはUS-EPAが提案したSWMMの表面負荷量流出サブモデルを利用した。このモデルを2002年11月29日の雨天時

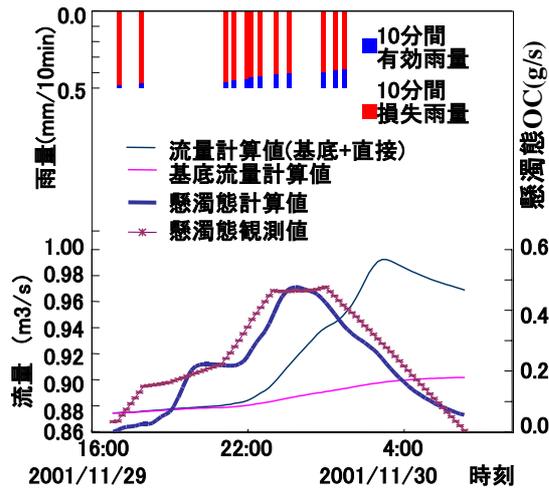


図8 懸濁態汚濁物質流出モデルの算定結果

観測値に対して適用した結果を図8に示す。流出初期の懸濁態汚濁物質流出量の再現性は高く、このモデルを用いて非灌漑期の汚濁物質流出量を算定したところ1.87kg-TOC/月/降水mm/km²という値を得た。

3.5 河川水質—汚濁物質の負荷源の解析

野洲川の河川水質と流域の土地利用状態との解析により、水田や畑地などの面源汚濁負荷源について、定量的に評価することを目的とした。流域全体を網羅する多数の水質観測地点を設けて、一年間にわたり河川水質の測定を詳細に行った。同時に、各水質観測地点に対応する流域を設定し、各種資料よりその土地利用状態について算定した。地点によって大きく異なる水質について、流域土地利用状況との統計解析から、各水質成分の負荷源について検討を行った。

溶存有機態炭素(DOC)を例に、濃度分布を図9に示す。野洲川の支流である杣川流域で濃度が高い傾向がある。これは、杣川流域に水田が多いことと対応しており、統計解析の結果、DOCについては水田が主な負荷源と特定された。DOC以外にも、マグネシウム、カリウム、全リン、リン酸態リンが、水田が主な負荷源であった。一方、硝酸イオンと硫酸イオンは畑が主な負荷源であることがわかった。また、野洲川の水質を土地利用状態から予測する式が得られ、各負荷源からの単位面積あたりの負荷量(負荷強度)を算定し、定量的に評価することができた。野洲川については、多くの水質成分について水田や畑が主な負荷源となることが判明した。



図9 溶存有機態炭素濃度の分布
(年8回測定の平均値)

4. 今後の課題と発展

野洲川流域の水・物質循環の実態を把握するための集中共同観測を実施し、その動態を分析した。また、その結果を元に数値シミュレーションモデルを構築した。本研究では、当流域で水文データの観測が開始された1960年代以降のすべてのルーチン観測データをデータベース化するとともに、土地利用などの流域情報を収集している。これらのデータをもとに流域全体を対象とする総合的な水・物質循環モデルの一層の進展を図る必要がある。なお、本研究を遂行するにあたり、国土交通省琵琶湖河川事務所と(株)日本建設コンサルタントにはデータ収集・観測等において多大な協力を得た。記して謝意を表す。

5. 発表論文リスト

- Kimaro, T. A., Y. Tachikawa and K. Takara: Evaluating land use change effects on flood peaks using a distributed rainfall-runoff model in Yasu River, Japan, IAHS, Publication, 282, pp. 241-248, 2003.
- Sato, K., Y. Shimizu, T. Suzuki, M. Takamatsu, S. Kim, H. Sogabe, M. Nakamura, J. Fujino and H. Yabushita: Distribution and movement of dioxins in Yasu River Basin, Japan, Advances in Asian Environmental Engineering, 3(2), pp.9-21, 2003.
- 立川康人・尾崎雄一郎・T. A. Kimaro・寶 馨: 野洲川流域における水循環の変遷について, 河川技術論文集, 第8巻, pp. 551-556, 2002.
- 原田守博・岡嶋和義・山田達也: 野洲川扇状地における河川水と地下水との水交換に関する考察, 土木学会水工学論文集, 第48巻, pp. 385-390, 2004.