

「水の循環系モデリングと利用システム」

平成 14 年度採択研究代表者

古米 弘明

(東京大学大学院工学系研究科 教授)

「リスク管理型都市水循環系の構造と機能の定量化」

1. 研究実施の概要

研究のねらい

流域圏外からの水の導入に依存したフロー型都市水利用システムには限界があり、“持続可能な”水資源の確保、健全な水循環の観点から、都市域における雨水・涵養地下水利用や排水再利用に多くの期待が寄せられている。新たな水利用を推進するためにも、都市自己水源の「質」の動態変化を理解した上でその利用可能性を検討すること、水用途の視点からそのリスクや許容性を踏まえた検討をすることが非常に重要であると考えられる。

研究の概要

模擬道路排水を対象とした土壌カラム浸透実験を完了するとともに、過去 2 年間での全国 37 河川 40 地点の水質調査データに加えて、都内地下水や湧水などの環境水試料について多面的な化学分析およびバイオアッセイのデータ収集を進めた。これにより、道路排水や下水処理水、さらにはそれらの土壌浸透水の水質レベルを相対的に評価するための水質データの蓄積を完了させた。そして、水利用者や利害関係者にわかりやすい水質リスク表示のあり方やその方法論を確立するとともに、水質リスク評価と水利用用途との相互関係、水環境の創出と地下水涵養の関係、水需要量と都市自己水源量の関係について議論を深めた。

また、カラム実験および水質調査の研究成果を統合・総合化する作業として、水質リスクのスコアリング・ラベリング・ランキングに基づく、都市自己水源の適正な配置とその利用へ向けた具体的なアプローチ案を作成した。特に、絶対的な水質基準と国内河川水質の累積頻度分布を参照する水質スコアの妥当性、水利用用途を考慮したラベリングとランキング手順を精査して、都市の水の安全性評価手法や表示のあり方の課題整理と対応案を検討した。

グループ単位の研究成果としては、道路塵埃や浸透堆積物中の重金属特性解析、土壌浸透過程における重金属類の挙動評価、高分解能衛星画像を利用した浸透域や植生地の抽出アルゴリズムの開発、放射性同位体元素を利用したエストロン分解菌の探索、河川や地下水中のフッ素系界面活性剤や医薬品類の検出、道路排水の土壌浸透処理による生物毒性の消長、アジアのメガシティにおける水文学的な水収支推定、エコロジカルフットプリントに類似した概念に基づき、雨水浸透・地下水涵養の効果的達成方策を評価するための新たな指標

開発に関する研究を進めた。

研究の成果と今後の見通し

各研究グループの知見を統合しながら、流域と都市の水循環系、水環境の創出と地下水涵養の関係、下水処理場の規模と配置、都市内の自己水源の再利用方策について議論を深め、都市自己水源の適正配置とその利用へ向けた具体的なアプローチ案の妥当性について実務者レベルでの議論を深める。そのために、水質データやリスクラベリングやランキング手法の研究成果を社会に還元するための整理を進める一方で、実務者へのアンケートやワークショップ、国際シンポジウムでの討議を踏まえて最終的なプロジェクト全体としてのとりまとめを行う。

2. 研究実施内容

1) 都市ノンポイント汚染物質の動態評価・モデル解析

都市域の雨天時流出水に含まれる重金属類の特性を評価するために、幹線道路塵埃、住宅地道路塵埃、雨水浸透柵堆積物を対象として、電子線マイクロアナライザーによる解析を行った。また、塵埃・堆積物の起源を推定するために、道路標識用の黄色塗料などについても分析した。その結果、幹線道路塵埃では Cr、Pb の両方を含有する粒子が多く存在したのに対し、住宅地道路塵埃及び柵堆積物では、両方とも含有している粒子は少ないことが示された。また、道路標識に用いる 3 種類の黄色塗料を分析したところ、3 種類ともに Cr 及び Pb を含有し、Cr と Pb との X 線強度比は、幹線道路塵埃の X 線強度比と概ね一致することが判明した。

土壌浸透過程における重金属類の挙動を評価するために、土壌カラムを用いて模擬道路排水を 12 週間にわたって連続通水/間欠通水し、重金属のカラム内における挙動を追跡した。本研究では、抽出条件に応じて、重金属類を残留画分、酸化画分、還元画分、酸交換画分に分類した（酸化画分、還元画分、酸交換画分は、可動性画分と見なした。）。間欠通水条件では、連続通水条件に比べて、可動性画分の重金属類が減少する傾向が示された。また、カラム内の土壌に含まれる腐植物質の特性を FT-IR (Fourier Transform-Infrared Spectrometer) によって解析したところ、連続通水している土壌と間欠通水している土壌とでは、腐植物質の FT-IR スペクトルに顕著な差異が見られ、通水条件が土壌有機物の特性にも影響を与えることが示唆された。

都市ノンポイント汚染物質の流出解析の精密化を目的として、市街地の高分解能衛星画像から浸透域である植生地を抽出するアルゴリズムについて検討を行った。今回用いた IKONOS 衛星画像では、赤色光、青色光、緑色光、近赤外光の情報を利用することができる。従来、植生地の抽出に用いられてきた正規化植生指数 ($NDVI = \frac{\text{近赤外光} - \text{赤色光}}{\text{近赤外光} + \text{赤色光}}$) では、植生地と青・緑色の屋根とを区別することが困難であることから、抽出条件の最適化を進めた。その結果、(赤色光 - 近赤外光)、(緑色光 - 近赤外光)、(青色光 - 近赤外光) という 3 つの差分値を組み合わせた判定条件を設定することにより、

人工芝や緑・青色の屋根を除外して、植生地のみを精度よく抽出することに成功した。

2) 地下水圏の浄化能を考慮した地下水の適正利用手法の開発

模擬道路排水を対象とした土壌カラム地下水涵養実験を昨年度から継続して行なった。その水質分析およびバイオアッセイの結果は次項の3)、4)にまとめて示した。

下水処理水を土壌浸透させて地下水涵養に用いる場合、処理水中に含まれる汚染物質の影響が懸念される。土壌への負荷を正確に評価するためにも、下水処理過程における汚染物質の除去特性を事前に把握することが重要と考えられる。放射性同位体元素で標識したエストロンをスパイクしたバイアルに、2箇所の下水処理場から採取した活性汚泥を添加し、培養を行ったところ、16時間以内にエストロンはほぼ全量分解されることが確認された。培養6時間後、10時間後の試料を採取し、放射性同位体元素を取り込んだ細菌を特定するとともに、FISHによってその系統的な情報を評価した。放射性同位体元素を取り込んだ細菌は、全細菌数の4-5%に相当し、それらの多くは *Alphaproteobacteria*、*Betaproteobacteria*、*Gammaproteobacteria* と同定された。土壌においても、これらの細菌群がエストロン分解に関与するかどうか、今後の課題である。

3) 都市域水循環・再利用から見た都市排水の水溶性微量汚染の評価

本年度は、水溶性微量汚染物質であるフッ素系界面活性剤 **perfluorooctane sulfonate (PFOS)**、**perfluoroheptanoic acid (PFHpA)**、**perfluorooctanoic acid (PFOA)**、**perfluorononanoic acid (PFNA)**、**perfluorodecanoic acid (PFDA)**、**perfluoroundecanoic acid (PFUA)**、**perfluorododecanoic acid (PFDDA)**、**perfluorotridecanoic acid (PFTDA)**、**perfluorooctane sulfonamide (FOSA)**の分析方法を確立した。一級河川、地下水および道路排水中のフッ素系界面活性剤、医薬品類、抗生物質の汚染実態を明らかにした。一級河川および地下水からフッ素系界面活性剤、医薬品類、抗生物質が検出され、特に **PFOA** は **New Jersey, Department of Environmental Protection** による飲料水の暫定的な指針値 **40 ng/L** を超過する河川や地下水が複数存在した(図1)。また、道路排水中からフッ素系界面活性剤が検出されることを世界で初めて明らかにした。河川水中の **PFOS**、**PFHpA**、**PFNA** は、都市排水の有力な指標であると考えられた医薬品 **crotamiton** と強い相関関係が認められ、下水処理水などの都市排水由来であると考えられた。一方で、**PFOA** と **crotamiton** との相関関係は弱く、**crotamiton** 濃度が低いにもかかわらず **PFOA** が高濃度で存在するような河川も存在した。**PFOA** は都市排水に加え、工場などの特定の汚染源が存在することが考えられた。地下水中のフッ素系界面活性剤や医薬品類の検出により、未処理下水が土壌へと浸透し、地下水汚染を引き起こしている可能性が示唆された。フッ素系界面活性剤や医薬品類は、土壌カラム実験によって土壌での除去率が低いことが確認されており、地下水における存在と調和的であった。

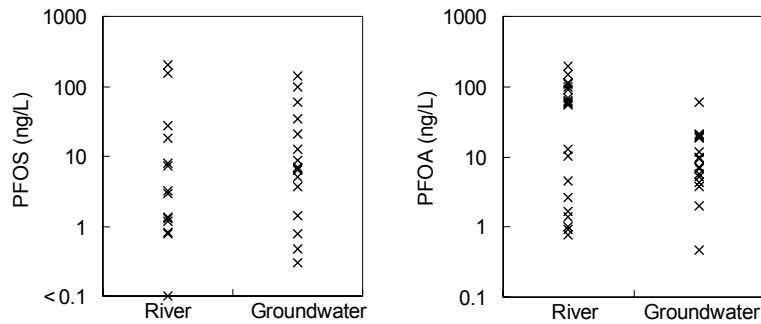


図 1. 一級河川及び地下水中のフッ素系界面活性剤

4) 都市水循環システム構築のための水質リスクの多面的評価

道路排水を地下浸透させることを想定し、その際の生物への毒性の消長について研究を行った。実際の道路から採集した塵埃をもとに調製した模擬路面排水を用いて土壌浸透カラム処理実験の試料を対象に、処理前後における試水の生物毒性をバイオアッセイによって試験した。また、併せて模擬路面排水と比較するために実際の降雨時路面排水、さらに都内 6 地点から採取した地下水についても同様に試験を行った。

雨天時路面排水、模擬路面排水、土壌カラム処理した模擬路面排水に対して、以下のバイオアッセイを行った：1) 発光細菌による発光急性阻害試験 (Microtox®)、2) 藻類生長阻害試験 (AGI)、3) ミジンコ遊泳阻害試験 (Daphtoxkit™)、4) カエル胚発生阻害試験 (FETAX)、5) 遺伝子組み換え酵母によるエストロゲン様活性試験 (YES)、6) 変異原性生成能試験 (Ames)。

この結果、Daphtoxkit 及び FETAX においては明確な毒性が検出されなかったが、Microtox、AGI、YES、Ames では、土壌カラムによって路面排水中に検出された活性や毒性が低下する傾向が認められた。

例えば Microtox による毒性変化について、全国の河川 (37 河川) 及び今回扱った地下水 (6 箇所) で調べた毒性の非超過率分布に当てはめて図 2 に示す。ここから、路面排水の毒性が、土壌浸透処理によって河川水等における毒性の範囲にまで低下した。しかし、土壌浸透処理路面排水の毒性を非超過率で見ると依然 70~80%の範囲であり、河川水等と比べると毒性は高いレベルにあるといえる。一方、Ames では、運転前半は変異原性生成能の変動が大きかったが、運転後半は安定して高い除去率 (75~86%) が得られた。また、そのレベルは河川水等における非超過率 15~30%の範囲となった。

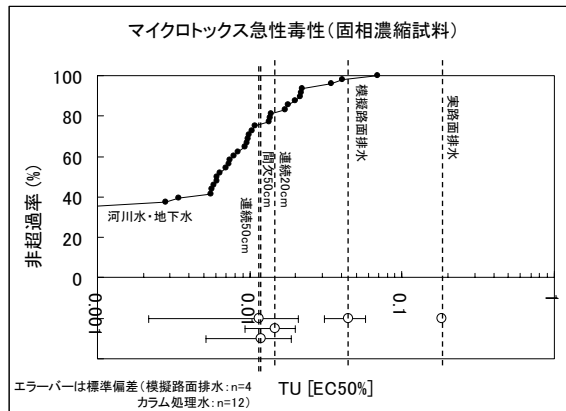


図2. 土壌浸透処理による Microtox による毒性変化

5) 水資源の再利用と適正配置モデルの構築

大小流域の表流・地下水に適用可能な水理・水文モデルに洪水の背水・氾濫を含めメグナ川流域に適用した。別途、懸濁・溶存態と吸着沈降を扱えるように拡張しダッカ都市域の底質濃度と比較した。さらに、日本を含むアジアのメガシティ（人口100万人以上）における実蒸発散量、表面流出量、地下浸透量を推定し、都市の水収支の相対比較のために人口1人当たりの年間水資源賦存量を試算した。

また、昨年度構築した水環境評価モデルで有効性が示された「地下水涵養を通じた水収支バランス化」の達成方策を対象として、新たな指標（ウォーターサプライフットプリント指標）の適用を通じた、方策の有効性や効果を定量的に明示した。

6) 水資源の適正配置と再利用に向けた水質リスク評価方法の展開

まずリスク関連では、スコア・ラベル・ランク化において水質基準・生態的事象から3段階スコアを設定し、一級河川42ヶ所の実測データによる妥当性の検証を行った。その結果、金属元素類で危険域スコアが見られたのは、性状から設定されたFe、Mn、Alの項目ならびに水生生物生育環境保全の観点でのZnであり（図3）、想定影響の明確化（ラベル）の必要性が示された。

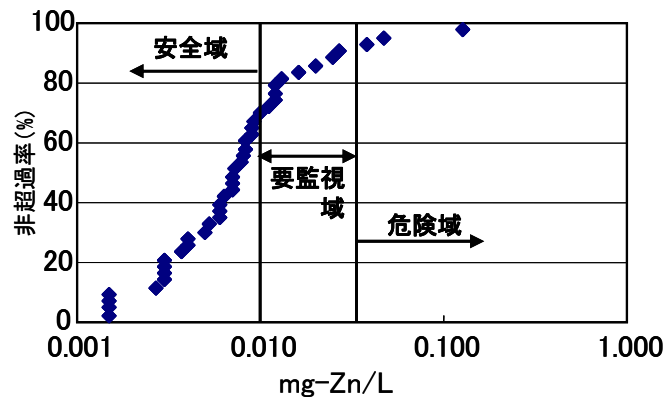


図3. 都市河川データのスコアリング結果（亜鉛・水生生物生育環境保全の観点）

また、研究成果を社会に還元するための最終年度の方針を決定した。最終年度には、上述の各種水質リスクのラベリング方法と有効性について、5～6月に実務者向けの説明会とインタビューを実施することとした。そこでの意見を踏まえ、さらに国内の専門家を招聘したディスカッションのための国内ワークショップを企画し、最終的な成果は10月開催の国際シンポジウムで発表することとした。

3. 研究実施体制

(1) 「東京大学」グループ

①研究者名

古米 弘明（東京大学大学院工学系研究科 教授）

②研究項目

- ・都市ノンポイント汚染物質の動態評価・モデル解析と
- ・地下水圏の浄化能を考慮した地下水の適正利用手法の開発

(2) 「東京農工大学」グループ

①研究者名

高田 秀重（東京農工大学大学院共生科学技術研究部 助教授）

②研究項目

- ・都市域水循環・再利用の観点から見た都市排水の水溶性微量汚染の評価

(3) 「土木研究所／京都大学」グループ

①研究者名

田中 宏明（京都大学大学院工学研究科 教授）

②研究項目

- ・都市水循環システム構築のための水質リスクの多面的評価

(4)「岡山大学」グループ

①研究者名

小野 芳朗（岡山大学大学院環境学研究科 教授）

②研究項目

- ・水資源の再利用と適正配置

(5)「いであ株式会社」グループ

①研究者名

伊藤 光明（いであ株式会社 常務執行役員）

②研究項目

- ・地下水圏の浄化能を考慮した地下水の適正利用手法の開発

4. 研究成果の発表等

(1)論文発表(原著論文)

- 山下尚之、田中宏明、宮島潔、鈴木穰:AGP 試験と藻類生長阻害試験を用いた下水処理水の河川水質に対する影響評価、土木学会論文集G, Vol.62, No.1, pp.191-200, 2006
- Norihide Nakada, Toshikatsu Tanishima, Hiroyuki Shinohara, Kentaro Kiri, Hideshige Takada: Pharmaceutical chemicals and endocrine disrupters in municipal wastewater in Tokyo and their removal during activated sludge treatment. Water Research, Vol.40, pp.3297-3303, 2006.
- 古米弘明:都市水循環系における汚濁物の流れと持続的水利用、環境科学会誌, Vol.19, No.5, pp.425-434, 2006
- 村上道夫、中島典之、古米弘明、Rupak K. Aryal:道路塵埃及び雨水浸透柵堆積物への重金属類の蓄積、環境科学会誌, Vol.19, No.5, pp.453-460, 2006
- 篠原裕之、村上道夫、真名垣聡、小嶋早和香、高田秀重、佐藤修之、鈴木穰、中田典秀:土壌浸透過程における水溶性微量有機物質の除去、環境科学会誌, Vol.19, No.5, pp.435-444, 2006
- 村上道夫、中島典之、古米弘明、加藤勇治:東京都内の道路塵埃中重金属類の溶出特性、水環境学会誌, Vol.29, No.11, pp.731-735, 2006
- R.K. Aryal, H. Furumai, F. Nakajima, M. Murakami and H.K.P.K. Jinadasa: Prolonged deposition of heavy metals in infiltration facilities and its possible threat to groundwater contamination, Water Science & Technology, Vol.54, No.6-7, pp.205-212, 2006
- 氏原岳人、谷口守、古米弘明、小野芳朗:ウォーターサプライ・フットプリント指標を用いた都市活動配置評価 ―水利用・循環の視点から地区整備を考える―、環境システム研究論文集, Vol.34, pp.507-513, 2006

- 原田新、中田典秀、山下尚之、佐藤修之、伊藤光明、鈴木穰、田中宏明、古米弘明:全国河川水質分布との相対比較による都市再生水の水質評価、環境工学研究論文集, Vol.43, pp501-508, 2006
- Norihide NAKADA, Naoyuki YAMASHITA, Kiyoshi MIYAJIMA, Yutaka SUZUKI, Hiroaki TANAKA, Hiroyuki SHINOHARA, Hideshige TAKADA, Nobuyuki SATO, Mikio SUZUKI, Mitsuaki ITO, Fumiyuki NAKAJIMA and Hiroaki FURUMAI: Multiple Evaluation of Soil Aquifer Treatment for Water Reclamation using Instrumental Analysis and Bioassay, In: Southeast Water Environment 2 (Eds: H. Furumai et al.), pp.303-310, IWA Publishing, 2007
- H. Shinohara, T. Tanishima, S. Kojima, S. Managaki, H. Takada, N. Nakada, H. Tanaka, F. Nakajima and H. Furumai: Water-soluble organic micro-pollutants in municipal wastewater and their removal during advanced treatment, In: Southeast Water Environment 2 (Eds: H. Furumai et al.), pp.311-318, IWA Publishing, 2007
- Michio Murakami, Fumiyuki Nakajima, Hiroaki Furumai, Bunbunoshin Tomiyasu, Masanori Owari: Identification of particles containing chromium and lead in road dust and soakaway sediment by electron probe microanalyser, Chemosphere, Vol.67, No.10, pp.2000-2010, 2007
- T. Kose, T. Yamamoto, A. Anegawa, S. Mohri and Y. Ono: Source analysis for polycyclic aromatic hydrocarbon in road dust and urban runoff using marker compounds, Desalination, (in press)