

リスク管理型都市水循環系の 構造と機能の定量化

研究代表者
古米 弘明

リスク管理型都市水循環系の構造と機能の定量化

研究代表者 東京大学大学院工学系研究科 古米弘明

1. 全体構想

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、持続可能な水資源確保や健全な水循環系を構築するためには、都市域における雨水・涵養地下水利用や排水再利用が求められる(図1)。そこで、都市自己水源の「質」の動態変化を理解するために、微量汚染物質の雨天時流出挙動の評価、道路排水や下水処理水の地下浸透に伴う浄化機構の解明、医薬品を含めた微量汚染物質の分析、様々な水試料についての水質リスクの多面的な評価を行い、水利用におけるリスクと許容性の判断基準を明示して、都市自己水源の再利用と適正配置を提案することを目指している。

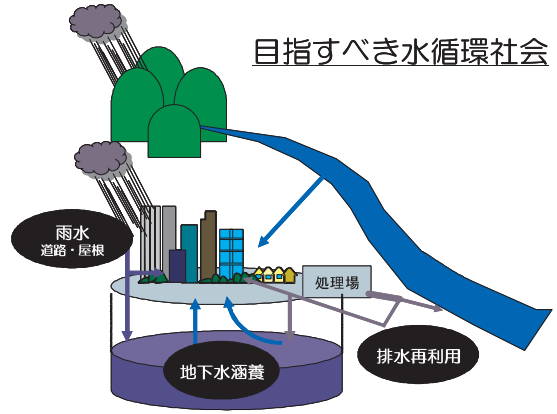


図1 目指すべき都市水循環

2. 研究手法・体制

研究は以下の5グループが分担し、それぞれのグループの分担内容および相互関係は図2に示すとおりである。

- (1) 東京大学 大学院工学系研究科都市工学専攻 (古米弘明)
- (2) 東京農工大学 大学院共生科学技術研究部環境資源共生科学部門 (高田秀重)
- (3) 独立行政法人土木研究所 水循環研究グループ/京都大学 大学院工学研究科附属環境質研究センター (田中宏明)
- (4) 岡山大学 環境理工学部環境デザイン工学科 (小野芳朗)
- (5) 国土環境株式会社 環境総合研究所 (伊藤光明)

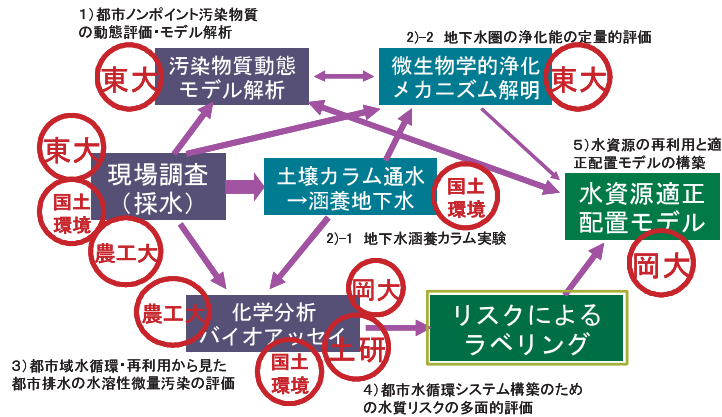


図2 本研究課題の研究項目と分担

都市自己水源の再利用と適正配置を提案することが最終的なゴールとなるが、そのための重要な段階として、様々な都市内自己水源の水質を多面的に評価し、図3に示すようなリスクラベリングを行う。リスクラベリングにおいては、得られた多面的水質データの絶対的な解釈ではなく、従来の水源（河川表流水など）との相対的な比較が有効であると考え、対照としての表流水データの充実が不可欠である。また、より積極的な自己水源の開発と管理へ向けて、都市内自己水源の水質の形成機構と水量のダイナミクスについても科学的検討を加える必要がある。その目的のために、土壌カラムを用いた室内実験により化学的・微生物学的側面から水質変化機構を明らかにし、また、雨水浸透施設における水量変動と有害物質の挙動の動的モデルの開発を行う。

本発表においては、リスクラベリングの基本的枠組みを提示するのに不可欠な全国の表流水（河川水）の多面的水質調査の結果と、都市内自己水源のひとつである再生水（下水処理水）とその土壌カラム浸透水の水質についてまとめる。

都市域において 想定される 水資源のタイプ	リスクレベル(濃度, EC50等)						利用可能性(◎○△×)				
	化学 物質 A	B	...	パイ オ ア ッ セイ α	β	...	飲 料 水	雑 用 水	修 景 用 水	地 下 水 涵 養	...
表流水(対照として)											
地下水(対照として)											
道路排水											
屋根排水											
下水処理水											
涵養 地下水	道路排水										
	屋根排水										
	下水処理水										

Stakeholderの選択自由度の増大 ←

図3 リスクラベリングのイメージ

3. 研究成果と考察

3-1 全国河川水の多面的水質調査

①研究のねらい

再生水の利用を推進するために、水の利用先の視点から、そのリスクや許容性を検討することが重要であると考えられる。このため、再生水のリスクについて、相対的な評価を行う際に用いる物差しのようなものが必要となる。その第一段階として、相対的な基準とする基礎データを集めるため、実際の河川における水質の分布を調査した。

②研究実施方法

②-1 流域情報の整理

流域情報を整理するために、国土交通省が作成した88の河川地図を用いた。これらの地図を参考に流域に含まれる市町村とその面積を調べた。各市町村の人口は住民基本台帳を利用した。また、公共下水道処理人口、合併浄化槽処理人口、農業集落排水処理人口、コミュニティプラント処理人口などの汚水処理形態別人口は、国土交通省から資料提供を受けた。これらの集計値に基づいて、流域内の人口密度、及び汚水処理整備率を計算した。次いで、これらの値と河川水質のデータを比較し、検討を行った。

②-2 対象河川の選定

地域特性を考慮して全国9つの地方整備局から4河川ずつ計36河川を選定した。選定に用いた指標はBOD、流域面積、河川距離、人口密度とし、指標の数値を均等な間隔で選定した。

このようにして河川を選択した時に、形成される指標項目分布のヒストグラムパターンが、全河川のパターンと最も近いものを選定の指標とした。なお、ヒストグラムで確認した項目は、BOD、エストロゲン様活性、汚水処理整備率、流量とした。

②—3 選定河川の調査

選定した河川のうち 19 の河川について、地方整備局の協力を得て 2004 年 11 月～12 月に採水を行った。採水した水を用いて試験した項目は、水質については、一般水質項目、栄養塩類、環境ホルモン関連物質、重金属、医薬品、洗剤由来物質、多環芳香族炭化水素類等を、生物を用いた試験として、変異原性や生物毒性等とした。

エストロゲン様活性、T-N、T-P、BOD についてはデータを非超過率の形で整理、検討を行った。

③現在の研究進捗状況

現在までに全体計画の約半分にあたる 19 河川 (21 地点) について調査を実施した。今後は、選択した残りの河川を調査するとともに、地下水などについても調査を追加して、水質分布範囲を拡げ、精度を上げる予定である。

また、再生水の水質についても、同じ方法を用いて河川水質との比較を行い、分析項目を重金属や微量物質、バイオアッセイなどに拡げて実施する予定である。このことにより、多くの水質項目について、様々な環境水における水質分布を把握することができるため、得られた結果を再生水のリスク評価における物差しとして適用できるようになると考えられる。

④研究結果

④—1 流域情報の整理

河川の流域情報と各水質項目のデータを比較した結果を、図 4 と図 5 に示す。

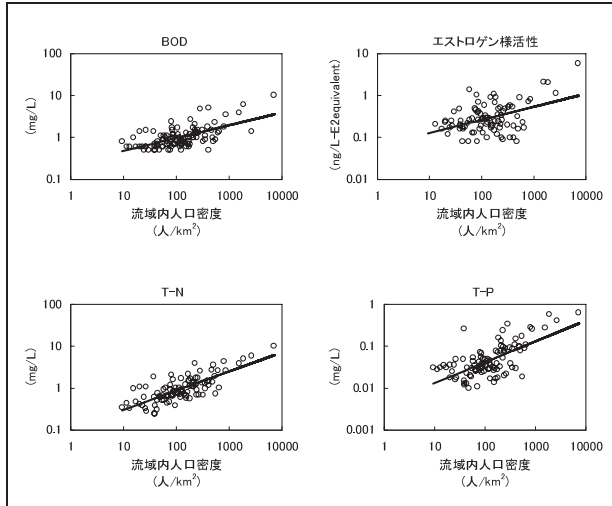


図 4 人口密度と水質

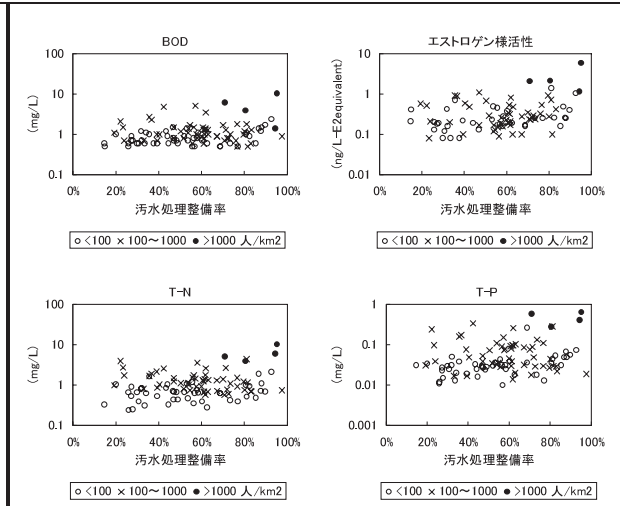


図 5 汚水処理整備率と水質

この結果、流域の人口密度と水質との間には正の相関が確認され、人口の集中が水質の変化に大きく寄与していることが推察された。一方、汚水処理整備率と水質との間に明確な傾向は確認できなかったが、流域人口の高い地点 (1000 人 /km² 以上) に注目すると、汚水処理整備率が高いにもかかわらず、水質濃度については高い値となった。都市部に位置する河川では、水資源の複雑な運用に伴い、下水処理水などの再生水が河川に占める割合は非常に高くなっており、河川流量に占める汚水処理水量の占める割合高まっていることが原因と考えられる。

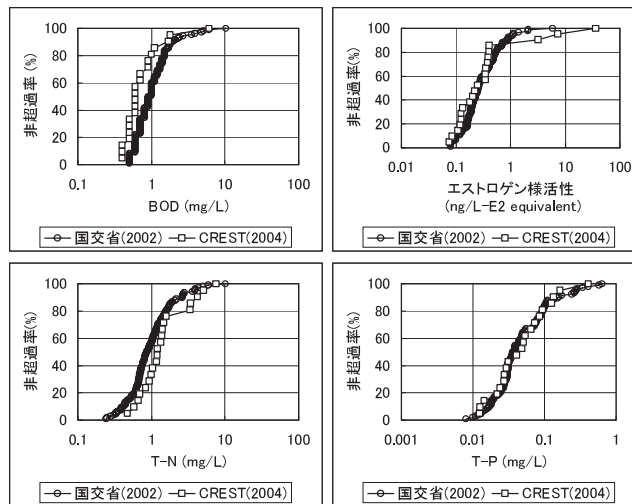


図6 全国河川データと選定河川データの非超過率による比較

b. 変異原性ポテンシャルの調査

水質リスクの中でも発ガン性や催奇形性と関連が深い変異原性の観点からの評価を行うため Ames 変異原性試験を実施した。環境水は一般に塩素を添加することで変異原性レベルが上昇することが知られている。本研究では安全側の評価を行なうため、また涵養地下水等の最も高水質が求められる利用用途を水道原水と考えていることから、塩素を添加した試料水の変異原性、すなわち変異原性生成能 (Mutagen Formation Potential, MFP) を測定した。試料中の変異原性物質は CSP-800 カートリッジを用いた固相抽出法で 1000 倍に濃縮し、TA98 ± S9、TA100 ± S9 の 4 条件で Ames 試験を行った。MFP の強度は河川水 1 L 当りの正味の復帰コロニー数で評価した。その結果、河川水でみられる一般的な傾向と同様に MFP は TA100 — S9 条件で最も高い値を示した。河川水 (19 河川、21 試料) の TA100 — S9 条件での MFP 強度は 210 ~ 9010 net rev./L と大きな幅を示した。しかし、極端に高い鶴見川を除くと最大値が 3390 net rev./L であり、水道水の変異原性レベルにおいて重点的な対策が望ましいと提案されている 3000 net rev./L を大きく上回る試料はなかった。鶴見川を除いた平均値は 1750 net rev./L、中間値は 1705 net rev./L であり、同一地方では流域面積の大きい河川の方が MFP は高い傾向にあること、大都市が立地する河川は MFP が高いことなどの特徴が認められた。また一般的な水質項目との関連を検討した結果、今回の河川水の MFP は DOC および E260 との間に中程度の正の相関が確認でき、鶴見川を除いた相関係数は DOC : $r = 0.66$ 、E260 : $r = 0.50$ であった。

c. 合成洗剤関連物質の実態と要因

量的に最も多く使われている陰イオン界面活性剤 LAS (直鎖アルキルベンゼンスルホン酸塩) とその分解産物である SPC (スルフォニルカルボン酸)、および洗剤に含まれる蛍光増白剤 (FWAs) である 2 成分 (DSBP と DAS1) について、河川水中の濃度を高速液体クロマトグラフタンデム質量分析計を用いて分析した。結果を図 7 に示す。

全国 18 の一級河川のモニタリング調査の結果、FWAs、LAS 及び SPC が広い範囲で検出され、洗剤による汚染が全国の河川で広がっていることが明らかになった。これらの洗剤成分は都市河川で高濃度になるという傾向を示した。下水処理水の流入のある多くの河川で LAS よりも SPC が高濃度で検出された。これはこれらの河川において下水道普及率が高く、下水処理過程において LAS の分解により生成した SPC が高濃度で含まれる下水処理水の流入割合が高いことによると考えられる。

LAS は過去数十年来モニタリングが数多くおこなわれてはいるが、今回のように全国の河川を網羅した合成洗剤関連物質の総合的なモニタリングは初めてである。全ての河川から洗剤汚染が認

められたことで広域に渡る合成洗剤汚染が明らかとなった。LASだけでなく、SPCのような分解産物、蛍光増白剤も含め、合成洗剤の総合的なリスク評価を行っていく必要がある。また、上記で対象とした合成洗剤成分以外にも、河川水から生活排水に含まれる医薬品や抗生物質など様々な汚染物質が検出された。

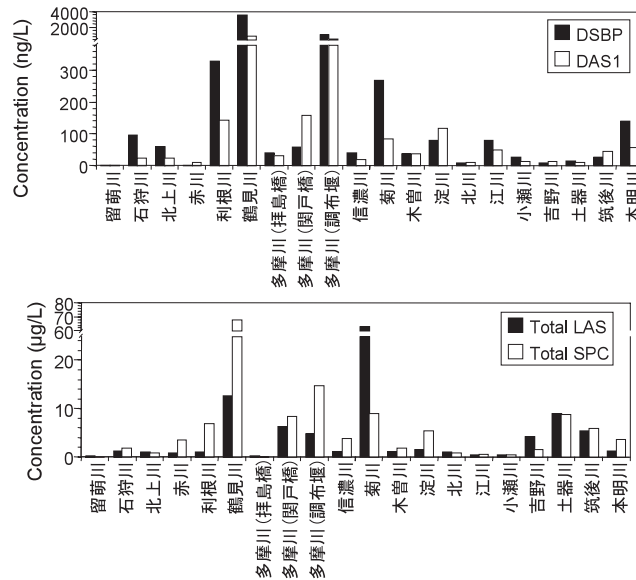


図7 河川水におけるFWAs, 全LAS, 全SPCの濃度

d. 水質項目毎の濃度分布

分析した水質項目について、項目ごとに非超過率の形に整理した。例として4物質についてのグラフを図8に示す。ここから、河川における濃度分布を把握することができ、さらにある多くの河川では満足している濃度レベルや、極端に悪い場合の濃度レベルを把握することができる。これらの情報は、再利用水の水質リスクを検討する際の一つの物差しとして重要な参考になると考えられる。

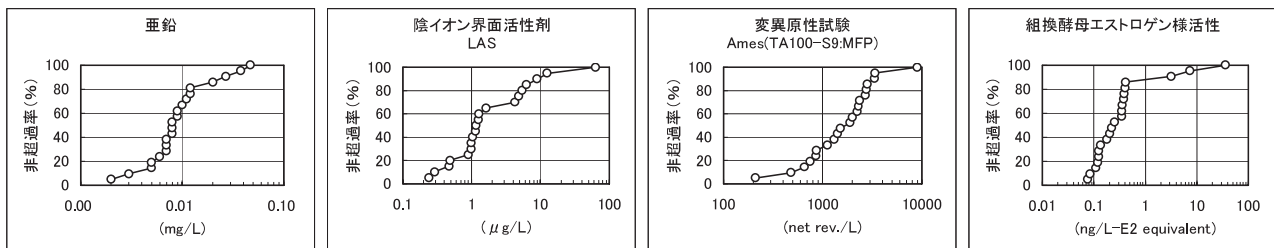


図8 河川水質濃度分布（非超過率）

e. 河川ごとの水質特性

各河川の水質は、それぞれの特徴があり、一つの項目については濃度が低くても、別の項目では濃度が高いなど、その組み合わせは多様である。

そこで、各河川の特徴を把握すると同時に、水質のグループ分けを検討する方策の一つとして、レーダーチャートによる整理を行った。

ここでは、未処理排水の指標として「医薬品のアスピリン (Aspirin), 洗剤関連物質のスルホンカルボン酸 (SPC), アンモニア態窒素 (NH₄-N)」の3項目を、また下水処理水由来の指標として「医薬品のクロタミトン (Crota.), 洗剤関連物質 (LAS), 環境ホルモン関連物質として組換酵母エストロゲン様活性値 (YES)」の3項目を、さらにこれらに加えて、有機汚濁として [BOD]、

変異原性ポテンシャルとして [Ames 試験] をそれぞれ代表の指標として整理した。

なお、扱う水質項目の測定単位は様々であることから、前述の非超過率における数値を用いてグラフ化し、例として4河川について図9に示した。

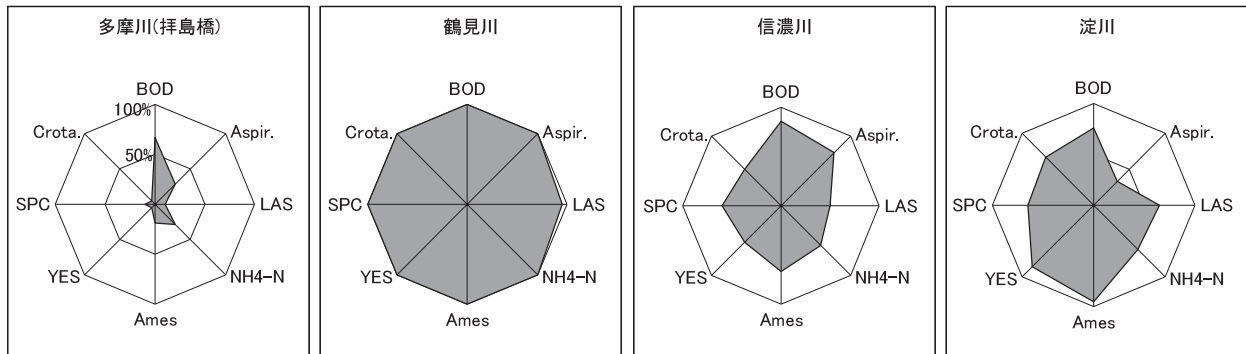


図9 河川ごとの水質特性

このようにグループとして、ほとんどの項目で低い但未処理排水に由来する項目がやや高い、ほとんどの項目で高い、各項目で比較的均等、やや処理水由来の項目が高い、などのパターンがみられた。

ここに、各水質項目のリスク要素を加味して再整理することで、再利用水の水質をグループ化してリスク評価する際の比較データとすることができると考えられる。

f. 今後の課題

都市自己水源の利用にあたっては、河川をはじめとする多様な水源における、様々な水質項目の濃度レベルを包括的に把握し、それに基づき利用対象とする水源の適切なリスク評価をおこなっていく必要がある。

今後は、残りの選定河川における調査を実施し、さらにデータを積み重ねることで、水質分布の精度を上げること、また、地下水や湖沼水などの多様な水域の水について同様に調査することで、水質リスクの物差しのベースとなるデータの幅を拡げていくことを目指す。

3-2 下水処理水の土壌カラム浸透実験

①研究のねらい

将来的な水資源の枯渇を考慮し、都市域内で水を循環再利用する、つまり循環型水利用形態の構築が必要である。そのため、雨水・地下水の利用や、下水処理水などの排水再利用に多くの期待が寄せられている。しかし、水の再利用においては、量的な問題だけではなく、水の用途の違いからそのリスクを把握するといった質的な問題についても検討をすることが非常に重要であると考えられる。本研究では、都市内自己水源の一つである下水処理水と雨天時の道路路面排水を地下浸透させ、地下水を涵養させる際の土壌浸透過程における水質の変化を多角的に評価するために、土壌浸透カラム実験を行い、土壌浸透カラム処理における水質変化を機器分析とバイオアッセイにより測定する。

②研究実施方法

下水処理水の地下浸透処理の模擬実験として、土壌を充填したカラム実験(図10参照)を80日間行った。カラムへの流入水として二次処理下水を用い、カラム流入水と流出水を機器分析とバイオアッセイにより評価した。従来、河川水や地下水質は、栄養塩類や一般項目(BODやCOD)などで評価されてきたが、本研究ではそれらに加え、重金属、近年国際的問題となっている環境ホルモンやエストロゲンといった微量有機汚染物質の測定を行うほか、遺伝子組み換え酵母を用いた総エストロゲン様活性の

測定（バイオアッセイ）を実施した。さらに、生態系への影響を評価するために、食物連鎖の底辺を構成する細菌、藻類を用いたバイオアッセイを行った。

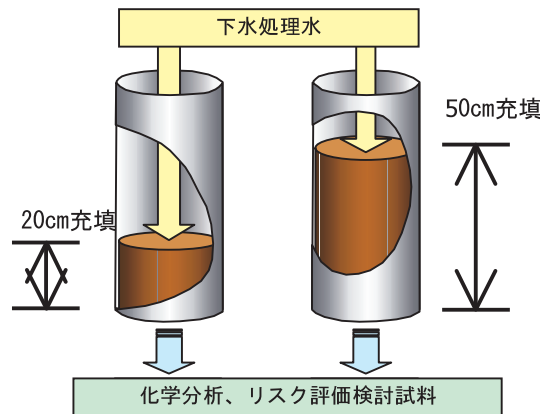


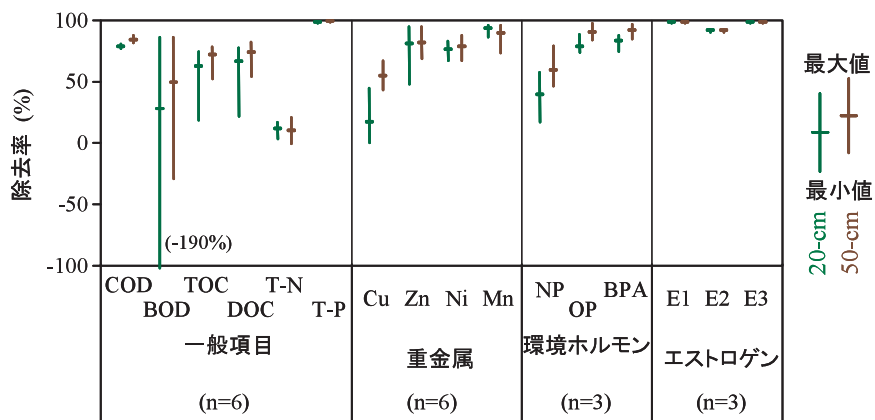
図 10 土壌カラム実験の概要図

③現在の研究進捗状況

これまでに、下水処理水の地下浸透を想定した土壌浸透カラム実験が終了し、各種化学分析及びバイオアッセイ試験のデータを得た。別途して実施している河川水質等のデータと合せ、水質リスクレベルやランク表示について検討を行っているところである。

④研究結果

下水処理水を用いた土壌浸透カラム実験の結果を図 11 に示した。総有機物量（TOC）、リン、重金属類については安定的な除去率が確認されたが、生分解性の低いノニルフェノールについては実験後期に土壌浸透カラム処理水中で濃度の増加、つまり除去率の低下が確認された。一方、ノニルフェノールより親水性が高いエストロゲン、そしてエストロゲン様活性については安定的な除去が確認され（図 12）、カラム中での生分解が示唆された。栄養塩類については、リンは効果的な除去が確認された。窒素類のうちアンモニウム態窒素はカラム処理前後で劇的に濃度が減少する一方、硝酸態窒素の増加が確認され、カラム内での硝化が確認された。硝酸態窒素は、地下水の環境基準項目の一つとなっており、実際に下水処理水を地下浸透する際には、本研究で除去率の低かった成分（特に窒素類）や、除去率が低下する成分（ノニルフェノール等）の濃度を基に、浸透処理水の選定と、その後の処理水の監視が重要であることが示唆された。



土壌浸透カラム実験における各分析項目の除去率
(実験開始より40日後から80日目までの平均、最小、最大値)

図 11 カラム実験における除去率の比較

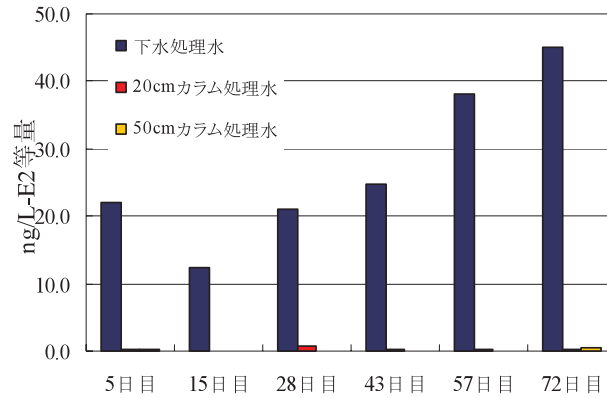


図12 エストロゲン様活性の推移

生態系への影響を評価するために行ったバイオアッセイの結果、海産細菌に対しては、供試下水処理水および土壌浸透カラム処理水ともに、影響は観察されなかった。一方、藻類を用いた成長試験の結果、供試下水処理水では藻類の増殖が確認されたが、土壌浸透カラム処理水では藻類の増殖が確認されなかった（図13）。同様に藻類成長阻害試験でも土壌浸透カラム処理水での成長阻害が確認されており、これは下水処理水が土壌中を浸透することにより、藻類の生長に有効な栄養塩、金属類が除去されていることのほか、土壌より藻類増殖の阻害物質が溶出しているものと推察される。以上の結果より、土壌カラムにより、物質によっては効果的に除去が確認された。しかし、下水処理水を地下水涵養する際には、特に窒素除去のために前処理工程が必要であることが示唆された。また、土壌浸透量の増加に伴い除去率が低下する物質もあるため、浸透処理水の適切な水質管理も重要であると考えられる。しかし、土壌浸透は炭素、リン、金属類、エストロゲン様物質の除去には有効であり、殊に地下浸透処理にマイナス面となる窒素含有量が低い場合では、同処理法は有効な手段となりうる可能性が高いことが明らかとなった。

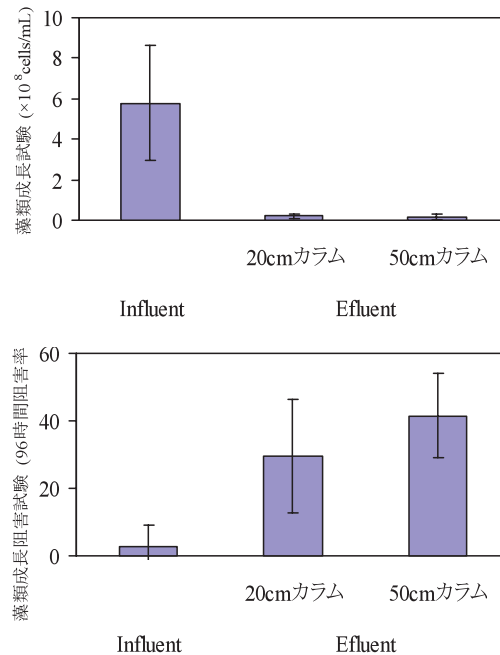


図13 藻類を用いたバイオアッセイ試験
(上段：藻類成長試験、下段：藻類成長阻害試験)

4. 今後の展開

本研究チームでは、研究期間の前半（H14.11～H17.9）では、汚濁流出解析および水収支モデルの構築作業、地下水涵養のカラム実験、処理場や環境試料の採水調査・分析を実施し、後半（H17.10～H19.10）では、水質リスクの評価のあり方、再利用や適正配置など実社会を想定したケーススタディへの展開を進める予定である。個別の研究項目ごとの展開は以下のとおりである。

1) 流出解析や水収支モデルに関しては、都市排水区を対象として分布型モデルによる汚染物質の雨天時流出挙動の予測手法の確立を終えて、浸透施設導入効果を評価可能となった。また、雨水浸透施設の堆積物調査や道路塵埃の分析データが整った。今後は、浸透施設内での汚染物質粒子の流出サブモデル構築や地下水汚染が懸念される重金属について土壌内の動態を評価することが今後の課題となっている。また、複合流域の総観モデルにより推定可能な浅層地下水と河川水の流出過程と都市域排水区モデルによる雨水浸透効果を結合評価するシステムづくりを目指す。

2) 地下水圏の浄化機能に関しては、下水処理水涵養の土壌カラム実験試料の化学分析とバイオアッセイとその水質リスクデータの詳細整理が終了しており、今後は道路排水に対する土壌カラム実験を実施する予定である。さらに、下水処理水の土壌微生物による浄化メカニズムの解析のうち、今後はエストロゲン物質に着目し、その分解細菌の検出とその分解機能の定量化について、分子生物学的手法を駆使して解析の高度化を図っていく。

3) 都市排水の水溶性微量汚染の評価に関しては、高度処理を含めた下水処理過程における医薬品の除去過程の調査研究、高速道路を含めた都市雨水排水中の微量化学物質の詳細分析データが蓄積されてきている。今後は複数の下水処理水、道路排水や屋根排水などについても分析データを追加して、より一般的な知見として整理していく。

4) 水質リスクの多面的評価に関しては、下水処理水やその土壌浸透水の水質評価のために、平成16年度から水道水源を含む全国一級河川水を対象に、多面的な化学分析項目およびバイオアッセイによって得られる水質項目を多角的に評価する作業を開始した。湖沼水や都市内の地下水なども試料として追加する。下水処理水、道路排水、それらの土壌涵養水について、水質リスク評価を行い、上記の環境水を比較対照とした相対的なリスクレベルのわかりやすい明示方法、質的な安全性や質確保のための経済性の表示方法（リスクラベリング）の検討をさらに進める。

5) 水資源の再利用と適正配置モデルに関しては、居住者の観点から適正な水循環、水環境の創出や地下水涵養のあり方を検討するために、まず、身近な水環境評価に対する意識調査結果をもとに水環境評価モデルを構築した。今後は、都市構造や地域特性に配慮したまちづくりにおいて、地下水涵養を軸とした水環境整備の重要性を定量的に評価することを目指す。また、項目1)と関連付けて、東南アジアの大都市における水文的水収支と水利用収支図の統合作成を進めて、水収支や水利用の視点からの東南アジアの大都市の類型化を行なう。

チーム全体としては、最終年度に持続的な都市の水利用のための雨水と再生水に関する国際シンポジウムを開催予定である。そして、大都市におけるリスク管理型水循環系の在り方についての提言や関連研究者との議論を深めたいと考えている。なお、チーム成果物として、図書の出版も構想しているが、より公開性の高いWEB掲載や映像情報を活用できるDVD化を検討したい。

5. 主要な成果報告等

- (1) P. Pengchai, F. Nakajima, H. Furumai : Estimation of origins of polycyclic aromatic hydrocarbons in size-fractionated road dust in Tokyo with multivariate analysis, *Water Science & Technology*, Vol.51, No.3-4, pp.169-175, 2005.
- (2) P. Pengchai, H. Furumai, F. Nakajima : Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in road dust in Tokyo, *Polycyclic Aromatic Compounds*, Vol. 24, No.4-5, pp.713-789, 2004.
- (3) 八十島誠、山下尚之、中田典秀、小森行也、鈴木穰、田中宏明：下水処理水中に含まれるレボフロキサシン、クラリスロマイシンの分析と藻類生長への影響、*水環境学会誌*、第27巻、第11号、pp.707～714、2004.
- (4) 中道久美子・谷口守・松中亮治：都市コンパクト化政策に対する簡易な評価システムの実用化に関する研究、*都市計画論文集*、No.39-3、pp.67-72、2004.
- (5) S. Seker, K. Arakawa, M. Sekiguchi and Y. Ono : Biomonitoring of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Kojima Bay, *J. Ac. & Tech. Univ. Peshawar*, Vol.28, No.1-2, 2004.
- (6) 山下尚之、田中宏明、宮島潔、鈴木穰：マイクロプレートを用いたAGP試験の検討、*水環境学会誌*、Vol.28, No.8, pp.493-499, 2005
- (7) M. Murakami, F. Nakajima, H. Furumai : Size- and density-distributions and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust, *Chemosphere*, (in press)
- (8) 真名垣聡、小嶋早和香、原田新、中田典秀、田中宏明、高田秀重：高速液体クロマトグラフィー質量分析計による直鎖アルキルベンゼンスルホン酸塩および分解産物の分析方法の開発と環境試料への応用、*水環境学会誌*、Vol.28, No.10, 2005 (印刷中)
- (9) 谷口守、古米弘明、小野芳朗、大久保賢治、諸泉利嗣：居住者意識に基づく水環境評価モデルの構築とその『水が循環するまちづくり』への援用、*環境システム研究論文集*、Vol.33、2005. (印刷中)
- (10) 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, 2nd International Symposium on Southeast Asian Water Environment, Hanoi, H16.12.3
- (11) N. Nakada, N. Yamashita, K. Miyajima, Y. Suzuki, H. Tanaka, H. Shinohara, H. Takada, N. Sato, M. Suzuki, M. Ito, F. Nakajima and H. Furumai : Multiple Evaluation of Soil Aquifer Treatment for Water Reclamation using Instrumental Analysis and Bioassay, 2nd International Symposium on Southeast Asian Water Environment, Hanoi, H16.12.3
- (12) 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, 10th International Conference on Urban Drainage (10ICUD), Copenhagen, 2005.8.21-26
- (13) M. Murakami, H. Furumai, F. Nakajima, H.K.P.K. Jinadasa and R.K. Aryal : Comparison of infiltration flows at three types of infiltration facilities in serial rainfall events with different characteristics, 10th International Conference on Urban Drainage (10ICUD), Copenhagen, 2005.8.21-26
- (14) Y. Sakata, F. Kurisu and O. Yagi : Effect on Soil Microbial Community by Feeding Sewage Effluent to Soil Columns, 10th International Symposium on Microbial Ecology, Cancun, H16.8.22-27 ポスター
- (15) K. Okubo : A Combined model for surface and subsurface flows in a watershed, International Symposium on numerical simulation of Environmental problems, Okayama, H16.11.22-23