

「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

流域圏外のダム湖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。雨水利用や排水再利用、涵養地下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

本年度は、チーム全体の研究としては、高速道路塵埃の大量入手とそれを用いて作成した模擬道路排水を対象とした土壌カラム浸透実験を開始した。試料分析を実施しており、有機物や栄養塩類、重金属や微量有機化学物質の土壌吸着機構や水質変換機構を解析中である。また、昨年度と合わせて2ヶ年間で、全国9地方整備局から4河川ずつ36河川と流下に伴う変化を調べるモデル河川として1河川の合計37河川を対象に水質調査を実施した。そして、多面的な化学分析項目およびバイオアッセイを行い、下水処理水や土壌浸透水の水質レベルを相対的に把握するための物差しとなる基礎データとして整理した。水質やバイオアッセイのデータを非超過率の形で表示することで、水質ランキングを通じたリスクのラベリング手法の手順や表示のあり方について具体的に進展させた。

グループ単位の研究としては、雨水浸透ますを通じた地下水涵養過程での重金属類の動態を明らかにするための道路塵埃溶出液と柵堆積物を用いた脱吸着試験、土壌浄化機能評価のための安定同位体プローブ法と平板培養法を用いたエストラジオール分解菌の探索、抗生物質のLC-MS/MSによる分析法の確立とオゾン処理過程における除去機構の解明、多種類多項目データを活用した水質と河川特性との相互関係の解析、水資源の再利用と水利施設の適正配置を提案のためのGISデータを利用した流域内の水収支モデルと水質ハイドログラフ算定手法の確立、水環境評価との関係を考慮した地下水涵養を通じた水収支バランス化方策の提案、居住者水利用負荷と地域の浸透還元機能のバランスを示す新たな指標導入の検討なども進めた。

研究の成果と今後の見通し

下水処理水に続き、道路排水に関する連続土壌カラム実験が進行中であり、地下水涵養プロセスにおける微量汚染物質の動態把握やその浄化機能の評価に関する研究成果の整理が進展している。また、こ

これらの新たな都市自己水源の水質リスクを 2 年にわたる大規模な河川水質調査を実施したことにより、比較参照する水質の物差しづくりが進行しつつある。これに、屋根排水・道路排水、湖沼水や都市内の地下水などの環境水についても多面的な化学分析およびバイオアッセイを行うことで、さらにデータの蓄積を進める。また、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、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の確立を進める。そして、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を作成することを目指す。

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

雨水浸透ますを通じた地下水涵養の過程での重金属類の動態を明らかにするために、道路塵埃溶出液と 3 箇所の桷堆積物を用いて重金属類の脱吸着試験を行った。得られた実験結果と化学平衡計算ソフトウェアによる計算結果を用い、特に有機錯体に注目して化学形態の観点から重金属類の挙動を評価した。その結果、道路塵埃溶出液と桷堆積物との混合前後で DOC 濃度が殆ど変わらなかった一方で、有機錯体と考えられる Cu は桷堆積物によって吸着した。また、桷堆積物の種類によっては、道路塵埃溶出液と桷堆積物との混合により、桷堆積物から Zn の溶出が促進される場合があった。また、新規購入した熱分解 GC/MS を用いて、この地域の土壌中有機物の解析を開始した。組成と吸脱着特性との関連は今後詳細に検討する。

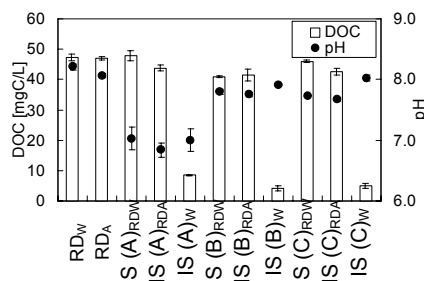


Fig. 1 DOC concentration and pH in road dust and inlet sediment leachates. (Mean $\pm$ S.E.)

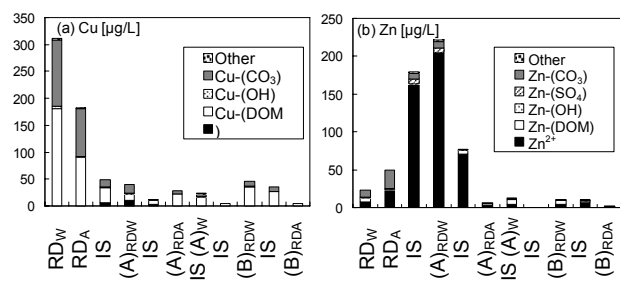


Fig. 2 Speciation of Cu and Zn in road dust and inlet sediment leachates. (Me-(X): complexes of heavy metal Me and ligand X)

雨水浸透施設への汚染物質の流入負荷量および施設内での捕捉量を推定するためのモデル計算を行い、さらに現場調査により、雨水浸透マス内にどのように重金属類が捕捉されているか明らかにした。計算結果によると小降雨で浸透マス内に捕捉・蓄積された汚濁物質が、強い雨により巻き上げられて流出することが示唆されたが、掃流と再懸濁の機構が重要であり計算プロセスのさらなる検討が必要である。また、浸透施設が設置され 20 年以上経過している東京都内の排水区において雨水浸透ますを調査した結果、堆積物中の重金属類濃度はクロム 6~143 $\mu\text{g/g}$ 、ニッケル 1~84 $\mu\text{g/g}$ 、銅 49~331 $\mu\text{g/g}$ 、亜鉛 210~2186 $\mu\text{g/g}$ 、鉛 2~332 $\mu\text{g/g}$ であった。これらは道路塵埃中含有濃度と同程度であった。

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

2-1 地下水涵養カラム実験

雨水利用や排水再利用を都市の自己水源として利用するためには「質」の動態変化を理解した上で水用途の視点からその許容性を踏まえた検討が必要である。本年度、道路排水の再利用を検討するため、その検討手法として土壌カラムを作成し、土壌浸透による水質変化の確認実験を行った。

はじめに道路排水を想定した実験を行うにあたり、長期実験に対応するため定常的に道路排水を確保することが必要であることから、首都高速道路塵埃を用いて模擬道路排水を作成し、通水原水とした。作成した模擬道路排水中には、ストロンチウム、マグネシウム、バリウム、亜鉛等の金属類が比較的高濃度に含有しており、金属類等の有害物質の土壌中での挙動の把握は重要である。

また、金属類の他、COD、BOD、N 類等一般的な水質項目の測定も実施した。

土壌カラム実験の条件として土壌厚 20cm、50cm の 2 条件を設定し、土壌厚の違いにより物質の吸着能の差異を評価した。道路排水の通水条件も連続通水、24 時間間欠通水（50cm カラム）として間欠通水を行うことにより土壌吸着能の差異もあわせて評価した。土壌への通水量は、1 時間当りの降雨量 10mm として、試料分析を 7 日間通水毎に行った。

Table 1 模擬道路排水中の金属類濃度

金属類濃度 mg/L			
Be	0.000004	As	0.0009
Mg	1.7	Se	0.001
Al	0.039	Sr	24
Cr	0.0013	Mo	0.0082
Mn	0.013	Cd	<0.001
Fe	<0.1	Sb	0.0077
Co	0.0036	Ba	0.27
Ni	0.016	Pb	0.0006
Cu	0.037	V	0.0022
Zn	0.10	-	-

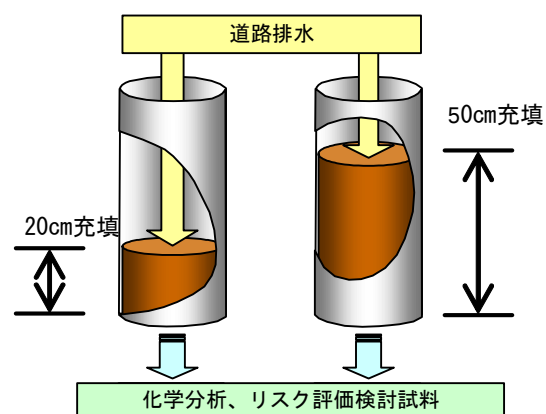


Fig.3 土壌カラム実験の概要図

土壌カラム実験の試料分析は現在分析の途中であるが土壌への通水により 20cm、50cm 連続通水カラムでは、土壌浸透水中の COD、TOC 濃度は徐々に増加が見られ、その後減少する傾向が見られた。両カラムで比較すると 50cm カラムより 20cm カラムの方が高い値となった。また、間欠通水の条件では、連続通水条件で見られた濃度の増加は見られず、経時的に減少する傾向となった。BOD は、20cm カラムで 3 週目に 55mg/L、50cm カラムで 7 週目に 39mg/L とそれぞれ極大値を示し、その後 BOD 値は両カラムとも 1mg/L 未満の値となった。間欠通水条件では現在までに極大値を示すような変化は見られていない。次に窒素の挙動をみると通水初期ではアンモニウム態窒素がいずれのカラムでも存在しているが、連続の通水条件ではアンモニウム態窒素濃度は通水期間が長くなるにつれて徐々に減少する結果となった。間欠通水ではアンモニウム態窒素の減少は確認されておらず、通水条件の違いにより土壌中での酸化、還元の状態が異なることを示唆しているものと考えられる。窒素全体で見てみる

といずれのカラムでも徐々に窒素濃度の増加し、COD、TOC 同様にその後減少している。

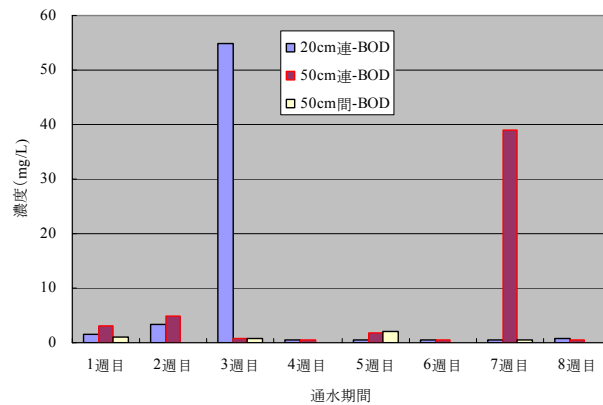


Fig. 4 土壌浸透水中の BOD 濃度変化

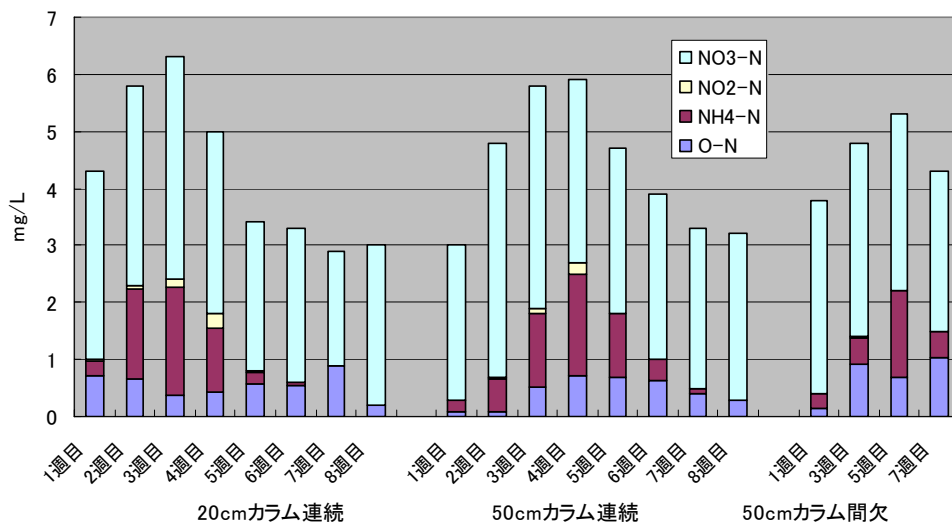


Fig. 5 各態窒素濃度の推移

金属類ではマグネシウム、マンガンを除き、ほとんどの金属類は土壤中に吸着し、通水原水（模擬道路排水）より低い値（実験開始から 6 週間目の結果）であった。マグネシウムは実験開始時から通水原水とほぼ同程度濃度であり、土壤には吸着されずそのまま水と一緒に移動するものと考えられる。また、マンガンはいずれの実験ケースでも通水原水よりも 3 倍程度高い値となっており、土壤から溶出しているものと考えられるが、このことは土壤内部で還元層が形成されていると予想できる。ストロンチウム及びバリウムは、土壤に保持されにくく、通水量の増加とともに徐々に土壤から破過しているものと思われる。

模擬道路排水を用いた土壌カラム実験は、連続通水ケースを 12 週間実施し、間欠通水のケースは現在継続中である。これら水質試料及び実験終了後土壌の分析により、土壌中での金属類の挙動及び水質の変化を把握することにより、排水再利用の可能性を検討するうえでの基礎資料とする。

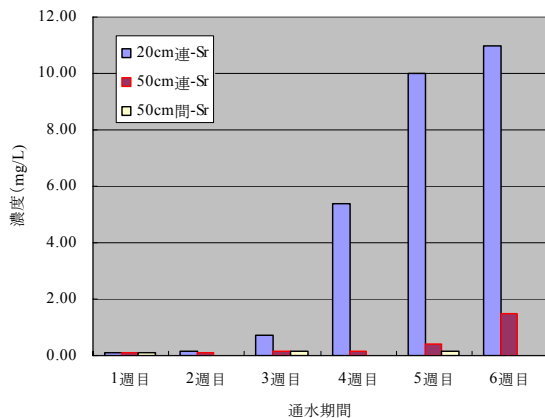


Fig. 6 土壌浸透水中のストロンチウムの変化

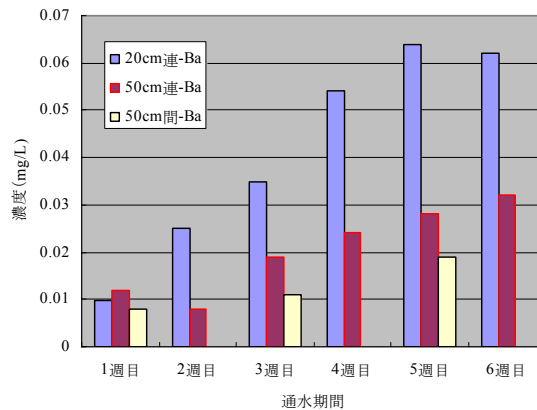


Fig. 7 土壌浸透水中のバリウムの変化

2-2 地下水圏の浄化能の定量的評価

35 mL 容バイアル瓶に東京大学内の畑地土壌 5 g、滅菌 Milli-Q 水 5 mL および E2 100 μ g を添加し、25°C、暗所にて、最長 5 日間振とうした。土壌から全量抽出した E2 を GC/MS で測定し、吸着を含めた E2 減少量を調べた。微生物 DNA は土壌から全量抽出し、16S rDNA の V3 領域を標的とした PCR-DGGE 法により解析した。

E2 分解菌の探索は、安定同位体プローブ(SIP)法と平板培養法を用いて行った。SIP 法では、基質として 1,2,3,4- $^{13}\text{C}_4$ -E2 を添加した。DNA を回収し、密度勾配遠心法にて高比重 DNA を分離し PCR-DGGE 解析を行った。平板培養法による探索は、表面に E2 結晶を塗布した無機塩固体培地にハロを形成したコロニーを E2 分解菌として検出した。SIP-DGGE において高比重側で得られたバンドと平板培養により得られたコロニーの 16S rDNA についてシーケンス解析および相同性検索を行い、両者の菌相を比較した。

添加した E2 100 μ g は土壌 5 g により 2~3 日でほぼ完全に分解された。平板培養法により計 11 個のハロ形成コロニーが検出され、速やかな E2 分解とともに土壌中の E2 分解菌数も増加していることから、土壌中の E2 分解には微生物が大きく寄与していることが示唆された。相同性検索により、単離菌 11 株は *Kitasatospora* 属細菌 (3 株)、*Streptomyces* 属細菌 (4 株)、*Nocardia* 属細菌 (1 株)、*Paenibacillus* 属細菌 (1 株)、 α -Proteobacteria 細菌 (1 株) であると同定された。*Streptomyces* 属による E2 から E1 への分解は報告があるが、*Kitasatospora* 属細菌および *Paenibacillus* 属細菌による E2 分解が示唆されたのは本研究が初めてである。

SIP 法において、 $^{13}\text{C}_4$ -E2 添加系における高比重側への顕著なシフトは見られなかったが、高比重側の部分に *Bacillus funiculus*、*Sphingomonas* spp.、*Bradyrhizobium* spp. と 98~100% の相同性を示すバンドが確認された。単離菌とは異なったものであり、単利菌以外で ^{13}C を取り込んでいる微生物の可能性が示唆された。

本年度の結果より、土壌環境中には種々の E2 分解菌が存在していることが判明した。

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

まず、抗生物質(サルファ剤系、マクロライド系)の LC-MS/MS による分析法を確立した。確立した手法を用い、2次処理および高度処理(オゾン処理、砂ろ過処理)における抗生物質の除去率を明らかにした。対象と

した抗生物質は二次処理では平均で 30%程度しか除去されなかった。一方、オゾン処理では抗生物質は効率的に除去された (Fig.8)。医薬品、抗生物質、環境ホルモン類のオゾン処理における除去効率を支配する因子を考察した。その結果、他の分子との接触可能な面積 (Fig.9) がオゾン処理における除去効率を支配していることが示され、500 Åを超えるとほぼ 100%除去されることが明らかとなった (Fig.10)。

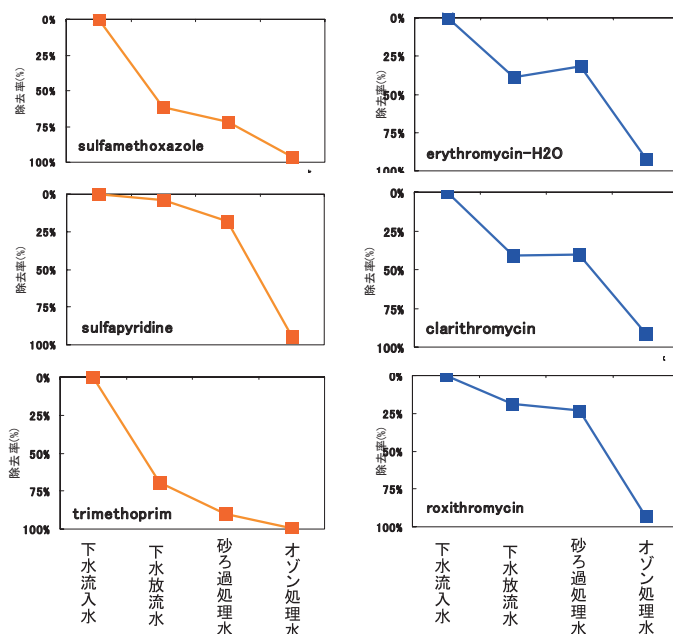


Fig.8 下水二次処理および高度処理における抗生物質の除去率

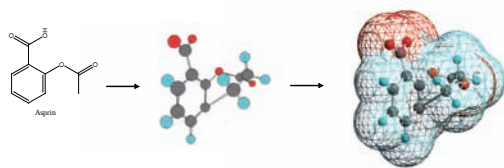


Fig.9 他の分子が接触可能な分子表面積 (Connolly Accessible Area : CAA)

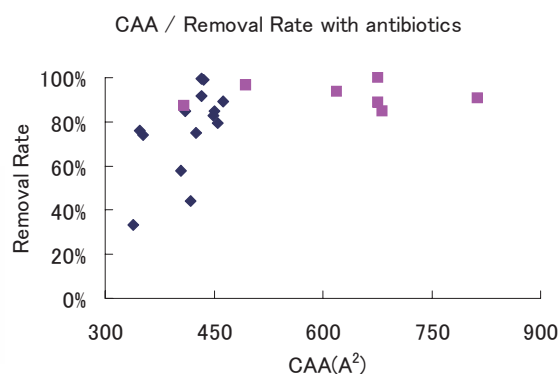


Fig.10 オゾン処理における微量有機汚染物質の除去率と他の分子が接触可能な分子表面積(CAA)の関係

土壌カラム実験 (下水処理水) における医薬品の測定を行った。医薬品と環境ホルモン類について土壌カラム実験における除去効率と物性、微生物分解性の関連を考察した。その結果以下の点が明らかとなった。

- 1) イオン性の化合物の除去効率が高いことから、イオン性の化合物は土壌粒子表面でのイオン交換により除去されていると推察された。
- 2) 土壌カラム実験初期においてはオクタノール-水分配係数 (K_{ow}) が除去を支配していることが示された。
Log K_{ow} が3以上で実験初期の除去効率は 100% 近く、log K_{ow} 3 以下では除去率は低下した

(Fig.11)。

3) 土壌カラム実験全期間の除去には微生物分解が寄与していることが示された (Fig.12)。

全国1級河川の抗生物質の分布を明らかにした。人口密度の高い河川で抗生物質濃度は高かった。一方、Sulfamethazine という家畜排水由来の抗生物質汚染も観測された (Fig.13)。各処理水の汚染物質濃度を総合指標化し、それを河川水の水質と比べ、各処理水の環境用水としての再利用性の評価する手法を試行した。

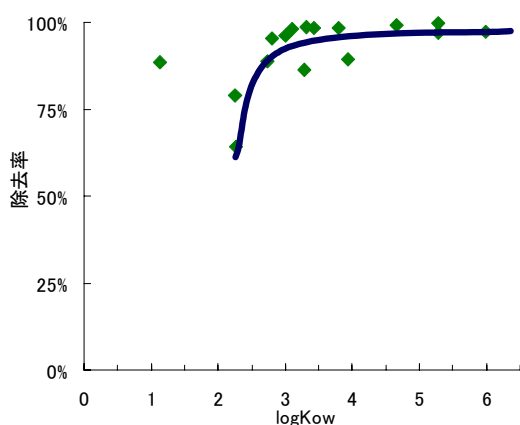


Fig.11 土壌カラム実験の初期段階における微量有機汚染物質の除去率と分子の疎水性（オクタノール-水分配係数：Kow）の関係

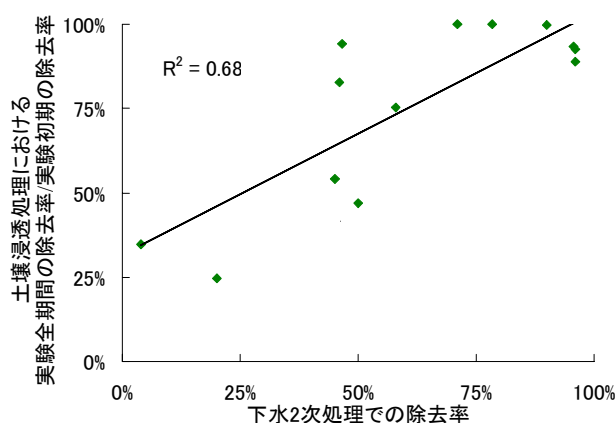


Fig.12 土壌カラム実験全期間における微量有機汚染物質の除去率と下水二次処理における除去率の関係

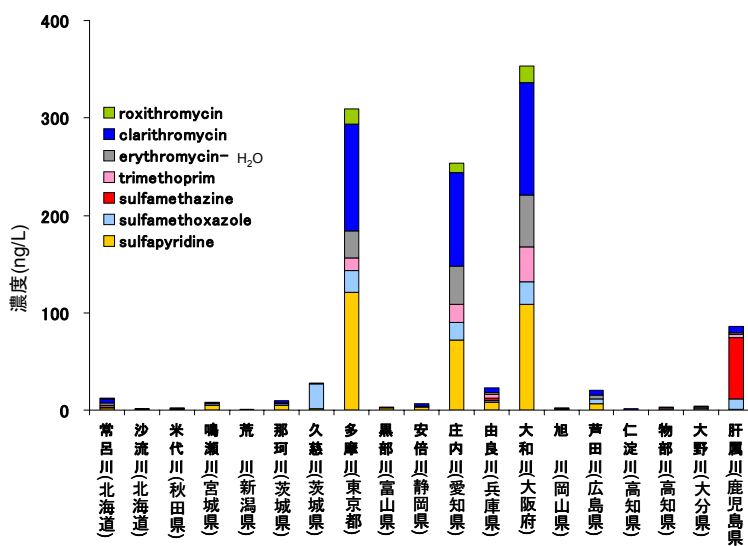


Fig.13 全国一級河川における抗生物質の分布

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

由来や処理方法によって異なる都市内水資源の水質リスクを相対的に評価するため、水道水源となる河川

を含む全国一級河川水を対象に調査を行った。調査対象とした河川は、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 36 河川と流下に伴う変化を調べるモデル河川として 1 河川の合計 37 河川を選定し、平成 16, 17 年の 2 ヶ年で調査を実施した。

この中で、各研究グループで共同し、多面的な化学分析項目およびバイオアッセイを行い、下水処理水や土壤浸透水の水質レベルを相対的に把握するための物差しとなる基礎データとして整理した。ここでは TOC, T-N, T-P, エストロゲン様活性についてデータを非超過率の形で検討を行った結果を示す。また、変異原性についてのデータと対象河川流域の情報とを比較検討した結果についても示した。

エストロゲン様活性については、内分泌攪乱作用を包括的に把握するために行った。試験はヒトのエストロゲン(女性ホルモン)受容体が組み込まれた遺伝子組み換え酵母(Sumpter 株)を用い、エストロゲンもしくはエストロゲン様作用を持つ化学物質が取り込まれた際に基質によって生じる発色反応から、エストロゲン様活性を算出した。

また、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。平成 16 年度、17 年度ともに、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。試験条件は河川水で通常最も高い値を示す TA100-S9 条件とし、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。

まず、下水処理過程におけるエストロゲン様活性の変化を今回調査した河川水の水質分布と比較した結果を Fig.14 に示す。ここから、河川水質の非超過率の分布において 90%を超えていた二次処理水中のエストロゲン活性が、オゾン処理によって 40%程度まで低減されたことが示された。また、土壤浸透による地下水涵養を想定した土壤カラムによる実験においては、Fig.15 に示すようにオゾン処理と同程度までエストロゲン様活性が低下した。

一方、有機物や栄養塩類について河川水質の分布と土壤カラム実験における水質変化を同様に比較した結果を Fig.16 に示す。ここからリンの除去率が良いことに対して、窒素の除去率が悪く、窒素を対象とした処理の重要性がうかがわれた。

次に変異原性試験の結果については、平成 17 年度の 19 河川、21 地点の MFP は 1,540~20,200 net rev./L と、平成 16 年度と同様に大きな幅を示し、また平均値は 5,420 net rev./L (中間値は 2,880) であった。平成 16 年度の平均値は 2,100 net rev./L (中間値は 1,900) であり、平成 17 年度が約 2.6 倍高い値となったが、DOC の平均値も約 2.3 倍高かったことから、平成 17 年度の調査地点の方が全体的に有機汚濁の進行していた地点であったといえる。

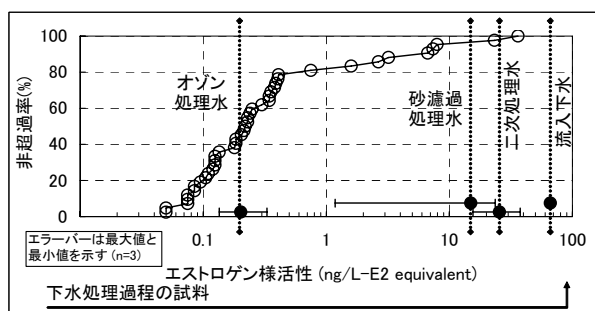


Fig. 14 下水処理過程におけるエストロゲン様活性の変化と河川水の比較

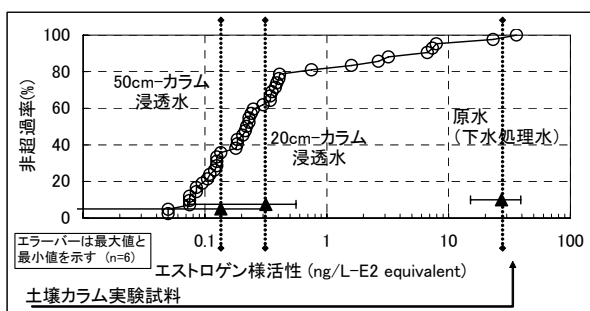


Fig. 15 土壌カラム実験におけるエストロゲン様活性の変化と河川水の比較

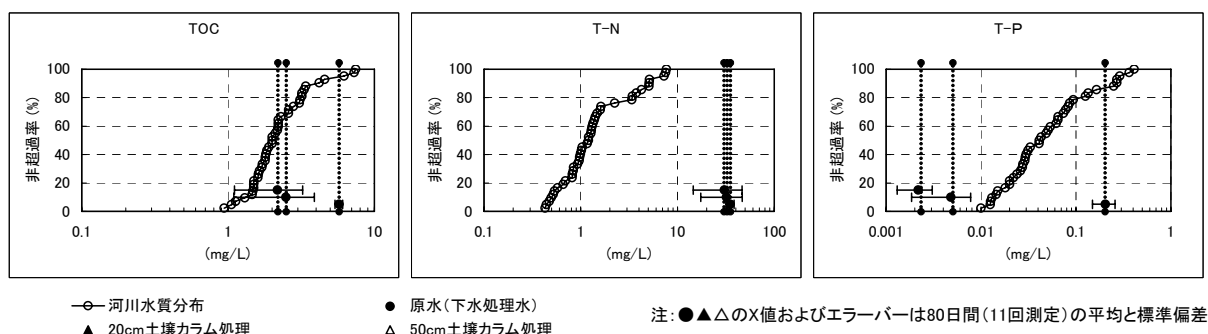


Fig. 16 土壌カラム実験における水質の変化と河川水の比較

また、平成 16 年度の結果も合わせて 42 地点の MFP と、DOC などの一般的な水質項目との関連、および流域の人口密度やフレッシュ度（評価地点における水量のうち上流において使用されていない水量の割合）など河川特性との関連を検討した。その結果、Fig.17 に示すように DOC と MFP との相関係数は $r=0.89$ と高かったが、DOC あたりの MFP でみると、平均 884 (107~2,156)、標準偏差 426 (net rev./mgC) と大きな幅を持っていた。また、人口密度およびフレッシュ度は、DOC との関係よりも MFP との関係においてより強い相関が認められたことから、河川中の変異原前駆物質として人間活動に起因する有機物の寄与が高いことが示唆された。

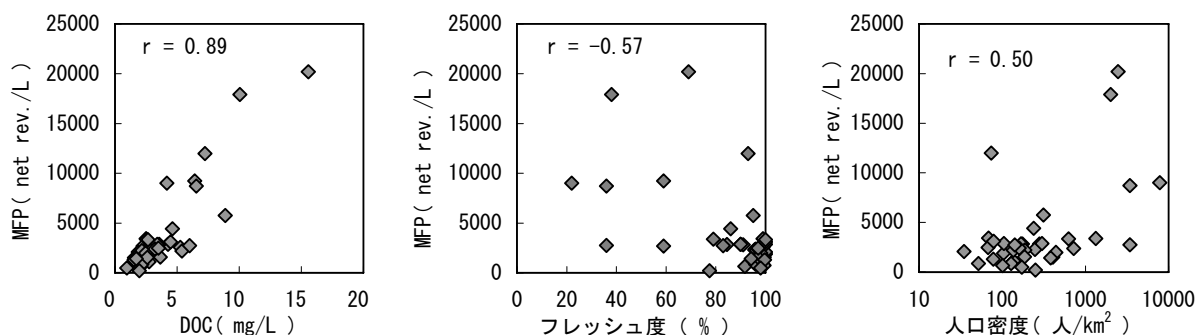


Fig.17 河川水における変異原性生成能と有機物や流域状況との比較

5) 水資源の再利用と適正配置モデルの構築

昨年度構築した水環境評価モデルでその有効性が示された「地下水涵養を通じた水収支バランス化」の効果的達成方策について地区整備手法という観点から比較評価を行った。岡山市における面的整備手法（旧来の都市部、一括開発型新興住宅、スプロール市街地、基盤整備先行型市街地）の異なる4つの地区を対象に、その地表面の流出・浸透特性の違いを航空写真の情報をもとに実測した。さらに居住者の水利用負荷と地域の浸透還元機能のバランスをウォーターサプライ・フットプリント(WSFP)という新たな指標を導入することによって地域整備のあり方が都市活動配置を通じて水収支バランスに及ぶ影響を定量的に明らかにした。対象とした4地区に対して地表面の浸透化を進め、地下水涵養を進めた場合、一体的開発に基づく活動配置を行った地区において効果的にフットプリント値が低下することが明らかになった (Fig.18)。

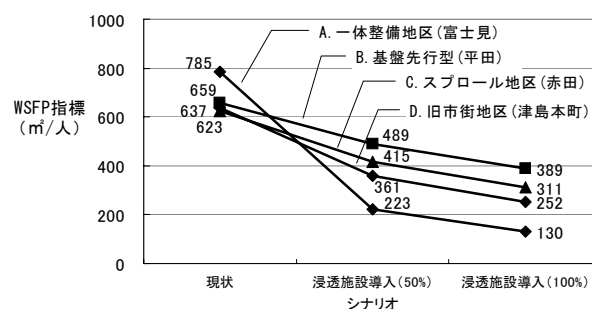


Fig.18 ウォーターサプライ・フットプリント指標を用いた浸透施設導入の地区別評価果

水資源の再利用と水利施設の適正配置を提案するためには流域内の水収支を正確に把握する必要がある。岡山県の旭川流域、高梁川流域、吉井川流域の3河川流域における広域での実蒸発散量の Morton 法、修正 B&S 法による推定を行った (2000 年 1 月～12 月データ)。降雨と河川流出高の年間の残差を求め、推定した実蒸発散量の妥当性を検討するとともに、流域水収支を推定結果、3 河川流域では吉井川流域の実蒸発散量が 660mm 程度と全体的に大きく、倉敷市や岡山市の市街地では 300～400mm 程度と小さくなっていた。また、降雨と河川流出高の残差と修正 B&S 法による実蒸発散量との比較では、残差はすべての流域で実蒸発散量より小さくなった。特に旭川流域ではその差が大きくなり約 300mm/year となったが、蒸発散量と水収支の推定誤差を考慮すると、吉井川流域では残差と実蒸発散量の差が 100mm/year、高梁川流域では 220mm/year ほどであり、ほぼ妥当な水収支が得られた。

これら流域レベルの水収支とともに表面流出及び浸透流出成分を考慮して水質予測を行う流出（タンクモデル）のルーチンを追加し、4 段タンクのレベルで異なる流出経路ごとの重みつき平均として水質ハイドログラフを日単位で取得した。検証トレーサー濃度として電気伝導度（国土交通省）を選んで比較すると降水などによる流況変動により各支流域・各タンクからの流量・流出比、水質にとっては配合比が変動して数日～旬スケールの電気伝導度の変動が再現できる。最下層（4 段目）のタンクの電気伝導度を近隣の浅井戸における観測平均値で与え、上層タンク（1 段目）では最下層の約 40%、中層タンク（2、3 段目）は約 60%および約 80%の値に設定した。岡山三川流域を対象に、4 年分の日降水量で解析すると流域幅の小さな旭川で電気伝導度の変動幅が小さく、支流面積比が大きい高梁川

では逆に変動幅が大きいことがわかった。計算値と実測値の相関は認められたが低水となった 2002 年冬に高梁川下流霞橋地点で系統的に計算値が過小となった。原因と考えられた、降水の分布、ダムの流量調節、取水・排水を表現することで若干の改良はなされたが完全ではなかった。流量低下の程度によっては河口から塩水遡上の影響も考慮する必要があると考えられる。

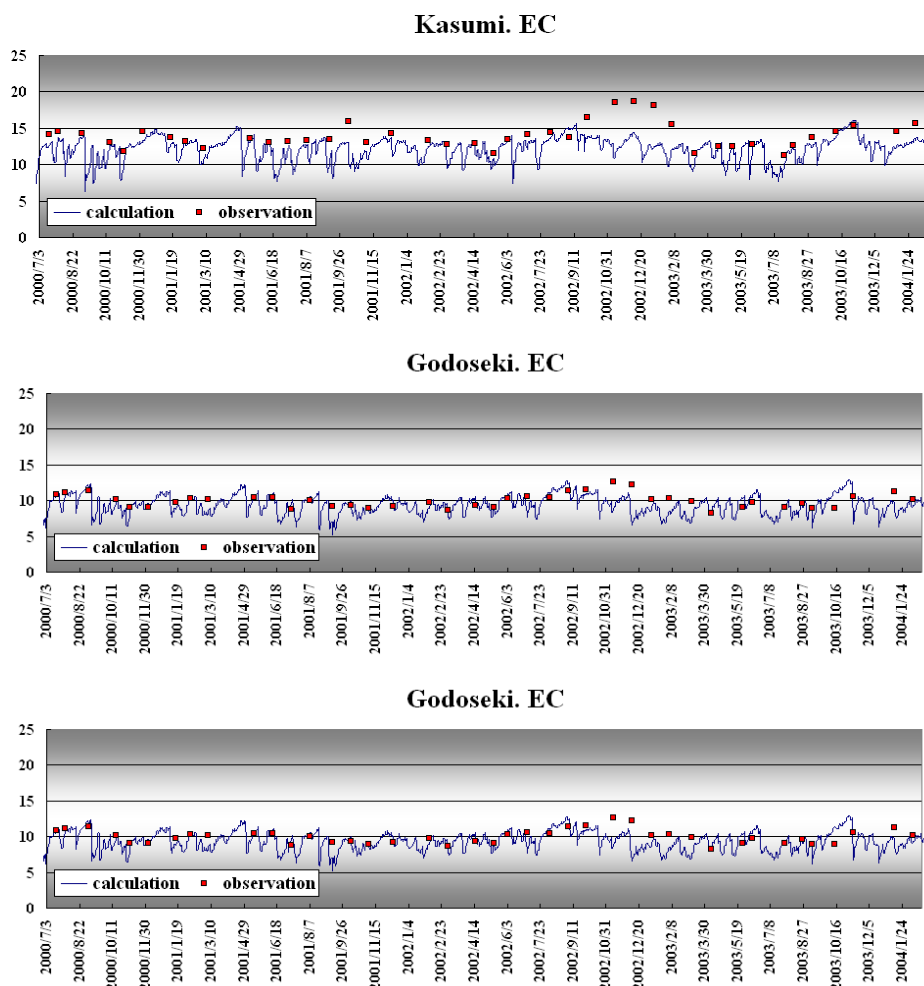


Fig.19 高梁川霞橋・旭川合同堰および吉井川熊山橋における電気伝導度の実測値と計算値の比較

3. 研究実施体制

東京大学グループ

- ①研究分担グループ長：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

東京農工大学グループ

- ①研究分担グループ長：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

土木研究所／京都大学グループ

①研究分担グループ長：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

岡山大学グループ

①研究分担グループ長：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

国土環境株式会社グループ

①研究分担グループ長：伊藤 光明（国土環境㈱環境創造研究所、所長）

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. 主な研究成果の発表

（１） 論文（原著論文）発表

- Sebahat Seker, Kensuke Arakawa, Motochika Sekiguchi and Yoshiro Ono: Biomonitoring of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Kojima Bay, J. Ac. & Tech. Univ. Peshawar, Vol.28, No.1-2, 2004.
- 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
- Michio Murakami, Fumiyuki Nakajima, Hiroaki Furumai: Size - and density - distributions and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust, Chemosphere, Vol.61, No.6, pp.783-791, 2005
- 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, pp.621-628, 2005
- 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、2005.10月
- H. Furumai, H.K.P.K.Jinadasa, M. Murakami, F. Nakajima and R.K. Aryal: Model description of storage and infiltration functions of infiltration facilities for urban runoff analysis by a distributed model, Water Science & Technology, Vol.52, No.5, pp.53-60, 2005
- R.K.Aryal, H.Furumai, F.Nakajima and M.Boller: Characteristics of particle-associated PAHs in a first flush of a highway runoff, Water Science & Technology, Vol.53, No.2, pp245-251, 2006