

# 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に期待が寄せられている。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うことがまず求められる。

多様な水質リスクを管理可能な都市水循環系の構築と都市における水資源の再利用と適正配置を目指すためには、単なる都市に存在する水の「質」を評価するだけでは十分ではなく、都市の水循環系と流域全体の水収支とのつながりに配慮することが求められる。したがって、既存の水流量やその質に対して、ここで提案する新たな都市水の利用におけるリスクがどの程度であるかを、水利用者に明確化することが必要である。そして、科学的な背景をもとに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が必要であると考えた。

本研究では水質リスク物質として、都市活動に伴い排出される化学物質に焦点を絞る。そして、すでに顕在化している有害化学物質だけでなく、多数の未知化学物質による汚染実態を調べるとともに、化学物質濃度とバイオアッセイを組み合わせた影響評価手法を駆使して、水質のリスクとして評価する。最終的にはリスク管理型の都市水循環系の構造と機能のあるべき姿を創出するための知見を体系的に整理することを目標とした（図1参照）。

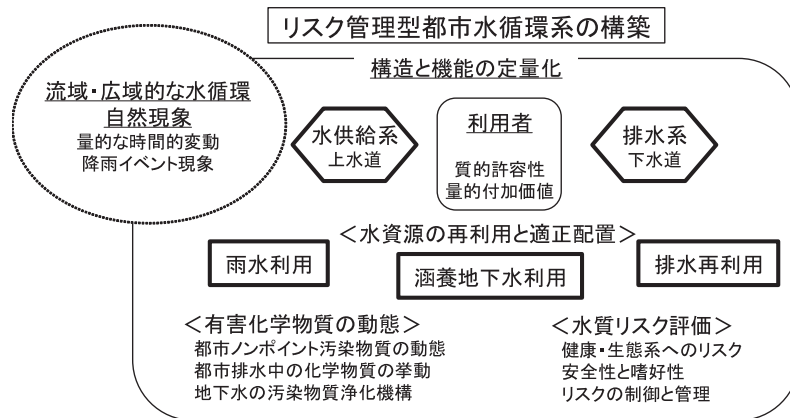


図1 リスク管理型都市水循環系の全体構造

## 2. 研究手法・体制

5年間を研究期間として、以下に示す5項目を軸に研究展開を進めた。すなわち、都市の水フローとしての上水道と下水道システムにおけるリスク物質の動態を理解しながら、都市ノンポイント汚染に代表されるような時空間的に水の質が変化する現象の把握、自己水源となりうる涵養地下水の質変換や汚染物質の動態の把握、水利用の許容性を踏まえた用途別のリスク評価などを主要な基礎研究項目としている。そのために、図2に示すような5つの項目の関連付けを行い、研究グループ相互の連携を取りながら、整合性のある研究成果を体系立てて蓄積することを試みた。

- 1) 都市ノンポイント汚染物質の動態評価・モデル解析（東京大学グループ）
- 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（東京大学&いであグループ）

- 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（（東京農工大学グループ）
- 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（土木研究所・京都大学グループ）
- 5) 水資源の再利用と適正配置モデルの構築（岡山大学グループ）

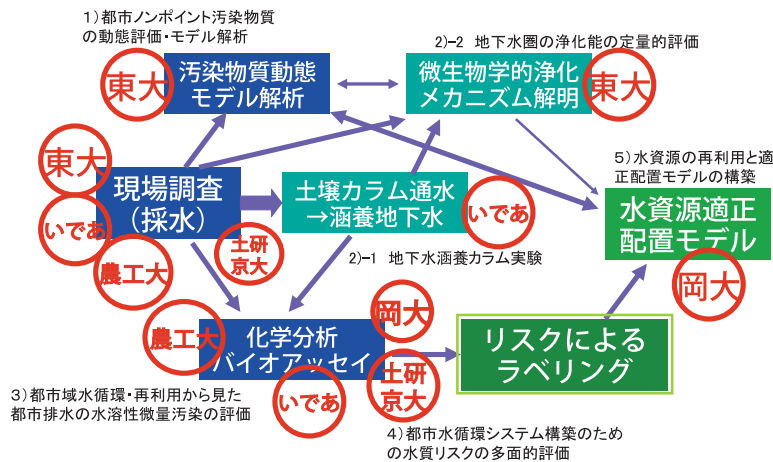


図2 研究項目とグループの相互関係

当初3年間で集中的に雨水浸透施設整備地域や下水処理場などでの現場調査、試料の化学分析やバイオアッセイ、下水処理水と道路排水を対象としたカラム実験などを実施した。これらは、都市内自己水源の利用とその管理へ向けて、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科学的検討を加えるために行ったものであり、下水処理水と道路排水を対象として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すること、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った。

そして、後半2年では、都市における水収支の評価作業、水のリスク評価研究を進展させながら、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した。その重要な段階として、様々な都市内自己水源の質の特徴付けである水質リスクのラベリングを行うことが必要であった。この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、大規模な全国河川の水質調査を実施して、対照（参考）水質値としての表流水データの充実を図った。同時に、科学的根拠を基礎におきながら、さまざまな環境水や都市の水に対してラベリングを9行い、同時にその水質レベルを全国河川の水質のものさしと相対比較させることで、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を提案した。この成果が、結果として都市の自己水源の水質リスク評価につながり、水利用者の選択判断の材料となりうると考えた。

### 3. 研究成果と考察

#### 3-1 都市ノンポイント汚染物質の動態評価・モデル解析

本研究では、都市域におけるPAH（多環芳香族炭化水素類）や重金属などの都市ノンポイント汚染物質の分布、存在状況を明らかにするとともに、雨水浸透施設における道路排水浸透過程において、これらの都市ノンポイント汚染物質がどのような動態を示すのかを明らかにした。更に、都市ノンポイント汚染物質の雨水流出時の挙動をモデルで評価するために、衛星画像を用いて都市地表面の状態を判別し、雨水流出解析の精緻化を検討した。また、分布型モデルへの雨水浸透施設の組み込み方法について検討をし、各種浸透施設ごとの雨水浸透量の定量的評価を試みた。その成果の一部を以下に紹介する。

##### 1) 都市ノンポイント汚染物質の分布と存在状態の評価の成果

雨水浸透施設の導入されている東京都練馬区内の下水道排水区を対象に、道路塵埃、雨水浸透堆積物の採取と、PAHや重金属などの存在状態分析を行なった。道路塵埃については、比較対照試料として都心部の幹線道路周辺のものも合わせて採取した。道路塵埃については、粒径や比重に着目した分画を行い、

また堆積物については堆積深さ方向の汚染分布について調査した。また、採取した塵埃及び堆積物の実験室内での溶出実験を行い、環境中での重金属の動態について評価した。

次いで、雨水浸透柵堆積物の蓄積状況を調査すると共に、浸透域土壌、住宅地道路塵埃、幹線道路塵埃を採取し、その重金属類の蓄積及び溶出特性を評価した。その結果、浸透柵堆積物ではPb、住宅地道路塵埃ではZn、幹線道路塵埃ではCr、Cu、Zn、Cd、Pbの汚染のレベルが顕著であることが示された。溶出実験の結果、幹線道路塵埃からのCrの溶出濃度が比較的高く、都市交通活動に由来した重金属の溶出が示唆された。更に、塵埃粒子における重金属の局所的な存在状態を評価するために、電子線マイクロアナライザーを用いて、幹線道路塵埃、住宅地道路塵埃、雨水浸透柵堆積物を解析した。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。塵埃・堆積物の起源を推定するために、道路標識用の3種類の黄色塗料についても分析したところ、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(図3)。

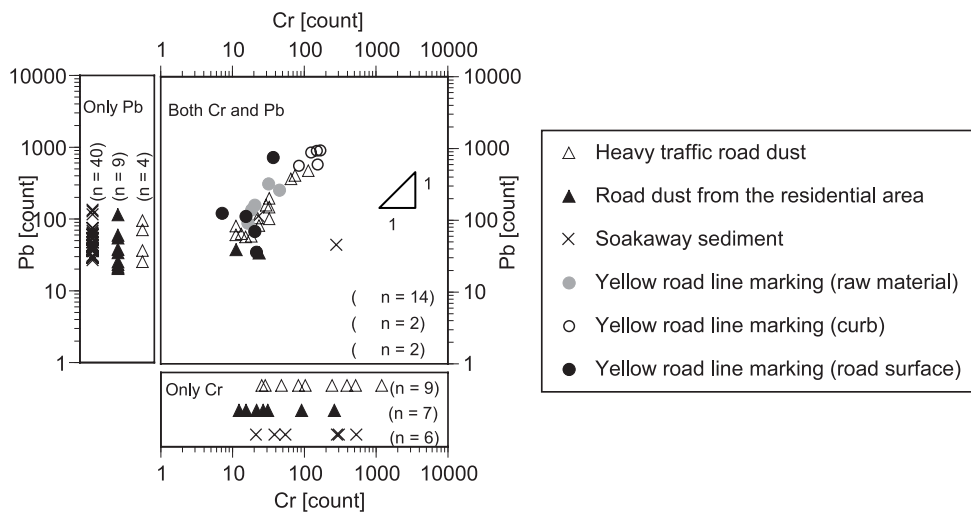


図3 道路塵埃及び道路標識用黄色塗料中Cr及びPb含有粒子におけるCr及びPbのX線強度比

## 2) 土壌浸透過程における重金属の動態評価

雨水浸透柵が実際に設置されている地点の土壌を採取し、土壌への重金属の吸着特性を評価した。特に、重金属間の競合的な吸着反応に着目し、表層及び下層の土壌について、それぞれ6種類の重金属(Zn、Cd、Ni、Cu、Pb、Cr)を単独添加する系と、二種類の重金属を添加する系の計21ケースの吸着実験を行い、Langmuir平衡式とFreundlich平衡式を適用することで、競合的な吸着関係を定量的に整理した。その結果、Cr、Pb、Cuは競合性が高いのに対して、Zn、Cd、Niは競合性が低い性質があることが明らかになった。図4は下層の土壌に対するZnおよびCuの吸着特性を示しており、Cuの共存により大幅にZnの土壌への吸着が低下するのに対し、CuはZnやNiの共存の如何によらずほぼすべてが土壌に吸着されることが分かる。逐次抽出法によって、重金属の存在形態を分析したところ、競合性の高いCr、Pb、Cuについては、酸交換画分だけでなく、還元画分や酸化画分への吸着も観察されたのに対し、競合性の低いZn、Cd、Niは、酸交換画分への吸着がほとんどであることが明らかになった。これらのことより、吸着部位の選択性の差異が競合性を決定する因子の一つになっていることが示唆された。

更に、雨水浸透柵堆積物を対象として、堆積物中の重金属の溶出特性についても考察した。その結果、有機物との錯体形成、pHの低下、還元状態などが、重金属の溶出に影響することが確認され、特に有機物との錯体形成が重金属の存在形態の変化に大きく寄与することが示された。各種重金属の溶出特性を評価した結果、移動性が高いZn、Cd、Niだけでなく、PbやCuも堆積物からの溶出がありえることが明らかになった。

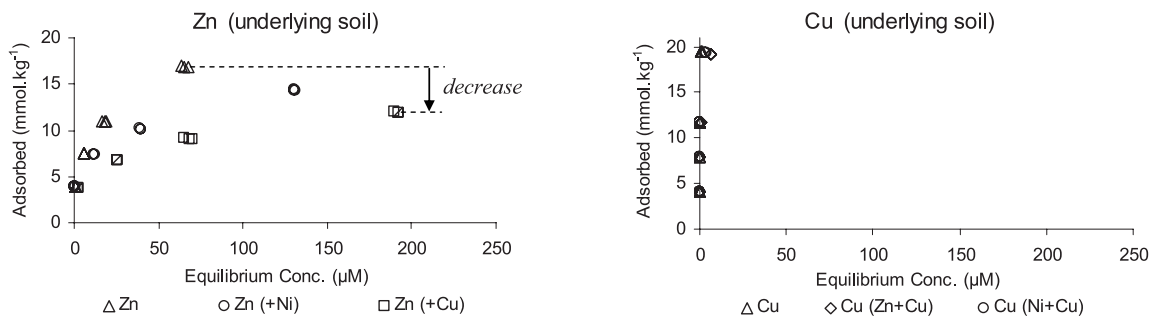


図4 下層土壌への亜鉛・銅の吸着に対する共存する他の金属の影響

### 3-2 都市排水の水溶性微量汚染の評価

本研究項目では、都市自己水源の「質」の相対的な評価を行うことが重要であるとの認識から、全国一級河川に加えて、都内地下水や湧水などの環境水試料の水溶性微量汚染物質である医薬品、抗生物質、フッ素系界面活性剤等の存在実態などに着目して汚染実態を研究した。その成果の一部を以下に紹介する。

#### 1) 下水処理過程、河川及び地下水における医薬品の分布と動態解析

下水処理水中に多数の医薬品類が検出されたことより、下水処理水が放流される河川水中での医薬品の汚染の広がりが懸念された。そこで、全国的な医薬品汚染の実態を把握するために、全国一級河川水中の医薬品濃度を測定した。全国一級河川の医薬品濃度を図5に示す。調査した河川全てにおいて、ibuprofen, naproxen, triclosan, crotamiton, carbamazepineなどの医薬品が数ng/Lから数百ng/Lの濃度範囲で有意に検出された。特に、都市域における医薬品濃度が極めて高かった。中でも、crotamitonは全国の河川から広く高濃度で検出され、crotamiton濃度と流域人口密度との間には強い相関関係が認められた(図6)。よって、crotamitonが都市排水の影響を表す化学指標として有用であることが示された。図7に全国一級河川における抗生物質の濃度を主要な7成分に関して示す。全ての河川からいずれかの抗生物質が有意に検出され、抗生物質の汚染が全国規模で広がっていることが明らかとなった。検出された抗生物質のうち、sulfapyridineが主要な成分であり、河川水中で数ng/L~数百ng/Lで検出された。庄内川、大和川では他の河川より高濃度で抗生物質が検出された。これらの河川は流域人口が多いためと考えられる。また鹿児島県の肝属川は他の河川の濃度組成とは異なりsulfamethazineが相対的に高濃度で検出された。sulfamethazineは動物用抗生物質として使用されており、肝属川の流域では養豚が盛んなことから、検出された抗生物質は家畜排水由来と考えられた。

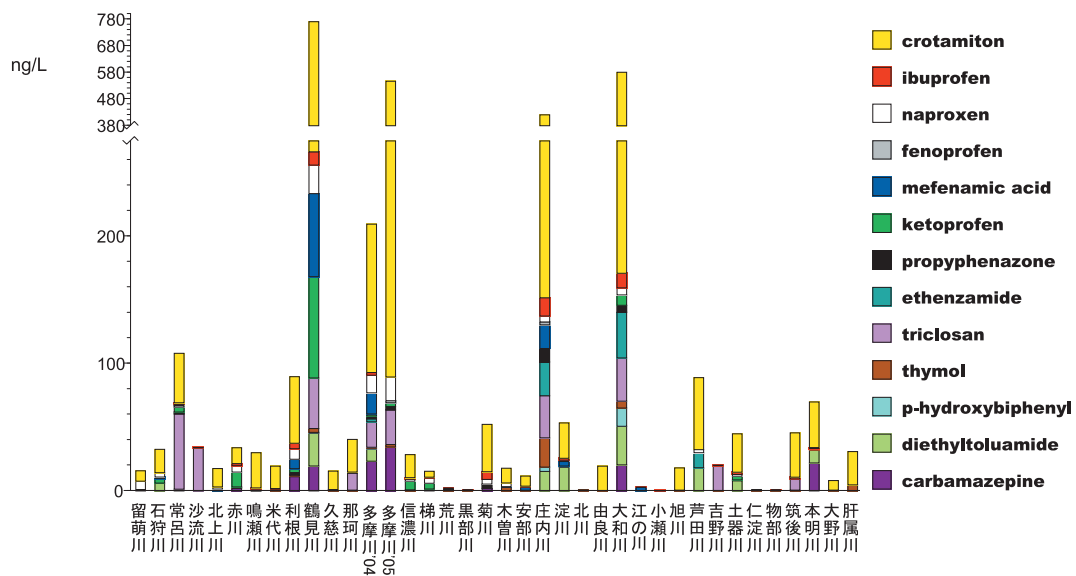


図5 全国一級河川水の医薬品濃度



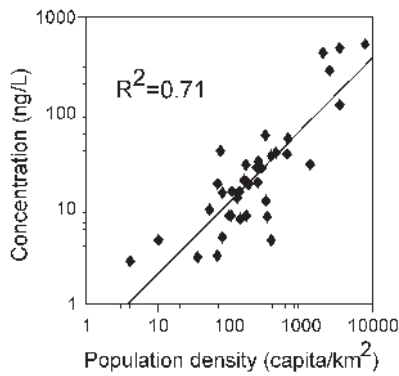


図6 全国一級河川の流域人口密度と crotamiton 濃度の相関関係

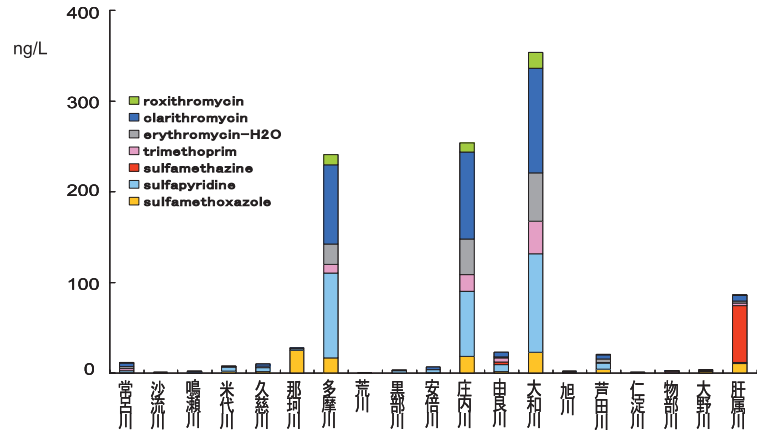


図7 全国一級河川中の抗生物質濃

### 3-3 土壌カラム実験を通じた涵養地下水の水質評価

本研究では土壌浸透による水質浄化能を考慮し、雨水、下水処理水等の水資源利用の可能性について土壌カラム (図8) を作成し検討を行った。カラム実験土壌は、東京都練馬区石神井町内公園で採取した。はじめに公園内の盛土された表層部をミニユンボで取り除き、GL-0.9 ~ -1.2m の範囲の関東ロームを実験土壌とした。

採取土壌は、はじめに自然乾燥させ、乾燥後、ステンレス製の篩を用いて土壌粒径  $75\mu\text{m} \sim 2\text{mm}$  に分別した。 $75\mu\text{m} \sim 2\text{mm}$  の範囲に分別した土壌を直径 200mm、高さ 600mm のステンレス製カラムに土壌厚 20cm (重量 5kg) 及び 50cm (重量 12.5kg) となるように加えた。

土壌カラムに浸透させる水は、下水処理水、道路排水の2種類を用いることとし、下水処理水は、標準活性汚泥法により処理した水に塩素を添加したものを用いた。道路排水は量の確保が困難なことから首都高速道路から採取した塵埃と地下水 (静岡県志太郡大井川町) と重量比 1:25 に 8 時間混合させ、16 時間静置した上澄み液を模擬道路排水として用いた。カラムへの浸透は  $300\text{mL/hr}$  程度 (降雨  $10\text{mm/hr}$  と想定) と設定し、通水はペリスタポンプにより行った。実験に使用する器材は溶存する物質の吸着等を考慮し、ステンレス製のものを用いることとし、送液ポンプローラー部配管についてはタイゴンチューブを用いたが、それ以外の箇所はステンレス製とした。また、道路排水を想定したケースでは、浸透条件により土壌吸着能が変化するかを検証するため、50cm カラムで連続して浸透させるケースと 24 時間間欠で浸透させるケースの2条件について実験を行った。

実験期間として下水処理水を用いたケースでは 80 日間、道路排水の連続浸透ケースでは 78 日間、間欠浸透ケースで 156 日間実施し、実験終了時での土壌カラムへの浸透量は、下水処理水、道路排水とも 600L 程度となり、浸透施設の集水面積と土壌浸透面積が同じであれば、東京都の降雨量で換算した場合は約 13 年分に相当する。

ここでは、一昨年度の領域シンポジウムで成果発表した成果概要の整理に留める。

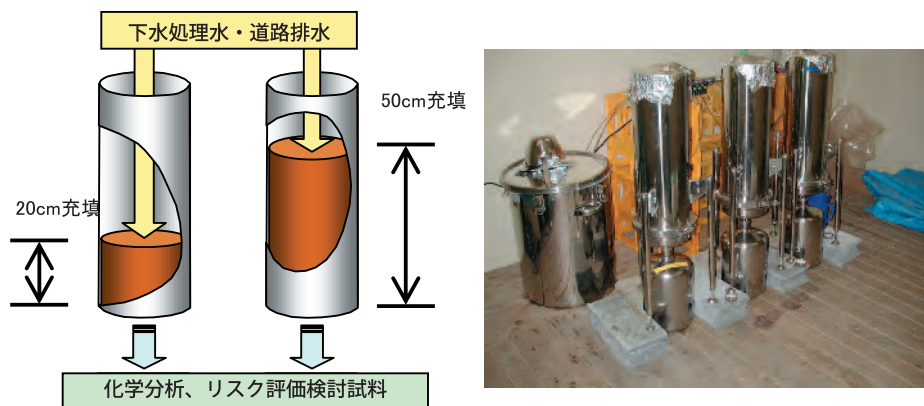


図8 土壌カラム実験装置

### 1) 模擬道路排水に対する土壌カラム実験

都市ノンポイント汚染物質を含む道路排水の地下浸透プロセスに着目して、模擬道路排水の土壌カラム実験を実施した。そのため、高速道路塵埃を大量（100kg以上）入手して、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3ヶ月間にわたり実施した。特に、降雨の間欠性も考慮をして連続浸透と間欠浸透の二条件で長期間の実験を行い、涵養地下水の水質評価を行った点は特筆すべき成果と判断している。それは、単なる一般水質項目である有機物や栄養塩類、重金属に留まらず、フッ素系界面活性剤などの微量有機化学物質も同時分析を実施した点にある。そして、溶出しやすい重金属とフッ素系界面活性剤については、土壌吸着機構や水質変換機構についても考察を加えたことも新規性の高い研究成果である。

### 2) 下水処理水に対する土壌カラム実験

従来の環境基準や水道水質基準にある水質項目に加えて、エストロゲンや医薬品類、さらにはバイオアッセイによる水質特性を評価することが、今回の研究課題では重要な位置づけとなっていた。そのために高感度LC/MS/MSを新規導入して、多くの都市排水や環境水中の当該物質の化学分析手法を確立するとともに、低濃度に存在する物質の濃縮方法と組み合わせた複数のバイオアッセイ手法の検討を進めた。

下水処理過程における微量汚染化学物質の除去過程の調査研究、下水処理水の土壌カラム実験研究を組み合わせて実施した。そして、下水処理水、その土壌涵養水に上記の分析手法を適用して、微量化学物質の存在状態や除去過程を調べ、リスク評価データを数多く入手した。特に、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は、本研究項目において非常に大きな貢献をした内容である。なお、研究期間後半では、医薬品に加えて、フッ素系界面活性剤も対象に追加して、幅広く微量化学汚染物質の検出に努めた。

一方、下水処理水を涵養した場合の土壌微生物による浄化メカニズムの解析、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、放射性同位体元素を利用したエストロン分解菌の探索を進めた。これにより、下水処理水中のエストロゲン物質の分解に関与する微生物群集構造の把握や、エストロン分解菌の検出手法を体系立てて開発したことは非常に有意義な成果の一つである。

## 3-4 多面的な水質評価のための「ものさし」の作成

水道水源を含む全国一級河川水を対象に、数多くの化学分析項目およびバイオアッセイによる毒性データを多面的に評価する作業を実施して、水質リスクのスコアリングやランキングする手法の検討材料を集積した。具体的には、国土交通省地方整備局の協力を得て採水、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（多摩川）の合計37河川を対象に水質調査を実施した。そして、環境ホルモン物質や医薬品類を含め、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。水質環境基準項目だけでなく、未規制汚染物質を含めて水質評価できたことから、水質特性を反映する項目群ごとにランクを設けることで、レーダーチャートとして表示でき、数値ではなく、図として水の「質」の特徴をわかりやすく示すことができたと考えている。

また、全国40地点の化学分析データ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ることに成功した。この非超過確率分布を数多くの水質項目について提示したことは、国際的にも斬新であり、水質を相対的に比較して、水利用者に理解しやすいものにする工夫として非常に役立つものと判断している。

成果の例として、全国河川調査におけるYES試験、マイクロトックス試験、AGI試験、MFP試験の結果を、前述の土壌カラム実験および下水処理場高度処理施設調査の結果を図9に示した。

エストロゲン様活性（図9a）は、下水の高度処理施設における調査結果、二次処理下水を用いた土壌カラム実験の結果を比較すると、前者においては砂ろ過まで処理を行ってもエストロゲン様活性の明瞭な

低減はできないが、オゾン処理により全国一級河川の水質分布の約30%の水質まで低減できることが明らかとなった。後者（土壌処理を想定したカラム実験）においても、流入下水と同程度のエストロゲン様活性を有する土壌カラム実験原水（二次処理下水）が、土壌カラム通過によりオゾン処理と同レベルの水質にまで再生されていることが明らかとなった。

マイクロトックス試験においては、約30%の試料から有意な毒性が検出された（図9b）。前述の模擬道路排水を用いた土壌カラム実験の結果と比較すると、原水では河川水の調査結果に比べ比較的高い毒性であったが、土壌カラムを通過することにより低減した毒性は全国一級河川の水質分布の約50%程度であった。

MFP測定の結果、全国河川水36試料のMFP強度は210 net rev./Lから20,200 net rev./Lまで、ほぼ100倍近い大幅な値の違いを示した。図9dに示したMFPの非超過率の分布の型から、MFPは対数正規分布に近い累積度数分布を示したことが分かる。このことはShapiro-Wilkの正規性検定の結果によっても裏付けられた。MFPは全体の約60%が1,400~3,400 net rev./Lの範囲内に分布し、幾何平均は2,400 net rev./L、中間値は2,440 net rev./Lであった。また、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3,000 net rev./Lを上回った比率は28%であった。MFP、及び、同時に測定した溶存態全有機炭素（DOC）の値について、流域状況を表す代表的指標である流域の人口密度との関連性を検討した。その結果、対数値を用いた相関係数は、人口密度とDOCでは0.26であったのに対して、人口密度とMFPでは0.42と、MFPの方が高い正の相関を示した。したがって、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。

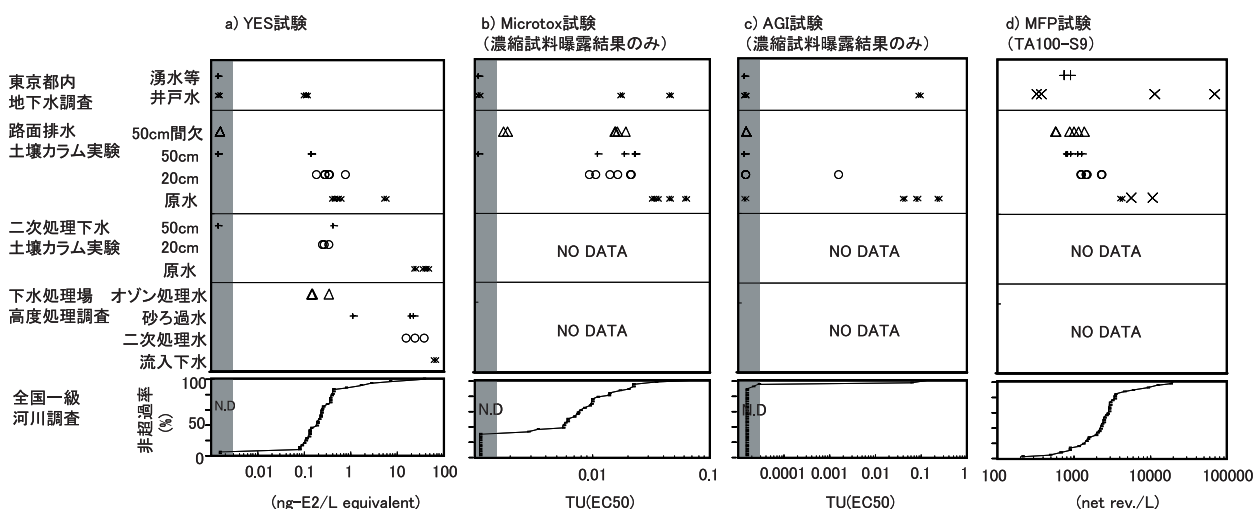


図9 全国一級河川調査における生物毒性等試験結果と各調査・実験結果との比較

a) YES 試験、b) Microtox 試験、c) AGI 試験、d) MFP 試験

### 3-5 水質スコアリング、ラベリング、ランキングから水利用のラベリングへ

上記の一連の現場調査と水質測定を元に、都市に存在する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方法の開発を目指した。それは、次の3ステップアプローチである。

- Step1 スコアリング：点数化＝各項目リスクの得点換算（各項目規制値の科学的根拠を個別に考慮）
- Step2 ラベリング：ラベル貼り＝特性化（スコアをカテゴライズ、想定用途・処理効率等からの特性表示）
- Step3 ランキング：等級付け＝利用用途・状況に合わせて具体的対応を伴う判定結果として提示。

ラベリングとはスコアをカテゴライズし、レーダーチャートの表現で対象となる水の特性を表示することである。この考えを進めるために、ヒト慢性毒性軸を新たに設定した。ここで三段階の「安全域」（0点）



が水道基準値の1/10、「危険域」(2点)を水道水基準値以上とし、両者の中間域を「準危険域(要監視域)」(1点)とした。この表示に従って整理しなおしたものが表1である。

表1 スコアリング結果の統合化(ヒト慢性毒性の例)

	安全域(0点)	準危険域(1点)	危険域(2点)
NO <sub>2</sub> -N	≤0.02 mg/L	0.02~0.2 mg/L	≥0.2 mg/L
Cd	≤1 μg/L	1~10 μg/L	≥10 μg/L
Pb	≤1 μg/L	1~10 μg/L	≥10 μg/L
Ni	≤1 μg/L	1~10 μg/L	≥10 μg/L
Se	≤1 μg/L	1~10 μg/L	≥10 μg/L
Cr	≤5 μg/L	5~50 μg/L	≥50 μg/L
As	≤1 μg/L	1~10 μg/L	≥10 μg/L
Sb	≤1.5 μg/L	1.5~15 μg/L	≥15 μg/L
benzo(a)pyrene	≤0.07 μg/L	0.07~0.7 μg/L	≥0.7 μg/L
PFOS	≤0.1 μg/L	0.1~1 μg/L	≥1 μg/L
PFOA	≤4 ng/L	4~40 ng/L	≥40 ng/L
Hg	≤0.1 μg/L	0.1~1 μg/L	≥1 μg/L
F	≤0.08 mg/L	0.08~0.8 mg/L	≥0.8 mg/L

さらにこれらから河川試料の慢性毒性スコアの分布をプロットしたものが図10である。この図中に道路排水を処理した場合の結果を縦線で挿入してある。処理することにより、スコアが減少することが読み取れる。レーダーチャート上にこれらの毒性ごとのスコアを示したのが図11であり、対象試料ごとにこのようなレーダーチャートすなわちラベルが記され、また処理などの措置によりラベルが変化することが識別できる。

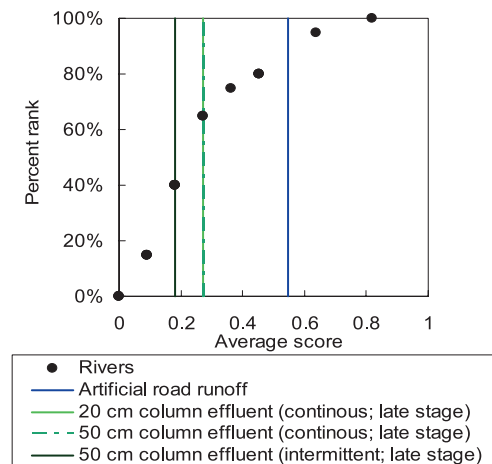


図10 河川試料の慢性毒性得点の分布および道路排水カラム実験結果との比較

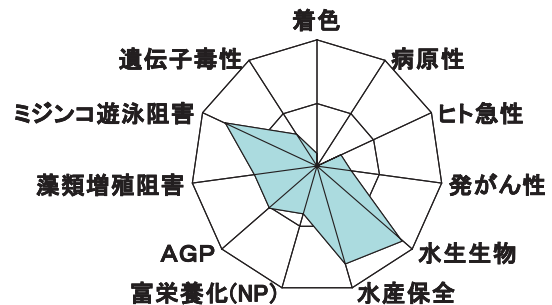


図11 レーダーチャート表示例

科学的根拠を基礎におきながら、さまざまな環境水や都市の水に対してスコア化やラベル化を適用しながら、同時にその水質レベルを全国河川の水質のものさしと相対比較させることで、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を提案した。この成果が、結果として都市の自己水源の水質リスク評価につながり、水利用者の選択判断の材料となりうる。

まさに、屋根雨水や道路排水、下水処理水やその高度処理水、さらには涵養地下水など、新たな都市の水源について、その水質のスコアやラベルやランクを統合・総合化して評価できる手法を提案できたものと考えられる。

### 3-6 都市内自己水源の有効利用と適正配置

地下水涵養を念頭に置いたストック型の水供給について検討する場合に流域を構成する各地区がどのような位置づけを有するのか、定量的に評価する必要がある。そこで雨水浸透と都市活動や土地利用とのバランスを把握できる指標としてウォーターサプライ・フットプリント (WSFP) 指標を提案した。WSFP 指標は、地区内で都市活動を行う居住者や事業者の水利用に対して、雨水浸透という形で自然に還元する場合に、その地区の面積がどれだけ必要になるかを表現する指標であり、エコロジカルフットプリントに類似した概念に基づいている。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であると考えられる。

そして、これらの研究成果を活かし、東京都野川流域における活動特性の異なる複数の地区（住居地区、商業・業務地区、用途混在地区、大規模公園地区など）対象として、地下水涵養を通じたストック型の水供給や、各地区の雨水や下水再生水の可能供給量及び、潜在的需要量を明らかにすることで、都市内自己水源の有効活用に向けた流域内の水資源配置に関する検討を行った。地下水涵養を通じたストック型の水供給について検討する際には、先に提案した WSFP 指標を導入した。分析結果を図 12、図 13 に示す。現状では、商業・業務系地区の WSFP 指標が最も高かったのに対して、屋根や路面を対象として雨水浸透施設を 30% 導入した場合、既に浸透効率の高い大規模公園地区とほぼ同じ値となることが示された。

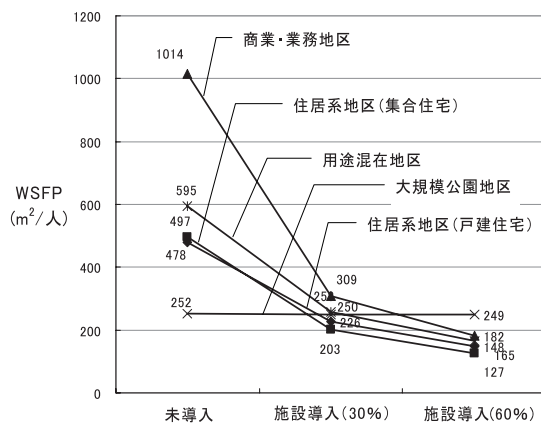


図12 各対象地区の WSFP 指標値

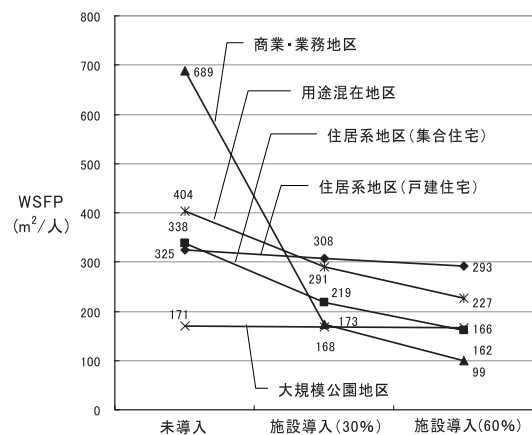
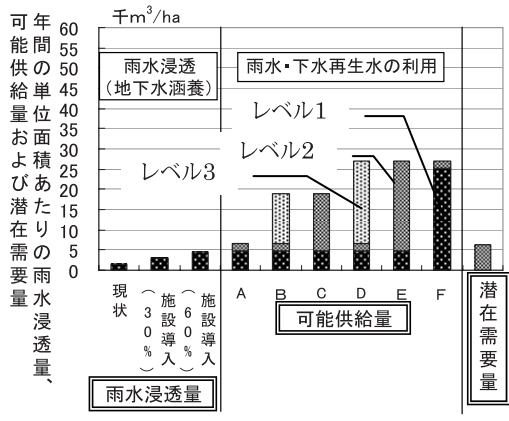


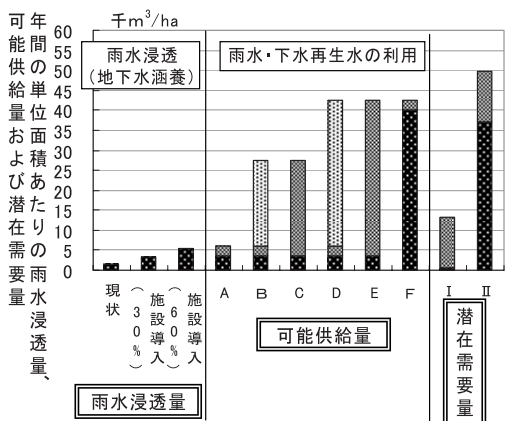
図13 各対象地区の WSFP 指標値

また、雨水や下水再生水を対象として、各対象地区の水利用用途を検討するとともに、それらの水量計算を実施した。なお、先述の水環境評価モデルより、まちなかの水環境は居住者の QoL に大きな比重を占めることが明らかとなっているため、日常的に利用される雑用水等に加えて、水環境創出のための親水・修景用水についても対象とした。また、これら水利用用途に関して衛生学的安全性の観点からスコアリングを行った。各対象地区の雨水や下水再生水の可能供給量および潜在的需要量を図 14 に示す。

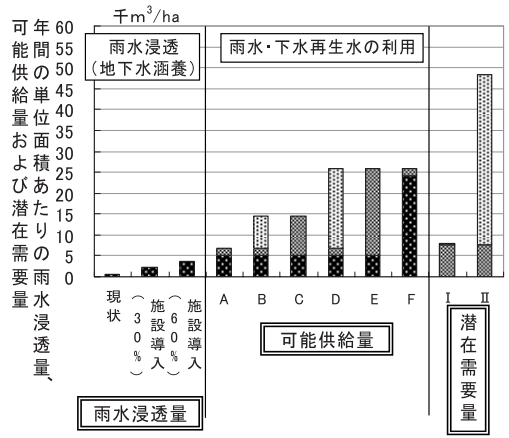
分析の結果、各地区の活動特性によって水利用特性は大きく異なり、例えば、住居系地区（戸建住宅）では、雨水利用方式のみで、その地区のスコア（要求水質）および需要量を満たす程度の供給が得られ、さらに地下水涵養を通じた水資源の供給源となる可能性が高いことが明らかとなった。その一方で、大規模公園地区では、潜在需要を満たすだけの供給可能性はなく、周辺地区からの供給を前提とした水資源配置が望ましいことが示された。



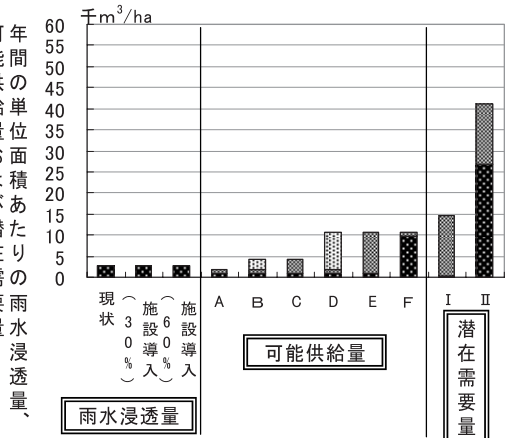
①住居系地区（戸建住宅）国分寺市東元町1丁目



②住居系地区（集合住宅）調布市国領町2, 3丁目



③商業・業務地区 国分寺市本町2, 3丁目



④大規模公園地区 調布市野水1丁目

**凡例（シナリオ）**

可能供給量  
 ①雨水利用方式のみ  
 A: 雨水利用方式のみ  
 ②地区循環方式（雨水利用方式併用）  
 B: レベル3に準ずる処理方式  
 C: レベル2に準ずる処理方式  
 ③広域循環方式（雨水利用方式併用）  
 D: レベル3に準ずる処理方式  
 E: レベル2に準ずる処理方式  
 F: レベル1に準ずる処理方式

**要求水質レベル**

①大腸菌：  
 不検出/100ml, レベル1, 2  
 1000CFU/100ml以下  
 （大腸菌群数）, レベル3  
 ②濁度：  
 2度以下を常に遵守, レベル1  
 2度以下を管理目標, レベル2, 3

図14 年間の単位面積あたりの雨水浸透量，可能供給量および潜在需要量（⑤用途混在地区を除く）

4. まとめと今後の展開

本研究チームでは、研究期間の前半では、汚濁流出解析および水収支モデルの構築作業、表流水だけでなく、地下水、屋根雨水および道路排水、再生水、涵養地下水などを対象とした調査研究、地下水涵養のカラム実験研究を主として実施し、後半では、全国河川や都市内地下水の水質調査へと展開しながら、水質リスクのスコアリング、ラベリング、ランキングを通じたリスク評価のあり方、また、都市自己水源の再利用や適正配置について野川流域をケーススタディとした検討など中心に研究実施した。

現場採取試料と実験試料について、化学分析結果とバイオアッセイを組み合わせた多面的な分析を行い、都市域の潜在的な水資源における有害化学物質の動態と水質のリスク評価を進めた。このリスク評価のために、グループ横断的なリスクラベリングに関するタスクグループ活動を展開した。そして、水利用者や関連利害関係者にわかりやすい水質リスクの表示方法、リスクのスコアリング・ランキング・ラベリングの手順やその方法論の基礎を築いた。都市の水収支と関連づけて、利用可能な都市自己水源に関する「リスクのラベリング」情報は、利害関係者の水利用選択の自由度や柔軟性を確保する上で重要なものとなり、最終的には都市域自己水資源の戦略的活用提案につながるものと考えている。

なお、チーム全体としては、2005年と2007年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ワークショップを開催した。そして、実務者に対するアンケート実施などを通じて、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。したがって、チーム成果物として、図書の出版や公開性の高いWEB掲載や映像情報を活用できるDVD化を検討している。

## 5. 主要な成果報告等（論文、招待講演・口頭・ポスター発表、新聞報道）

### 1) 原著論文

- (1) 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
- (2) 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
- (3) Hiroaki 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.
- (4) 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, 40, 3297-3303, 2006.
- (5) Rupak.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, pp.245-251, 2006.
- (6) Rupak.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
- (7) 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.
- (8) 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, pp.501-508, 2006
- (9) Hiroyuki 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
- (10) 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

(他 17編)

- 2) 招待講演 (国内会議 6件、国際会議 3件)  
口頭発表 (国内会議 41件、国際会議 35件)  
ポスター発表 (国内会議 7件、国際会議 10件)

### 3) 受賞

平成18年度日本水環境学会論文賞：Michio MURAKAMI, Fumiyuki NAKAJIMA and Hiroaki FURUMAI  
Modeling of runoff behaviour of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from roads and roofs, Water Research, Vol. 38, 4475-4483 (2004)

- 4) 新聞報道 (国内新聞 6件)