

環境中における雨天時下水道由来のリスク因子の変容と動態

東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 古米弘明

研究組織

- 古米弘明 (東京大学 大学院工学系研究科)
- 高田秀重 (東京農工大学 農学部)
- 福士謙介 (東京大学 環境安全研究センター)
- 中島典之 (" 大学院工学系研究科)
- 片山浩之 (" 大学院新領域創成科学研究科)

1 はじめに

近年、合流式下水道の雨天時越流水 (CSO ; combined sewer overflow) に伴う汚濁に関して一般の関心が高まっている。しかし、降雨のような非定常的事象に対する現場調査は容易ではなく、十分な実態調査が行われていないのが実情である。特に、放流後の汚濁物質の動態把握や親水空間との関連付け、また BOD などの一般的な有機汚濁指標以外の水質に関しては情報が不十分である。CSO には、下水由来の病原微生物 (バクテリアだけではなく、ウイルスや原虫類も含む) やホルモン物質、医薬品などの多様な物質に加えて、都市ノンポイント汚染物質である、ダイオキシン類や多環芳香族炭化水素類 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) といった燃焼副生成物や、都市基盤や建築物表面に塗装、散布されるような様々な化学物質や重金属類など、非常に複雑で多様なリスク因子が含まれていると考えられる。

これらのリスクの予測を行うためには、まず汚濁発生の定量的予測、排出後の動態の予測、さらに様々なシナリオの下でのリスクの評価、といったことが必要になる。たとえばお台場などの東京湾岸の親水公園をリスク評価対象に想定した場合、多数の吐き口やポンプ所、非常に複雑な下水管路

網、入り組んだ水路などを考慮した解析や評価は極めて困難なことになる。実測データの蓄積と、予測モデルの高度化が必須であり、合わせて、従来測定されてこなかったようなリスク因子も念頭において解析が求められている (図 1)。

本研究の目標は、都市ノンポイント汚染や雨天時合流式下水道起因の汚濁問題に関連する化学物質と健康関連微生物の、発生源と受水域における環境動態 "Fate" を定量的に評価する、汚濁対策評価に必要な負荷量算定やリスク評価の手法を提供し、安全で快適な親水空間を創出することに寄与することを目指す、の二点である。以下に得られた結果について述べる。

2 下水由来のリスク因子の特性評価

1) 道路堆積物中の有害化学物質プロファイルの解析

東京都内の道路堆積物およびその起源と想定されるもの (排ガスや舗装材等、合計 86 データ) の多環芳香族炭化水素類 (PAHs) を測定し、道路堆積物中の PAHs の起源とその寄与率についてクラスター解析と重回帰分析を用いて統計学的に求めた。その結果、道路ごとに各起源の寄与率は異なり、排気ガスだけでなく磨耗したタイヤも重要な起源となっていることが示唆された。

2) 下水中のマーカー物質の探索と化学汚染物質の特性の解析

ヒトの糞便に特異的なステロール類のコプロスタノールと合成洗剤由来のアルキルベンゼン (図 2) を東京都下水処理場で採取した試料について

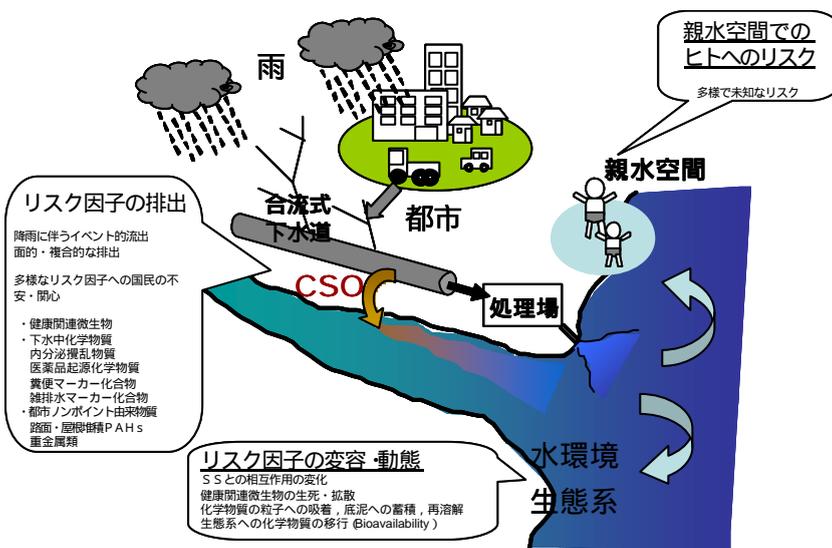


図 1 雨天時下水道由来リスク因子に関する問題

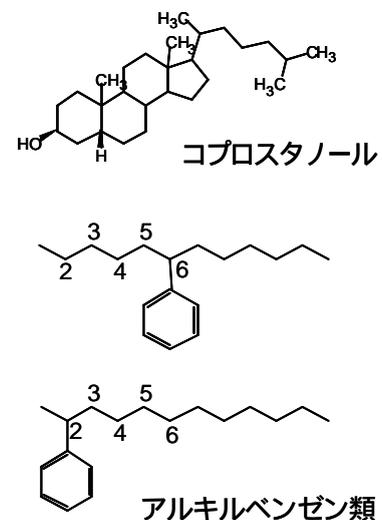


図 2 下水中のマーカー物質

分析した。流入水と二次処理放流水中のコプロスタノール濃度は $330 \pm 54 \mu\text{g/L}$ ($n=5$)、 $1.9 \pm 1.0 \mu\text{g/L}$ ($n=5$)、アルキルベンゼン濃度は $10.6 \pm 2.9 \mu\text{g/L}$ ($n=5$)、 $0.16 \pm 0.05 \mu\text{g/L}$ ($n=5$)であり、98%以上が通常の下水処理により除去され、これらの化合物が越流の指標として優れていることを明らかにした。いずれも粒子相に90%以上が存在していることを確認し、これらの化合物が越流粒子の指標となることを明らかにした。アルキルベンゼンの異性体組成比(I/E ratio; 流入水: 0.94 ± 0.09 、放流水: 4.26 ± 1.22)は、流入水と二次処理水で大きく異なり、雨天時越流下水の寄与を推定する指標として有用である可能性が示された。

3) 下水におけるウイルス検出定量法と病原微生物指標の開発

陰電荷膜を用いて腸管系ウイルスを濃縮する手法を、下水流入水および処理水に適用した。Norovirus に関しては培養手法が開発されていないため回収率は不明であるが、下水処理場流入水、一次処理水および二次処理水の100mLの試料からそれぞれ検出することができた。これらの結果から、陰電荷膜を用いたウイルス濃縮法は、下水処理場におけるウイルス測定において十分に適用可能なウイルス濃縮法であることが明らかとなった。一方、ファージは水処理工程においてウイルスと似た挙動を示すため、ウイルス指標として期待されているが、絶対濃度が低いことから測定法の開発、および、消毒に対する耐性の解明が今後の課題として挙げられる。

下水処理工程における病原微生物および指標微生物の挙動を調べるため、晴天日および雨天時において、経時的に採取された沈殿池への流入水および流出水(雨天時は2系列)、下水二次処理水(晴天日のみ)の12試料について微生物試験を行なった(表1)。その結果、晴天日および雨天時ともに第一沈殿池ではほとんど指標微生物数が減少せず、Enterovirus および Norovirus の陽性率も減少しなかった。一方、下水二次処理水において指標微生物はほぼ安定して99%除去を達成しており、Norovirus の陽性率も100%から25%に低減していることがわかった。しかしながら、この低減は病原微生物の管理の点からは十分と言えず、このあとに続いて施されている消毒における微生物低減効果、特にウイルスの不活化効果を確認する必要がある。

下水中や海水中のタンパク質の組成比較によるCSO寄与率評価については、試料の適当な精製方法が見出せな

かったため、2次元電気泳動結果に強いノイズが表れ、その相同性を比較するに至らなかった。

表1 晴天時の下水処理におけるウイルスの挙動

	NVG1 ¹⁾	NVG2 ¹⁾	EV ¹⁾	EV CC-PCR ¹⁾
流入水	11/12	11/12	1/12	1/12
沈殿池流出水	11/12	10/12	0/12	7/12
二次処理水	2/12	1/12	0/12	0/12

1) No. of positive sample / No. of sample tested

3 リスク因子の受水域における雨天時動態評価

1) 雨天時下水由来粒子の分布の調査

8月2日の雨天に伴う越流の翌日に東京湾(運河、東京港、隅田川河口)15地点で採取した表層海水(粒子相)中のコプロスタノール濃度、アルキルベンゼン濃度はそれぞれ366~11,100 ng/L、29~1,020 ng/Lであった。これらの濃度は晴天時(12月14日)に採取したコントロール試料に比べて一桁程度高く、雨天時越流下水の寄与が示された。I/E ratio やコプロスタノールを含めたステロール類組成測定結果からも越流下水の寄与が確認された。下水中の指標化合物の濃度との比較から、越流先の海水中で下水粒子が生下水の数十分の1に希釈されて存在していると計算された。同様の結果は10月1日の降雨後の調査においても観測された。10月の調査時に経時的な観測を行った結果、水中の指標化合物濃度は越流後2日で1桁減少することが明らかになった(図3)。水中濃度の急激な減少の一部は越流粒子の沈降・堆積によると考えられた。実際に、ポンプ所や下水処理

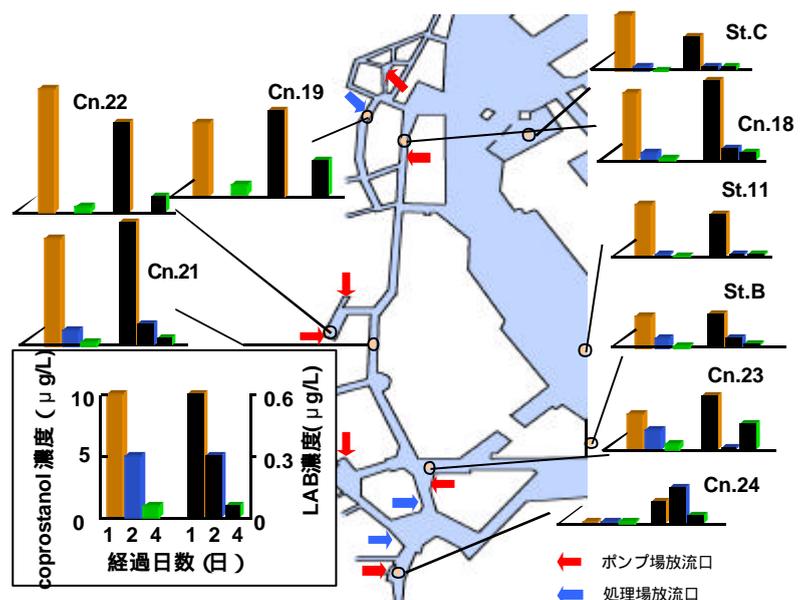


図3 東京湾岸海水中的のマーカー濃度の経時変化(2002.10)

水放流口付近に越流粒子が堆積していることが指標化合物の分析から確認された。堆積物中のアルキルベンゼンの異性体組成 (I/E ratio) から、芝浦下水処理場の放流口付近の堆積物中で越流粒子が日常的に放流されている二次処理水中の粒子と同程度の寄与をしていると推定された。

2) 雨天時下水中のウイルスおよび病原微生物の調査

大腸菌群数と糞便性大腸菌群数には正の相関があるが、これらと Norovirus の間およびこれらと Enterovirus との間には相関は見られなかった。また、腸管系ウイルスとファージが共に検出された地点数は非常に少なかった。これらのことから、腸管系ウイルスの代替指標として有効な水質項目は今のところ見あたらないといえる。

大腸菌群は越流の翌日に高い濃度であるのに対し、腸管系ウイルスの方は必ずしも越流直後の存在量が多いとはいえない結果となっている(表2)。このことから、排出源や東京湾沿岸域における消長などにおいて、腸管系ウイルスは大腸菌群とは異なる挙動を持つといえる。

これらの違いが排出源の挙動によるものとするれば、腸管系ウイルスは通常の下水处理プロセスで完全に除去されず、日常的に環境中に排出されている可能性がある。その場合、東京湾のウイルス濃度レベルを決定する要因として、通常処理水由来と比較して雨天時越流水による非定常的な流出による影響は小さいともいえる。一方、沿岸域における消長の違いによるものとするれば、ウイルスは大腸菌群に比べて長期にわたって残存する可

表2 東京湾における越流後の腸管系ウイルスの検出結果

	NVG1 ¹⁾	NVG2 ¹⁾	EV ¹⁾	EV CC-PCR ¹⁾	TC ²⁾ (CFU/ml)
3 Aug (1 day)	5/19	2/19	0/19	9/19	10 ^{3.54±0.69}
2 Oct (1 day)	4/19	1/19	4/19	2/19	10 ^{3.42±0.61}
3 Oct (2 day)	3/12	0/12	5/12	7/12	10 ^{2.49±0.46}
5 Oct (4 day)	1/14	2/14	2/14	7/14	10 ^{2.54±0.62}

- 1) No. of positive sample / No. of sample tested
2) Average and standard deviation of log normal distribution

表3 ウイルス類による感染リスクの試算

対象地域	接触形態	個人年間感染リスク	感染者の出現期待年数(年)
お台場海浜公園	散歩時の接触	3.22 x 10 ⁻⁶	647
お台場海浜公園	ウインドサーフィン	1.49 x 10 ⁻⁴	336
城南島海浜公園	水遊び	5.80 x 10 ⁻⁶	192
中央海浜公園	釣り	3.30 x 10 ⁻⁵	101
中央海浜公園	バードウォッチング	1.61 x 10 ⁻⁶	31,056

能性がある。いずれにせよ、晴天時におけるウイルスの存在状況に関する調査、および下水処理場におけるウイルス流出量に関する調査が今後の課題として挙げられる。

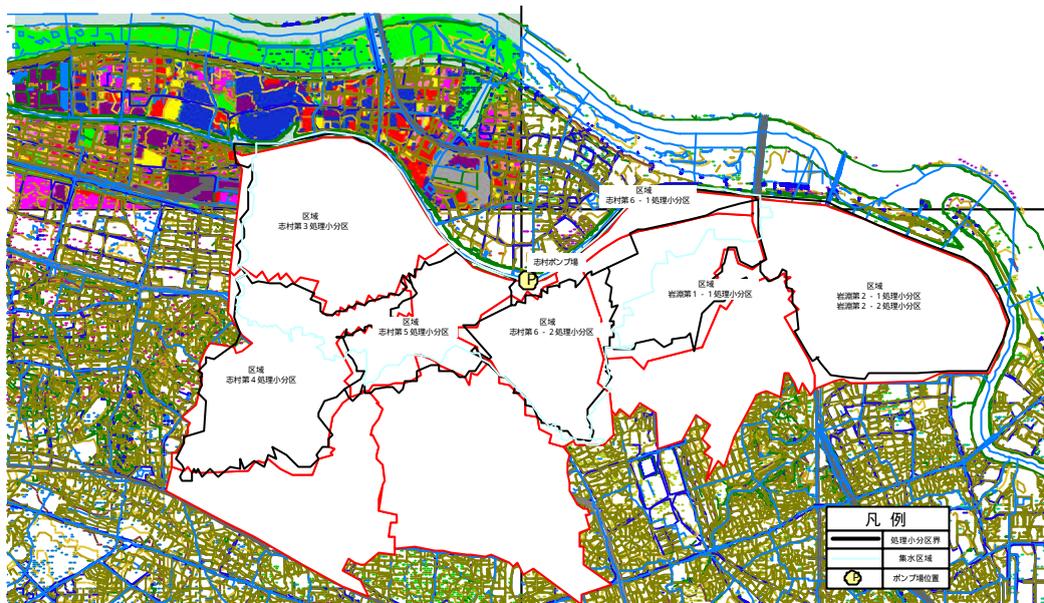
4 合流式下水道雨天時汚濁解析とリスク評価

1) 合流式下水道雨天時汚濁解析

雨水流出特性の異なる8排水区(自然流下雨水吐口排水区4箇所、ポンプ所排水区4箇所)を対象として、下水道台帳電子データ(東京都下水道局 SEMIS)や10mメッシュの細密数値情報、数値地図などを活用して分布型モデル解析に必要な管路ネットワークデータや地表面分布データを含むCSO汚濁解析のプラットフォームを作成した(図4)。そして、ポンプ場や吐口での雨天時越流水汚濁負荷量の予測と算定を目指して、当該排水区における複数降雨に対して雨水流出解析を行い、不浸透域と浸透域の設定のあり方を議論した。多くのモデルパラメータの合理的な設定手法を検討するとともに、汚濁解析プロセスモデルにおける管路内堆積物と地表面堆積物の汚濁負荷条件設定に関する課題抽出を行った。これらを基礎として、実務レベルでの分布型モデルによる雨天時汚濁解析のための体系的な計算手法の整備が期待できる。

2) 親水公園における感染リスク評価

糞便性大腸菌とウイルスによる感染リスクを現地の水接触形態調査に基づき求めた結果、通常の都市生活者の年間許容リスクである10⁻⁴を超えるリスクは観察されなかった(表3)。ウイルスによる感染リスクの方が現在の海水浴場の水質基準の指標である糞便性大腸菌群によるものよりも高めとなることが明らかとなり、今後ウイルスを指標とした環境衛生調査が必要と考えられる。また、現在環境省が定めている糞便性大腸菌群による海水浴場の水質基準値は現在の我が国の海水浴形態を考えるに、通常の年間許容リスクの1/1000程度に保っており、許容リスクを指標とした場合にはその整合性がない。今後、コプロスタノールや他の糞便性指標を用いたリスク算出法などの開発も必要となると考えられる。また、より正確にリスクを算出するための容量反応モデルやパラメータのデータ蓄積は我が国は遅れているため、特に研究の必要性が高い。



細密数値情報(首都圏1994) 国土地理院

図4 雨天時汚濁解析におけるブロック割と土地利用図の例

5 今後の展望と課題

1) 地域特性依存の雨天時非定常汚濁現象の解明に向けて

本研究では大都市域の親水空間におけるヒトと水の接触を見据えて、晴天時という安定状態と雨天時での非定常状態での現象を比較しながら、雨天時越流水汚濁流出過程を連続観測することを試みた。興味ある知見やデータが取得できたものの、その研究期間の制限や人的なパワー不足もあり、さらに体系立てた環境モニタリングデータの蓄積を必要としている。

今回の研究成果である都市ノンポイント汚染物質の PAH のプロファイリング手法、さらに下水由来のウイルス検出手法、汚水中のマーカ物質の追跡などに加え、さらに糞便汚染源の識別に遺伝子を活用した検出手法、化学組成や微生物群集プロファイルを活用するなどして、病原微生物やその指標微生物の起源解析と動態解析を行うことが非常に期待される研究テーマである。そして、受水域での健康リスク評価を定量的に行う手法を展開することで、最終的には下水道由来の衛生リスク物質の管理手法や低減技術のあり方など対策効果を定量的に検討可能な知見を蓄積することが可能となる。

今後、ある意味では汚濁発生源となる下水道を含め都市基盤を管轄する国土交通省が、受水域の環境モニタリングを管轄している環境省や海上保安庁、さらには健康関連微生物や健康リスクを管轄している厚生労働省などと連携した研究組織や連携プロジェクトを展開することで、より効率的

で有効な環境モニタリングと環境リスク評価が推進されるものと期待される。

2) 都市域の雨天時汚濁流出解析モデル技術の高度化に向けて

複雑なネットワーク構造や汚濁対策構造物を保有する合流式下水道排水区において汚濁解析技術を高度化するには、様々な特徴を有する排水区において多くのモニタリングデータを取得することが最も肝要である。同時に、仮定の汚濁解析計算から管内堆積物が想定される箇所や汚濁流出負荷量として特徴的な箇所を事前に抽出することも重要であると考えられる。体系だったモニタリングを進める上で役立つ観点からも、モニタリングとモデリングの連携と融合が事業レベルで今後検討されるべきである。

大都市の下水道システムでは貯留施設やポンプ所の設置などで施設ネットワークが複雑になってきており、イベント的に発生する雨天時汚濁負荷流出過程を経験的な知識だけで解釈や評価することは非常に困難であると想像される。それゆえに、下水道管理台帳データの電子化、降雨レーダを活用した情報システムの構築など、経験的な下水道の管理から情報やモデルを実務利用した管理へ移行する必要がある。合流式下水道汚濁対策や都市ノンポイント汚染対策を効率よく進展させ、また親水空間を利用する住民に汚濁状況や健康リスクをわかりやすく提示するためにも、問題となっている汚濁負荷流出過程を正しく理解して、評価すべき汚濁現象に応じて、精度よく汚濁負荷流出量を表現できるモデルが必要な状況にきている。