

◆特集：自然共生型流域圏・都市の再生◆

都市の水循環における雨天時汚濁負荷流出現象の影響解析

森田弘昭*

1. はじめに

水は、地表形態、大気、生物とともに都市環境を支配する自然的要素として、基本的かつ不可欠であることはいうまでもない。水の存在と動態、特に人間活動との関係を解明することこそ、都市環境問題の現状と将来を考察するうえで、必須条件となっている。Hermanowicz (1999) によれば、現状における、人工100万人の仮想都市への入力水：700,000Mg/day、食料：1,800Mg/day、燃料：8,200Mg/dayであり、出力では排水：560,000Mg/day、固体廃棄物：1,800Mg/day、大気汚染物質：520mg/dayと記されている。このように、都市に出入りする物質の中では、水が一番大きな輸送量を有しており、都市環境に影響を与える物質の中で、量的に一番重要な物質であると考えられる。水の重要な特性はその循環性にある。そして、都市域においては上下水道に代表される水利用施設によって、極めて大きな人工的な水輸送系が形成され、自然の水循環、特に流域スケールの水循環にも大きな影響を量と質の面で及ぼしている。このように、都市環境における健全な水循環を構築するためには、都市内水循環の出力系の大半に関与する下水道システムを無視することはできない。特に、健全な水循環に齟齬をきたしている大都市で整備されている合流式下水道を評価することは極めて重要なことと考えられている。

合流式下水道の雨天時越流水問題については、お台場海浜公園（東京都港区）における白色固形物漂着の報道等を契機に対策推進の気運が高まり、平成13年6月には「合流式下水道改善対策検討委員会」が立ち上がり、平成14年2月には「合流式下水道の改善対策に関する基本的な考え方（案）」として最終報告がとりまとめられたところである¹⁾。

しかし、合流式下水道越流水と放流先水域の水質の関係について検討された事例はほとんどなく、

またそれ以前の問題として、議論の材料となるような調査データも十分ではないのが現状である。

このような背景から、今回合流式下水道越流水が流入する海域を対象として雨天時水質調査を実施した。

2. 調査方法

2.1 調査地点の概要

調査海域には久里浜港（神奈川県横須賀市）を選定した。当該海域を調査対象として選定した理由は以下の通りである。

- 1) 久里浜港への主たる雨水流入経路が平作川のみである。
- 2) 流域の大半が都市化され、また下水道普及率も高い。
- 3) 流域内に適当な広さの合流式下水道整備地区を抱えている。
- 4) 久里浜港の沿岸の一部では親水的な利用がなされている。

平作川流域の状況は図-1の通りである。平作川は大楠山に源を発し久里浜港に注ぐ2級河川で、下水道の排水系統を考慮した流域面積は約23km²である。

流域内の下水道普及率は約95%であり、これらのうちJR衣笠駅北側の旧市街地周辺が合流式下水道（上町処理区、一部は下町処理区）によって

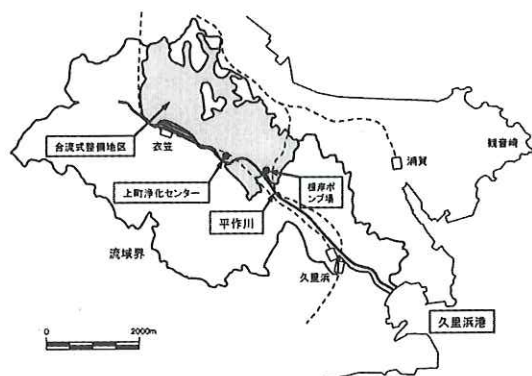


図-1 平作川流域の状況

整備されている（図-1のハッチ部分）。流域内における合流式下水道の整備面積は約5km²であり、これは流域面積全体の約20%に相当する。

合流式下水道整備地区内には、処理場（上町浄化センター）1箇所、ポンプ場（根岸ポンプ場）1箇所、および雨水吐き11箇所が存在する。遮集管は時間最大汚水量の3倍（いわゆる3Q）で整備されており、1mm/hr程度の降雨で越流が生じる。なお根岸ポンプ場の下流には3箇所の雨水ポンプ場（分流式）が整備されている。

久里浜港における調査地点の位置について図-2に示す。調査地点1は平作川から久里浜港への流入水質を把握するため、平作川最下流（開国橋）に設定した。調査地点2は久里浜港内での水質変動を把握するため、開国橋より約500m離れた国土技術政策総合研究所（国総研横須賀）の構内岸壁に設定した。調査地点1では合流式下水道の雨天時越流水と分流式下水道の雨水放流水の両方を含んだ河川水を採水することになるため、本調査結果から合流式下水道の雨天時越流水の影響だけを分離して評価することは困難である。



図-2 久里浜港における調査地点位置

2.2 調査方法

調査は晴天時、雨天時の各1回ずつ実施した。晴天時調査は、各調査地点において2回の採水を行った。雨天時調査は、各調査地点において降雨後5日間にわたり採水を行った。調査開始日およ

びその翌日については、潮の干満にあわせて採水を行った（2日間で6回）。3日目以降は1日に1回の採水とし、採水時間は日中の干潮時にあわせた。採水は橋上もしくは岸壁より直接行い、いずれも表層水を対象とした。試料はバイク便等を活用し、採水後速やかに国土技術政策総合研究所（つくば）に搬入し分析を行った。

水質分析項目はCOD、SS、T-N、T-P、大腸菌群数、糞便性大腸菌群数である。大腸菌群数についてはBGLB培地直接MPN法により、糞便性大腸菌群数についてはM-FC寒天培地法により分析を行った。このほか水温、DO、電気伝導度について現地にて測定した。

なお、潮位データは海上保安庁横須賀験潮所の潮汐日報³⁾を、雨量データは流域内の上町浄化センターの計測データを使用した。

3. 調査結果

3.1 晴天時調査結果

晴天時調査は平成13年11月26日に実施した。当日までの先行無降雨日数は13日間であり、また干潮が7:40、満潮が14:30であり、採水はこの間で各地点とも2回ずつ行った。

調査結果を表-1に示す。各地点において2回の調査結果に大きな差はなく、これらの平均値を晴天時の平均的な水質として扱うこととした。

3.2 雨天時調査結果

雨天時調査は平成13年12月13日から17日にかけて実施した。当日までの先行無降雨日数は6日間であった。

調査地点2における採水時刻を横須賀験潮所の観測潮位とともに示したものが図-3である。採水は原則として調査地点2、調査地点1の順に実施しており、2地点の採水時刻の差は10～20分程度である。調査期間中の検体数は各地点とも9検体ずつである。

12月13日における上町浄化センターにおける降雨量、ならびに上町浄化センターの簡易処理放

表-1 晴天時調査結果

調査地点	採水時刻	COD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	大腸菌群数 (個/100mL)	糞便性 大腸菌群数 (個/100mL)	水温 (℃)	DO (mg/L)	電気伝導度 (s/m)
調査地点1 (開国橋)	7:40	3.6	4.6	3.08	0.31	490	330	15.0	7.0	欠測
	11:25	4.8	3.6	3.16	0.32	170	140	15.5	6.0	欠測
調査地点2 (国総研横須賀)	10:05	1.9	6.0	0.72	0.05	130	90	15.8	8.2	欠測
	11:35	1.8	4.1	0.63	0.05	78	20	15.8	6.1	欠測

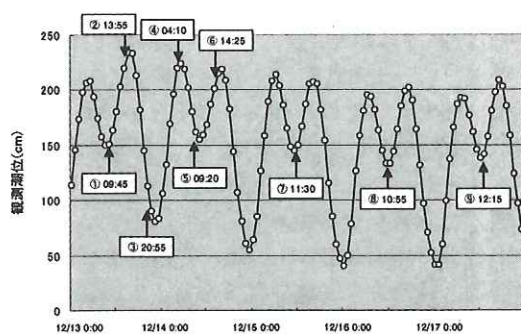


図-3 調査地点2における採水時刻と観測潮位

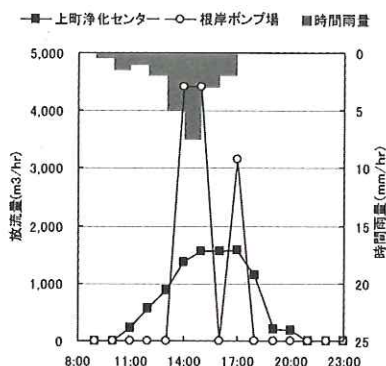


図-4 12月13日の降雨、および越流の状況

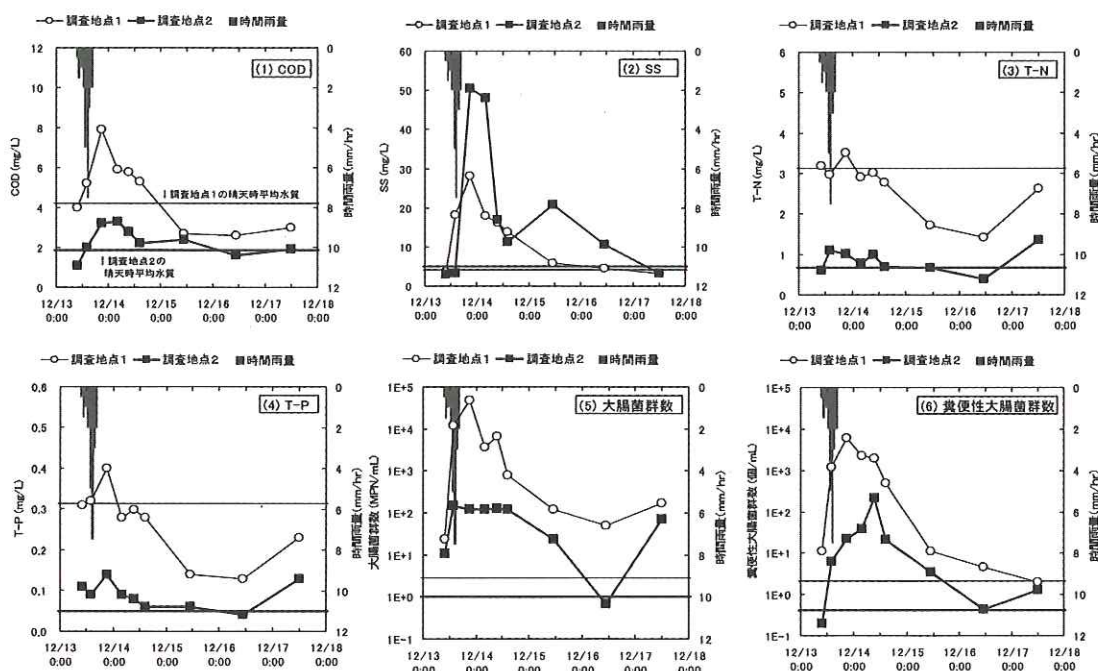


図-5 雨天時調査結果

流量、根岸ポンプ場の放流量について図-4に示す。総降雨量は22.5mmを記録した。なお13日の降雨終了後、17日までの調査期間中に新たな降雨はなく晴天が続いた。

降雨量ならびに上町浄化センターの簡易処理放流の状況から判断して、雨天時越流が始まった時刻は10時から11時の間であったと想定される。よって1回目の採水における調査地点1の水質は越流水の影響を受けていないものと考えられる。また、越流量のピークは15時前後と想定され、2回目の採水は越流量のピーク前、3回目の採水は越流量のピーク後に相当すると考えられる。なお、

根岸ポンプ場の下流に位置する3箇所の雨水ポンプ場（分流式）においても、15時から16時にかけて放流があった。

調査結果について図-5に示す。なお図中には晴天時の平均水質もあわせて表示した。前述の越流状況を反映して、調査地点1においてはすべての水質項目について3回目の採水時にピーク値が観測された。潮の干満の影響については、調査地点1において干潮時の5回目の値が、前後の満潮時の4、6回目の値より若干高くなる傾向が見られたが、調査結果全体に及ぼす影響は小さいと判断した。

なお、表-2に水温、DO、電気伝導度の測定結

果についてまとめた。

表-2 雨天時調査結果 (水温、DO、電気伝導度)

項目	測定結果の概要
水温	地点1において12～14℃、地点2において13～15℃の変動であった。地点1では夜間に水温が低下したが地点2ではそのような現象は顕著ではなかった。
DO	地点1において6～7mg/L、地点2において6～8mg/Lの変動であった。
電気伝導度	地点1においては朝汐の影響を受け、干潮時に低く満潮時に高くなる傾向があった。1～3s/mの変動であった。地点2においては4～5s/mで安心していた。

4. 考 察

4.1 晴天時と雨天時の比較

晴天時平均水質に対する雨天時のピーク水質の比について整理したものが図-6である。図より、COD、T-N、T-Pは雨天時と晴天時の差が比較的小さいが、SS、大腸菌群数、糞便性大腸菌群数についてはその差が大きく、特に大腸菌群数と糞便性大腸菌群数は比の値が $10^2 \sim 10^4$ 程度と非常に大きく、晴天時と雨天時で水質が大きく異なることを示している。

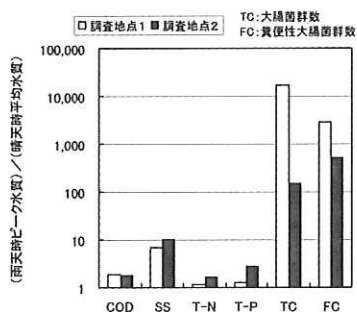


図-6 晴天時平均水質に対する雨天時ピーク水質の比

表-3は雨水流出により悪化した水質が晴天時の平均水質に回復するまでに要する日数を水質項目ごとに整理したものである。ここで所要日数は降雨終了後を起点とし、概ね晴天時水質と同等のレベルまで回復した時点 (図-5により判断) をもって終点とし、これを0.5日単位で表現したものである。COD、T-N、T-Pは降雨終了後約1日で回復するが、SS、大腸菌群数、糞便性大腸菌群数は回復までに約2～3日を要した。これは、SS、大

腸菌群数、糞便性大腸菌群数については、上述の通り晴天時と雨天時で水質が大きく異なることが原因の1つと考えられる。

表-3 晴天時平均水質に回復するまで要する日数

調査地点	COD	SS	T-N	T-P	大腸菌群数	糞便性大腸菌群数
調査地点1 (開国橋)	1.0	1.5	0.5	0.5	3以上	3.0
調査地点2 (国総研横須賀)	1.0	3.0	1.0	1.0	2.5	2.5

また、調査地点1におけるCOD、T-N、T-Pについては、降雨終了後2日目以降は、むしろ晴天時水質より良好な水質が観測される傾向にあった。これは、調査地点1が感潮河川の河口部であり、晴天時に滞留している汚濁物質が降雨による流出でフラッシュされ、水質が一時的に改善されたものと考えられる。

4.2 海域における水質変動

調査地点2における各水質項目のピーク値は、2～5回目の採水において観測された。調査地点1ではいずれの項目も3回目の採水時にピーク値が観測されており、海域における水質変動は水質項目毎に異なる特性を持っていることが推測される。

調査地点2の測定値に対する調査地点1の測定値の比について整理したものが図-7である。図の傾向から、6つの水質項目を大きく3つに分類することができる。

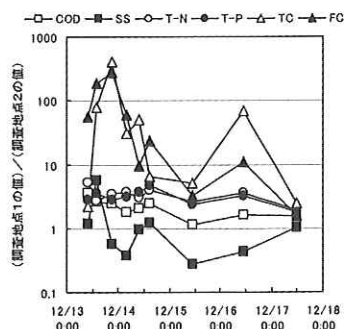


図-7 2調査地点における測定値の比

①COD、T-N、T-P：比の値は全体を通じてほぼ一定。

②SS：比の値が1を下回る場合がある。

③大腸菌群数、糞便性大腸菌群数：流出の初期に比の値が大きい。

②については、底泥の巻き上げや風による吹き

寄せの影響などにより、海域の水質が上昇したものと考えられる。③については、雨天時の流入水質が晴天時に比べ格段に高いことに加え、海域での菌の死滅により、比の値が大きくなるものと考えられる。

4.3 大腸菌群数と糞便性大腸菌群数との関係

大腸菌群数ならびに糞便性大腸菌群数については、今回新たに合流改善対策の目標に位置づけられた公衆衛生に関する指標項目であるとともに、放流先の海域においてその影響が長期間に及ぶことから、今後の検討において特に重視していく必要がある。

大腸菌群数や糞便性大腸菌群数が放流先において減少する原因として、菌の死滅や沈降、拡散などが考えられるが、これらを総括して1次反応式($dC/dt = -kC$, C は濃度、 k は減衰係数)で表現した場合の減衰係数を計算し、結果を表-4に示した。減衰係数は2地点間の大きな差はなく、いずれの場合も糞便性大腸菌群数の減衰係数の方が大きかった。

表-4 1次反応を仮定した場合の減衰係数

調査地点	大腸菌群数 (day ⁻¹)	糞便性 大腸菌群数 (day ⁻¹)	備 考
調査地点1 (開国橋)	2.49	3.02	3～8回目のデータにより算出
調査地点2 (国総研横須賀)	2.55	2.69	5～8回目のデータにより算出

大腸菌群数に対する糞便性大腸菌群数の比(FC/TC比)について整理したものが図-8である。

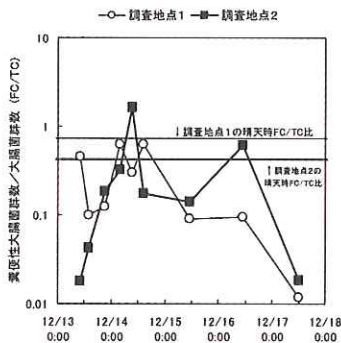


図-8 大腸菌群数と糞便性大腸菌群数の比

調査期間中にFC/TC比は大きく変動しており、これは海域での挙動や陸域からの流入特性がそれ

ぞれ異なっていることが原因と考えられる。吐き口における規制は大腸菌群数で行われているが、放流先における安全性の評価は糞便性大腸菌群数で行われていることを考えると、海域における実態把握や挙動解明については、大腸菌群、糞便性大腸菌群の双方を対象にする必要があると考えられる。

4.4 既往調査結果との比較

合流式下水道改善対策検討委員会において公表された13都市実態調査結果のうち、海域を対象としている5都市の調査結果について解析を行い、本調査結果との比較を行った。対象とした5都市の調査概要について表-5にまとめた。各都市とも海域の調査は2地点で行われているが、いずれも陸域に近い方の1地点のみを比較の対象とした。

これらの調査結果に対し、晴天時平均水質に回復するまでに要する日数、ならびに大腸菌群数、

表-5 比較の対象とした既往調査の概要

調査 No.	都市名	調査地点名	調査 開始日	総降雨量 (mm)	先行無降雨 時間(hr)
1	東京都	お台場海浜公園	7/25	17.5	600
2			8/22	73.5	73
3	横浜市	竜宮橋	7/25	29.0	597
4			10/17	28.5	150
5	大阪市	フェリー埠頭	9/6	95.7	21
6			10/1	58.1	7
7	広島市	元宇品ポンプ場 北側護岸	6/27	9.0	36
8			7/5	58.0	107
9	北九州市	黒崎泊地区	6/26	16.5	32
10			7/5	82.0	149

表-6 既往調査の解析結果

調査 No.	晴天時平均水質に回復するまでに要する日数(day)				減衰係数 (day ⁻¹)	
	COD	SS	大腸菌群数	糞便性 大腸菌群数	大腸菌群数	糞便性 大腸菌群数
1	0	*	1以上	1以上	—	—
2	*	0	2以上	2以上	2.15	1.86
3	0.5	0.5	1以上	1以上	3.92	3.09
4	*	*	1以上	1以上	—	—
5	*	*	1以上	1以上	—	—
6	*	*	1以上	1以上	—	—
7	0.5	0.5	1以上	1.0	—	—
8	0	0	1以上	1以上	2.76	1.57
9	0	0	1.0	1.0	5.42	6.27
10	0	0	1以上	1以上	—	—

*：雨天時水質が晴天時平均水質を下回る場合。

—：減衰係数を算定できなかった場合。

糞便性大腸菌群数の減衰係数について計算した結果を表-6に示した。なお計算は本調査結果と同様の方法によった。

晴天時平均水質に回復するまでに要する日数については、表-3との比較からSSを除いて同様の傾向であった。

大腸菌群数、糞便性大腸菌群数の減衰係数は、各調査によって大きなばらつきがあった。また減衰傾向が明確でないため減衰係数を算定できない場合も多く、一般的な傾向を論じることができなかった。大腸菌群数、糞便性大腸菌群数の減衰係数の大小関係については、大腸菌群数の減衰係数の方が大きくなる場合が多く、本調査結果とは逆の傾向を示していた。各調査における減衰係数と雨天時ピーク水質との関係を図-9に整理したが、両者の関係は明らかではなかった。

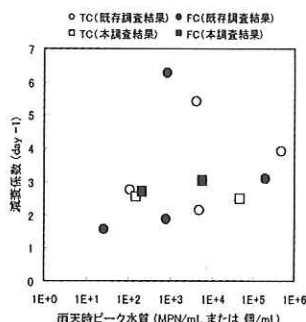


図-9 雨天時ピーク水質と減衰係数の関数

これらの結果から、大腸菌群数、糞便性大腸菌群数については、放流先の海域において降雨後の影響が長期間に及ぶが、減衰の傾向は一様ではなく、各海域の特性が大きく影響するものと考えられる。これは、海域毎の実態調査の重要性を改めて示唆するものである。

5. まとめと今後の課題

合流式下水道の雨天時越流水が流入する海域において雨天時水質調査を実施した。得られた知見をまとめると次の通りである。

- 1) SS、大腸菌群数、糞便性大腸菌群数は晴天時と雨天時で水質が大きく異なる。大腸菌群数と糞便性大腸菌群数では、雨天時ピーク水質が晴天時平均水質の $10^2 \sim 10^4$ 倍程度であった。
- 2) 降雨終了後COD、T-N、T-Pでは約1日で晴天時平均水質まで回復するのにに対しSS、大腸菌群数、糞便性大腸菌群数では約2～3日と長

期間を要した。

- 3) 海域における水質変動の特徴は、①COD、T-N、T-P、②SS、③大腸菌群数、糞便性大腸菌群数の3つのグループに分類された。
- 4) 1次反応を仮定した大腸菌群数と糞便性大腸菌群数の減衰係数は $2.5 \sim 3.0 \text{ day}^{-1}$ 程度であり、2地点間の差は小さかった。
- 5) 調査期間中のFC/TC比は大きく変動していた。海域における実態把握や挙動解明については、大腸菌群と糞便性大腸菌群の双方を検討対象にする必要がある。
- 6) 13都市実態調査結果と比較したところ、晴天時平均水質に回復するまでに要する日数についてはSSを除いて同様の傾向であった。一方、大腸菌群数と糞便性大腸菌群数の減衰係数はばらつきが大きく、各海域の特性が大きく影響すると考えられた。

今後は、より大きな降雨調査を含む詳細な調査を実施し、海域に流入した各汚濁物質の消長について明らかにするとともに、海域に流入する合流式下水道からの越流水や分流水下水道の雨水等についても水量水質調査を行い、流入負荷量と海域の水質との関係についても検討していく必要がある。

<謝辞>

現地調査にご協力いただいた国土技術政策総合研究所海洋環境研究室および日本下水道事業団技術開発部、ならびに雨量データ等のご提供をいただきました横須賀市下水道部の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 平成13年度第5回合流式下水道改善対策検討委員会資料(資料3), 2002.
- 2) 平成13年度第4回合流式下水道改善対策検討委員会資料(参考資料1), 2001.
- 3) http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN3/kaisyo/day_index.html

森田弘昭*



国土交通省国土技術政策
総合研究所下水道研究部
下水道研究室長、工博
Dr. Hiroaki MORITA