

台場周辺海域における雨天時合流式下水道越流水の数値解析

小野澤恵一*・鯉渕幸生**・古米弘明***
片山浩之****・磯部雅彦*****

台場周辺には、お台場海浜公園を始め親水空間が多数存在するにも関わらず、水質悪化により水との接触が制限されている。特に雨天時合流式下水道越流水 (CSO) はその影響が大きいとされているが、受水域における挙動はあきらかにされていない。そこで、都市沿岸域における親水空間の利用と健康リスクに対して重要な CSO の挙動を解明するため、ポンプ所からの下水放流量や、感潮域の流速時系列変動を加味した 3 次元流動モデルを開発し、台場周辺海域での流動・CSO の挙動を再現した。CSO の影響が、潮汐や、降雨特性によって時空間的に大きく変化することを明らかにし、さらに、合流改善クイックプランの効果推算した。

1. はじめに

生活水準の向上に向けて、親水空間の創出が求められている。しかし都市域では下水道整備など、排水処理施設の整備が進んでいるにもかかわらず、内湾での汚濁負荷は減少していない。これには都心部の下水道が合流式であることが少なからぬ影響を与えていると考えられる。

合流式下水道とは、汚水と雨水を同一管渠系で排除する下水道システムのことであり、雨天時に下水処理場で処理しきれない下水を雨水吐き口やポンプ所から河海へ未処理のまま直接放流するため、放流先の水環境・衛生・景観に悪影響を及ぼす。この問題を、雨天時合流式下水道越流水 (Combined Sewer Overflow, CSO) 問題と呼び、合流式下水道に特有の問題である。

この問題は、お台場海浜公園において CSO 由来と考えられる白色固形物が漂着した (2000) ことで広く認知されるようになった。お台場海浜公園は現在遊泳禁止であるが、周辺海域浄化実験を始めとして、水と接触できる機会を求める声が大きくなってきている。

このような現状を踏まえ本研究では、台場周辺海域において、河川・ポンプ所・処理場から海へ放流された CSO の挙動を再現するモデルを開発した。都市沿岸域のシミュレーションで無視することのできない、ポンプ所における放流や、感潮域における河川流量の影響をモデル化した。さらにできあがったモデルを用いて数値計算を行い、降雨特性や潮汐と、CSO の挙動の間にどのような傾向が見られるのか考察した。最終的に、新合流

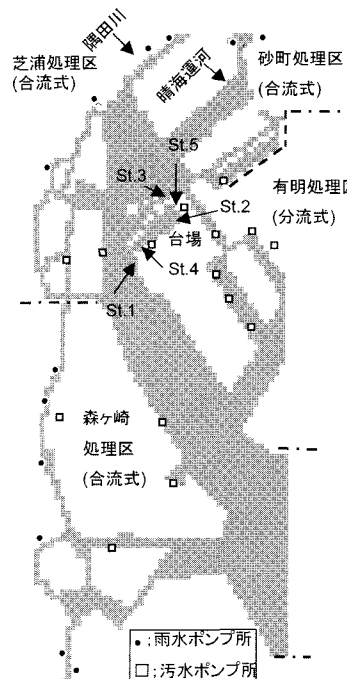


図-1 台場周辺海域 (計算領域)

改善クイックプラン (東京都2004) の効果を検討した。

2. 数値モデルの概要

本モデルは、3次元流動モデルと、大腸菌 (*Escherichia coliform*, 以後 E-COLI) モデルより成り立っている。E-COLI は CSO 中に多量に含まれており、かつその生態的挙動に関して既往の研究が充実しており、CSO をモデル化する際の指標として最適である。以下モデルの概要を述べる。

(1) 3次元流動モデル

流動・密度場の計算アルゴリズムは鯉渕ら (2001) の σ 座標系による 3 次元流動モデルを用いた。基礎式は静水圧近似とブシネスク近似を仮定した Navier-Stokes の式、連続式、水温・塩分の移流拡散方程式および密度の

* 学生会員	東京大学大学院 大学院工学系研究科社会基盤学専攻
** 正会員 博(工)	東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻
*** 正会員 工博	東京大学教授 大学院工学系研究科都市工学専攻
**** 正会員 博(工)	東京大学講師 大学院工学系研究科都市工学専攻
***** フェロー 工博	東京大学教授 大学院新領域創成科学研究

状態方程式を用いている。

(2) E-COLI モデル

E-COLI の挙動を精度よく再現するために、移流・拡散に加え、沈降と、高塩分水との接触による死滅を考慮し、式(1)のように定式化した。

$$\frac{\partial \text{Coli}}{\partial t} + u_i \frac{\partial \text{Coli}}{\partial x_i} + (-\text{Sink}) \frac{\partial \text{Coli}}{\partial z} \dots\dots\dots (1)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon_i \frac{\partial \text{Coli}}{\partial x_i} \right) - \text{sal} \cdot \text{Coli}$$

ここで、Coli は E-COLI 濃度 (CFU/100 mL)、sal は塩水との接触による死滅率、Sink は沈降速度 (m/s)、 u_i は流速 (m/s)、 ε_i は拡散係数である。

(3) ポンプ所放流量推定法

台場周辺海域には雨水ポンプ所・污水ポンプ所の2種類のポンプ所がある。雨水ポンプ所は、合流式区域において、雨水混じりの污水を東京湾へ放流する。一方污水ポンプ所は、分流式区域において、污水を下水処理場へ送り、雨水を河海へ放流するものである。これらのポンプ所ごとの機能の違いについてもモデル上で再現するため、計算領域内全28箇所のポンプ所(図-1; ●印, □印)における污水・雨水の流出を、管路ネットワークモデルに基づき合理的合成法で算出した。

a) 汚水量の算定法

平成14年度の污水揚水量実績より処理区ごとの日平均汚水量を算定し、それぞれを処理区内の各ポンプ所に、排水面積に応じて分配した。さらに“下水道施設計画・設計指針と解説(2001)”に基づき汚水量の24時間変動を

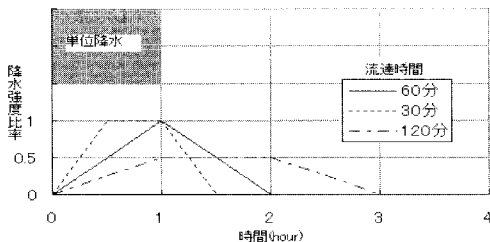


図-2(a) 合理的合成法によるハイドログラフ作成例

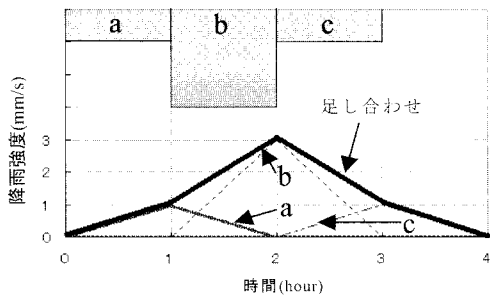


図-2(b) ハイドログラフの足し合わせ例(流達時間60分)

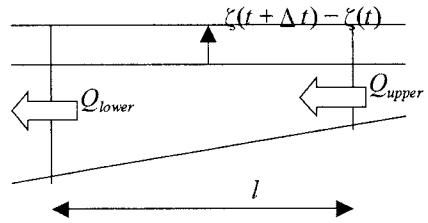


図-3 流量計算法

与えた。雨水ポンプ所は、雨水に希釈された污水を放流しているが、この希釈効果を式(2)のように反映させた。

$$PSColi = PSColifine \cdot \frac{\text{sewage}}{\text{rain} + \text{sewage}} \dots\dots\dots (2)$$

PSColi は、雨水ポンプ所における放流水の E-COLI 濃度 (CFU/100 ml)、PSColifine は、晴天時下水中における E-COLI 濃度 (CFU/100 ml)、sewage は汚水量 (m^3/s)、rain は雨水量 (m^3/s) である。

b) 雨水量の推定法

各ポンプ所の最大管路長より求めた最大流達時間に基づき、合理式合成法によるハイドログラフを作成した。単位降水ごとに得られたハイドログラフ(図-2(a))を足し合わせることで全体ハイドログラフを計算することができる(図-2(b))。得られた降雨強度に排水面積と流出係数(0.8)を掛けることによってポンプ所で放流される雨水量を求めた。

(4) 河川流量推定法

都市沿岸域の計算を行う際には、計算領域を河川上流まで広げる必要があったが、本計算では、境界位置を河川感潮域にとっても合理的に計算ができるようモデルを改良した。

概念図を図-3に示す。まず河川上流での観測流量 Q_{upper} と、河口部での流量 Q_{lower} 、そして潮位 $\zeta(t)$ の間には、式(3)のような関係が成り立つ。

$$(\zeta(t+\Delta t) - \zeta(t)) \cdot l \cdot w = (Q_{upper} - Q_{lower}) \dots\dots (3)$$

これを変形し、 Q_{lower} に関する次式(4)を得る。

$$Q_{lower} = Q_{upper} - \frac{\zeta(t+\Delta t) - \zeta(t)}{\Delta t} \cdot l \cdot w \dots\dots\dots (4)$$

l は上流から河口までの長さ(m)、 w は川幅(m)である。こうして得られた河口部での流量から、2次の鉛直分布を仮定して流速を計算した。

(5) 計算条件

本計算では、お台場周辺スケールでの計算の開境界に、東京湾スケールでの計算結果をネスティングすることで、夏季の成層など、東京湾スケールでの現象がお台場に及ぼす影響をモデルに反映させることを可能にした。計算の諸条件を表-1に示す。気象データは、気象庁による地上観測(東京・千葉)およびアメダス(羽田)の一時

表-1 計算諸条件

	東京湾全体	台場周辺海域
計算領域	50 km×66 km	5 km×12.7 km
grid1辺の長さ	2000 m	100 m
全グリッド数	25×33×10層=8250	50×127×10層=63500
全海グリッド数	2920	22740
計算期間	2004年4月1日 ～10月31日	2004年8月1日 ～10月15日
Δt	10分	30秒
総ステップ数	30240 step	218880 step

間毎の観測結果を用いた。東京湾開境界における潮位は、海上保安庁による一時間毎の観測値を、水温は千葉県水産研究センター漁場環境研究室の観測値を用いた。河川流量は東京湾に流入する全ての河川で与えた。この際、流量時系列データのある主要な河川（多摩川、江戸川）については、河口に最も近い測点における流量を、それ以外の河川については、主要な河川との流量の比から流量を推定して与えた。

3. 数値モデルの検証

(1) 東京湾スケール

図-4は2004年8月から10月中旬までの東京灯標における塩分観測値と計算値の比較である。日射量・河川流量の増加による成層化や、崩壊、強風の連風による沿岸湧昇について、タイミングや変化量を忠実に再現できていることが分かる。

(2) 台場周辺スケール

図-5は2004年8月から10月中旬までのSt.3表層における水温・塩分を観測値と計算値で比較したものだが、共に非常に高い再現性を有しており流動モデル改良の効果がはっきりと見て取れる。特に、日射量の増大や、雲量の変化による水温変化や、降水後に河川流量が増加し低塩分化する現象について、タイミングおよび変化量共に精度よく再現できている。

図-6は、2004年8月から10月中旬までのSt.1表層に

におけるE-COLI濃度を、観測値と計算値で比較したものである（観測方法や結果については鯉渕ら（2005）を参照）。環境省による水浴場水質判定基準において、水浴場として許認されるレベル（水質C）の閾値は、糞便性大腸菌群数（*Fecal coliform*、以下F-COLI）基準で、1000（CFU/100 mL）である。F-COLIとは、温血動物の糞便に由来する大腸菌群の多くが44.5℃という高温でも生育するという性質を利用して検出するもので、その中には、E-COLI以外の細菌が若干含まれるが、両者の値はほとんど等しいことが知られている。現在お台場海浜公園は、年数回の測定値に基づき遊泳禁止になっているが、今回の計算により、実際に糞便性大腸菌群数が、閾値を越えている期間は短いことが明らかになった。計算値をF-COLI観測結果と比較してみても、この閾値を超える期間や、越流後のピーク濃度を良好に再現できている。そして、8月15日の降水（14 mm）と、8月23日～24日の降水（3 mm）を始め、必ずしも降水量が大きいほどCSOの影響が大きくなるわけではないことが明らかになった。これは累積降雨時間や河川水による希釈効果、外洋への流出など様々な現象が複雑に関与しているためであり、数値実験によって、CSOの挙動をより詳細に検討した。

4. 数値実験

(1) 潮汐・河川流量と、各処理区の寄与率の関係

お台場海浜公園に対する各処理区の寄与率を求めるために、各処理区内の全雨水ポンプ所からのE-COLI放流量をゼロとした条件のもと数値実験を行った。その結果と2004年のナウキャストシミュレーション結果（第3章）との差分が各処理区起源CSOの到達量に相当する。

2004年8月28日から8月30日のSt.1における各処理区のE-COLI寄与量と潮汐・河川流量を図-7に示す。各処理区ごとにお台場海浜公園に到達するタイミングが異なっており、晴海運河よりも流量の多い隅田川の影響で

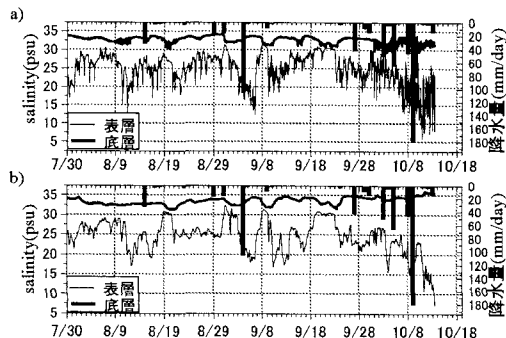


図-4 東京灯標における塩分濃度(a)観測値 (b)計算値

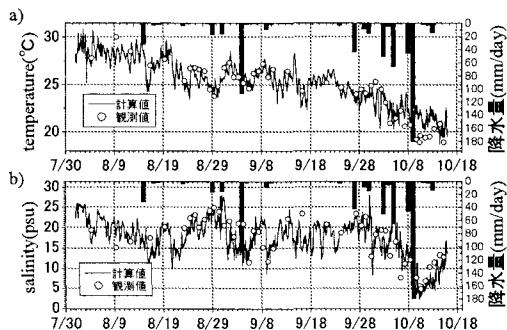


図-5 St. 3における (a)水温 (b)塩分

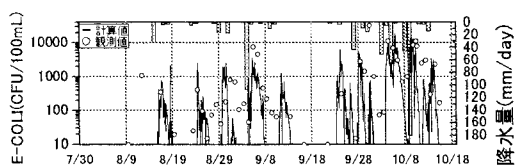


図-6 E-COLI 計算・観測結果 (St. 1)

芝浦起源 CSO が最初に到達し、次いで下げ潮時に砂町起源 CSO が急増する。森ヶ崎処理区起源のものは降水後約一日たってから遅れて到達している。これは、お台場海浜公園に対する各処理区の位置関係および潮流に起因していると考えられる。すなわち、台場から見て芝浦・砂町処理区が隅田川の流れに対して上流に位置している一方で、森ヶ崎は下流側に位置しており、その影響がお台場に届くには上げ潮時に北向きの潮流に乗ることが必要である。実際に、8月30日に森ヶ崎起源 CSO が到達したときは、大潮の上げ潮時である。数値実験を観察したところ、降水後河川流量の多い間は北向きの潮流が発生しなかったが、河川流量がおさまったところの上げ潮時に北向きの潮流が発生したことによって森ヶ崎起源 CSO がお台場海浜公園に到達していた (図-8)。

同様に図-9 は、10月8日から10月10日の各処理区の寄与量を表している。この時期には台風22号 (MA-ON) の関東地方上陸の影響で、台場周辺海域にも累積降水量282.5 mm (羽田アメダス) を記録する大雨が降った。さらにこのとき小潮であったこともあり、河川流量の増大に阻まれ森ヶ崎起源の CSO は全く到達していなかったことが明らかになった。

このような傾向が上記2ケースに限ったことなのか、それとも一般的な性質なのか調べるために、全ての降水

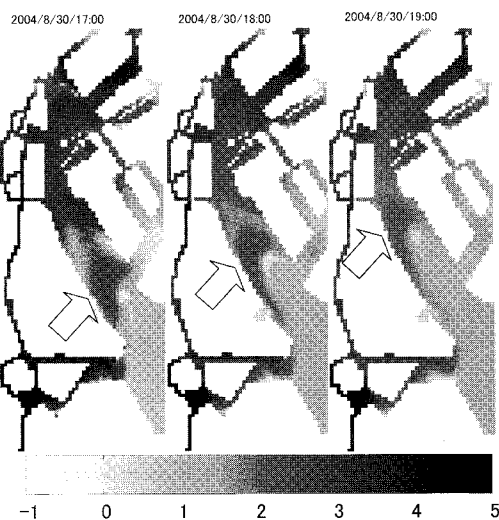


図-8 上げ潮時の森ヶ崎処理区の寄与

に対して検討したところ、8月17日～18日 (6.5 mm)、8月23日～24日 (3.0 mm)、8月30日 (0.5 mm)、9月4日～5日 (84.5 mm)、10月4日～5日 (119.0 mm)、8月17日～18日 (6.5 mm) に、森ヶ崎起源 CSO がお台場海浜公園に到達したことが分かった。そのすべてのケースにおいて、森ヶ崎起源 CSO が到達したのは上げ潮時または上げ潮になる直前であり、この関係が一般的なものであることが明らかになった。また、2004年は8月から9月上旬にかけて先行無降雨時間の長い降水が多く見られたが、このような降水に対しては森ヶ崎起源 CSO の台場到達が多数みられた。その一方で、9月下旬から10月上旬にかけて断続的に降雨が続いた時期にはたった一度しか到達していない。このことから、河川流量が多いと、森ヶ崎処理区よりも砂町・芝浦処理区の影響

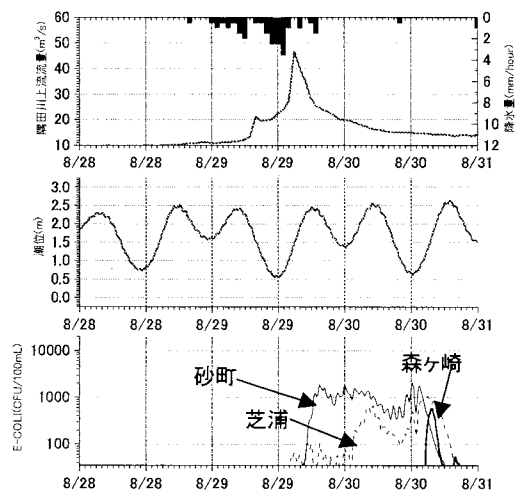


図-7 数値実験(1) 8月28日-8月30日

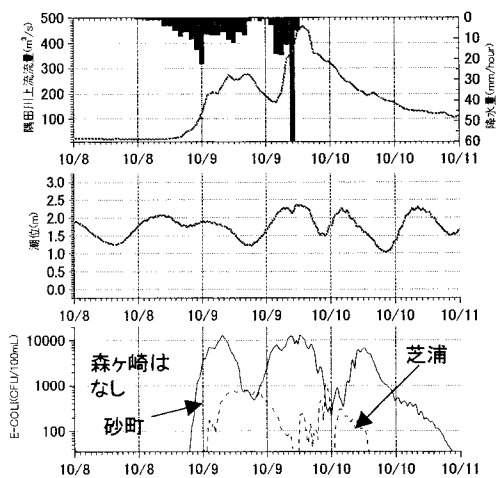


図-9 数値実験(2) 10月8日-10月10日

響が大きくなるという傾向が明らかになった。

(2) 合流改善新クイックプランの効果検証

東京都は平成16年9月、「新・合流改善クイックプラン（平成16年度～20年度）」を策定した。これまでも「合流改善クイックプラン（平成12年度～16年度）」に則り、オイルボールやごみの流出抑制など短期間に事業効果を実感できる対策を中心に取り組んできていたが、今回のプランでは、貯留池の整備や再開発地区における部分分流の導入などの対策を盛り込んでいるのが特徴である。東京都は其中で、既存施設を活用した貯留池の整備を30万 m^3 整備することを宣言している。この効果を数値実験で検証することを試みた。

前節で砂町処理区、芝浦処理区における雨水ポンプ所からの放流がお台場海浜公園の水質に大きな寄与を見せることが明らかになったことを受け、30万 m^3 の滞水池を、この2処理区のファーストフラッシュを集めることに使い、お台場海浜公園の水質を効率よく改善することを考えた。遮集した下水を処理しきる前に次の降水が始まる場合、この降雨についてはファーストフラッシュを削減できる量が少なくなる。これについては、連続無降雨時間が1日を越えたときに雨水滞水池内の下水がクリアされるという設定を組み込むことで考慮した。改善版での結果を2004年リアルタイムシミュレーションと比較することで効果を検証した。

効果を量る指標として、環境省の定める水浴場水質判定基準をもとに、閾値である水質C超過期間を算出した。2004年8月1日から10月15日の76日中、この値を超えた総時間を比較したところ、表-2のようになった。雨水放流の影響でもともと糞便性大腸菌群数の少なかったSt.2やSt.5では効果は少ないが、砂町処理場からのCSOが真っ先に到達するSt.3では4日強、遊泳可能な日数が増えるという改善効果がみられた。これは実質遊泳禁止期間が26%削減されたことに相当する。

表-2 雨水滞水池の効果検証

	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5
改善前	8.21	2.06	15.44	10.48	3.60
改善後	6.35	1.96	11.42	8.53	3.31
削減効果	1.86	0.10	4.03	1.94	0.30

単位：day

5. ま と め

都市沿岸域のCSO由来E-COLIの挙動を再現するモ

デルを開発した。従来都市沿岸域計算時のネックであった、ポンプ所からの下水放流量の影響をモデルに取り込み、計算領域を河川感潮域に設定しても合理的に計算できるようモデルを改良した。計算結果を2004年の観測結果と比較したところ、塩分・水温ともに高い再現性が見られ、流動モデル改良の効果がはっきりと確認された。E-COLIに関しても、お台場海浜公園における降雨後のピーク濃度や水質C超過期間を高い精度で再現することができ、CSOの挙動を再現することに成功した。さらにモデルを用いた数値計算により、降雨特性や潮汐の影響によってCSOの挙動が異なることを明らかにし、寄与の大きい処理区もそれにとまない変化する実態が解明された。その考察をもとに、お台場海浜公園の水質浄化にとって効率的な雨水滞水池の運用形態を提案し、新合流改善クイックプランの効果を推算した。

謝辞：本研究の一部は、21世紀COEプログラム「都市空間の持続再生学の創出」および河川整備基金事業「河川汽水域の水環境と生物環境に関する研究」および科学研究費若手研究B（課題番号：16760403、代表：鯉渕幸生）により実施したことを付記する。また、本研究を進めるにあたり、国土交通省関東地方整備局河川計画課には河川流量データを提供して頂きました。ここに記して御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 鯉渕幸生・小野澤恵一・中村格之・原本英二・片山浩之・古米弘明・佐藤慎司・岡安章夫・磯部雅彦(2005)：東京湾お台場海浜公園における雨天時合流式下水道越流水の影響調査，海講論文集，第52巻，pp. 886-890.
- 東京都下水道局(2003)：東京都下水道局事業概要 平成15年度版，pp. 15, pp29-30, pp. 34.
- 東京都下水道局(2004)：新・合流改善クイックプラン，pp. 5, pp. 8, pp27-30, pp. 38.
- 日本下水道協会(2001)：下水道施設計画・設計指針と解説・後編，pp. 6-7.
- 片山浩之・久山哲雄・大垣眞一郎(2003)：都市沿岸海中におけるF特異ファージおよび指標細菌の分布，土木学会論文集，No.741/VII-28, pp. 123-130.
- 鯉渕幸生・佐々木淳・磯部雅彦(2001)：東京湾における窒素・リンに着目した物質循環機構，海講論文集，第48巻，pp. 1076-1080.
- A.James(1982)：Mathematical modeling of estuaries and coastal waters, Wat. Sci. Tech., Vol.14, pp. 1E1-1E115.
- Omura T., M.Onuma and Y. Hashimoto (1982)：Viability and adaptability of E-COLI and Enterococcus group to salt water with high concentration of sodium chloride, Wat. Sci. Tech., Vol.14, pp. 115-126.