

## 物質収支を考慮した江戸城外濠における水循環解析モデルの構築と 水質改善策に関する研究

法政大学大学院デザイン工学研究科 ○学生会員 田中 走

法政大学デザイン工学部 学生会員 亀田 哲平

法政大学デザイン工学部 正会員 鈴木 善晴

### 1. 背景・目的

多くの都市域ではその急激な成長に伴い、安価で工期の短い合流式下水道が敷設されてきたが、合流式下水道からの未処理下水の放流によって、周辺水域の水質汚濁が進行している。また、都市化により不浸透域が拡大したことで合流式下水道の環境への影響は以前よりも大きなものとなっている。

環境保全の意識が高まりつつある近年では、合流式下水道の問題を解決（合流改善）しようとする自治体も増えてきた。しかしながら、江戸城外濠においては、効果が表れるような目立った取り組みは行われていない。

本研究では、合流式下水道の敷設地域である江戸城外濠（以下外濠）を対象に、水循環解析モデルを構築し、雨水貯留浸透施設の導入による水質変動を予測・検証することで、外濠の水質改善策に関する検討を行った。水循環解析モデルでは、下水道からの未処理放流水中の物質量を計算し、濠の物質収支を考慮することで、水質改善策による合流改善効果と水質改善効果について同時に評価を行った。

### 2. 外濠集水域の概要

本研究で対象としている外濠は、上流から市ヶ谷濠、新見附濠、牛込濠の3つの濠となっており、JR市ヶ谷駅と飯田橋駅にまたがる形で存在する。

外濠へ放流する下水管網が雨水を集めてくる範囲を外濠集水域と呼んでいるが、その面積はおよそ330haである。集水域内にマンホールが2027個、管路延長が7万mほどである。オフィス街であるため昼間人口と夜間人口の差が大きく、昼間で16万人、夜間で5万人である。図1に外濠集水域を示す。図中の青い範囲が市ヶ谷濠、緑が新見附濠、赤が牛

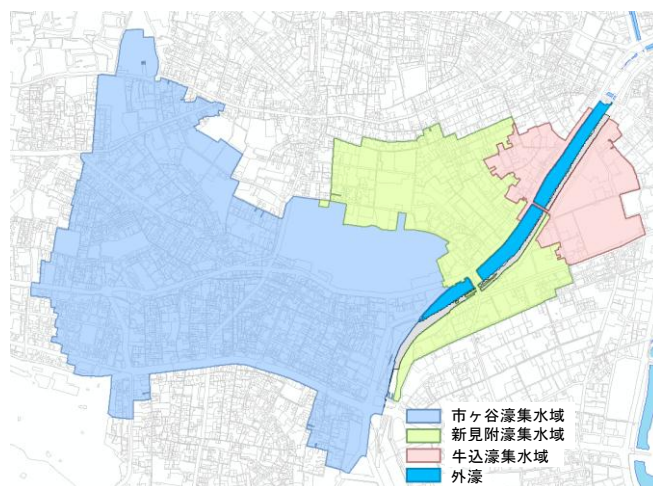


図1 外濠集水域

込濠である。

濠ごとの集水面積は市ヶ谷濠で最も大きく228haで、全体の70%を占めている。本稿ではこの市ヶ谷濠に絞って水質改善策の提案を行う。

### 3. 水循環解析モデル

外濠の水質改善策として雨水貯留浸透施設による合流改善があげられるが、その規模や効果を評価するためには外濠の水循環の把握が不可欠である。ここでいう水循環とは、降雨による濠への未処理水流入と、濠内の水収支による濠水の貯留・流去とそれに伴う物質移動全般を指す。

本研究では外濠の水循環を把握するため、外濠水循環解析モデルを構築した。このモデルは「放流解析モデル」「水収支解析モデル」「物質収支解析モデル」からなる複合モデルである。

#### (1) 放流解析モデル

放流解析モデル<sup>1)</sup>では、外濠に降った雨と濠への放流の関係を解析する。降雨は最も近傍のマンホールに流入すると仮定し、それを吐口までの流達時間によって合算し放流量を推定する。マンホールへの

キーワード 物質収支, 江戸城外濠, 水質, 合流改善, 雨水貯留浸透施設

連絡先 〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33 法政大学デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 TEL: 03-5228-1389

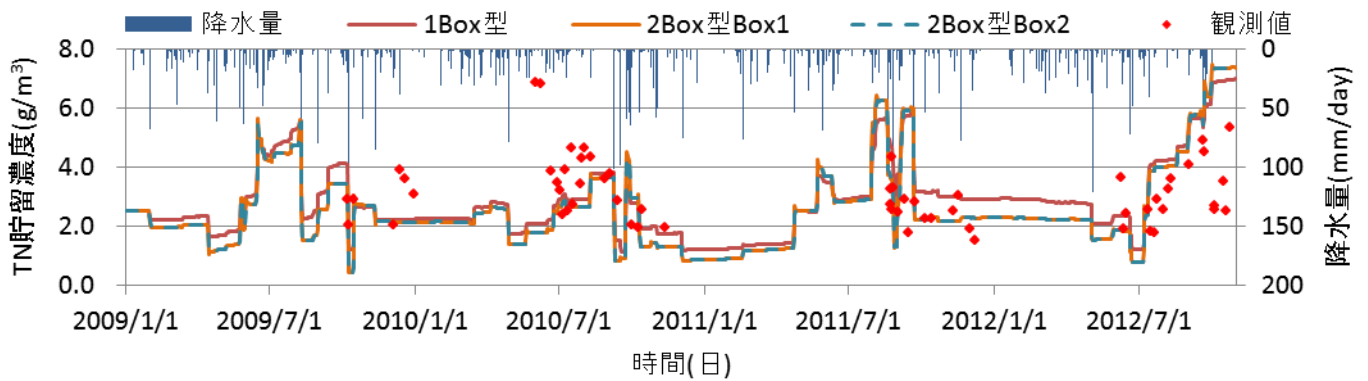


図 2 長期解析による市ヶ谷濠 TN 貯留濃度

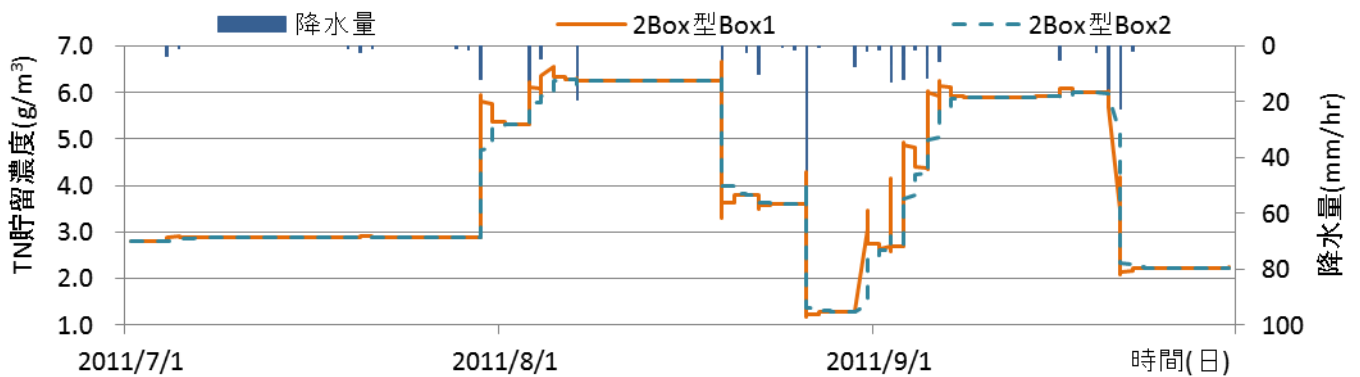


図 3 2Box 型を用いた市ヶ谷濠 TN 貯留濃度

流入過程は道路、屋根、その他の地表の 3 経路を考えそれぞれに流出率を設定しており、流入量は合理式により算出する。放流水中の汚濁物質の計算には、各流入経路に設定した汚濁負荷量<sup>2)</sup>と管内の平常時汚水量を用いた。平常時汚水量は町丁目ごとの人口によって算出している。さらに、ファーストフラッシュを考慮するため、降雨継続時間が 40 分を超えた場合には雨水による汚濁負荷はないものとみなした。

## (2) 水収支解析モデル

水収支解析モデルでは放流解析モデルで得られた結果をもとに濠内の水収支を解き、ある時刻の貯留量は次の式から算定する。

$$S_t = Q_{in} - Q_{out} + S_{t-1}$$

ここで  $S_t$ :  $t$  時における貯留量 ( $m^3/min$ )、 $Q_{in}$ :  $t$  時における流入量 ( $m^3/min$ )、 $Q_{out}$ :  $t$  時における流出量 ( $m^3/min$ )、 $S_{t-1}$ :  $t-1$  時における貯留量 ( $m^3/min$ ) である。

市ヶ谷濠においては、流入量は下水からの放流量と濠への直接降雨量の合計であり、流出量は下流の濠への越流量と蒸発量の合計である。市ヶ谷濠の越流口には堰が設けてあり、水深が 1.5m を上回ると

放流が発生すると考えた。また、蒸発量には参考としてハモン式<sup>3)</sup>を用いた。

## (3) 物質収支解析モデル

物質収支解析モデルでは上記ふたつのモデルの解析結果を用いて濠内の水質を予測できる。物質の移動は水の移動とともに行われると仮定し、その移動量は水の移動量と物質濃度によって計算している。ある時刻の物質貯留量は下式によって算定する。

$$Ms_t = M_{in} - M_{out} + Ms_{t-1}$$

ここで、 $Ms_t$ :  $t$  時における物質貯留量 (g)、 $M_{in}$ :  $t$  時における物質流入量 (g)、 $M_{out}$ :  $t$  時における物質流出量 (g)、 $Ms_{t-1}$ :  $t-1$  時における物質貯留量 (g) である。

## (4) ボックスモデル化

水および物質の移動を表現するとき、濠水全体が一樣な水質であることは考えられない。そこで、濠を複数の箱と仮定<sup>4)</sup>し、箱間の水の移動を考慮することで水質の水平方向の分布を表現した。本研究では 1Box 型と 2Box 型を作成した。

放流等によってそれぞれの箱の水位に差が生じた際に、水位を平均するように水の移動が発生すると考えた。また、水位が定常状態にある場合には 24

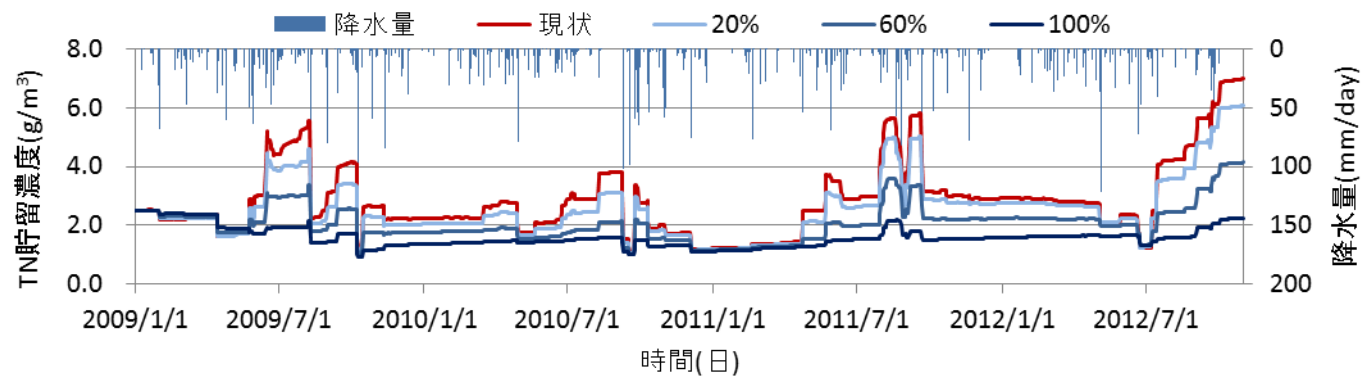


図 4 道路浸透を考慮した市ヶ谷濠 TN 貯留濃度

表 1 本研究で使⽤した見かけの溶出速度

| 時刻 | TN(mg/m <sup>2</sup> /day) |      |       |        | TP(mg/m <sup>2</sup> /day) |     |      |       |
|----|----------------------------|------|-------|--------|----------------------------|-----|------|-------|
|    | 春                          | 夏    | 秋     | 冬      | 春                          | 夏   | 秋    | 冬     |
| 1  | -58.4                      | 6.4  | -46.5 | -100.0 | -5.9                       | 5.1 | -3.9 | -13.1 |
| 4  | -60.7                      | 5.6  | -50.0 | -103.4 | -6.3                       | 5.0 | -4.5 | -13.6 |
| 7  | -46.2                      | 18.1 | -38.6 | -94.0  | -3.9                       | 7.2 | -2.6 | -12.0 |
| 10 | -31.7                      | 29.9 | -23.2 | -75.8  | -1.4                       | 9.2 | 0.1  | -8.9  |
| 13 | -29.6                      | 31.3 | -20.5 | -71.5  | -1.0                       | 9.4 | 0.5  | -8.2  |
| 16 | -37.3                      | 23.5 | -28.2 | -79.1  | -2.3                       | 8.1 | -0.8 | -9.5  |
| 19 | -46.0                      | 14.8 | -35.2 | -87.1  | -3.8                       | 6.6 | -2.0 | -10.9 |
| 22 | -51.9                      | 10.2 | -41.7 | -94.1  | -4.8                       | 5.8 | -3.1 | -12.1 |

表 2 各浸透割合における

放流回数、放流量、放流物質質量に低減効果

|                  | 現状         | 浸透20%      | 40%          | 60%           | 80%           | 100%          |
|------------------|------------|------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 放流回数<br>(低減率(%)) | 147<br>(/) | 147<br>(0) | 140<br>(4.8) | 129<br>(12.2) | 117<br>(20.4) | 107<br>(27.2) |
| 放流量<br>削減率(%)    |            | 11.1       | 21.7         | 31.8          | 41.2          | 50.1          |
| 放流物質<br>削減率(%)   |            | 17.9       | 34.0         | 48.2          | 60.6          | 71.1          |

時間で水が混ざり合うように移動速度を設定した。

市ヶ谷濠における 2009 年から 2012 年 10 月までの TN 濃度の解析結果を Box 型で比較したものを図 2 に示す。Box それぞれの大きさは濠を 2 分するように設定したため、市ヶ谷濠の場合、下水からの放流はすべて Box1 に行われる。そのため、1Box 型に対し、2Box 型では放流水の影響をより強く受け、TN 濃度の変動が大きくなる傾向を示した。また、図 3 は市ヶ谷濠の 2011 年 7 月から 9 月までの TN 濃度の変化を 1 時間ごとに示したものだが、放流の影響はまず Box1 に現れ、その後水の移動に伴い、濃度が均一化されていく現象が再現できた。

(5) 物質の沈降・溶出の考慮

濠水と底泥との間ではたえず物質のやり取りが行われている。本研究では簡易に物質の溶出・沈降を考慮するため、表 1 に示す見かけの溶出速度<sup>5)</sup>を用いた。見かけの溶出速度は水温によって直線的に変化し、TN の場合水温が 23℃を閾値にそれ未満で沈降、23℃より高いときは溶出に向かう。外濠では水温が 23℃を上回る時期は夏期しかないので、それ以外の季節では沈降傾向が強くなる。

外濠の水温は観測データと湖沼水と気温の関係<sup>6)</sup>を参考にした。しかし、実際の溶出・沈降は水温だけではなく、濠水と底泥の濃度に影響される。見かけの溶出速度を水温のみで決めてしまうと、物質が

過剰に沈降し、現実的な計算結果が得られなかった。また、物質の溶出沈降は湖沼の特徴によって違いが出るため、精度の高い計算を行うには、濠の水と底泥を用いた室内実験等で設定値の検証が必要である。

3. 合流改善策の検証

合流式下水道からの放流を削減するために多く用いられる手法のひとつとして雨水貯留浸透施設の導入が挙げられる。本研究では外濠集水域に貯留施設と浸透施設を導入したと仮定し、水質改善効果の検証を行った。

(1) 貯留施設

貯留施設を導入するうえで重要となるものが、施設の規模と導入箇所である。導入箇所として、敷地面積 2000m<sup>2</sup>以上の官公庁施設 17 箇所をピックアップした。それぞれに一般的な施設規模である 4000 m<sup>3</sup>を導入するとした。貯留施設に最も近傍なマンホールへの流入を貯留すると仮定し解析を行った。

解析結果は割愛するが、貯留施設の効果は施設に集めてくる雨の量に左右されるため、集水面積の小さいマンホールへの流入を貯留しても合流改善効果はほとんど上がらないことが分かった。

貯留施設で合流改善を期待する場合には、幹線の下流から下水を引き込むような大型の地下貯留施設等を敷設する必要があると考えられる。

## (2) 浸透施設

浸透施設にはいくつかの種類があるが、本研究では道路面への降雨に対し浸透施設を考慮した。浸透施設の規模は、下式のように道路面の浸透浸割合で表現した。

$$Q = fRA \cdot (1 - i/100)$$

ここで、 $Q$ ：マンホールへの道路面からの流入量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )、 $f$ ：道路面の流出率、 $R$ ：降雨強度 ( $\text{m}/\text{min}$ )、 $A$ ：マンホールの集水面積 ( $\text{m}^2$ )、 $i$ ：道路面の浸透割合 (%) である。浸透割合 20、40、60、80、100%での解析を行った。

図 4 は市ヶ谷濠の TN 濃度の長期解析結果を道路浸透割合で比較したグラフである。

また、各浸透割合における、放流回数等の低減効果を表 2 にまとめた。

グラフを見ると、浸透割合 0%である現状と比べて、浸透割合が大きくなるにしたがい水質の変動が緩慢になることが分かる。また、浸透割合 100%では放流量を 50%、放流物質量を 70%ほど削減できるという結果が得られた。このことから、濠水の物質濃度には道路面からの汚濁負荷が大きく影響していると考えられる。つまり、道路面の降雨に浸透施設を導入することは有力な水質改善策といえる。

## 4. まとめ

外濠の水質改善策の提案に際し、降雨と放流の応答や濠内の物質の移動を把握するため、水循環解析モデルを構築した。同モデルを使用することで、水質改善効果と合流改善効果を同時に評価することが可能となった。また、より実現性に近づけるため、ボックスモデルの適用と水温による見かけの溶出速度の考慮を行った。

その結果、ボックスモデルの適用に関しては、水質変化の時間遅れが再現でき、観測値ともある程度一致した。しかし、見かけの溶出速度の考慮に関しては、現実的な解析結果が得られなかった。これは、濠水と底泥との濃度差など見かけの溶出速度の決定に大きくかわる項目を考慮していないことが原因と推察される。

さらに、水質改善策の検証として雨水貯留浸透施設の解析を行った。貯留施設は集水域内に点在する官公庁施設に導入すると仮定したが、合流改善効果

はそれほど見られなかった。貯留施設による効果を見込む場合は大型の貯留施設による下水のオフサイト貯留が必要と考えられる。

浸透施設では道路面への降雨を浸透させることで水質改善につながることが分かった。また、浸透割合 100%の物質低減率が 70%ほどであることから、道路面からの流出による汚濁負荷が水質に大きな影響を与えていると考えられる。

## 5. 今後の課題

モデルによる水質予測はある程度の精度を確保できた。しかし、見かけの溶出速度や、物質の化学変化、生態系モデル等の考慮はより信頼度の高い物質収支解析をするうえで大きな課題である。また、水循環改善策として本稿では貯留施設と浸透施設を取り上げたが、今後はそれらの組み合わせや、下水道を合流式から分流式に切り替えた場合の効果などより多岐にわたる改善策の検証・提案を行っていく。

そのうえで施設の導入費用や運用コストを踏まえ、実現可能な改善策を模索していきたい。さらには水循環改善策の提案から水循環および水質の管理方法の提案へと研究を進めていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 柳沢加奈子 (2012) : 江戸城外濠を対象とした雨水貯留施設の導入による水質改善効果に関する研究, 2011 年度法政大学修士論文, pp.10-20.
- 2) 和田安彦 (1988) : 都市域における非特定汚染源負荷とその計測方法, 水質汚濁研究, Vol.11, No.12, pp.739-742.
- 3) 土木学会 水理委員会 (1999) : 水理公式集[平成 11 年度版], 丸善, pp.18.
- 4) 湖沼における水理・水質管理の技術 (2007) : 湖沼技術研究会, 第 4 章, pp.1-14.
- 5) 藤田和男, 鷹野洋, 坂本祐基, 宮崎清 (2009) : 児島湖底泥からの窒素・リンの溶出, 岡山県環境保健センター年報, pp.25-28.
- 6) 広瀬慎一, 森谷義春 (1991) : 刀利ダムにおける水温と気温の関係, 富山県立大学紀要, pp.100-106.