# 大河川下流部の河岸際人工湿地における 塩分変動に関する現地研究

FIELD STUDY ON BRACKISH WATER CONDITION IN AN ARTIFICIAL WETLAND LOCATED ON THE LOW WATER CHANNEL BANK OF THE LOWER ARAKAWA RIVER, TOKYO

黒田直樹<sup>1</sup>・横山勝英<sup>2</sup>・石川忠晴<sup>3</sup> Naoki KURODA, Katsuhide YOKOYAMA and Tadaharu ISHIKAWA

1正会員 東京都立大学(旧首都大学東京)都市基盤環境学科博士後期課程 (〒192-2786 東京都八王子市南大沢1-1) 株式会社 建設技術研究所 東京本社(〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)

 $^2$ 正会員 博(工) 東京都立大学(旧首都大学東京)教授 都市基盤環境学域(〒192-2786 東京都八王子市南大沢1-1)  $^3$ フェロー会員 東京工業大学名誉教授(〒251-0035神奈川県藤沢市片瀬海岸2-4-15)

Variation of brackish water condition in an artificial tidal flat which is separated by a permeable dike with narrow openings from the low water channel of Arakawa River flowing in the Tokyo Metropolis was studied by field measurements and numerical flow simulation. Water level and salinity fluctuations due to the tide action were measure for about three months using water gauges and salinity meters installed in the low water channel and in the tidal flat respectively. In addition, water salinity contained in the surface soil of tidal flat was measured four times with one-month intervals after a flood of fresh water. A numerical flow simulation adopting the shallow water model well reproduced the salinity variation in the tidal flat. A model of salinity exchange between surface water and soil water suggested that the soil salinity in the tidal flat recovers less than one month after an impact of freshwater flood. The above results suggest that a stable brackish ecotone can be created in an artificial tidal flat using the numerical model as a design tool.

Key Words: artificial tidal flat, brackish ecotone, field measurement, numerical flow simulation

## 1. はじめに

平成9年の河川法改正に伴い,従来は中小河川で実施されることが多かった「多自然川づくり」が大河川の直轄管理区間でも考えられるようになってきた<sup>1)</sup>. 多自然川づくりは、水域および河岸を含め縦断的に連続した自然性の保全と創出が理想とされている<sup>2)</sup>. しかし沿川の都市化が進んでいる大河川下流部では、明瞭な複断面化による水域と陸域の分離が進み、また高水敷がグラウンドや公園になっている. したがって、治水面や高水敷利用面の制約の範囲内で、低水路河岸付近を主対象とした多自然化が現実的であると考えられている<sup>3)</sup>.

一方,大河川下流部では潮位変動に伴い塩水による低水路河岸の周期的冠水が生じるので,汽水性環境を生かした「干潟湿地」の造成・整備等によるユニークな自然環境の創造が考えられる.しかし従来の多自然川づくりにおいては河岸の汽水性環境の創出に着目した検討事例はない.この原因は,従来の多自然川づくりの主対象で

あった中小河川の汽水区間が短かったためと思われる.

そこで本研究では、低水路河岸における汽水性干潟湿地の創出可能性に関する研究の基礎的段階として、首都圏を流れる荒川下流部の塩水遡上区間にある「五反野ワンド」の干潟湿地において、潮汐作用により生じる水位および塩分状態の時間変動を観測するとともに、平面二次元不定流解析モデルと塩分輸送方程式を組み合わせて観測結果の再現を試みた。また2019年の台風第19号出水において干潟湿地が冠水した後に、土壌間隙水塩分を毎月1回観測し、塩分回復過程を検討した。

## 2. 研究対象の概要

#### (1) 荒川下流部の概要

荒川下流部の河道を図-1に示す.本研究の対象である 五反野ワンドは12KP付近(●)にある. 荒川は埼玉県と 東京都を流れる一級河川で,幹川流路延長は173km,流 域面積は2,940km²である. このうち秋ヶ瀬取水堰



図-1 荒川下流河道と五反野ワンド位置

(34.8KP) から下流は感潮区間となっている<sup>4</sup>. なお岩淵より下流は昭和5年に完成した人工河道(荒川放水路)であり,河床勾配が約1/10,000の典型的複断面河道で,高水敷の大部分はグラウンド等に利用されている.

岩淵地点の河道計画流量は7,000m³/sとされるが、1999年8月の出水(7,650m³/s)以降は、2019年の台風第19号までの20年間、五反野ワンドが位置する高水敷が冠水することはなかった。なお秋ヶ瀬取水堰からの平時の放水量は10m³/sのオーダだが、図−1に▲で示す西新井観測所での非洪水時水位変動が2mのオーダであることから、平水時の流動の主要因は潮汐であると考えられる。

#### (2) 研究対象区域の概要

研究対象である五反野ワンドは、荒川下流部で最初の多自然型川づくりとして、建設省(現国土交通省)と足立区の共同により1992年に12.1KP付近左岸に整備されたもので、総面積は約0.7haである。その設計においては、自然植生景観と生物多様性に配慮しつつも環境教育・自然体験の場としての親水公園機能が重視された<sup>5)</sup>. 全景写真を写真-1に、標高分布(2012年測量)を図-2に示している。なお同図中の点線は、後述する数値シミュレーションで境界条件を与える位置であり、St.AとSt.Bは水位塩分センサーの設置位置を示している。

図-2からわかるようにワンド内の地盤は高水敷より低く,遊歩道で仕切られた2つの窪地から構成されている.上流側窪地の地盤標高はA.P.2.0m程度で比較的平坦である.一方下流側窪地はA.P.1.5m~1.0mとやや深く,中央部には引き潮時でもわずかに湛水している池がある.西新井観測所の水位記録によれば,この付近の朔望平均満潮位はA.P.2.2mであり,上流側窪地の冠水はわずかなので,本研究では下流側窪地を研究対象とした.

写真-2に示すように、ワンドと低水路は50~80cm大

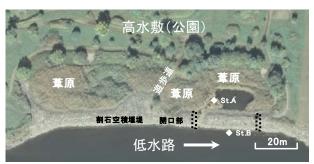


写真-1 五反野ワンドの全景

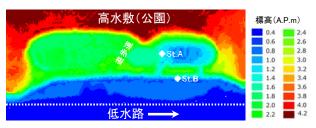


図-2 干潟湿地の標高分布



写真-2 割石空積堰堤

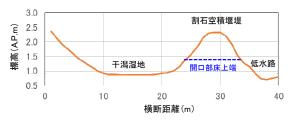


図-3 割石空積堰堤の表面横断形状



写真-3 干潟湿地の生物

の割石空積堰堤により仕切られている. 2か所に幅2m程度の開口部が設けられているが、その底面は堰堤と同様に割石空積である. 堰堤の横断面形を図-3に示す. 堰堤

天端標高はA.P.2.4m程度で、開口部敷高は2mほど低い. 低水路と干潟湿地の水交換は主に開口部を経由しているが、満潮時には堰堤を越水して流入することもある.また目視によると堰堤の空積割石の隙間を通しても水交換が生じているが、その量は開口部に比べてわずかであった. 低潮時に低水路水面がワンド窪地より低下すると、下流側窪地中央部の池を除いて広い範囲で乾陸化する. なお低潮時の池の水深は10cm程度である. つまり、五反野ワンドの大部分は、実質的には潮汐に伴い乾湿を繰り返す干潟湿地となっている.

常時湛水している部分を除き、干潟湿地の大部分は葦原に覆われている。**写真-3**に筆者らが葦原で確認した汽水性生物を示す。イトトンボの一種やサナエトンボの他、乾陸時には多数のクロベンケイガニやベンケイガニが食餌行動をしている。特にクロベンケイガニの個体数は極めて多く、径約40mmの巣穴を地表下30~40cmまで穿っているようであった。

# 3. 現地観測

#### (1) 現地観測の期間および計測項目

図-4に現地観測の期間および計測項目を、気象庁さいたま観測所での日雨量、秋ヶ瀬取水堰放流量、観測点近傍の西新井観測所における水位(白線)とともに示す、各観測の方法は後述する。「(a)自記式計器による水位塩分観測」は8月15日に開始されたが、10月13日の台風第19号による出水で計測器が故障し、さらに10月25日には台風第21号の出水もあったため1か月以上欠測が続き、全測定器が回復したのは12月12日であった。

データ回収と計器点検は1か月ごととし、大潮の昼間の干潮時に行った。また10月28日以降のデータ回収日には「(b)土壌塩分の現場計測」も実施した。なお図中には水温塩分計のセンサー部の設置標高も示している。

# (2) 水位および塩分濃度の観測

写真-1および図-2に◇で示す位置に自記式塩分計 (Onset社製U24-002-C) と水位計 (Onset社製U20-001-01) を設置した。St.A(干潟湿地内)では、図-5(a)に示すように塩ビ管を地盤に挿入し、センサー部が地盤から10cm高い位置になるよう設置した。St.B(低水路際)では、図-5(b)に示すように、堰堤の割石の隙間に外向きに挿入して固定した。なおどのセンサーも干潮時には空中に露出した。

#### (3) 土壌間隙水塩分の現場計測

大潮の干潮時にはSt.Aの付近は乾陸化している。そこで図-6に示す方法で10cmごとの深度の土壌塩分を計測した。塩ビ管を地表から所定の深さまで貫入して(左図)引き抜いた後、塩ビ管より径が若干小さな棒を頭部より

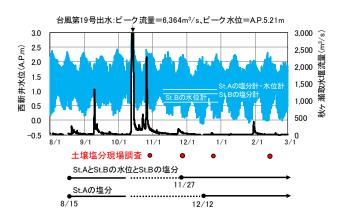


図-4 現地観測期間と水文状況

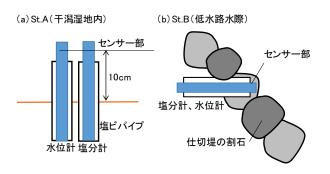


図-5 計測器の設置状況

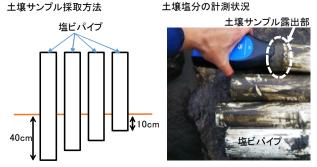


図-6 土壌間隙水塩分の計測方法

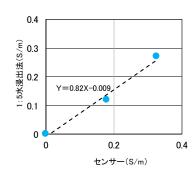


図-7 観測結果と1:5水浸出法との比較(電気伝導度)

挿入し、数cm露出した土壌サンプル(右写真)にポータブル土壌マルチプローブ(メイワフォーシス社製: HydraGO)のセンサー部(長さ5.7cmのステンレス製)を突き刺して計測した。なお本装置の出力は土壌粒径や密度の影響を受けるので、予備試験で作成した更生曲線(図-7)により1:5水浸出法<sup>6)</sup>の値に換算した。

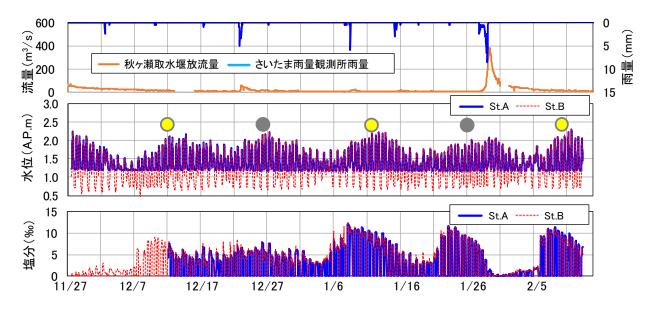


図-8 月齢に伴う干潟湿地の水位塩分変動(観測値)

# 4. 数値シミュレーション

### (1) 干潟湿地の塩水流動モデル

一般的な矩形格子の浅水流モデル"に塩分の移流拡散 方程式を加えて塩分空間変化を求めた。格子サイズは 1m×1mとし、図-2に示した標高データを与えた。地表 のマニング粗度係数は、文献®を参考にして、葦原で 0.08、裸地(葦原外)で0.02、割石空積は0.05とした。図-2の低水路側に点線で示した位置で、St.Bで計測された 水位と塩分を境界条件として与えた。なお前述したよう に空積割石の間隙を通しても多少の流出入があったが、 その量は解析では考慮しなかった。

#### (2) 土壌間隙水塩分の変化

表層水と土壌間隙水の塩分交換率は、土壌の粒径や開放度合の他に、植生や底生動物の活動(例えば葦の根茎密度、カニ類などの底生生物生息密度や深度)の影響を受けるが、それを定量的に求めるのは困難である。そこでLinら<sup>9</sup>に倣い一次の伝達式を仮定し、経験定数γを観測データから同定することとした。

$$\frac{d}{dt}\left(\int_{H}^{0} S(t;z) dz\right) = \beta \left\{S_{0}(t) - S_{f}(t)\right\} \tag{1}$$

ここに,S(t;z)は時刻 t における土壌間隙水中の塩分の鉛直分布, $S_0(t)$ は地表水の塩分, $S_f(t)$ は地表面直下の土壌間隙水塩分, $\beta$ は交換係数である.またHは塩分変動が生じる土壌層の厚さであり,例えば,難透水性地盤がある場合はその深度に相当する.

#### 5. 結果および考察

#### (1) 水位および塩分の変動

#### a) 観測結果

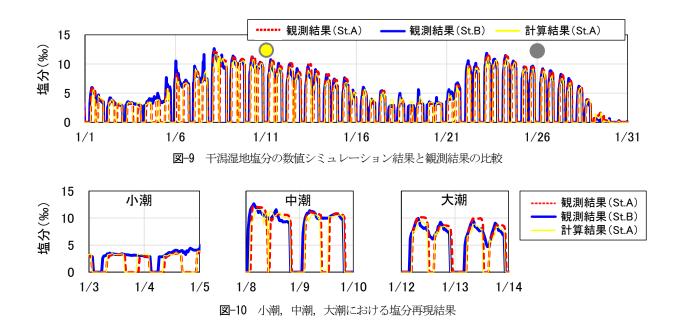
水位と塩分の観測結果を図-8に示す.上段には降水量と流量の時系列を、水位のグラフには新月と満月を示している.水温、塩分とも青実線はSt.A(干潟湿地)、赤点線はSt.B(低水路)の値である.前述したようにSt.Aの塩分記録が得られたのは12月12日以降である.

11月23日の小出水の影響で12月初旬まで流量は比較的大きかった。また1月29日に小出水があった。水位変動は2週間周期の潮位変動にほぼ従っている。一方、塩分は水位と同様に塩分も2週間の周期を示すものの、11月末から12月初旬の塩分は低く、また12月下旬よりも1月上旬の変動幅が大きくなっている。また1月29日の出水によって塩分は大きく低下している。水位変動が河口から伝播しても塩分が上昇しない理由は、荒川河口が東京湾の埋め立て地の奥にあることから、出水により東京湾の湾奥部表層の海水塩分が低下したことと、河川流量の増大により、塩水遡上が抑制されたためと推測される。

#### b) 数値シミュレーション結果

図-9に1月1日以降の1ヶ月間の塩分の数値シミュレーション結果を観測結果と比較している。また図-10に1月3日(小潮),8日(中潮),12日(大潮)における塩分変化の拡大図を示す。干潟湿地内塩分は低水路塩分から約30分の遅れを持って変動し、数値モデルはそれを概ね再現していることがわかる。また低水路塩分に比較して干潟湿地内塩分が若干平滑化されることも概ね再現されている。

図-11は干潟湿地内塩分の時空間変動の数値シミュレーション結果を示している。左側の水位時間変化図に



水位ピーク時 描画時点 水位上昇前期 水位上昇後期 水位下降時 流出終了時 水位(A.P.m) 1 3 2 1 1/3 20:00 1/4 4:00 1/3 22:00 1/4 2:00 1/4 0:00 小 潮 1/8 4:00 水位(A.P.m.) 1 1/8 2:00 1/8 6:00 1/8 8:00 1/8 0:00 中 潮 1/12 14:00 1/12 16:00 1/12 18:00 1/12 20:00 1/13 0:00 水位(A.P.n 5 大潮

図-11 干潟湿地内の塩分変化

○で示すように、水位上昇前期、同後期、水位ピーク時、水位下降期、流出終了後の5時点について示している.

小潮目には流入がほとんどないため冠水領域は狭く, 塩分も低かった。中潮日は大潮日に比較して水位ピーク は低いものの流入水塩分は高く,相対的に深い部分で高 濃度塩水が滞留する。これに対して大潮日は、低水路水 位ピークは高いものの塩分はそれほど上昇しないために, 干潟湿地の湛水面積は大きくなるが塩分上昇量は小さい。 この原因は河口からの塩水遡上の形態が異なることによ るのではないかと思われるが、今回は縦断的な塩水遡上 過程を計測していないので今後の課題としたい。

# (2) 土壌間隙水塩分濃度の回復過程

#### a)観測結果

St.Aにおける土壌間隙水の塩分濃度の観測結果を図-12に示す。19号台風出水による淡水冠水で低下した塩分が徐々に回復していく様子が見て取れる。どの時点においても塩分鉛直分布がほぼ一様であることから、干潟湿地の土壌の鉛直透水能はかなり高いことがわかる。この

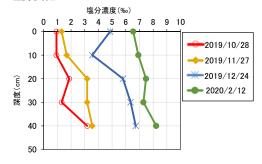


図-12 土壌間隙水塩分の変化

理由として植生根茎および底生動物の影響が考えられる. 前述のように干潟湿地全面を葦が高密度で覆っているため古い根茎が土壌を開放的にしている可能性が高い<sup>9</sup>. また大量に生息するクロベンケイガニの巣穴はかなり深くまで達しており、表層水と地下水の交換を促進している可能性がある.ただし詳細は今後の研究課題である.

## b) シミュレーション結果

式(1)は塩分変動の生じる層厚Hが既知であることを前提としていた.しかし図-12に示した深度40cmまでの観

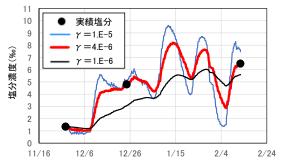


図-13 γによる土壌間隙水塩分時系列の変化

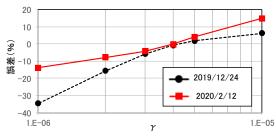


図-14 計算誤差のγへの依存性

測結果ではHが不明であり、また観測できた範囲ではSの鉛直偏差は小さく時間増分も概ね一様である。そこで地表からHまでの範囲での塩分を一様と近似すると、土壌柱に蓄積される塩分は $S_f$ に比例することになるので、式(1)は次式となる。

$$\frac{d}{dt}\left\{S_f(t)\right\} = \gamma\left\{S_0(t) - S_f(t)\right\} \tag{2}$$

ここに γ は経験的に定められる定数である.

観測された $S_0(t)$  を式(2)に代入し、適当な初期条件のもとに時間積分することにより $S_f$ の時系列を求められる。図-12に示す最初の観測値は19号台風出水から間もない10月28日に得られているが、この時点では全ての水位塩分計が故障していた。そこで11月27日の観測値を初期値としてシミュレーションを行う。ただしこの時点においてもSt.A(干潟湿地)の塩分計だけは12月11日までは不調であった。一方、図-9、図-10に示したように4(1)で述べた浅水流モデルは低水路における水位と塩分からSt.Aでの塩分を良好に再現していた。そこで11月27日から12月11日までは数値モデルで求めたSt.Aの塩分を $S_0(t)$ として与え、12月12日以降は $S_0(t)$ の観測値を用いた。

3つの  $\gamma$  についての $S_f(t)$ の計算結果を図-13に示す. 図中の $\oplus$ のうち11月27日は初期値であり、12月24日と2月12日の値を式(2)の検証データとして用いる. 大きな  $\gamma$ の計算結果は図-9に示した月齢による2週間周期で変動しているが、 $\gamma$  が小さくなるほど変動幅は小さくなる.

一方、2つの検証データとの対応関係を見ると、中間的なyにおいて計算結果と検証データの差が小さい、そこで(計算値ー観測値)とyの関係を $\mathbf{Z}$ -14に示す、これから $y = 0.4 \times 10^{-5}$  (1/sec)付近で誤差が0に最も近づくこ

とがわかる。そこで塩分回復に要する時間のオーダを調べるために,仮に洪水による冠水で $S_f=0$ となった後に一定の塩分 $S_0$ の塩水に覆われた場合を想定すると,式(2)の解は式(3)となる.

$$S_f(t) = S_0\{1 - exp(-\gamma t)\}$$
 (3)

ここで $S_f$  が $S_0$  の90%に到達する時間 $E_\gamma = 0.4 \times 10^5$ について計算すると約7日となる。図-9に示したように塩水冠水は間欠的なので実際には数倍となるが、いずれにしても、出水により土壌間隙水塩分が低下しても回復に要する時間はかなり短いと言える。

## 6. おわりに

本研究の主な結論は以下のとおりである.

- 1) 五反野ワンドの大部分は低潮時に乾陸化し、汽水性 カニ類などが生息する干潟湿地となっている.堰堤 開口部を経由した間欠的塩水流入により安定した汽 水状態が形成されている.
- 2) ワンド内の塩分時空間変化は、浅水流モデルにより 良好に再現された.したがって同種の汽水性干潟湿 地の計画において本モデルを使用可能と考えられる.
- 3) 干潟内の土壌間隙水塩分は、洪水による淡水冠水の 後の数週間で通常状態に回復する。この過程は簡略 な一次微分方程式で概ね再現できた。

なお本研究では荒川河道の塩水遡上過程については検 討していない. 今後は塩水遡上モデルと干潟湿地モデル を連結したいと考えている.

#### 参考文献

1)国土交通省:「多自然川づくり」優良事例集,2018.3.

2)国土交通省河川局:多自然川づくりの基本指針,2006.10.

3)国土交通省: 大河川における多自然川づくり-Q&A形式で理解を深める, 2019.3.

4)国土交通省河川局:荒川水系河川整備基本方針,2007.3.

5)荒川の将来を考える協議会: 荒川将来像計画2010, 2012.4.

6)農林水産省: 土壤分析法, 2015.3.

7)長田信寿: 一般座標系を用いた平面二次元非定常流れの数値 解析, 水工学における計算機利用の講習会, 講義集, 1999.

- 8) (財) 国土技術研究センター:河道計画検討の手引き (案),2002.
- 9) Qian Lin, Tadaharu Ishikawa, Ryosuke Akoh, Fenglin Yang, Shushen Zhang: Soil salinity reduction by river water irrigation in a reed field: A case study in Shuangtai Estuary Wetland, Northeast China, Ecological Engineering 89, p32-39, 2016.

(2020.4.2受付)