

大河川下流部の汽水性湿地における
土壌塩分の長期推定モデルに関する研究

2021 年 9 月

黒 田 直 樹

東京都立大学 都市環境科学研究科
都市環境科学域

大河川下流部の汽水性湿地における
土壌塩分の長期推定モデルに関する研究

目 次

第1章 序 論.....	1
1-1 研究の背景	1
1-2 既往の研究	4
1-2-1 多自然川づくりの経緯.....	4
1-2-2 大河川の多自然川づくりにおける汽水性湿地の位置づけ	5
1-2-3 汽水性湿地の土壌塩分の研究.....	7
1-2-4 塩水遡上モデルに関する既往の研究.....	8
1-3 本研究の目的と構成	10
1-3-1 本研究の目的.....	10
1-3-2 本研究の構成.....	11
第2章 研究の対象	15
2-1 緒言.....	15
2-2 研究の対象	15
2-2-1 対象河川の概要.....	15
2-2-2 研究対象の概要.....	29
2-3 現地観測.....	38
2-3-1 既存観測施設の観測データ整理.....	38
2-3-2 塩分と水位の連続観測.....	39
2-3-3 土壌塩分の現地計測	45
2-3-4 簡易透水試験.....	51
2-4 結語.....	56

第 3 章 低水路表層塩分のモデル化	59
3-1 緒言	59
3-1-1 本章の目的	59
3-1-2 既往の研究と課題	59
3-1-3 検討フロー	60
3-2 塩水遡上の特徴把握	62
3-3 低水路表層塩分のモデル化	65
3-3-1 モデル設計の基本方針	65
3-3-2 荒川 13KP 地点の塩分データの特徴と解析指標の設定	66
3-3-3 流速振幅 ΔU_d に対する ΔS および S_{av} の応答	67
3-3-4 ΔS および S_{av} のモデル化	72
3-3-5 ΔS および S_{av} の再現	73
3-3-6 荒川 13KP 地点の ΔS および S_{av} の再現結果	74
3-3-7 荒川 13KP 地点の低水路表層塩分の再現結果	75
3-3-8 五反野ワンド前面の低水路表層塩分の再現	76
3-4 東京湾を含めたモデルの改良	79
3-4-1 東京湾の塩分変動	80
3-4-2 モデルの改良	81
3-5 考察	84
3-6 結語	100
第 4 章 湿地内の土壌塩分のモデル化	102
4-1 緒言	102
4-1-1 本章の目的	102
4-1-2 既往の研究と課題	102
4-1-3 検討フロー	103
4-2 土壌塩分の特徴把握	104
4-2-1 鉛直方向の変動特性把握	104
4-2-2 土壌の透水性の把握	106
4-3 土壌塩分のモデル化	110
4-3-1 モデル化の方法	110
4-3-2 モデルの検証	111

4-3-3 考察.....	116
結語.....	131
第 5 章 湿地を拡大した場合のシナリオシミュレーション	134
5-1 緒言.....	134
5-1-1 本章の目的.....	134
5-1-2 検討フロー.....	134
5-2 平面二次元モデルの構築.....	136
5-2-1 塩分の移流拡散を考慮した平面二次元モデルの構築.....	136
5-2-2 観測データを入力条件としたモデルの検証.....	138
5-3 低水路表層の計算塩分を入力条件とした平面二次元モデルの検証.....	141
5-4 池の拡大シナリオシミュレーション	143
5-4-1 池の拡大シナリオの設定.....	143
5-4-2 シナリオシミュレーション結果.....	144
5-4-3 考察.....	161
5-5 結語.....	162
第 6 章 結論.....	164
6-1 本研究で得られた知見.....	164
6-2 今後の課題	166
謝辞	170

図 表 目 次

図 1-1 大正時代以降の地勢図でみた東京湾岸の埋立地の変遷	2
図 1-2 荒川河口部の変遷	2
図 1-3 Q&A に示されている河川環境の評価対象となる環境要素	5
図 1-4 相対潮汐地盤高の選好性の一例	6
図 1-5 高水敷の一部切り下げイメージ	10
図 2-1 荒川流域図	16
図 2-2 土地利用	17
図 2-3 下流域の市街化の進展	17
図 2-4 地形分類図	18
図 2-5 荒川下流部のゼロメートル地帯	18
図 2-6 近年 35 年（1971～2005 年）の年間降雨分布	19
図 2-7 三峰および東京の月別降水量	19
図 2-8 荒川縦断図	20
図 2-9 平面図	21
図 2-10 荒川横断図	24
図 2-11 荒川将来像計画における大規模自然地と中規模自然地	27
図 2-12 荒川将来像計画における自然地の整備方針	27
図 2-13 研究対象水域	29
図 2-14 西新井観測所の塩分観測位置	30
図 2-15 湿地の標高分布	32
図 2-16 割石空積堰堤の横断形状	35
図 2-17 既存観測施設の観測データ	38
図 2-18 現地観測期間と水文状況	42
図 2-19 計測器の設置イメージ	43
図 2-20 土壌塩分の計測方法	47

図 2-21 土壌塩分計と 1:5 水浸出法との比較（電気伝導度）	49
図 2-22 1:5 水浸出法から得られた電気伝導度と塩分の関係	50
図 2-23 簡易透水試験の模式図および作成した装置	53
図 3-1 検討フロー	61
図 3-2 観測データ（2019 年 11 月 27 日～2020 年 12 月 29 日）	62
図 3-3 2020 年 2 月 11 日～同年 3 月 15 日の観測データ	63
図 3-4 潮汐に伴う塩分の変化特性	63
図 3-5 2020 年 1 月 12 日～同年 2 月 11 日の観測データ	64
図 3-6 塩分推定モデルの概念図	66
図 3-7 荒川 13KP 地点の塩分および湾内 a 地点の時系列変化	66
図 3-8 流速振幅（ ΔU_d ）の算定方法	67
図 3-9 一次元不定流計算モデルの構築範囲	68
図 3-10 一次元不定流計算モデルの再現結果	70
図 3-11 計算流速 U と流速振幅 ΔU_d	71
図 3-12 ΔU_d と ΔS および $S_{av.}$ の関係	71
図 3-13 ΔU_d と ΔS の相関	72
図 3-14 ΔU_d と $S_{av.}$ の相関	72
図 3-15 時定数 α の感度分析結果	73
図 3-16 ΔS と $S_{av.}$ の再現結果	74
図 3-17 荒川 13KP 地点の低水路表層塩分（ S_1 ）の再現結果	75
図 3-18 荒川 12KP 地点（St.B）の表層塩分（ S_1 ）の試算結果	76
図 3-19 計算 $S_{av.}$ と逆算 $S_{av.}$ の比較	77
図 3-20 湿地前面（St.B）の ΔQ と $\Delta S_{av.}$ の相関	77
図 3-21 湿地前面（St.B）の表層塩分（ S_1 ）の再現結果	78
図 3-22 低水路河岸表層塩分の再現結果（東京湾塩分の考慮前）	79
図 3-23 東京湾の塩分時系列（鉛直平均値）	80
図 3-24 δS_1 と δS_t の算定結果の例	81
図 3-25 δS_1 と δS_t の算定結果	82
図 3-26 δS_1 と δS_t の関係	82
図 3-27 低水路河岸表層塩分の再現結果（東京湾塩分の考慮後）	83
図 3-28 低水路河岸表層塩分の再現結果（全計算期間）	86

図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果（2019 年 12 月）	87
図 4-1 検討フロー	103
図 4-2 土壌塩分の現地計測結果（St.A）	104
図 4-3 簡易透水試験結果	107
図 4-4 湿地土壌の粒径加積曲線	108
図 4-5 土壌塩分の供給イメージ	109
図 4-6 湛水塩分 S_0 と土壌塩分 S_f	110
図 4-7 低水路観測塩分（St.B）とワンド観測塩分（St.A）	111
図 4-8 低水路観測水位（St.B）とワンド観測水位（St.A）	111
図 4-9 低水路計算水位（St.B）とワンド観測水位（St.A）	112
図 4-10 St.A の観測塩分と計算塩分	112
図 4-11 γ の感度分析	113
図 4-12 計算土壌塩分と観測土壌塩分の相関	114
図 4-13 湿地内の土壌塩分の再現結果	115
図 4-14 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ（全期間）	117
図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ（2019 年 12 月）	118
図 5-1 検討フロー	135
図 5-2 メッシュ分割図	137
図 5-3 五反野ワンド全景	137
図 5-4 湿地塩分の数値シミュレーション結果と観測結果の比較	138
図 5-5 小潮，中潮，大潮における塩分再現結果	138
図 5-6 湿地内の塩分平面分布時系列	140
図 5-7 低水路表層塩分推定モデルを境界条件とした平面二次元モデルの検証結果	142
図 5-8 平面二次元モデルを境界条件とした土壌塩分モデルの検証結果	142
図 5-9 地盤高コンター	143
図 5-10 シミュレーション結果	145
図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列	146
表 2-1 荒川流域の概要	16
表 2-2 各地点の既存の観測データ	30
表 2-3 各地点の一般化表記	31

表 2-4 塩分計の仕様	40
表 2-5 水位計の仕様	41
表 2-6 土壌塩分計の仕様	46
表 2-7 土壌塩分の現地計測の実施時期	48
表 2-8 簡易透水試験の試料採取の概要	53
表 2-9 簡易透水試験の実施期間	54
表 3-1 一次元不定流計算の計算条件	69
表 5-1 平面二次元モデルの検証条件	136
表 5-2 低水路表層の計算塩分を入力条件とした平面二次元モデルの検証	141
表 5-3 ヒヌマイトトンボの生息に適した環境条件	161

第1章 序 論

1-1 研究の背景

我が国の河川の汽水域では、淡水と海水が混合することにより特有の環境が形成される。そこには汽水域特有の魚類や底生動物が生息するとともに、これを捕食する鳥類等がみられ、独自の自然環境を形成している。汽水域のうち水際の湿地には、止水性の環境が形成され、魚類の産卵場や仔稚魚の生息場として、湿地特有の環境を形成している。

しかし、1960年代の高度経済成長期以降、我が国の河川の河口では港湾等の整備のために埋め立てが進み、多くの湿地が消失した。例えば東京湾岸の大半では埋め立てが進み（図 1-1¹⁾）、東京湾に注ぐ荒川の河口においても埋め立てが進行した（図 1-2）。都市中小河川では3面・2面コンクリート化が進行し、水際の湿地は完全に消滅した。写真 1-1に示す東京都市部を流れる隅田川、神田川などのように、高度利用が進み直立護岸が連続する中小河川での水際湿地の再生は実質困難である。

一方、大河川に目を向けると、治水面や利用面の目的から、高水敷は低水路と明瞭に分離され、ランド等として整備されている河川が多いものの、この一部を切り下げることによる湿地の再生の余地が残されている。従来、中小河川で行われることが多かった多自然川づくりは、2019年に示された「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～」²⁾を契機として、大河川の下流部においても展開されつつある。河川下流部に位置する大都市域での多自然川づくりを考えたとき、大河川には低水路河岸や高水敷があるため、水際に多様な水深・流速場等を創出できる。

特に、感潮区間では潮位変動によって塩水が遡上し、水位が変化するため、汽水性の干潟や湿地¹⁾を創出できる。また、大河川の下流部は、潮位変動に伴う水位変動が大きい³⁾。低水路河岸に湿地がある場合には、水位変動により塩水が出入りし、汽水性の湿地が形成され、汽水性の魚類や底生生物が生息する。底生生物にとっては、水中だけではなく、土壌中の塩分も彼らの生息のしやすさを規定する重要な要素と考えられる。このため汽水性の湿地の創出においては、塩分の供給源となる低水路および湿地内の塩水の挙動を考慮した検討が必要と考えられる。しかしその事例は少なく、湿地内の土壌塩分の挙動に着目したものはほとんどない。

そこで本研究では、大河川の河岸湿地における長期塩分変動を推定するモデルを開発した。さらに、この結果を入力条件として、湿地内の湛水塩分と土壌塩分を推定するモデルを開発した。

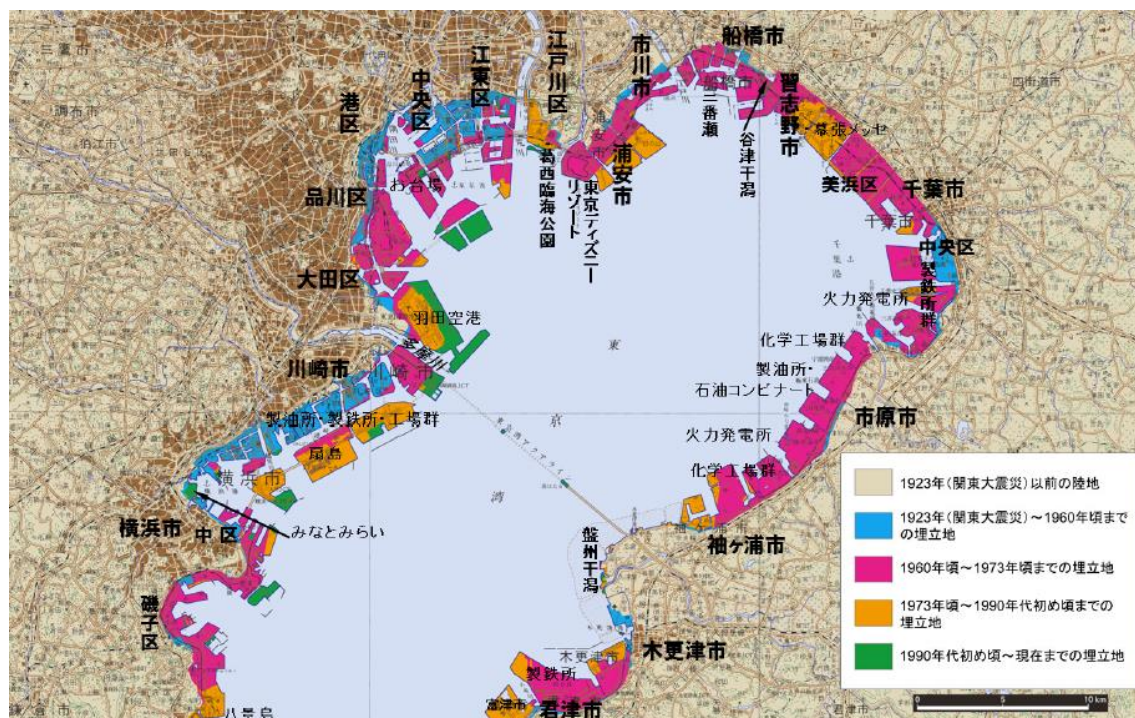
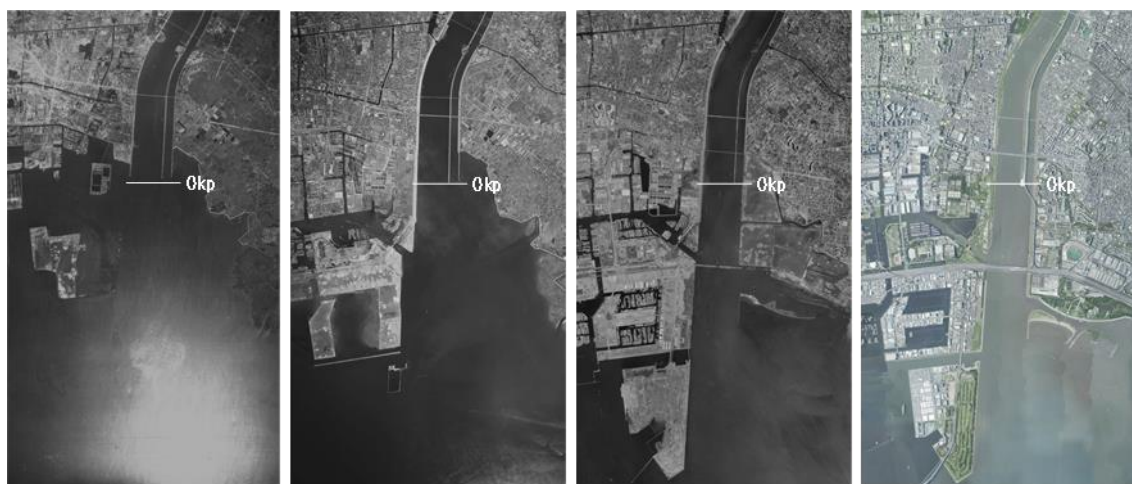


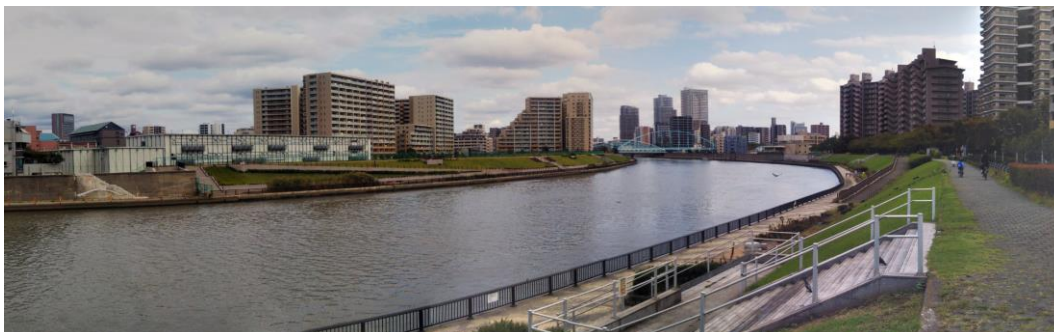
図 1-1 大正時代以降の地勢図でみた東京湾岸の埋立地の変遷¹⁾



1946 年（昭和 21 年）4 月 1965 年（昭和 40 年）11 月 1975 年（昭和 50 年）5 月 2019 年（令和元年）

図 1-2 荒川河口部の変遷⁴⁾

隅田川



目黒川



神田川



写真 1-1 中小河川の河岸の例

¹干潟：干潟とは、水産庁によれば次のように定義されている。『干潮時に干上がり、満潮時には海面下に没する潮間帯において砂質または砂泥質の浅場がひろがっている場所を「干潟」という⁵⁾。』また、湿地とは、ラムサール条約によれば次のように定義されている。『この条約の適用上、湿地とは、天然のものであるか人工のものであるか、永続的なものであるか一時的のものであるかを問わず、更には水が滞っているか流れているか、淡水であるか汽水であるか鹹水(かんすい＝塩水・海水)であるかを問わず、沼沢地、湿原、泥炭地または水域をいい、低潮時における水深が6メートルを超えない海域を含む』

⁶⁾

1-2 既往の研究

1-2-1 多自然川づくりの経緯

日本の都市部の河川では、1960年代の高度経済成長期に暗渠化や3面・2面コンクリート化が進み、多くの自然が消失した。そして、1990年代からの自然環境への関心の高まりの中、多自然型川づくりの考え方が導入された⁷⁾。導入初期の代表河川としては、横浜市のいたち川⁸⁾や和泉川⁷⁾等の中小河川が挙げられる。

その後、2006年の「多自然川づくりの基本指針」⁹⁾において、多自然川づくりの基本的な考え方が示された。これまでの多自然“型”川づくりから、より自然本来の河川の再生・創出を目指した多自然川づくりへと名称を変え、中小河川へのさらなる展開が期待された。多自然川づくりポイントブック¹⁰⁾には多数の事例が紹介されており、東京都の河川では野川や平井川が成功例として挙げられている。しかしながら、前述の写真 1-1 に示したように、都市中小河川では河岸が狭く直立護岸が連続しており、河岸の湿地環境の再生は実質困難である。

一方、国土交通省が管理する大河川に目を向けると、2019年に「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～」(以下、Q&Aという)²⁾が公表された。Q&Aが作成された背景として、『「多自然川づくり基本指針」に記載された留意事項が、河道法線の変更など中小河川にみられる河道改変することを念頭においており、河道掘削、堤防強化等の河道の一部を対象として整備を行う大河川を対象としていなかったことが一つの理由と考えられる』と述べられている。

ただし、Q&Aには、大河川における多自然川づくりの成功事例が多数紹介されており、個々の河川ではすでに、創意工夫しながら自然川づくりが実践されつつあることが見て取れる。Q&Aは、この流れを全国的にさらに促進・展開していくため、現場技術者のサポートを目的として作成されたものであり、大河川においても多自然川づくりのさらなる展開が期待される。

1-2-2 大河川の多自然川づくりにおける汽水性湿地の位置づけ

大河川下流部の汽水環境の再生や創出のための研究としては、「河川水辺の国勢調査」から、全国の一級河川を対象に汽水域の地理的条件と魚類の関係を分類した岸田・天野らによる事例¹¹⁾や、生物多様性との関係を整理した中村による事例¹²⁾がある。これらは、淡水河川とは異なる生態系や物理特性を有する河川汽水域の環境管理の手法の確立を念頭としたものであった。その後、2019年に公表されたQ&Aでは、河川環境の評価に用いる12の環境要素が図1-3の通り示されており、干潟とヨシ原が汽水性の環境要素として考慮されている。

このうち干潟については、造成の際の具体的な指標として、図1-4に示す「相対潮汐地盤高」¹³⁾の考え方が紹介されている。これは、干潟に生息するアサリ等の貝類やコメツキガニ等のカニ類、および植生群落が選好する朔望平均潮位に対する地盤高を整理したものであり、干潟創出の際の具体的な地盤高の設定の際に参考となると考えられる。

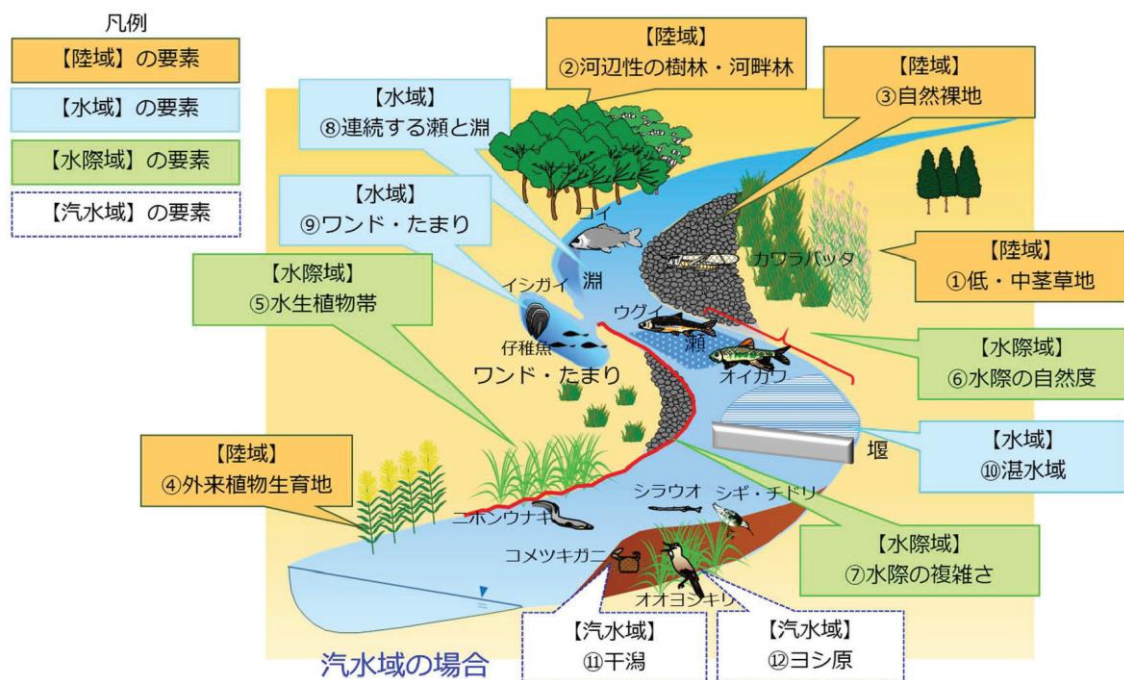


図 1-3 Q&A に示されている河川環境の評価対象となる環境要素



図 1-4 相対潮汐地盤高の選好性の一例

さて、図 1-3 の上流側に目を向けると、水域に区分される環境要素としてワンド・たまり²が挙げられている。ワンド・たまりには仔稚魚やイシガイが記載されており、Q&A 中で明確には述べられていないが、純淡水域の環境が想定されているようである。実際、大河川におけるワンド・たまりの整備の事例として挙げられることが多い淀川のワンド¹⁴⁾は、純淡水域が対象となっている。

しかし、ワンド・たまりを含む湿地環境は、汽水域にも形成される。汽水域の湿地では、塩水が低水路から出入りするため、半止水環境のみならず塩分も生物の生息生育に影響し、淡水域の湿地とも、汽水域の低水路とも異なる自然環境を形成する。実際に、ヒヌマイトトンボ¹⁵⁾は汽水域に生息するが、低水路には見られず河岸の湿地にのみに生息する。また、低水路にも生息する魚類にとっても、稚魚・仔魚期には汽水性・半止水性の湿地が重要な生息場となっている。

このように、汽水性の湿地の創出や保全のためには、半止水性と汽水性の両面を考慮した検討が必要である。しかし、汽水域の干潟を対象とした研究としては、上述の相対潮汐地盤高（図 1-4 参照）として整理した事例¹³⁾のほか、ヨシ原の保全のための地盤高を検討した事例¹⁶⁾があるが、これらは塩分のコントロールに着目したものではない。

²ワンド・たまり¹⁷⁾：河川本流の近傍にみられる半止水環境を持つ水域のことを指す。このような半止水環境は、水生生物の生息環境として重要であると考えられている。



写真 1-2 淀川で整備されたワンド

1-2-3 汽水性湿地の土壤塩分の研究

汽水性の底生動物であるゴカイは平常時には土壤中に生息している．また，汽水性の貝類であるシジミも同様である．さらに，汽水域に見られるヨシやガマ等の植生は，土壤中に根を下ろしている．当然，これらの汽水性の底生動物や植生にとっては，水中だけではなく，土壤塩分も彼らの生息のしやすさを規定する重要な要素と考えられる．しかし，汽水性生物の生息環境の創出において，土壤塩分に着目した研究は見当たらない．

一方，海外では，カスピ海（ロシア連邦）や死海（イスラエル）等の塩湖が多いことからわかるように，内陸部に塩水環境が存在する．また，灌漑を目的とした地下水の揚水に伴う塩害が問題になることが多い．このため，土壤塩分の調査手法に関する研究が多くみられる^{18)~20)}．また，汽水性湿地の土壤塩分に着目した研究としては，例えば Moore et al. は，アメリカ合衆国の Great Bay の汽水性湿地を対象に，土壤塩分と生息種との関係を分類している²¹⁾．また，Jackson と Vallaire は，アメリカ合衆国ルイジアナ州の湿地における土壤塩分と湿地微生物への影響を調査し，塩分と生息種の分類を行っている²²⁾．

しかしこれらは，土壤塩分の調査手法や生物への影響把握を目的としたものであり，汽水性湿地の塩分のコントロールを論じたものではない．

1-2-4 塩水遡上モデルに関する既往の研究

汽水性湿地への塩分の供給源は、湿地に隣接する低水路であり、低水路への塩分の供給源は海域である。つまり、汽水性湿地の創出の検討には、まず、低水路の塩分を推定できるモデルが必要となる。さらに、汽水性湿地を生息場とする生物にとっては、年間を通じた塩分の季節変動が影響することから、通年の季節変動を推定できるモデルが必要となる。

汽水域の塩水遡上モデルとしては、鉛直二次元ないし三次元モデルが提案されている²³⁾。これらの高次モデルの構築にあたっては、観測データに基づく乱流混合定数の同定や河口部境界条件の適切な設定が必要である。また、感潮河道の上流端から河口部までをモデル化すると格子数が膨大になる。加えて高次モデルは計算負荷および計算時間が膨大となる。

鉛直二次元モデルの実際の河川への適用例としては、例えば小林らの利根川下流を対象としたモデルの検証が挙げられる²⁴⁾。しかし、モデルの検証対象は、河床沿いの塩水くさびの先端位置であり、低水路河岸の湿地への塩分の供給源となる低水路表層に着目した検討ではない。また、計算期間は10日間であり、生物の生息・生育環境を検討するうえで必要となる季節変動を伴う長期を対象としたものではない。

工藤、鈴木、石川らは、相模川感潮域を対象に、環境維持流量を検討するため鉛直二次元モデルによる検討を行っている。計算期間は1月19日～2月3日である。²⁵⁾

三次元モデルの実際の河川への適用例も多数みられる。例えば、中村と石川は、Soroban格子を用いた三次元モデルを開発し、宮城県北上川を対象に再現計算を行っている²⁶⁾。計算期間は2006年8月8日～9月1日の26日間である。

中本、新谷らは、釧路川を対象に三次元モデルを用いて塩水遡上の予測を行っている²⁷⁾。検討は気候変動による海面上昇に伴う塩水遡上距離の変化に着目したものであり、低水路表層の挙動は評価されていない。また、塩水遡上距離の日変動を予測したものであり、計算期間は数日オーダーである。

佐藤、新谷らは、網走川を対象に、吹送流の影響を考慮した三次元モデルを用いて塩水遡上の再現を行っている²⁸⁾。この時の計算期間は2007年6月9日～15日の6日間である。

松村らは、筑後川を対象に三次元モデルの検証を行っている²⁹⁾。モデルの検証では、河床から水面までの塩分の鉛直分布を再現対象としており、良好な再現性を得ている。しかし、検証期間は2日間とごく短期間である。

天野，大沼らは，愛知県の豊川を対象に，河川の汽水域に海水侵入後の懸濁物質の残留時間を三次元モデルで検討している³⁰⁾．計算期間は，2007 年 1 月 1 日～2 月 28 日までの 2 ヶ月間である．懸濁物質は赤潮を想定しており，約 45 日以内に，河道に侵入した懸濁物は海域に戻ることをシミュレーションにより予想している．

鉛直二次元や三次元モデル以外の塩水遡上モデルの開発や検討事例も見られる．

田渕，滝川らは，北九州市を流れる中小河川の紫川と江川を対象に，海面上昇による塩水遡上の変化を予測するため，多層一次元モデルを開発している³¹⁾．計算期間は最長 84 時間である．杉原と新目は，天塩川を対象に河道形状の違いによる塩水遡上の変化を一次元二層モデルにより検討を行っている．計算期間は 7 日間である³²⁾．

このように，上記のいずれの高次のモデルにおいても，計算対象時間は数日から最長でも 2 か月であり，約半年間や通年の数値シミュレーションには適さないと言える．また，検討対象は，塩水くさびの遡上に着目した研究が多く，低水路表層に着目したものは少ない．

1-3 本研究の目的と構成

1-3-1 本研究の目的

都市部を流れる大河川下流部では、河岸の整備が多自然川づくりの有力メニューと考えられるとともに、中小河川に比べ延長が長い汽水性の湿地の創出の可能性がある。湿地の汽水性の生物、とりわけカニ類やゴカイ等の底生動物にとっては、土壌中の塩分状態が生息に大きく影響すると考えられる。しかし、多自然川づくりにおいて、土壌の塩分状態を考慮し、汽水性の湿地の保全あるいは創出を論じた例はほとんどない。

そこで本研究では、低水路河岸における汽水性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」を対象に、湿地内の土壌塩分を通年で再現できるモデル（以降、土壌塩分推定モデルという）の開発を目的とした。また、湿地の諸元を変更した場合のシナリオシミュレーションを行い、湛水と土壌の塩分の挙動を考慮した汽水性湿地の創出可能性の検討を目的とした。

現在、我が国では国土強靱化の方針が示されているが、本研究で提案する湿地の創出は、図 1-5 に示すように高水敷の一部を切り下げるものである。これは、河積の増大による流下能力の向上という治水面の効果も有する。河積の増大のための対策としては、従来は、図中に示すような低水路を掘削する方法が主流であったと考えられる。ただし、感潮区間における低水路掘削は、掘削後すぐに土砂が再堆積することが懸念される³³⁾。また、掘削範囲は、朔望平均干潮位以下の掘削が主であり、掘削領域の塩分は低水路と同じとなるため、多様な塩分環境の創出は見込めない。これに対し、本研究で提案する高水敷の切り下げは、流下能力の向上と併せた汽水性の湿地の創出を可能とするとともに、陸上掘削が主となり、工事にかかる費用は浚渫より抑えられると考えられる。

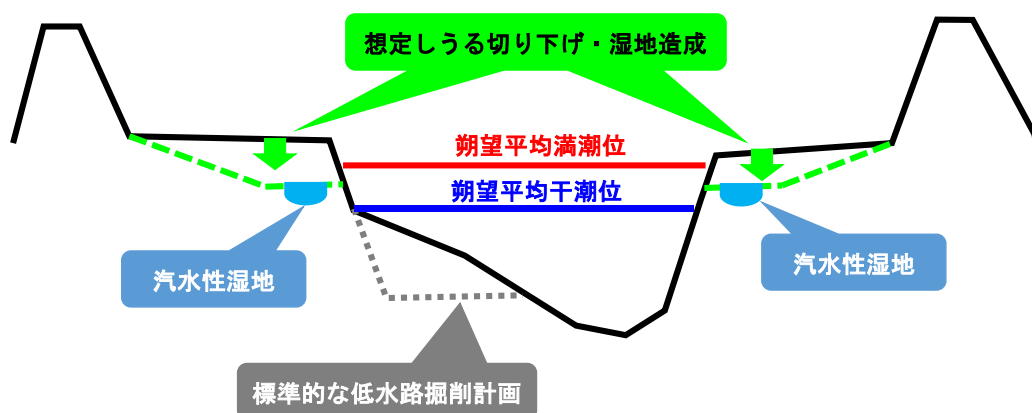


図 1-5 高水敷の一部切り下げイメージ

1-3-2 本研究の構成

本論文は、全6章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べ、本論文の構成を示している。

第2章は研究方法であり、対象地の概要と現地観測・実験方法を述べる。

第3章では、河岸湿地に流入する低水路表層水の塩分推定モデル（以降、低水路表層塩分推定モデルという）の開発について述べる。低水路表層塩分推定モデルは、一階の微分方程式で表現される半経験的なモデルであり、出水期を含む通年で観測データを良好に再現できることを示す。

第4章は、湿地土壌の塩分推定モデルの開発である。第3章で構築した低水路表層塩分推定モデルにより得られた塩分を入力条件とすることにより、出水期を含む通年で河岸湿地内の土壌塩分を良好に再現できることを示す。土壌塩分モデルは、第3章の低水路表層塩分推定モデルと同じ式形である一階の微分方程式で表現され、実務での活用も視野に長期の計算を可能とするものであり、本研究の技術的特徴である。

第5章は、河岸湿地の造成に関するシナリオ検討である。塩分の挙動を移流拡散項で考慮した平面二次元計算モデルの検証を行い、その後、ワンド内の池を拡大することにより、湛水および土壌の塩分のコントロールの可能性を示す。

最後に第6章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の課題について述べる。

【参考文献】

- 1) 地理地殻活動研究センター：面積調でみる東京湾の埋め立ての変遷と埋立地の問題点, p.109, 2013.
- 2) 国土交通省：大河川における多自然川づくりーQ&A形式で理解を深める, 2019.3.
- 3) 汽水域の河川環境の捉え方に関する検討会：汽水域の河川環境の捉え方に関する手引書, pp.4-9, 2004.5.
- 4) 国土地理院：空中写真
<https://www.gsi.go.jp/CHIRIKYOUIKU/syasin.html> (参照：2021/6/14)
- 5) 水産庁HP：干潟の働きと現状
https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/tamenteki/kaisetu/moba/higata_genjou/
(参照：2021/6/14)
- 6) 環境省HP：ラムサール条約湿地とは
http://www.env.go.jp/nature/ramsar/conv/About_RamsarSite.html (参照：2021/6/14)
- 7) 多自然川づくり研究会：多自然川づくりポイントブック～河川改修時の課題と留意点～, 2007.3.
- 8) 道路局河川企画課：第一稿いたち川（いたち川の由来と低水路整備）, 2019.9
- 9) 国土交通省河川局：多自然川づくりの基本指針, p.2, 2006.10.
- 10) 多自然川づくり研究会：「多自然川づくりポイントブックⅢ」中小河川に関する河道計画の技術基準；解説, 2011.10.
- 11) 岸田, 天野, 大沼, 遠藤：河川汽水域の環境管理技術確立のための全国一級水系の汽水域環境類型化, 土木学会論文集B1（水工学）, Vol.67, No.4, pp. I_1273-I_1278, 2011.
- 12) 中村ら：「河川水辺の国勢調査」による河川汽水域の生物多様性の地理的分布評価の試み, 応用生態工学会第19回研究発表会講演集, p.36, 2015.
- 13) 前田, 中村ら：環境管理を目的とした河川汽水域における底生動物と生息場の定量的関係の把握, 河川技術論文集 第22巻, pp.415-420, 2016.6.
- 14) 国土交通省淀川河川事務所HP：淀川環境保全活動
<https://www.kkr.mlit.go.jp/yodogawa/activity/environment/index.html>
(参照：2021/6/14)
- 15) リバーフロント研究所：ヒヌマイトトンボの生態と保護増殖の手法について, 平成8年度研究所報告, 1996.

- 16) 国土交通省荒川下流河川事務所：荒川下流航走波対策指針（案）～荒川のヨシ原保全・再生のため～改訂版 第二章 荒川下流部のヨシ原の現状，2009.8.
- 17) 国立研究開発法人土木研究所 自然共生研究センターHP：“ワンド”や“たまり”とは
https://www.pwri.go.jp/team/kyousei/jpn/research/m3_h19_6.htm（参照：2021/6/17）
- 18) Yuan, C. & Jingkuan, S. & Wenquan, L. & Jing, W. & Mengwei, Z. Mapping coastal wetland soil salinity in different seasons using an improved comprehensive land surface factor system. *Ecological Indicators*, Vol. 107, 2019.
- 19) Drew, N. F. & Sammy, L. K. & David, C. W. Evaluating Abiotic Influences on Soil Salinity of Inland Managed Wetlands and Agricultural Croplands in a Semi-Arid Environment. *Wetlands*, 2014, p.1229-1239.
- 20) Juan, H. & David, C. W. & Carman, C. Two Fixed Ratio Dilutions for Soil Salinity Monitoring in Hypersaline Wetlands. *PLOS ONE*, 2015.
- 21) Gregg E. Moore & David M. Burdick & Chris R. Peter & Donald R. Keirstead: Mapping Soil Pore Water Salinity of Tidal Marsh Habitats Using Electromagnetic Induction in Great Bay Estuary, USA, *Wetlands*, 2011.
- 22) Colin R. Jackson¹ & Scarlett C. Vallaire: Effects of Salinity and Nutrients On Microbial Assemblages in Louisiana Wetland Sediments, *WETLANDS*, Vol. 29, No. 1, pp.277-287, 2009.
- 23) 湖沼技術研究会：湖沼における水理・水質管理の技術（第4章 湖沼の水理・水質解析技術），pp.4-5，2007.3.
- 24) 小林ら：利根川感潮域における塩水流動の現地観測および数値シミュレーション，土木学会論文集B1（水工学），67 巻 4 号，pp. I_1597-I_1602，2011.
- 25) 工藤，鈴木，石川：鉛直二次元モデルによる相模川感潮域の塩水流動解析，水工学論文集，第45巻，2001.2.
- 26) 中村，石川：CIP-Soroban法に基づく汽水域3次元数値流動モデルの開発，水工学論文集，第54巻，2010.2.
- 27) 中本，新谷ら：海面上昇を考慮した釧路湿原への塩水遡上の影響評価，土木学会論文集B1（水工学），67 巻 4 号，pp. I_1351-I_1356，2011.
- 28) 佐藤，中山，新谷ら：網走川河口における塩水遡上への吹送流の影響評価，土木学会論文集B3（海洋開発），69 巻 2 号，pp. I_1222-I_1227，2013.

- 29) 松村ら：分岐合流を有する感潮河道における塩水遡上運動の三次元流動シミュレーション，土木学会論文集B1（水工学），73 巻 4 号，pp.I_1039-I_1044，2017.
- 30) 天野，大沼，遠藤：河川汽水域への海水浸入後経過時間および海水残留時間の数値解析による評価，土木学会論文集B1（水工学），68 巻 4 号，pp.I_1561-I_1566，2012.
- 31) 田渕，滝川ら：海面上昇による塩分遡上特性の変化，地球環境シンポジウム講演論文集，9 巻号，pp.229-236，2001.
- 32) 杉原，新目ら：天塩川水系の塩水遡上変化要因と適応策に関する研究，第61回（平成29年度）北海道開発技術研究発表会，2017.
- 33) 稲村：荒川下流域の河道特性における新たな要因と対応策の検討，国土交通省関東地方整備局平成30年度スキルアップセミナー関東 一般(安全・安心(1))(防災)部門，2018.

第2章 研究の対象

2-1 緒言

第2章では、研究対象河川の荒川の流域および河道の概要を述べたうえで、研究対象とする五反野ワンドの概要を整理する。また、五反野ワンドの約1km上流で国土交通省荒川下流河川事務所により観測されている塩分等の既存の観測データを示し、塩分の遡上特性を整理する。

そして、五反野ワンド内の塩分の挙動の分析や土壌塩分推定モデルの開発に必要な現地観測として、筆者が五反野ワンドを対象に実施した「湛水塩分の連続観測」、「土壌塩分の現地計測」、および「簡易透水試験」の方法を述べる。

2-2 研究の対象

2-2-1 対象河川の概要

(1) 対象河川の選定

本研究では、対象河川として荒川を選定した。選定の理由は以下のとおりである。

- ①日本の首都東京を貫流する大河川であり、下流部は塩水遡上区間であること。
- ②国土交通省荒川下流河川事務所により低水路の塩分が観測されており、塩水遡上の現象の分析に必要なデータの蓄積があること。
- ③塩水遡上区間内は、自然地として低水路河岸に人工の湿地が整備されており、低水路と湿地の塩分の挙動の把握のための現地観測が可能であること。

(2) 荒川流域の概要

1) 流域の概要

荒川の流域図を図 2-1 に、荒川流域の概要を表 2-1 に示す。荒川は埼玉県と東京都を流れる一級河川であり、幹川流路延長は 173km、流域面積は 2,940km²であり、流域内人口は約 976 万人に達する。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）である¹⁾。

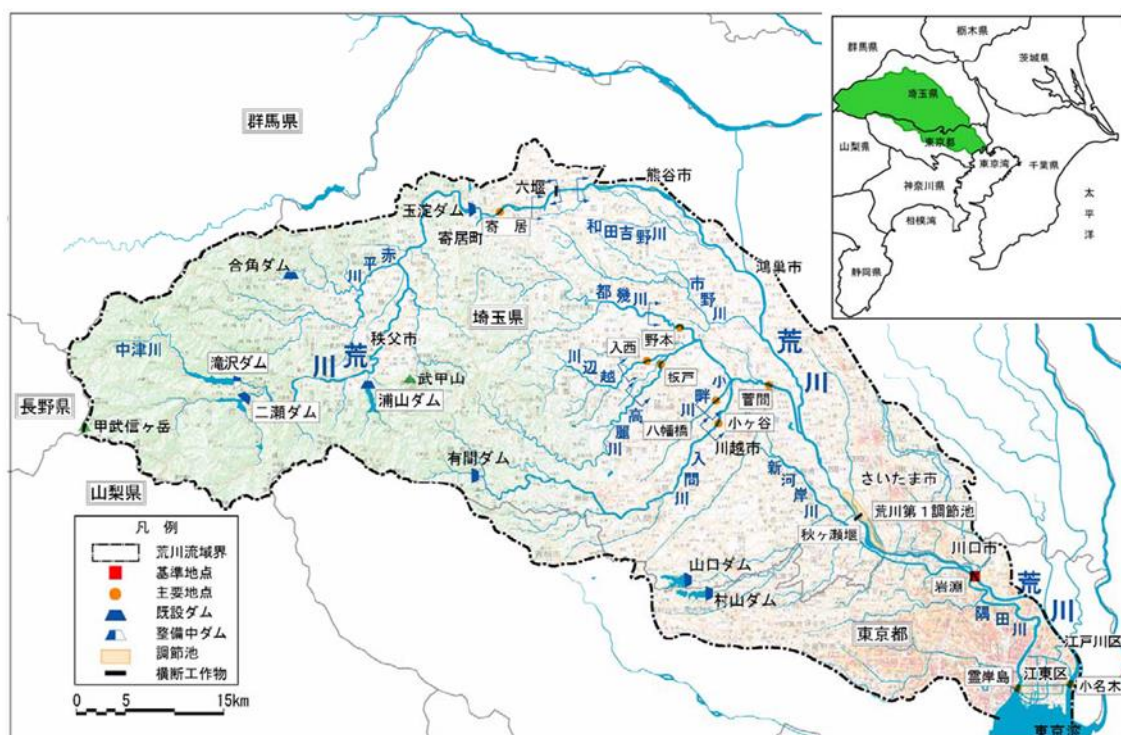


図 2-1 荒川流域図（荒川水系河川整備基本方針より¹⁾）

表 2-1 荒川流域の概要（荒川流域河川整備計画より²⁾）

項目	諸元	備考
幹川流路延長	173km	全国 109 水系中、第 15 位
流域面積	2,940km ²	全国 109 水系中、第 19 位
流域市区町村	20 区 39 市 17 町 1 村	東京都：20 区 13 市 1 町 埼玉県：26 市 16 町 1 村
流域内人口	約 976 万人	

2) 土地利用

荒川の土地利用について、平成 21 年の状況を図 2-2 に示す。森林面積は 44%，市街地は 33% を占める³⁾。下流域の市街地の進展のようすは図 2-3 示す通りであり、荒川沿川の市街化の進展も著しい。下流区間はもともと人工の放水路であるものの、現在の荒川の自然環境は、沿川住民の憩いの場として、また、河川内に生息する動植物の生息・生育場として、重要な役割を果たしていると考えられる。

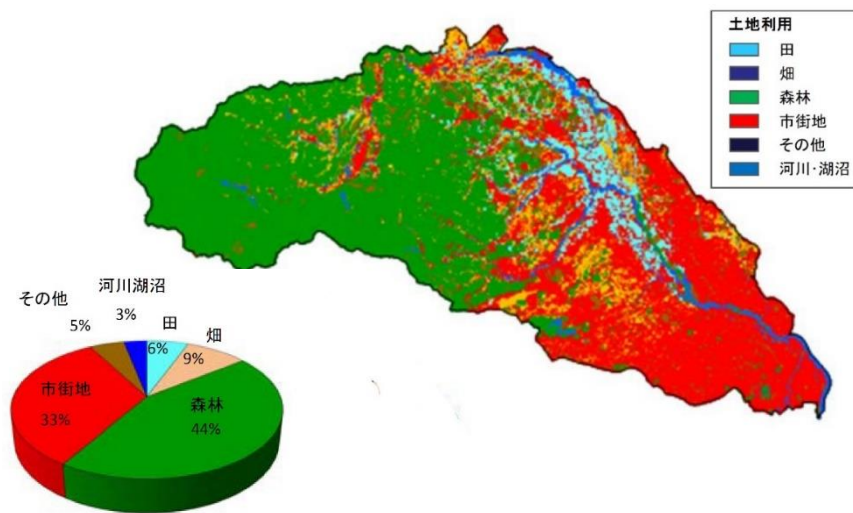


図 2-2 土地利用（荒川の現状と課題より³⁾）

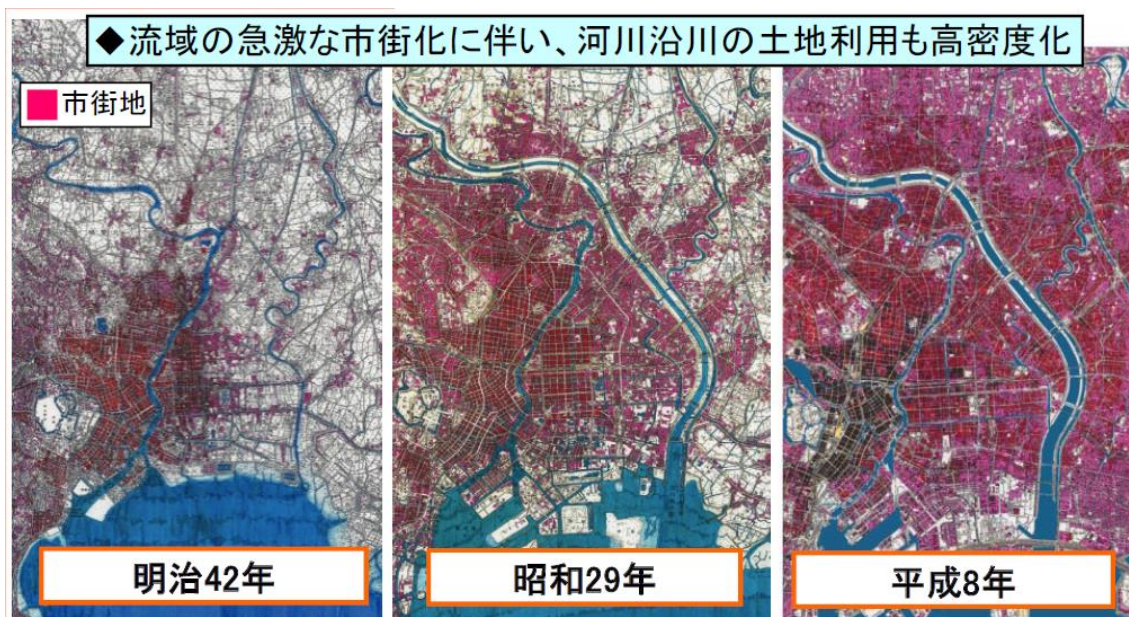


図 2-3 下流域の市街化の進展（荒川の現状と課題より³⁾）

3) 地形特性

荒川の地形特性について、平成 21 年の状況を図 2-4 に示す。山地は 43%，台地・丘陵は 36%を占め、荒川の沿川は低地・盆地であり 21%を占める。昭和 20 年代から進行した地盤沈下により、図 2-5 に示すように下流部はゼロメートル地帯となっている。

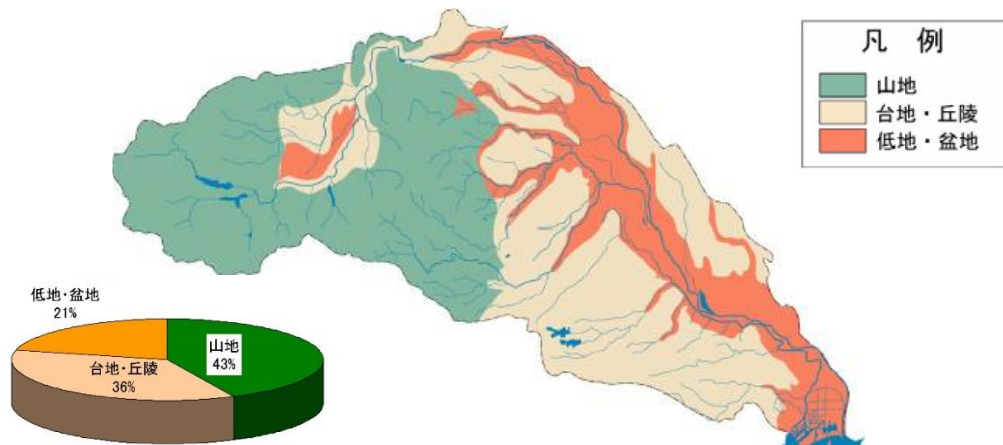


図 2-4 地形分類図（荒川水系河川整備基本方針より¹⁾）

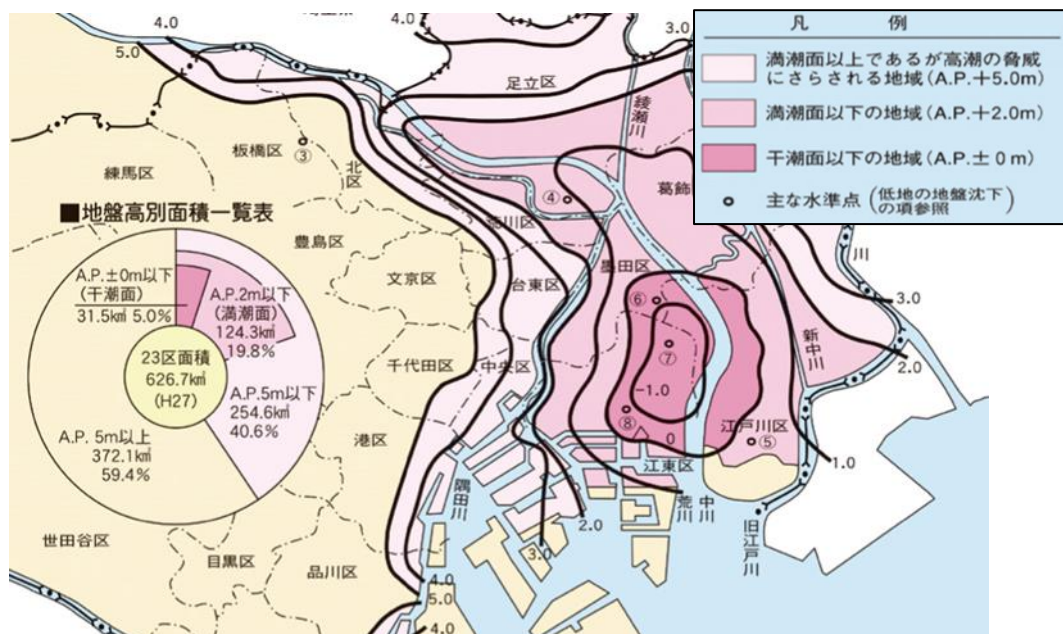


図 2-5 荒川下流部のゼロメートル地帯⁴⁾

4) 降雨特性

荒川流域の年間降雨分布を図 2-6 に、月別降水量を図 2-7 に示す。年間降雨量は、下流部に位置する東京で 1,400～1,500mm 程度、上流の山地に位置する三峰で 1,500～1,600mm 程度である。月別降水量を見ると、東京では 10 月、9 月、6 月の順、三峰では 9 月、10 月、8 月の順に降水量が多い。両地点共に、冬季の 12 月～2 月の降水量は少ない。

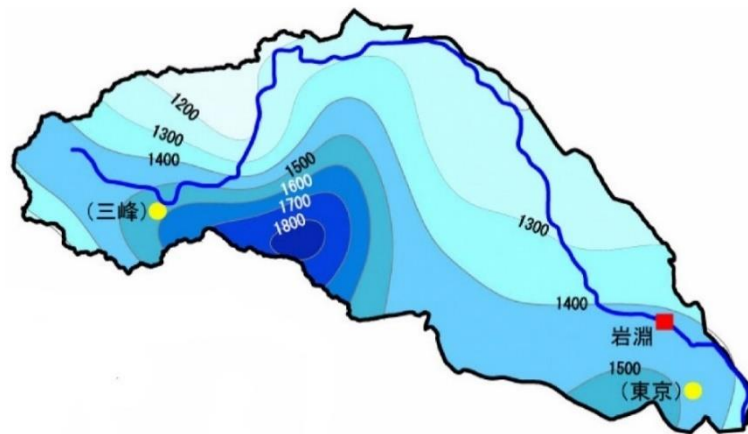


図 2-6 近年 35 ヶ年（1971～2005 年）の年間降雨分布

（荒川水系河川整備基本方針より ¹⁾）

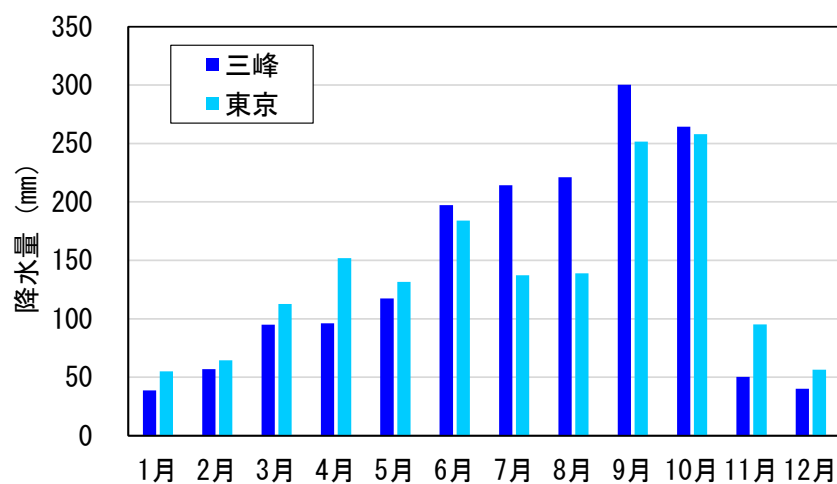


図 2-7 三峰および東京の月別降水量（2011～2020 の平均値）⁵⁾

(3) 河道特性

荒川の河口から国土交通省管理区間上流端の縦断面図を図 2-8 に示す。図中には朔望平均満潮位と同干潮位を記載している。35KP 地点には、秋ヶ瀬取水堰が位置している。秋ヶ瀬取水堰⁶⁾は、1964 年に水資源開発公団（現水資源機構）により建設された横断工作物であり、塩水遡上はここで防がれ、河口から秋ヶ瀬取水堰までが汽水区間となっている。河口から秋ヶ瀬取水堰までの区間の河床勾配は 1/5,000～1/10,000 となっている。

なお、詳細は後述するが、本研究で対象とする五反野ワンド⁷⁾は約 12.2KP に位置しており、汽水区間に属している。また、約 1km 上流には西新井橋があり、国土交通省荒川下流河川事務所により、水位（10 分ピッチ）のほか塩分（1 時間ピッチ）が連続観測されている。

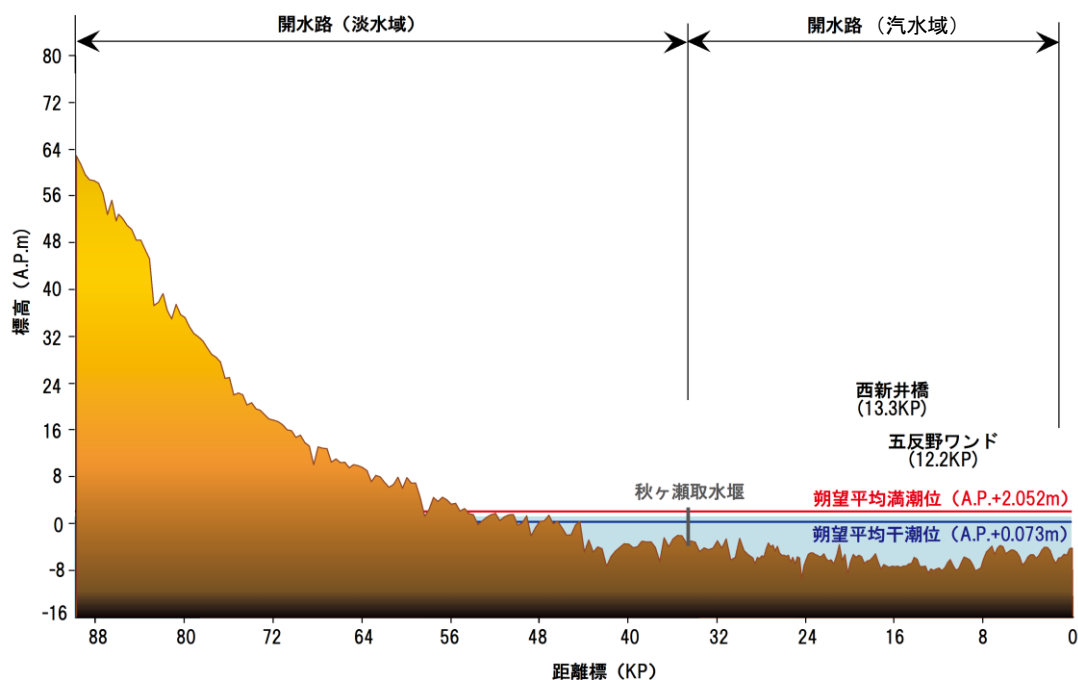


図 2-8 荒川縦断面図（河口～国土交通省管理区間上流端）

（河床縦断は 28.8KP 上流区間は荒川水系河川整備基本方針より作成¹⁾，下流区間は国土交通省荒川下流河川事務所提供の横断データおよび朔望平均満潮位・干潮位⁸⁾より作成）

汽水区間である河口から秋ヶ瀬取水堰までの平面図を図 2-9 に示す。約 21KP 地点には次ページに示す写真 2-1 に示すように岩淵水門が位置しており、隅田川の分派地点となっている。岩淵水門から下流は 1930 年（昭和 5 年）に完成した荒川放水路であり、川幅はおよそ 500m で一定である¹⁾。約 13KP に位置する千住大橋の下流の眺めをページの写真 2-2 に示す。左右岸ともに高水敷が広がっており、左岸側には自然地、右岸側にはグラウンドとして利用されている。荒川の河口部の眺めは写真 2-3 に示す通り、高水敷は狭く、河岸はコンクリート護岸が連続している。



図 2-9 平面図（河口～秋ヶ瀬取水堰）



写真 2-1 荒川の眺め（隅田川分派点から上流を望む）



写真 2-2 荒川の眺め（千住新橋から下流を望む）



写真 2-3 荒川の眺め（中川合流点から荒川河口を望む）

荒川下流部の横断形状（国土交通省荒川下流河川事務所提供データ）を 5KP ピッチで整理したものを図 2-10 に示す．また，図中には，朔望平均満潮位と同干潮位⁸⁾を示している．例えば 10KP や 15KP の横断形状をみると，低水路と高水敷は明瞭に分断されていること，高水敷は朔望平均満潮位より 1m 以上高い位置に整備されていることがわかる．朔望平均満潮位と同干潮位の差はおよそ 1.8m となっている．

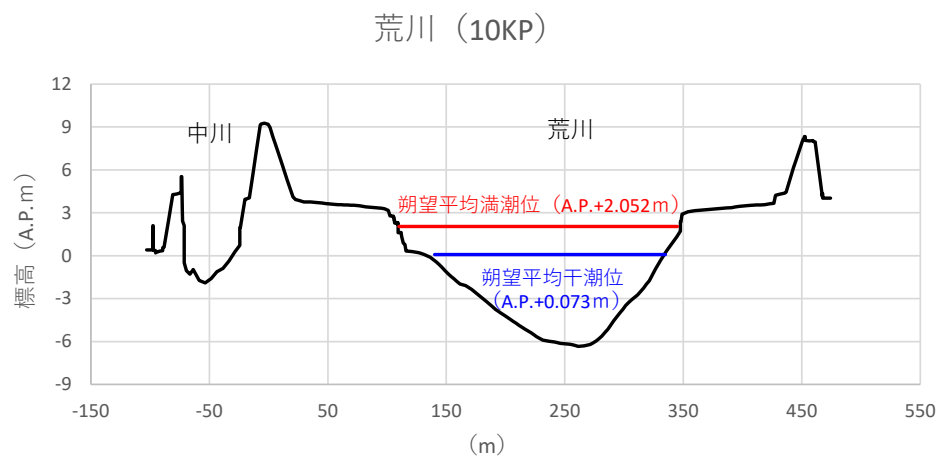
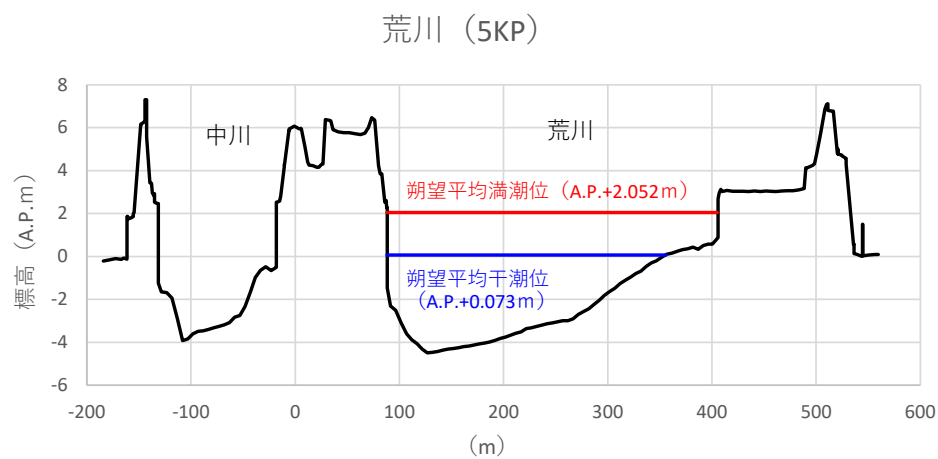
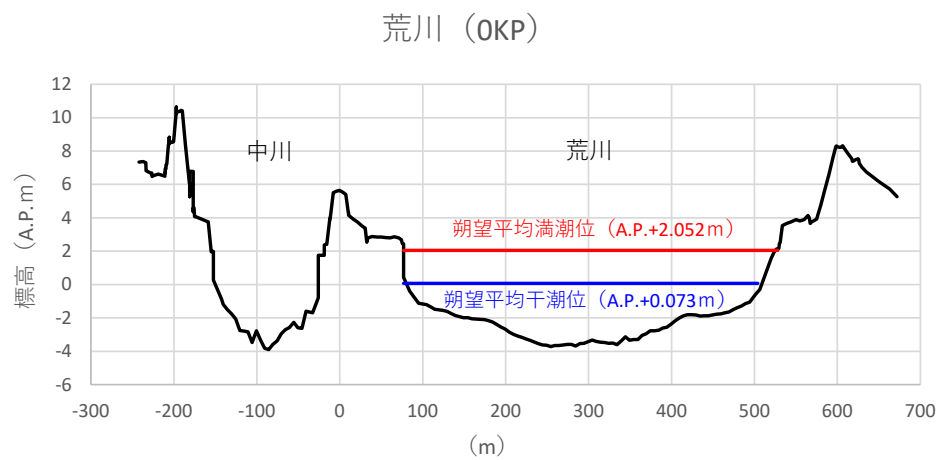


図 2-10 荒川横断面

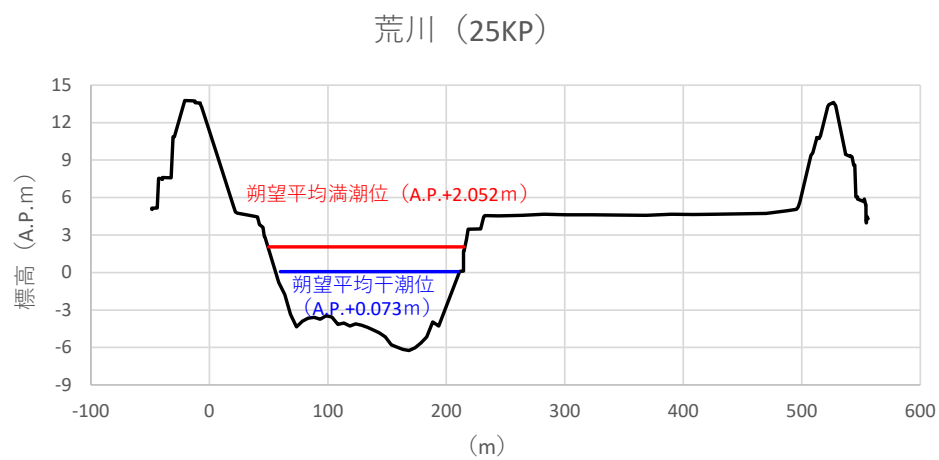
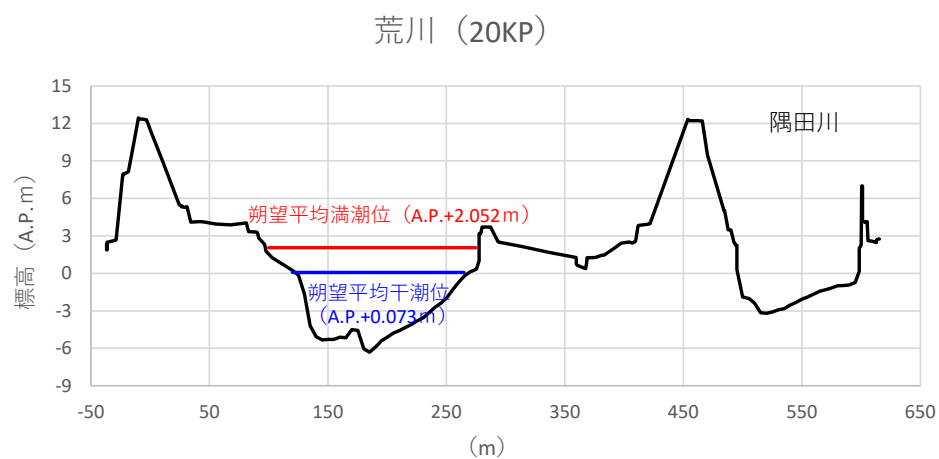
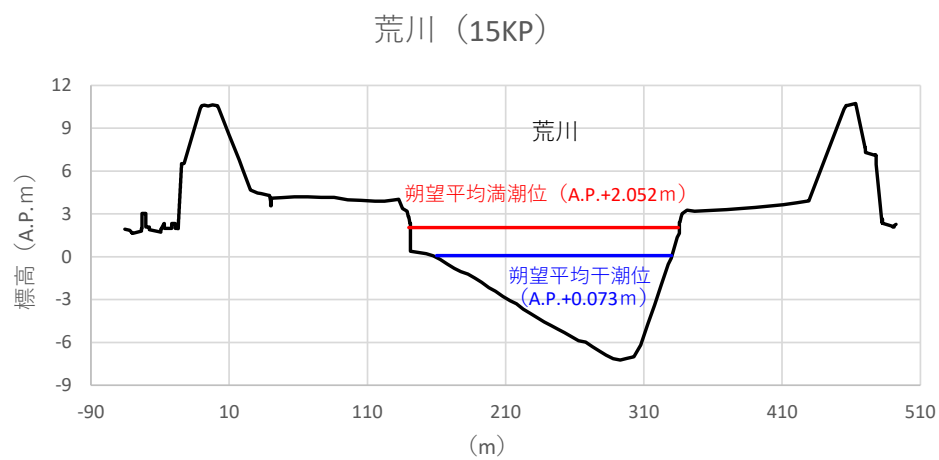


図 2-10 荒川横断面図

(4) 荒川将来像計画

荒川下流区間では、1996年に「荒川将来像計画」が作成されている⁷⁾。荒川将来像計画は、「単に創るためだけのものではなく、荒川を守り育てていく計画としても機能するように、荒川のあるべき姿の実現に向けて市民に参加していただく場⁹⁾」とされており、荒川の治水面、利用面、環境面の将来像が示されているものである。このうち、環境面については、対象面積に応じて大規模自然地、中規模自然地、小規模自然地別に以下のように分類され、図 2-11 に示す配置が示されている。また、自然地の整備方針として、その保全・整備イメージが整理されている（図 2-12）⁷⁾。

なお参考として、昭和 38 年（1963 年）と令和元年（2019 年）の千住新橋（約 12.5KP）周辺の垂直写真を写真 2-4 および写真 2-5 に示す。1963 年時点は現在より高水敷が広く、また、湿地が広く分布していたことがわかる。

大規模自然地の定義

面積が大きく、生き物の生息拠点となる大規模自然地には、荒川食物連鎖の頂点に位置するコミミズクやチュウヒなどの猛禽類の生息できる大きさを想定し、猛禽類の餌となるネズミ等の小動物が、十分生息できる環境として 10ha を目安とします。自然地の内容としては、水辺には大規模なヨシ原を、河口域には干潟を、河川敷には湿地や草原を作ります。また、自然地の中には荒川本川と連続した水路（クリーク）や本川の窪み（ワンド）を創出し、魚類の生息環境を確保します。

中規模自然地の定義

荒川にふさわしい生物の生息環境が安定して維持できるように、大規模自然地とともに生き物の生息の拠点として、また、移動する時に休息できる中継地点として、比較的まとまった規模の自然地を確保します。この中規模自然地は、夏期にオオヨシキリがヨシ原で繁殖できる大きさを想定し、そのために必要な約 1ha を目安とします。

小規模自然地の定義

小規模な自然地には、人間の利用と調和させながら小さな生物の生息環境を創出します。例えば、グラウンドの脇の空き地を藪にするなどして、昆虫などにすみかを提供します。また、一回の移動距離の短い生き物の移動の中継地点となります。

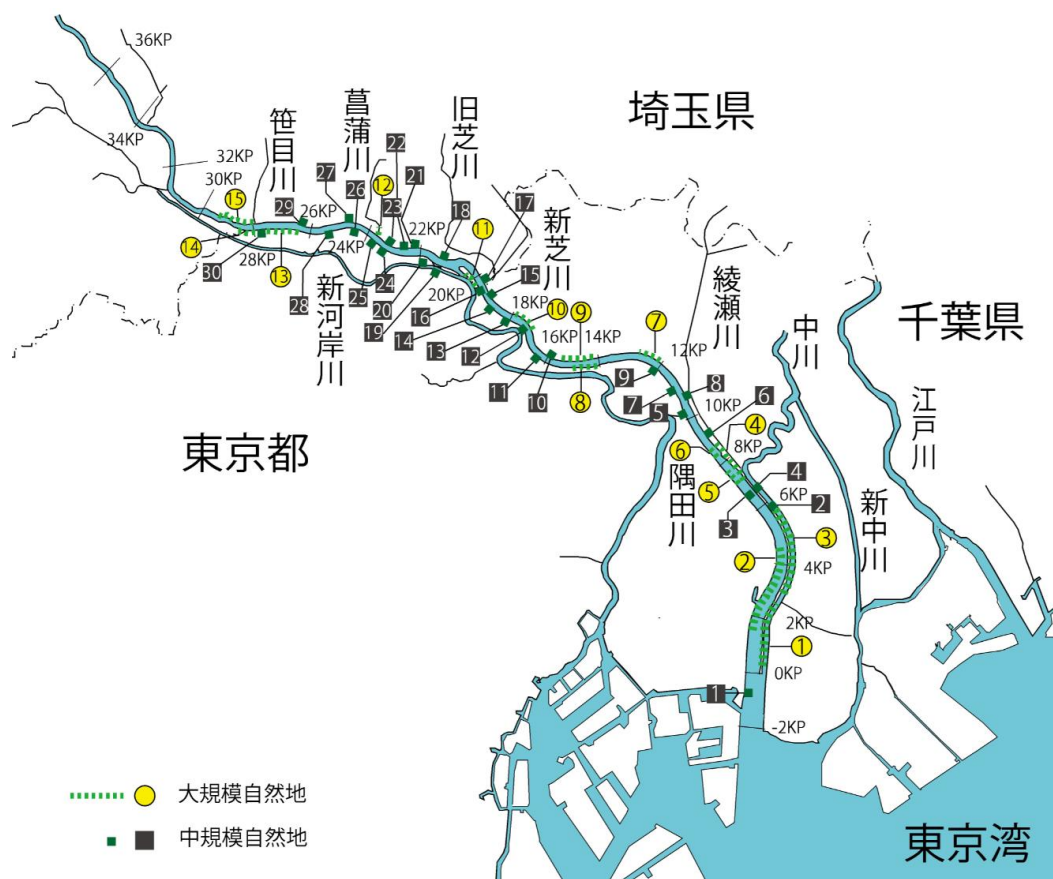


図 2-11 荒川将来像計画における大規模自然地と中規模自然地

(荒川将来像計画⁷⁾より作成)

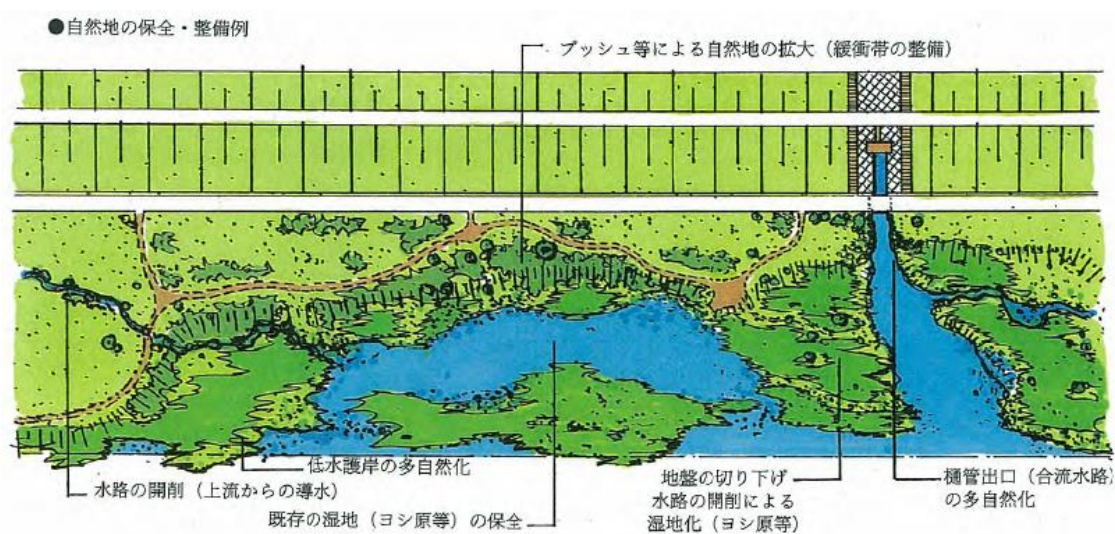


図 2-12 荒川将来像計画における自然地の整備方針（保全・整備例）⁷⁾



写真 2-4 垂直写真（昭和 38 年：1963 年）¹⁰⁾



写真 2-5 垂直写真（令和元年：2019 年）¹⁰⁾

(1) 研究対象水域の概要

29

(2) 既存の観測施設

図 2-13 には、五反野ワンドと西新井観測所のほか、汽水区間の上流端に位置する秋ヶ瀬取水堰、東京湾に位置する晴海（■）、浦安沖（▼）、St-18（◆）の位置を併せて示す。上記の各地点では、表 2-2 に示すデータが観測されており、塩分の遡上特性の分析や後述するモデル化の際に、境界条件や検証データ等に使用した。

浦安沖観測所では、国土交通省により塩分が毎時観測されている。西新井観測所の塩分は、図 2-14 に示すように上層と下層で観測されている。

表 2-2 各地点の既存の観測データ

地点・観測所名	管理者	使用した観測データ
秋ヶ瀬取水堰	水資源機構	時刻流量 ¹¹⁾
西新井	国土交通省	時刻塩分 ^{※1}
晴海	気象庁	時刻潮位 ¹²⁾
浦安沖	国土交通省	時刻塩分 ¹³⁾
St-18	第三管区海上保安本部	塩分 ^{14)※2}

※1: 国土交通省荒川下流河川事務所よりご提供いただいたデータ

※2: 2019 年 4 月までは毎月一回、同年 5 月以降は 3 か月に一回の頻度

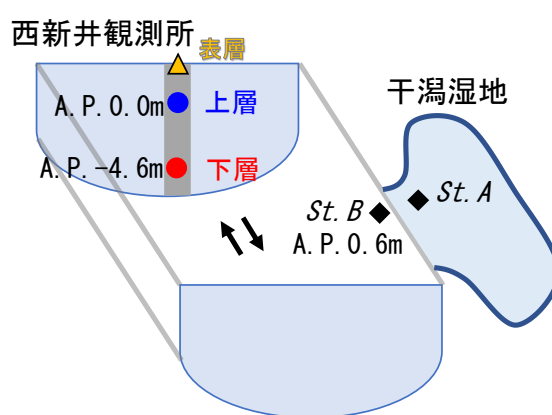


図 2-14 西新井観測所の塩分観測位置

(3) 地名の表記方法

図 2-13 に示した研究対象水域中の地名は、分かりやすさのため、表 2-3 に示すように一般化表記することとした。

表 2-3 各地点の一般化表記

地点・観測所名	一般化表記	備考
秋ヶ瀬取水堰	荒川 35KP 地点	
西新井	荒川 13KP 地点	
五反野ワンド	荒川 12KP 地点	研究対象
晴海	湾内 a 地点	
浦安沖	湾内 b 地点	
St-18	湾内 c 地点	

(4) 五反野ワンドの概要

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 12.2KP 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⁷⁾。全景写真を写真 2-6 に、標高分布（2012 年測量）を図 2-15 に示している。

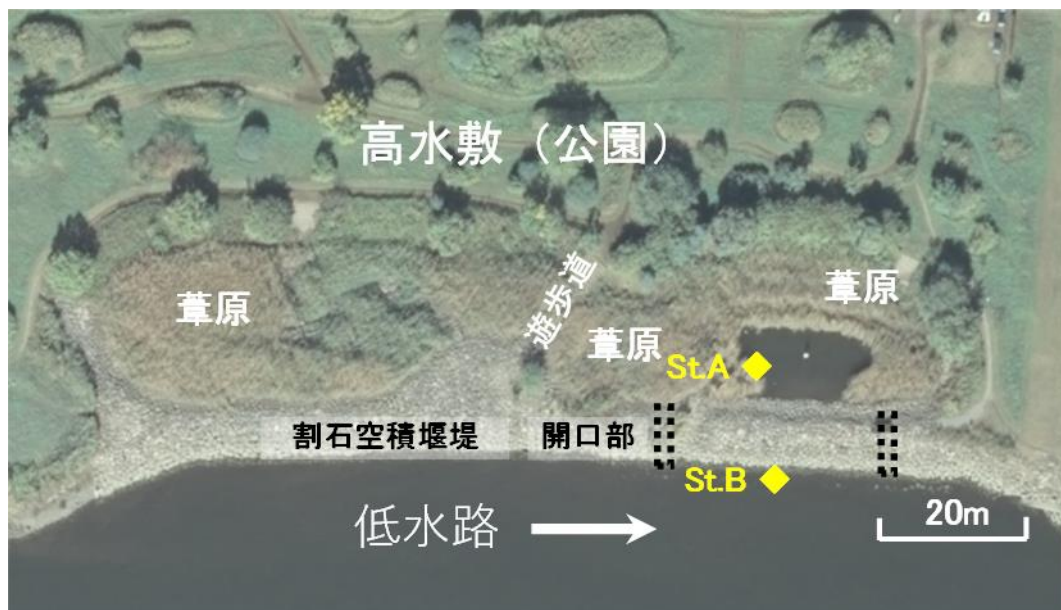


写真 2-6 五反野ワンドの全景

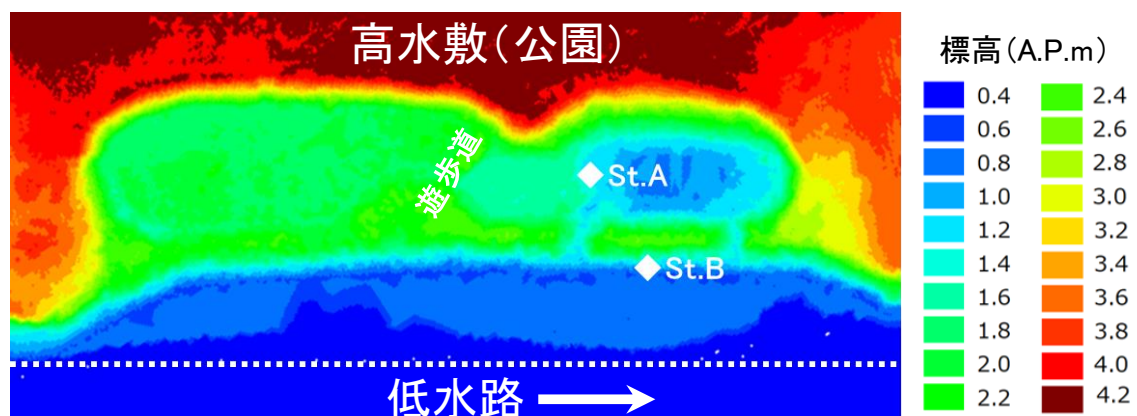


図 2-15 湿地の標高分布

図 2-15 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 2-7）．

写真 2-8 に示すように，ワンドと低水路は 50～80cm 大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（写真 2-9，写真 2-10）．



写真 2-7 下流側窪地の池（2018 年 9 月 19 日撮影）

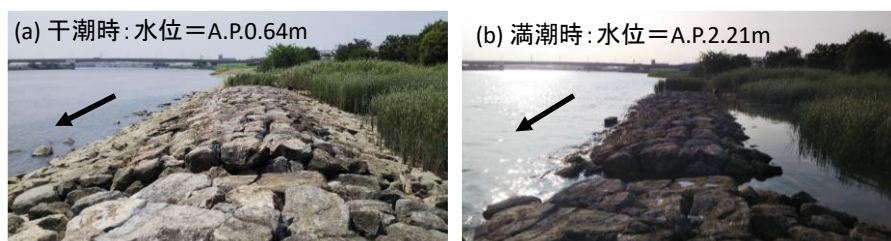


写真 2-8 割石空積堰堤



写真 2-9 上流の開口部



写真 2-10 下流の開口部（割石空積堰堤からワンドを望む）

堰堤の横断面形を図 2-16 に示す。堰堤天端標高は A.P.2.4m 程度で、開口部敷高は 1m ほど低い。低水路と湿地の水交換は主に開口部を経由している。また目視によると堰堤の空積割石の隙間を通して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（写真 2-11）。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湿地となっている。常時湛水している部分を除き、湿地の大部分は草原に覆われている。

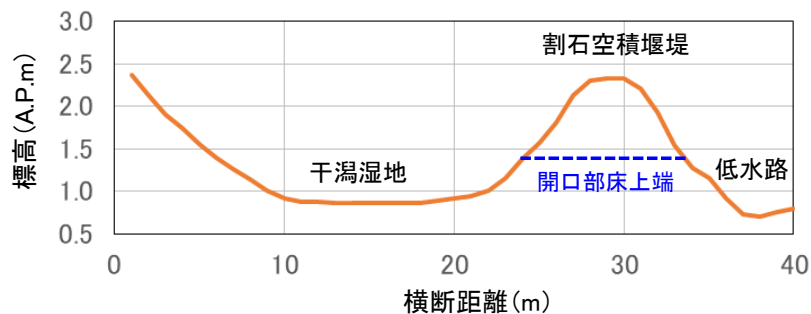


図 2-16 割石空積堰堤の横断形状



写真 2-11 割石空積堰堤を通過する水

(5) 五反野ワンドで確認した生物

写真 2-12 に、筆者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(写真 2-13)。特にクロベンケイガニの個体数は極めて多い。写真 2-14 に示したように、干潮時には陸域となる領域 (St.A) の地表にはカニ類の巣穴や、ゴカイ類の通過痕が多数みられる。

五反野ワンド内		
クロベンケイガニ	ベンケイガニ	ゴカイ
		
ヤマトシジミ	ヒメダカ	イトトンボの一種
		
低水路側		
サナエトンボの一種	カワヒバリガイ	ミシシippアカミミガメ
		
甲虫の一種	アオサギ	ユリカモメ
		

写真 2-12 湿地の生物



写真 2-13 多数のカニがみられる夏のようす（2020 年 9 月 2 日）



写真 2-14 湿地表面のようす（カニの巣穴とゴカイの通過痕）

2-3 現地観測

2-3-1 既存観測施設の観測データ整理

図 2-17 の上段に秋ヶ瀬取水堰（荒川 35KP 地点）放流量¹¹⁾と晴海観測所（湾内 a 地点）潮位¹²⁾、中段に St-18 地点（湾内 c 地点）¹⁴⁾と浦安沖（湾内 b 地点）の塩分¹³⁾、下段に西新井観測所（荒川 13KP 地点）の観測塩分を示す（塩分は無単位）。

これより、西新井観測所の塩分は東京湾の潮位変動に伴い周期的に変動することと、上層塩分は下層塩分に比べ低く鉛直方向で異なることがわかる。また、出水期（4 月下旬から 10 月上旬）の塩分は、下層と上層ともに非出水期に比べ低い期間が継続し、傾向が異なることがわかる。そしてこの期間の東京湾の塩分（湾内 b, c 地点）は冬季に比べ継続的に低下していることがわかる。

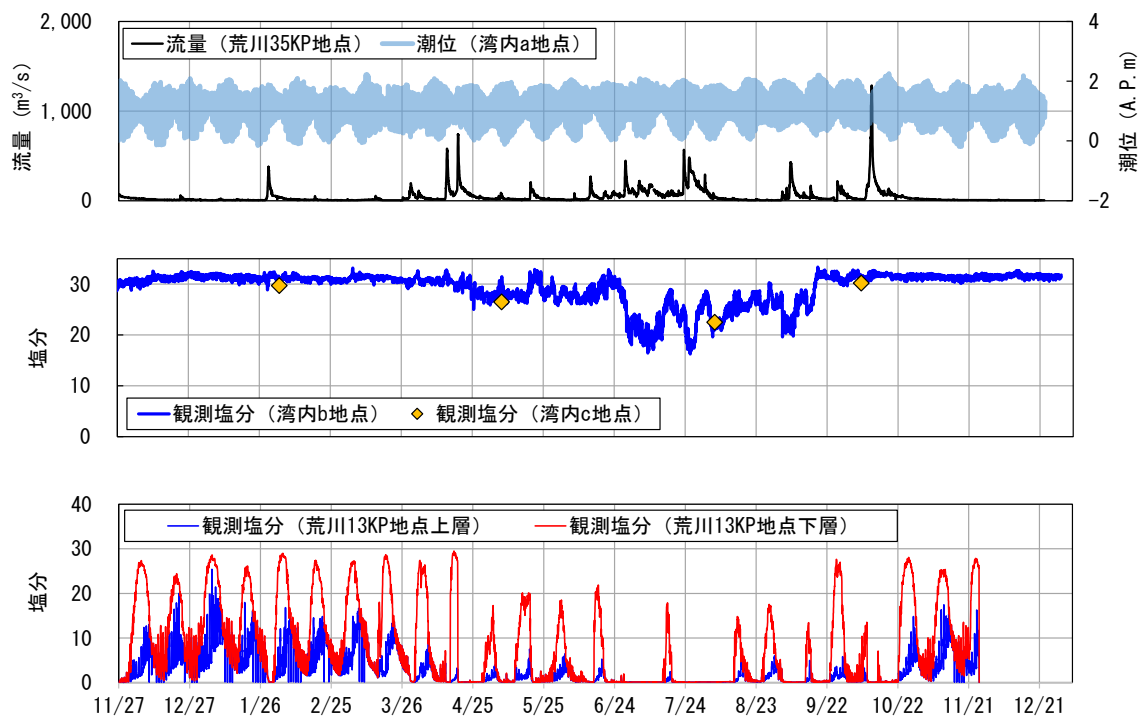


図 2-17 既存観測施設の観測データ

2-3-2 塩分と水位の連続観測

(1) 調査の目的

西新井観測所で観測されている塩分は、五反野ワンドでは観測されていない。また、五反野ワンドの塩分は低水路表層の水との交換により変動すると考えられるが、低水路河岸で塩分は観測されていない。

上記を踏まえ、本研究では、五反野ワンドにおける塩分の挙動を分析し、モデル化を行うため、五反野ワンド内とワンドに隣接する低水路河岸の塩分・水位の現地観測を目的とした。

(2) 調査方法

塩分と水位の連続観測の方法を以下に示した。

1) 調査地点

写真 2-6 に示す St.A と St.B の 2 箇所を調査地点とした。

2) 計測機器

写真 2-15 および写真 2-16 に示す自記式の塩分計（Onset 社製 U24-002-C）¹⁵⁾と水位計（Onset 社製 U20-001-01-TI）¹⁶⁾を用いた。塩分計と水位計の仕様をそれぞれ表 2-4 および表 2-5 に示す。データ記録のインターバルはともに 30 分とした。

なお、大気圧の観測には上記の水位計と同じ計測器を用いた。



写真 2-15 塩分計

表 2-4 塩分計の仕様¹⁵⁾

仕様	
型番	U24-002-C
電気伝導率センサー	
測定範囲	1,000～55,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
精度（校正範囲内）	Low Range：読値の 3%または 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Full Range：校正ポイントから±3,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の水域において読値
分解能	2 $\mu\text{S}/\text{cm}$
導電率校正温度範囲	5～35℃
温度センサー	
計測範囲	-2～36℃
精度	±0.1℃
分解能	0.01℃ (25℃)
応答速度	1 秒（水中）
共通仕様	
時間精度	±1 分/月（0～50℃）
電源	専用バッテリー内蔵（米国工場で交換可能）
電池寿命	約 3 年 ※1 分以上のインターバルで使用した場合の目安
記録容量（64k バイト）	1 レンジ/温度セットにて約 18,500 点 2 レンジ/温度セットにて約 11,800 点
耐圧深度	70m まで
インターバル	1 秒～18 時間（ユーザー設定）
寸法	31.8mm ϕ × 165mm 長, 6.3mm ϕ 取付穴
質量	193g
ソフトウェア	HOBOWare Pro
通信	USB ベースステーション BASE-U-4 ※ウォータープルーフシャトルでも可



写真 2-16 水位計

表 2-5 水位計の仕様¹⁶⁾

仕様	
型番	U20-001-01-TI
水位センサー（圧力センサー）	
計測範囲	9m
校正範囲	69～207kPa
破損圧	310kPa, 約 18m 深度
精度	±0.05%FS, 0.5cm
分解能	< 0.02kPa, 0.21cm 水位
温度センサー	
計測範囲	-20℃～50℃
精度	±0.44℃ (0～50℃)
分解能	0.1℃ (25℃)
応答速度	3.5 分 (水中)
共通仕様	
時間精度	±1 分/月 (0～50℃)
ハウジング	チタン（海水対応型=型番末尾 TI）
電源	専用バッテリー内蔵（米国工場で交換可能）
電池寿命	約 5 年 ※1 分以上のインターバルで使用した場合の目安
記録容量	不揮発性メモリ 64kB（圧力/温度セットにて約 21,700 点）
インターバル	1 秒～18 時間（ユーザー設定）
寸法	24.6mmφ × 150mm 長, 6.3mmφ 取付穴
質量	標準型：210g 海水対応型：140g
ソフトウェア	HOBOWare Pro
通信	USB ベースステーション BASE-U-4 ※ウォータープルーフシャトルでも可
NTS 校正証明書	標準付属

3) 観測期間

図 2-18 に現地観測の期間および計測項目を、荒川 35KP 地点（秋ヶ瀬取水堰）放流量、荒川 13KP 地点（西新井観測所）における水位とともに示す。図中には塩分計のセンサー部の設置標高も示している。各観測の方法は後述する。なお、自記式計器による水位と塩分観測は 2019 年 8 月 15 日に開始されたが、同年 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。その後データは順調に記録されたものの、St.A の塩分計は 4 月 8 日から 9 月 2 日まで、St.B の水位計は 4 月 8 日から 6 月 10 日まで計器の故障のためデータは欠測となっている。また、国土交通省荒川河川事務所により観測されている西新井観測所の塩分は、2020 年 11 月 25 日以降のデータは未回収のため得られていない。

データ回収と計器点検は概ね 1 か月ごととし、主に大潮の昼間の干潮時に行った。なお、図中には、後述する土壌塩分の現地計測の実施時期も併せて記載している。

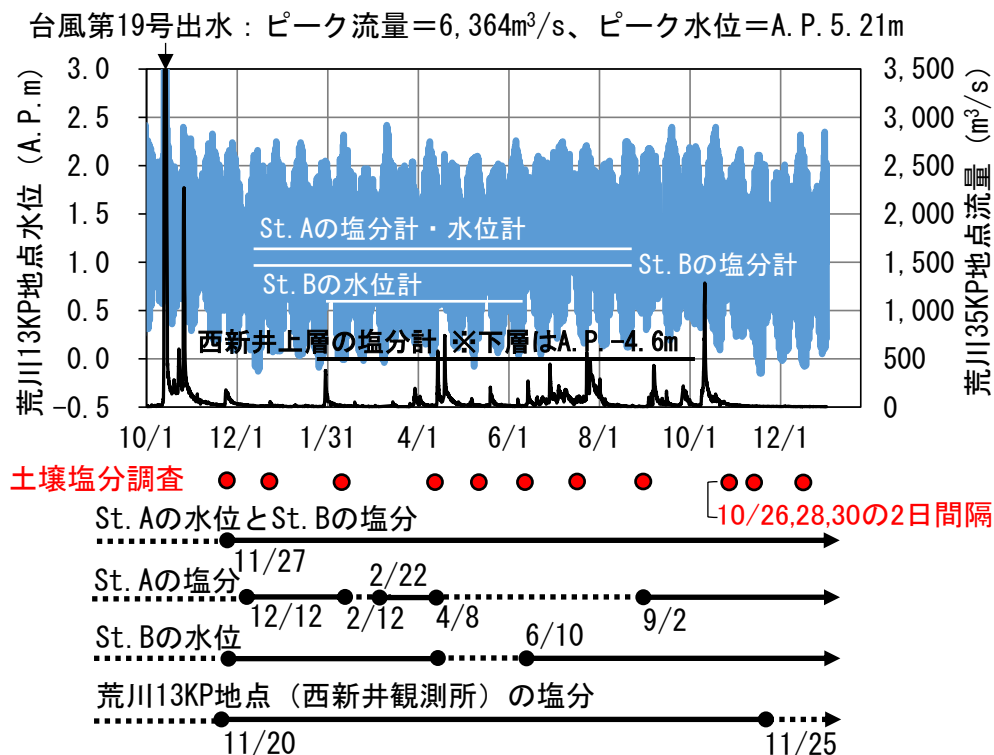


図 2-18 現地観測期間と水文状況

4) 機器設置方法

塩分および水位の各計測器の設置イメージを図 2-19 に、設置状況を写真 2-17 に示す（併せて大気圧計の設置状況を写真 2-18 に示す）。St.A(湿地内)では、図 2-19(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 2-19 (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。

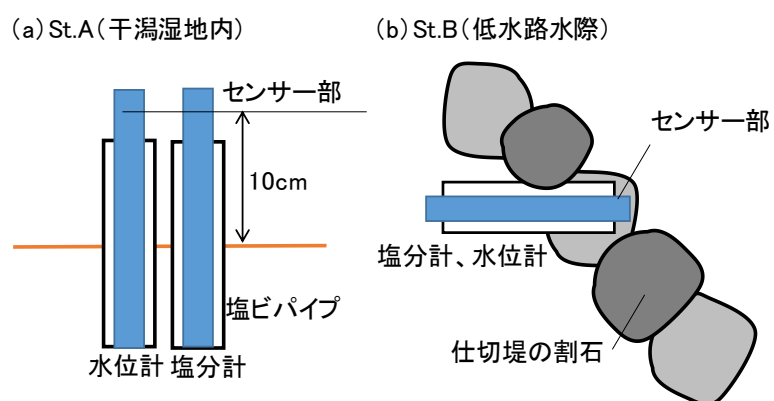


図 2-19 計測器の設置イメージ

St.A



写真 2-17(1) 計測器の設置状況

St.B



写真 2-17(2) 計測器の設置状況



写真 2-18 大気圧計の設置状況（下流側湿地に隣接する樹木に設置）

2-3-3 土壌塩分の現地計測

(1) 現地計測の目的

図 2-17 でみたように、西新井観測所（荒川 13KP 地点）の塩分は潮汐変動に伴い変動している。このため、五反野ワンドを出入りする水と塩分も変動することが推定される。そして、五反野ワンド内の湛水塩分の変動に伴い、土壌中間隙水の塩分も変動すると考えられる。しかしその実態はこれまで把握されていない。

上記を踏まえ、土壌の現地計測は、五反野ワンド内の土壌塩分の変動特性の分析とモデル化の際の検証データとして使用することを目的とした。

(2) 計測方法

土壌塩分の計測方法を以下に示した。

1) 計測地点

写真 2-6 に示す St.A を調査地点とした。

2) 計測機器

土壌塩分の現地計測には、写真 2-19 に示す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）¹⁷⁾を用いた。その仕様を表 2-6 に示す。



写真 2-19 土壌塩分計

本計測器は Bluetooth を搭載しており、現地にてリアルタイムで土壌塩分を確認できるほか、データはスマートフォンの専用ソフトに記録される。

表 2-6 土壌塩分計の仕様¹⁷⁾

仕様	
電池	充電式ニッケル水素バッテリー 3.6V/300mAh
ワイヤレスプロトコル	Bluetooth
温度	−10～55℃（オプション−30～55℃），精度：±0.1℃
動作温度	−10℃～+65℃
サイズ	ポール部（持ち手）：70～153cm 可変，トップ部：Φ7.5cm 本体部は，胴部を含めて長さ 20cm
水分	範囲：完全乾燥から完全飽和まで（飽和の 0% から 100%まで） 精度：ほとんどの土壌で±0.01WFV，微細な質感土壌では最大 ±0.03
バルク導電率	範囲：0～1.5S/m ±2.0%または，0.02S/m のいずれか大きい値
実誘電率（絶縁）	範囲：1～80，1＝空気，80＝蒸留水
温度	範囲：−10℃～+60℃ 精度：±0.3℃

3) 試料採取

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 2-20 に示す方法で 10cm ほど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引き抜いた後，塩ビ管より径が若干小さな棒を頭部より挿入し，試料を露出させた．そして，数 cm 露出した土壌サンプル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．

土壌試料の採取状況を写真 2-20 に，土壌塩分の計測状況を写真 2-21 に示す．

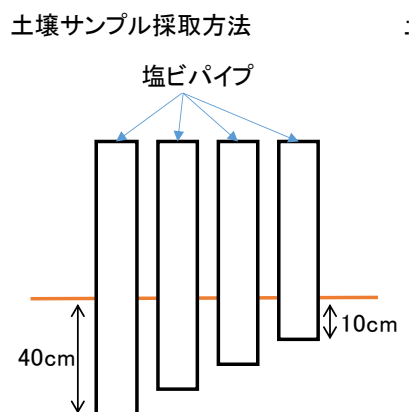


図 2-20 土壌塩分の計測方法



写真 2-20 土壌試料の採取状況



写真 2-21 土壌塩分の計測状況

4) 現地計測の実施

土壌塩分の現地計測は、表 2-7 に示す五反野ワンドの土壌が露出する干潮時に合計 13 回実施し、実施間隔は概ね 1 ヶ月から 1.5 ヶ月で実施した。ただし、No.9～11 の計測では、土壌塩分の短期的な変動を把握するため 2 日おきに実施した。

表 2-7 土壌塩分の現地計測の実施時期

No.	年月日	時刻
1	2019/11/27	10:30～11:00
2	2019/12/24	9:30～10:00
3	2020/2/12	11:00～11:30
4	2020/4/8	10:30～11:00
5	2020/5/11	11:30～12:00
6	2020/6/10	13:30～14:00
7	2020/7/22	11:00～11:30
8	2020/9/2	10:00～10:30
9	2020/10/26	8:00～8:30
10	2020/10/28	9:30～10:00
11	2020/10/30	9:30～10:00
12	2020/11/12	11:30～12:00
13	2020/12/17	10:30～11:00

5) 電気伝導度の換算

本研究で使用した土壤塩分計の出力は、土壤粒径や密度の影響を受けるので、1:5 水浸出法¹⁸⁾の値に換算するための予備試験を行った。予備試験の概要を以下に示す。

a) 調査時期

予備試験のための試料採取は、2019 年 8 月 29 日に行った。

b) 試料採取

土壤塩分計の出力値と 1:5 水浸出法の値の関係（更生曲線）を作成するためには、電気伝導度が異なる複数の試料が必要となる。このため試料採取は、写真 2-6 に示した五反野ワンド内の St.A と遊歩道の上流側の窪地の 2 か所で、それぞれ表層から 8cm までの試料を採取した。

c) 調査結果

上記の方法で得られた更生曲線を図 2-21 に示す。

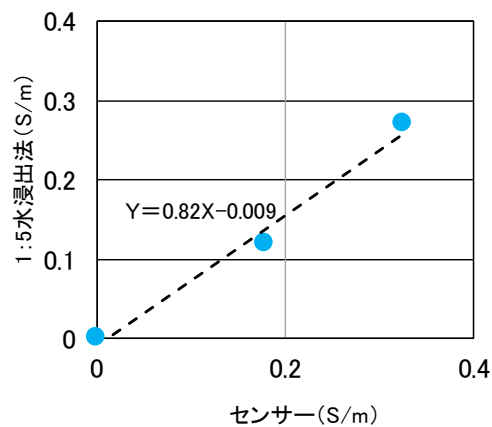


図 2-21 土壤塩分計と 1:5 水浸出法との比較（電気伝導度）

また，予備試験で採取した同じ試料の 1:5 水浸出法から得られた電気伝導度と塩分の関係を図 2-22 に示す．これにより，土壌塩分計の電気伝導の出力値から塩分に換算できる．

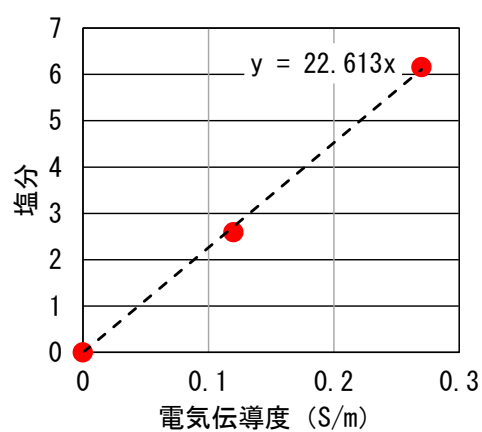


図 2-22 1:5 水浸出法から得られた電気伝導度と塩分の関係

2-3-4 簡易透水試験

(1) 試験の目的

写真 2-14 からわかるように、湿地表面は、カニの巣穴やゴカイの通過痕が存在することから、五反野ワンドの湛水は穴から速やかに浸透することが予想される。

この理由として考えられる生物由来の穴の鉛直分布を調べるため、湿地内土壌の地表から 10cm ピッチで採取した土壌の断面を写真 2-22 に示す。地表には最大 2mm 程度の穴が多数存在し、10cm 以深では急減するが、8 個、4 個、1 個、3 個の穴を目視にて確認した。最深部の 40cm でもゴカイ類が確認された。カニ類の巣穴は写真 2-22 右下の写真に示したように、20cm の深さでは水平方向に伸びていることを確認した。同じカニ穴の拡大写真を写真 2-23 に、土壌表層の様子と塩ビで試料を採取した際の土壌側面の様子を次ページの写真 2-24 に示す。土壌側面においてもゴカイの通過痕とみられる穴がみられる。

しかしながら、土壌塩分の鉛直方向の変動特性は不明である。そこで本節では、五反野ワンド内の土壌を対象に簡易的な透水試験を実施し、湛水の浸透性能を把握することを目的とした。

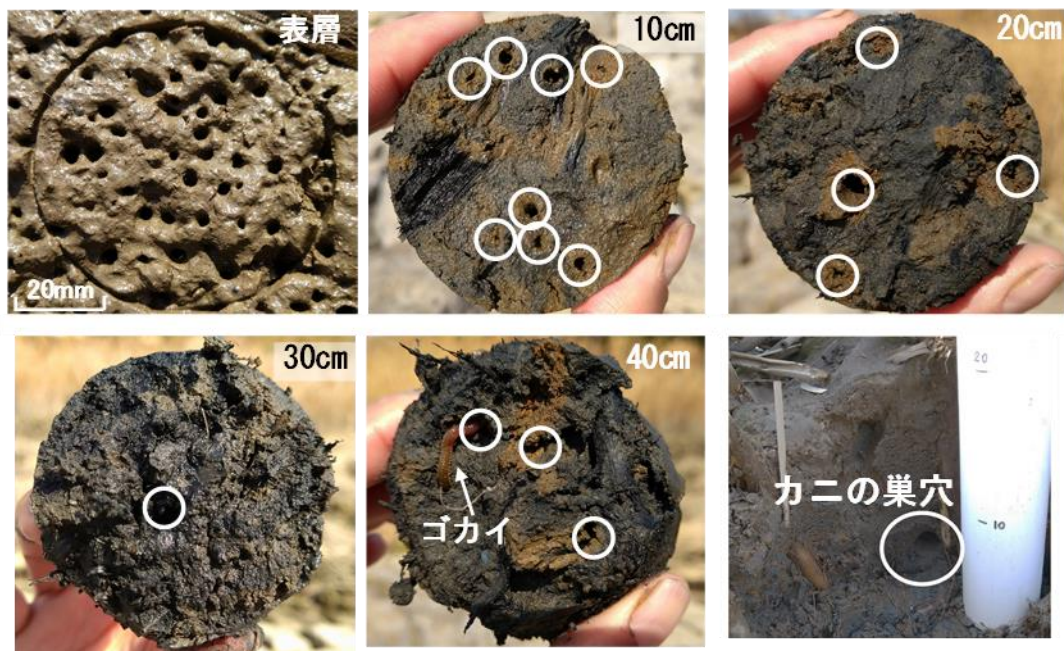


写真 2-22 ゴカイ類の通過痕およびカニの巣穴



写真 2-23 カニの巣穴（写真 2-22 右下のカニ穴を拡大）


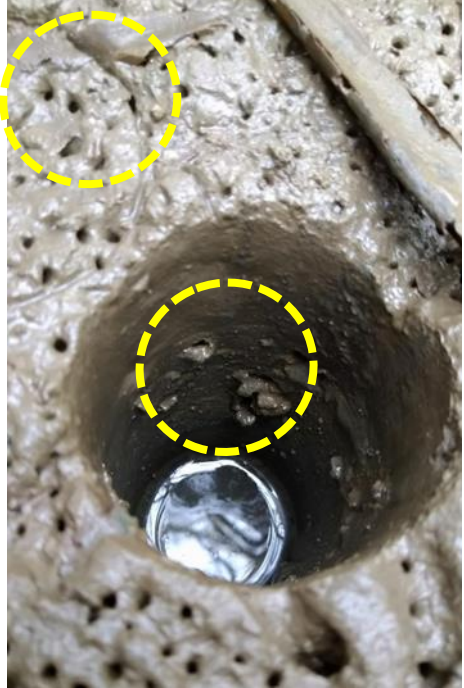
土壌表層	ゴカイの通過痕
 <p>カニの巣穴(白丸)の周辺に小さな穴(黄丸)が多数あいている</p>	 <p>小さな穴は、塩ビでの試料採取後の断面にもあいている</p>

写真 2-24 土壌表層と試料採取後の土壌側面のようす

(2) 調査方法

簡易透水試験の方法を以下に示した。

1) 使用する機材

簡易透水試験にあたっては、図 2-23 に示すような装置を作成した。目盛り付きのパイプはアクリル製であり、土壌試料から浸透した水の逃げ場を設けるため、急須用の金網を下に設置した。試料は湿地内の St.A で表層（0～8cm）、中層（16～24cm）、下層（32～40cm）別に塩ビパイプを貫入し、みださずに採取した。

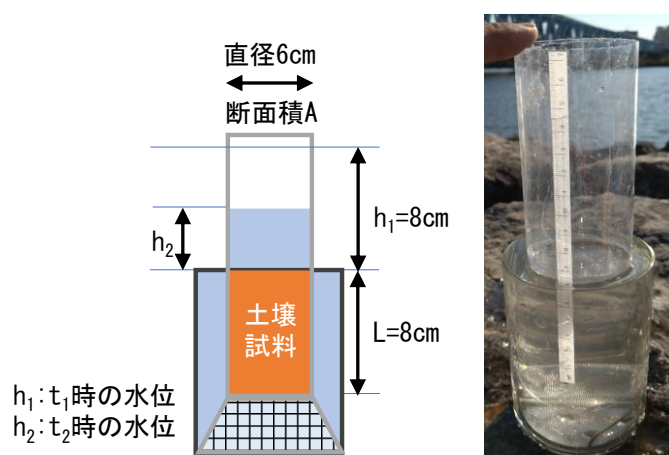


図 2-23 簡易透水試験の模式図および作成した装置

2) 試験項目

試験項目は変水位法による透水係数¹⁹⁾とした。ただし、生物由来の穴の有無による透水係数の差を把握するため、それぞれの透水係数を求めた。

3) 試料採取

試料採取は、みださない試料とみだした試料を対象に表 2-8 に示す内容で行った。

表 2-8 簡易透水試験の試料採取の概要

	採取日時	試料数
みださない試料	2021/2/13 11:00～12:00	3 ^{※1}
みだした試料	2021/2/28 11:00～12:00	1 ^{※2}

※1：表層～8cm の表層，16～24cm の中層，32～40cm の下層から採取した。

※2：表層～8cm を採取した。

みださない試料は、塩ビパイプを所定の深度まで貫入し、みださずに抜き取り、図 2-23 に示したアクリル製の試験パイプを貫入し採取した。みだした試料は、写真 2-25 に示すように、試料をバケツにいったん移し、これを手で1分程度こねることにより生物由来の穴をなくしたあと、アクリル製のパイプを貫入し、試料を採取した。

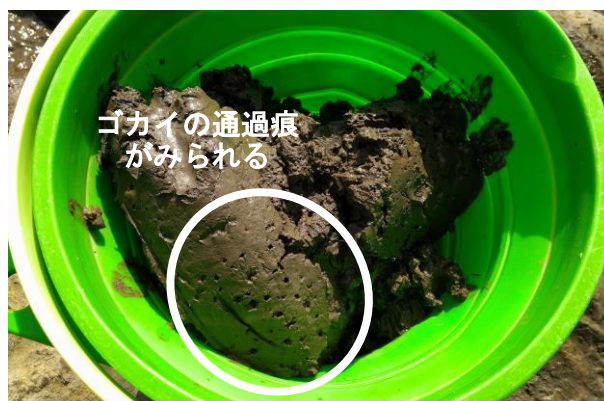


写真 2-25 みだした試料の採取状況

4) 試験時期

試験は、みださない試料とみだした試料を対象に表 2-9 に示す期間で実施した。

表 2-9 簡易透水試験の実施期間

No.	実施期間	実施場所
みださない試料	2021/2/13 11:00～同日 16:00	現地
みだした試料	2021/2/28 18:00～同年 3/3 10:00	屋内

5) 簡易透水試験の実施

簡易透水試験は、図 2-23 に示した $h_1=8\text{cm}$ を初期水位として、その後の水位低下量を記録した。初期水位までの注水は、まず、外側の透明プラスチック容器に水を満たした後に、透明アクリルパイプの水位が初期水位になるよう注水した。

簡易透水試験の実施状況の例として、みだした試料のものを写真 2-26 に示す。

なお、みだした試料の水低下速度は極めて遅く、現地での日中内での実施ができなかったため、試料を持ち帰り室内にて行った。また、試験実施中の水の蒸発の影響が考えられたため、写真中のようにプラスチック（写真中の黒いもの）で蓋をした。

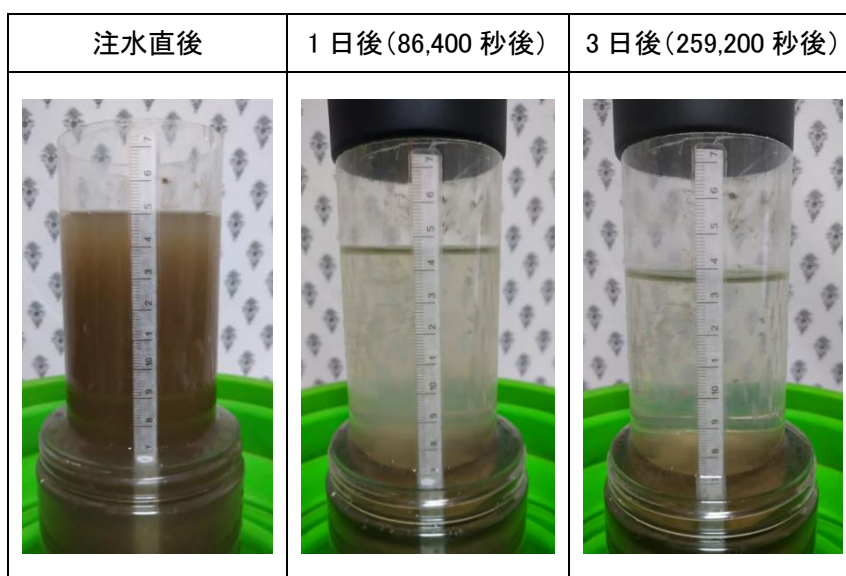


写真 2-26 簡易透水試験の実施状況

6) 透水係数の算定

透水係数は、以下に示す式¹⁹⁾により算定した。

$$k = \frac{L}{(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} = \frac{2.303L}{(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (2-1)$$

ここに、 k ：透水係数(cm/s)、 t_1 ：初期水位時の経過時間（ゼロ）(s)、 t_2 ：初期水位からの経過時間(s)、 h_1 ：初期水位(cm)、 h_2 ： t_2 時の水位(cm)である。

2-4 結語

第2章では、研究対象河川の荒川の流域および河道の概要を述べたうえで、研究対象とする五反野ワンドの概要を整理した。また、五反野ワンドの約1km上流で国土交通省荒川下流河川事務所により得られている西新井観測所の観測塩分を示し、その塩分は東京湾の潮位変動に伴い周期的に変動することと、上層塩分は下層塩分に比べ低く鉛直分布を有することを確認した。一方、出水期（4月下旬から10月上旬）の塩分は、下層と上層ともに非出水期に比べ低い期間が継続し、傾向が異なることを示した。このため、低水路河岸に位置する五反野ワンドへの塩分は、潮汐に伴う変動に加え、季節的な変化を有することが予想された。

上記を踏まえ、五反野ワンド内の土壌塩分の変化特性の実態の把握とその推定モデルの開発のために、本研究では、以下の現地観測を行った。

- ・ 湛水塩分の変化特性の把握のための「湛水塩分の連続観測」
- ・ 土壌塩分の変化特性の把握のための「土壌塩分の現地計測」
- ・ 湛水の浸透性能の把握のための「簡易透水試験」

【参考文献】

- 1) 国土交通省河川局：荒川水系河川整備基本方針 荒川水系の流域および河川の概要，2007.3.
- 2) 国土交通省関東地方整備局：荒川水系河川整備計画【大臣管理区間】（変更），2016.3.（2020年9月変更）
- 3) 国土交通省関東地方整備局：荒川の現状と課題，2015.3.
- 4) 東京都建設局：東部低地帯の河川施設整備計画，2012.12.
- 5) 気象庁HP：過去の気象データ検索
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>（参照：2021/6/14）
- 6) 独立行政法人水資源機構：利根導水路概要書，2021.3.
- 7) 荒川の将来を考える協議会：荒川将来像計画2010，2012.4.
- 8) 東京都港湾局：平成31年東京港24時間潮位表，2019.1.
- 9) 国土交通省荒川上流河川事務所HP：<https://www.ktr.mlit.go.jp/arage/arage00201.html>
（参照：2021/6/14）
- 10) 国土地理院HP：空中写真
<https://www.gsi.go.jp/CHIRIKYOUIKU/syasin.html>（参照：2021/6/7）
- 11) 国土交通省荒川上流河川事務所：秋ヶ瀬堰取水量・下流放流量，
<https://www.ktr.mlit.go.jp/arajo/i/kouiki/history/oakg-out.htm>（24時間分のデータを毎日ダウンロードして使用）
- 12) 気象庁HP：潮位表 東京(TOKYO)東京都中央区晴海5丁目
<http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/suisan.php>
- 13) 東京湾環境情報センター：東京湾水質連続観測
<https://www.tbeic.go.jp/MonitoringPost/Top>
- 14) 第三管区海上保安本部：東京湾環境保全調査
https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN3/kaisyo/tokyo_kankyo/tokyo_menu.htm
- 15) onset社 HOB0 U24-002-C,
<https://pdf.agriexpo.online/ja/pdf-en/onset/catalogs>（参照：2021/5/27）
- 16) onset社 HOB0 U20,
<https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u20-001-01/>（参照：2021/5/27）

- 17) メイワフォーシス社 HydraGO,
http://www.meiwafosis.com/products/soilmoisture/soilmoisture_hydrago_shiyo.html
(参照：2021/5/27)
- 18) 農林水産省：土壌分析法，2015.3.
- 19) 日本規格協会：JIS 土の透水試験方法 JIS A 1218, 2020.3.25改正

第3章 低水路表層塩分のモデル化

3-1 緒言

3-1-1 本章の目的

第3章では、河岸湿地に流入する河川表層水の塩分推定モデルの開発を目的とする。まず、既存の観測施設と五反野ワンドが位置する低水路表層の塩分データから、荒川の塩分遡上特性を把握する。

そして、半年間や1年間オーダーの長期の計算を可能とするため、三次元や鉛直二次元の高次のモデルではなく、簡単な一階の微分方程式で表現される半経験的なモデルの開発を行う。

3-1-2 既往の研究と課題

第1章で確認したとおり、塩水遡上を評価するモデルとしては、三次元や鉛直二次元の高次のモデルが適用されることが多い^{1)~3)}。また、これらのモデルは、塩水遡上の到達距離を予測・評価することを目的に、主に河床沿いの塩水さくびの到達距離に着目しており、低水路表層の挙動に着目した事例はほとんどない。また、検討対象期間は数日から一ヶ月オーダーである^{1章の24)~32)}。今日、計算機の性能の向上は目覚ましいものがあるが、半年や通年の計算には現状でも計算機への負荷が大きく、計算時間は長くなり、実用面で課題があると考えられる。仮に、計算機器の高速化によりこの問題が解決したとしても、高次のモデルでは、長期の観測データに基づく乱流混合定数の同定や河口部の境界条件の適切な設定に相当の労力を要すると思われる。

一方、湿地の自然環境の創出を考えたとき、そこに生息・生育する生物にとっては、塩分の時間変動に加え、季節変動を含めて検討を行う必要がある。

第3章では、外力条件として、河道流量と東京湾潮位、および東京湾の塩分のみを用いた一階の微分方程式で表現される低水路表層塩分推定モデルを開発し、出水期を含む年間の低水路表層の塩分変動を再現できることを示す。

3-1-3 検討フロー

第3章の検討フローを図 3-1 に示す。「3-2 塩水遡上の特徴把握」では、第2章で整理した「2-3-1 既存観測施設の観測データ整理」および本研究で実施した「2-3-2 塩分と水位の連続観測」の結果を踏まえ小潮時，中潮時，大潮時の低水路表層塩分の変動傾向を把握した。

この結果を踏まえ、「3-3 低水路表層塩分のモデル化」では、荒川 35KP 地点の河道流量と東京湾（湾内 a 地点）の潮位を入力条件とした一階の微分方程式で構成される半経験モデルを開発し、低水路表層塩分の通年の検証を行った。

この結果、出水期の再現性が不十分であったことから、「3-4 東京湾を含めたモデルの改良」では、東京湾塩分（湾内 b 地点）の観測塩分を考慮してモデルの改良を行い、通年の再現性を確保した。

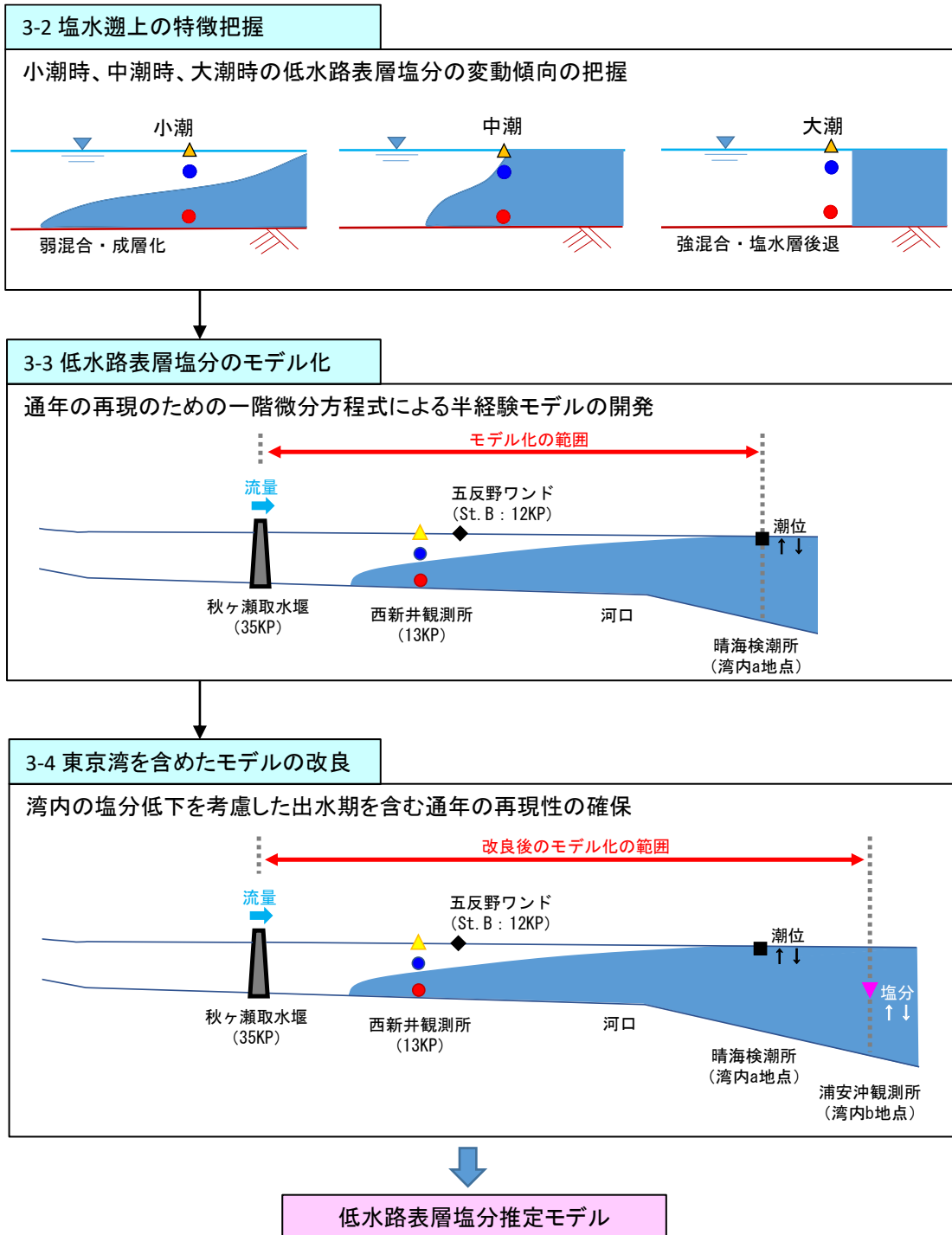


図 3-1 検討フロー

3-2 塩水遡上の特徴把握

図 3-2 の上段に荒川 35KP 地点（秋ヶ瀬取水堰）流量と湾内 a 地点（晴海観測所）潮位、下段に荒川 13KP 地点（西新井観測所）と荒川 12KP 地点（St.B）の観測塩分を示す。

これより、まず年間の傾向を見ると、塩分変動は周期性を有し、湾内 a 地点の潮汐変動と対応している。また、St.B は図 2-14 に示したように低水路河岸に位置し、荒川 13KP 地点の上層より標高が高いため塩分は低い。逆に、河床付近に位置する荒川 13KP 地点の下層の塩分は、海水に近い 30 程度に達することがある。ただし、4 月下旬から 10 月上旬の期間はその他の期間に比べ塩分が低下傾向となっている。この時期の荒川 35KP 地点流量をみると、出水が連続する期間でありこれが影響している可能性が考えられる。また、同時期に湾内 b 地点（浦安沖）の塩分も低下傾向にあることから、この影響の可能性が考えられる。

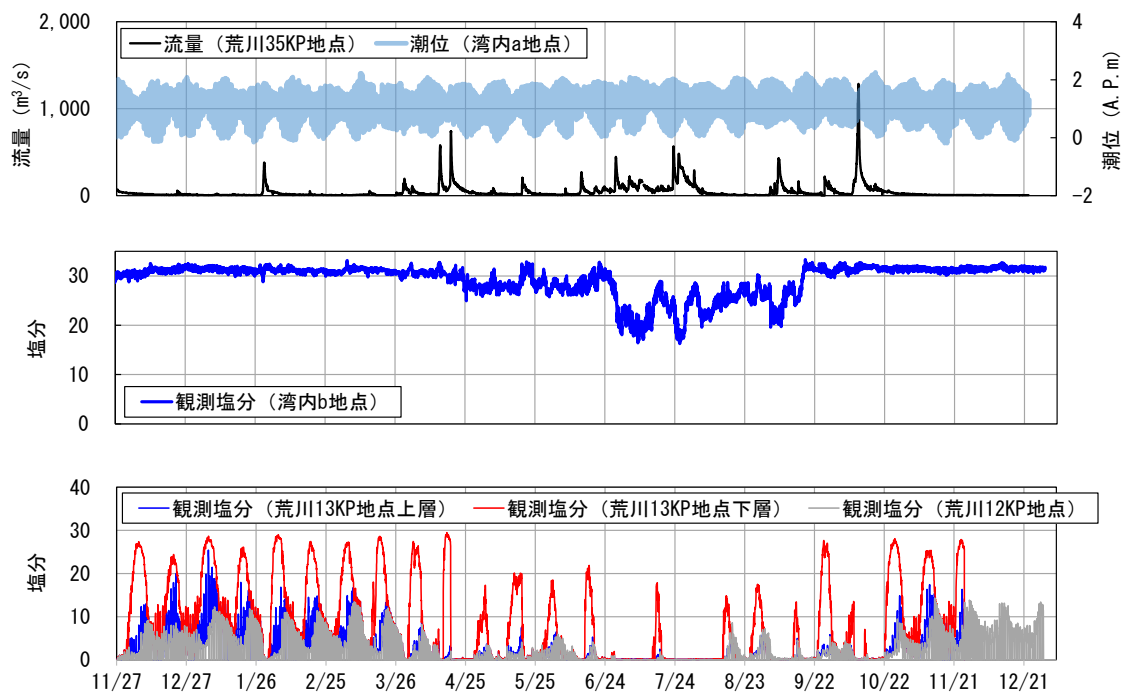


図 3-2 観測データ（2019 年 11 月 27 日～2020 年 12 月 29 日）

上記の通り，年間の塩分変動は出水や東京湾塩分の影響を受けている可能性がある．
 このため，まず，荒川 35KP 地点（秋ヶ瀬取水堰）流量が少なく，かつ湾内 b 地点（東京湾塩分）が安定している冬季を対象に塩分の変動特性を考察した．2020 年 2 月 11 日から同年 3 月 15 日の観測データを図 3-3 に示す．これより，小潮時，中潮時，大潮時に以下の挙動を示すことがわかる．

- ・低水路の塩分は，小潮時には潮汐振幅の低下に伴い成層化が促進されるので，下層塩分は上昇し，表層塩分は低下する．
- ・中潮時には鉛直混合が活発になるので両者の差が縮まり，大潮時には強混合となるので両者はほぼ一致する．
- ・強混合になると河口からの塩水侵入長が減少するので，当該地点の塩分は減少する．

荒川下流における上記の塩分変動傾向は，既往の研究^{4),5)}で得られていた知見と一致している．小潮時，中潮時，大潮時の塩分変動特性を模式化すると図 3-4 の通りとなり，我が国の一般的な河川下流部の典型的な挙動⁶⁾を示している．

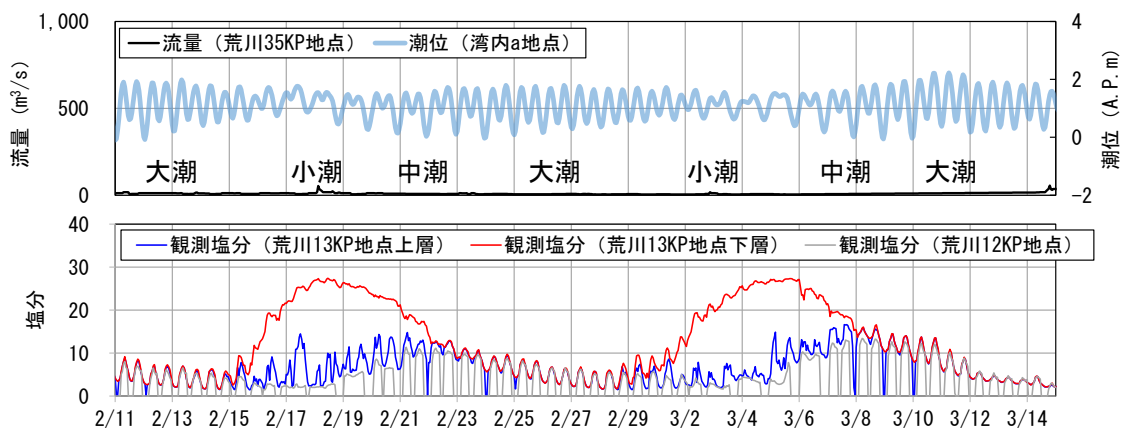


図 3-3 2020 年 2 月 11 日～同年 3 月 15 日の観測データ

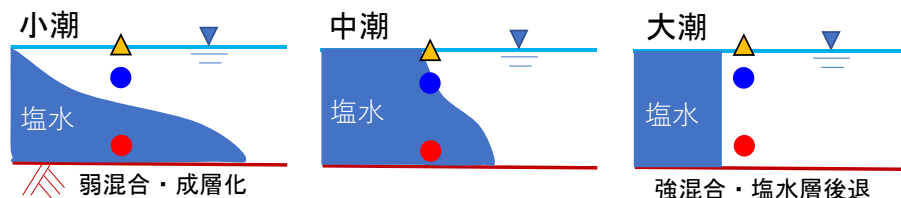


図 3-4 潮汐に伴う塩分の変化特性

次に、冬季のうち、一山波形の出水（1月29日）が1回発生した2020年1月12日から同年2月11日の観測データを図3-5に示す。これより、出水があった1月29日から2月1日の塩分は、全層でほぼゼロとなっていることがわかる。しかし、2月1日以降は、出水前と同様の水準に回復している。

このことより、1出水の影響は、出水中の短期に限定されていると考えられる。

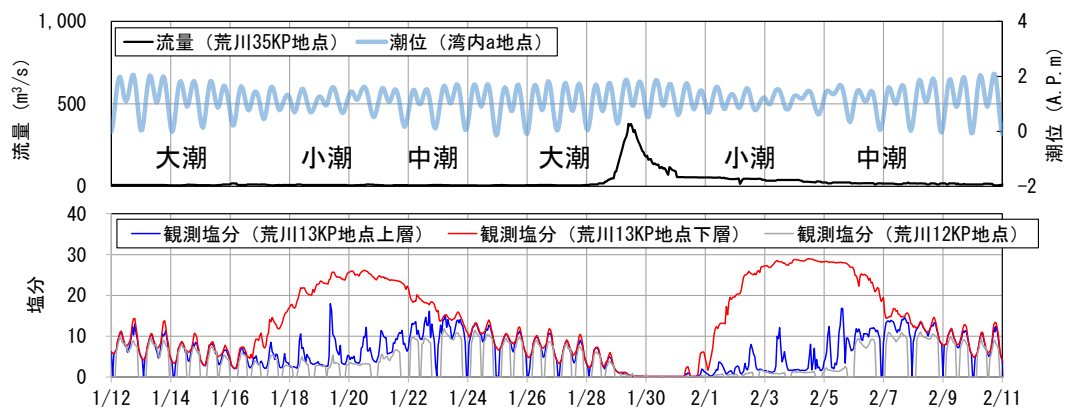


図 3-5 2020 年 1 月 12 日～同年 2 月 11 日の観測データ

3-3 低水路表層塩分のモデル化

3-3-1 モデル設計の基本方針

前節でみた通り，低水路塩分の挙動は，潮汐のほか河道流量と塩分の供給源となる海域の塩分の影響を受けている可能性がある．

そこで本節では，低水路表層塩分のモデル化の第一段階として，河道流量と海域の塩分が安定している冬季（2020 年 2 月 11 日～同年 3 月 15 日）を対象とすることとした．そして，五反野ワンドの近傍に位置する荒川 13KP 地点（西新井観測所）で得られている上下層塩分の記録をもとに，物理的考察に基づき簡易な塩分推定モデルを構築した．

3-3-2 荒川 13KP 地点の塩分データの特性と解析指標の設定

「3-2 塩水遡上の特徴把握」で述べた小潮時、中潮時、大潮時の塩分の変動特性を踏まえ、図 3-6 に示すように、小潮時の塩分成層化を表す指標として「下層と表層の塩分差 (ΔS)」、強混合に伴う塩水層後退の指標として「下層と表層塩分の平均値 ($S_{av.}$)」を設けた。

ここで、図 3-6 中の S_l は低水路表層塩分を示しており、荒川 13KP 地点（西新井観測所）の下層塩分と上層塩分およびそれらの直線外挿により求めた表層塩分を図 3-7 上段に、下段に湾内 a 地点（晴海検潮所）の時系列を示す。

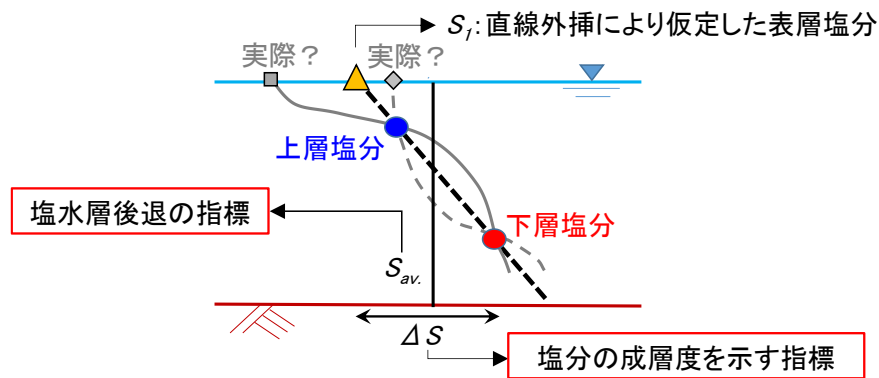


図 3-6 塩分推定モデルの概念図

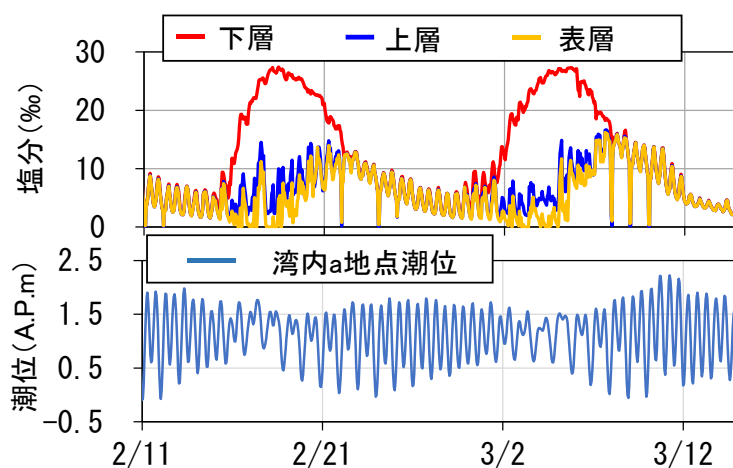


図 3-7 荒川 13KP 地点の塩分および湾内 a 地点の時系列変化

3-3-3 流速振幅 ΔU_d に対する ΔS および S_{av} の応答

(1) 流速振幅 ΔU_d の算定方法

図 3-6 では、下層および上層のふたつの観測値から直線分布を仮定しているが、実際の成層状態は必ずしも直線ではない。特に成層化が顕著になる小潮時には S_I と S_{av} の推定誤差が増加する恐れがある。しかし現状では、観測データの制約によりやむを得ない。

次に、潮位変動の影響を表す指標として、湾内 a 地点（晴海観測所）潮位と荒川 35KP 地点（秋ヶ瀬取水堰）流量をもとにした平均流速 U に着目した。 U は潮汐に合わせて変動するので、図 3-8 に示す zero-down-cross 法⁷⁾により各潮汐の値 ΔU_d を潮汐振幅として求めることができる。また ΔS と S_{av} も変動するので、 U がゼロ点をクロスする時刻の ΔS と S_{av} を ΔU_d に対応する値とした。

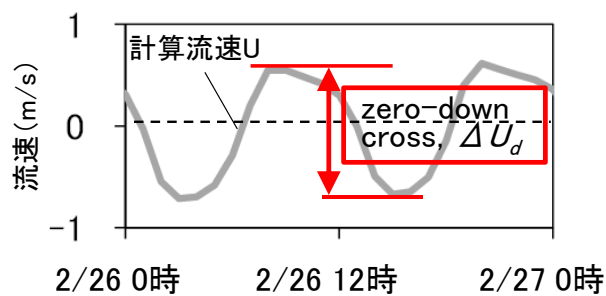


図 3-8 流速振幅 (ΔU_d) の算定方法

荒川 13KP 地点（西新井観測所）の平均流速 U の観測データはないため、一次元不定流計算により求めることとした。一次元不定流計算モデルの構築範囲を図 3-9 に、モデルの検証条件を表 3-1 に示す。



表 3-1 一次元不定流計算の計算条件

項目		内容	備考
モデル	モデル	一次元不定流計算モデル	
	対象区間	東京湾沖 (-7.5KP) から秋ヶ瀬取水堰 (35.0KP) 地点まで (汽水区間)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 図 3-9 参照 ・ -7.5KP～0.0KP までは本研究で延伸
	計算間隔	-7.5KP～22.0KP : 250m ピッチ 22.2KP～35.0KP : 200m ピッチ	
	地形条件	平成 26 年度横断測量結果	国土交通省荒川下流河川事務所提供
	粗度係数	0.016	トライアルにて設定
	計算期間	2020/1/1 0 : 00～2020/12/29 0 : 00	
境界	上流端	荒川 35KP 地点 (秋ヶ瀬取水堰) 流量 ⁸⁾	1 時間ピッチ
	下流端	湾内 a 地点 (晴海検潮所) 潮位 ⁹⁾	1 時間ピッチ

荒川 13KP 地点（西新井観測所）における一次元不定流計算モデルの検証結果を図 3-10 に示す。検証期間中の水位変動の再現性を確認するため、10 日ごとに整理している。これより、計算水位は、小潮時、中潮時、大潮時を通して、観測水位を良好に再現できている。

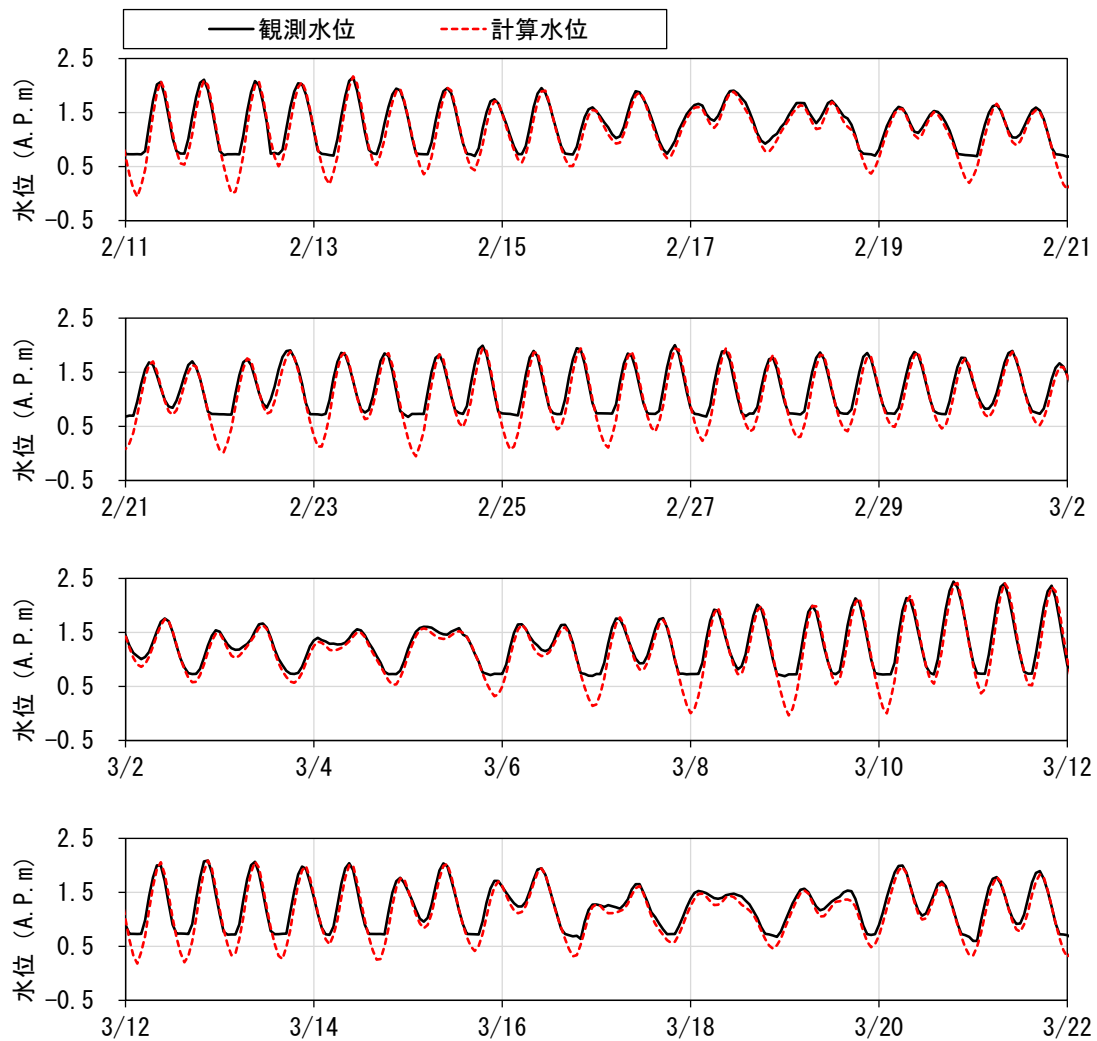


図 3-10 一次元不定流計算モデルの再現結果

図 3-10 に示した一次元不定流計算モデルの検証結果から得られる計算流速 U 、および U から算定した流速振幅 ΔU_d を整理したものを図 3-11 に示す。

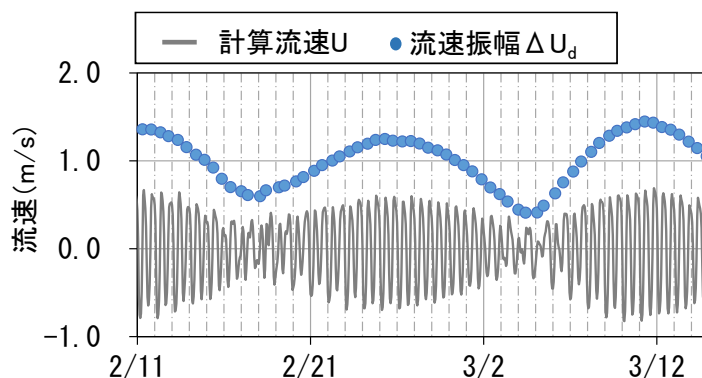


図 3-11 計算流速 U と流速振幅 ΔU_d

(3) ΔU_d に対する ΔS および $S_{av.}$ の応答

ΔU_d と同様に、 ΔS と $S_{av.}$ も潮汐振幅に伴い変動するので、 U がゼロ点をクロスする時刻の ΔS と $S_{av.}$ を ΔU_d に対応する値として求めた。その結果を図 3-12 に示す。 ΔS と $S_{av.}$ は予想通り ΔU_d と概ね負の相関を持ち、特に $S_{av.}$ の最大値は ΔU_d に対して数日遅れて応答することがわかる。

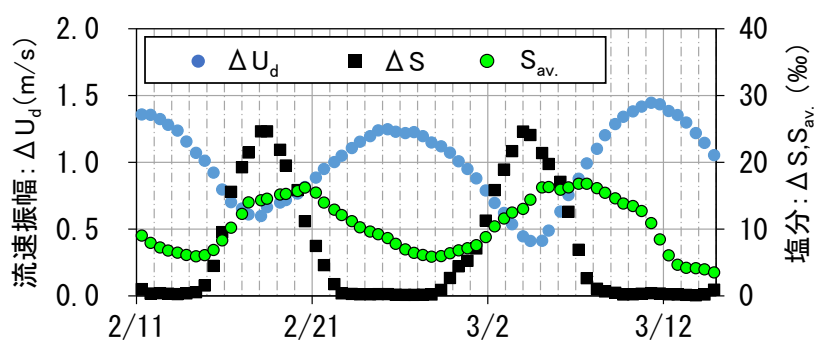


図 3-12 ΔU_d と ΔS および $S_{av.}$ の関係

3-3-4 ΔS および $S_{av.}$ のモデル化

ΔS と $S_{av.}$ の ΔU_d に対する遅れの性質を調べるために、遅れ時間を種々設定して相関図を描いた結果を図 3-13 と図 3-14 に示す。各図の(a)は単純相関で、上昇期と下降期で色分けしている。(b)は ΔS と ΔU_d 、および $S_{av.}$ と ΔU_d が直線となるように時差を逐次変化させて求めた結果であり、 ΔS について 3 時間、 $S_{av.}$ について 47 時間の遅れ時間を与えた。この相関図は、直線近似式により式(3-1)、(3-2)のように表すことができる。 $S_{av.}$ の遅れ時間が 47 時間となる理由は、潮汐に伴う塩水の前進と後退を繰り返しながら塩水遡上が徐々に進行するためと考えられる。

$$\Delta S + A_1 \Delta U_d - B_1 = 0 \quad (3-1)$$

$$S_{av.} + A_2 \Delta U_d - B_2 = 0 \quad (3-2)$$

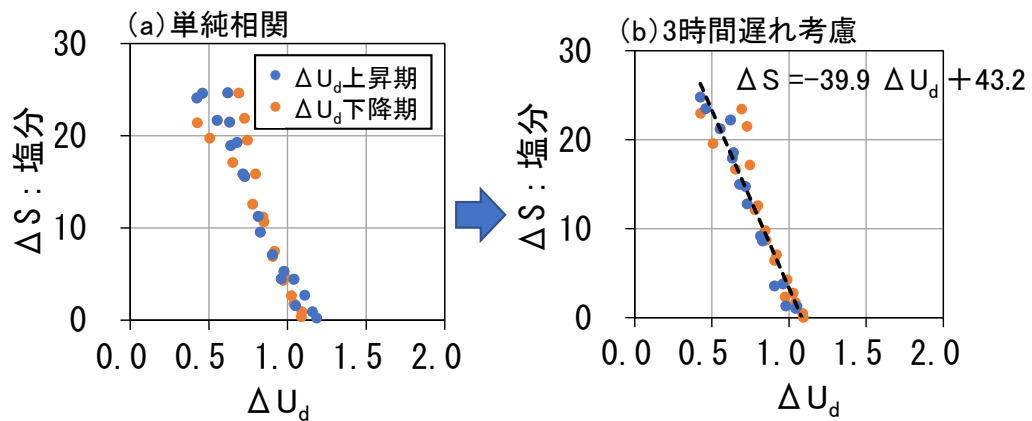


図 3-13 ΔU_d と ΔS の相関

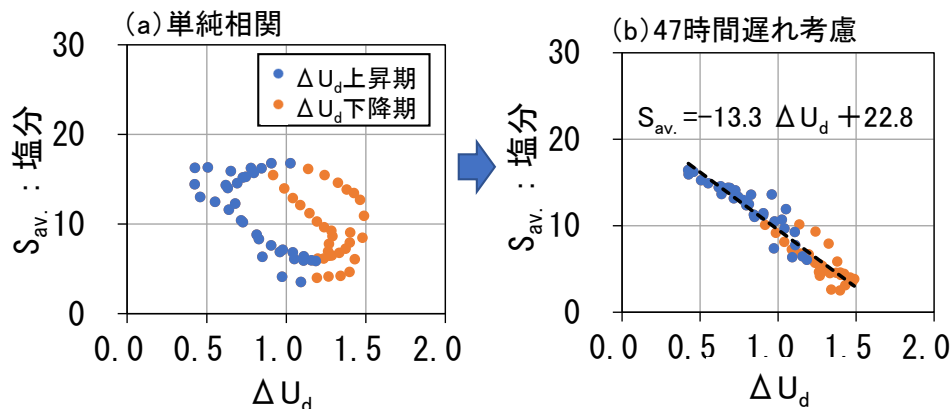


図 3-14 ΔU_d と $S_{av.}$ の相関

3-3-5 ΔS および S_{av} の再現

(1) 一階の微分方程式の導入

ΔS と S_{av} は ΔU_d に対し時間遅れを有し追随するため、その挙動を式(3-3)の式形で表現することができる¹⁰⁾。ここで、 Y は目的変数で、 X は説明変数、および α は時間遅れを規定する時定数である。この式形の性質を見るため、説明変数 X として、sin 波形、三角波形、矩形波形の 3 パターンの波形を対象に α をパラメータとして、 Y の追随の様子をグラフ化すると図 3-15 の通りとなる。

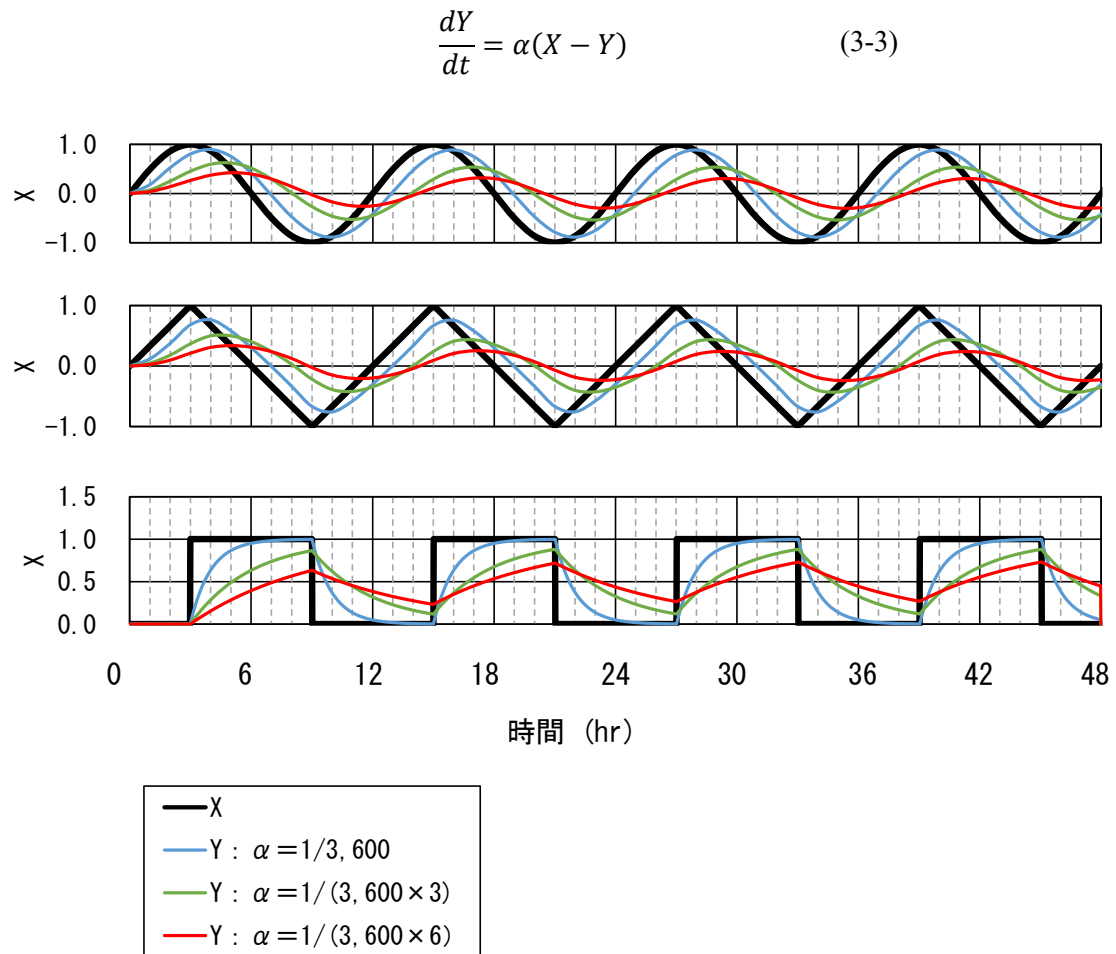


図 3-15 時定数 α の感度分析結果

(2) 流速振幅 ΔU_d に対する ΔS および $S_{av.}$ のモデル化

式(3-1), (3-2)において, A_1 と B_1 , および A_2 と B_2 は定数であり, $A_1 = -39.9, B_1 = 43.2$, $A_2 = -13.3, B_2 = 22.8$ である. (1)を踏まえ, 平衡状態を表す式(3-1)および式(3-2)を次式のように表現することができる.

$$\frac{d}{dt}\{\Delta S(t)\} = a_1(\Delta S + A_1\Delta U_d - B_1) \quad (3-4)$$

$$\frac{d}{dt}\{S_{av.}(t)\} = a_2(S_{av.} + A_2\Delta U_d - B_2) \quad (3-5)$$

3-3-6 荒川 13KP 地点の ΔS および $S_{av.}$ の再現結果

α_1 と α_2 は遅れの程度を表す時定数で, ΔS と $S_{av.}$ の遅れ時間 (3 時間と 47 時間) の逆数を与え, 9.0×10^{-5} , 6.0×10^{-6} とした (小数点以下は切り捨て). 式(3-4), (3-5)を数値積分して得られた ΔS と $S_{av.}$ の再現性を図 3-16 に示す.

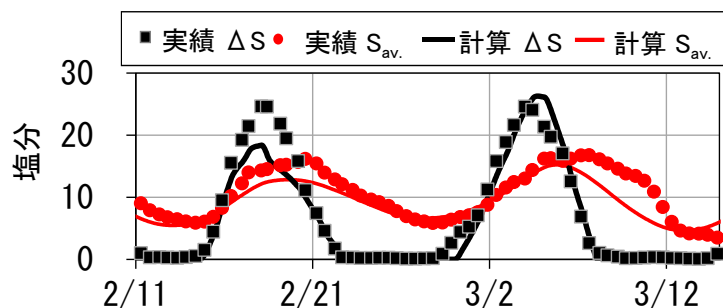


図 3-16 ΔS と $S_{av.}$ の再現結果

3-3-7 荒川 13KP 地点の低水路表層塩分の再現結果

次に，荒川 13KP 地点の低水路下層塩分を S_2 と書くと， ΔS と $S_{av.}$ の定義から式(3-6)が成立するので，本モデルの目的である表層塩分は式(3-7)で表される．

$$\Delta S = S_2 - S_1, \quad S_{av.} = (S_1 + S_2)/2 \quad (3-6)$$

$$S_1 = S_{av.} - \Delta S/2 \quad (3-7)$$

式(3-6)により求められた表層塩分と観測塩分を図 3-17 に比較する．計算結果は S_1 の変動特性を概ね再現している．しかし中潮から大潮，大潮から小潮というように塩分の混合形態が変化する期間での一致度が低い．この原因は，図 3-6 で述べた塩分鉛直分布の直線近似の誤差に起因すると思われる．

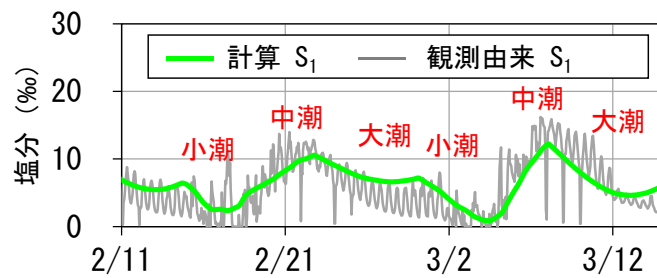


図 3-17 荒川 13KP 地点の低水路表層塩分 (S_1) の再現結果

3-3-8 五反野ワンド前面の低水路表層塩分の再現

(1) 出水影響を考慮しない場合の再現結果

五反野ワンドは荒川 13KP 地点（西新井観測所）の下流約 1 km の至近距離にあるので、前節で作成したモデルの長期間の適合性を調べた。検証期間は 2019 年 11 月 27 日から 2020 年 6 月 10 日とした。その結果を図 3-18 に示す。ただし、式(3-5)中の定数 A_2 , B_2 は St.B の観測塩分を用いたキャリブレーションによりそれぞれ -20.0 と 30.0 に修正した。図中の灰色は計測値であり、低水路河岸水位が塩分計位置より低下した時にはゼロ値になるので、歯形状になっている。また緑実線がモデルで得られた計算塩分、赤実線は秋ヶ瀬取水堰放流量である。放流量が少ない期間は緑線が計測塩分の包絡線とほぼ一致しており、モデルの適合性は良好と考えられる。しかし出水があると乖離が大きくなることがわかる。これは出水によって塩水が下流に押し出されるためと考えられる。

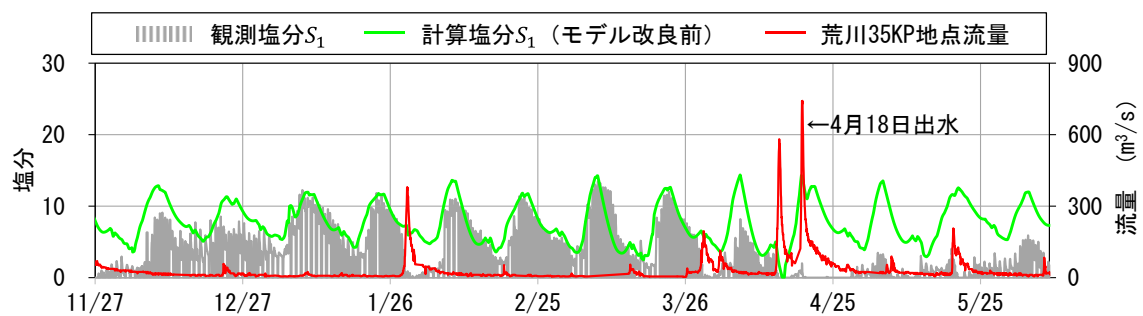


図 3-18 荒川 12KP 地点 (St.B) の表層塩分 (S_1) の試算結果

(2) 出水影響を考慮した再現結果

そこで荒川 35KP 地点（秋ヶ瀬取水堰）流量をゼロとした場合（すなわち潮汐流動のみ）の一次元不定流計算から得られる五反野ワンド地点の流量 $Q_0(t)$ と実際条件での計算流量 $Q(t)$ の差 $\Delta Q(t)$ が S_{av} に及ぼす影響を調べた。まず潮汐流動のみにおいて計算される S_{av} と、式(3-6)において表層塩分 S_1 を推定値から観測値に変更した場合の S_{av} （逆算 S_{av} と呼ぶ）を比較すると図 3-19 を得る。ただし $S_{av} \geq 0$ としている。そこで ΔS_{av} と ΔQ の相関を、検証期間中の流量が最大であった4月18日出水について整理した結果を図 3-20 に示す。

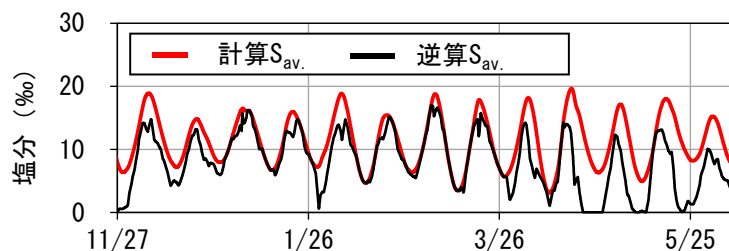


図 3-19 計算 S_{av} と逆算 S_{av} の比較

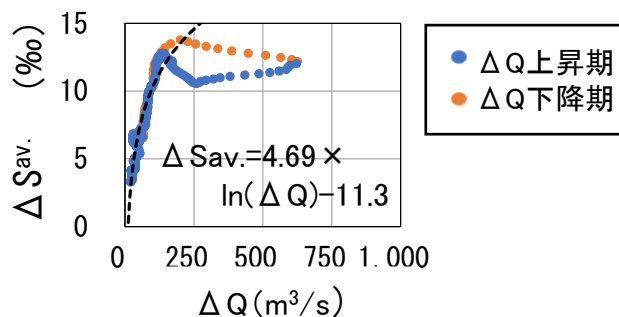


図 3-20 湿地前面（St.B）の ΔQ と ΔS_{av} の相関

ΔS_{av} は ΔQ が $150\text{m}^3/\text{s}$ 付近まで急激に増加し、それ以上の ΔQ では $S_{av} \geq 0$ の条件により頭打ちになる。また増水期と減水期で若干の時差を持つ。そこで図 3-20 中の点線で示す式を用い、式(3-1), (3-2), (3-4)および (3-5)と同じ手法で ΔS_{av} を一階の微分方程式で表した。

$$\frac{d}{dt}\{\Delta S_{av}\} = \beta\{\Delta S_{av} - \{4.69\ln(\Delta Q) - 11.3\}\} \quad (3-8)$$

ここに、 β は定数 (1.0×10^{-5}) である。補正後の S_{av} を用いて再計算された S_I を図 3-21 に示す。図 3-18 との比較から、1 月末の出水時の再現性が向上したことがわかる。ただし、4 月末以降の小出水での一致度は依然として低い。この原因は図 3-9 に示すように、荒川河口が東京湾奥に位置し、出水の流入により海水が希釈されたためと考えられるが、この現象のモデルへの反映は次節にて行う。

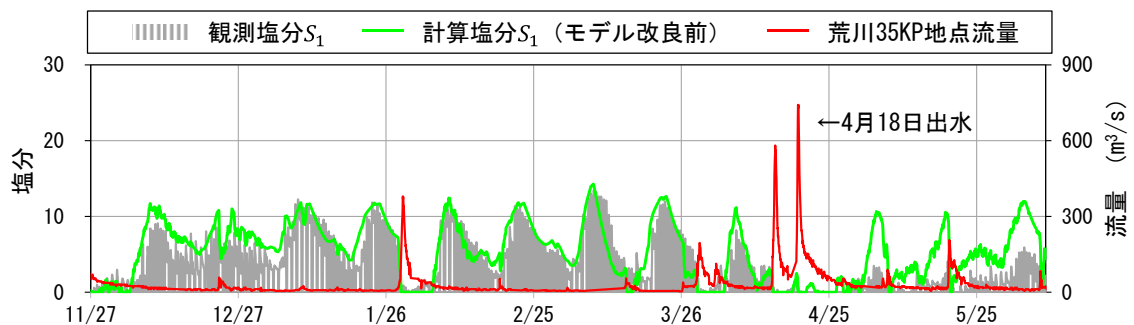


図 3-21 湿地前面 (St.B) の表層塩分 (S_I) の再現結果

3-4 東京湾を含めたモデルの改良

前節で開発した低水路表層塩分推定モデルでは、荒川 35KP 地点（秋ヶ瀬取水堰）の出水時流量と逆算 S_{av} の関係から低水路塩分の低下を考慮することにより、1 月 29 日等の単発出水の低水路表層塩分の再現性は向上した。しかし、4 月下旬以降の出水が連続する期間の再現性は向上しなかった。この理由として、当該期間には、荒川への塩分の供給源である東京湾の塩分低下の可能性が考えられた。そこで本節では、東京湾の塩分変動を考慮するため対象範囲を拡大し、図 2-13 に示す荒川河口沖の湾内 c 地点（St-18（◆））と湾内 b 地点（浦安沖（▼））の塩分データを追加しモデルを改良した。

まず、改良前のモデルによる St.B の計算結果を図 3-22 に示す。ただし、検証期間を 2020 年 12 月 29 日まで延伸した。また、東京湾の塩分変動を未考慮であることを表すため、計算塩分 S_I には“～”を変数の頭に付した。

これより、2019 年 11 月から 2020 年 4 月中旬の計算結果は観測値をよく再現し、さらに、1 月 29 日の 1 出水における塩分低下も再現できている。また、延伸期間のうち 10 月以降の再現性も良好である。しかし、出水が連続し湾内 b 地点塩分が低下する年 4 月下旬から 9 月の期間（以降、出水期という）の計算結果は、観測値よりも連続的に高い。

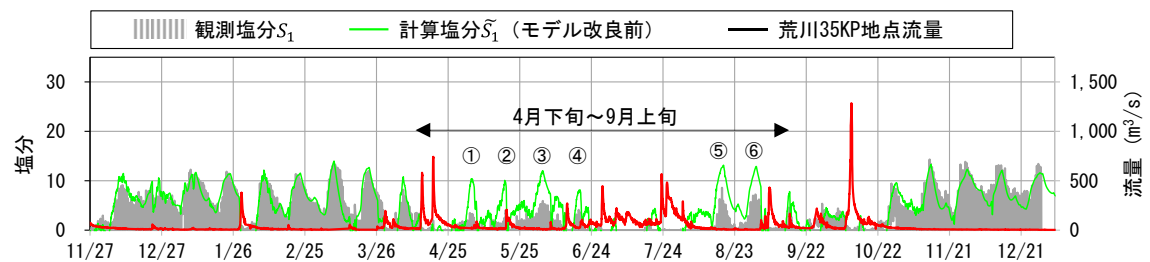


図 3-22 低水路河岸表層塩分の再現結果（東京湾塩分の考慮前）

3-4-1 東京湾の塩分変動

湾内 c 地点 (St-18) および湾内 b 地点 (浦安沖) の 3 年間の観測塩分の鉛直平均値を図 3-23 に示す。両地点とも表層から底層まで塩分が観測されており、鉛直平均値を示している。これより、出水期には東京湾の塩分低下は 3 年連続で見られることが確認された。この原因として、東京湾は浅い閉鎖性水域であり、河川からの流入水が湾内にとどまり湾内の塩分が希釈されたためと考えられる。

さて、前節で開発した低水路表層塩分推定モデルを改良する上で、荒川河口沖の塩分連続データが必要である。しかし、湾内 c 地点では 1~3 ヶ月おきにしかデータは取得されていない。一方、湾内 b 地点の塩分は江戸川放水路の影響を受けることが想定されたが、図 3-23 から湾内 c 地点とほぼ同じ変動を示していることから、本研究では湾内 b 地点の観測値を荒川河口沖の塩分としてモデルに使用することとした。

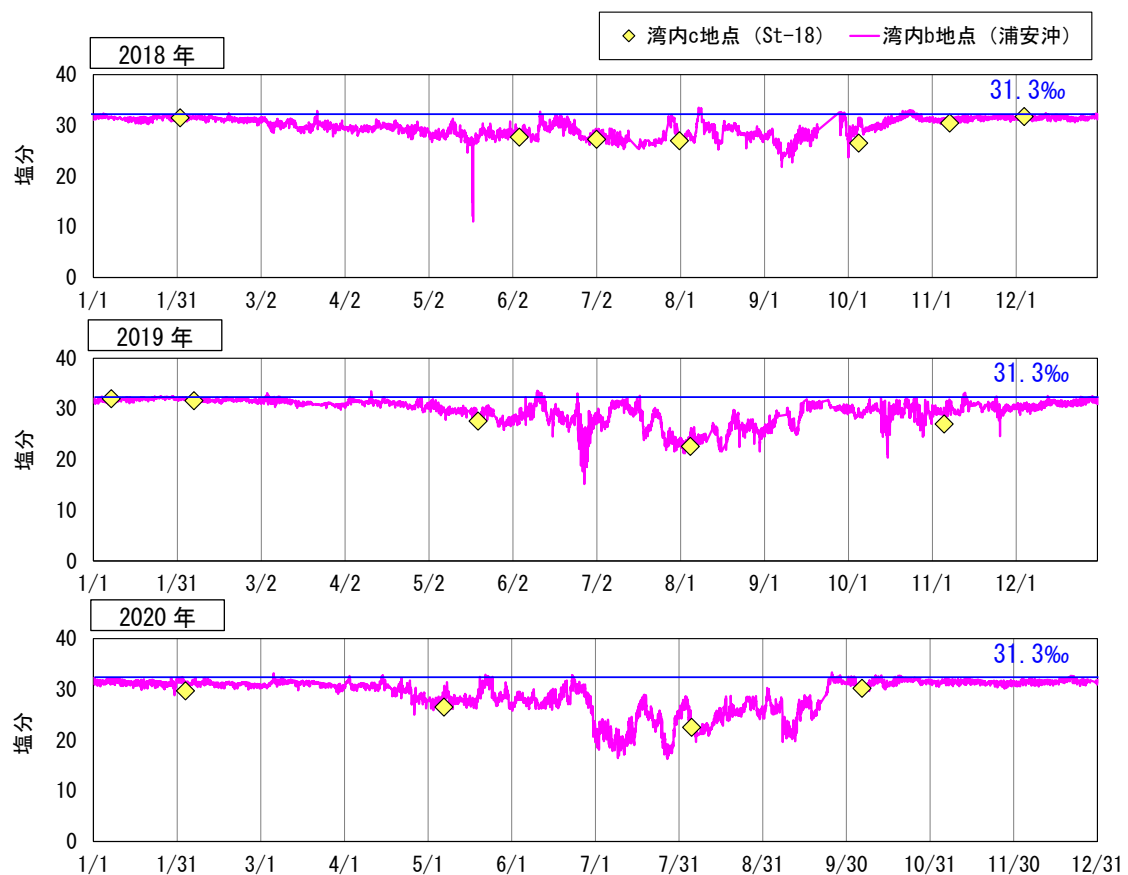


図 3-23 東京湾の塩分時系列 (鉛直平均値)

3-4-2 モデルの改良

東京湾と低水路(St.B)の塩分の関係把握するため、東京湾の塩分が安定する2月と低下する5月について、それぞれ半月周期を比較した(図 3-24)。5月には低水路の計算塩分 S_t が観測値より低下していることがわかる。そこで、出水期の東京湾の平均塩分低下量 δS_t と、低水路(St.B)における計算塩分と観測塩分の差 δS_l の関係を調べた。ここで、図 3-24 の5月の低水路の塩分は、湾内b地点の塩分の低下に応じて累積的に低下していることから、 δS_t は低水路塩分の差が生じ始めるときからピークとなるまでの期間平均値とした。また、 δS_l は低水路の塩分の差がピークになるときの値とした。図 3-22 中の出水期の①～⑥の各サイクルで求めた δS_l と δS_t をプロットすると図 3-26 が得られた。

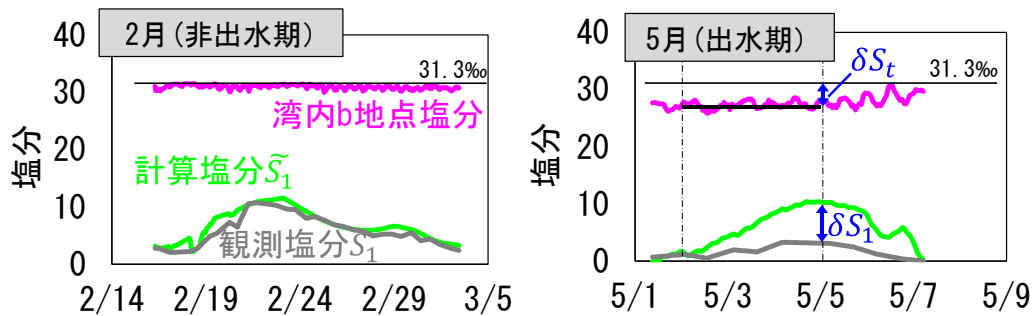


図 3-24 δS_l と δS_t の算定結果の例

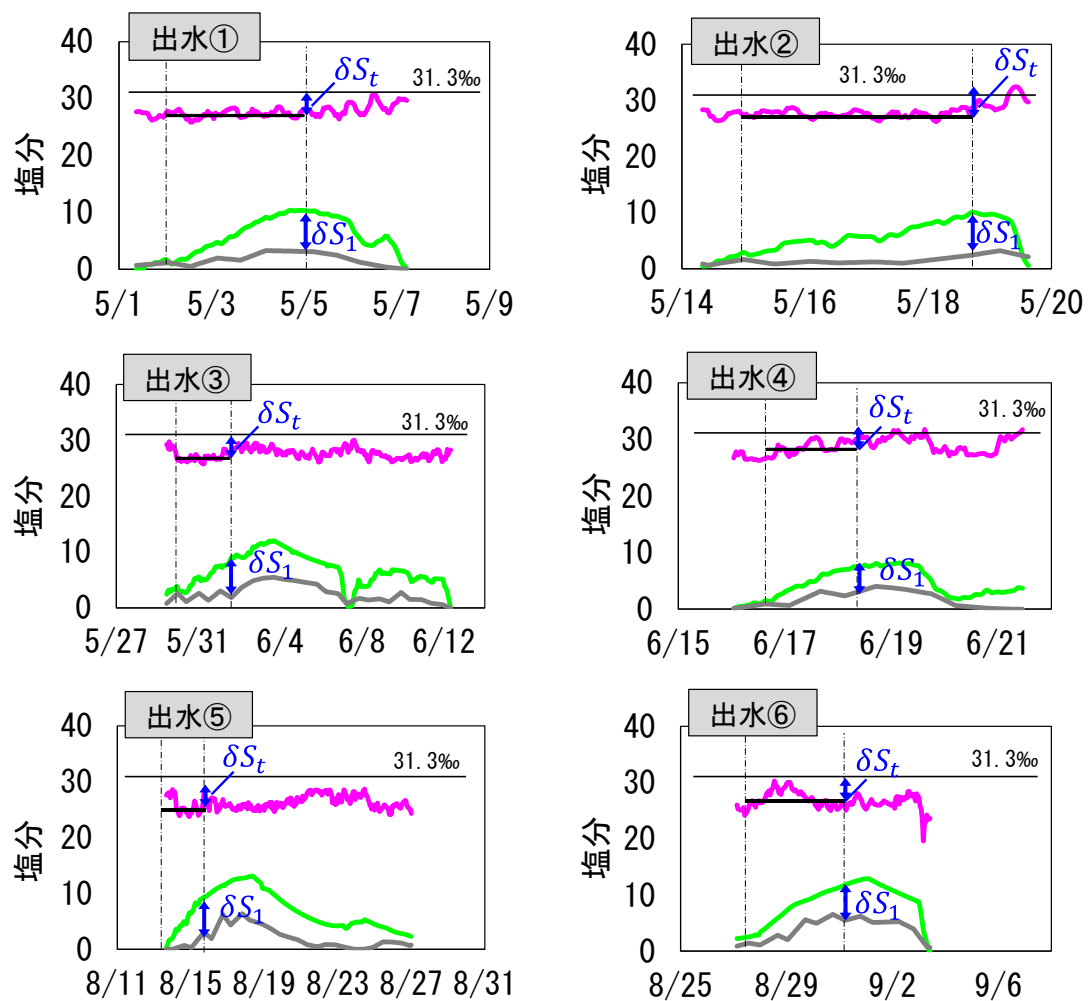


図 3-25 δS_1 と δS_t の算定結果 (図 3-22 中の①～⑥)

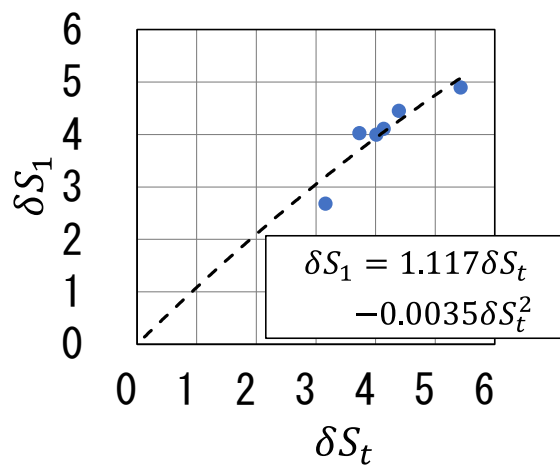


図 3-26 δS_1 と δS_t の関係

δS_I は δS_t に概ね比例し、相関があることが分かった。次に、低水路の ΔS と $\widetilde{\Delta S}$ の関係および $S_{av.}$ と $\widetilde{S_{av.}}$ の関係を東京湾の塩分低下量 δS_t を用いて以下のように近似できると仮定した¹¹⁾。

$$\Delta S = \widetilde{\Delta S} + a_1 \delta S_t + \beta_1 \delta S_t^2 \quad (3-9)$$

$$S_{av.} = \widetilde{S_{av.}} + a_2 \delta S_t + \beta_2 \delta S_t^2 \quad (3-10)$$

a_1 と β_1 、および a_2 と β_2 はそれぞれ定数である。式(3-7)、および式(3-9) (3-10)より、 S_I を式(3-11)のように展開できる。

$$\begin{aligned} S_I &= S_{av.} - \Delta S/2 \\ &= \left(\widetilde{S_{av.}} - \frac{\widetilde{\Delta S}}{2} \right) + \left(a_2 - \frac{a_1}{2} \right) \delta S_t + \left(\beta_2 - \frac{\beta_1}{2} \right) \delta S_t^2 \\ &= \widetilde{S}_1 + \alpha \delta S_t + \beta \delta S_t^2 \end{aligned} \quad (3-11)$$

式(3-11)右辺の α と β は定数である。次に、式(3-11)から δS_I を以下のように書くことができる。

$$\delta S_I = S_I - \widetilde{S}_1 = \alpha \delta S_t + \beta \delta S_t^2 \quad (3-12)$$

式(3-12)を図 3-26 に適用した結果、 $\alpha=1.117$ 、 $\beta=-0.0035$ が得られた。改良モデルによる塩分推定結果を図 3-27 に示す。改良前と比較し、4月～9月の出水期の再現性が向上した。

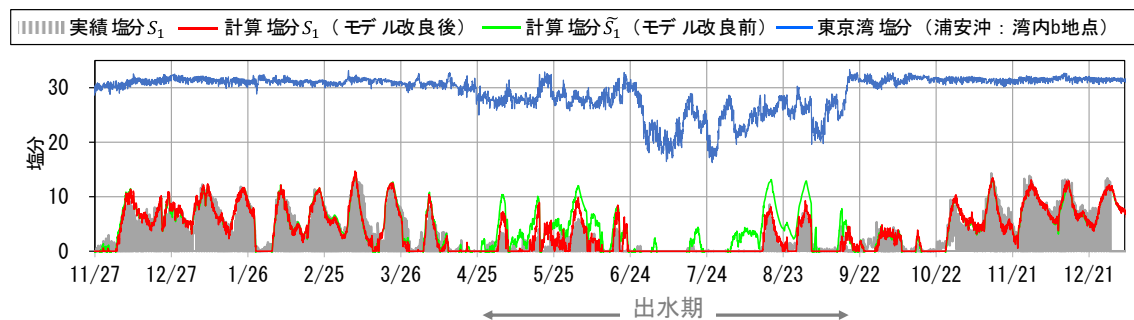


図 3-27 低水路河岸表層塩分の再現結果（東京湾塩分の考慮後）

3-5 考察

低水路河岸表層塩分の再現結果を考察するため、各種の観測データや低水路表層塩分の計算過程で得られる計算値（計算流速 U 、流速振幅 ΔU_d 、 ΔS 、 S_{av} ）を横並びで整理した（図 3-28）。

図 3-28 のうち、一段目～三段目は観測データである。モデルの入力条件とした荒川 35KP 地点の流量と東京湾（湾内 a 地点）の潮位の観測値を一段目のグラフに、東京湾（湾内 b 地点）の観測塩分を二段目のグラフに示す。三段目のグラフには、荒川 13KP 地点の上層と下層、および 12KP 地点（St.B）の観測塩分を示す。四段目のグラフは、荒川 12KP 地点の計算流速 U と U から算定した流速振幅 ΔU_d 、五段目のグラフは、 ΔS および S_{av} を示す。そして、一番下のグラフが五反野ワンドの位置する荒川 12KP 地点の低水路表層塩分の観測値と計算塩分である。図 3-28 は全計算期間について整理したものであり、図 3-29 はこれを一ヶ月ごとに整理したものである。

まず図 3-28 についてみると、東京湾塩分（湾内 b 地点）が低下する 4 月～9 月の出水期、およびそれ以外の非出水期においても、計算結果は観測値を良好に再現できていることがわかる。月別の図 3-29 についてみると、2019 年 12 月～2 月の計算塩分は小潮時、中潮時、大潮時の期間を通して良好な再現性を確保できている。ただし、2020 年 3 月の計算塩分は、低減期に観測塩分よりも全体的に低めになっている。図 3-6 に示したように、本モデルの表層塩分は、下層と上層塩分の直線外挿から求めている。このため実際の塩分の鉛直分布が直線関係とならない場合には誤差が生じる。しかし、荒川 12KP 地点では下層と上層の 2 地点でしか塩分が観測されていないため、直線近似を仮定せざるを得ず、現状ではやむを得ない。

2020 年 4 月の計算塩分は、14 日と 19 日に出水が発生しており、荒川 13KP 地点や荒川 12KP 地点の観測塩分がほぼゼロになっており、計算塩分 S_I は観測塩分を再現できている。この時の湾内 b 地点の塩分はほとんど低下がみられないことから、計算塩分 S_I がほぼゼロとなるこの挙動は、図 3-20 で示した補正により適切に表現できていると言える。その後、9 月にかけて観測塩分が低下する期間が継続するが、再現性を確保できている。これは、図 3-26 に示した東京湾の塩分低下を考慮したことによる。

10 月には東京湾塩分は回復するが、10 月 10 日の出水により、観測塩分と計算塩分ともに低下した。10 月下旬以降は出水が見られなくなるとともに観測塩分は回復し、計算塩分はこれを良好に再現できている。

図 3-28 および図 3-29 の計算結果は、式 (3-4) と式 (3-5) による一階の微分方程式から得られており、式中の経験定数 A_1 と B_1 、および A_2 と B_2 は通年で同じ値を用いており、出水期を含む通年で適用できる。一階の微分方程式は、通年の計算でも現在の計算 PC であれば数分程度で完了する。このため、一度、モデルのパラメータの同定が完了すれば、一年のみならず数年～10 年オーダーの予測計算も容易である。

なお、東京湾は、房総半島と三浦半島に挟まれた湾口の奥に位置している。このため、出水期には、東京湾に注ぐ荒川や江戸川等の河川からの淡水の流入により、湾の塩分が希釈され低下すると考えられる。一方、対象河川が外湾に注ぐ場合は、湾内の塩分低下は発生しないため、湾塩分の低下を考慮する必要はない。

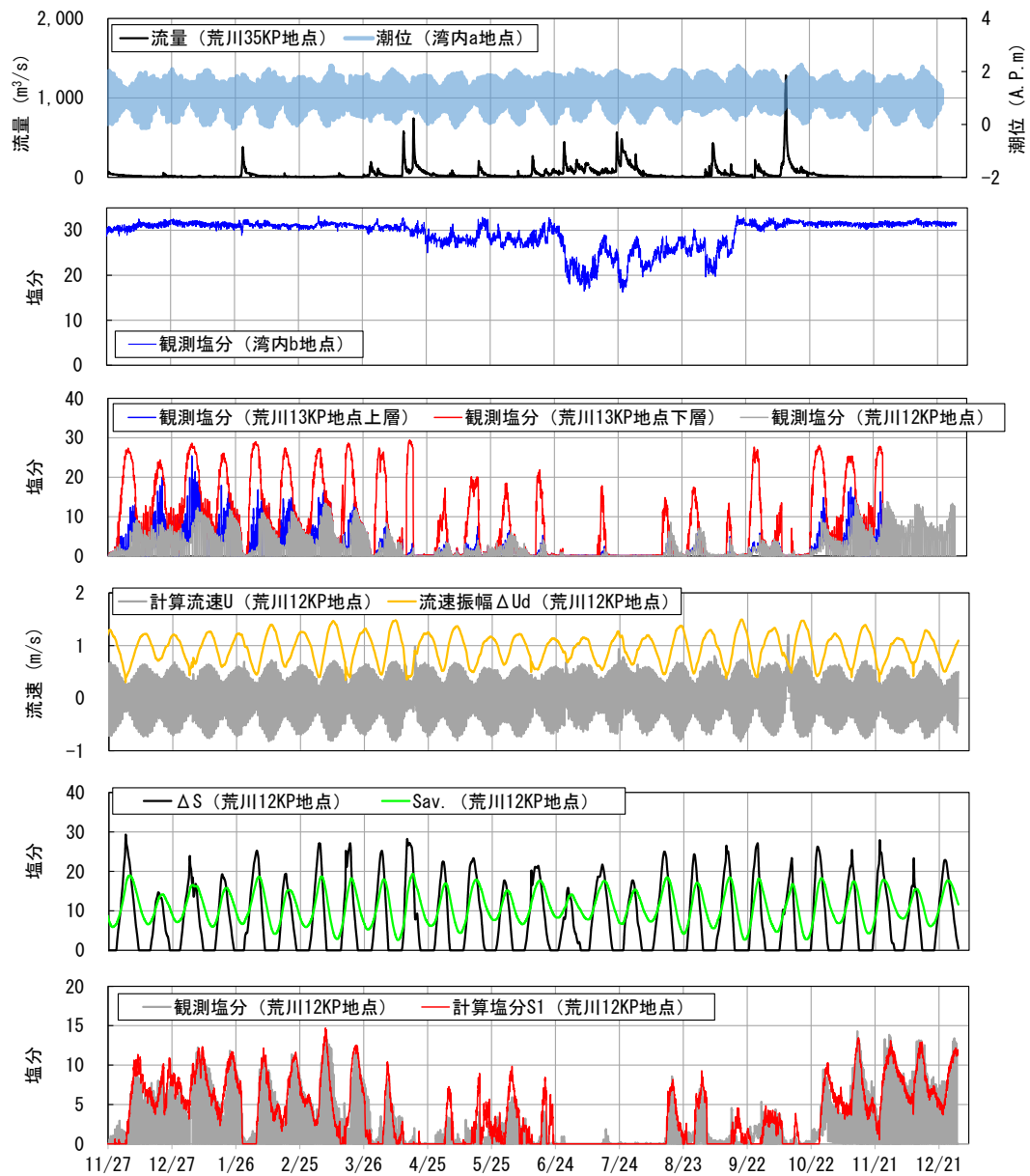


図 3-28 低水路河岸表層塩分の再現結果（全計算期間）

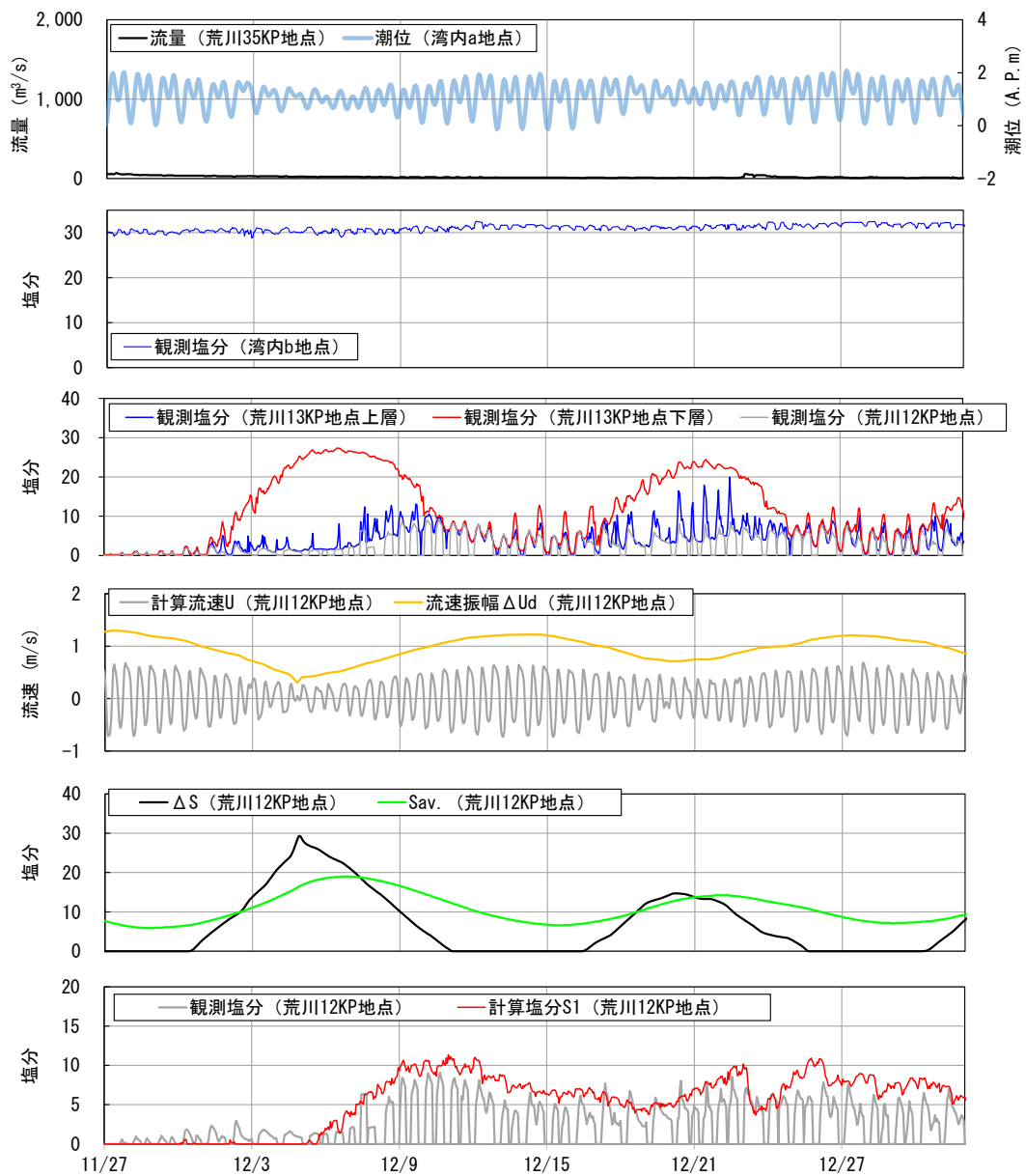


図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果（2019 年 12 月）

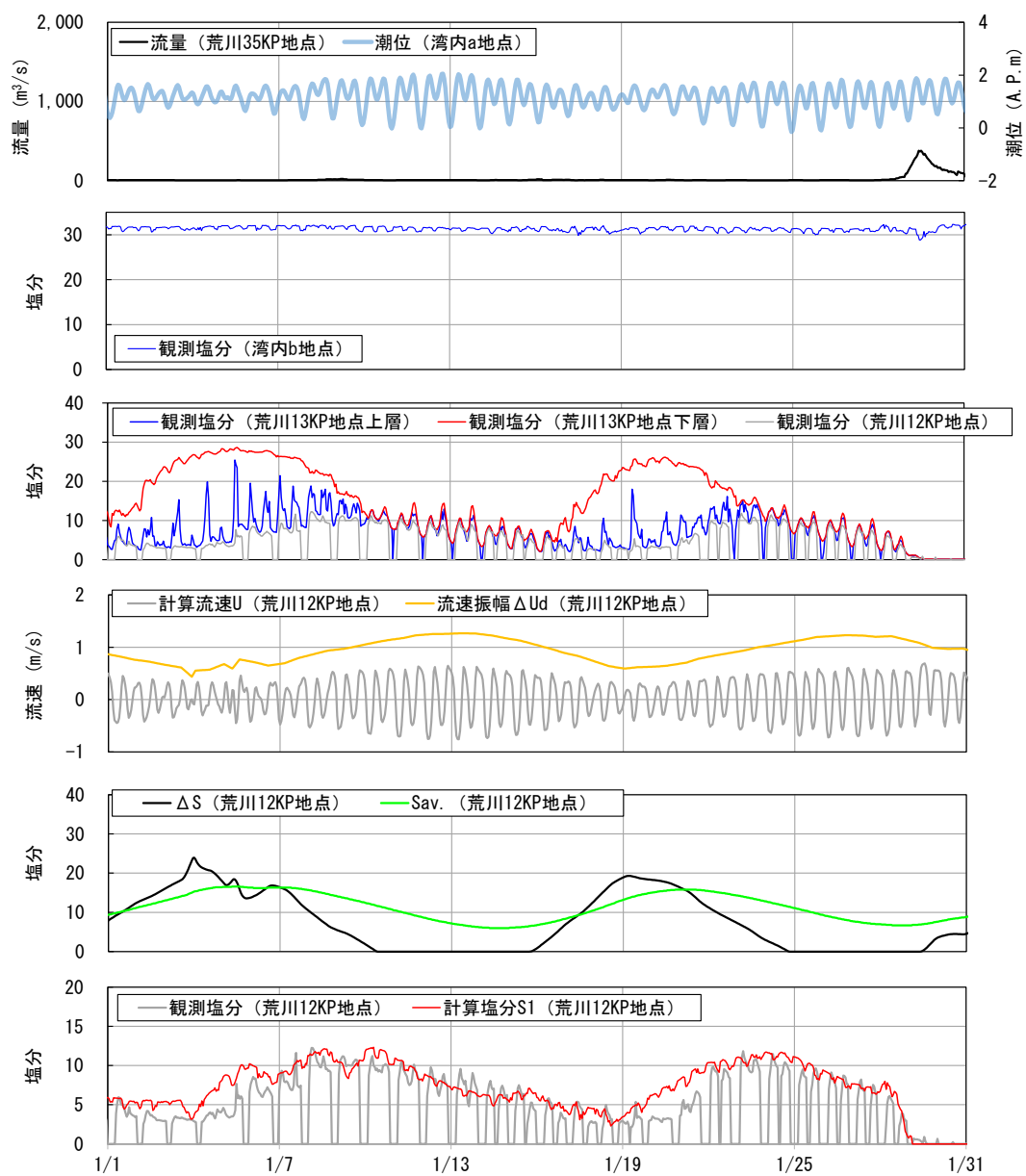


図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果（2020 年 1 月）

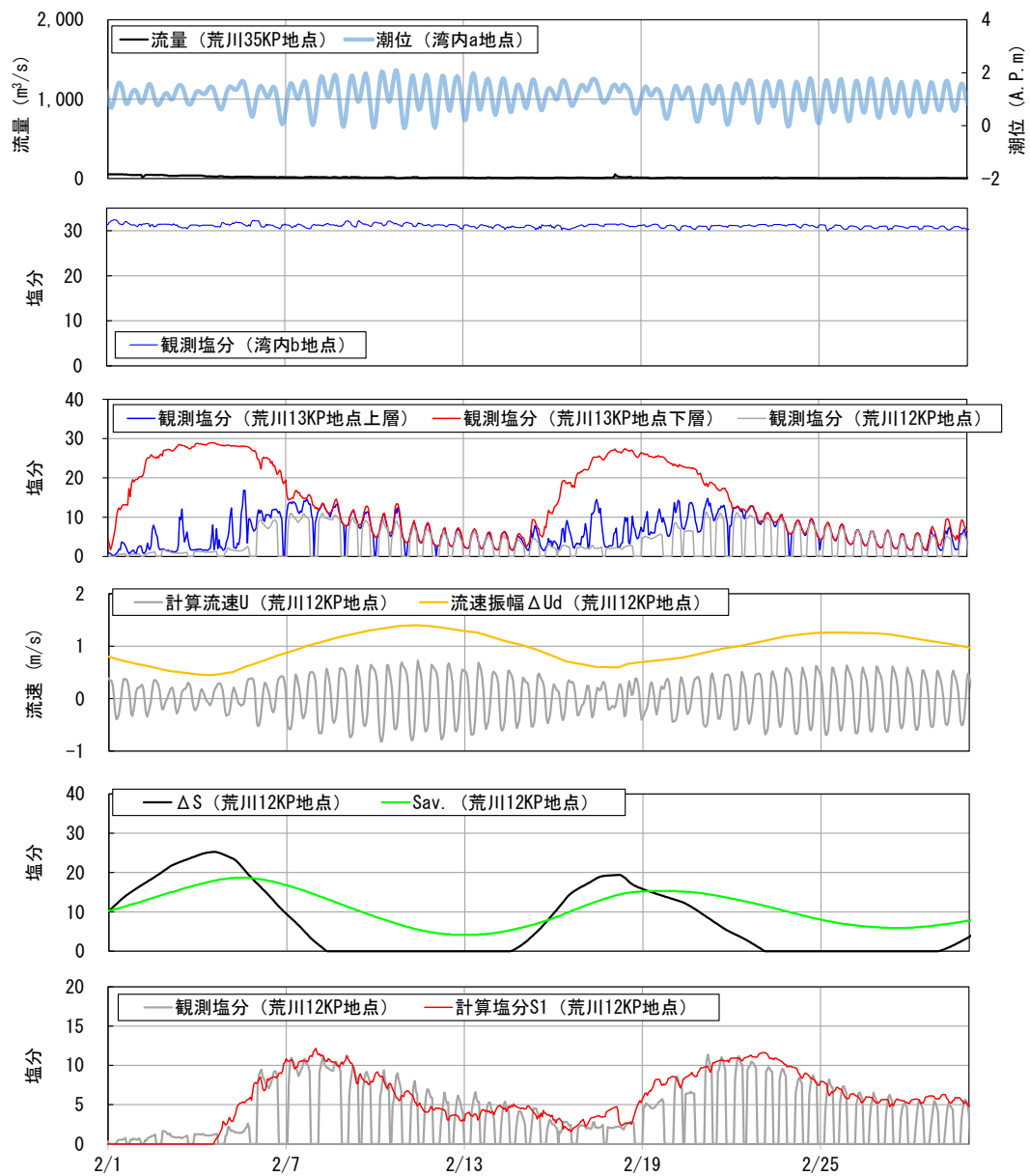


図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果（2020 年 2 月）

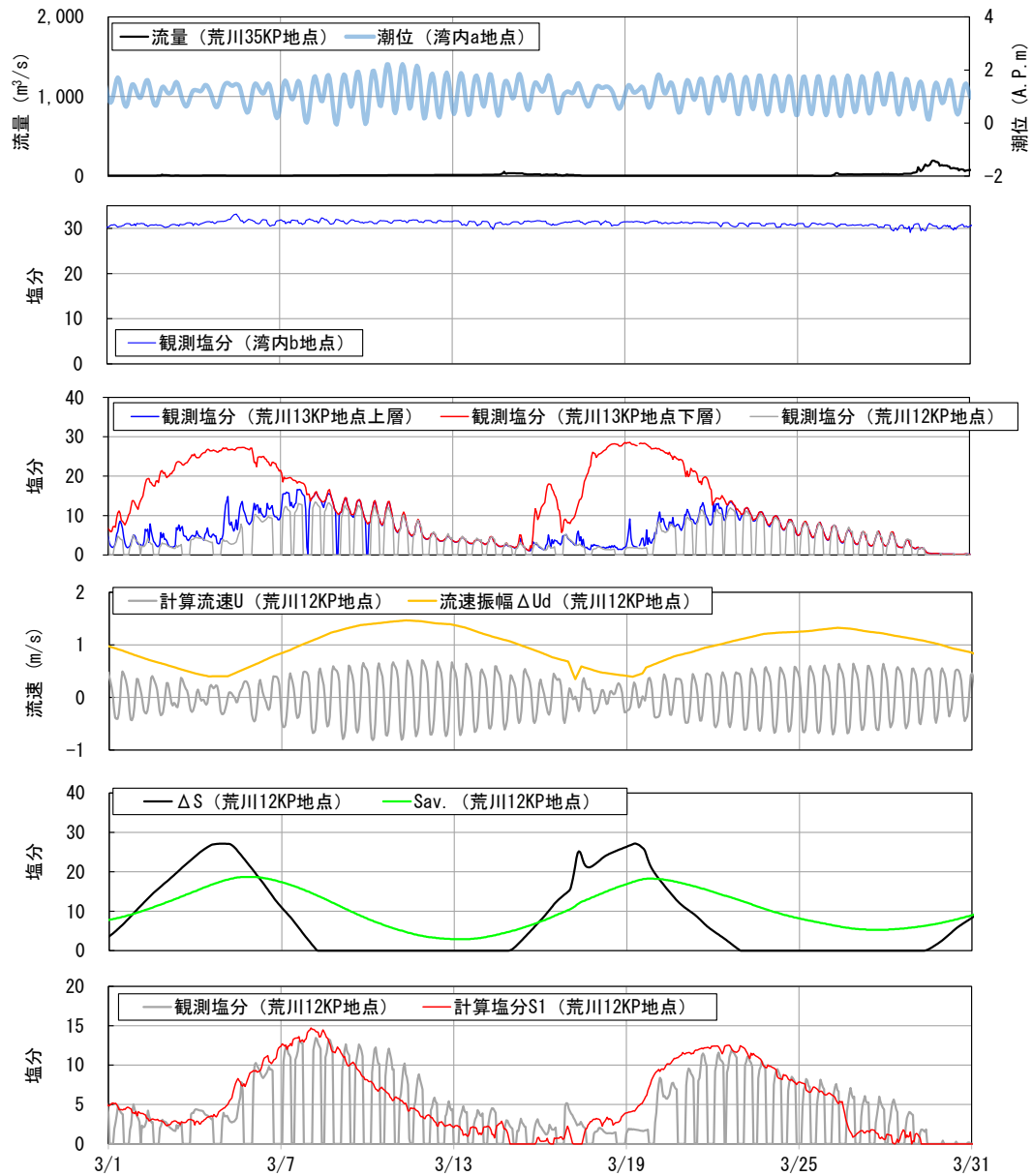


図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果（2020 年 3 月）

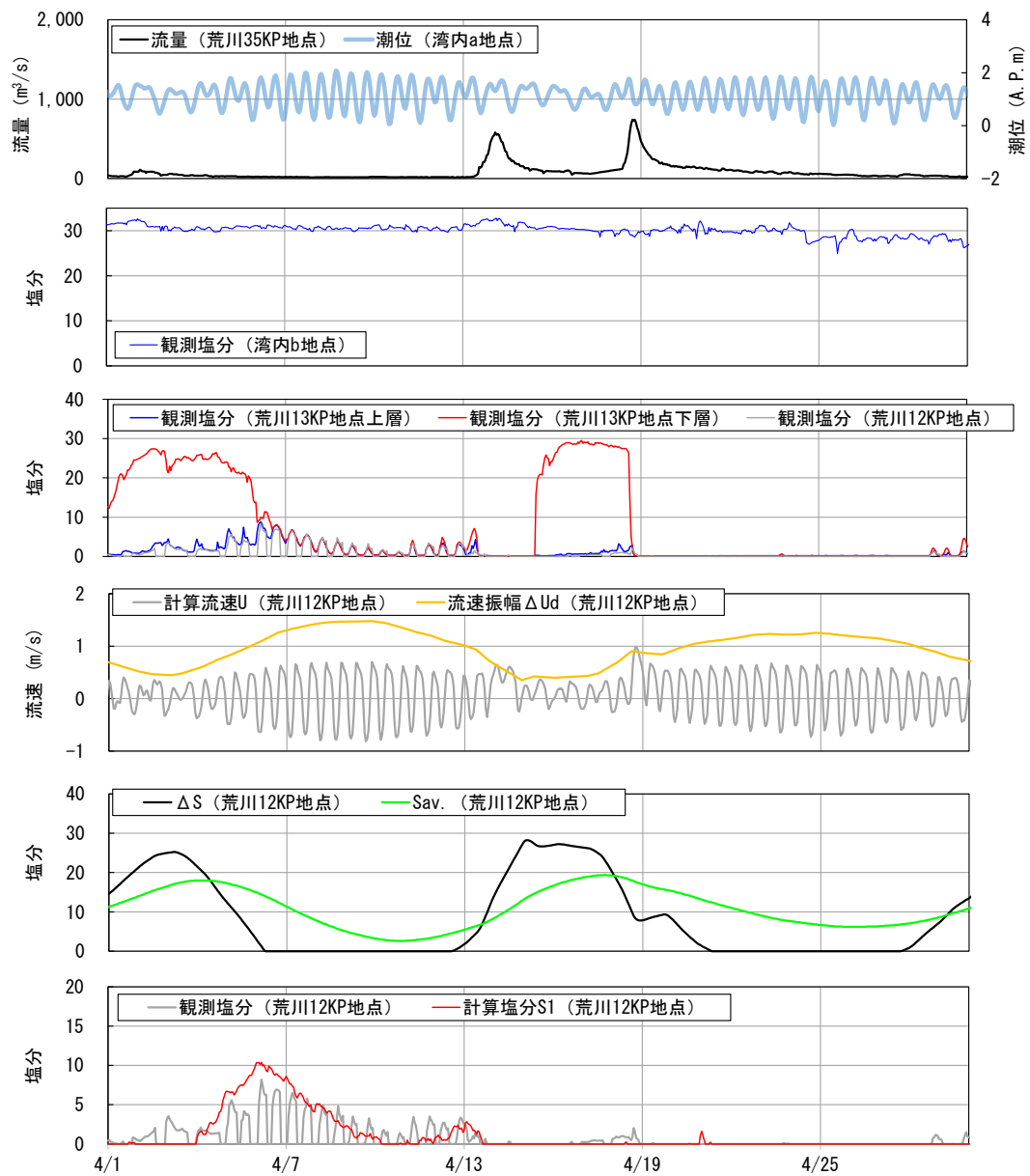


図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果（2020 年 4 月）

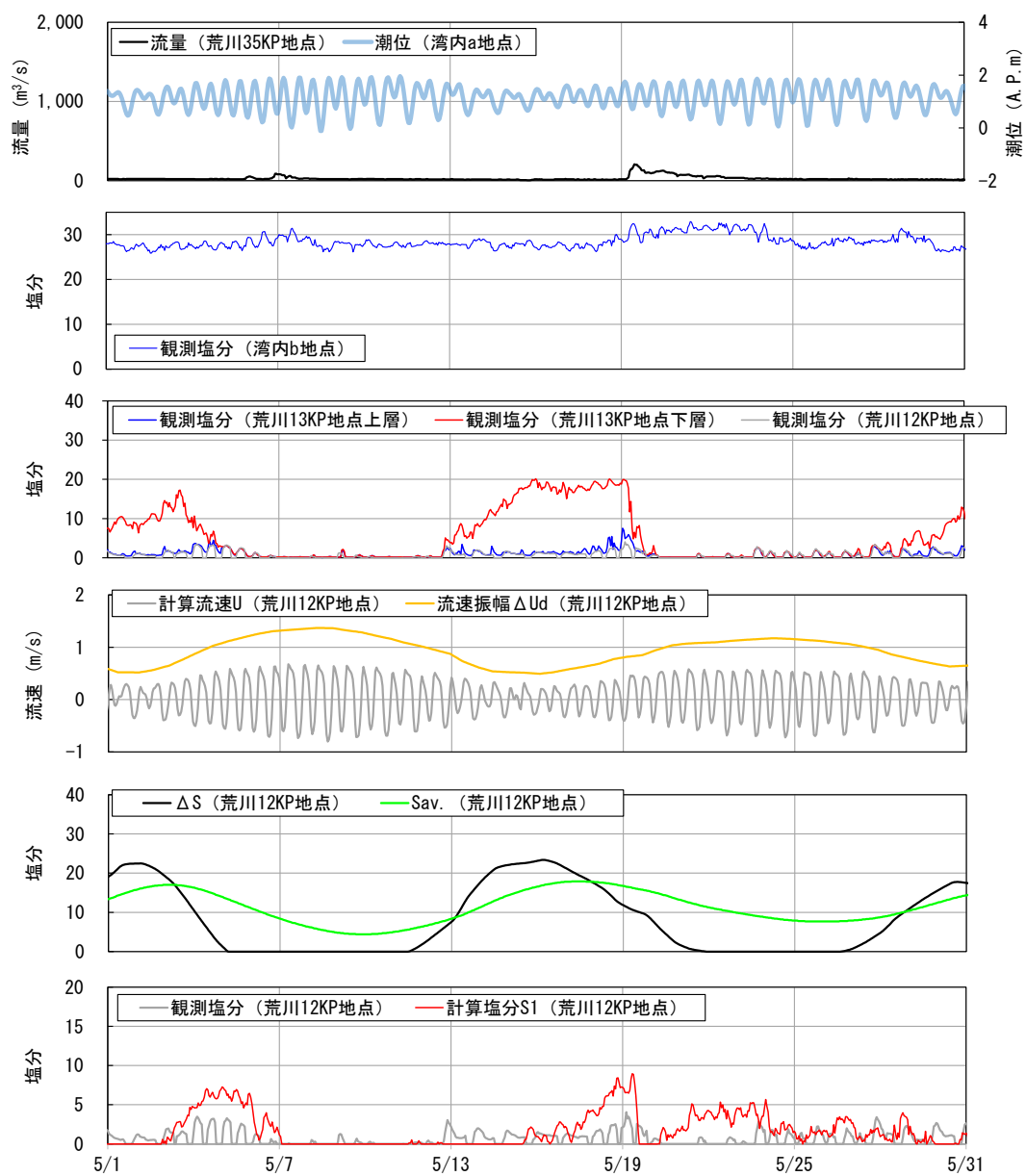


図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果 (2020 年 5 月)

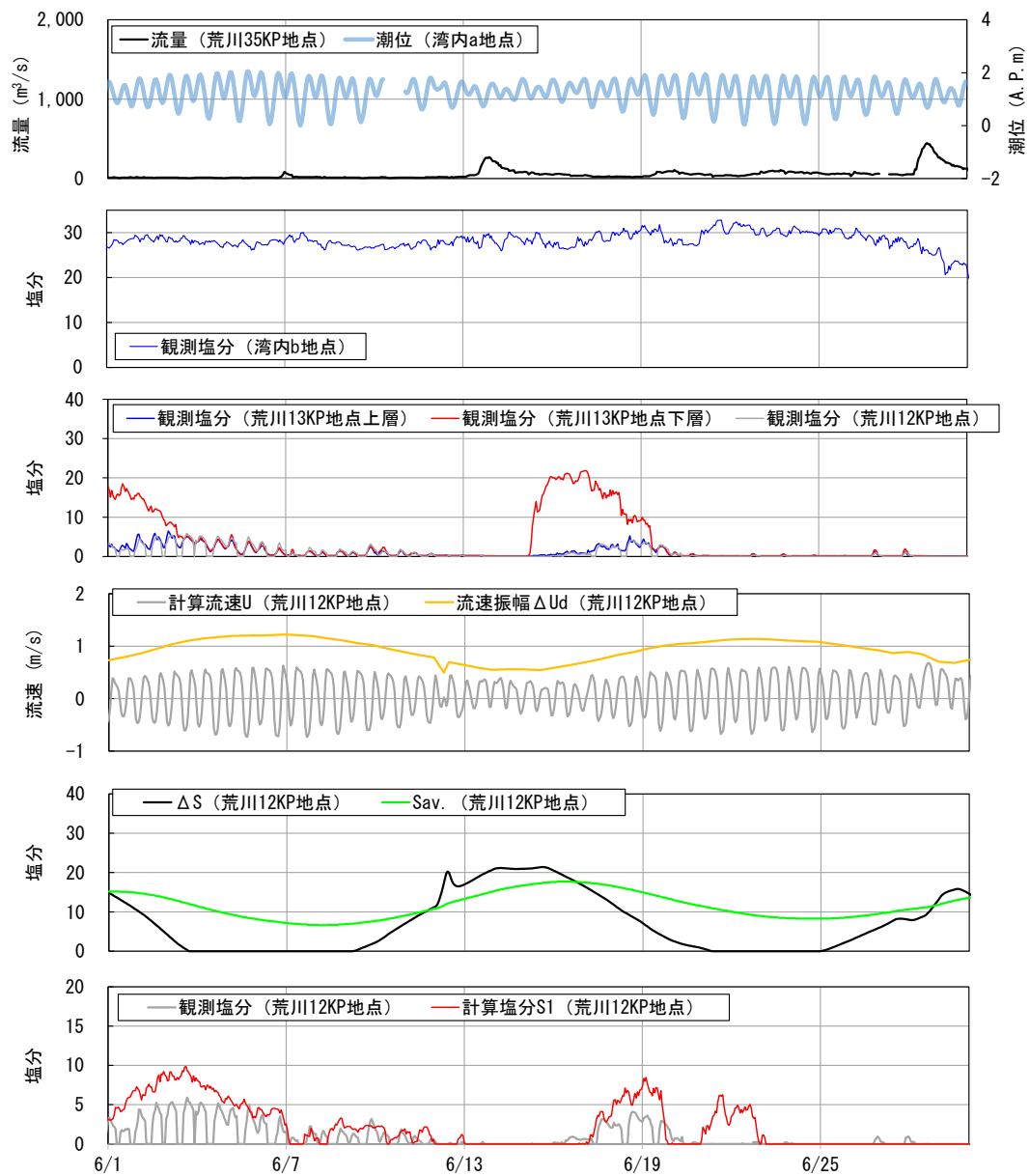


図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果 (2020 年 6 月)

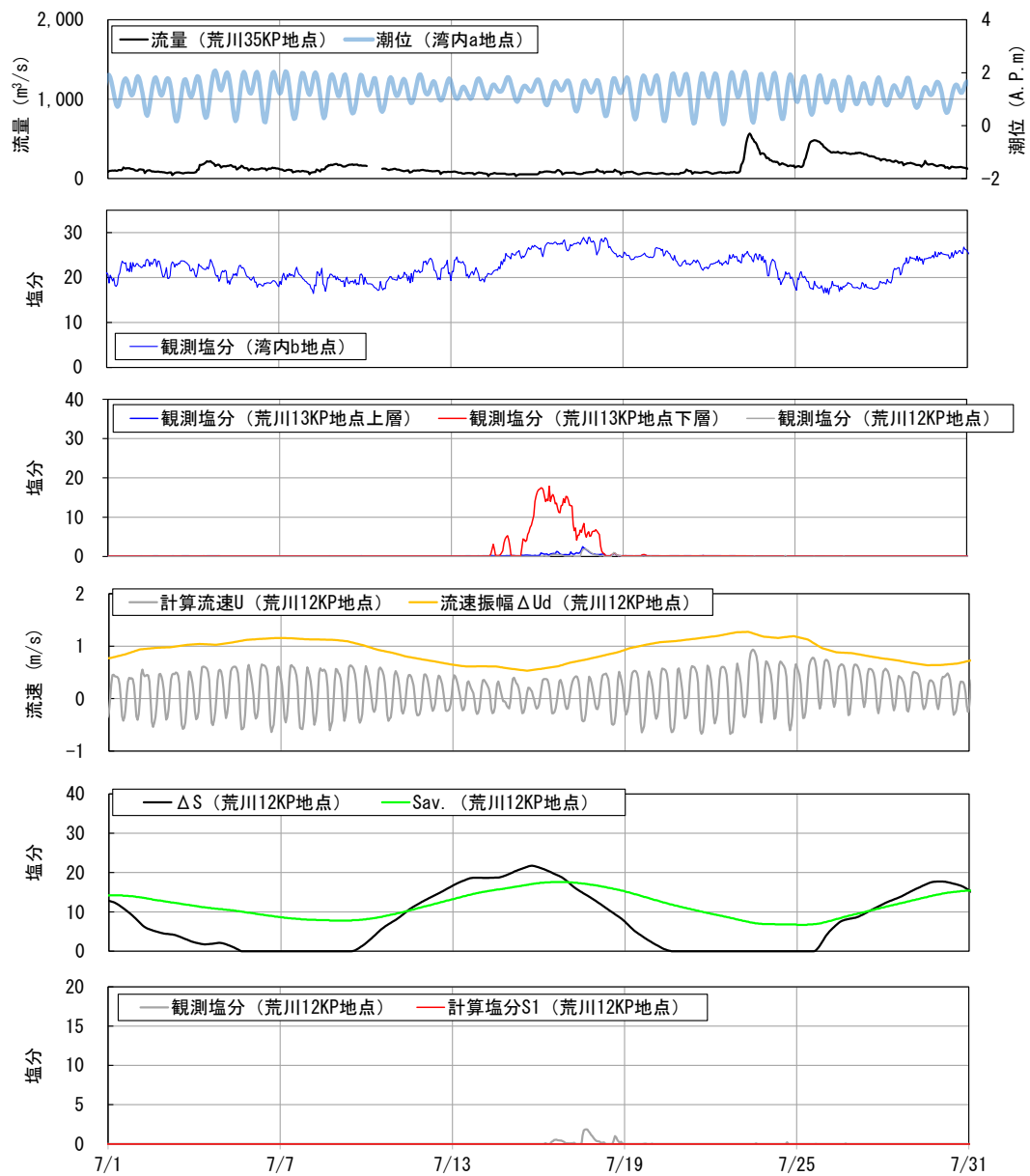


図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果 (2020 年 7 月)

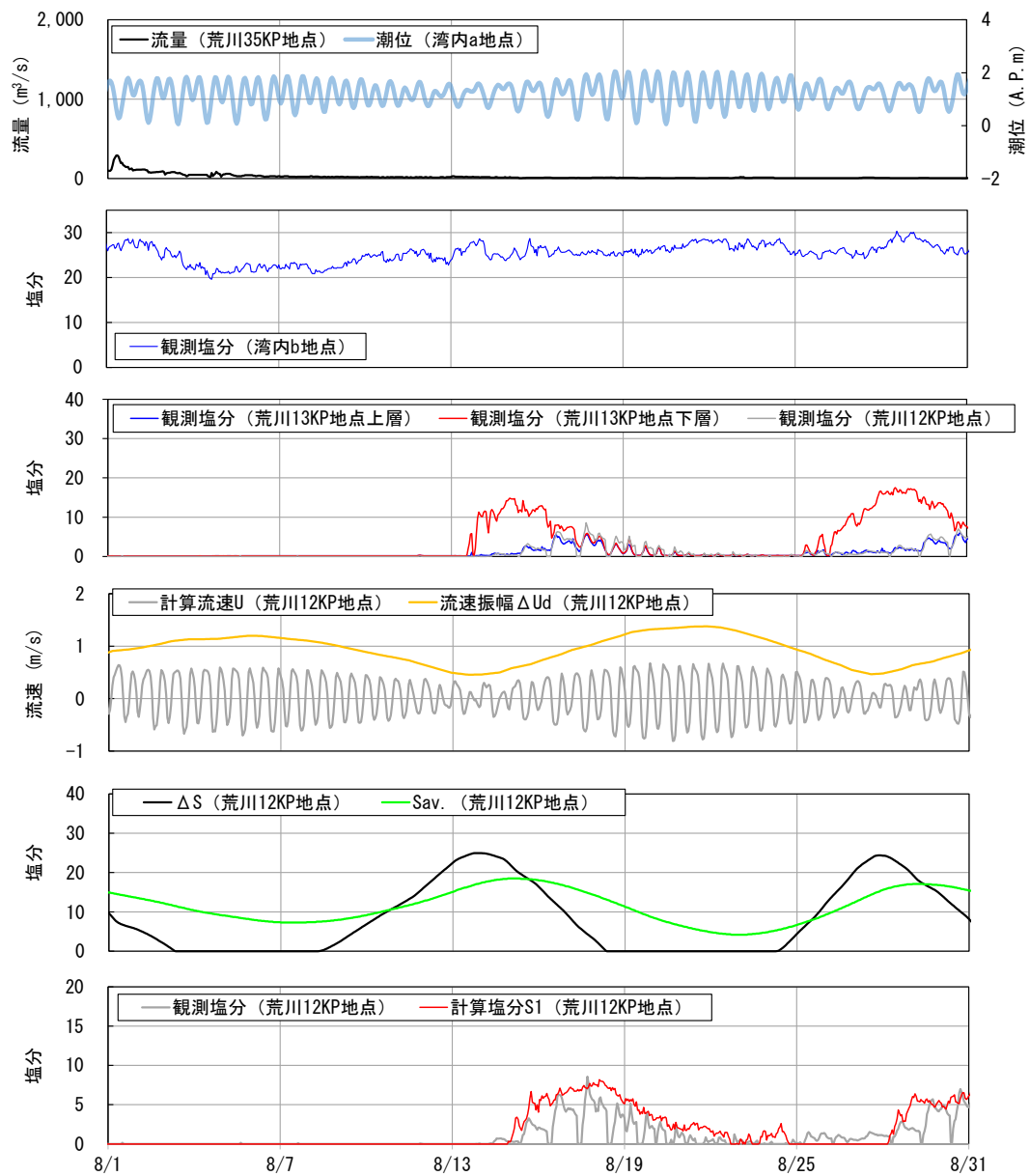


図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果 (2020 年 8 月)

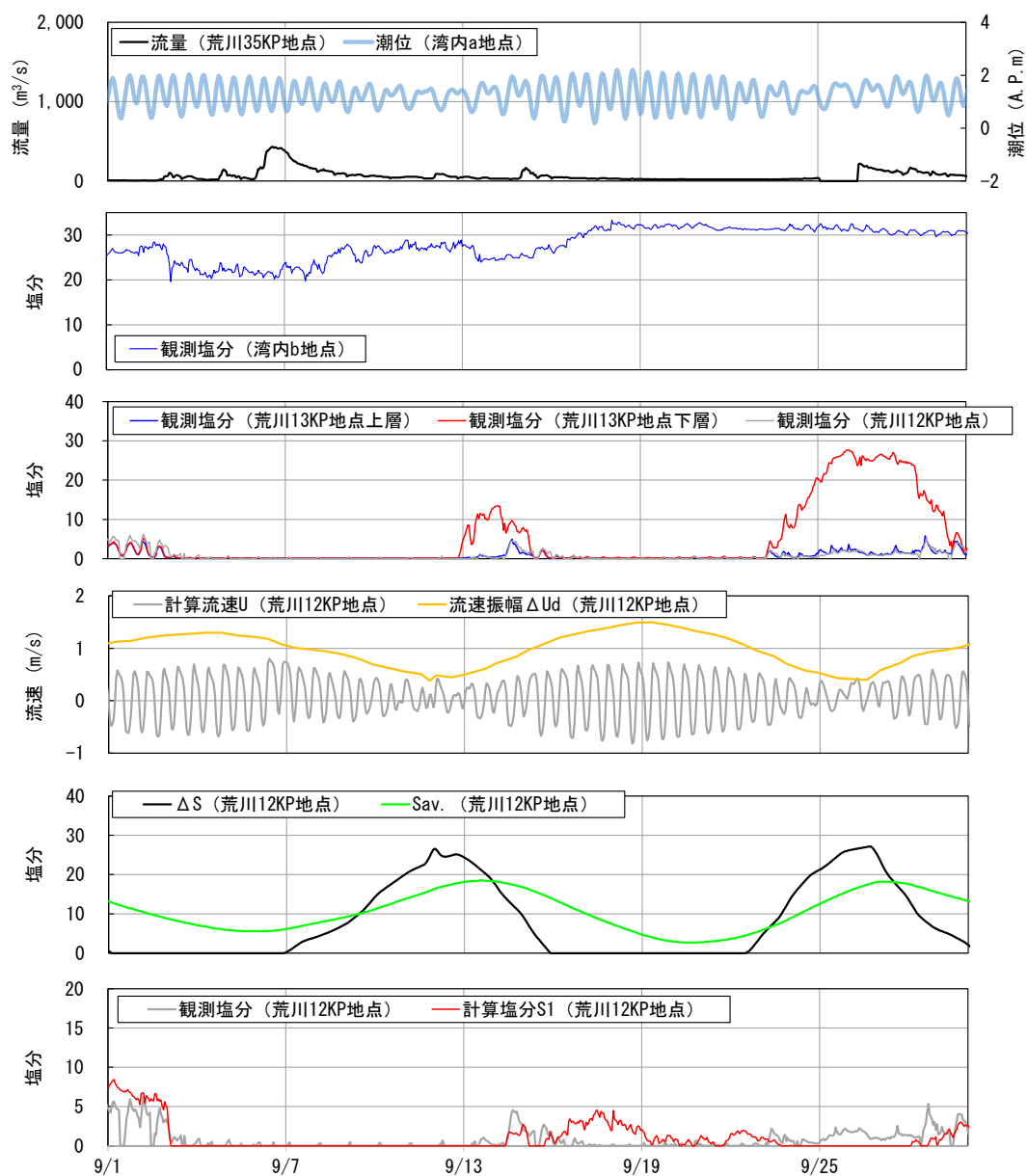


図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果 (2020 年 9 月)

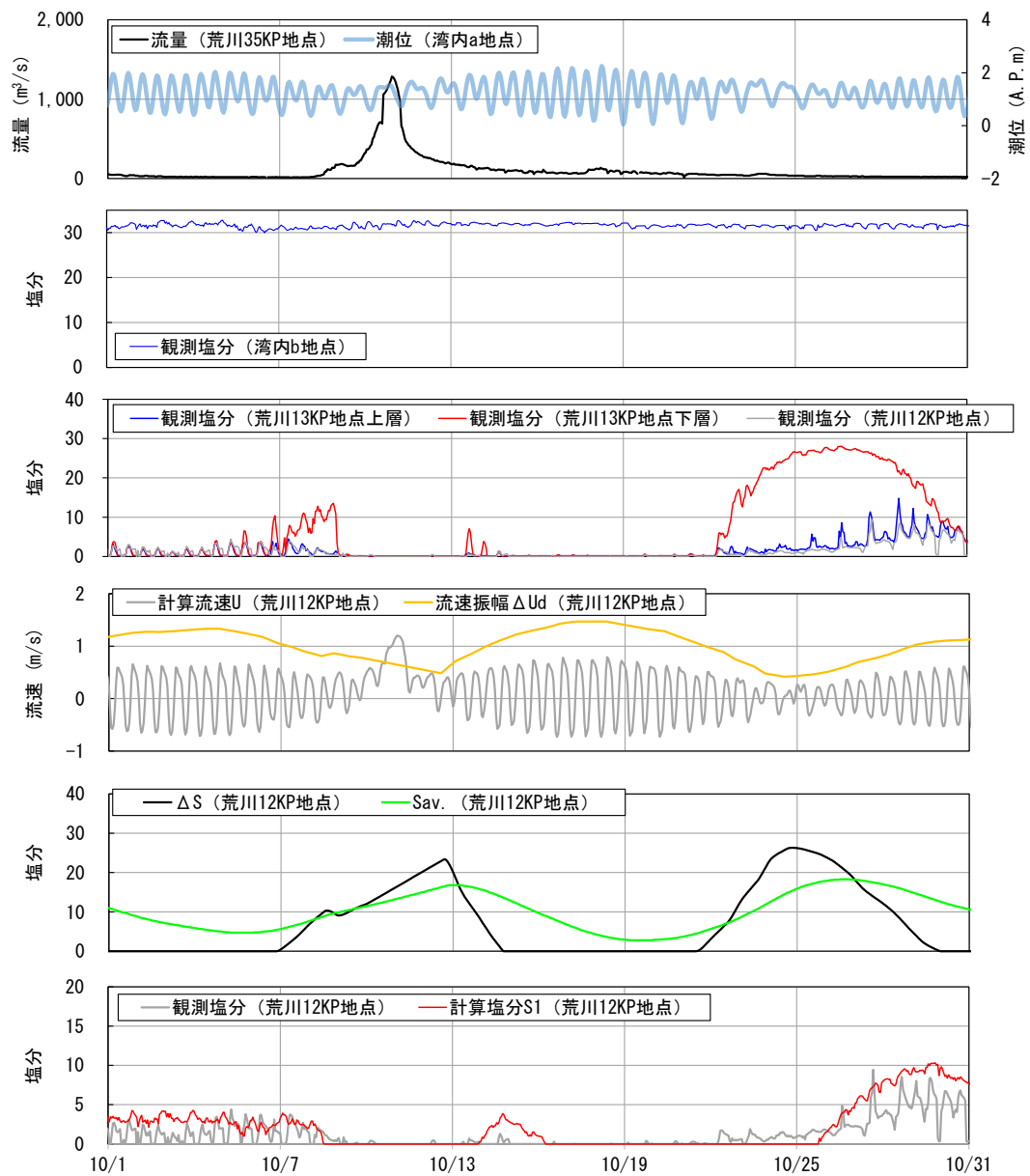


図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果（2020 年 10 月）

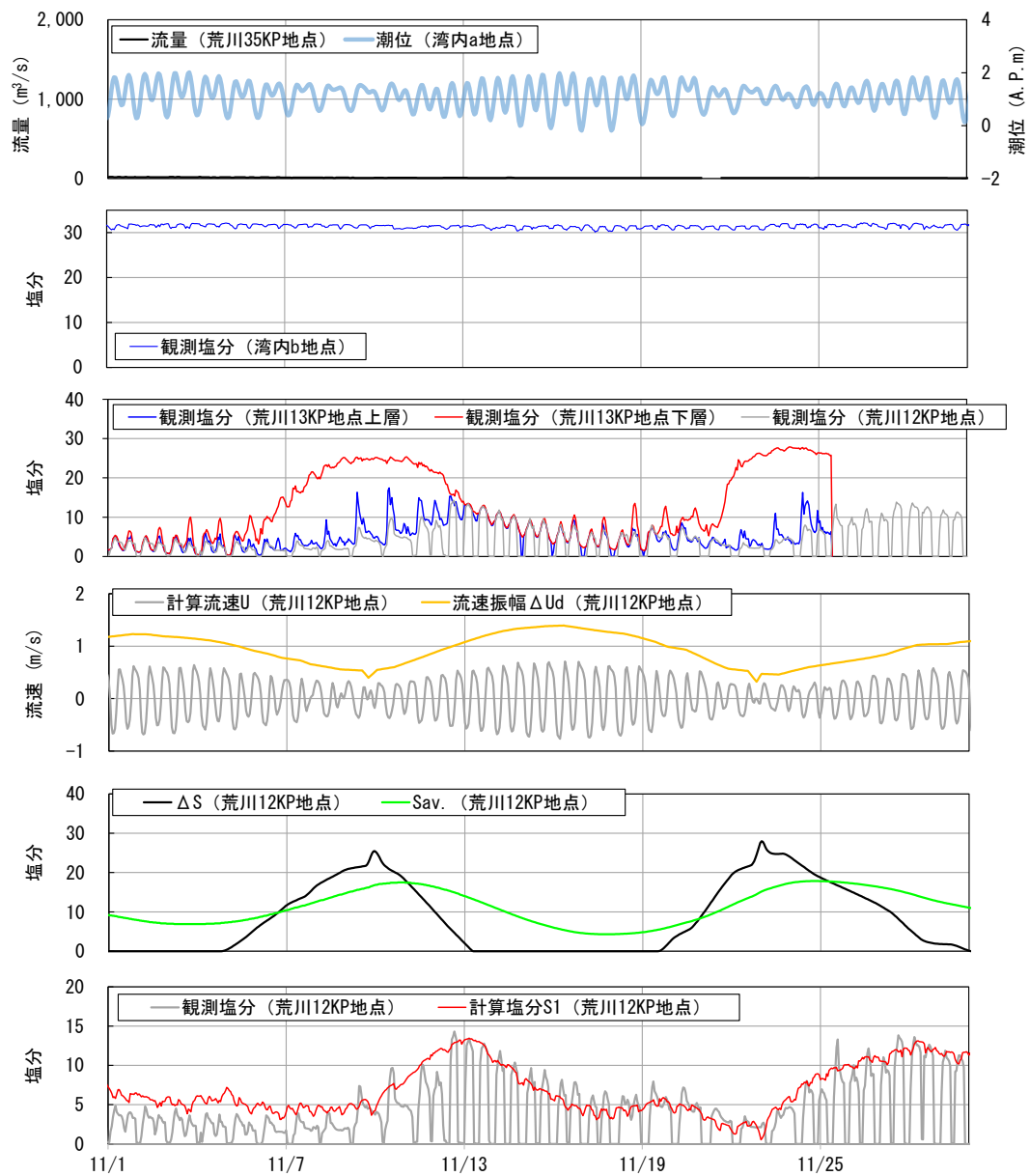


図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果（2020 年 11 月）

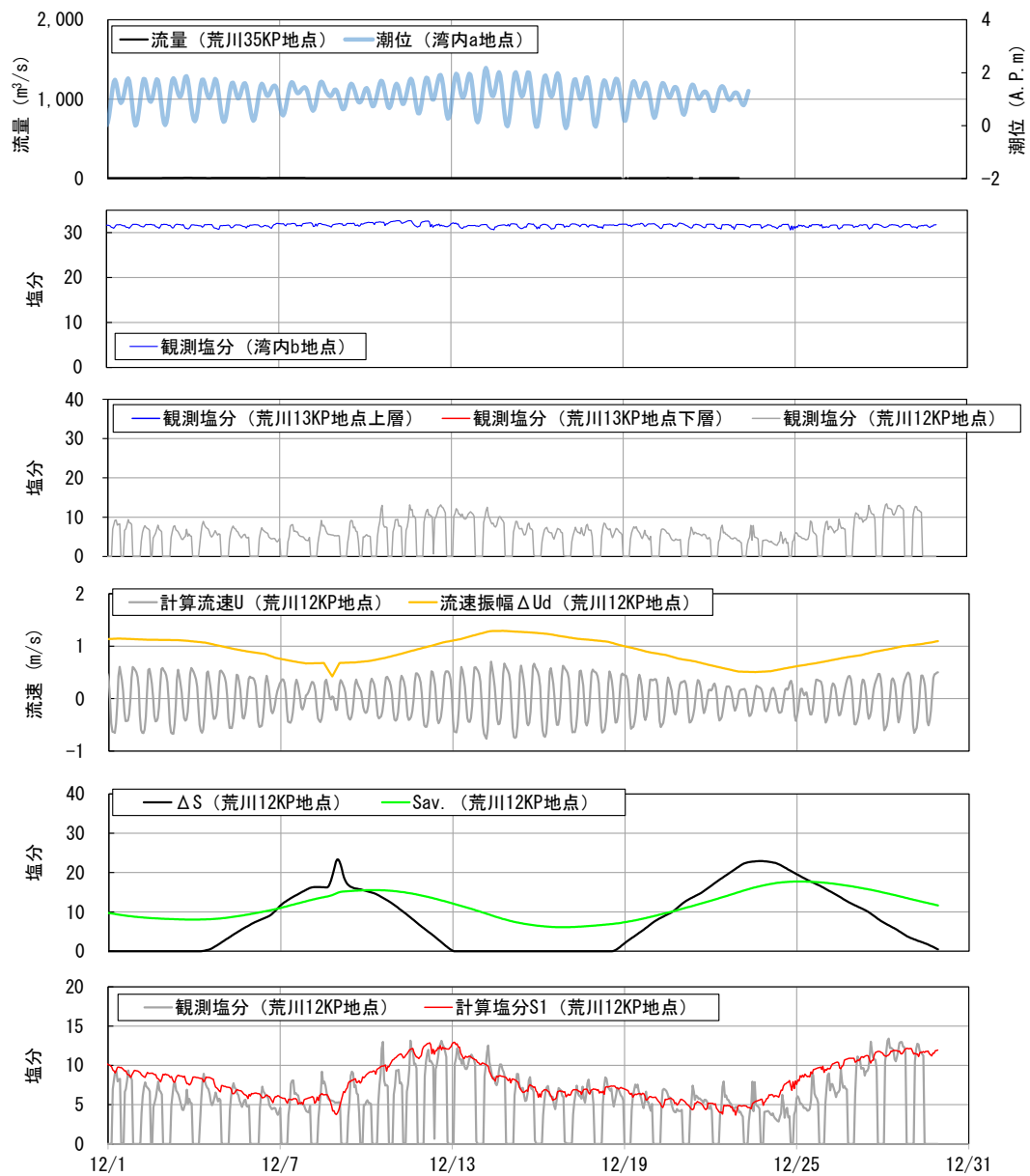


図 3-29 低水路河岸表層塩分の再現結果（2020 年 12 月）

3-6 結語

第3章では、河岸湿地に流入する河川表層水の塩分推定モデルを開発した。まず、既存の観測施設の観測データと本研究の現地観測で得られた低水路表層の塩分等の観測データから、荒川の塩分遡上の特徴を把握した。まず、河道流量が少なく、東京湾塩分が安定している冬季（2020年2月11日から同年3月15日）の観測データから、荒川13KP地点の観測塩分は小潮時、中潮時、大潮時に以下の挙動を示すことが分かった。

- ・低水路の塩分は、小潮時には潮汐振幅の低下に伴い成層化が促進されるので、下層塩分は上昇し、表層塩分は低下する。
- ・中潮時には鉛直混合が活発になるので両者の差が縮まり、大潮時には強混合となるので両者はほぼ一致する。
- ・大潮時には強混合になるとともに河口からの塩水侵入長が減少し、当該地点の塩分は減少する。

次に、一山波形の出水（2020年1月29日から2月1日）中の塩分は、全層でほぼゼロとなる一方、その影響は出水中の短期に限定されることが分かった。

低水路表層塩分推定モデルは、半年間や1年間オーダーの長期の計算を可能とする必要があるが、モデル化の第一段階として、まず、河道流量が少なく東京湾塩分が安定している冬季を対象とした。モデル化においては、長期の計算には実務上の制約が大きい三次元や鉛直二次元の高次のものではなく、簡単な一階の微分方程式で表現される半経験的なモデルを開発した。この半経験的なモデルは、小潮時の塩分成層化を表す指標として「下層と表層の塩分差（ ΔS ）」、強混合に伴う塩水層後退の指標として「下層と表層塩分の平均値（ S_{av} ）」を設け、低水路の流速振幅 ΔU_d との関係を一階の微分方程式で表現したものである。出水の影響は、 ΔS_{av} と河道流量の関係を定式化することにより考慮した。モデルの検証の結果、荒川13KP地点の塩分を再現できるとともに、一階の微分方程式の定数を変更することにより、荒川12KP地点 St.B（五反野ワンド前面）の低水路表層塩分も良好に再現できることを示した。

上記のモデルでは、4月下旬以降の出水期の計算結果が観測値より高く、再現性が十分ではなかったが、この理由として、河道への塩分の供給源である海域の塩分低下の影響が予想された。このため、東京湾塩分と低水路表層塩分の間を定式化し、上記の低水路表層塩分推定モデルに組み込んだ。その結果、出水期を含む通年で、計算結果は観測値を良好に再現できることを示した。

【参考文献】

- 1) 林ら：利根川感潮域における塩水流動の現地観測および数値シミュレーション，土木学会論文集 B1（水工学），67 巻 4 号，pp.I_1597-I_1602，2011.
- 2) 中本，新谷ら：海面上昇を考慮した釧路湿原への塩水遡上の影響評価，土木学会論文集 B1（水工学），67 巻 4 号，pp.I_1351-I_1356，2011.
- 3) 松村ら：分岐合流を有する感潮河道における塩水遡上運動の三次元流動シミュレーション，土木学会論文集 B1（水工学），73 巻 4 号，pp.I_1039-I_1044，2017.
- 4) 金子祐，Nerriezza OLAP，梅田雄太，横山勝英：荒川河口域・隅田川の塩分遡上
が平常時の水分派に与える影響，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.75，No.2，
pp.I_205-I_210，2019.10.
- 5) 国土技術政策総合研究所：荒川河口域における混合形態に伴う Chlorophyll-a 動態と
海域への河川流入負荷量変動，国総研資料 第 87 号，2003.6
- 6) 汽水域の河川環境の捉え方に関する検討会：汽水域の河川環境の捉え方に関する手
引書，pp.3-9，2004.5.
- 7) 日田吉信・上野公彦：ゼロクロス法におけるシミュレートされた海洋波の統計的検
証，水産工学，54巻3号，pp.173-184，2018.2
- 8) 国土交通省荒川上流河川事務所：秋ヶ瀬堰取水量・下流放流量，
<https://www.ktr.mlit.go.jp/arajo/i/kouiki/history/oakg-out.htm>（24時間分のデータを毎日
ダウンロードして使用）
- 9) 気象庁HP：潮位表 東京(TOKYO)東京都中央区晴海5丁目
<http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/suisan.php>
- 10) 真貝寿明：徹底攻略 常微分方程式，共立出版，p.47，2010.8.
- 11) 吉井洋二：テイラーの定理について，秋田高専研究紀要第48号，2012.12.12

なお，本章の内容は，下記の論文で公表済みである．

- 1) 黒田直樹，横山勝英，石川忠晴：東京都荒川下流部の五反野ワンド内干潟湿地に
おける土壌塩分状態の推定法に関する研究，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.76，
No.2，pp. I_1285-I_1290，2020.
- 2) 黒田直樹，横山勝英，石川忠晴：大河川下流部における汽水性干潟湿地の設計の
ための土壌塩分の長期推定モデルの開発，河川技術論文集,第 27 巻，pp.347-
352,2021.6.

第4章 湿地内の土壌塩分のモデル化

4-1 緒言

4-1-1 本章の目的

第4章では、湿地土壌の塩分推定モデルの開発を目的とする。まず、2019年の台風第19号出水において五反野ワンドが冠水した後に、2020年の1年間の土壌間隙水塩分の現地計測の結果から、塩分回復過程を把握する。また、簡易透水試験の結果から、土壌への塩分の供給特性を考察する。

そして、土壌塩分を通年で推定できる手法を提案するため、第3章で開発した低水路表層塩分推定モデルと同じ一階の微分方程式で表現される半経験モデルを導入し、その適用性を確認する。

4-1-2 既往の研究と課題

湿地の土壌塩分の挙動に着目した既往の研究は、海外では多数みられ、例えば、土壌塩分の調査手法に関する研究^{1)~3)}や土壌塩分と生物種の関係に着目した研究^{4),5)}などがある。国内に目を向けると、ヨシをはじめとした植生の生育環境と土壌塩分に関する研究が多い。例えば、山田は、汽水域に生育するヨシが選好する物理環境として、潮汐水位、塩分、冠水時間とヨシの成長速度の関係を調査している⁶⁾。杉本・矢持は、大阪湾の人工干潟を対象に、ヨシ群落が生育可能な土壌塩分を明らかにしている⁷⁾。しかし、これらの研究は現地観測に基づくものであり、土壌塩分の予測については触れられていない。ヨシ原の保全や創出を目的とした研究もみられる。例えば、本研究の対象河川である荒川の平均満潮位と同干潮位と地盤高の関係から、生育に望ましい地盤高を研究したものが⁸⁾。しかし、塩分の影響は考慮されていない。

土壌塩分の推定モデルの研究は事例が少ないが、Lin・Ishikawa et al.は、中国の双台湿地のヨシ原を対象に開発を行っている⁹⁾。しかし、モデルの入力条件となる湛水量と湛水塩分は雨量のみにより決定され、潮汐に伴う低水路塩分の変化を考慮できていない。

4-1-3 検討フロー

第4章の検討フローを図4-1に示す。フロー図は、第2章、第3章とのつながりを含めて整理している。

「4-2-1 鉛直方向の変動特性把握」では、「2-3 現地観測」の結果から、五反野ワンド（St.A）の土壌塩分の鉛直方向の変動特性を把握した。次に、「4-2-2 土壌の透水性の把握」では、生物由来の穴による土壌塩分への影響をみるため、みださずに採取した土壌試料とみだした試料の透水係数を求めた。この結果、みださない試料の透水係数は、みだした試料の 10^4 オーダー大きくなることを示した。

「4-3 土壌塩分のモデル化」では、土壌塩分が湛水塩分に対し時間遅れをもって変動することを踏まえ、第3章で構築した低水路表層塩分推定モデルと同じ式形をもつ一階の微分方程式を採用した。このモデルに、低水路表層塩分推定モデルの計算結果を入力条件として検証を行い、出水期を含む通年で、土壌塩分を良好に再現した。

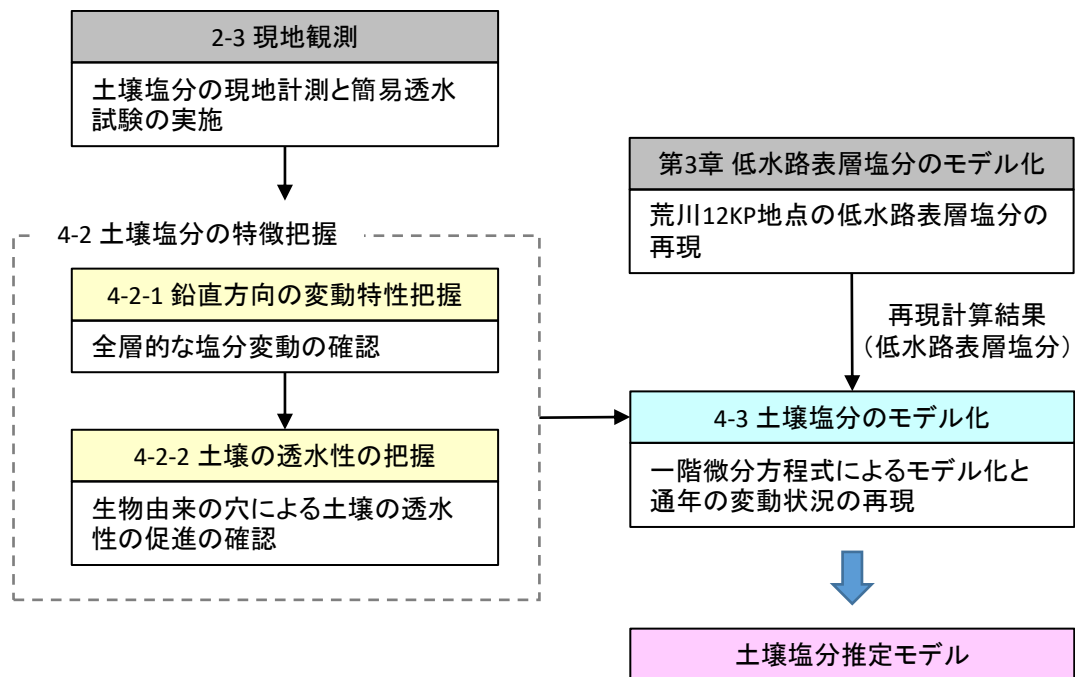


図 4-1 検討フロー

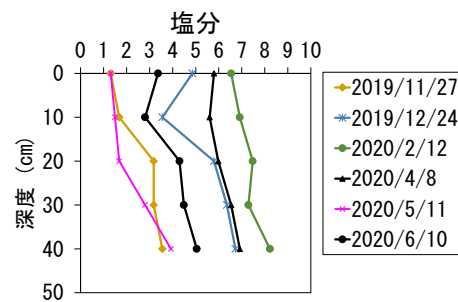
4-2 土壌塩分の特徴把握

4-2-1 鉛直方向の変動特性把握

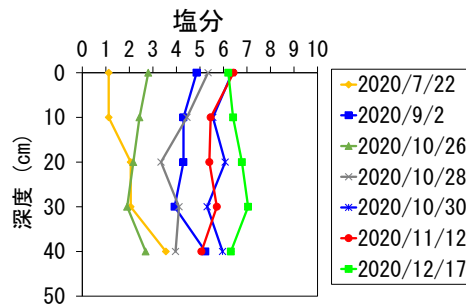
「2-3-3 土壌塩分の現地計測」で述べた，St.A における 2020 年 6 月までの土壌塩分の現地計測結果を図 4-2(a)に，その後の現地計測で得られた結果を図 4-2(b)に示す．土壌塩分はともに，深度 40cm を含む全層でほぼ一様に変動している．

さらに，日単位の土壌塩分の変化速度を把握するため，2020 年 10 月に 2 日おきに同調査を実施した．その結果を図 4-2(c)に示す．土壌塩分は全層でほぼ一様に増加しており，湿地に流入した塩分は速やかに土壌中に浸入してゆくことが分かった．

(a)2020 年 6 月まで



(b)2020 年 7 月以降



(c)うち 10 月 26, 28, 30 日

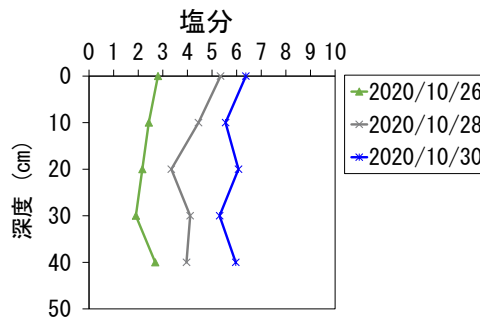


図 4-2 土壌塩分の現地計測結果 (St.A)

なお、図 4-2(a)に示す土壌塩分の第一回目の現地計測は 2019 年 11 月 27 日であったが、以降の現地計測に比べ土壌塩分がかなり低かったことがわかる。2019 年 10 月 13 日には台風第 19 号が発生し、写真 4-1 に示したように、五反野ワンドを含む高水敷全面が冠水した。図 2-18 で述べたように、本出水により塩分計が故障したため、湛水塩分は観測できていないが、淡水が長期にわたり冠水し土壌中の塩分が希釈されたと考えられる。これが、11 月 27 日の土壌塩分が低かった理由と考えられる。



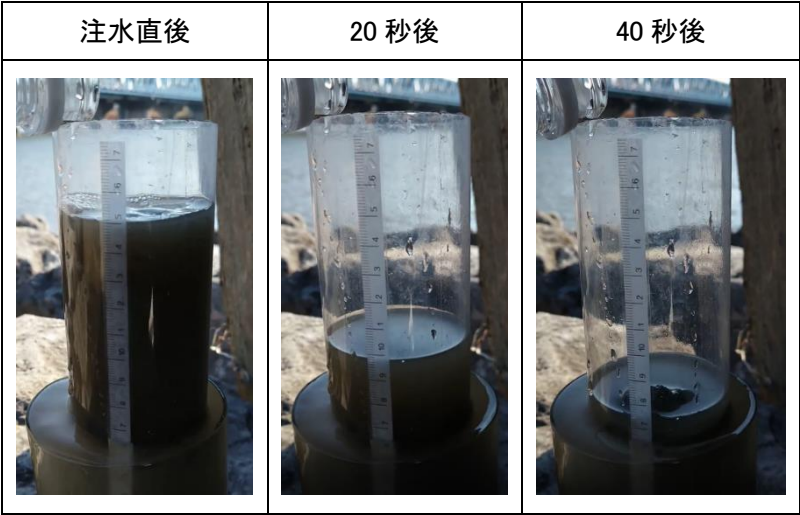
写真 4-1 2019 年台風第 19 号出水後のようす（2019 年 10 月 13 日 12 時撮影）

4-2-2 土壌の透水性の把握

(1) 簡易透水試験結果

みだした試料とみださない試料の経過時間と水位低下のようすを写真 4-2 に示す. また, これをグラフにプロットし透水係数を求めたものを図 4-3 に示す. みださない試料では, 表層では 40 秒で 7.6cm, 中層では 6.3cm 水位が低下した. 下層では 60 秒で 4.4cm 水位が低下した. このときの透水係数 k_m は表層からそれぞれ 1.3×10^{-1} , 6.6×10^{-2} , $1.9 \times 10^{-2}(\text{cm/sec})$ であった. これらの透過係数は砂礫質に相当¹⁰⁾する値であった. 次に, みだした試料の水位低下速度は 3 日で 1.3cm, 透水係数 k は $1.2 \times 10^{-6}(\text{cm/sec})$ であった.

(a)みださない試料



(b)みだした試料

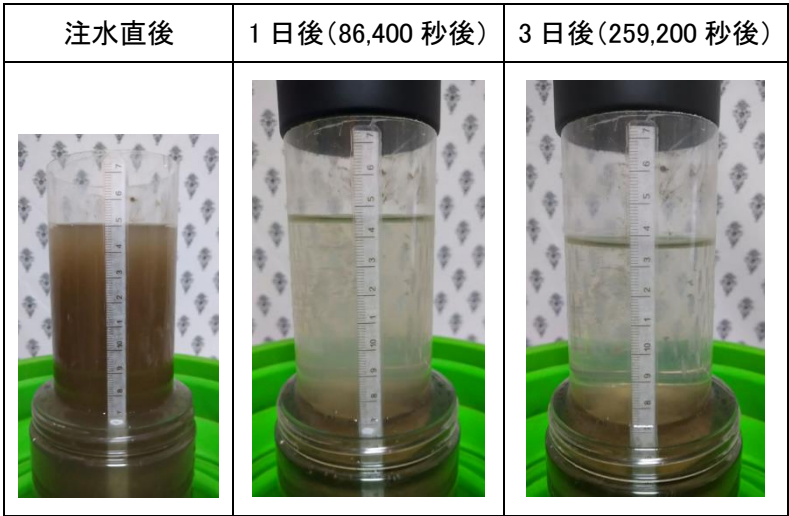


写真 4-2 経過時間と水位低下量

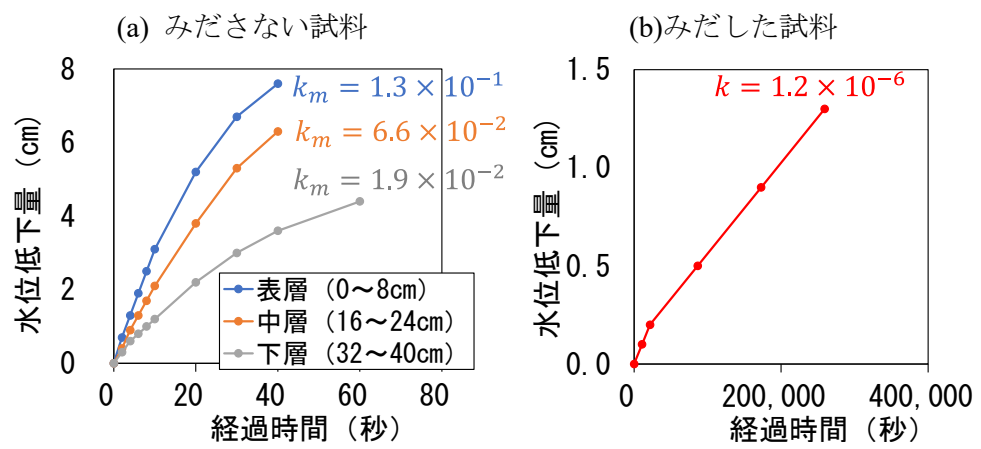


図 4-3 簡易透水試験結果

(2) 底質の粒度分布

図 4-3(a) の透水係数と土壌の粒径の関係を調べるため、湿地内の土壌試料を表層～10cm で採取し JIS1204¹¹⁾に従い粒度試験を実施した。得られた粒径加積曲線を図 4-4 に示す。粒径成分は粘土分 16.2%，シルト分 55.9%，細砂分 27.4%でありシルト・粘土質が 72.1%であった。20%粒径は 0.007mm であり、この粒径の透水係数 k は $1 \times 10^{-6}(\text{cm/sec})$ オーダーであることが知られている¹⁰⁾。これは、みだした試料の透水係数 $1.2 \times 10^{-6}(\text{cm/sec})$ と同程度である。以上より、みださない試料の透水係数は、底質の土質物性から決まる透水係数よりも 10^4 オーダー大きいことが分かった。

なお、荒川の低水路の河床材料は代表粒径 0.09mm¹²⁾であり、五反野ワンドより粒径はこれより若干小さい。



写真 4-3 採取試料

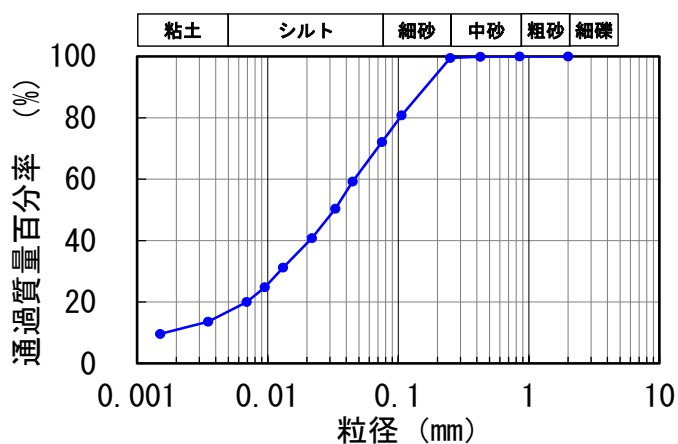


図 4-4 湿地土壌の粒径加積曲線

(3) 土壌塩分の供給イメージ

簡易透水試験の結果を踏まえ、土壌への塩分供給形態を図 4-5 のように模式化することができる。すなわち、生物由来の穴の影響で塩水が底層まで速やかに浸透できる。なお図 4-3 (a)を見ると、上層と中層の 10 秒以降の水位低下速度はほぼ同じであるが、この理由は、写真 2-22 で見たようにゴカイ類の通過痕は深度 40cm まで存在するのに対し、カニ類の巣穴はこれよりも浅いためと推察される。

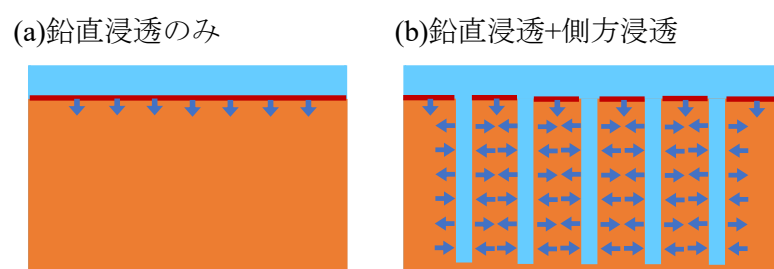


図 4-5 土壌塩分の供給イメージ

4-3 土壌塩分のモデル化

4-3-1 モデル化の方法

湛水と土壌の塩分の移動を模式化すると図 4-6 の通りとなる．土壌塩分のモデル化は，Lin ら⁹⁾に倣い式(4-1)に示す一次の伝達式を仮定し，経験定数（後述の式（4-2）の γ ）を観測データから同定することとした．



図 4-6 湛水塩分 S_0 と土壌塩分 S_f

$$\frac{d}{dt} \left(\int_H^0 S(t; z) dz \right) = \beta \{ S_0(t) - S_f(t) \} \quad (4-1)$$

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， β 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．

式(4-1)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 4-2 に示した深度 40cm までの観測結果では 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(4-1)は次式となる．

$$\frac{d}{dt} \{ S_f(t) \} = \gamma \{ S_0(t) - S_f(t) \} \quad (4-2)$$

ここに γ は経験的に定められる時定数である．

観測された S_0 を式(4-2)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．

4-3-2 モデルの検証

(1) 低水路とワンドの観測塩分の関係

低水路とワンドの観測塩分の比較を図 4-7 に示す。ワンドの観測塩分は湛水の値である。これより、ワンドの観測塩分は、低水路とほぼ連動して変動していることがわかる。なお値がゼロとなる時間帯は、ワンド水位が低下し池の底面が露出したときである（図 4-8）。ワンド水位は、低水路の水位とほぼ連動し、貯留効果はほとんどないことがわかる。

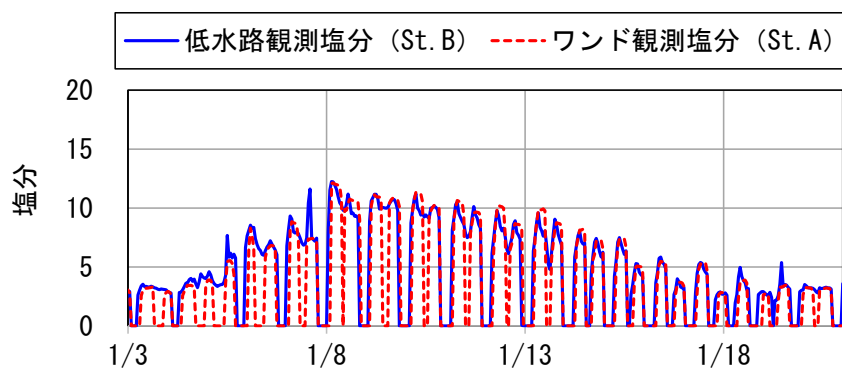


図 4-7 低水路観測塩分 (St.B) とワンド観測塩分 (St.A)

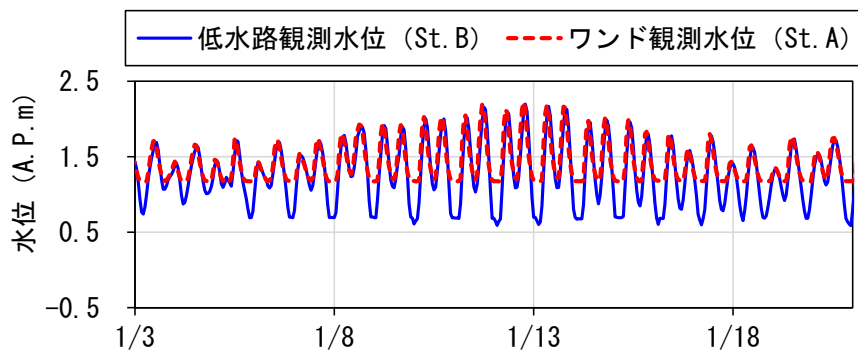


図 4-8 低水路観測水位 (St.B) とワンド観測水位 (St.A)

(2) 冠水時間の設定

さて、ワンド内の水位変化は本来、低水路との水交換量を仮定して水収支式から算出すべきだが、図 4-9 に示すようにワンド内水位の観測結果は、図 3-10 で示した一次元不定流計算による低水路水位にほぼ連動している。

また、図 4-7 および図 4-8 に示した通り、観測結果からも低水路とワンド内の水位と塩分はほぼ連動することが確認されている。そこで図 4-9 から湿地が冠水している時間帯を算出し、モデルから算出される低水路表層塩分の月齢変化を非冠水時にはゼロに置き換えると図 4-10 の赤線を得る。黒線は St.A での観測塩分であり、表層塩分が最大となる中潮時の一致度は高く、また全体的な傾向も似ているものの、小潮時に誤差が大きくなる。これは図 3-6 における直線外挿の限界であると考えられる。

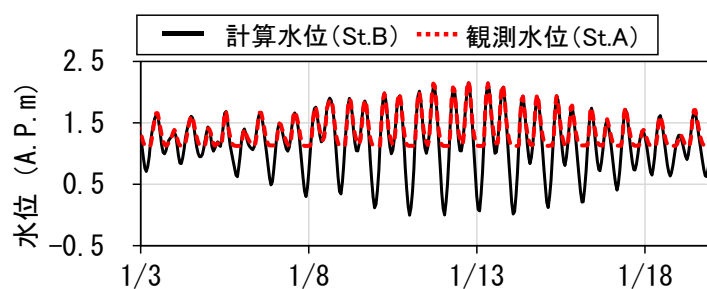


図 4-9 低水路計算水位 (St.B) とワンド観測水位 (St.A)

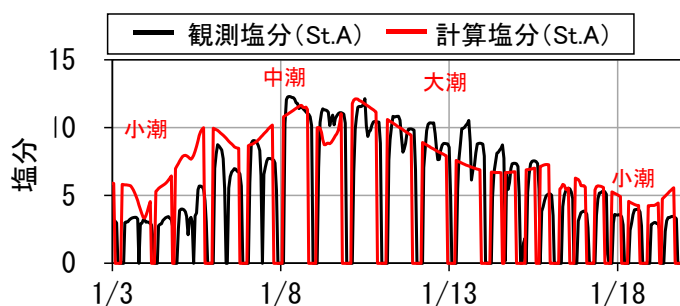


図 4-10 St.A の観測塩分と計算塩分

(3) γ の感度分析

ここでは、 γ を $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ の範囲で 5 ケース設定し、観測土壌塩分の再現性を確認した。前節の確認結果を踏まえ、境界条件には、低水路表層塩分推定モデルの検証結果を湛水塩分として用い、一次元不定流計算水位を湛水位としてそれぞれ用いた。土壌塩分の計算結果を図 4-11 に示す。また、各 γ を与えた場合の計算土壌塩分と観測土壌塩分を比較したものを次ページの図 4-12 に示す。計算土壌塩分と観測土壌塩分の相関性を示す決定定数 R^2 は $\gamma = 1.0 \times 10^{-5}$ (1/sec) の時に最大 (0.8396) となった。

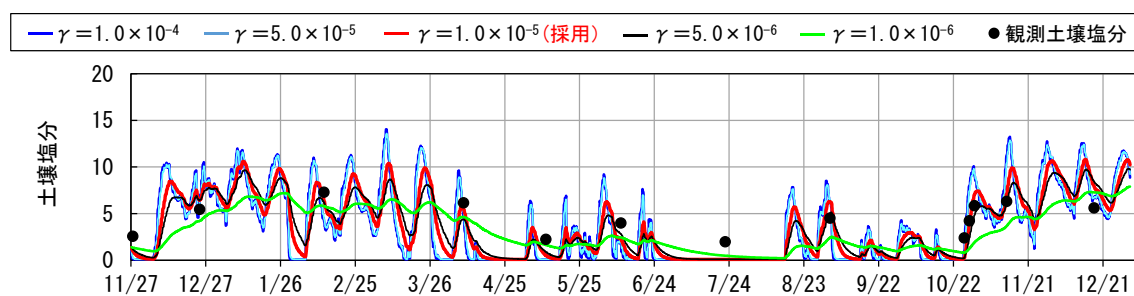


図 4-11 γ の感度分析

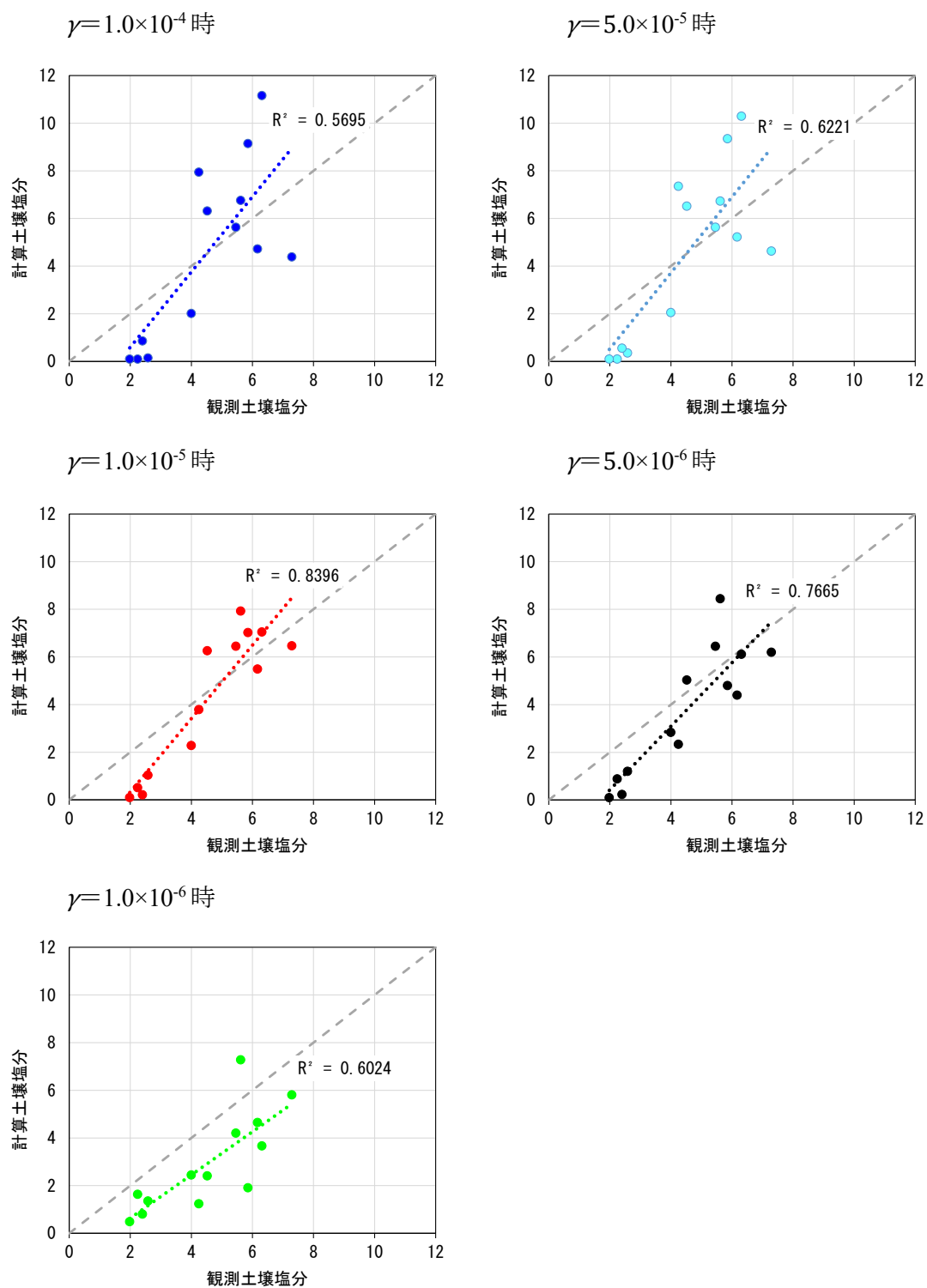


図 4-12 計算土壌塩分と観測土壌塩分の相関

(4) 検証結果

$\gamma=1.0\times 10^{-5}$ (1/sec) における土壌塩分の計算結果を図 4-13 中に赤線で示すが、計算結果は観測塩分を概ね再現することがわかる。観測塩分は、全層の計測結果の平均値をプロットしている。これより、出水期を含む通年の再現性が確保された。さて、図 4-13 の計算結果はほぼ 14 日周期で変動している。このことから湿地の塩分状態は月齢に従って変動すると考えられる。また図 4-13 より、計算結果は 10 月の 2 日おきの速やかな塩分変動とも一致した。これらのことから、本モデルは生物由来の穴による鉛直・水平の塩分移動を内包し、通年での計算が可能であることが示された。

本章で構築した土壌塩分推定モデルは、式 (4-2) に示したように低水路表層塩分推定モデルと同じ一階の微分方程式と同じ式形を持ち、モデルの経験定数の同定が完了すれば、一年のみならず数年～10 年オーダーの予測計算も容易である。

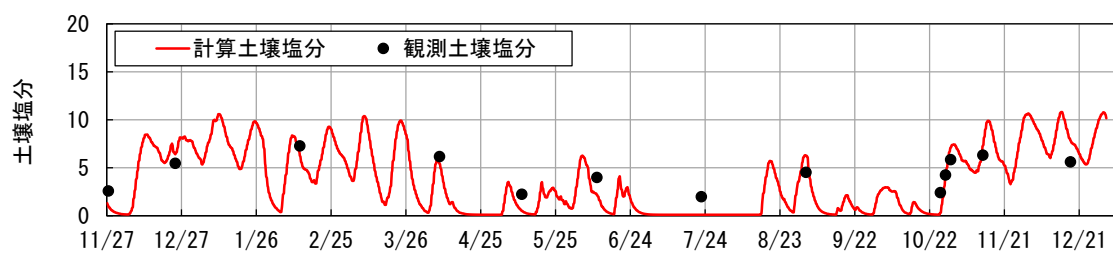


図 4-13 湿地内の土壌塩分の再現結果

4-3-3 考察

図 4-13 に示した再現結果を考察するため、図 4-14 の一段目～三段目に低水路および湾内の各種の観測データを示した。また、一番下のグラフには、低水路表層塩分の計算結果 S_I (3 章で再現)、土壌塩分の計算結果と観測値を示した。図 4-14 では全計算期間、図 4-15 では 1 ヶ月ごとに整理した。

これらの図より、土壌塩分の計算結果は、低水路表層塩分の計算結果 S_I よりピークが遅れて生起し、変動幅が緩和されていることがわかる。土壌塩分の現地計測は連続計測ではなかったため、土壌塩分推定モデルの再現性の確認には限界があるが、土壌塩分の観測値と計算結果は概ね対応していることと、2020 年 10 月の 2 日おきの観測値も概ね再現できている。

この様子を詳細にみるため、図 4-15 のうち、例えば 2020 年 1 月の再現結果を見ると、土壌塩分のピークは S_I より 2 日程度遅れていることが見てとれる。また、 S_I が極大となる 1 月 10 日の約 12 に対し、土壌塩分は 10 程度となっている。逆に極小値についてみると、 S_I の 1 月 19 日の 3 程度に対し、土壌塩分は 5 程度と予想される。また、1 月 26 日の出水時は、 S_I は急減しゼロとなるが、土壌塩分は緩やかに低下することが予想される。上記のことから、五反野ワンドの土壌塩分は、低水路の塩分変動に追随し、全層的に活発に変動する一方で、若干の緩和効果を有していると考えられる。

なお、図 4-14 に示した土壌塩分の計算結果のうち、7 月 22 日の計算土壌塩分はゼロとなっているのに対し、観測土壌塩分は 2 程度となっている。表 2-6 の土壌塩分計の仕様に示したように、計測器の電気伝導率はゼロまで対応しているため、観測土壌塩分は実際に正の値 (2 程度) となっていたと考えられる。

この理由の一つとして、土壌中に塩分が残留していた可能性が挙げられる。つまり、図 4-3 で見たように、生物由来の穴をなくしたみだした試料の透水係数は、粘土・シルトに相当し、土壌中の塩分を含む水分は長期間残留していたと推察される。もう一つの可能性としては、ナトリウムイオン以外のイオン (例えばカリウムイオンやカルシウムイオン) の影響の可能性が考えられる。

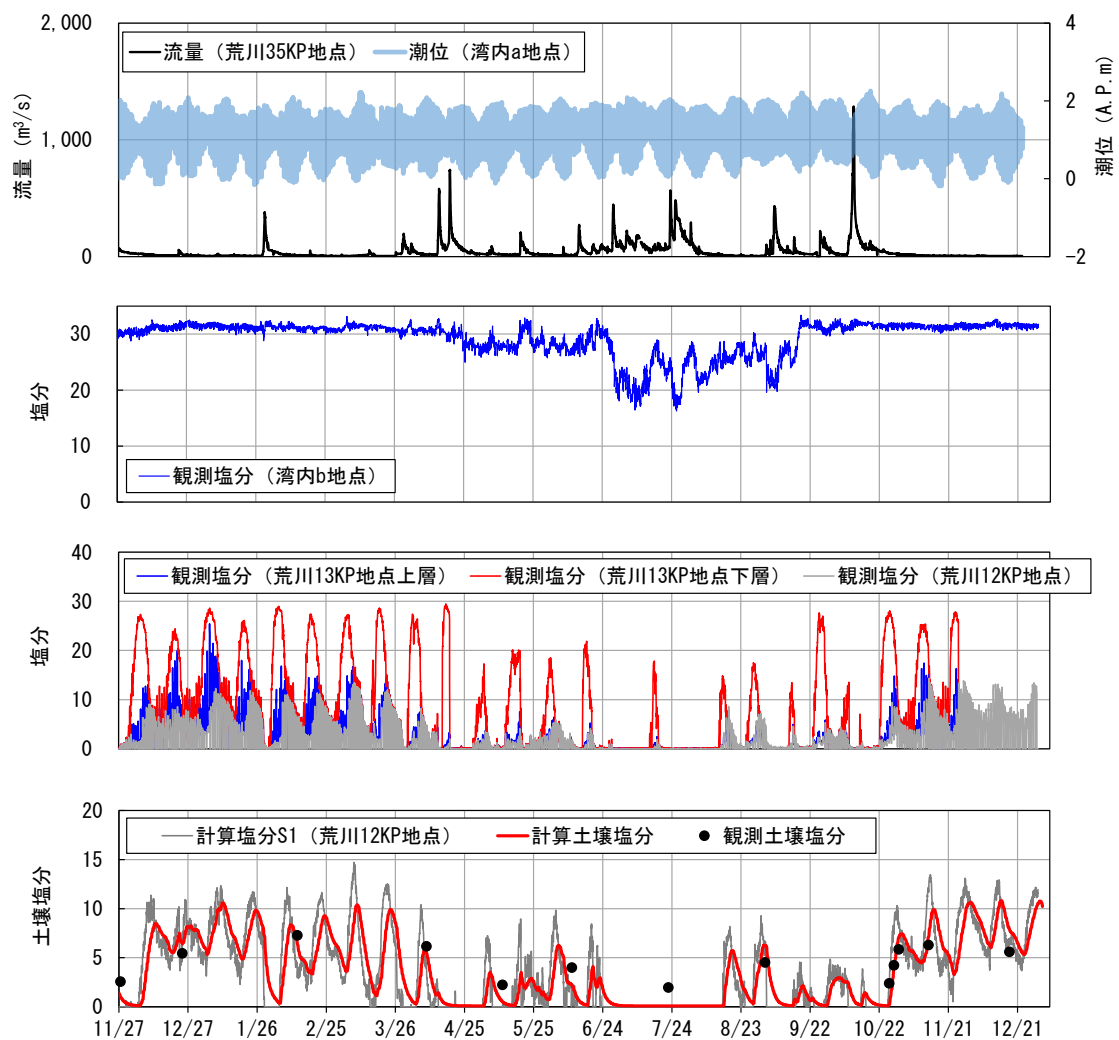


図 4-14 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ（全期間）

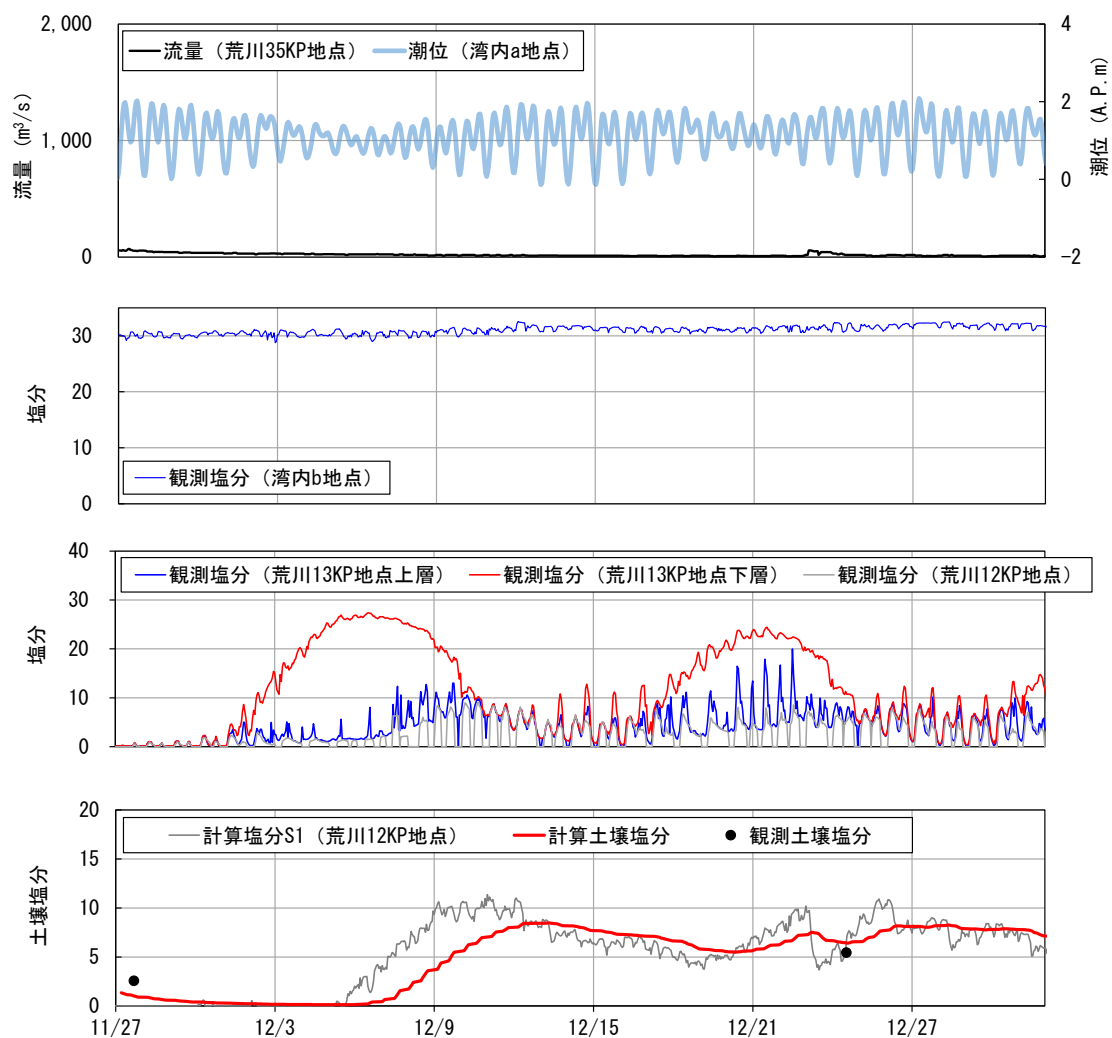


図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ (2019 年 12 月)

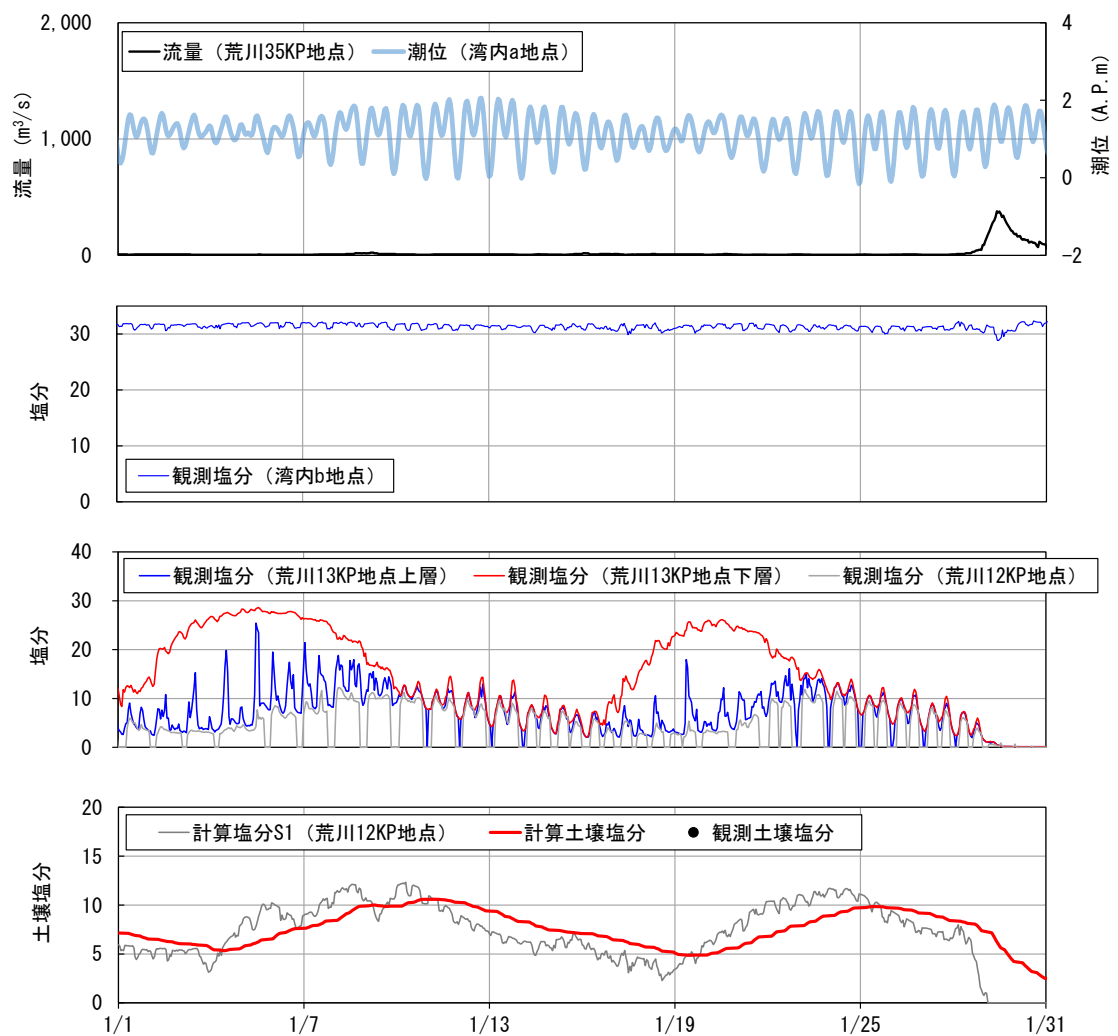


図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ（2020 年 1 月）

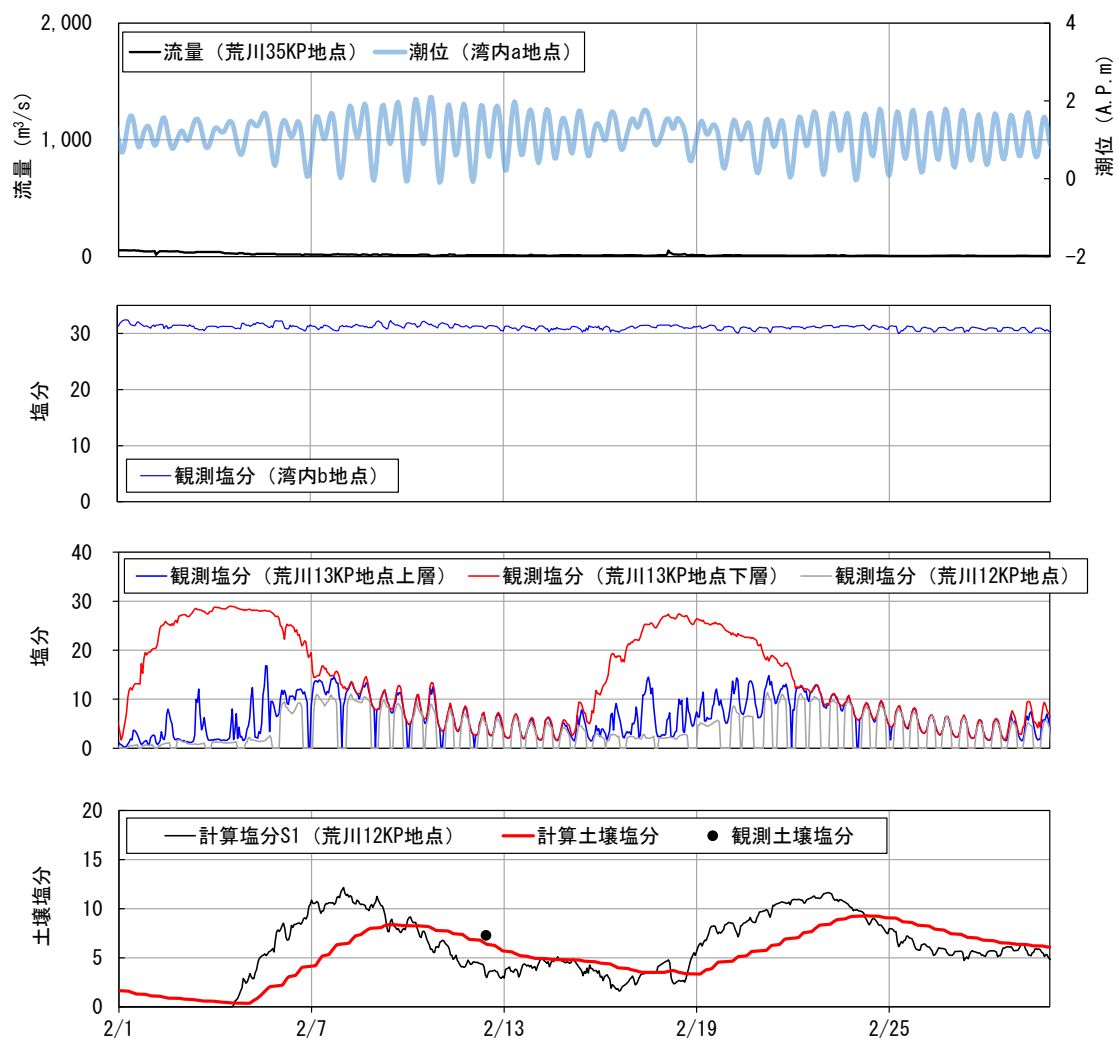


図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ（2020 年 2 月）

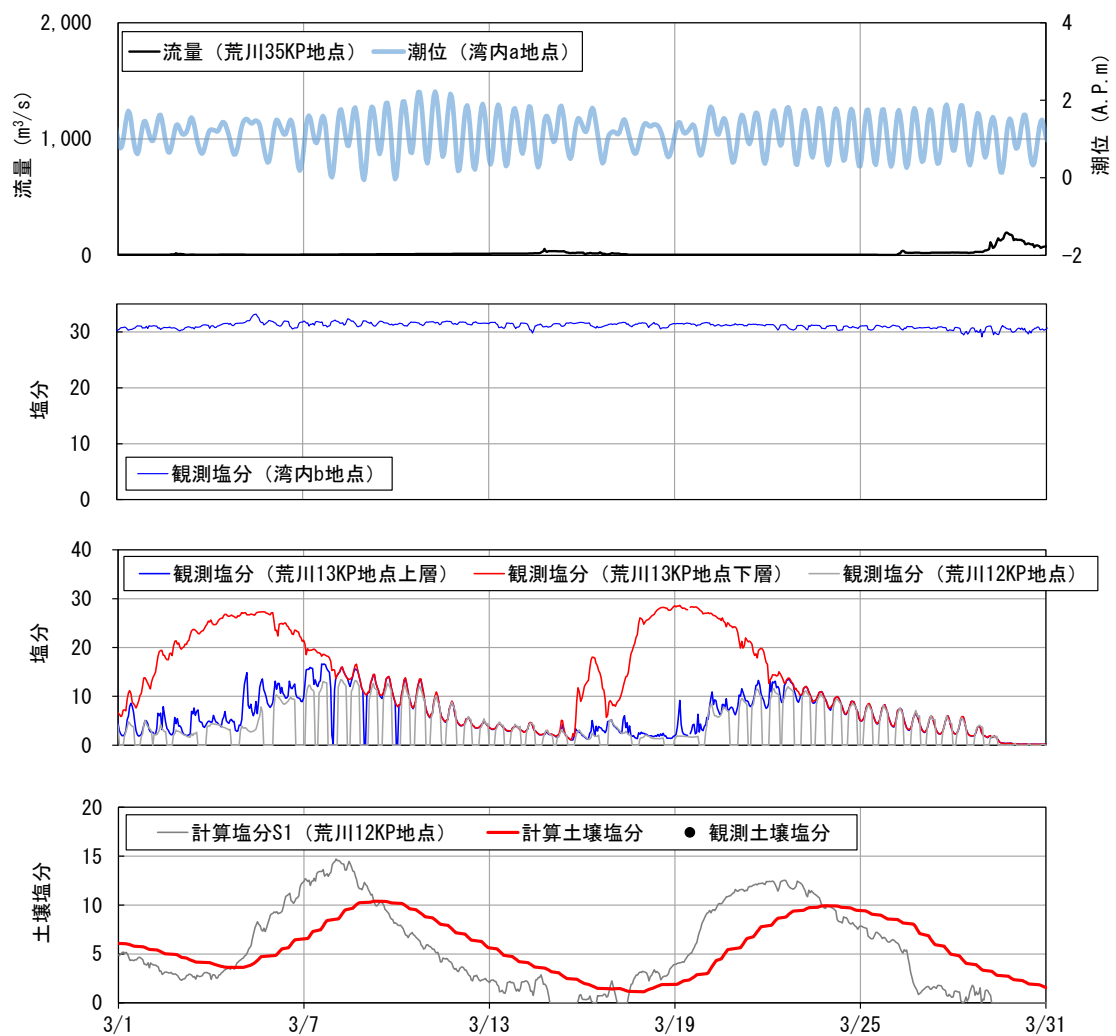


図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ (2020 年 3 月)

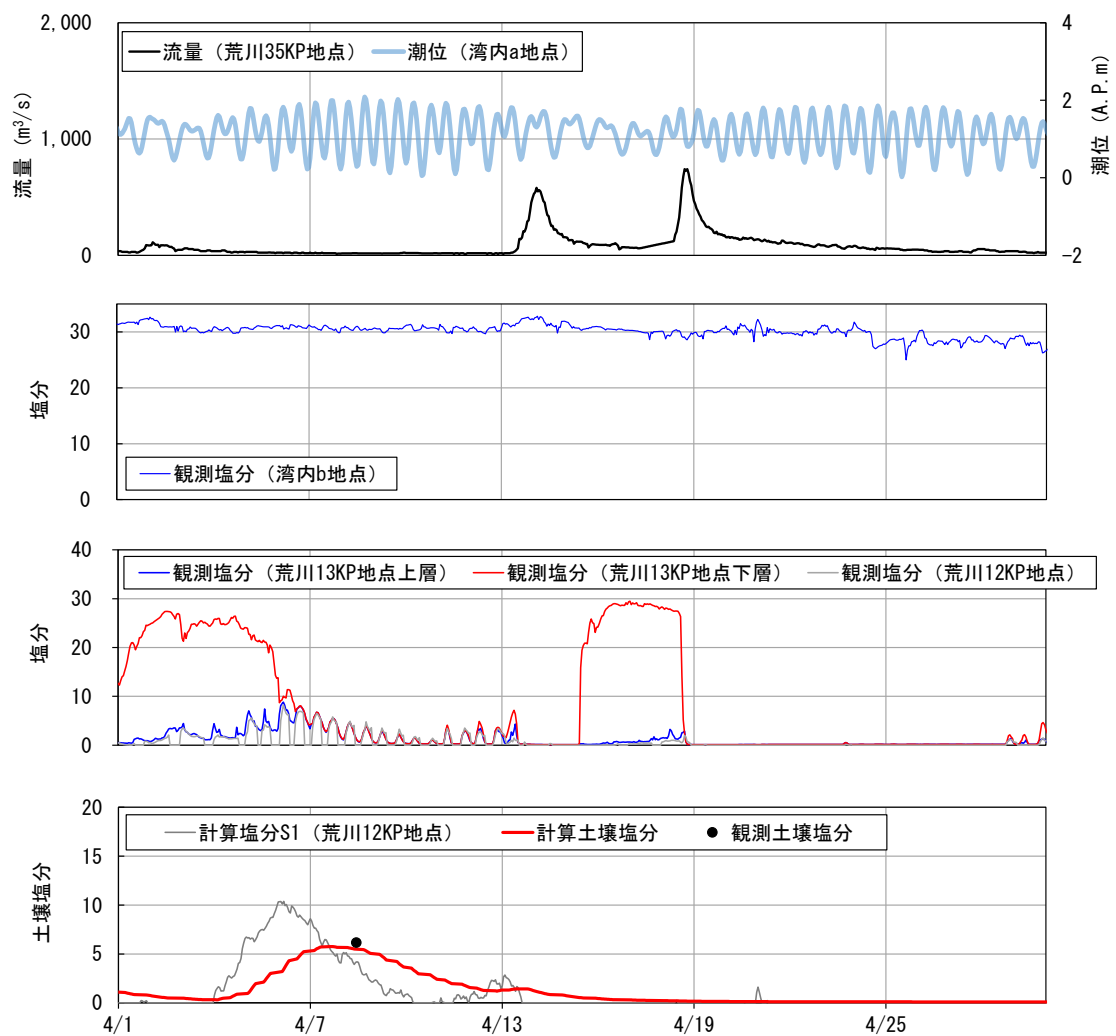


図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ（2020 年 4 月）

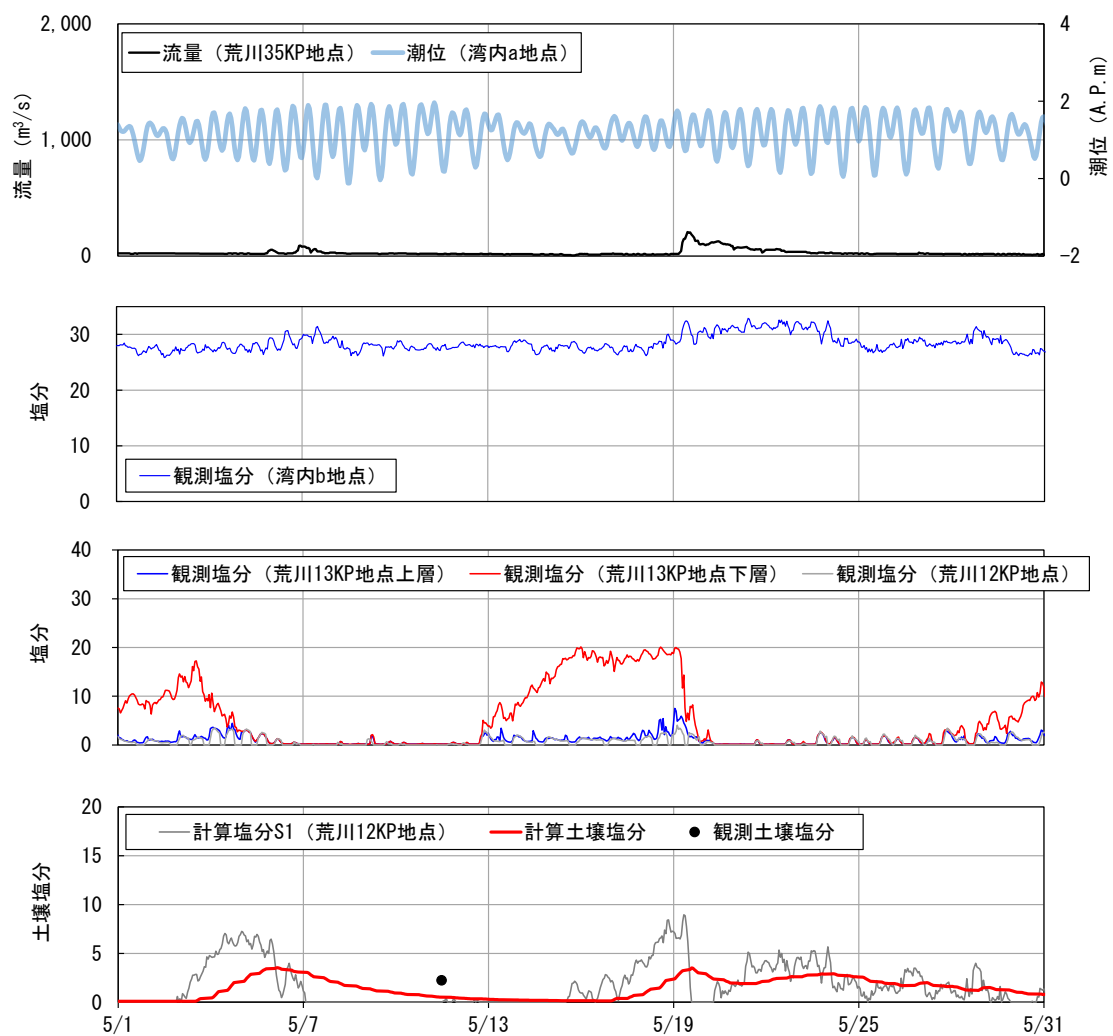


図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ (2020 年 5 月)

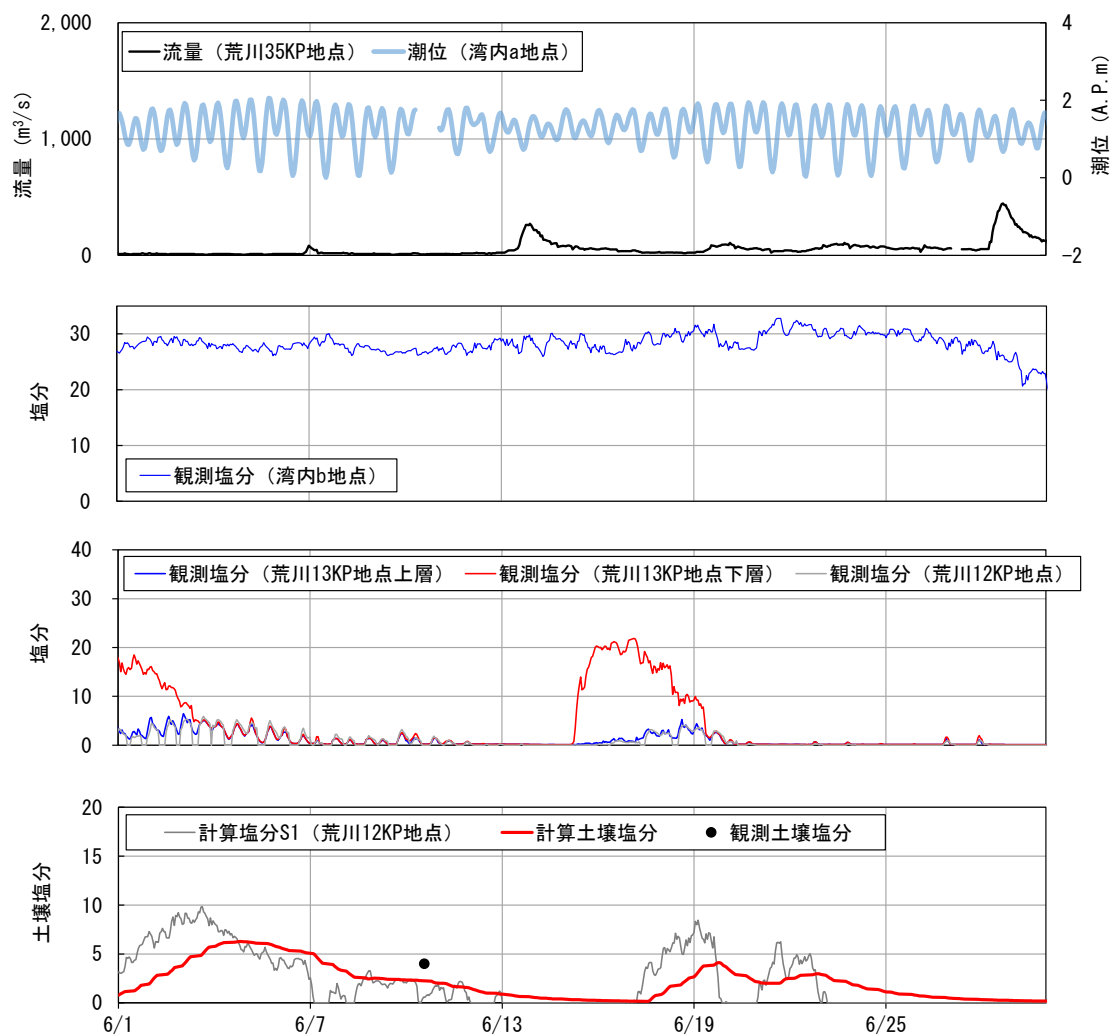


図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ（2020 年 6 月）

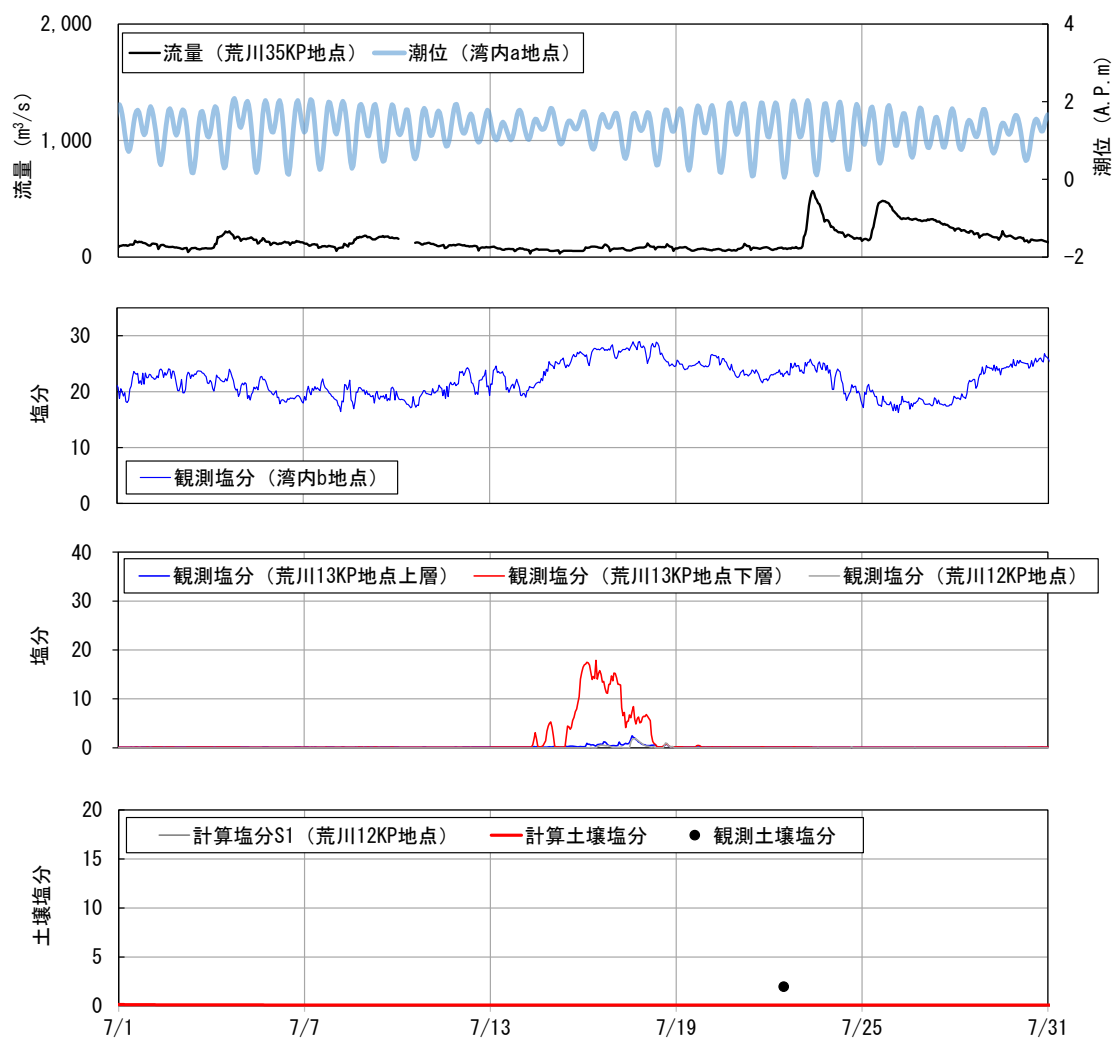


図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ（2020 年 7 月）

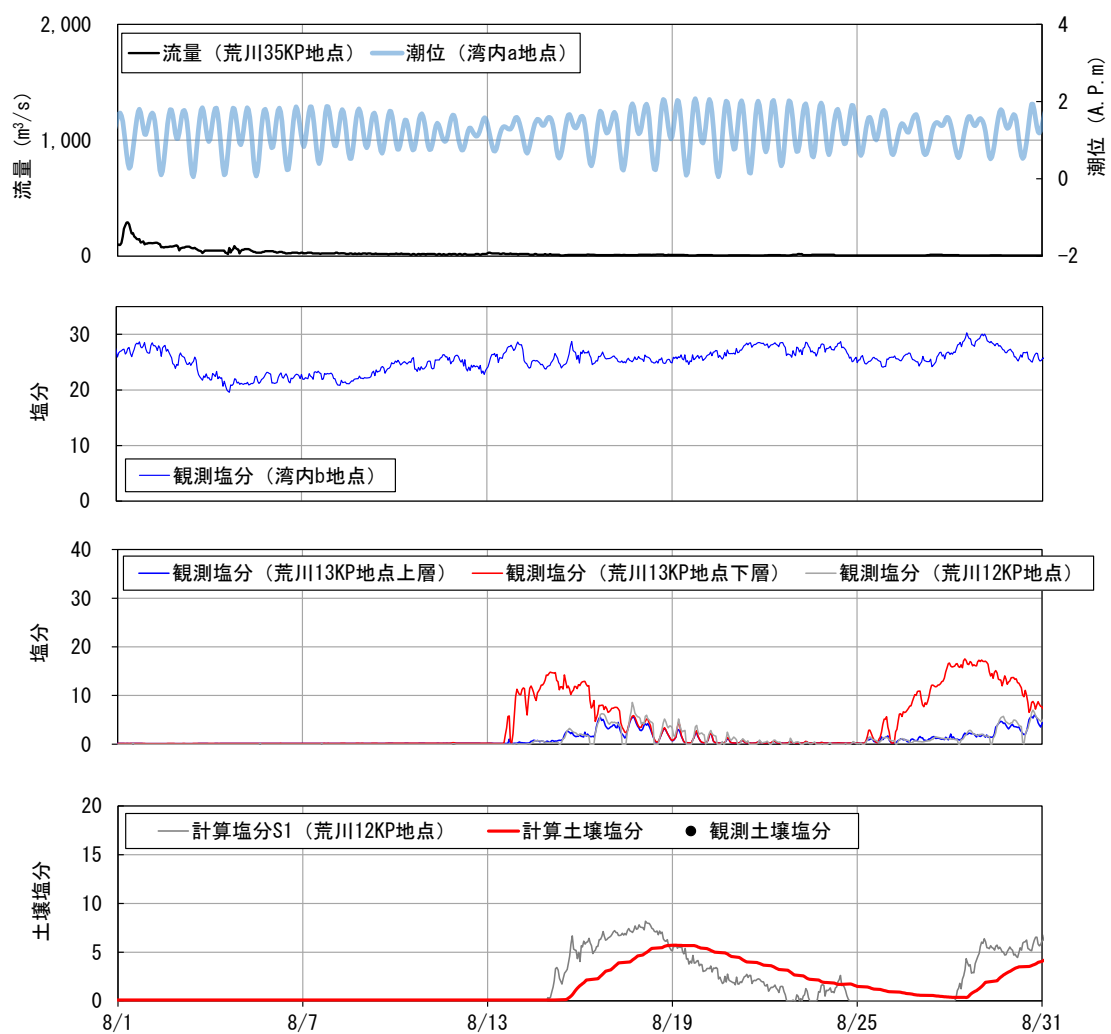


図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ（2020 年 8 月）

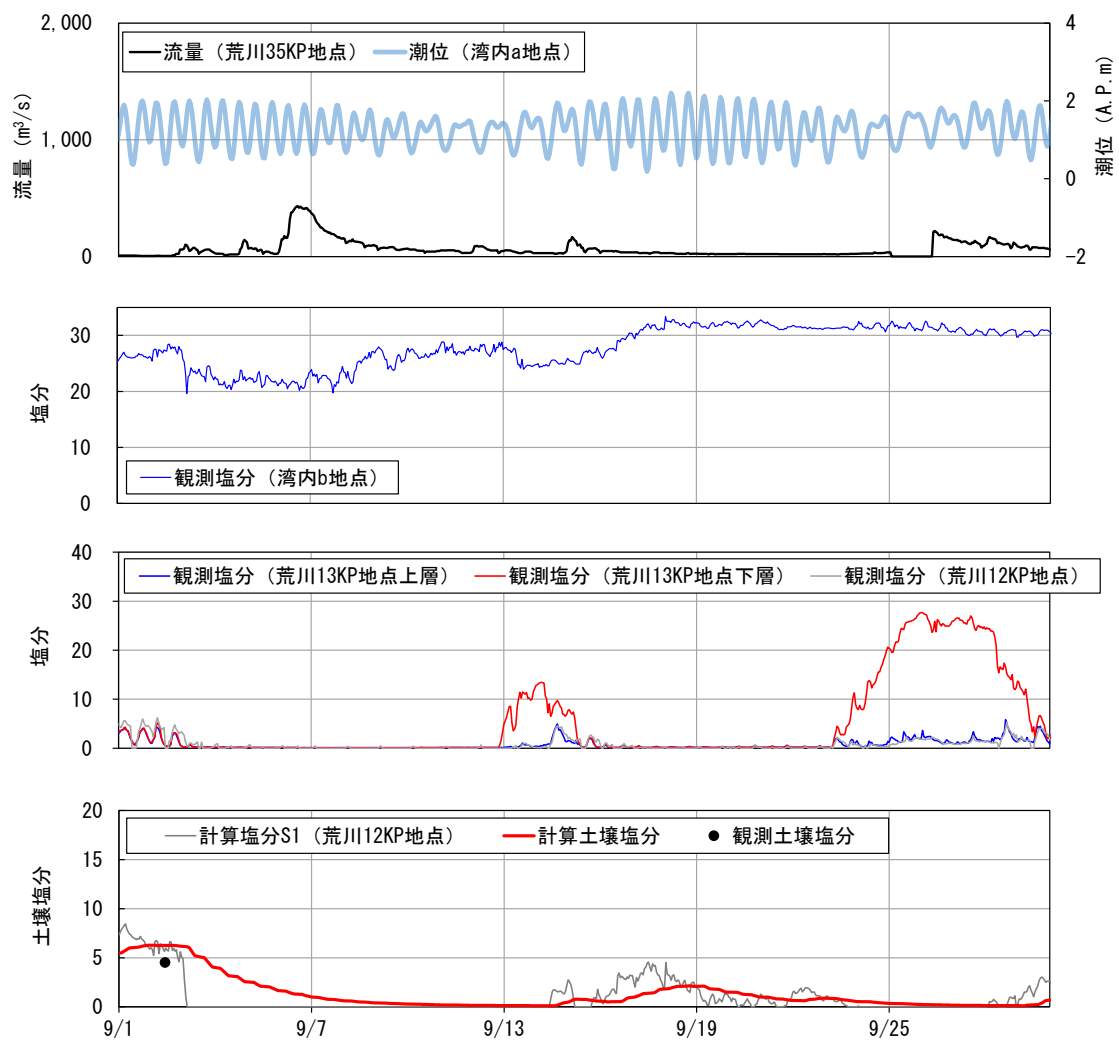


図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ（2020 年 9 月）

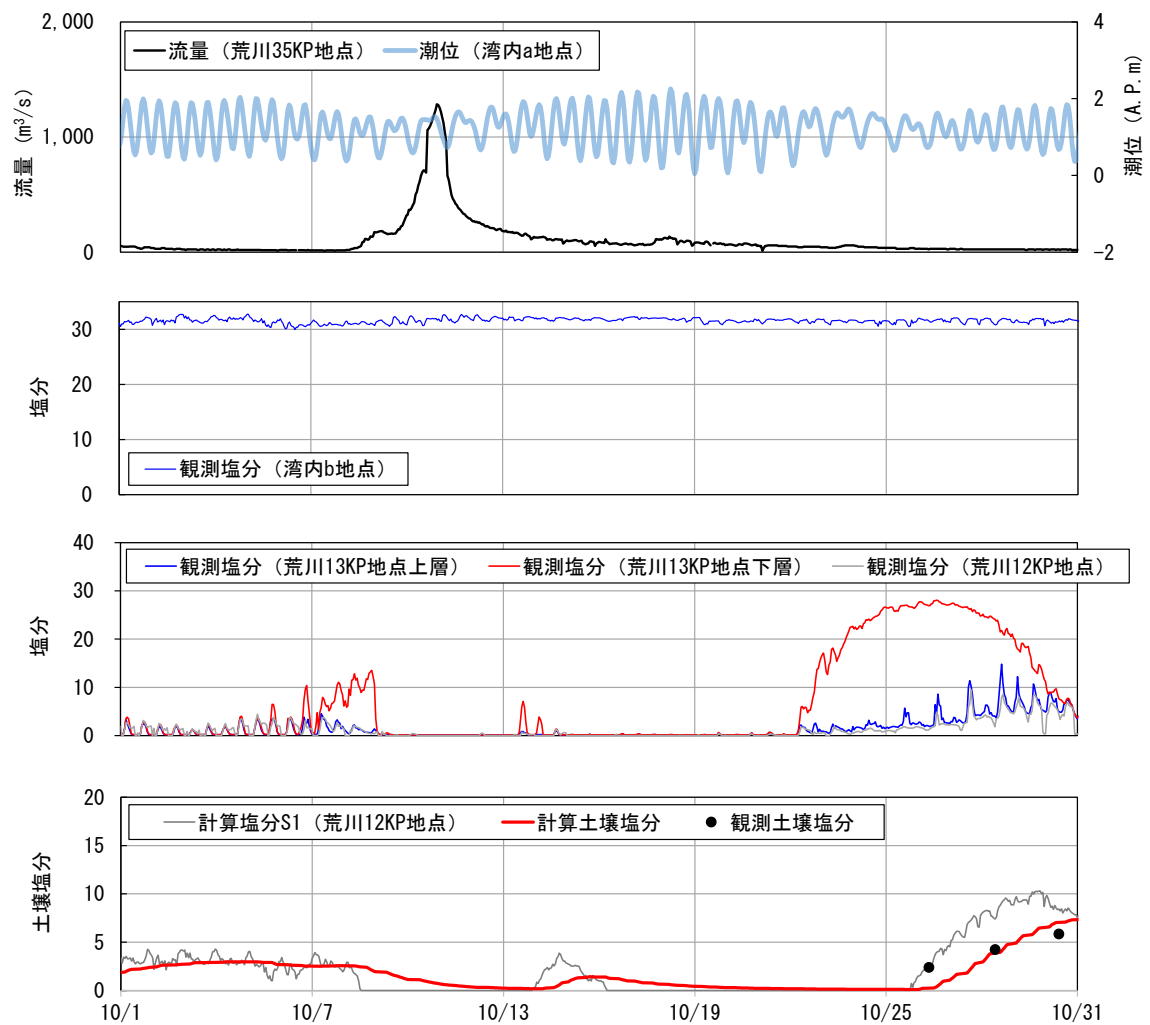
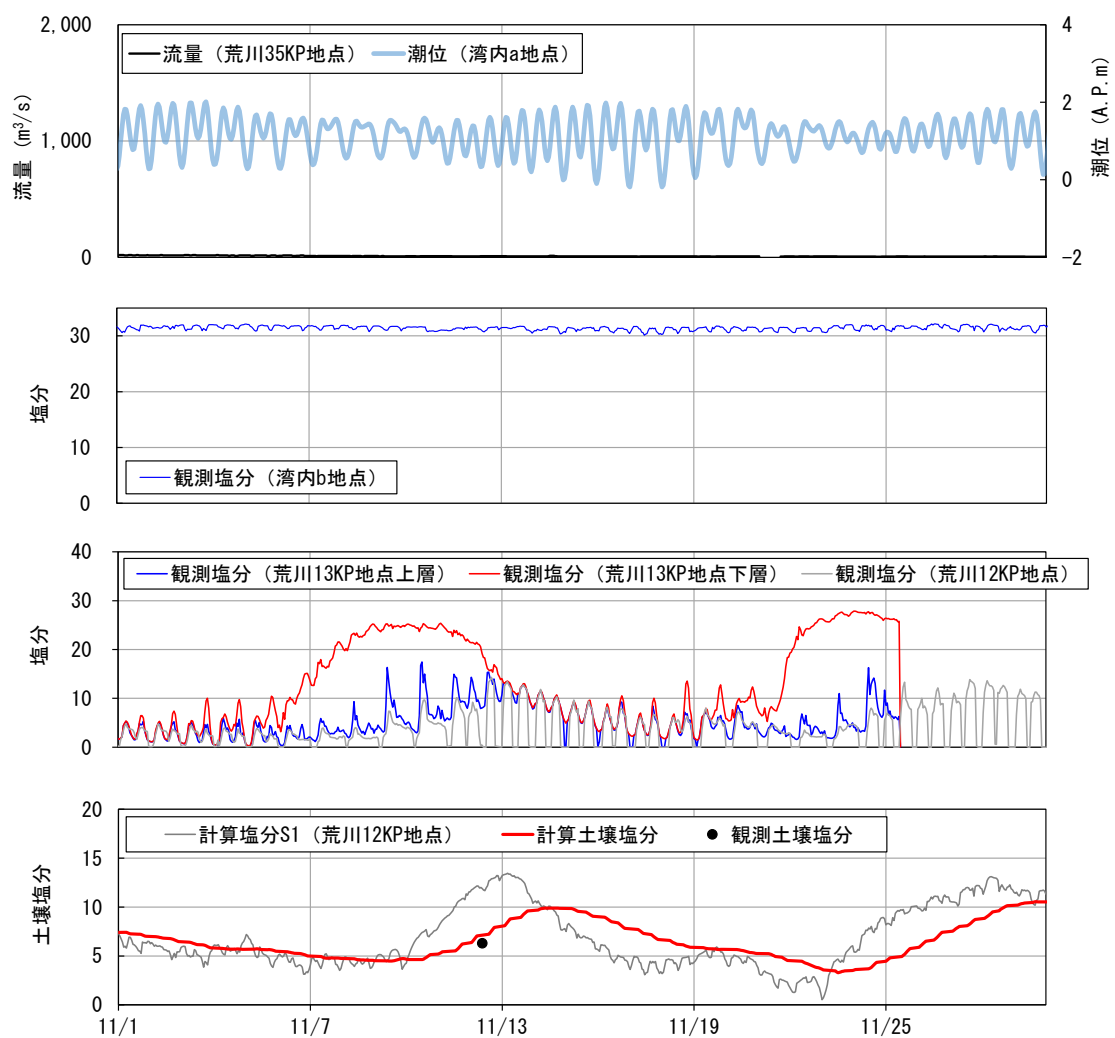
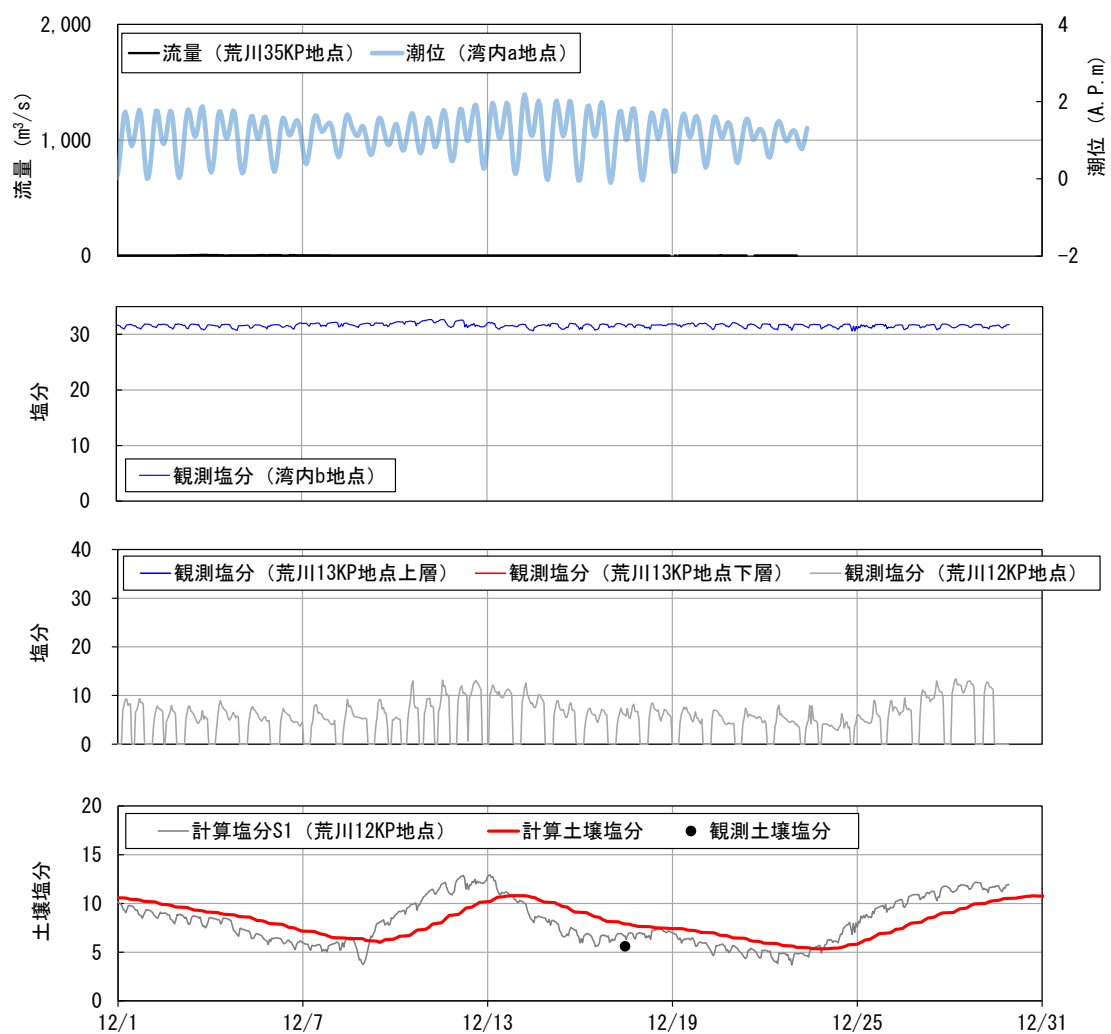


図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ（2020 年 10 月）



※荒川 13KP の上層および下層の観測塩分は、11 月 27 日以降はデータなし

図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ (2020 年 11 月)



※荒川 13KP の上層および下層の観測塩分は、11 月 27 日以降はデータなし

図 4-15 湿地内の土壌塩分の再現結果のまとめ (2020 年 12 月)

結語

第4章では、五反野ワンドの土壌塩分の変化特性の把握とそのモデル化を行った。まず、2019年10月13日の台風第19号出水において五反野ワンドが冠水した後に、2019年11月27日から2020年12月27日の13か月、約1月間隔で土壌塩分の現地計測を行った。このうち、2020年10月26日、28日、30日には日単位の変動傾向を把握するための現地計測を行った。この結果、以下のことが分かった。

- ・月単位の土壌塩分は表層から40cmの全層に渡りほぼ一様に変動すること
- ・日単位の土壌塩分も全層でほぼ一様に変動すること

この理由として、土壌表層にみられるカニの巣穴やゴカイの通過痕の生物由来の穴による湛水の浸透が考えられた。そこで生物由来の穴の鉛直分布を把握するとともに、透水性を定量的に把握するため簡易的な透水試験を実施した。この結果、透水係数は $1.3 \times 10^{-1} \sim 1.9 \times 10^{-2} (\text{cm/sec})$ を示し、現地土壌試料（シルト・粘土質が72.1%）をみだして穴をなくした試料の透水係数 $1.2 \times 10^{-6} (\text{cm/sec})$ の 10^4 オーダー大きいことが分かった。このことは、カニ類やゴカイ類により形成された穴は、湿地の土壌の塩分環境を形成するうえで重要な役割を果たしていることを示唆している。

次に、上記の土壌塩分を通年で推定するためのモデル化を行った。モデル化においては、第3章で開発した低水路表層塩分推定モデルと同じ一階の微分方程式で表現される半経験モデルを導入し、その適用性を確認した。モデルの外部条件には、潮汐、河川流量、海域塩分のみから推定した表層水塩分時系列（3章の検証結果）を用いた。この結果、観測土壌塩分を通年で良好に再現できることを示した。

以上から、本研究で開発した半経験的塩分モデルが河岸湿地の概略設計に使用できる可能性が示された。

【参考文献】

- 1) Yuan, C. & Jingkuan, S. & Wenquan, L. & Jing, W. & Mengwei, Z. Mapping coastal wetland soil salinity in different seasons using an improved comprehensive land surface factor system. *Ecological Indicators*, Vol. 107, 2019.
- 2) Drew, N. F. & Sammy, L. K. & David, C. W. Evaluating Abiotic Influences on Soil Salinity of Inland Managed Wetlands and Agricultural Croplands in a Semi-Arid Environment. *Wetlands*, 2014, p.1229-1239.
- 3) Juan, H. & David, C. W. & Carman, C. Two Fixed Ratio Dilutions for Soil Salinity Monitoring in Hypersaline Wetlands. *PLOS ONE*, 2015.
- 4) Gregg E. Moore & David M. Burdick & Chris R. Peter & Donald R. Keirstead: Mapping Soil Pore Water Salinity of Tidal Marsh Habitats Using Electromagnetic Induction in Great Bay Estuary, USA, *Wetlands*, 2011.
- 5) Colin R. Jackson¹ & Scarlett C. Vallaire: Effects of Salinity And Nutrients On Microbial Assemblages in Louisiana Wetland Sediments, *WETLANDS*, Vol. 29, No. 1, pp.277-287, 2009.
- 6) 山田一裕：ヨシ生育に及ぼす水ストレスの影響と被災した河口汽水域ヨシ原の再生方法に関する研究，河川財団 河川整備基金助成事業 助成番号：26－1215－004，2015
- 7) 杉本・矢持：大阪湾阪南2区人工干潟に生育するヨシ群落と土壤環境，土木学会論文集B2（海岸工学），71 巻 2 号，pp. I_1339-I_1344，2015.
- 8) 国土交通省荒川下流河川事務所：荒川下流航走波対策指針（案）～荒川のヨシ原保全・再生のため～改訂版 第二章 荒川下流部のヨシ原の現状，2009.8
- 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, pp.32-39, 2016.
- 10) Creager, W.P., Justin, J.D. & Hinds, J.: *Engineering for Dams*, Vol. III, Earth, Rock-fill, Steel and Timber dams, John, Wiley & Sons, Inc., N.Y., pp.645～649, 1945.
- 11) 日本規格協会：JIS 土の粒度試験方法 JIS A 1204, 2020.3.25改正
- 12) 国土交通省河川局：荒川水系河川整備基本方針 荒川水系の流域および河川の概要，2007.3

なお、本章の内容は、下記の論文で公表済みである。

- 1) 黒田直樹，横山勝英，石川忠晴：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，河川技術論文集,第 26 巻, pp.355-360,2020.6.
- 2) 黒田直樹，横山勝英，石川忠晴：東京都荒川下流部の五反野ワンド内干潟湿地における土壌塩分状態の推定法に関する研究，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.76, No.2, pp. I_1285-I_1290, 2020.
- 3) 黒田直樹，横山勝英，石川忠晴：大河川下流部における汽水性干潟湿地の設計のための土壌塩分の長期推定モデルの開発，河川技術論文集,第 27 巻, pp. 347-352,2021.6.

第5章 湿地を拡大した場合のシナリオシミュレーション

5-1 緒言

5-1-1 本章の目的

第4章では、低水路表層と五反野ワンドの塩分はほぼ連動することが分かった。これは、ワンドの池の容量が非常に小さく、潮汐に伴う1回の水の出入りで湛水がほぼ全量交換されるためと考えられる。一方、湿地を拡大し、池容量を増加させることにより、貯留効果によって塩分の変化を緩和できる可能性がある。

上記を踏まえ、第5章では、五反野ワンド内の池を拡大した場合のシナリオシミュレーションを行う。最初に、塩分の挙動を移流拡散方程式で考慮した平面二次元計算モデルの検証を行う。そして、ワンド内の池を拡大することにより、ワンド内の湛水および土壌塩分をコントロールできる可能性を検討する。

5-1-2 検討フロー

第5章の検討フローを図5-1に示す。「5-2 平面二次元モデルの構築」では、一般的な浅水流平面二次元計算不定流計算モデルに塩分の挙動を移流拡散方程式で考慮し、「2-3-2 塩分と水位の連続観測」の観測値を境界条件としてモデルの検証を行う。次に、「5-3 低水路表層の計算塩分を入力条件とした平面二次元モデルの検証」では、第3章で開発した低水路表層塩分推定モデルの再現結果を境界条件として、ワンド内（St.A）の湛水塩分を再現するとともに、第4章で構築した土壌塩分推定モデルによる土壌塩分の再現を行う。「5-4 池の拡大シナリオシミュレーション」では、五反野ワンド内の池を拡大した場合の塩分の挙動を予測する。

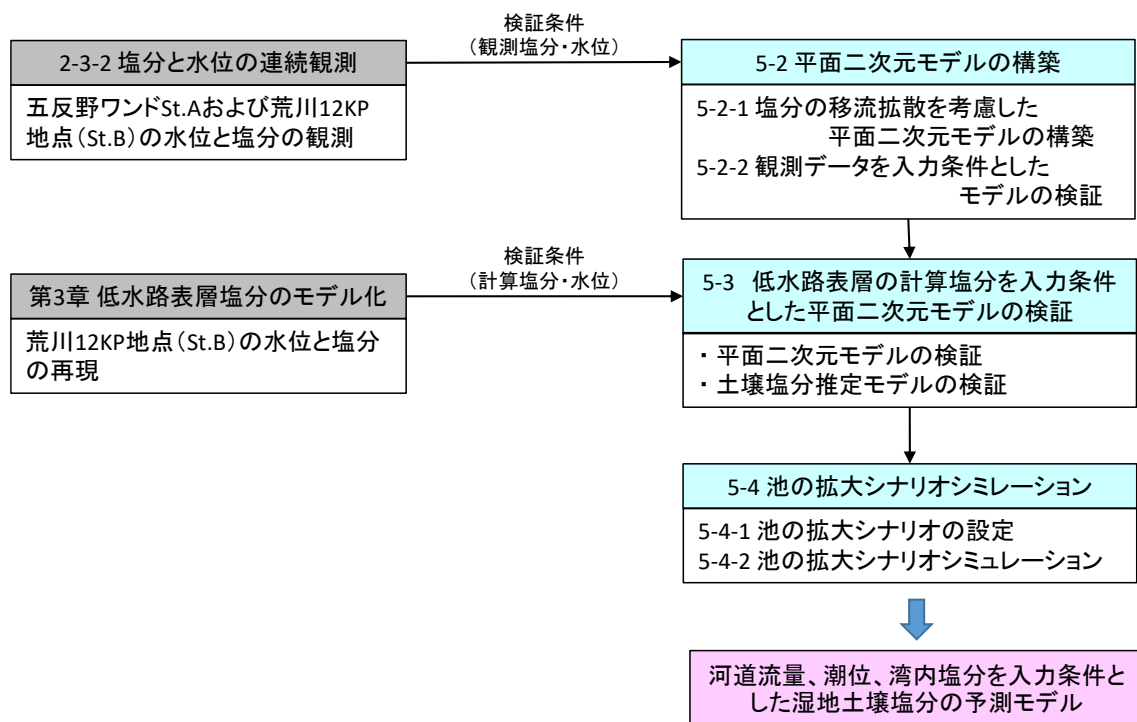


図 5-1 検討フロー

5-2 平面二次元モデルの構築

5-2-1 塩分の移流拡散を考慮した平面二次元モデルの構築

平面二次元モデルの検証条件を表 5-1 に示す．一般的な矩形格子の浅水流モデル¹⁾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 2-15 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²⁾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 5-2 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．なお写真 2-11 に示したように割石空積の間隙を通して多少の流入出があったが，その量は解析では考慮しなかった．

表 5-1 平面二次元モデルの検証条件

項目		内容	
モデル	モデル	一般座標系平面二次元不定流計算モデル	移流拡散方程式で塩分を考慮
	対象区間	五反野ワンド	図 5-2 参照
	格子間隔	流下方向，横断方向ともに 1m ピッチ	
	格子点数	流下方向：171 横断方向：86	
	地形条件	平成 24 年度レーザ測量結果	国土交通省荒川下流河川事務提供
	粗度係数	葦原：0.08，裸地：0.02，割石空積：0.05	
	計算期間	2020/1/1 0：00～2020/1/31 0：00	
条境界	上流端	流量（ただしゼロ）	
	下流端	低水路観測水位（1 時間ピッチ）	図 5-2 中の St.B
条初期	塩分	1/1 の低水路観測塩分	図 5-2 中の St.B

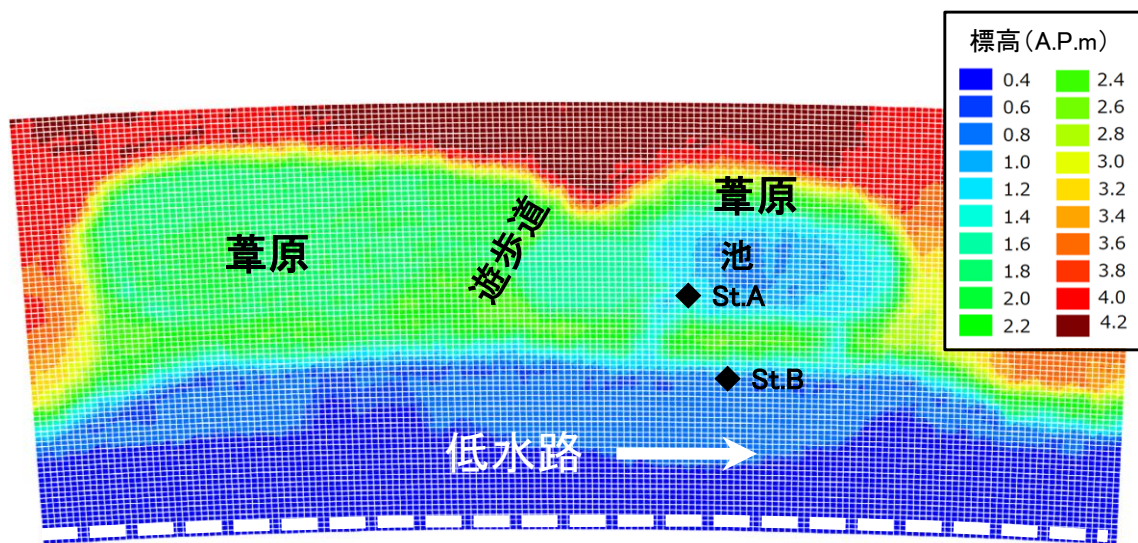


図 5-2 メッシュ分割図

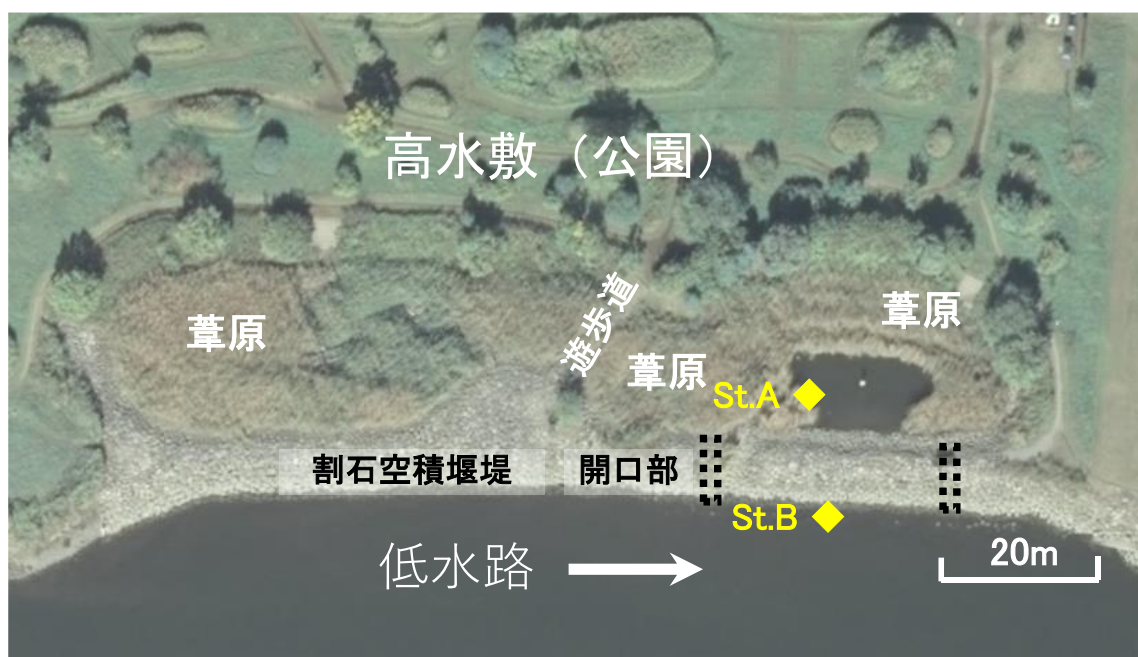


図 5-3 五反野ワンド全景【再掲】

5-2-2 観測データを入力条件としたモデルの検証

図 5-4 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 5-5 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。湿地内塩分は低水路塩分とほぼ連動し, 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。

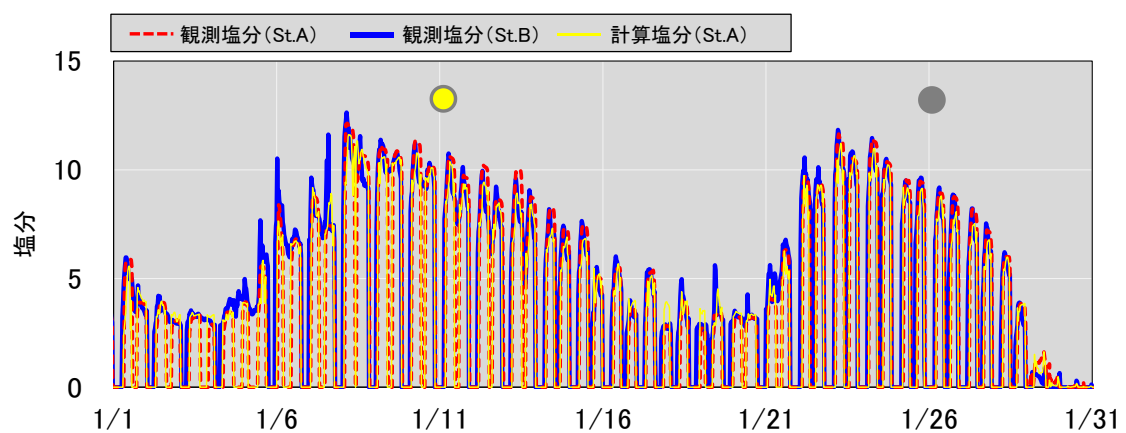


図 5-4 湿地塩分の数値シミュレーション結果と観測結果の比較

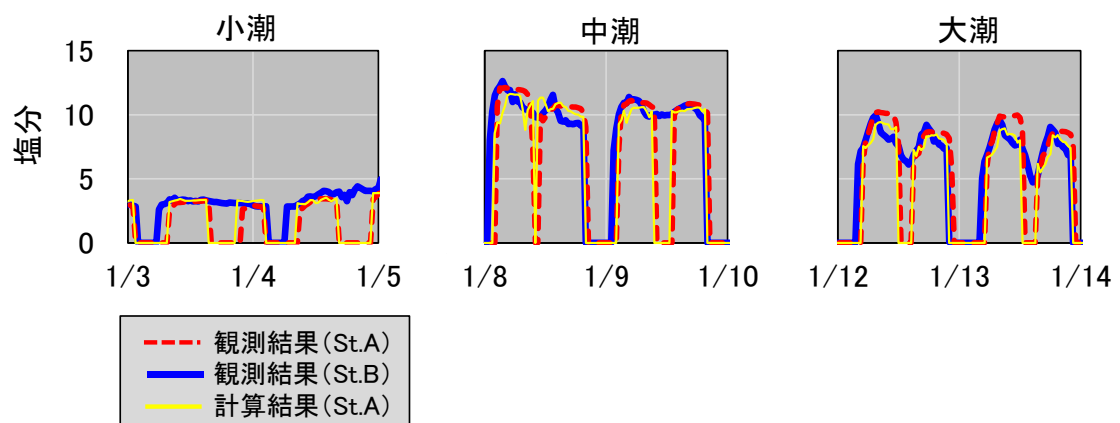


図 5-5 小潮, 中潮, 大潮における塩分再現結果

図 5-6 は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。上段の水位時間変化図に○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。

小潮期には流入がほとんどないため湛水領域は狭く、塩分も低かった。中潮時は大潮時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。これに対して大潮時は、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、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、図 3-7 に示すように、河口からの塩水遡上の形態が小潮時、中潮時、大潮時で異なることによる。

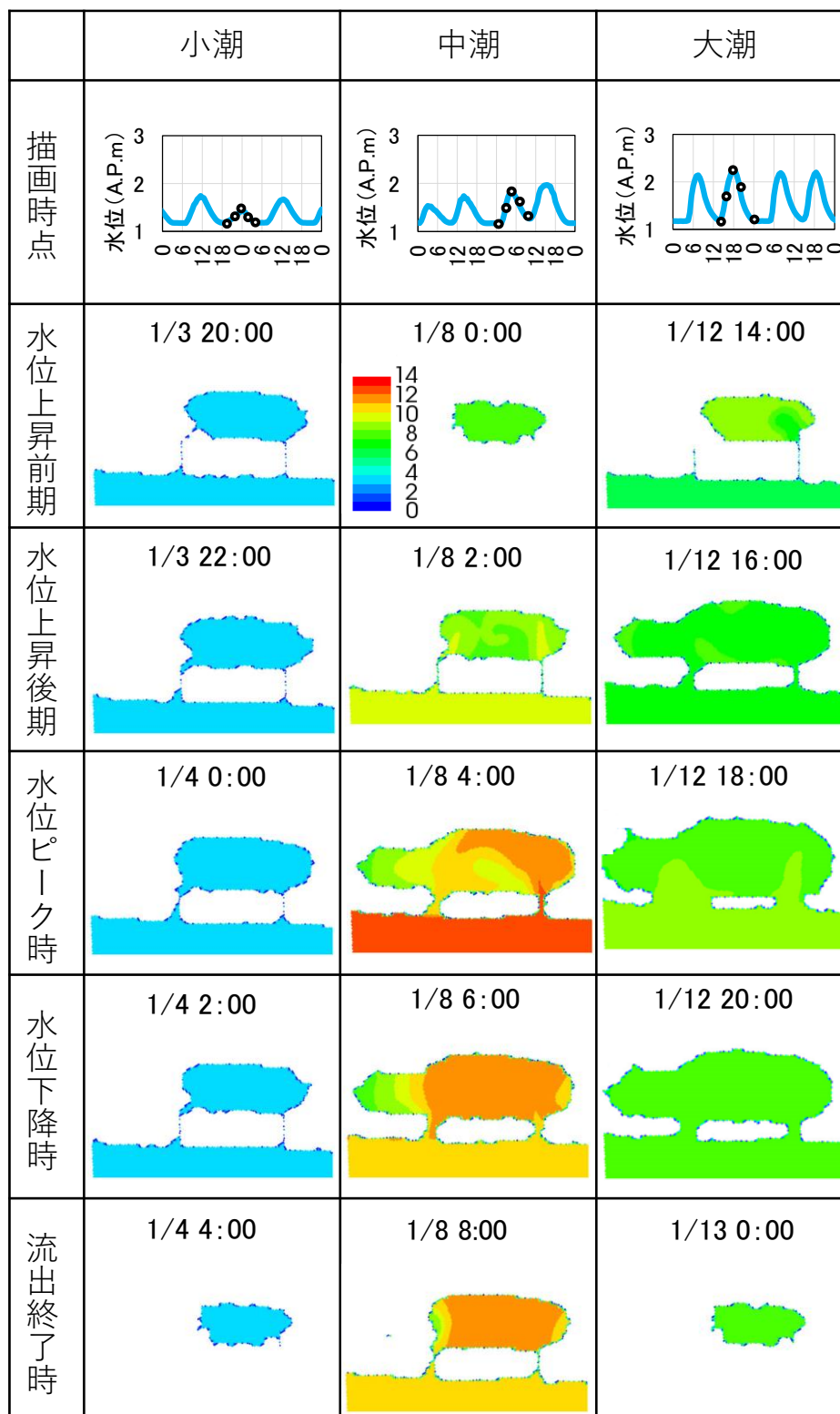


図 5-6 湿地内の塩分平面分布時系列

5-3 低水路表層の計算塩分を入力条件とした平面二次元モデルの検証

前節の平面二次元モデルの検証では、境界条件として低水路 St.B の観測塩分と観測水位を用いていた。一方、St.B の観測データは本研究で観測したものであり、通常は得られていない。そこで本節では、表 5-2 に示すように、境界条件を第 3 章で得た計算値に変更した。

表 5-2 低水路表層の計算塩分を入力条件とした平面二次元モデルの検証

項目		内容	
モデル	モデル	一般座標系平面二次元不定流計算モデル	移流拡散方程式で塩分を考慮
	対象区間	五反野ワンド	図 5-2 参照
	格子間隔	流下方向，横断方向ともに 1m ピッチ	
	格子点数	流下方向：171 横断方向：86	
	地形条件	平成 24 年度レーザ測量結果	国土交通省荒川下流河川事務提供
	粗度係数	葦原：0.08，裸地：0.02，割石空積：0.05	
	計算期間	2020/1/1 0：00～2020/2/13 0：00	
境界条件	上流端	流量（ただしゼロ）	
	下流端	一次元不定流計算水位	表 3-1 参照
初期条件	塩分	低水路表層塩分推定モデルの計算塩分	図 3-27 の計算塩分 S_l （モデル改良後）

赤字：表 5-1 からの変更箇所

平面二次元モデルの計算結果を図 5-7 に示す。St.A の計算結果は、低水路表層塩分推定モデルの St.B の計算結果とほぼ連動し、境界条件に観測データを用いた図 5-4 より再現性は若干低下するものの、観測塩分を概ね再現できていることがわかる。また、図 5-7 の St.A の計算結果を境界条件として、第 4 章で構築した土壌塩分推定モデルによる計算結果を図 5-8 に示す。計算期間中の土壌塩分は 1 回の観測のみであるが、2 月 13 日の計算結果は観測値にほぼ一致している。

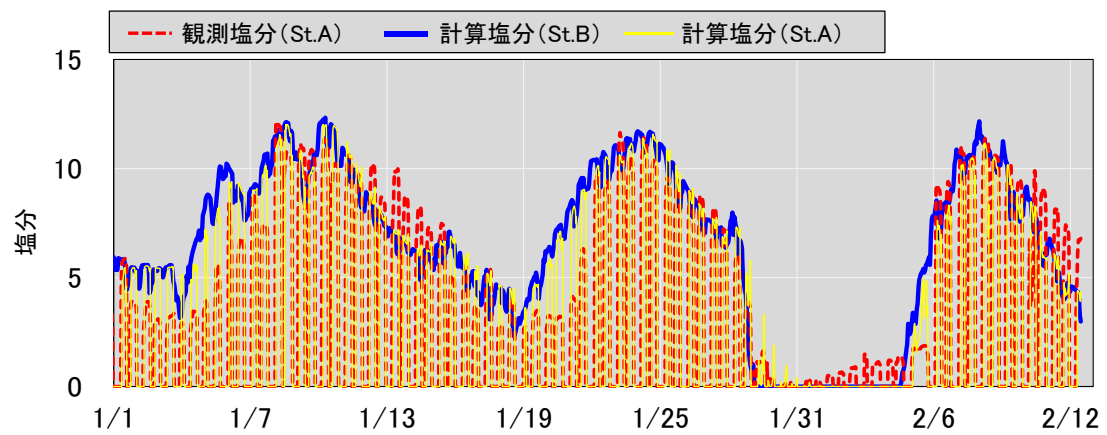


図 5-7 低水路表層塩分推定モデルを境界条件とした平面二次元モデルの検証結果

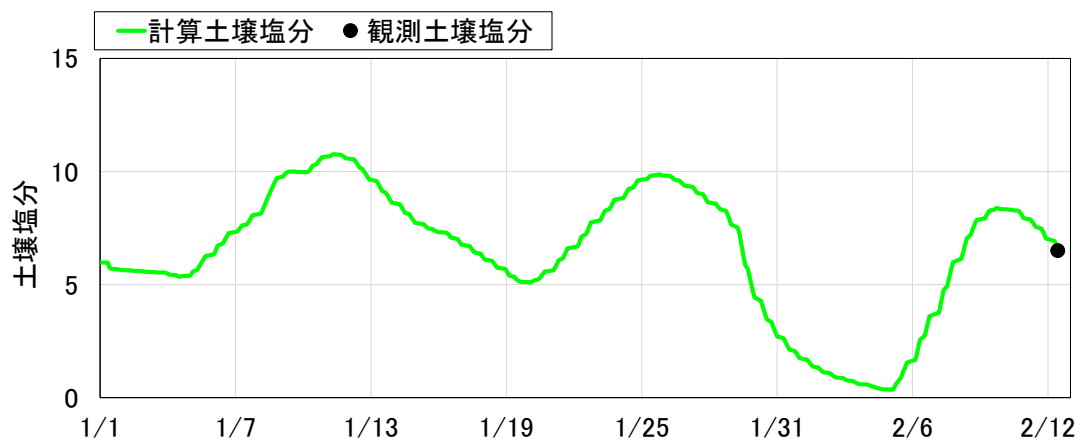


図 5-8 平面二次元モデルを境界条件とした土壌塩分モデルの検証結果

5-4 池の拡大シナリオシミュレーション

5-4-1 池の拡大シナリオの設定

図 5-3 に示したように，五反野ワンドの遊歩道の上流側には草原が広がっており，地盤高は下流側の池よりも高く干潮時には全域が陸域となっている．そこで，遊歩道の上流側の草原の地盤を切り下げ，池を拡大することが考えられる．

設定した池の拡大シナリオを図 5-9 の下図に示す．上図は現況地形である．池の拡大シナリオは以下の通りに設定した．

池の敷高は，遊歩道下流側に位置する現況の池の最深河床が A.P.0.8m 程度であるため，掘削下限高を A.P.0.8m とした．池の敷高を下げて，容量を増加させることも考えられるが，この場合水深が深くなり，安全性の確保の面で課題が生じると考えられる．水際の河床勾配は，水深が緩やかに変化するように 5 割とした．

また，下流側の池については，池の容量を極力拡大した場合の塩分の変化を見るため，上流側の池の拡大と併せて A.P.0.8m を掘削下限高として，図 5-9 のように池を拡大することとした．

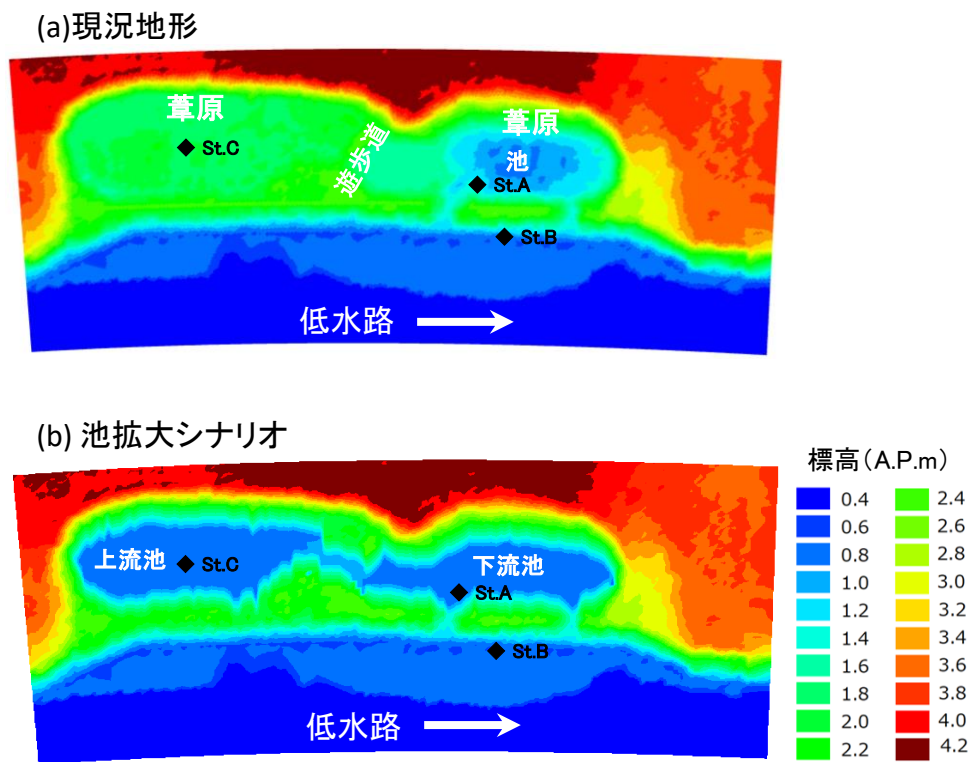


図 5-9 地盤高コンター（池拡大シナリオ）

5-4-2 シナリオシミュレーション結果

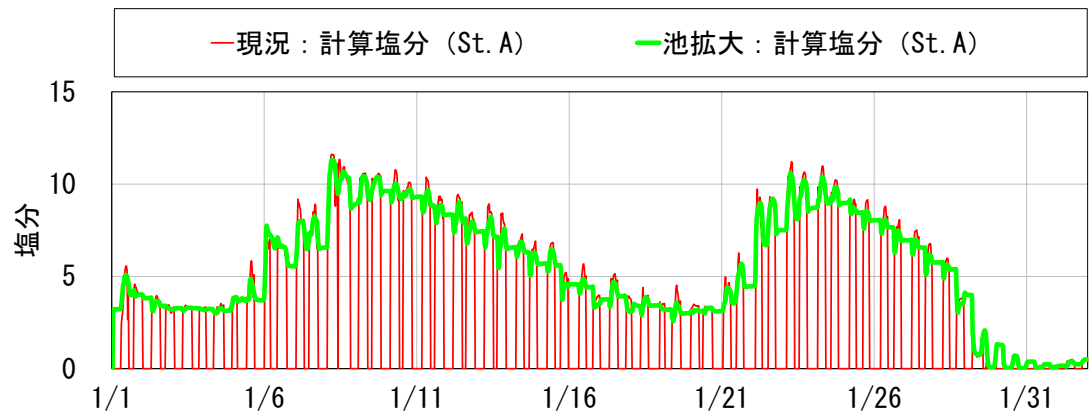
(1) 塩分時系列

表 5-1 に示した計算条件で、地形条件を現況と池の拡大シナリオとした場合の計算結果を図 5-10 に示す。図 5-10 の上段には St.A、下段には St.C の結果を示す。

これより、現況地形における池（St.A）の計算塩分は、図 5-4 に示した検証計算でみたとおり低水路（St.B）とほぼ連動する。一方、池拡大シナリオにおける計算塩分は、特に上流側の St.C で低水路塩分と異なる傾向を示し、その特徴は以下のとおりである。

- 下流側の池（St.A）の計算塩分は、現況とほぼ同じとなる。一方、上流側の池（St.C）のピーク付近の計算塩分は、現況の計算塩分を下回る。
- 上流側の池（St.C）の計算塩分は、現況では 1 月 30 日以降にほぼゼロとなるが、池拡大シナリオでは、わずかながらも維持される。

【下流池の計算結果】



【上流池の計算結果】

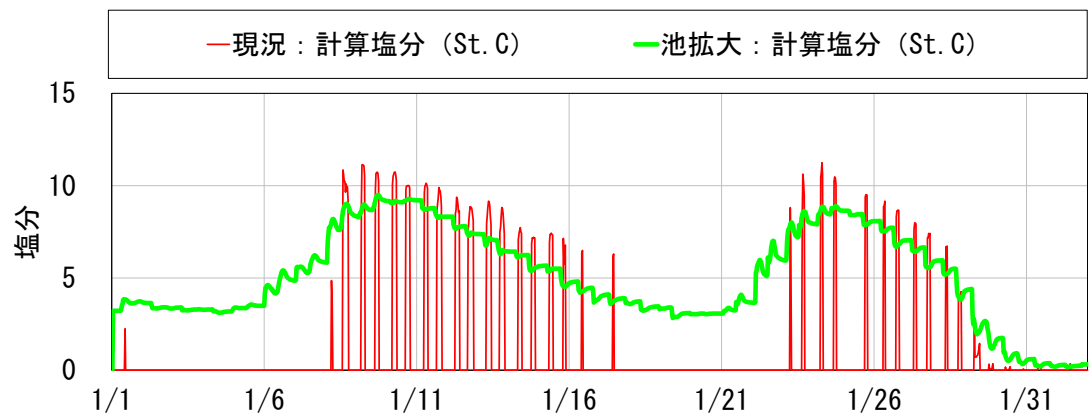


図 5-10 シミュレーション結果：池拡大シナリオ（塩分の時系列変化）

(2) 平面分布

シナリオシミュレーション結果について、塩分の平面分布時系列を図 5-11 に示す。

小潮 (1/3, 20 : 00)

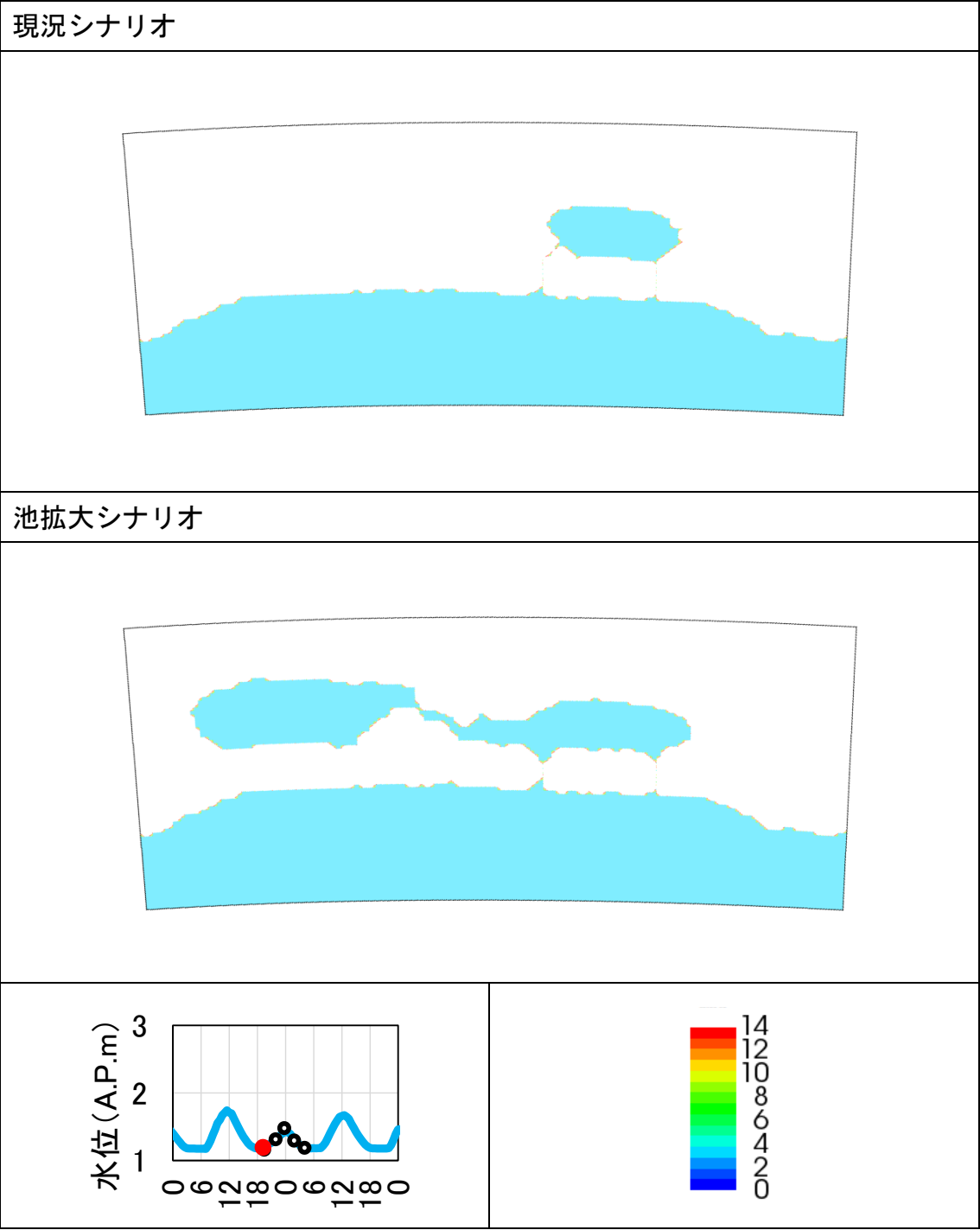


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

小潮（1/3, 22 : 00）

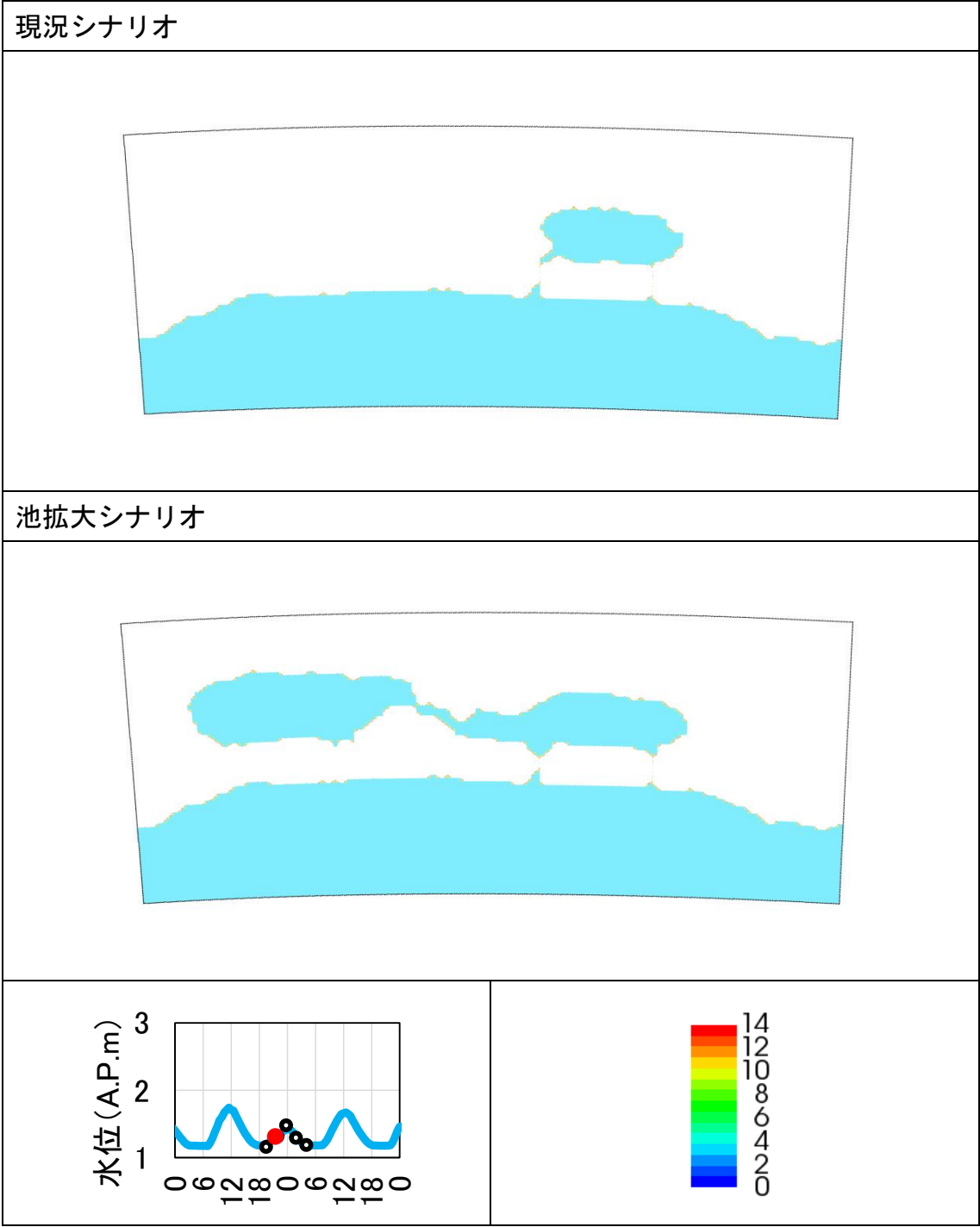


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

小潮（1/4, 0 : 00）

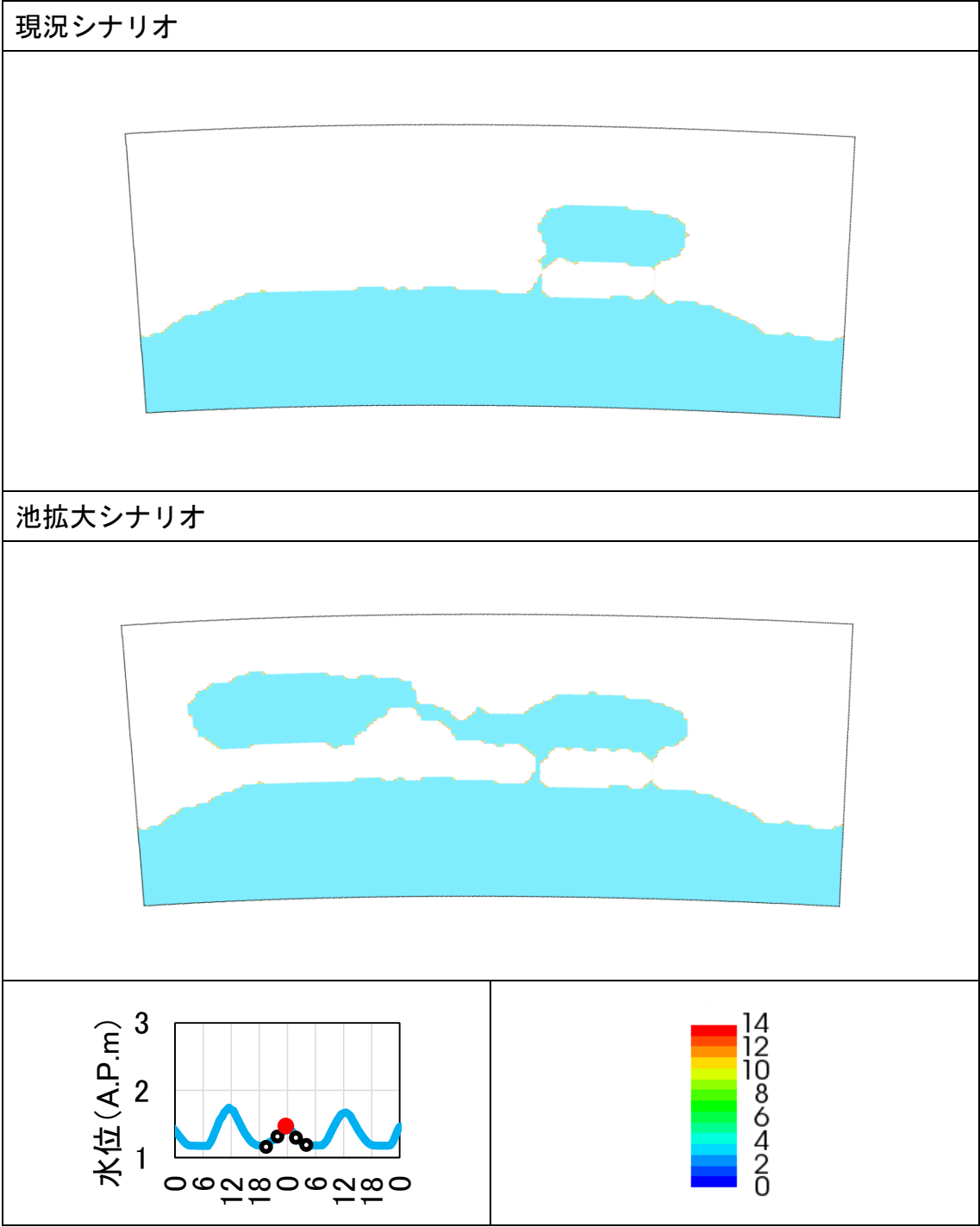


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

小潮（1/4， 2：00）

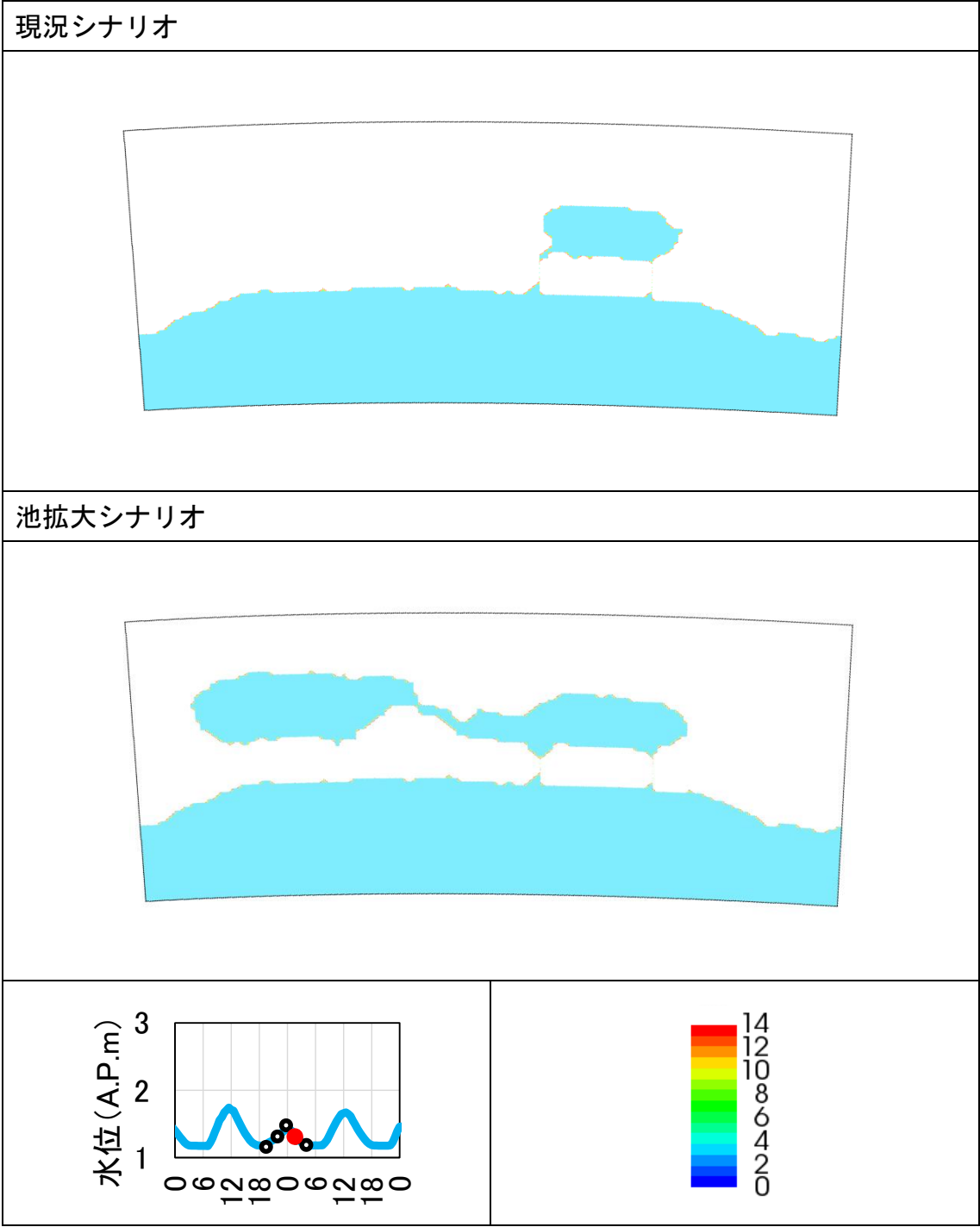


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

小潮（1/4， 4：00）

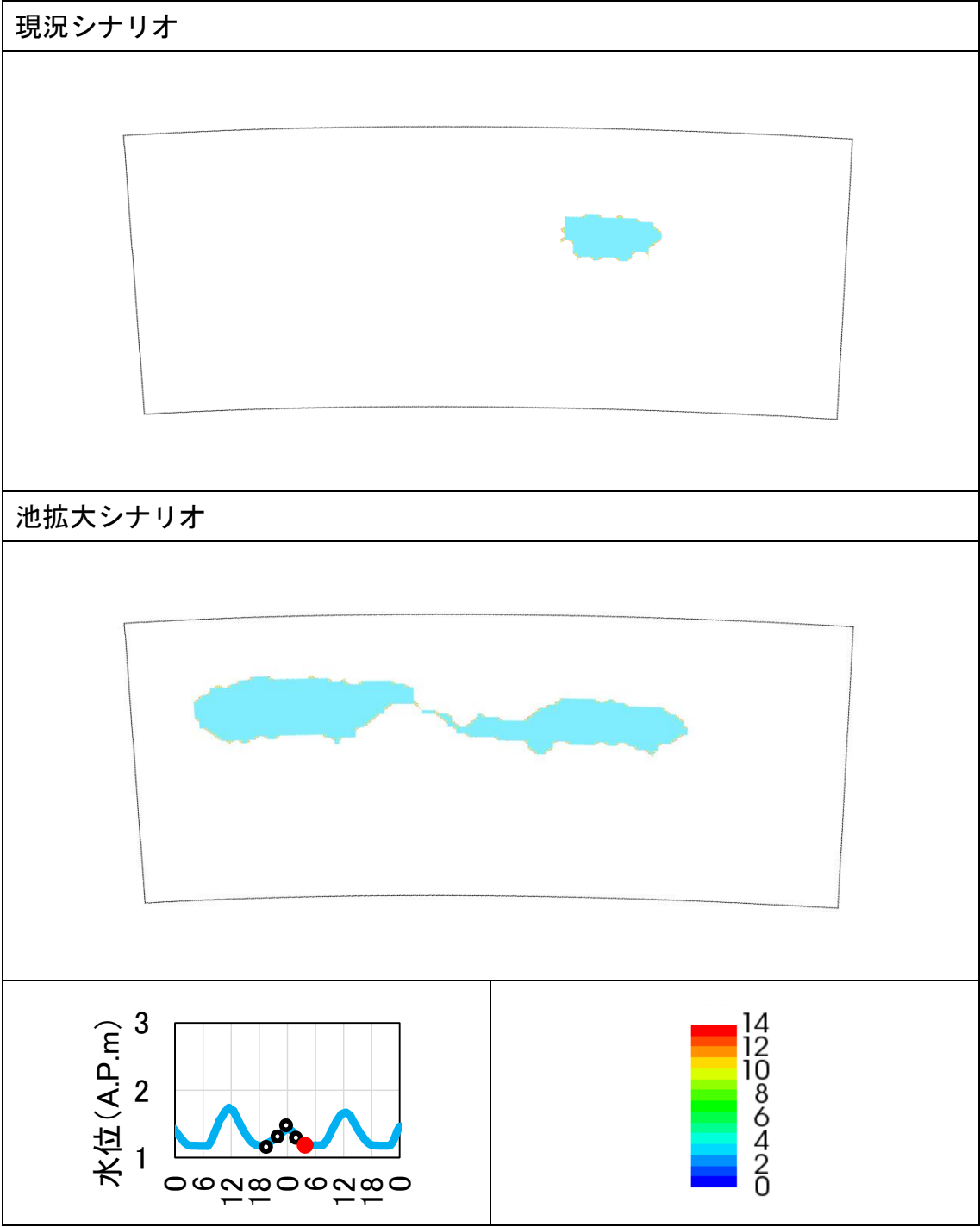


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

中潮 (1/8, 0 : 00)

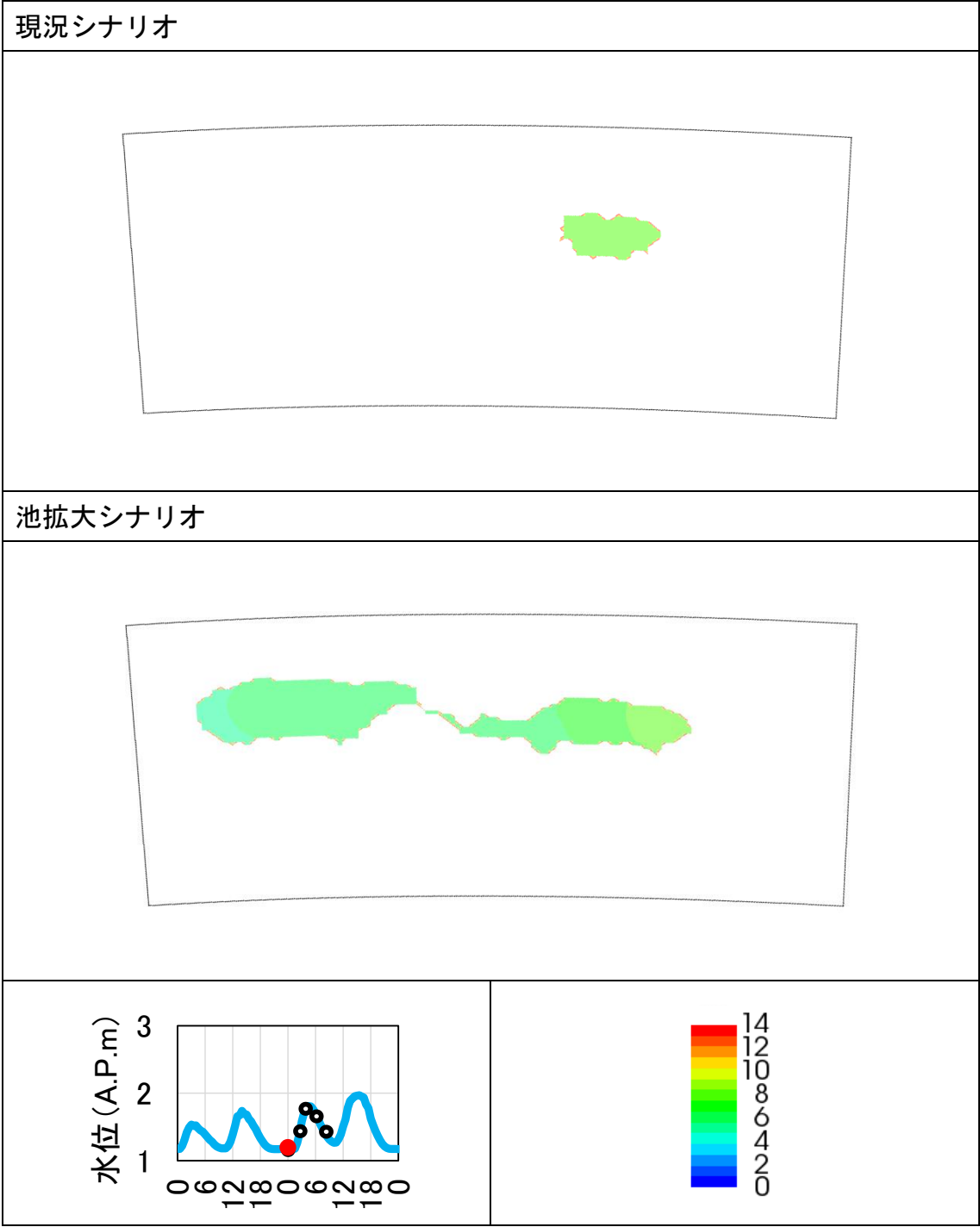


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

中潮 (1/8, 2 : 00)

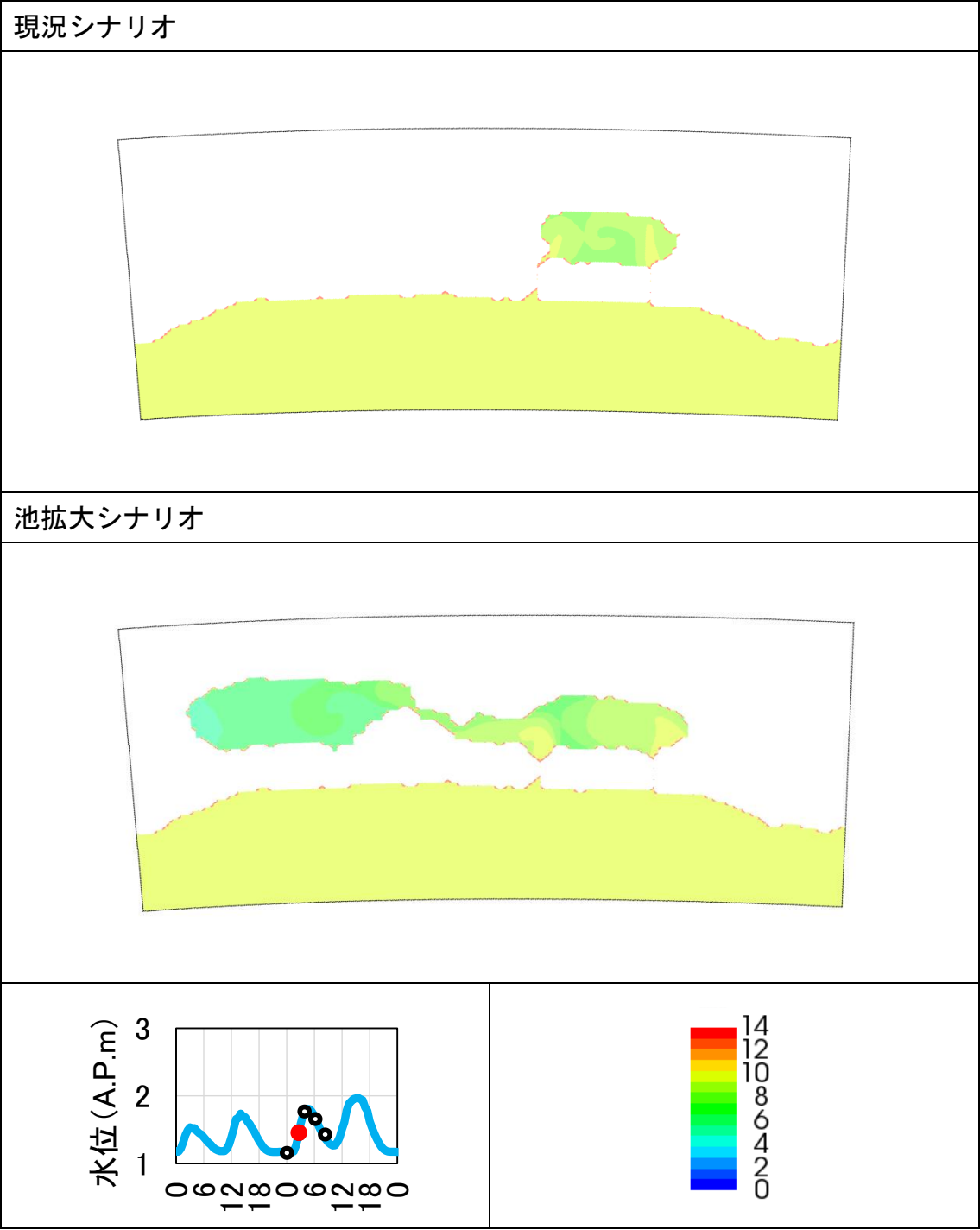


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

中潮（1/8, 4 : 00）

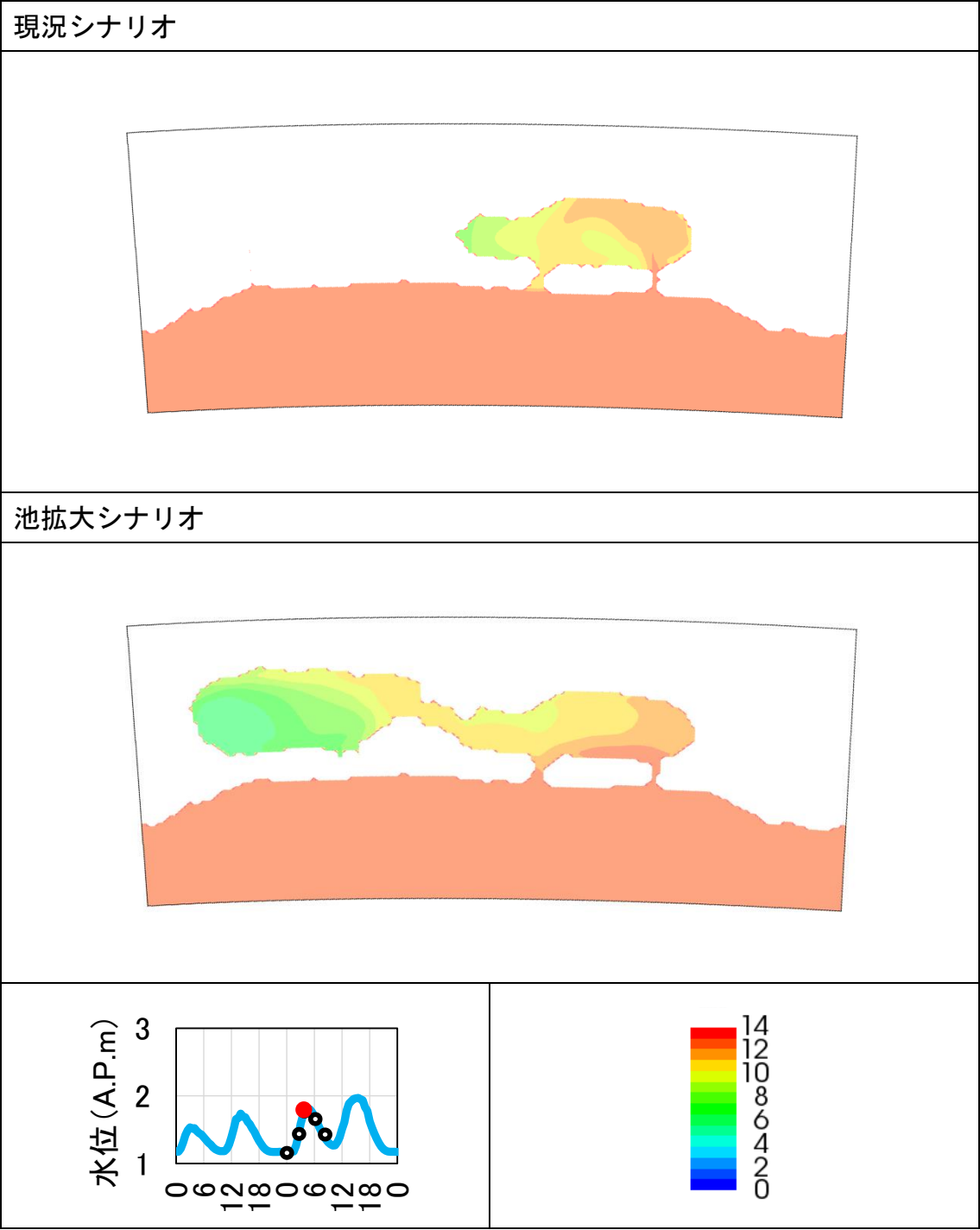


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

中潮（1/8, 6 : 00）

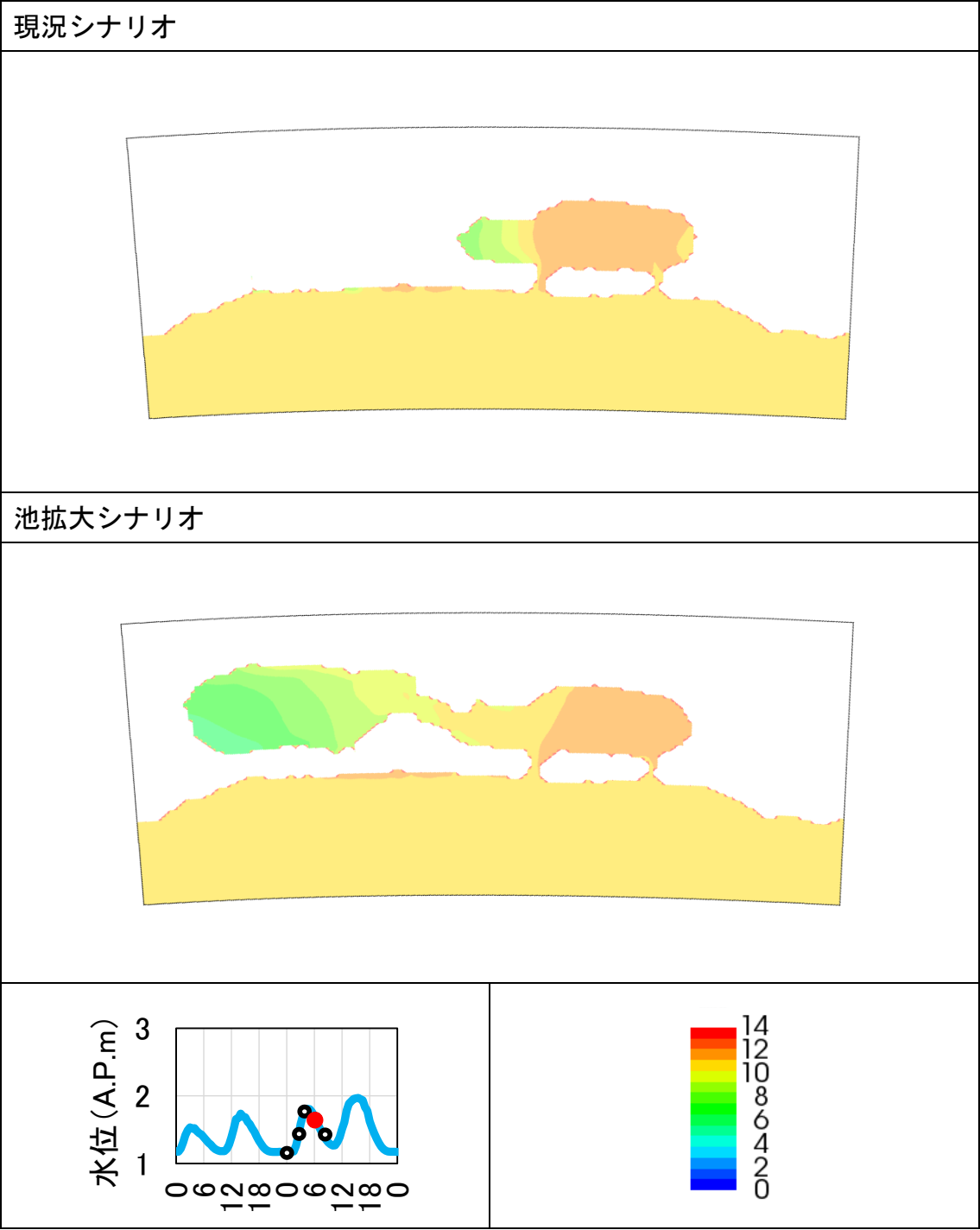
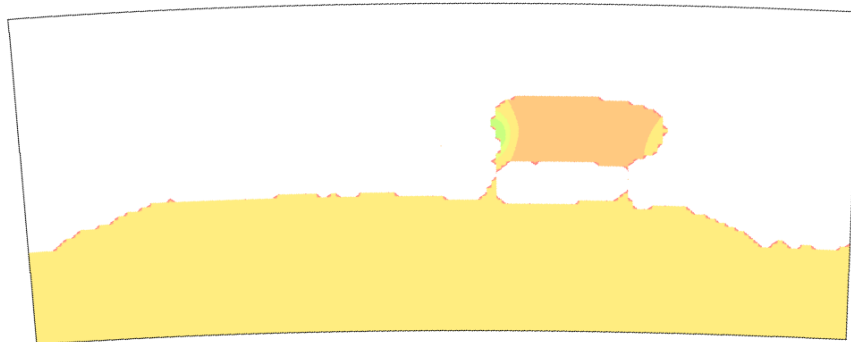


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

中潮 (1/8, 8 : 00)

現況シナリオ



池拡大シナリオ

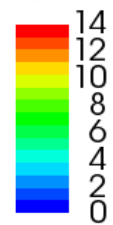
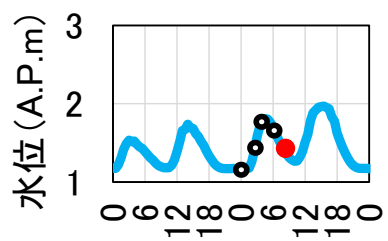
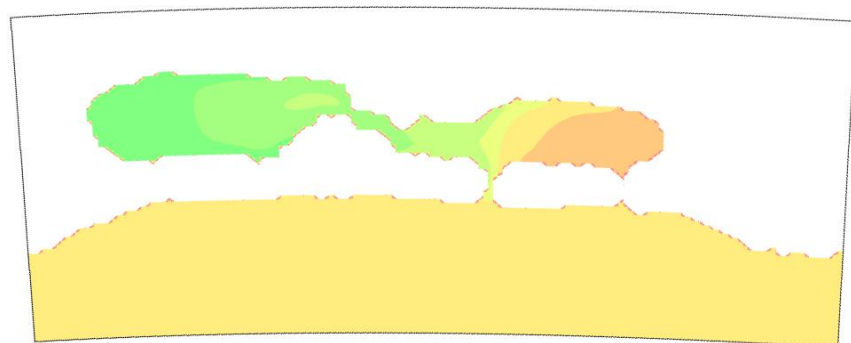


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

大潮（1/12, 14 : 00）

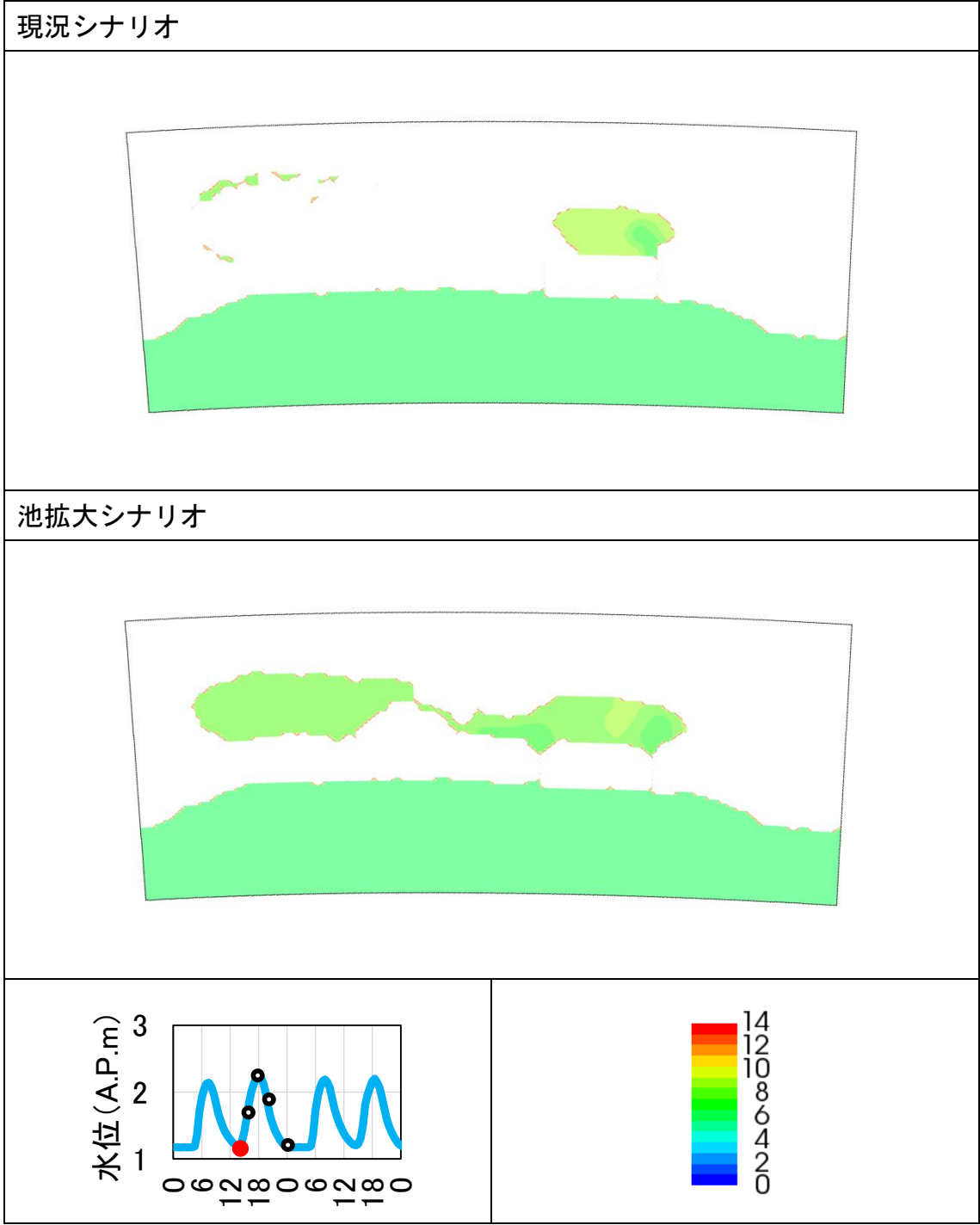


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

大潮（1/12, 16：00）

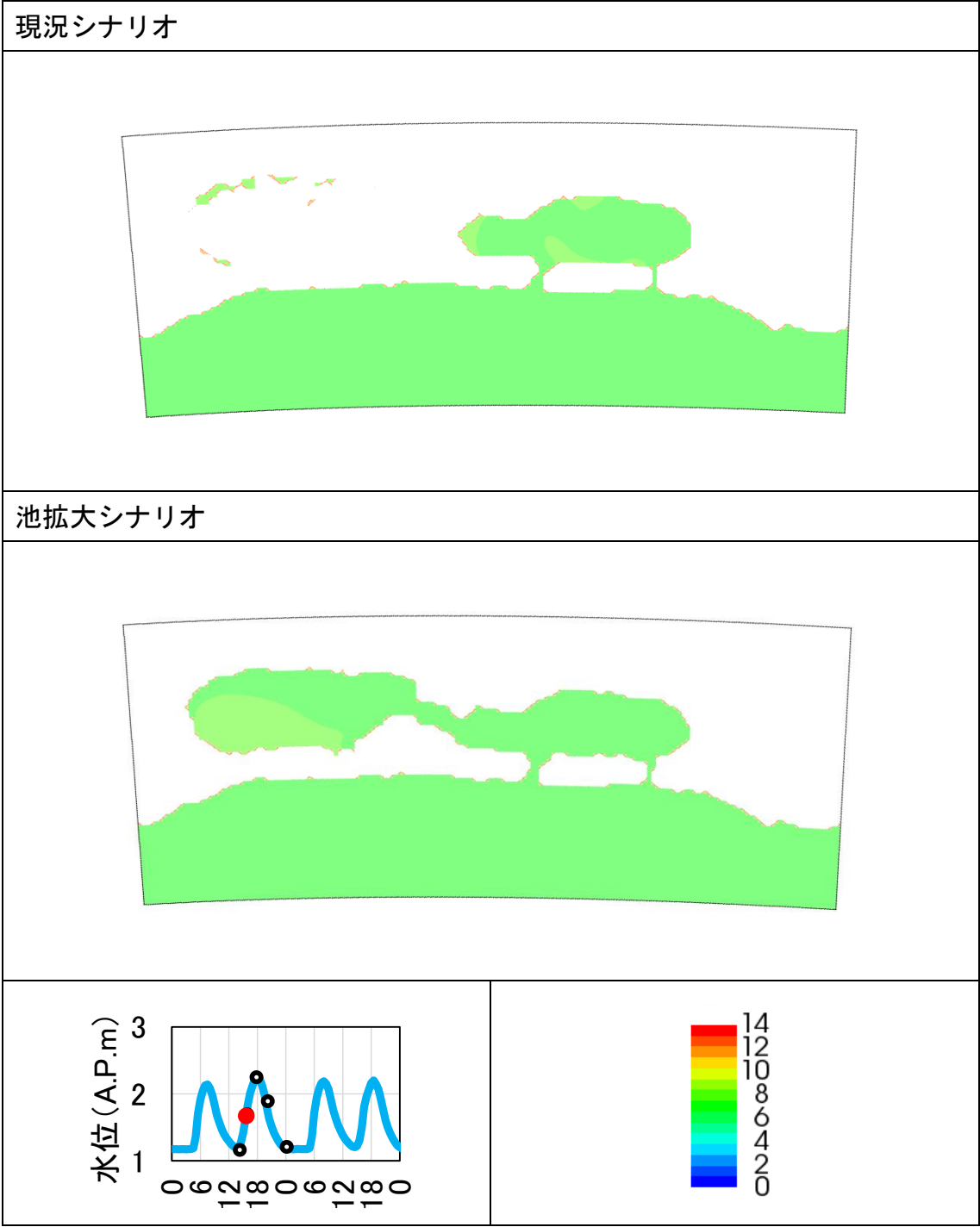


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

大潮（1/12, 18：00）

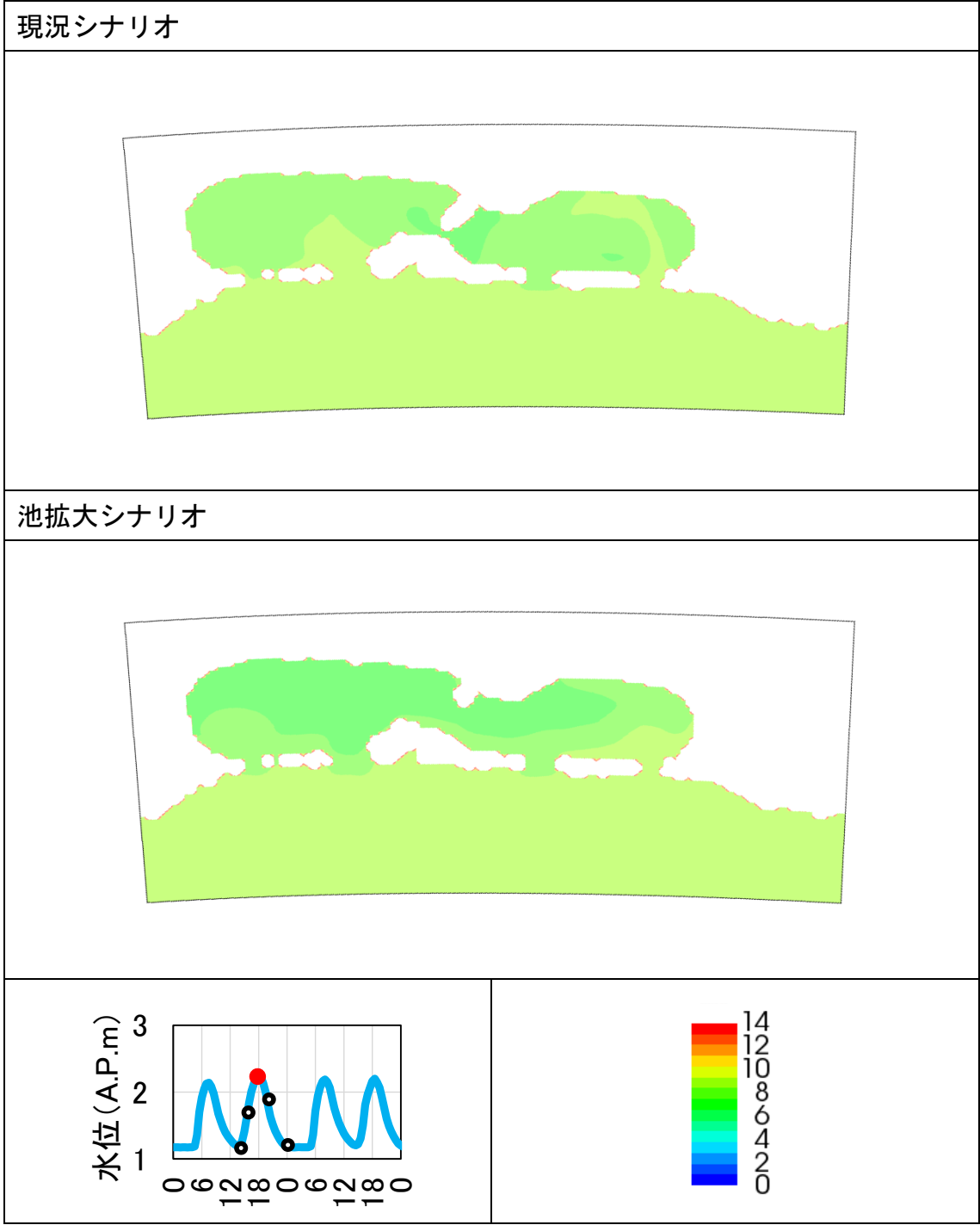


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

大潮（1/12, 20 : 00）

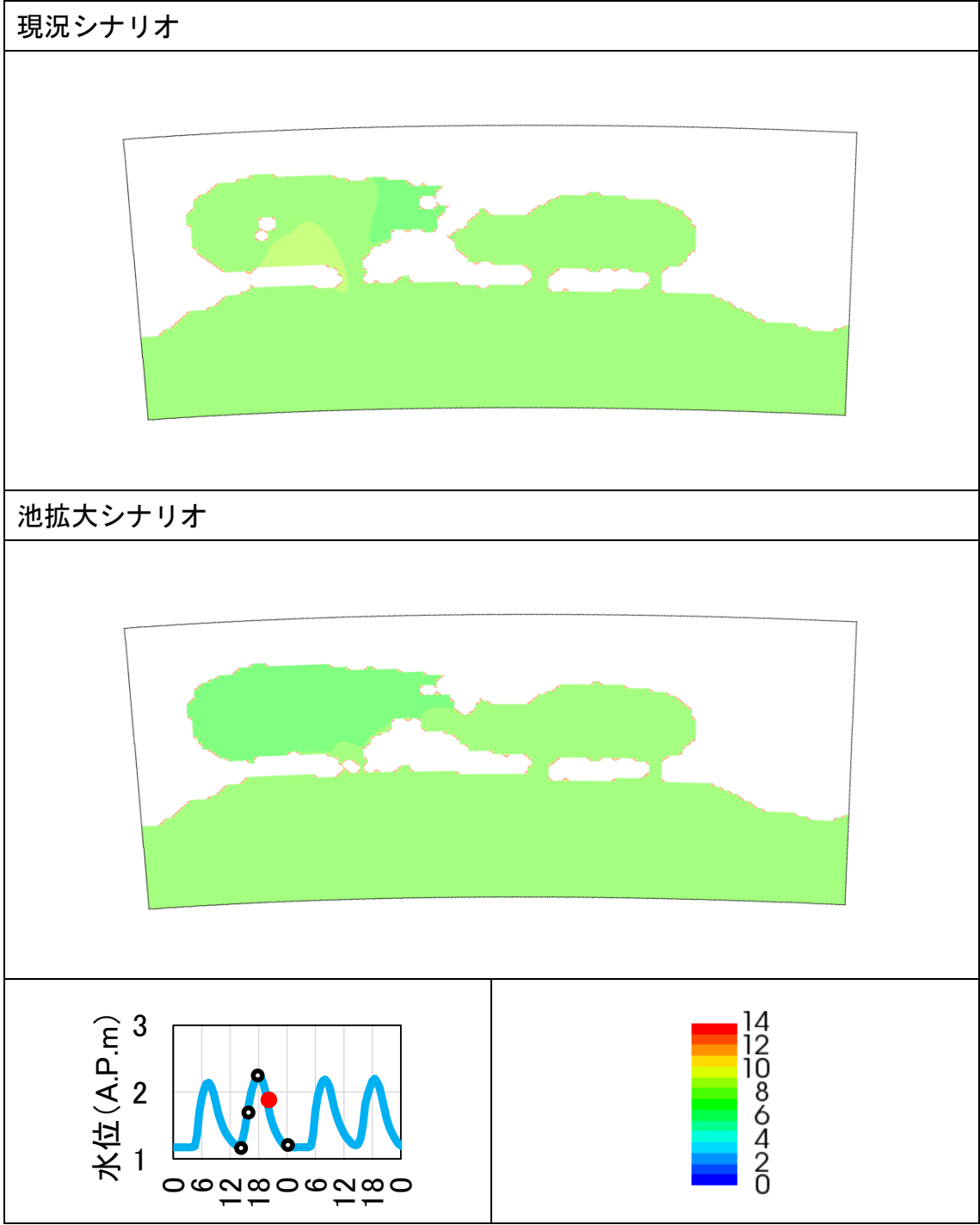


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

大潮（1/13, 0 : 00）

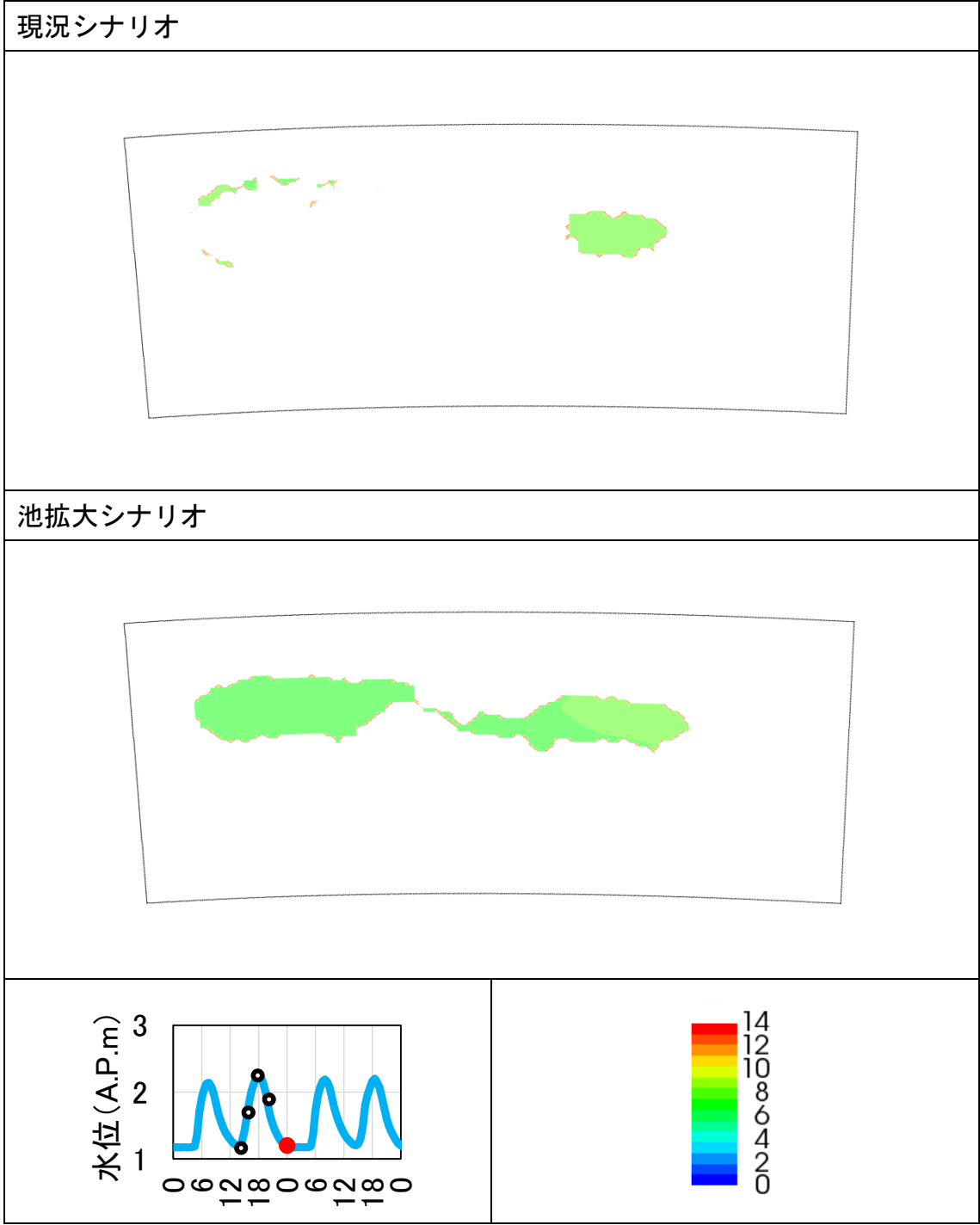


図 5-11 湿地内の塩分平面分布時系列（現況と池拡大シナリオの比較）

5-4-3 考察

池拡大シナリオシミュレーションの結果、池内の塩分変動が低水路の塩分変動より緩和されることを確認した。この傾向は現況シナリオの場合には見込めない挙動である。このことは、低水路沿いの汽水性湿地を創出する際、低水路と異なる多様な塩分環境を創出できる可能性を示していると言える。

本研究で実施した池拡大シナリオシミュレーションは、年間で低水路塩分のピーク値が高くなる冬季を対象に行った。図 5-10 に示した通り、現況シナリオの低水路の塩分は最大 13 程度となることがある一方、池拡大シナリオ時の上流池では、最大でも 10 以下に抑えられることが予測された。また、1 月末には低水路塩分がゼロとなり、現況シナリオでは池が淡水となる期間が発生するが、池拡大シナリオにおいては、わずかながらも塩分を維持する機能を有することがわかった。このように、池の拡大により、低水路とは異なる塩分環境を創出できる可能性がある。

また、例えば汽水性特有の昆虫類である希少種のヒヌマイトトンボの生息環境は表 5-3 に示す知見が得られており、塩分は 0～10 の範囲に生息する。ヒヌマイトトンボは、荒川下流区間にも生息していることが知られているが、その数は非常に少ないと予想される³⁾。そこで池を拡大することにより、池の一部で、ヒヌマイトトンボの新たな生息環境を創出できる可能性がある。

表 5-3 ヒヌマイトトンボの生息に適した環境条件³⁾

必要項目		考慮する点
水質	DO	特に考慮する必要はなし。ヒヌマイトトンボの汚濁耐性は比較的大きく、DO 不足に対して抵抗力が高いと考えられる。
	有機物汚濁	同上
	塩分	0 から 10 程度までは生息に支障はない（海水の塩分は約 35）ただし、完全な淡水の場合、天敵の侵入が容易となり、捕食圧が高まると考えられる。そこで年間数回程度塩水が侵入してくるような状態となれば良い。

5-5 結語

第4章では、低水路表層と五反野ワンドの塩分はほぼ連動することを示した。これは、ワンドの池の容量が非常に小さく、潮汐に伴う1回の水の出入りで湛水がほぼ全量交換されるためと考えられた。一方、湿地を拡大し、池容量を増加させることにより、貯留効果によって塩分の変化を緩和できる可能性が考えられた。

そこで第5章では、五反野ワンド内の池を拡大した場合のシナリオシミュレーションを行った。最初に、塩分の挙動を移流拡散項で考慮した平面二次元計算モデルの検証を行い、計算結果はワンド内の観測塩分を良好に再現することを示した。

次に、五反野ワンドの上流側の湿地の敷高を切り下げることにより湛水の貯留効果を増大させたシナリオシミュレーションを行った。計算期間は、河道流量が少なく東京湾塩分が安定している冬季のうち2020年1月1日～1月31日とした。シナリオシミュレーションの結果、池を拡大した場合の上流側の池の湛水塩分の変動は低水路より緩和され、最大値は、低水路表層塩分13程度に対し、10未満に低下することを示した。一方、低水路塩分がほぼゼロとなる期間の湛水塩分の最小値は小さいながらもゼロとはならず、塩分環境を持続する機能を有することが分かった。なお、荒川下流区間には希少種のヒヌマイトトンボが生息しており、そのヤゴの生息可能な塩分の上限は10程度が目安とされている。このため現状の五反野ワンドの諸元を変更することにより、ワンド内の一部の領域にヒヌマイトトンボのヤゴの生息環境を創出できる可能性があると考えられる。

【参考文献】

- 1) 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.
- 2) （財）国土技術研究センター：河道計画検討の手引き（案），2002.
- 3) リバーフロント研究所：ヒヌマイトトンボの生態と保護増殖の手法について，平成8年度研究所報告，1996.

なお，本章の内容のうち，モデルの検証については，下記の論文で公表済みである．

- 1) 黒田直樹，横山勝英，石川忠晴：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，河川技術論文集,第 26 巻, pp.355-360,2020.6.

第6章 結論

6-1 本研究で得られた知見

第1章は序論であり，本研究の背景および目的を述べ，本論文の構成を述べた．

第2章は研究方法であり，対象地の概要と現地観測・実験方法を述べた．対象地は東京都を貫流する荒川の汽水区間（荒川 12KP 地点）に位置する五反野ワンドである．ここで，ワンド内の湛水塩分の連続観測，土壌塩分の鉛直分布に関する現地計測，土壌の簡易透水試験を行った．水と土壌の塩分計測は，2019年11月27日～2020年12月27日の13か月間行った．別途，国土交通省が荒川下流域と東京湾で測定している塩分データ，水資源機構による秋ヶ瀬取水堰の流量データ，および気象庁による東京湾の潮位データも解析に用いた．

第3章は，河岸湿地に流入する河川表層水の塩分推定モデルの開発について述べている．河川の塩分の観測結果から，小潮，中潮，大潮の塩分の挙動として，中潮の表層塩分が最大となり，月齢に伴い周期的に変動していることが分かった．この変動をモデル化するにあたり，長期計算には実務上の制約が大きい三次元や鉛直二次元ではなく，実用性を重視して半経験的なモデルを開発した．まず，流量が少なく東京湾塩分が安定している冬季を対象として，小潮の塩分成層を表す指標としての「下層と表層の塩分差（ ΔS ）」，強混合に伴う塩水層後退の指標としての「下層と表層塩分の平均値（ S_{av} ）」を設定し，低水路の流速振幅 ΔU_d との関係を一階の微分方程式で表現した．次に，東京湾塩分と低水路表層塩分の関係を上記のモデルに組み込み，出水期を含む通年の検証を行って，良好な再現性を確保できることを示した．

第4章は，湿地土壌の塩分推定モデルの開発である．湿地土壌の組成はシルト・粘土質が72.1%であり，土壌塩分の鉛直分布を定期的に測定した結果，月単位のみならず日単位でも土壌塩分は表層から40cmの全層に渡りほぼ一様に変動することが分かった．また，簡易的な透水試験を現地で実施したところ，透水係数は $1.3 \times 10^{-1} \sim 1.9 \times 10^{-2} (\text{cm/sec})$ を示し，みだした試料の透水係数より 10^4 オーダー大きいことが分かった．この原因として，湿地土壌にはカニ類やゴカイ類により形成された穴が多数見られ，この穴が透水性を高めていることを確認した．この結果を踏まえて，一階の微分方程式で表現される半経験モデルを開発した．入力条件には3章で推定した低水路表層の塩分時系列を用い，土壌塩分を通年で良好に再現できることを示した．

第5章は、河岸湿地の造成に関するシナリオ検討である。現況の湿地は小規模であるが、その面積を拡大した場合には、湿地内の水平的な塩分の拡がりも考慮することが必要であるため、塩分の平面二次元モデルを構築した。そして、「低水路表層塩分推定モデル（第3章）」、「土壌塩分推定モデル（第4章）」、および「平面二次元モデル（第5章）」を連結することにより、潮汐、河川流量、東京湾塩分のみを入力条件として、湿地内の湛水塩分と土壌塩分の長期の予測が可能であることを示した。さらに、面積の違うモデル湿地を設定して、塩分環境の変動をシナリオ検討し、本モデル群が汽水性湿地の創出の検討ツールとして使用できることを示した。

6-2 今後の課題

本節では、汽水性湿地の創出に向けて、本研究で得られた知見を踏まえた今後の課題を述べる。

(1) 低水路表層塩分推定モデルの汎用性の確保

本研究では、荒川 12KP 地点の 1 地点を対象にモデル群を開発したが、他地点や他河川でも検証を行い、モデルの汎用性を確保する必要がある。特に第 3 章で開発した低水路表層塩分推定モデルの開発では、小潮時には成層、大潮時には強混合が明瞭にみられる塩水遡上形態を有する荒川を対象とした。このため、潮位差が小さい日本海側に注ぐ河川や、逆に潮位差が大きい有明海に注ぐ河川のように、塩水遡上形態が異なる河川での適用性は確認できていない。また、本研究で対象とした荒川に限定した場合でも、本研究で対象とした荒川 12KP 地点（五反野ワンド）と荒川 13KP 地点（西新井観測所）以外の適用性は確認できていない。

ただし、第 3 章の低水路表層塩分推定モデルで設定した S_{av} と ΔS は、流速振幅 ΔU_d に追随する挙動は共通すると考えられる。我が国の多くの河川では、モデルの計算に必要な河道の流量と湾の潮位は、公的機関による既存観測所の観測データを活用できる。このため、検証対象となる低水路表層塩分さえ得られれば検証が可能である。観測期間は、流量規模が安定する冬季に 1 ヶ月、出水期に 1 ヶ月あれば十分である。

なお、本研究は、大都市を流れる河川のうち、湿地の創出のための高水敷を有する大河川を研究対象とした。しかし、塩水遡上形態が同じ河川であれば、大河川に限らず中小河川においても本研究で開発した低水路表層塩分推定モデルが適応可能と考えられる。中小河川も含めたモデルの検証が課題である。

(2) 実用性を考慮した低水路表層塩分推定モデルの改良

第 3 章で開発した低水路表層塩分推定モデルでは、潮汐変動に相当する指標として、低水路の流速振幅 ΔU_d を算定した。流速振幅 ΔU_d は、河口から対象地点までの縦断距離に応じた潮汐変動を考慮するために採用したものである。ただし、 ΔU_d は一次元不定流計算モデルによる算定が必要であり、計算時間は年間でも 10 分オーダーと短いものの、モデルの構築や検証には時間を要する。このため、実務への活用を想定すると、一次元不定流計算モデルより簡便な手法の開発の余地がある。具体的には、例えば、潮汐変動に伴う河道内の単位時間当たりの容量の変化から、任意の縦断地点における通過流量と

流速を求め、この流速から簡易な流速振幅を算定する方法が考えられる。あるいは、第3章の式(3-4)や式(3-5)の定数を距離に応じて変更する方法等も考えられる。

(3) 土壌塩分推定モデルの経験定数 γ の精査

第4章で構築した土壌塩分推定モデルは、ゴカイ類やカニ類の生物由来の穴を経由して塩分が早急かつ全層的に供給されることを一種類の経験定数 γ で表現している。つまり、生物由来の穴の密度が異なれば、 γ も異なると考えられる。また、生物由来の穴がない試料の透水係数は、穴がある試料に比べ 10^4 オーダー小さい。そして、これらの試料は実際の土壌中には混在している。これらのことから、それぞれの試料に対応する γ を求め、これらを合成することで、より実態にあった γ が得られる可能性もある。他地点や他河川でのモデルの汎用性の確保を進める上で、 γ のとりうる範囲の把握や理論的な算定方法の確立等が望ましいが、これらは今後の課題としたい。

(4) 塩分の影響を考慮した汽水性湿地の設計

第5章のシナリオシミュレーションでは、池拡大シナリオを1ケース設定し、塩分環境の変化を予測した。池のさらなる拡大や池の開口部の諸元を変更することにより、塩分環境をさらにコントロールできる可能性がある。例えば、目標とする生物種とその生物が選好する塩分環境が明確になっている場合には、その塩分環境を形成する湿地の諸元の検討に活用できる。

(5) 高水敷の切り下げに関する技術基準の検討

本研究で提案した汽水性の湿地の創出は、高水敷の切り下げを伴うものである。これは、河積の増大に伴う流下能力の向上という治水面の効果も期待できることから、今後加速すると考えられる国土強靱化にも寄与するものである。ただし、高水敷の切り下げは、出水時の高水敷の高速流の発生のリスクも有する。治水安全度を維持する範囲での高水敷の切り下げ高や形状等に関する技術基準の確立のための検討が併せて必要となる。

(6) 治水と環境を一体とした川づくり

多自然川づくりは、河川が“元来”有していた生態系を復元、あるいは創出する川づくりである。そして、河川の生態系はその受け皿となる河川の物理環境の上に成立している。元来 50 種類の魚類が生息していた河川があり、現在 10 種類に減少した状況を想像してみる。種数の減少の原因が物理環境による場合には、50 種類の魚類が生息できる物理環境への回復が、多自然川づくりの目指すべき姿と言える。このことは、魚類に限らず、他の動植物にとっても同様と考えられる。

個々の生物が選好する物理環境は、それぞれ重なりつつも微妙に異なる。例えば、身近な淡水魚であるギンブナとヘラブナ（原種はゲンゴロウブナ）は同所に生息することが普通にみられるが、ギンブナは主に低層、ヘラブナは主に表層を好む。また、同じく身近なトンボの仲間であるギンヤンマとシオカラトンボのオスは、同じ池でしばしばみられるが、ギンヤンマは水際からすこし離れた領域、シオカラトンボは水際を中心になわばりを形成する。一方、類似でなく同種の環境を選好する種の場合を考えてみる。在来種のメダカと外来種のカダヤシは、ともに小水路や池などの、水深が浅い水際を選好するが、選考する物理環境が一致するため、強い種が弱い種を駆逐する結果となる。

つまり、ごく単純に言えば、元来 50 種類の生物が生息できていた場合は、50 パターンの物理環境により構成され、逆に 10 種類に減少してしまった場合は、物理環境のパターンが減少したために生じたと考えることができる。

本研究の第 5 章のシナリオシミュレーションでは、湿地内の池を拡大することにより塩分をコントロールし、ヒヌマイトトンボのヤゴが生息可能な塩分環境を形成できることを示した。ここで仮に、ヒヌマイトトンボの生息のみを考えた場合には、それが選好する水深と塩分のみ存在する池を形成することで可能と言える。つまり、単調な池となってしまう可能性がある。しかしこのような物理環境は、多様な生物相が存在できる多様な物理環境とは全く性質を異にする単調なものとなる。ある生物種を目標種に立てたとき、その種が選好する物理環境のみを創出するという考え方は危険である。目標種は、生物相の単調化の過程で姿を消したその他の種のひとつにすぎず、すべての種が生息できる多様な物理環境の保全・創出が必要であることを忘れてはならない。

ここで、治水と環境を両立した川づくりを考えてみる。現在、国土強靱化や流域治水が叫ばれ、今後の川づくりの軸となっていくものと思われる。具体の施策として推進されるメニューとして、従来から実施されてきた流下能力の増大のための河道掘削による

「河積の増大」は、引き続き必要となるであろう。また、従来の川づくりには含まれていなかった「堤内地の遊水地としての活用」は、今後、検討が本格化するであろう。

河積の拡大においては、本研究で提案した高水敷の切り下げと併せた湿地の創出が考えられる。これは、汽水区間に限らず淡水区間についても適応できる。高水敷の安全性の確保を絶対条件としつつも、従来の浚渫による低水路掘削に変えて、陸上掘削のため工事費も抑えることができる対策として、有力なメニューとなりうると考えられる。ここで重要となるのは、河川が元来有していた物理環境をよく理解し、目標とする物理環境を適切に設定することである。現在の我が国の河川では、生物の種数が減少、あるいは単調化している河川が多い。また、1997年（平成9年）に改正された河川法では、治水と環境の両立を原則としている。このため、今後の河川整備においては、多様な物理環境が存在し、かつ治水機能を有する川づくりの目標としなければならない。例えば、50種類の生物種を目標とするならば50パターンの生物環境の形成を目標としなければならない。実際には、物理環境はデジタルに存在するのではなく連続しているため、グラデーションを有する物理環境の創出を基本原則とした川づくりが必要となる。

「堤内地の遊水地としての活用」について考えてみる。例えば淀川は、桂川、宇治川、木津川の3川の合流後に名称が淀川となり、3川合流点にはかつて巨椋池^{おぐらいけ}という広大な池が存在した。巨椋池は昭和初期に干拓で消失し、京都競馬場中央の池にその名残をкаろうじて残すのみであるが、その周辺は農地を主とする低平地である。巨椋池のように、かつて池沼や湿地が存在し、干拓や埋め立てにより姿を消した場所はわが国には多数あると考えられる。現在は消失したこれらの土地を遊水地として整備できれば、従来の河川内のハード整備による洪水調節以上の治水機能の増強に寄与するはずである。さらにその際、自然環境の復元を併せて行うことにより、治水と環境を両立した場が創出できる。単に過去を復元するだけではなく、プラスアルファの機能を持たせることも可能となる。当然ながら、これらの土地は、宅地や農地等としての何らかの利用がなされている。このため、流域の洪水リスクの平面分布を明らかにし、適地の抽出を可能とする技術の確立を前提とすることは言うまでもない。

本研究で行ったような観測技術と予測技術の研究を継続するとともにこれらを駆使し、また、ここで述べた治水と環境を両面した川づくりによって、100年後、1000年後の真の国土強靱化に資するものと考えられる。

以上

謝辞

本論文をとりまとめるにあたり、東京都立大学大学院都市環境科学研究科都市基盤環境学域の横山勝英教授には、研究の方針、遂行、成果のまとめ方にいたるまで多方面にわたり惜しみないご指導を賜りました。幾度にもわたるゼミの中で、数多くの議論をさせていただき、研究の詳細なご指導をいただくと共に、励ましのお言葉があったからこそ成し遂げることができました。ここに心から深く感謝の意を表します。

東京都立大学大学院都市環境科学研究科都市基盤環境学域の今村能之教授、新谷哲也准教授には、本論文を審査いただくとともに暖かい激励を賜りました。先生方の適確な御助言と御指導により、本論文の内容を向上させることができました。深く感謝申し上げます。

石川忠晴東京工業大学名誉教授には、建設技術研究所の技術顧問として、ある業務の技術指導を2016年7月からいただいております。その内容は、建設技術研究所への入社以来、治水計画に関する業務がメインであった中で、河川環境に関するものでした。その後、荒川を対象とした研究を社会人博士課程のなかで進めることをご提案いただきました。私自身、入社以来、河川環境に関する業務に携わる機会が少なかったため、業務の両立や技術面で不安しかありませんでした。しかし同時に、そもそもこのような機会はそうあるものではないとの思いから、2019年4月からの博士課程の中で本格的にご指導をいただくこととなりました。その時の心境としては、建設コンサルタント歴は20年程度あったため、なんとかなんと楽観していた部分もありました。しかし、実際に始まった研究は、まったく想像通りには行きませんでした。研究方針の道筋を石川先生に示していただいたにもかかわらず、具体的な形にする段階ではことごとくつまずきました。とりわけ、モデル開発の視点は欠落していました。普段、建設コンサルタントとしては、手引きやマニュアル等に示された既存のモデルを使用する場面が多いですが、研究ではそのモデル自体を開発することとなります。しかしその発想が不足していることを痛感しました。挫折しそうな日々の中で、石川先生からはその都度親身に、具体的な道筋を示していただけたからこそ、少しずつ前進することができました。当初の会社や喫茶店での打合せは、途中、コロナ禍でWEB打合せに移行しつつ、週末でも快く引き受けていただきました。特に、学会論文の締切りまでの1か月間は、私からの急な質問にも昼夜を問わず、丁寧にご指導いただきました。2019年7月の博士後期課程の開始から今にいたるまで、石川先生のご指導なしにはたどり着けませんでした。本当に、ありがとうございます。

国土交通省関東地方整備局荒川下流河川事務所からは、研究で使用した塩分データをはじめとした各種データをご提供いただくとともに貴重なご助言をいただきました。Gubash Azhikodan 助教授、社会人博士課程の金子祐さん、Maurice Duka さんには、ゼミの場等で助言をいただき、日々の大きな励みとなりました。横山研究室の梅田雄太さん、木下航太さん、稲川翔太さん、Neriezza Olap さん、山内祐人さんとは研究をともにし、現地観測をはじめとして、多大な協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

今回、会社に在籍しながら研究活動の場を快く与えていただきました（株）建設技術研究所 西村達也本社企画・営業本部長、天野光歩東北支社長、永矢貴之東京本社次長、荒木千博東京本社河川部長、岩見収二大阪本社河川部次長、加藤千恵東京本社河川部次長に心から深く感謝申し上げます。特に岩見次長には、社会人大学生の先輩として会社での至らない場面で支えていただきました。平田治さんには、現地観測の準備から実施に至るまで多大なご協力をいただきました。古賀達也さんには、日々の研究生活を送る中で、要所での確かなアドバイスをいただきました。共に仕事をしている部員の金山拓広さん、桐生真澄さん、山下千智さん、安藤裕一さん、笠見幸大さん、元社員の浦谷修司さん、アルバイトの沈紅さんからも、多くのご支援と励ましをいただきました。社会人大学生として研究を進めることができたのも、多くの方々からの暖かいご支援とご協力によるものです。ここに深く感謝の意を表します。

最後に、日々の研究を進めるにあたり、妻の育実の協力がなければ、ここにたどり着くことは困難でした。博士へのチャレンジを悩んでいた際、このような機会はそうそうあるものではないと背中を押してくれました。研究の日々においては、平日よりむしろ休日がメインとなる中でも、全面的に支えていただきました。本当にありがとうございます。