

生物生息環境と汽水環境の保全に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～令 3

担当チーム：水環境保全チーム

研究担当者：新目竜一、村山雅昭、巖倉啓子、
谷瀬敦、野上毅、杉原幸樹

【要旨】

弱混合型の塩水遡上の河川において、汽水環境の指標として塩淡境界標高と淡水流量の関係性を調査、検討した。また、1次元および3次元の塩水遡上数値モデルを構築し、河道断面形状との関係について検討を行った。塩淡境界標高は河川淡水流量と相関関係があり、感潮域外の淡水流量によって、下流区間の任意地点での塩淡境界標高が推定出来ることを明らかにした。また数値モデルにより低水路を複断面とすることで塩水遡上が助長されることがわかった。数値実験から低水路掘削により、汽水環境を拡大させることが可能であると推察された。
キーワード：塩水遡上、汽水環境、河道形状、数値実験

1. はじめに

気候変動によって、海面の上昇や降雨量の増加などが予想されており、河川河口域においては塩水遡上の増加や流下流量の増加の相反する影響がどのように発現されるかは不明な点が多い。これまでに天塩川において調査を行ってきた結果¹⁾から、天塩川では淡水流量の増加影響が強く、汽水環境の減少となっていることが示唆されている。河口域では農業や工業用水および上水利用のため淡水要求が強い河川と漁業や環境保全のため塩水要求が強い河川があり、河川毎に水利用を加味して、気候変動影響に適応した対応が必要となる。

天塩川はシジミ漁業や汽水湿地保全のため塩水要求が高い河川であるが、気候変動により淡水化影響が強くなっている課題がある。一方で、全国では淡水要求を満たすため塩水堰など河川構造物を設置する事業が散見されるが、総じて水質汚濁の要因となっている。

また、海面の上昇や淡水流量の減少時には地下水の塩水化も想定されており²⁾、水質悪化を起こさずに淡水需要に対応する一方で、塩水需要に対応することが望まれるといった、二律背反の状態が想定される。河川構造物による対策は、環境面での副作用が想定され、その副作用がどのようなものとなるかの予測困難な場合が多い。そこで横断構造物に依らない塩水制御の方策として河道形状によって制御可能かの検討を行った。

本研究は弱混合河川を対象として、塩水遡上挙動と淡水流量の関係を解析した。さらに天塩川を対象として塩水遡上の数値計算モデルを作成し、断面形状が塩

水遡上に与える影響を検討した。加えて海面上昇や河川流量の増加など外的因子による塩水遡上に与える影響の検討、河道断面による塩水遡上への影響を検討した。

2. 淡水流量と塩水遡上の関係

2.1 天塩川における調査・検討

本研究は図-1に示す北海道北部に位置する天塩川(流路延長 256 km、流域面積 5,590 km²)を対象とした。天塩川では河口から 19.4 km まで塩水が遡上することが知られており³⁾、この間の河床勾配は 1.5 万分の 1 ほどである。なお、塩水が遡上する区間に合流する主な支川はサロベツ川のみである。また、河口から 30 km 上流に設置されている円山(まるやま)水位・流量観測所では、塩水の遡上は確認されていない。なお、図-1 中 KP は河口からの距離を表し、KP7.8 は河口から 7.8 km 上流であることを示す。



図-1 対象位置図

既往⁴⁾の観測結果(2015年7月～10月)から天塩川本川の流速分布を図-2に示す。下層の黄～赤色部は遡上する流れを示し、塩水は明瞭な二層構造を形成することを確認している。天塩川水系では高潮時以外は潮汐周期によらず、KP3.0より上流で二層構造が常に観測され、境界付近の塩分濃度は鉛直方向40cm間で1PSU程度から33PSUに急激に変化する。なお、出水時には塩水が押し流される挙動は確認したが(図-2 青色部参照)、塩淡水境界が破壊・混合する挙動は観測できていない。このように天塩川水系では本川および支川でも塩水遡上は明瞭な塩淡水境界を有する弱混合型で遡上している。

天塩川では、KP19ほどまで海水が遡上し、塩分濃度30PSUを塩淡水境界として境界標高は本川流量で定式化できることを報告した⁴⁾。図-3に天塩川KP7.8における境界標高と円山観測所流量(以下、円山流量)の関係を示す。境界標高は淡水流量の対数形で近似でき、淡水流量が多いほど境界標高が低下する。サロベツ川合流点であるKP11.8での国土交通省北海道開発局留萌開発建設部(以下、留萌開建)による超音波流速計の調査結果からも、塩淡水境界標高は立式可能であり、境界標高の縦断推定状況を確認した。KP7.8とKP11.8の境界標高の推定式から両地点間の直線外挿することで縦断的な境界標高位置を推定した。2006年6月19日に留萌開建で実施された音響測深機による密度境界の縦断観測結果と本研究での塩淡水境界標高推定値は、図-4に示すように実測値とほぼ一致した。この手法により河道形状が大きく変化しないかぎり、上流1点の流量データによって縦断的な塩淡水境界を推定でき、かつ過去の塩水環境データの復元が可能であることが示唆される。

2.2 他河川での適用

本研究は楔状で海水が遡上する、弱混合河川を対象とした。一般に日本海側に河口を有する河川では日本海の潮位変動幅が小さいために弱混合河川が多い。北海道でも天塩川、石狩川、尻別川など日本海に河口が接続する1級河川では弱混合型で塩水遡上する。天塩川での推定手法が他河川でも適用出来るかを確認するため、鉛直塩分分布を連続的に観測した結果を確認できた石狩川と尻別川について適用を行った。

天塩川での解析は2011年と2012年に弊所で実施した、天塩川での超音波流速計による連続観測および投げ込み式塩分計による鉛直塩分分布観測結果を用いた。

石狩川での解析は2002年に弊所で実施した、音響測深機と投げ込み式塩分計による塩水遡上観測結果を用

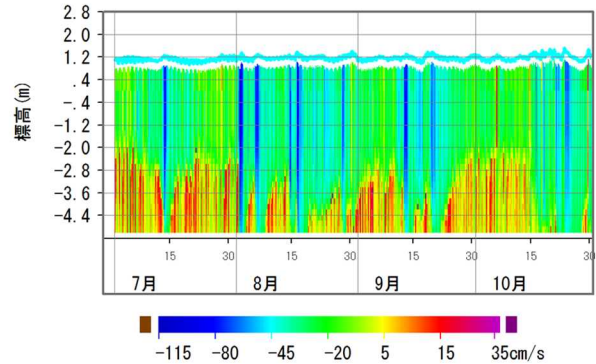


図-2 天塩川KP7.8流速の鉛直分布の時系列変化

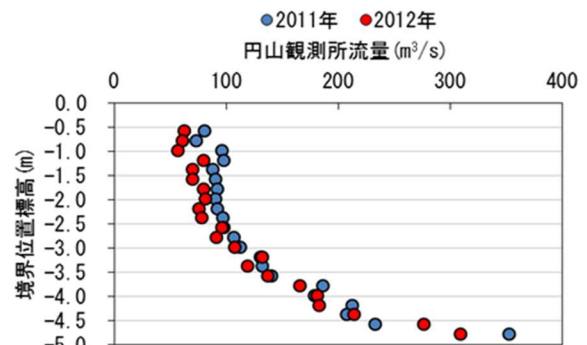


図-3 天塩川KP7.8における淡水流量と塩淡水境界位置標高の関係

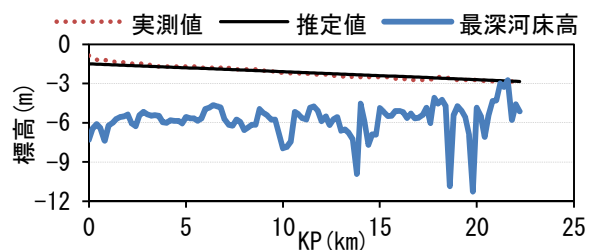


図-4 天塩川における境界面標高の縦断変化

いた。

尻別川での解析は国土交通省北海道開発局小樽開発建設部(以下、小樽開建)より提供いただいた、2012年の尻別川での自記式塩分計による連続観測結果を用いた。

各データより鉛直塩分が20PSU以上となる、標高を塩淡水境界位置として、毎時のデータを整理した。なお、石狩川については断続的な観測のため、観測間で内挿補間して毎正時データを作成した。また尻別川については、鉛直方向の塩分値が断続的なため、0.1m間隔になるように鉛直距離方向に内挿補間してデータを作成した。加えて、各河川の塩分観測期間と同時刻の毎時流量データを水文水質データベース(国土交通省)より収集した。このとき天塩川は円山観測所(KP30.0)、石狩川は岩見沢観測所(KP44.5)、尻別川は名駒観測所

(KP15.2)を選定した。これらは感潮域外で淡水流量の精度を確保できる観測所を選定した。

同時刻の毎正時データについて、河川流量に対する塩淡境界位置標高をまとめ、図-5、6に示す。なお、解析地点は天塩川はKP7.8(図-3参照)、石狩川はKP4.6、尻別川はKP2.6とした。図に示すように、いずれの河川でも任意地点の塩淡境界位置標高は淡水流量と相関関係があることが示唆される。図中では同一塩淡境界位置標高に流量値の分散があり、図中では流量の平均値を示しているが、同時刻の場合でも、流量の標準誤差は±20%であった。天塩川による解析では、流速による到達時間を加味して時間差をつけた場合に誤差が減少し、相関性が向上することを確認しているが、管理上蓄積されているデータが流量であるため、同時刻解析でも塩分挙動の把握には十分であると思われる。

また、天塩川の解析において、同一河川での他地点でも同様に相関関係が確認され、相関式は変化するが淡水流量との相関性が維持されることも確認している。このことから、弱混合で塩水遡上する河川では、任意地点の塩淡境界位置標高は淡水流量で表現出来ることが確認された。

図-3から天塩川では流量が100 m³/s以上で塩淡境界位置標高が低下すること、つまり塩水遡上が抑制されることがわかる。低水流量が200 m³/sほどであるため、標高-3mより高い位置に塩水が接触する頻度が少なくなっていることが示唆される。このことは汽水域の縮小を意味しており、シジミや渡鳥など汽水環境の保全が必要な河川では、流量増加時にも汽水域の縮小を抑制させるような方策が必要である。

図-5から石狩川では淡水流量の増加とともに塩淡境界位置標高が低下している挙動を示した。このとき岩見沢大橋から解析地点までに夕張川、千歳川、豊平川など支川流入があるが、完全淡水域である岩見沢大橋の流量のみでも相関性が高く、塩水挙動の推定が可能であることを示している。もちろん各河川の合流を考慮すれば、精度はより向上すると推察される。石狩川においては農業のため淡水取水をおこなっており、この結果より取水標高の選定や取水停止の目安を河川流量で行うことができることが示唆される。

図-6から尻別川においては流量70 m³/s、塩淡境界位置標高-3.5 m以下で分散が大きい結果となっている。観測データに大流量データが乏しいこと、鉛直補間データを用いていることが影響していると考えられる。尻別川では農業取水のため淡水が必要であるが、最下流の取水地点(KP2.6)では淡水取水頻度が限られるこ

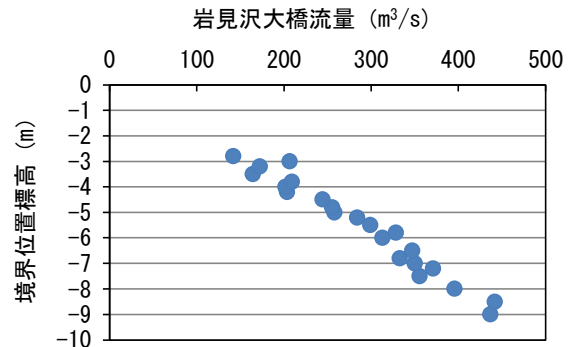


図-5 石狩川 KP4.6における淡水流量と塩淡境界位置標高の関係

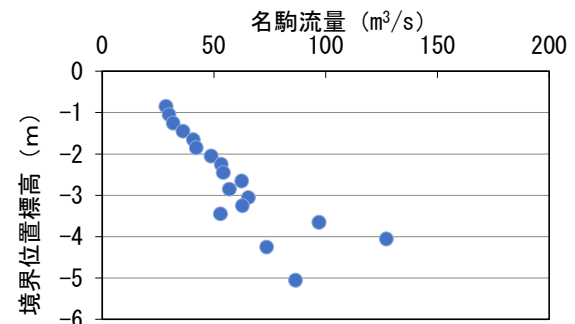


図-6 尻別川 KP2.6における淡水流量と塩淡境界位置標高の関係

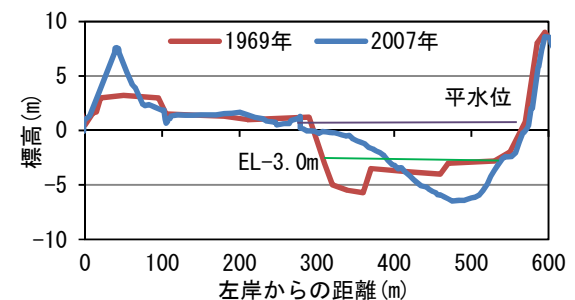


図-7 KP7.8における横断形状の比較

とが推察される。

上述の3河川では、いずれの河川でも対数型の相関式を立式でき、河川によらず共通の推定式を適用できることを確認した。

3. 断面形状による塩水遡上の検討

3.1 断面形状の変化

図-7に天塩川 KP7.8の1969年と2007年の横断測量成果を示す。KP7.8の平水位は0.3mである。1969年の天塩川では標高-3m前後に棚状地形が存在し、2007年にくらべ標高-3mの水路幅が約100mほど広がった。このような地形的な違いはKP0~11.8までの間に所々にみられる。棚状地形が消失した理由は不明であるが、河川改修や鋤簾漁、土砂堆積などの影響と考えられる。

この図から過去は低水路が複断面化しており、塩水遡上頻度が多かったこと、さらに天塩川の塩水遡上は二層構造で淡水と塩水が区分されていることから断面形状の影響を反映した塩水遡上計算を行って、効果を検討した。

3.2 一次元二層流モデルによる効果の試算

3.2.1 計算条件

低水路の複断面の効果を把握するため、定性的な検討を行うこととした。採用したモデルは吉川ら⁹⁾の一次元二層流モデルとした。詳細は割愛するが、淡水層と塩水層の連続式と運動方程式は式(1)~(4)、摩擦勾配は式(6)、(7)である。h[m]：水深、Q[m³/s]：流量、B[m]：川幅、i₀：河床勾配、i_f：摩擦勾配、ρ：液体密度で Knudsen 式、f_i：界面抵抗係数でフルード数とレイノルズ数の関数である金子式、f_b：河床粗度抵抗係数で Manning 式で算出した。添え字 1 は淡水層、2 は塩水層を表す。

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q_1}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q_2}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + g \left(\frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) + g i_{f1} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + g \left(\frac{\partial (1-\varepsilon)h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) + g i_{f2} = 0 \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad (5)$$

$$i_{f1} = \frac{f_i}{2gh_1} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (6)$$

$$i_{f2} = \frac{f_b}{2gh_2} u_2 |u_2| - \frac{f_i}{2gh_2} (1-\varepsilon)(u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (7)$$

ここで、吉川らのモデルは一次元のため淡水層と塩水層の川幅が同一である。そこで、複断面地形は図-8に示すように淡水層の単位幅流量を考慮し、一次元の淡水流量に割り戻して設定した。ここで、棚状部の摩擦勾配、塩淡境界が棚上となった場合の算出、棚の高さの影響など課題が多いが、計算上は単位幅流量と流速により各水深を求めるため、淡水層の川幅による塩淡境界標高の影響については定性的に評価できると考え、棚状部に関する摩擦勾配等は考慮しないこととした。

塩水川幅(B₂)は 250 m、河床勾配 1 / 15000、Manning 粗度係数 0.025 として矩形断面を縦断距離 26 km、全水深は 6 m 程で水路を設定した。下流端の境界条件である潮位は実測値をもとに 0.3 ± 0.5 m の 24 時間周

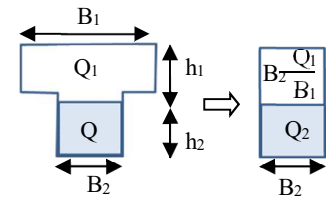


図-8 複断面地形の一次元適用模式図

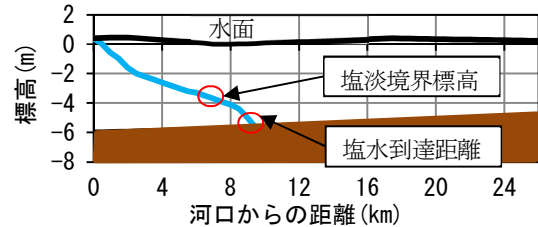


図-9 境界標高計算結果例

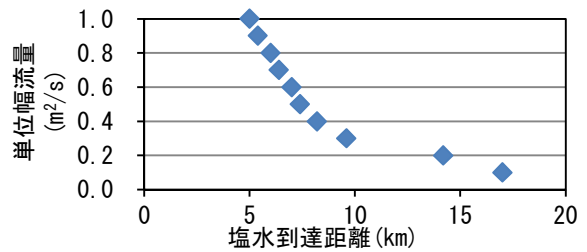


図-10 塩水到達距離と単位幅流量の関係

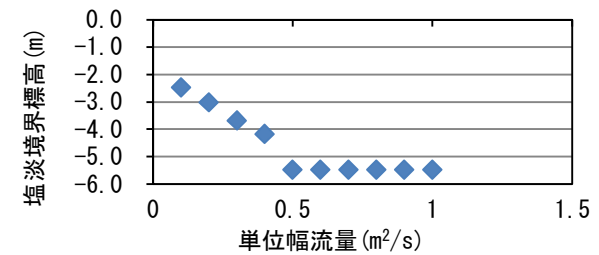


図-11 単位幅流量と塩淡境界標高の関係

期の正弦波で与え、上流端の境界条件である淡水流量を単位幅流量見合いで 0.1~1 m²/s の間で試算を行った。遡上する塩水濃度は変化しないとして 33 PSU とし、淡水と塩水の水温は 15 °C で一定とした。Δx = 200 m、Δt = 1 s として任意上流端流量を一定とした場合の 7 日後の出力値を結果とした。図-9 に算出結果例を示すが、図中の塩水到達距離および KP7.8 相当の塩淡境界標高をとりまとめた。

3.2.2 算出結果

図-10 に単位幅流量と塩水到達距離の関係を示す。塩水到達距離は最長で 18 km に到達する。しかし単位幅流量が 0.4 m²/s では 9 km までしか達しない結果となった。また、単位幅流量 0.4 m²/s が単位幅流量に対する塩水の遡上距離の変化量の変曲点となる結果となり、水路幅 250 m では流量規模は 100 m³/s に相当する。淡水流量が 100 m³/s 以下で塩水到達距離が、より

伸長して塩水遡上量が増加することを示唆している。実際の天塩川でも淡水流量が減少するほど塩水遡上が助長される傾向¹⁾は一致している。

次に図-11に KP7.8 相等の塩淡水境界標高と淡水の単位幅流量の関係を示す。単位幅流量が $0.4 \text{ m}^2/\text{s}$ までは KP7.8 に塩水が到達しているため、境界標高が算出される。単位幅流量が $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 以上では塩水が到達しないため、塩淡水境界標高は河床高になっている。このとき単位幅流量が小さいほど塩淡水境界標高が高くなる結果となった。実際の天塩川では単位幅流量 $0.4 \text{ m}^2/\text{s}$ のとき、KP7.8 の塩淡水境界標高は -2.5 m 、塩水到達距離は 14 km 程であり、計算結果は塩水遡上を過小評価している。しかし、淡水流量の増加によって塩淡水境界標高が低下し、塩水到達距離が短縮するなど、定性的な挙動は概ね評価できると思われる。ここで、算出される全水深(h_1+h_2)は単位幅流量が大きいほど深くなるが、その差は 3 cm ほどであった。淡水の単位幅流量が減少すると h_1 が減少するが、補うように h_2 が増加するために塩水遡上が助長される結果となった。また、塩淡水界面の摩擦係数は淡水層のフルード数とレイノルズ数で算出しているが単位幅流量が減少すると淡水流速も減少するため界面摩擦も減少する。このため塩淡水境界標高が上昇し、全水深がほぼ変化しないと推察される。以上の結果から、塩水遡上を促進させるためには淡水の流速を減少させること、換言すれば単位幅流量を減少させること、つまり淡水川幅を拡幅することが有効であることがわかった。1次元計算において、棚状部の水深は h_1 となるため、概念的には上流に向かい棚状部が塩淡水境界標高に沿って深くなる欠点がある。そのため、より詳細に地形効果を検証する必要があるが、単位幅流量を減少させることで、塩水遡上が促進される傾向は変化しないと考えられる。よって川幅の拡幅、棚状地形の造成は塩水遡上の促進に一定の効果があると想定される。さらに河積の増大、生物生息場としての副次的な効果も期待される。

3.3 三次元モデルによる塩水遡上計算の構築

3.3.1 計算条件

1次元モデルにおいては断面形状を反映しきれない欠点があるため、3次元の計算モデルを構築することとした。オランダの *deltares* 研究所が開発した、オープンソース3次元水理計算ソフト (Delft3D) を援用して、天塩川への適用モデルを構築した。河道形状は2006年の横断測量結果から、KP0.0~12.0までの範囲で、各横断面の 30 m 間隔で河床標高を抽出して計算断面を作成した。上流境界条件は円山観測所の毎正時流量と水

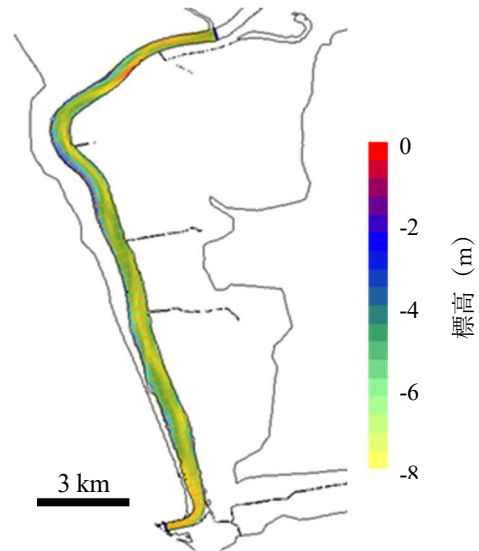


図-12 計算河道と入力河床標高

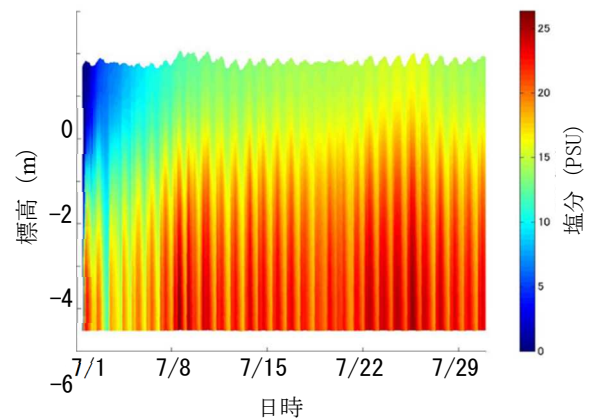


図-13 KP7.8における塩分鉛直分布の経時変化

位とし、塩分濃度を 0 として与えた。下流境界条件は杵形港潮位 (利尻島: 天塩川河口から直近の潮位観測所) として、塩分を 35 PSU として、計算上の助走距離を 400 m 与えて調整した。このとき遡上側の初期速度は与えず、密度による貫入のみを与えた。マニング粗度係数 0.025 として2012年7月1日~7月31日までの期間について再現計算を行った。図-12に入力河道条件のコンター図を示す。天塩川の低水路においては流心と比べて左右岸が浅くなる複断面形状となっている。1次元計算では低水路高さが変動してしまう欠点があったが、3次元計算では河床形状を固定して反映させることが可能となった。

3.3.2 計算結果

再現計算結果を図-13に示す。モデルは塩分算出が σ モデルであるため、明瞭な塩水楔を再現しきれていない。しかし、塩分値 20 PSU の標高は観測値と概ね一致していた。7/1~7/7までは海水の初期流速を与えていないため、定常状態までの助走期間となっている。7/8~7/11までは上層では高水による塩水流出、底層で

は海水遡上が同時に起きている結果となった。7/22～7/26では低流量となり塩水遡上が卓越し、境界標高の上昇と底層の高塩分が算出されている。以上から高水や低流量および潮位などにより、塩分値の日周期増減や淡水流量見合いの変動(図中赤色部)がおおよそ再現できることを確認した。一方で σ モデルによる標高-2m以上での塩分の過大評価については改良の余地がある。

しかし概ね塩水遡上を表現できるため、河道形状、上下流の境界条件等を変化させたときの影響を検討した。KP7.8相当位置の塩分値20PSUとなる標高を便宜的に境界標高として、1ヶ月間の平均境界標高値を解析した。解析結果を表-1、2にまとめる。表-1は上流端境界条件の淡水流量を一定値増加させた場合と下流端境界条件の潮位を一定値増加させた場合の結果であり、値が小さくなるほど塩水遡上が助長されることを示している。潮位と淡水流量は相反する結果となり、天塩川においては河川流量の影響が強く反映されることが想定される。表-2はKP5.0～6.0の範囲で河道断面を複断面形状に掘削した場合を想定して、兩岸河岸部の掘削深さと拡幅幅を変えた場合の計算結果である。流路の一部を掘削する想定のため、塩水遡上への影響は小さいが、掘削深を深く、広く拡幅するほど塩水遡上が助長される結果となった。なお、平均塩淡境界より深く掘削すると、助長効果が得られず、むしろ流出傾向となる結果が得られた。図-14に幅30m、深さ2mで複断面化したKP5.2の例を示す。感度分析では兩岸同等に複断面化する形状を与えて計算を行っている。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 弱混合型の塩水遡上河川において、任意地点の塩淡境界標高は感潮域外の淡水流量で推定できることがわかった。この傾向は河川に依らず共通であった。
- 2) 塩淡境界標高を数値計算により算出するモデルを構築した。塩淡境界は淡水の単位幅流量により強く影響されることが示唆され、低水路の複断面形状により、塩水遡上に影響を与えることが推察された。
- 3) 外力による塩水遡上影響を数値モデルによって分析した結果、潮位と淡水流量は相反する結果となり、天塩川においては河川流量の影響が強く反映されることがわかった。また塩水遡上を助長させるには低水路を複断面形状にすることが有効であ

表-1 塩淡境界標高の境界条件による感度分析結果

		淡水流量		
		+0m ³ /s	+30m ³ /s	+50m ³ /s
潮位	+0cm	-2.11	-2.38	-2.60
	+30cm	-1.90	-2.14	-2.25
	+50cm	-1.72	-2.05	-2.16

表-2 塩淡境界標高の断面形状による感度分析結果

		幅		
		0 m	15m	30m
深さ	0m	-2.1105	-2.1104	-2.1102
	1m	-2.1102	-2.1101	-2.1018
	2m	-2.1091	-2.1089	-2.0932

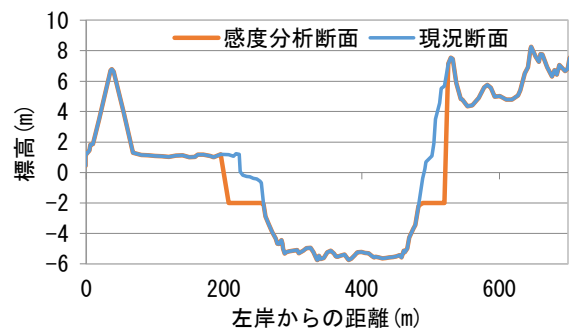


図-14 感度分析における断面形状の一例

り、平均塩淡境界深さまでは深いほど、拡幅幅が広いほど塩水遡上が助長されることがわかった。当然塩水遡上を抑制したい場合は単断面に近づけることで抑制効果が得られると推定される。

参考文献

- 1) 杉原幸樹、平井康幸：サロベツ川の水収支に基づくヤマトシジミ生息環境と流況変化の関係、土木学会論文集 G(環境)、Vol.71、No.5、I_79-I_86、2015。
- 2) 国土交通省：国土交通省気候変動適応計画、2015。
- 3) 西田修三、吉田静男：天塩川河口二層流の水理特性、海岸工学研究発表会論文集、第33巻、pp. 601-605、1986。
- 4) 杉原幸樹、渡邊和好、平井康幸：天塩川におけるヤマトシジミ生息環境に対する塩水遡上の影響、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.71、No.4、I_1117-I_1122、2015。
- 5) 吉川泰弘、阿部孝章、中津川誠、船木淳悟：河川津波による塩水遡上現象に関する研究、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.71、No.2、I_403-I_408、2015。

Research on conservation of biological habitat and brackish water environment

Research Period: FY2017-2021

Research Team: Watershed Environment Engineering Research
Team, Cold-Region Hydraulic and Aquatic
Environment Engineering Research Group

Author: SHINME Ryu-ichi
MURAYAMA Masaaki
IWAKURA Keiko
TANISE Atsushi
NOGAMI Tsuyoshi
SUGIHARA Koki

Abstract: We investigated and examined the relationship between salt-freshwater boundary elevation and freshwater flow rate as an index of brackish water environment in double-layer formed saltwater upstream rivers. In addition, one-dimensional and three-dimensional saltwater run-up numerical models were constructed, and the relationship with the cross-sectional shape of the river channel was examined. It was clarified that the salt-freshwater boundary elevation correlates with the freshwater flow rate, and that the salt-water boundary elevation at any point in the downstream section can be estimated from the freshwater flow rate outside the tidal area. In addition, it was found that the saltwater run-up is promoted by making the low waterway a compound cross section by the numerical model. From numerical experiments, it was inferred that it is possible to expand the brackish water environment by excavating low waterways.

Keywords: Salt water run-up, brackish water environment, river channel shape, numerical experiment