

河川河口域における断面形状による 塩水環境変化に関する研究

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム

○杉原 幸樹
巖倉 啓子

河川感潮域の塩水環境は気候変動に伴い、今後変化する可能性がある。日本海に河口が接続する河川においては楔状で海水が河川内に遡上する弱混合となる。過去の塩分観測結果から、塩淡水境界標高といった塩水遡上の指標は河川流量と相関関係があることを明らかにした。また流動モデルにより河道横断形状を変化させると、塩水環境が変化することがわかった。数値計算による低水路を複断面化した場合の結果を報告する。

キーワード：塩水遡上、気候変動、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適用したり、他方では塩水需要に適用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は極めて困難である。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。

そこで、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。さらに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

の検討を行った。

2. 淡水流量と塩水遡上の関係

本研究で対象としたのは楔状で海水が遡上する、弱混合河川とした。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。我々は天塩川およびサロベツ川³⁾ の調査結果から天塩川の塩水遡上は塩淡水二層構造を有しているため塩淡水界面の標高は淡水流量で推定できることを明らかにした。これら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いた。

尻別川での解析は小樽開発建設部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、0.1 m間隔になるよう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水境界位置標高をまとめ、図-1～3に示す。なお、解析地点は天塩川はKP7.8、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水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。図中では同一塩淡水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、他地点でも同様に相関関係が確認され、断面形状が変化しないかぎり、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、任意地点の塩淡水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-1から天塩川では流量が100 m³/s以上で塩淡水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-3 m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-2から石狩川では淡水流量の増加とともに塩淡水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、豊平川など淡水流入があるが、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-3から尻別川においては流量70 m³/s、塩淡水境界位置標高-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、最下流の取水地点では淡水取水頻度が限られることが推察される。

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示唆している。

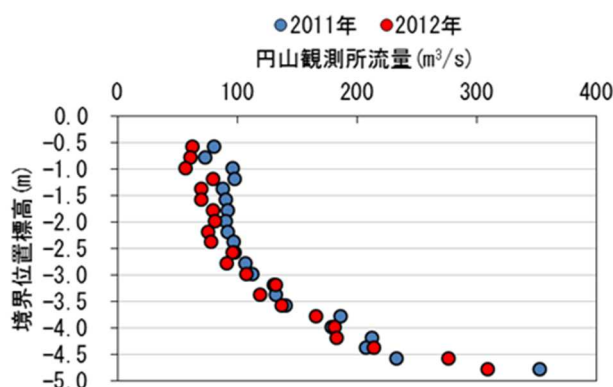


図-1 天塩川 KP7.8 における淡水流量と塩淡水境界位置標高の関係

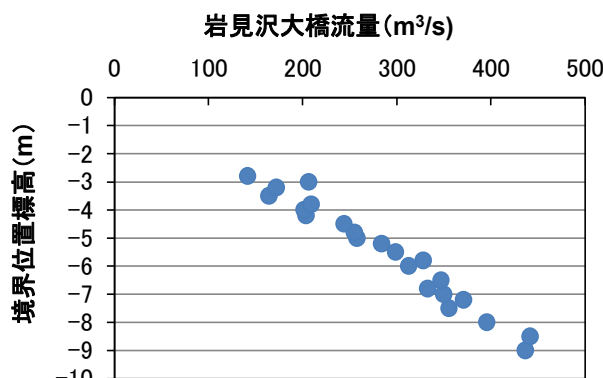


図-2 石狩川 KP4.6 における淡水流量と塩淡水境界位置標高の関係

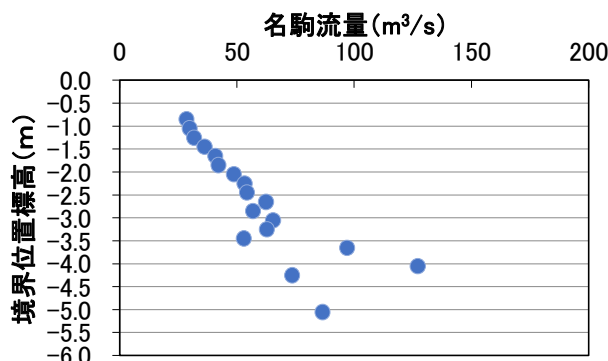


図-3 尻別川 KP2.6 における淡水流量と塩淡水境界位置標高の関係

3. 数値計算による塩分挙動

(1) 一次元二層流モデルによる効果の試算

a) 計算条件

低水路の複断面の効果把握するため、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⁵⁾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、 i_0 ：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マニング式で算出した。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-4 に示すように淡水層の単位幅流量を考慮し、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、塩淡水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水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(B_2)は 250 m、河床勾配 1 / 15000、マニング粗度係数 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 $0.1 \sim 1$ m^2/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。 $\Delta x = 200$ m、 $\Delta t = 1$ 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 5 に算出結果例を示すが、図中の塩水到達距離および KP7.8 相当の塩淡水境界標高をとりまとめた。

b) 算出結果

図-6 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 $0.4 \text{ m}^2/\text{s}$ 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 $0.4 \text{ m}^2/\text{s}$ 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 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ に相当する。淡水流量が $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 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(図-1 参照)、淡水流量が減少するほど塩水遡上が助長される傾向は一致している。

次に図-7 に KP7.8 相等の塩淡水境界標高と淡水の単位幅

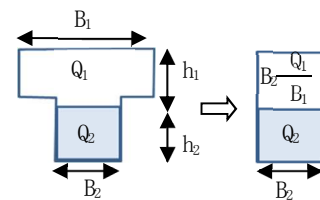


図-4 複断面地形の次元適用模式図

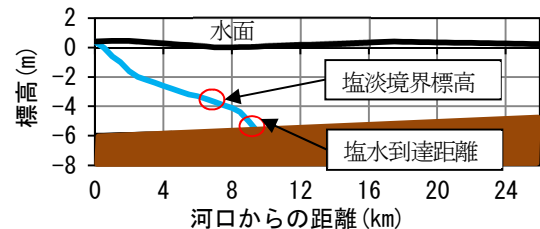


図-5 境界標高計算結果例

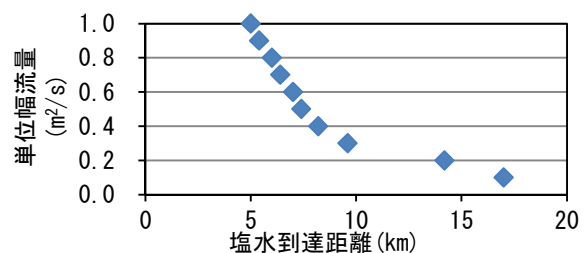


図-6 塩水到達距離と単位幅流量の関係

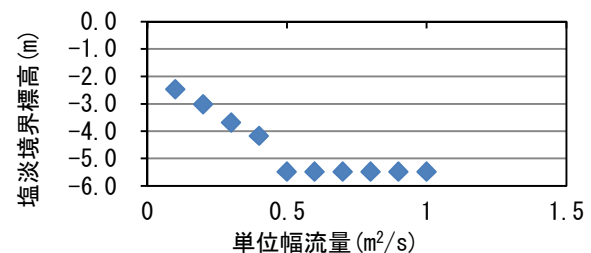


図-7 単位幅流量と塩淡水境界標高の関係

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、単位幅流量を減少させること、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_f 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。

(2) 三次元モデルによる塩水遡上計算の構築

a) 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位とし、塩分濃度を0として与えた。下流境界条件は沓形港潮位として、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-8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。

b) 計算結果

再現計算結果を図-9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-2 m以上の塩分の過大評価については改良の余地がある。

4. まとめ

弱混合型の塩水遡上河川において、任意地点の塩淡水境

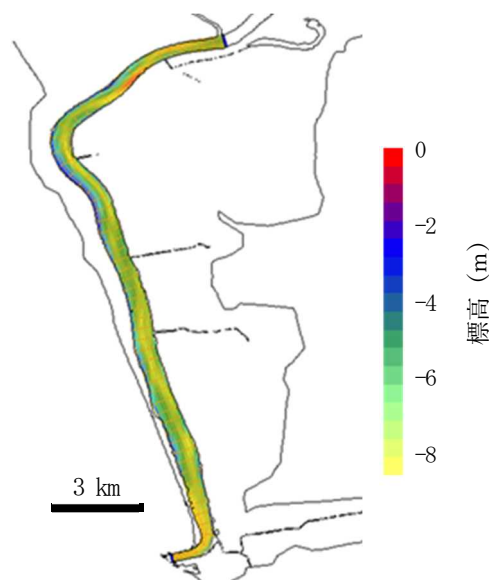


図-8 計算河道と入力河床標高

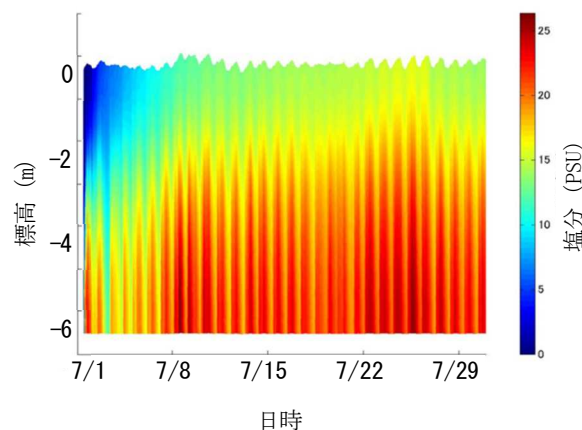


図-9 KP7.8における塩分鉛直分布の経時変化

界標高は淡水流量で療原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。また、塩淡水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。

今後は3次元モデルの精度を向上させ、断面形状による影響評価を予定している。

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) 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。
- 4) 杉原幸樹、新目竜一：天塩川水系におけるヤマトシジミ生息環境の変化要因とその適応策の検討、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 73、No. 4、I_1135-I_1140、2017。
- 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。