

数値シミュレーションを用いた雄物川河口域における塩水遡上の研究*

秋田大学理工学部 神田智洋

秋田大学大学院理工学研究科 谷口隼也・齋藤憲寿・渡辺一也

1. はじめに

河口部は河川や海岸からの外力による影響を大きく受けしており、特に淡水と塩水の接触によりきわめて複雑な様相を呈している¹⁾。弱混合型河川で生じる塩水くさびは河川水の塩水化を引き起し水資源利用の障害となっており、この性質を解明することは重要である。このような河川での塩水くさびの遡上については、石狩川河口²⁾や阿賀野川³⁾等で実測資料をもとに研究が行われている。また、秋田県では米代川⁴⁾で研究が行われているが、2019年 の渴水被害⁵⁾に伴い塩水遡上が確認された雄物川において、塩水遡上の要因は明らかとなっていない。

そこで本研究では、雄物川河口域を対象に現地観測と塩水遡上の数値シミュレーションを行い、雄物川の塩水遡上に影響をもたらす要因を検討した。

2. 研究対象

図1に雄物川の全体図を示す。雄物川は秋田県を流れる一級河川である。流域面積は4,710 km²、幹線流路延長は133 km となっている。

図2に観測地点および計算領域を示す。観測地点においては、観測地点AB間の距離は約50 m となっている。観測地点Cは、2019年に国土交通省が実施した



図1 雄物川流域図

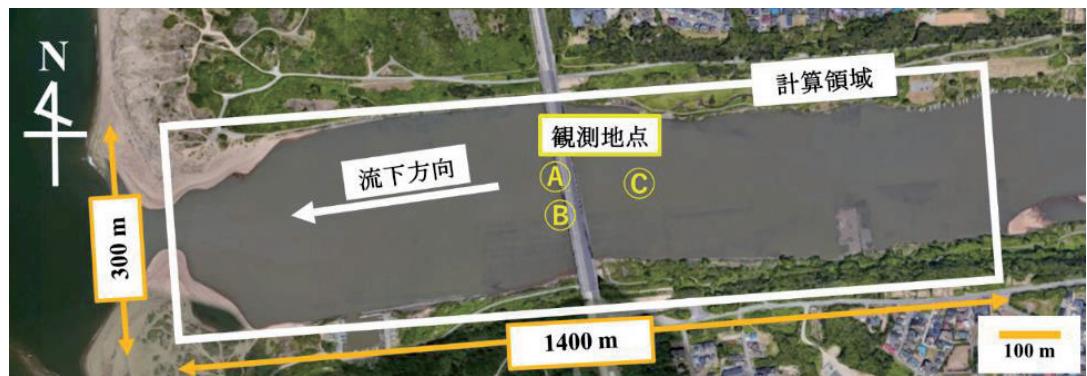


図2 観測地点・計算領域(google map より引用)

*Study on Saline Water Run-up at Omono River Mouth using Numerical Simulation by Tomohiro KANDA, Junya TANIGUCHI, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE

塩分観測地点であり、観測地点 A および B から上流方向に約 100 m に位置している。本研究では雄物川河口域を対象に、現地観測と数値シミュレーションを行った。

3. 塩分観測結果

塩分観測には多項目水質計（クロロテック）を用いて、塩分の鉛直分布を測定した。塩分観測の結果を図 3 に示す。2021/6/17 の観測では、地点 A にて塩水の遡上は認められなかったが、2021/8/4 の地点 A では、最大塩分濃度 31.510 psu を示した。同日の地点 B では、最大塩分濃度 31.416 psu を示した。そして、2019 年に国土交通省によって地点 C にて実施された観測結果は、16.300 psu を示した⁶⁾。地点 A および B に対して地点 C の塩分濃度は半分程度という結果を示したが、これは観測地点 C がより上流側に位置していることが原因と考えられる。塩水遡上が確認できた場合は、いずれも明瞭に塩水の躍層が見られた。また、塩水が河床を這うように分布していたことから、塩水遡上が確認される場合は、塩水くさびが発生するのではないかと考えられる。

観測日 7 日前からの水位差の変化を図 4 に示す。水位差 $\Delta\eta$ は、潮位 η_r および水位 η_R より式(1)を用いて算出した。なお、データは国交省より秋田港のデータを使用した。

$$\Delta\eta = \eta_r - \eta_R \quad (1)$$

塩水遡上が確認された 2019/8/9 および 2021/8/4 の水位差は -2.5 m であったが、遡上が確認されなかった 2021/6/17 の水位差は -0.37 m であった。このことから、-0.37 m から -0.25 m の範囲内で塩水遡上の条件を満たす閾値があると考えられるため、今後はデータを蓄積し、塩水遡上と水位差の関係を詳細に検討する必要がある。

観測日 7 日前からの波高の変化を図 5 に示す。2021/8/4 および 2021/6/17 に測定した際の波高は

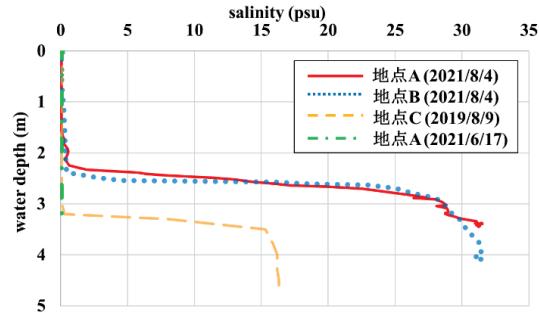


図 3 塩分観測結果

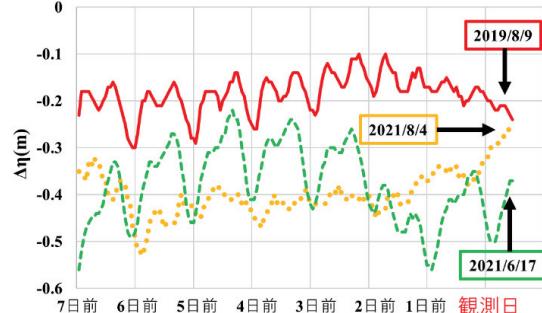


図 4 観測 7 日前からの水位差



図 5 観測 7 日前からの波高

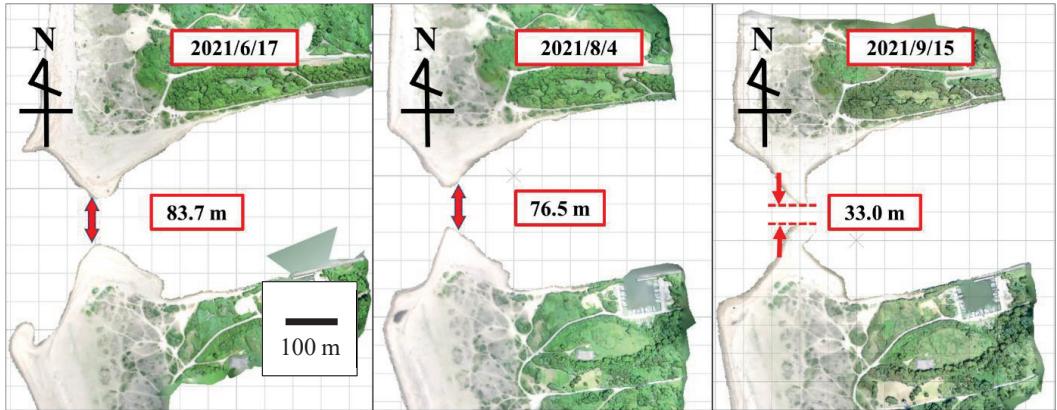


図 6 雄物川河口幅

0.2 m程度であったが、2019/8/9の波高は測定日の10時間程度前からに急激に大きく上昇している。このことから、波高による塩水遡上への影響は見られなかった。

2021/6/17, 2021/8/4 および 2021/9/15 に塩分観測を行った際の雄物川河口部の形状を図 6 に示す。これらの図は雄物川現地にて UAV(unmanned aerial vehicle)を用いて空撮を実施し、SfM(Structure from Motion)処理を施したものである。図 6 のうち、塩水遡上が確認されたのは 2021/8/4 のみであるが、河口幅は 2021/6/17 の方が大きな数値を示した。このことから 2021/8/4 に塩水遡上が確認できた要因の一つは図 4 に示した水位差であると考えられる。また、2021/9/15においては、河口幅が非常に狭くなっていた。既往の研究⁴⁾によると、河口砂州が発達して川幅が閉塞した場合、河川流量を流下させるために流速が早くなり、海水の浸入が困難になることが明らかとなっている。そのため、2021/9/15 も同様の理由で塩水遡上が確認できなかつたと考えられる。以上のことから、雄物川の塩水遡上において河口幅は一定の影響を与えていていると考えられる。

4. 数値計算

数値計算に使用した基礎方程式を式(2)～(5)に示す。式(2)は連続式、式(3)～(5)は非圧縮とブシネスク近似を使用した3次元 Navier-Stokes 式である。また、塩分濃度の輸送方程式を式(6)に示す。

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta x} + w \frac{\delta u}{\delta z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\delta p}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta x} \left(V_H \frac{\delta u}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(V_H \frac{\delta u}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(V_H \frac{\delta u}{\delta z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta x} + w \frac{\delta v}{\delta z} - f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\delta p}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta x} \left(V_H \frac{\delta v}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(V_H \frac{\delta v}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(V_H \frac{\delta v}{\delta z} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\delta w}{\delta t} + u \frac{\delta w}{\delta x} + v \frac{\delta w}{\delta x} + w \frac{\delta w}{\delta z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\delta p}{\delta z} + \frac{\delta}{\delta x} \left(V_H \frac{\delta w}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(V_H \frac{\delta w}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(V_H \frac{\delta w}{\delta z} \right) - \frac{g}{\rho_0} (\rho_0 + \rho) \quad (5)$$

$$\frac{\delta C}{\delta t} + u \frac{\delta C}{\delta x} + v \frac{\delta C}{\delta y} + w \frac{\delta C}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta x} K \left(\frac{\delta C}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} K \left(\frac{\delta C}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} K \left(V_H \frac{\delta C}{\delta z} \right) \quad (6)$$

表1 計算パラメータ

	流量・波高と 塩水遡上の関係	水深方向の 初期濃度分布の影響	拡散係数の影響
流路長 (m)		1400	
川幅 (m)		300	
水深 (m)		6	
主流路部勾配		1/5000	
初期配置濃度 (psu)		32	
計算タイムステップ(s)		0.5	
計算格子 (m)		$20 \times 20 \times 1$	
下流端周期 (s)		6	
下流端波高 (m)	0.22, 1, 2, 3, 5		1
流量 (m^3/s)	0, 100		100
初期濃度分布 (m)	$300 \times 300 \times 6$	$300 \times 300 \times n (n=1, 3, 5, 6)$	$300 \times 300 \times 3$
拡散係数	0	0	0, 0.05, 1, 5, 10, 100

ここで、 u は x 方向の流速、 v は y 方向の流速、 w は z 方向の流速、 t は時間、 f はコリオリ係数、 V_H は水平方向の渦粘性係数、 V_v は鉛直方向の渦粘性係数、 ρ_0 は参照密度、 $\rho_0 + \rho$ は密度、 C は塩分濃度、 K は拡散係数である。また、計算条件を表1に示す。この計算条件から取得できる計算領域は、 $1400\text{ m} \times 300\text{ m} \times 6\text{ m}$ の矩形水路である。実際の雄物川は両岸から砂州が発達し、河口が狭窄している。加えて河床高も一定ではないが、今回の検証では実河川の再現ではなく、塩水遡上に与える影響の大きな要因を明らかにすることを重視した。本研究ではパラメータの一部を固定し、流量、下流端波高、初期濃度分布、拡散係数を変更し、それぞれの関係を考察した。

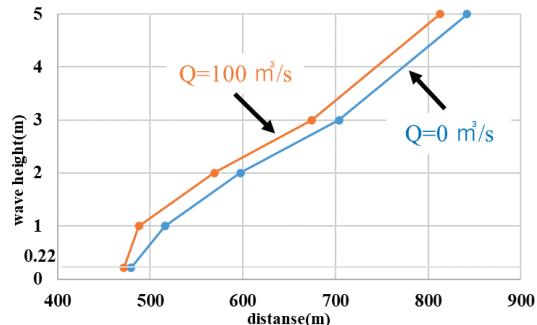


図7 波高と塩水遡上距離の関係

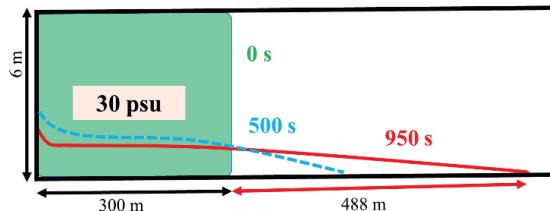


図8 塩水の経時変化

5. 計算結果

1) 流量・波高と塩水遡上距離の関係

周期を固定して波高 H および河川流量 Q を変化させ、 300 m 地点から塩水が遡上する距離を計算した。波高と塩水遡上距離の関係を図7に示す。流量に関わらず、波高が大きいほど遡上距離が

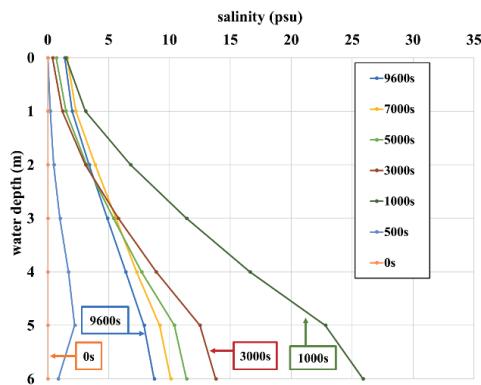


図 9 塩分の鉛直分布の経時変化

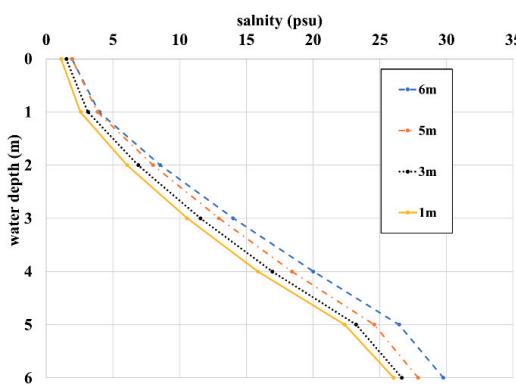


図 10 初期濃度分布と鉛直の塩分分布の関係

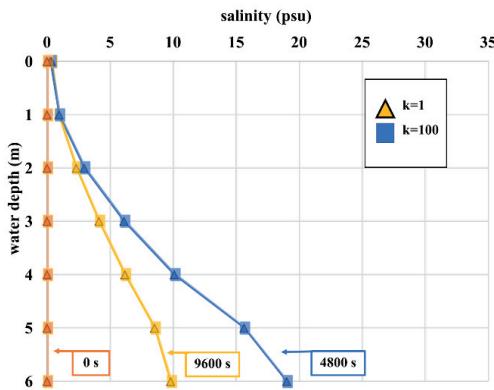


図 11 拡散係数と塩分分布の経時変化

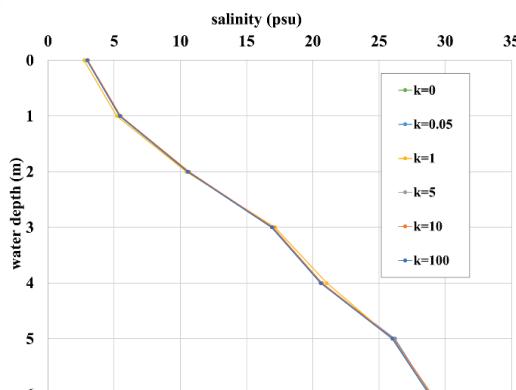


図 12 拡散係数と塩分の鉛直分布の関係

長くなっているが、流量による差は最大 30 m 程度であった。このことから、塩水遡上における流量の影響は波高に比べると小さいと考えられる。

塩分濃度の経時変化を図 8 に示す。なお、設定は流量 $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ 、波高 $H=1 \text{ m}$ である。計算開始直後の 0 s 時点では 300 m まで矩形状に塩水が配置されているが、時間変化とともに河床および上流側へ塩水が遡上していく様子を確認できた。また、950 s 時点の様子から塩水くさびが生じていると考えられる。

2) 水深方向の初期濃度分布の影響

流量・波高を固定し、初期濃度分布を水深方向に変化させた場合の塩分濃度の差異を検証した。初期濃度分布を $300 \text{ m} \times 300 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ とした塩分鉛直分布の経時変化を図 9 に示す。なお、鉛直分布は河口から 800 m 地点の中央から出力した。計算開始から 1000 s 程度で塩分濃度が最大となったが、その後は緩やかに低下した。また、水面側よりも河床側の方が、塩分濃度が大きく上昇および低下する傾向であることが分かった。

水深方向の初期濃度分布と塩分の鉛直分布の関係を図 10 に示す。計算開始 1000 s 時点の 800 m 地点の中央から出力した。初期濃度分布を高く配置した場合や河床側ほど塩分濃度が高くなる傾向

であり、図8同様の挙動を示した。一方、図3に示した現地観測の結果と比較すると、現地観測では淡水と塩水が明瞭に分かれていたが、数値シミュレーションの結果は異なり、水面側から河床側へ徐々に塩分濃度の上昇が見られた。また、河床付近の塩分濃度は現地観測よりも小さい値を示した。

3) 拡散係数と塩水遡上の関係

拡散係数を定めたときの塩分の鉛直分布の経時変化を図11に示す。なお、鉛直分布は河口から800m地点の中央から出力した。経時変化の様子は図9同様の結果を示したが、拡散係数による違いは見られなかった。

拡散係数Kを0~100まで変化させた際の塩分鉛直分布を図12に示す。計算開始から1000s時点において、河口から800m地点の中央から出力した。拡散係数を与えると、鉛直分布はほとんど変化しなかった。このことから、拡散係数は塩水遡上に影響を与えないと考えられる。

6. 終わりに

本研究では、雄物川河口域において現地観測および数値シミュレーションを行い、塩水遡上の要因を検討した。現地観測では他の弱混合河川²⁴⁾と同様に塩水の躍層が明瞭に見られ、外力の影響としては水位差と河口幅が一定の影響を与えると考えられる。また、数値シミュレーションからは波高が大きな要因の一つであることがわかった。一方、今回のシミュレーションでは水路の河口幅を川幅に等しい設定で計算したため、塩水が川幅に対して一様に確認された。今後は河口幅を計算条件に組み込んだシミュレーションを行い、詳細な条件を明らかにしていく。

謝辞

本研究の実施にあたり、国土交通省よりデータの提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 福嶋祐介, 守屋祥一, 新庄高久: 河口密度流の流動機構と塩水くさびの河口条件, 土木学会論文報告集第327号, pp. 61-71, 1982.
- 2) 小倉和紀, 宮崎俊之, 唐澤圭: 石狩川下流部における塩水遡上による利水への影響予測について, 平成14年度技術研究発表会, 河-22, pp. 1-8, 2003.
- 3) 福岡捷二, 市村清, 加藤信夫, 高橋晃, 藤田光一, 加賀谷均: 阿賀野川における塩水遡上の実態, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 596-600, 1986.
- 4) 名倉華子, 田中仁, 梅田信: 米代川における冬季wave set-upと塩水遡上に関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp. 316-320, 2010.
- 5) 湯沢河川国道事務所, 秋田河川国道事務所, 玉川ダム管理所: 雄物川水系渴水対策支部(警戒体制を解除) (記者発表資料) <https://www.thr.mlit.go.jp/bumon/kisyah/kisyah/images/76466_1.pdf> (2021/12/11 アクセス)
- 6) 有限会社大曲設計事務所: 雄物川下流水文観測等業務(雄物川水系) 塩水遡上調査報告書, pp. 1-33, 2020.