

米代川の河口部における塩水遡上について*

秋田大学理工学部 山崎 諒
秋田大学大学院理工学研究科 斎藤憲寿・渡辺一也

1. はじめに

河口では淡水に海水が混じる塩水遡上が発生する。塩水遡上の例として川内川¹⁾、網走川²⁾などがあり、塩水遡上による影響としては農業用水や工業用水、飲料水に被害をもたらすことがある。具体的な数値としては塩水濃度が 0.25 %で農業用水の取水停止の目安であり、生活用水の基準は 0.15 %である³⁾。神田ら⁴⁾は雄物川河口を対象に現地観測および数値計算を用いて塩水遡上と外力の関係を明らかにした。

秋田県の一級河川は雄物川の他に子吉川、米代川があるが、米代川河口を対象とした塩水遡上に関する 3 次元的数値計算を用いた研究はあまり行われていない。

そこで本研究では秋田県の一級河川である米代川河口を研究対象とし、数値計算により塩水遡上と外力の関係を検討した。

2. 研究対象

図 1 に米代川の流域図を示す。本研究の対象である米代川は秋田県北部の能代市を流れる一級河川であり、河口部は右岸側から砂州が形成されている。図 2 に米代川河口部を示す。

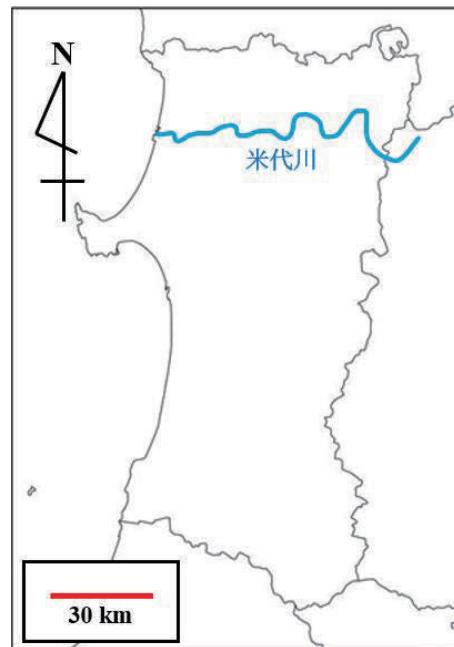


図 1 米代川の流域図

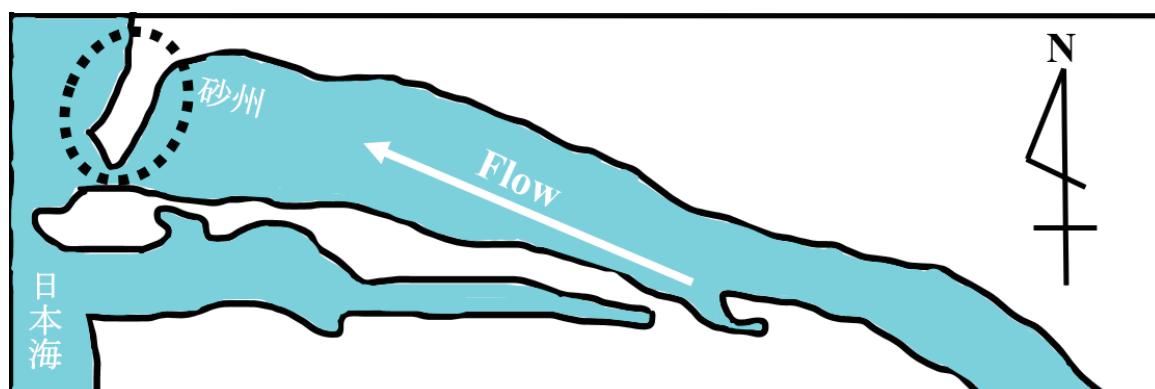


図 2 米代川河口部

*Study on Saline Water Run-up at Yoneshiro River Mouth using Numerical Simulation by Ryo YAMAZAKI, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE

3. 数値計算

数値計算に使用した基礎方程式を式(1)~(4)に示す。

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} + w \frac{\delta u}{\delta z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\delta p}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta x} \left(V_H \frac{\delta u}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(V_H \frac{\delta u}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(V_H \frac{\delta u}{\delta z} \right) \quad (2)$$

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

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

$$\frac{\delta c}{\delta t} + u \frac{\delta c}{\delta x} + v \frac{\delta c}{\delta y} + w \frac{\delta c}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta x} K \left(\frac{\delta c}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} K \left(\frac{\delta c}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} K \left(V_H \frac{\delta c}{\delta z} \right) \quad (5)$$

式(1)は連続式、式(2)~(4)は非圧縮とプシネスク近似を使用した3次元Navier-Stokes式である。また、塩水濃度の輸送方程式を式(5)に示す。ここで、 u : x 方向の流速、 v : y 方向の流速、 w : z 方向の流速、 t : 時間、 f : コリオリ係数、 V_H : 水平方向の渦粘性係数、 V_v : 鉛直方向の渦粘性係数、 ρ_0 : 参照密度、 $\rho_0 + \rho$: 密度、 C : 塩水濃度、 K : 拡散係数である。

表1に計算条件を示す。水深に関しては神成ら⁵⁾を参照

表1 計算条件

| | | |
|--------|------------------------|----------------------|
| 初期濃度分布 | なし | あり |
| 流路長 | 1500 m | 3000 m |
| 川幅 | 500 m | |
| 水深 | 2.7 m | |
| 主流路部勾配 | 1/5000 | |
| 計算格子 | 20 m × 20 m × 0.3 m | 20 m × 20 m × 1.35 m |
| 計算時間 | 3600 s | |
| 流量 | 100 m ³ /s | |
| 初期配置濃度 | 0 psu | 35 psu |
| 初期濃度分布 | 0 m × 0 m × 0 m | 300 × 500 × 2.7 |
| 下流端波高 | 0.66, 1, 2, 3, 4, 5 m | |
| 下流端周期 | 5.8 s | |
| 河口幅 | 40, 60, 80, 100, 500 m | |

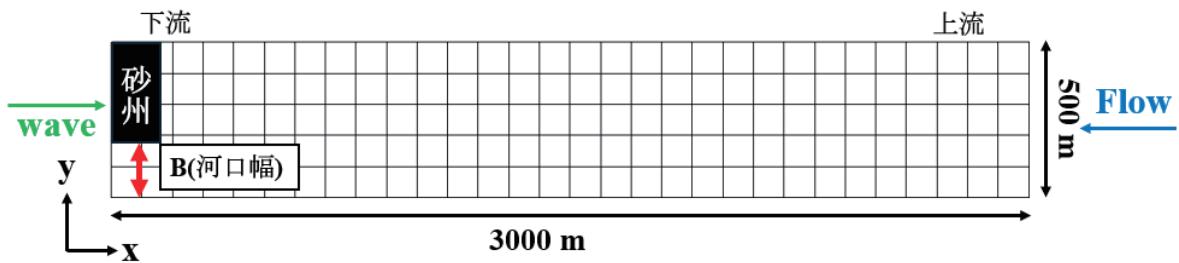


図3 計算領域の概略図

した。波高や周期の値はリアルタイムナウフルアス⁶⁾から過去数年間のデータを参照した。下流端周期 $T=5.8$ s および流量 $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ を固定し、河口幅 B と下流端波高 H を変化させて計算を行った。

図3に計算領域の概略図を示す。この概略図は上空から見た2次元的図である。赤い領域は砂州を表しており、砂州と川幅の間を河口幅 B とする。図3のメッシュは実際の計算時のメッシュよりも粗く表示している。

図4に塩水の経時変化を示す。塩水が河口から 300 m 遷上している状態と塩水の経時変化の概略図を鉛直方向から見た図である。経時変化として 1000 s, 3000 s 後の遷上の様子も示している。本研究では初期配置として河口に塩水が遷上していない状態と河口から 35 psu の塩水が 300 m 遷上した状態から計算を開始しており、異なる河口幅と波高に伴う遷上距離の影響を検討した。

4. 計算結果

1) 波高・河口幅と塩水遷上距離の関係(初期塩水濃度分布なし)

図5、図6に波高と遷上距離の関係を示す。図5は塩水濃度別での塩水遷上距離の結果を表しており、砂州がない状態(河口幅 500 m)の結果である。結果より、3 %の塩水は遷上せず 2 %の遷上距離としては河口から約 250 m~1000 m まで遷上した。1 %の塩水は河口から約 700 m~1500 m まで遷上した。0.25 %の塩水では波高が 0.66 m~3 m では約 950 m~1450 m まで遷上したが、波高が 4 m 以降は遷上距離が 1500 m を超えるような結果となった。図6は図5と同じく塩水濃度別での塩水遷上距離の結果を表しており、砂州がある状態(河口幅 40 m)の結果である。結果より、3 %の塩水は遷上せず、2 %の塩水は波高が高くなるたびに遷上距離が伸びていく結果となった。1 %, 0.25 %の塩水は計算範囲で

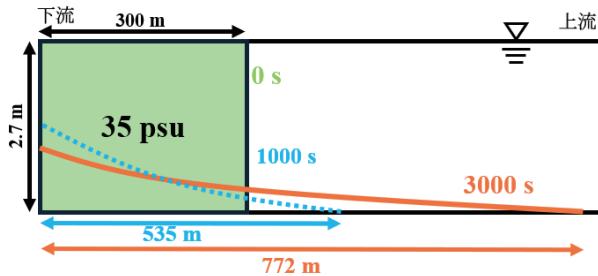


図4 塩水の経時変化

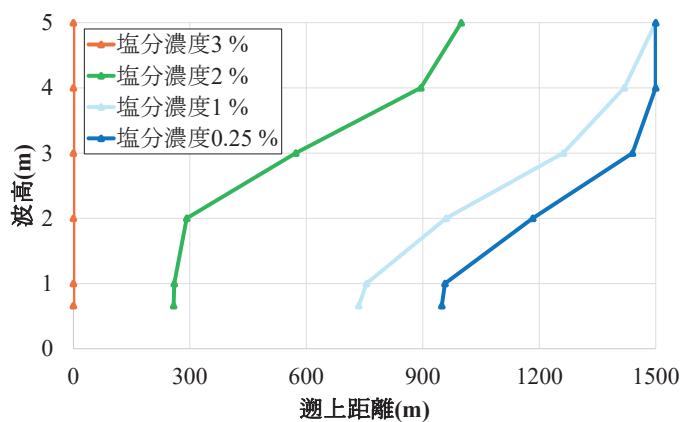


図5 塩水遷上距離(砂州なし $B=500 \text{ m}$)

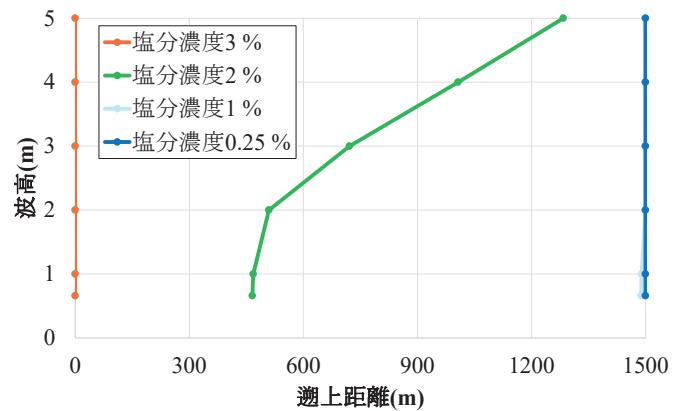


図6 塩水遷上距離(砂州あり $B=40 \text{ m}$)

ある 1500 m を超えるような遡上距離であった。今回は 1 例として砂州ありの状態を河口幅 40 m で示したが、河口幅 40 m の他にも 60 m, 80 m, 100 m で計算を行ったが河口幅が広がるほど塩水遡上距離は伸びる結果となった。

図 7 に塩水濃度の 3 次元的図を示す。今回の計算で塩水濃度別の遡上距離は分かったが、遡上の様子を図 7 に示している。2 % の塩水は河底を這うような形で塩水遡上しており塩水濃度が低くなっていくほど水面付近に近づいていく形で遡上している形となった。

初期濃度分布がない状態で計算を行い得られた共通のことは砂州がある場合も砂州がない場合も塩水遡上自体は起きるのだが、塩水濃度が 3 % の塩水遡上は起きないことが計算から得られた。砂州がある場合と無い場合を比べた際に大きく違う点としては 1 % より低い塩水濃度の遡上距離が大きくなっていた。砂州がある場合ではすべての波高で 1500 m を超えるような塩水遡上を起こしていたが砂州がない場合ではそのようなことは起こらなかった。加えて砂州がある場合とない場合を比べた際に、砂州がある場合には 3 % 以外のすべての濃度で塩水遡上距離が大きく伸びており砂州が発達することによって 200 m ほど遡上距離が伸びる結果が得られた。

2) 波高・河口幅と塩水遡上距離の関係 (初期塩水濃度分布あり)

図 8、図 9 に波高と遡上距離の関係を示す。図 8 は塩水濃度別での塩水遡上距離を表しており、砂州がない状態(河口幅 500 m)の結果である。図 8 の砂州なしの結果では、3 % の塩水は河口から 300 m~900 m まで塩水遡上することが計算から得られた。2 % の塩水では 1300 m~2700 m まで塩水遡上することが計算から得られた。1 % の塩水では 2800 m~3000 m 付近まで塩水遡上する結果が得られた。0.25 % の塩水では波高が大きくなるに連れ 3000 m を超えるような結果が得られた。

図 9 は塩水濃度別での塩水遡上距離を表しており、砂州がある状態(河口幅 40 m)の結果である。砂州ありの結果では、3 %

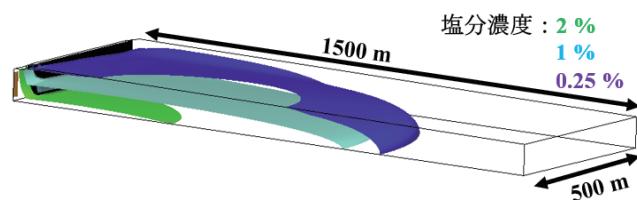


図 7 塩水濃度の 3 次元的図

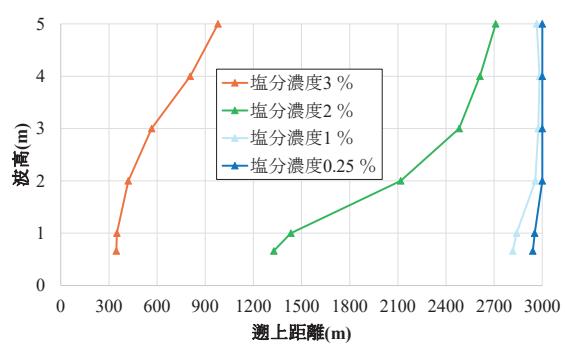


図 8 塩水遡上距離(砂州なし $B=500$ m)

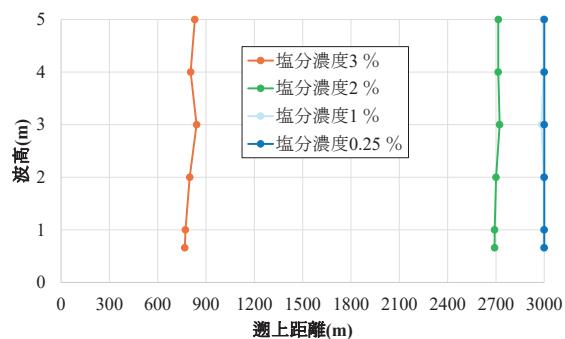


図 9 塩水遡上距離(砂州あり $B=40$ m)

の塩水は河口から 700 m~800 m を遡上しており、2 %の遡上距離は河口から 2700 m 付近を遡上する結果となった。1 %と 0.25 %の塩水では計算範囲である 3000 m を超えるような塩水遡上が見られた。

図 10 は 3 % の河口幅別の塩水遡上距離を示しており、河口幅 40 m, 60 m, 80 m, 100 m, 500 m の 5 種類で比較を行っている。波高が 3 m 以下の場合は河口幅が広いほど遡上距離が短く、波高が 5 m の場合は河口幅が広いほど遡上距離は長い傾向であった。

一方、河口幅が広いほど波高による遡上距離の変化が大きくなってしまっており、河口幅 40 m では波高による遡上距離の変化が約 100 m に対し、河口幅 100 m では波高による遡上距離の変化は約 450 m となつた。反対に河口幅 500 m では塩水遡上距離が短くなるという結果は得られなかつた。これらの結果を踏まえ、河口幅が広くなるほど波高による影響を受けやすくなり、塩水遡上距離の変化が広がつたのではないかと考察する。加えて砂州ありでの結果から共通して分かることは波高が 4 m の時に塩水遡上距離が短くなっていたことが挙げられる。波高が 4 m のときのみ遡上距離が短くなってしまうのは初期濃度分布がない場合の結果とは違った結果となつた。

図 11, 図 12 に塩水の最大遡上距離時の様子を示す。図 11 は左岸側に塩水遡上した様子であり、図 12 は右岸側にも塩水遡上した図となつてゐる。波高が 3 m 以下の場合は左岸側のみ塩水が遡上しているのに対し、4 m 以降は左岸側だけでなく右岸側(砂州側)にも塩水が遡上している。本研究では片側からのみの流入を想定したため、波高が 3 m の場合よりも 4 m の方が短くなつてしまつたと考察する。

それらに加え、水深別の濃度分布の結果を算出した。図 13 に水深別の塩水濃度分布の様子を示す。この結果から水深が深くなるほど塩水濃度が高くなっていることが分かる。それに加え、初期濃度分布がある状態でも図 7 のように塩水濃度が高いほど河底を這うように塩水遡上し、塩水濃度が低いほど水面付近に塩水遡上することが水深別の塩水濃度分布の結果から分かつた。

初期濃度分布がある状態で計算を行つた結果、砂州がある場合と砂州がない場合で大きく違いが見られた。1 つ目に波高による遡上距離の違いが大きく違つてゐた。砂州がある場合は波高による

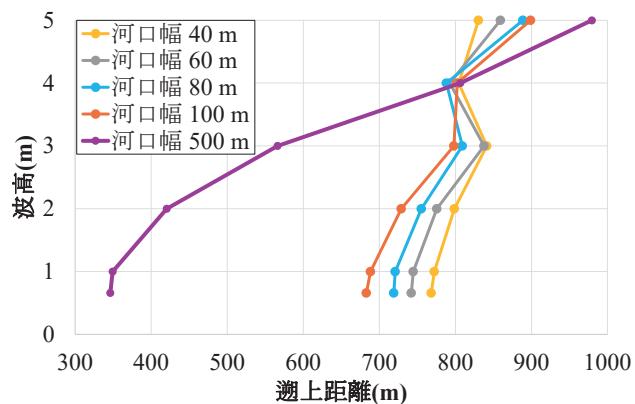


図 10 塩水遡上距離(塩分濃度 3 %)

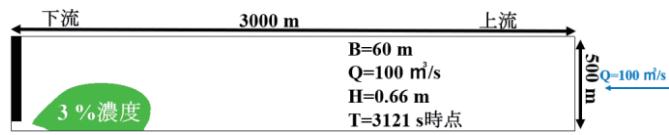


図 11 塩水の最大遡上距離($H=0.66 \text{ m}$)

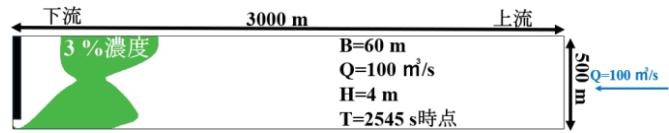


図 12 塩水の最大遡上距離($H=4 \text{ m}$)

塩水遡上距離の差が約 100 m, 砂州がない場合では波高による塩水遡上距離の差が大きく出ている。2つ目に砂州がない場合と砂州がある場合とで遡上距離に大きく違いが見られたことである。初期濃度分布がない場合と同じように全体的に塩水遡上距離が伸びる結果となっていたが、初期濃度分布がある場合でも同じように砂州がない場合の方が全体的に塩水遡上距離が伸びていた。だが、波高が 5 m

かつ塩水濃度が 3 %の場合のみ砂州なしで塩水遡上距離が大きくなっていた。これらの結果から初期濃度分布があるなしに関わらず砂州の発達は塩水遡上を加速させることが今回の研究から明らかとなった。

5. おわりに

本研究では、米代川河口域において 3 次元的数値計算を行い、塩水遡上と外力の関係を検討した。初期塩水濃度分布がない場合では砂州がある場合とない場合で塩水遡上距離の差に大きく差が出ていた。波高に関しては砂州がある場合は流量の大小に関わらずどの塩水濃度を取っても塩水遡上距離が伸びる結果となった。初期塩水濃度分布がある場合でも砂州がない場合より砂州がある場合の方が全体的に塩水遡上距離が伸びていた結果が今回の研究から得られた。

今回の研究から砂州が発達することによって塩水濃度が高い場合、低い場合どちらでも塩水遡上距離が伸び、農地利用や生活用水に大きく影響を及ぼすことが分かった。

参考文献

- 1) 小松利光, 上杉達雄, 安達貴浩, 松岡弘文, 坂元浩二, 大和則夫, 朝田将 : 川内川における塩水遡上の人工的制御に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.43, pp.341-345, 1996.
- 2) 池永 仁, 大塚 純一, 三澤 大輔, 内島 邦英, 横山 和夫, 山田 正 : 網走川における塩水遡上特性と塩水楔の形態変化に関する研究, 水工学論文集, Vol.42, pp.775-780, 1998.
- 3) 日本植物生理学会 : <https://jspp.org/hiroba/q_and_a/detail.html?id=578> (2024/12/19 アクセス)
- 4) 神田智洋, 谷口隼也, 斎藤憲寿, 渡辺一也 : 雄物川河口における塩水遡上に関する検討, 東北地域災害科学研究, Vol.58, pp.75-80, 2022.
- 5) 渡辺 一也, 神成 寿樹, 伊東 緋音 : 日本海側河川を対象とした冬季高波浪時の wave set-up と入退潮量に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, pp.401-405, 2014.
- 6) リアルタイムナウファス : 国土交通省港湾局 <<https://nowphas.mlit.go.jp/pastdata/>> (2024/11/21 アクセス)

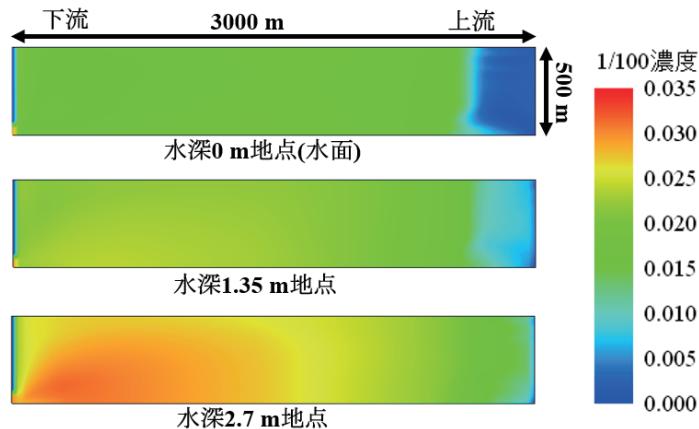


図 13 水深別の塩水濃度分布