

ベトナム北部ホン川河口部における塩分動態の解析

Analysis of salinity dynamics in the estuary of the Red River, Northern Vietnam

○井上慶士* 木村匡臣** 松野 裕** 吉川夏樹***

○Keishi Inoue*, Masaomi Kimura**, Yutaka Matsuno**, Natsuki Yoshikawa***

1. はじめに 紅河は全長約 1,200 km におよび、ベトナム北部を流れる主要河川である。その河口部に形成される紅河デルタは、国内の米の 2 大生産地の 1 つであり、作付面積は約 57 万 ha である。しかし、沿岸部は特に自然災害の影響を受けやすく、塩分遡上が顕著である。塩水は河口から約 20 km 離れた地点まで確認されており、流量が減少する乾季において、その傾向は強くなる¹⁾。灌漑時には、水門を操作して河川から用水を取水するが、河川水中の塩分濃度を都度計測しながら水門の操作管理を行っており、事前に灌漑計画が立てづらいという課題がある。そこで本研究では、ホン川河口部の塩分動態を調査し、その変動特性を明らかにするとともに、水理シミュレーションモデルを構築することを目的とする。

2. 調査対象地の概要 本研究の対象地はベトナム北部を流れるホン川の河口から約 30 km の区間とした (Fig.1)。調査区間の川幅は河口付近で約 1,000 m、狭い地点で約 250 m である。本川沿いには、灌漑用の取水を行うための水門が複数箇所設置されており、本川の塩分濃度が高いときには閉鎖、低いときには開門するように管理されている。

3. 調査方法 2023 年 12 月および 2025 年 2 月に、調査区間において塩分濃度の鉛直分布の計測と河道断面の測量を実施した。塩分濃度の調査には携帯投げ込み式 CTD (電気伝導度、水温、水深) センサー (CastAway-CTD) を使用し、河道断面の測量は、ボートにソナー (GARMIN STRIKER VIVID 4CV) を取り付け、河川を横断しながら実施した。また、CTD センサー (HYDROS 21) およびデータロガー (ZL6) を 3 か所の水門 (Fig.1 A,B,C 点) に設置し、2024 年 10 月より連続観測を行った。

4. 調査結果 2023 年 12 月に観測した電気伝導度の鉛直分布の一例を Fig.2 に示す。電気伝導度は河口付近で約 50,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と高く、河口から離れるほど低下するが、ほとんどの場所で農業用水として適さないほど高かった。また、塩分の遡上形態は、弱混合、緩混合、強混合のすべてが観測され、潮汐の強さや流量によって変化していると考えられた。水門に設置したセンサーで観測された電気伝導度と、ボートを用いてホン川で測定した結果を比較すると、両者の差異は認められず、本川から水門に至る過程で塩分が減少することは無かった (Fig.3)。ま



Fig.1 調査対象地(ホン川下流部)

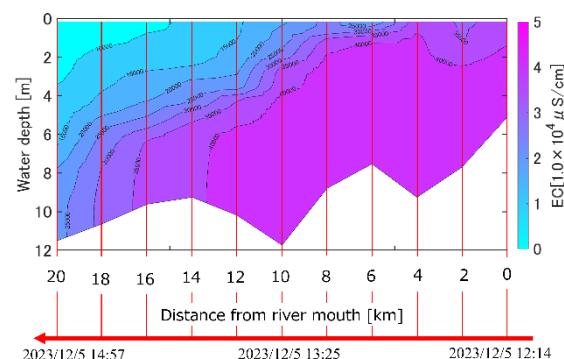


Fig.2 観測された電気伝導度(複数時刻統合)

*近畿大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kindai University, **近畿大学農学部 Faculty of Agriculture, Kindai University, ***新潟大学農学部 Faculty of Agriculture, Niigata University

キーワード：紅河デルタ、感潮河川、塩分遡上、数値シミュレーション、多層流

た、塩水は緩やかに河川を遡上するのに対し、上流からの淡水によって急速に後退することを確認した。これらの結果から、ホン川における塩分遡上は一様ではなく、潮汐や流量の変動に応じて異なる形態を示すことがわかった。そこで、塩分のさまざまな遡上形態での鉛直分布の再現を可能とする水理解析モデルの構築を試みた。

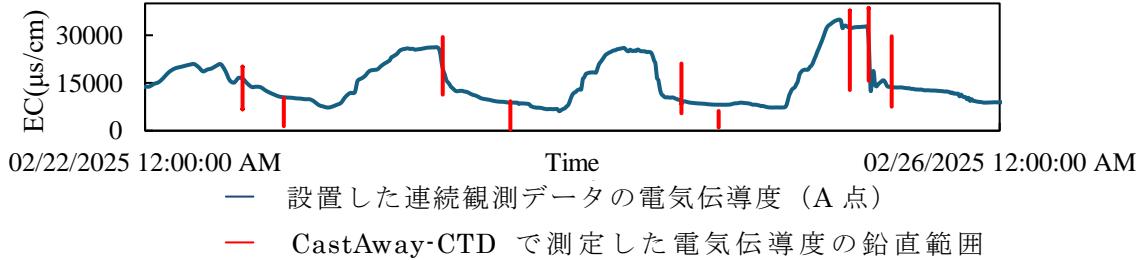


Fig.3 2025/2/22~2/26 の連続観測と集中観測

5. 数値計算の方法 数値計算の基礎方程式には、体積保存、運動量保存、塩分保存の式を用いた (Fig.4)。体積保存と運動量保存の基礎方程式に基づき各層の水深と流積を流束差分離法 (FDS 法) を用いて計算した。塩分濃度の混合は、FDS 法で水の流れを解いた後に各層ごとで計算した。また、密度差を均一にするため、密度等価法²⁾を用いて各層の密度、水深を補正した。境界条件は、上流端には淡水流量を与える、下流端には潮位を与えた。

6. シミュレーションの結果 シミュレーションは 2023 年 12 月 1 日～12 月 8 日の 1 週間を対象として行い、検証には 2023 年 12 月に測定した塩分濃度の鉛直分布の概形と比較した。塩分遡上は上流からの淡水流量と河口からの潮汐変動の影響を大きく受けるが、淡水流量、潮汐変動、河床高は正確なデータが少ないため、シミュレーションではこれら 3 つを調整可能なパラメータとして実施した。淡水流量を増加させると、水面付近の塩水は押し流されるが、川底の塩水はほとんど変化しないことが分かった。また、観測された鉛直分布の特徴と類似する混合状態を再現できた流量は、約 400 (Fig.5) ～600 m^3/s であり、本モデルにおけるホン川の流量はこの範囲に収まると考えられる。潮位差を大きくすると、川底の塩水も押し流されやすくなり、特に、観測結果の塩分動態が強混合に近いときにモデルの再現性が高くなることから、強混合状態の際は、潮位差の影響を受けやすいことが示唆された。一方で、他の混合状態には効果が見られなかったため、多様な混合状態を表現するためにパラメータの再検討が必要である。

$$\begin{aligned}
 & (1) \text{ 体積保存} \\
 & \frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} = \sum_{m=1}^N \{Wex(m, i) - Wex(i, m)\} \\
 & (2) \text{ 運動量保存} \\
 & \frac{\partial Q_i}{\partial t} + \frac{\partial \left(Q_i^2 / A_i \right)}{\partial x} + gA_i \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\rho_i} \left\{ \sum_{l=1}^{i-1} (\rho_l h_l) + \sum_{m=i}^N (\rho_m h_m) \right\} \right] \\
 & + gA_i S_{fi} = \sum_{m=1}^N \left\{ \frac{\rho_m}{\rho_i} Wex(m, i) V_m - Wex(i, m) V_i \right\} \\
 & (3) \text{ 塩分保存} \\
 & \frac{\partial (A_i \rho_i)}{\partial t} + \frac{\partial (Q_i \rho_i)}{\partial x} = \sum_{m=1}^N \{ \rho_m Wex(m, i) - \rho_i Wex(i, m) \}
 \end{aligned}$$

i: 計算される層 g: 重力加速度 N: 層の数
 A_i : 層の断面積 Q_i : 層の平均流量 h_i : 層の層厚
 V_i : 層の流速 n: マニングの相速度係数 R_i : 層の径深
 ρ_i : 層の密度
 $Wex(m, i): m$ 層から i 層への単位長さ当たりの混合量
 $S_{fi} = \left(\frac{n^2 v_i^2}{R_i^{4/3}} \right)$: i 層の摩擦勾配

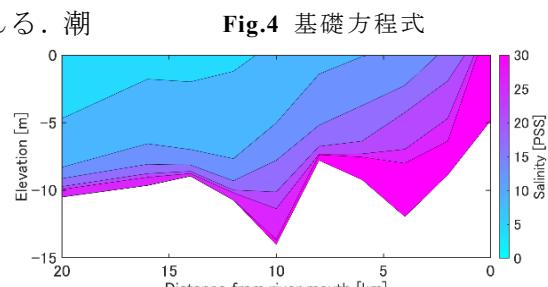


Fig.4 基礎方程式

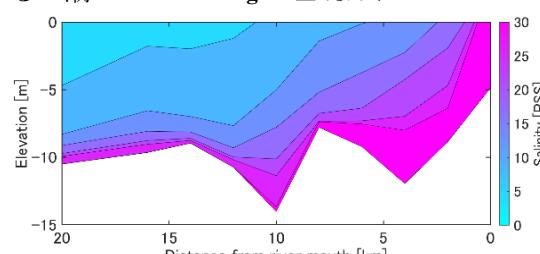


Fig.5 塩分分布の計算結果 (流量 400 m^3/s)

参考文献 1) Nguyen Yen Bich, Kamoshita Akihiko, Dinh Van Thi Hai, Matsuda Hirotaka, Kurokura Hisashi. (2017) : Salinity intrusion and rice production in Red River Delta under changing climate conditions, Paddy and Water Environment, 15(1), 37-48. 2) KWON Sungill, 久保成隆. (2005) : 感潮河川における密度流シミュレーションのための多層流モデル開発に関する研究, 農業土木学会論文集, 73(4), 69-77.

謝辞 本研究は、JST SICORP, JPMJSC20E1 および、JSPS 科研費 24K01870 の支援を受けて実施した。調査の遂行にあたり、Lan Thanh Ha 氏, Hung Dinh 氏 (Institute of Water Resources Planning, Vietnam) に多大なる配慮を頂いた。記して深謝の意を表する。