

網走川において風波が塩水浸入に及ぼす影響評価

Influence of wind waves on salt wedge intrusion in Abashiri River

北見工業大学 ○学生員 佐久間慎雄(Noritaka Sakuma)

北見工業大学 正 員 中山恵介(Keisuke Nakayama)

鹿児島大学 正 員 柿沼太郎(Kakinuma Taro)

首都大学東京 正 員 新谷哲也(Shintani Tetsuya)

1. はじめに

北海道東部のオホーツク沿岸域に位置する網走湖およびオホーツク海にそそぐ網走川は、サケ、ワカサギ、シジミ等の多くの水産資源に恵まれている。網走湖は約 7km の網走川によりオホーツク海と接続されており、大潮時もしくは高潮時に海水が網走川を遡上し、網走湖へとそそぎこむ。そのため網走湖は、浸入する塩水と上流から供給される淡水による明確な密度成層を持つ汽水湖として存在しており、その 2 成層化により底層にヘドロ状の底泥が堆積し、下層に貧酸素水塊が発生する。その結果、風による湧昇が与えられると、下層の貧酸素水塊が水表面に達する青潮現象を誘発することが報告されている。

青潮とは、湖面にある程度の風速の風が与えられることにより、水表面が風下側で上昇し、傾圧効果により密度界面が逆勾配となり風上側で上昇し、風上側での上昇流の効果が加わり、無酸素化した下層の水が水表面に達する現象である。そのため、湧昇による青潮現象の発生を抑制するためには、水表面から密度界面までの距離を十分に確保しておく必要がある。今後対策を講じる場合、風を制御することは困難であり、塩水の浸入を制御する方法が対応策として考えられることから、網走川における塩水の遡上に関して理解を深める必要がある。

しかし、網走川における遡上の影響評価については、室内実験やその実験の再現結果等の研究¹⁾が多く、現実の網走川を対象とした研究は、2 層モデル等の簡便なモデルの適用に限られている。網走

川は急激に水深が変化する川であり、オホーツク海から網走湖までの間において、幾つかのシルが存在している。シルの存在は、密度界面の混合を促進することが知られており、実際の現象を解析するためには、3 次元計算モデルが必要とされる。

さらに、網走川の河口に網走港湾が存在するが、平常時においても有義波高で 20cm 程度の波の浸入が河口において計測されており、波の発生によるストークスドリフトが塩水遡上に影響を及ぼしていると考えられる。

そこで本研究では、外的条件である表面波によるストークスドリフトの効果を推定し、その効果が、塩水遡上にどのように影響しているかを評価するため、柿沼・中山²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾により、開発された強非線形強分散内部波方程式を利用し検討することを目的とする。

2. 表面波とストークスドリフト

(1) 強非線形強分散内部波方程式

網走川河口における表面波の進入によるストークスドリフトの効果を評価するため、強非線形強分散内部波方程式²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾を用いることとした。 i 層の界面における変位を $z = \eta_{ij}$ ($j=0$: 各層での上の界面, $j=1$: 各層での下の界面), そこでの圧力を $p_i(x, t)$ とすると, i 層目における汎関数は以下の式で与えられる。

$$F_i[\phi_i, \eta_{i,j}] = \int_0^T \int_A \int_{\eta_{i,0}}^{\eta_{i,1}} \left\{ \frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \phi_i)^2 \right.$$

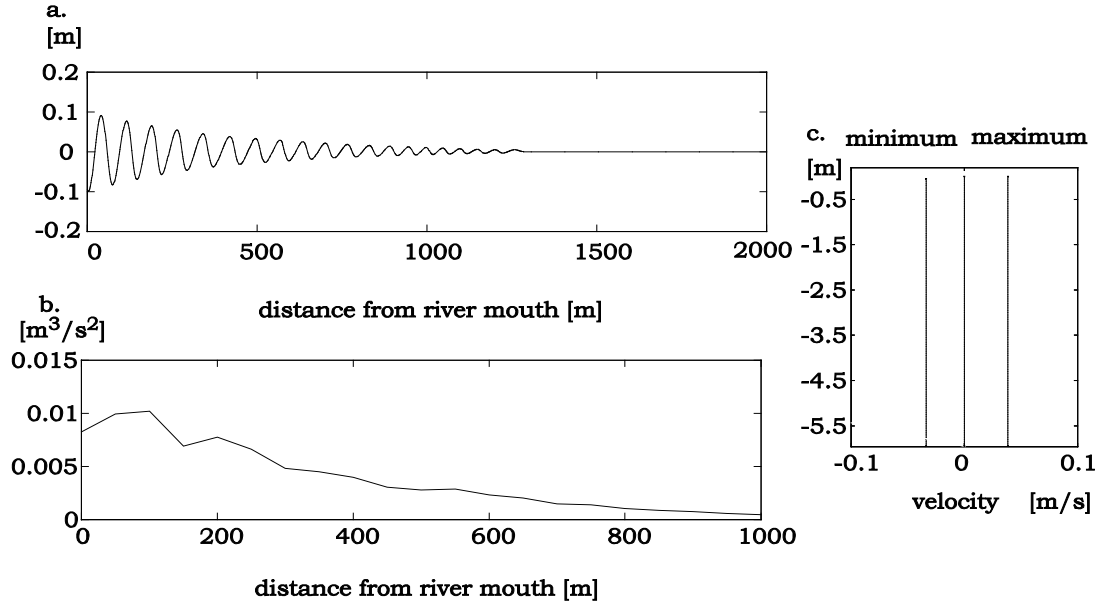


図-1 次数 1 における計算結果. a. 網走川河口からの水表面波形.

b. 河口 300m における表面波による流速の鉛直分布の最大値と最小値. c. 式(11)の河口からの分布.

$$+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \phi_i}{\partial z}\right)^2+gz+\frac{\rho_{i-j}+P_i}{\rho_i}\}dzdAdt \quad (1)$$

$$P_i = \sum_{k=1}^{i-1} (\rho_i - \rho_k)gh_k \quad (2)$$

ここで、 ϕ_i : i 層における速度ポテンシャル、 g : 重力加速度、 ρ_i : i 層の密度、 p_i : i 層下面の圧力ある。速度ポテンシャルの実現のために、べき乗で展開される式(3)を用いることとする。

$$\begin{aligned} \phi_i(x, z, t) &= \sum_{\alpha=0}^{N-1} Z_{i,\alpha} \{z, h_i(x)\} f_{i,\alpha}(x, t) \\ &\equiv Z_{i,\alpha} f_{i,\alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $Z_{i,\alpha}$: i 層目における速度ポテンシャル、 $f_{i,\alpha}$: i 層目における次数 α の重みである。

式(3)を式(1)に代入することにより、以下に示されるオイラーラグランジアン方程式が得られる。これが、強非線形強分散内部波方程式である。

$$\begin{aligned} Z_{i,\alpha}^{\eta_{i,1}} \frac{\partial \eta_{i,1}}{\partial t} - Z_{i,\alpha}^{\eta_{i,0}} \frac{\partial \eta_{i,0}}{\partial t} + \nabla \left(\int_{\eta_{i,0}}^{\eta_{i,1}} \frac{\partial Z_{i,\alpha}}{\partial Z} \frac{\partial Z_{i,\beta}}{\partial z} dz f_{i,\beta} \right) \\ - \int_{\eta_{i,0}}^{\eta_{i,1}} \frac{\partial Z_{i,\alpha}}{\partial z} \frac{\partial Z_{i,\beta}}{\partial z} dz f_{i,\beta} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$Z_{i,\beta}^{\eta_{i,j}} \frac{\partial f_{i,\beta}}{\partial t} + \frac{1}{2} Z_{i,\beta}^{\eta_{i,j}} Z_{i,\gamma}^{\eta_{i,j}} \nabla f_{i,\beta} \nabla f_{i,\gamma} + \frac{1}{2} \frac{\partial Z_{i,\beta}^{\eta_{i,j}}}{\partial z} \frac{\partial Z_{i,\gamma}^{\eta_{i,j}}}{\partial z}$$

$$f_{i,\beta} f_{i,\gamma} + g \eta_{i,j} + \frac{\rho_{i-j} + P_i}{\rho_i} = 0 \quad (5)$$

本研究では、表面波に着目した再現を行うため 2 層のみ考慮し、上層を空気、下層を水とする。鉛直分布関数を式(6)のように定義することにより、最終的に上層の方程式(7)、(8)と下層の方程式(9)、(10)が得られる。

上層の方程式：

$$Z_{i,\alpha} = \alpha \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \eta^\alpha \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{\alpha + \beta + 1} \nabla (\eta^{\alpha+\beta+1} \nabla f_{1,\beta}) \\ - \frac{\alpha \beta}{\alpha + \beta - 1} \eta^{\alpha+\beta-1} f_{1,\beta} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \eta^\beta \frac{\partial f_{1,\beta}}{\partial t} + \frac{1}{2} \eta^{\beta+\gamma} \nabla f_{1,\beta} \nabla f_{1,\gamma} \\ + \frac{\beta \gamma}{2} \eta^{\beta+\gamma-2} f_{1,\beta} f_{1,\gamma} + g \eta + \frac{p_1}{\rho_1} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

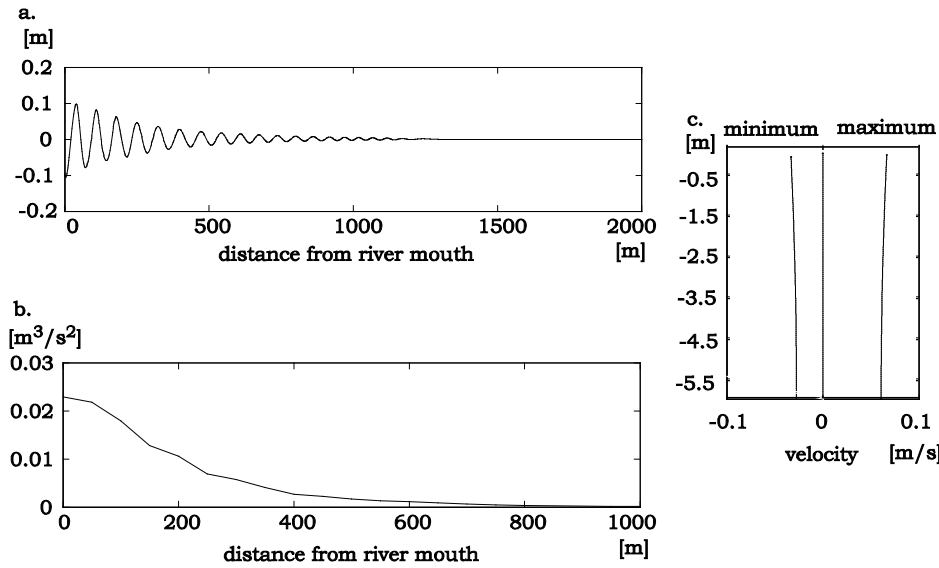


図-2 次数 3 における計算結果. a. 網走川河口からの水表面波形.

b. 河口 300m における表面波による流速の鉛直分布の最大値と最小値. c. 式(11)の河口からの分布.

下層の方程式：

$$\eta^\alpha \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{\alpha + \beta + 1} \nabla \{ (\eta^{\alpha+\beta+1} - b^{\alpha+\beta+1}) \nabla f_{2,\beta} \} - \frac{\alpha\beta}{\alpha + \beta - 1} (\eta^{\alpha+\beta-1} - b^{\alpha+\beta-1}) f_{2,\beta} = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \eta^\beta \frac{\partial f_{2,\beta}}{\partial t} + \frac{1}{2} \eta^{\beta+\gamma} \nabla f_{2,\beta} \nabla f_{2,\gamma} \\ & + \frac{\beta\gamma}{2} \eta^{\beta+\gamma-2} f_{2,\beta} f_{2,\gamma} + g\eta \\ & + \frac{p_1 + (\rho_2 - \rho_1)gh_1}{\rho_2} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

ストークスドリフトの影響を評価するため、式(11)を用いて水深積分を行った上の $\bar{\quad}$ は時間平均を表わす。

$$S_{xx} = \overline{\int_{-h}^{\eta} (p + \rho u_w^2) dz} - \int_{-h}^0 p_s dz \quad (11)$$

ここで水平流速 u_w , $p = p_s = -\rho g z$ とする。

(2) 網走川への適用

強非線形強分散内部波方程式では、次数Nを変化させることが出来る。次数が1であれば長波方程式に対応し、次数が2前後であればBoussinesqタイプの方程式等に対応することが報告されている⁸⁾。本研究では、次数3までの計算を実行した。その結果、次数2と次数3では大きな違いが確認されなかったため、本論文では次数1と次数3について考察する(図-1と図-2)。波高について、実測地と比較すると、河口において0.2m、600m付近において0.03mであったことから、次数の違いによる再現性の大きな違いはなく、全てのケースで再現できていた。しかし波形を見ると、次数1では波が立っていきっている状態が再現されており、次数3での孤立波として再現される波と大きく異なっていた。300m地点における流速の鉛直分布の最大値と最小値を比較すると、次数3において分散関係が再現されている様子が確認された。

続いて、ストークスドリフトの影響を評価するため、式(7)を用いて水深積分を行った。長波近似である次数1を次数3と比較すると、ストークスドリフトの影響が河口では小さかった。しかし、長波近似された波はエネルギーの減衰は少なく、300m付近以降で比較すると次数1の方が大きな影

響をうけるということが推定されるということがわかった。河口付近の $0.01\text{m}^3/\text{s}^2$ という値は、水深 5m とし、バルク係数を 0.015 とすると、風速およそ 1.2m/s の応力が与えられていることに匹敵する。そのため、ストークスドリフトによる影響は河口付近では大きいことが確認された。

今回用いた値は、2007 年 11 月 19 日から 2007 年 11 月 23 日までにおける通常の波の測定結果であり、波浪時などではその数倍の波のエネルギーが与えられる可能性がある。今後、紋別で測定されている波のデータとの相関を取り、より一般的なストークスドリフトによる塩水遡上への影響を調査してゆく予定である。

3. まとめ

本研究では、網走川における塩水浸入に関する研究を行い、以下のような結論を得た。

- 1) 2007 年 11 月 19 日から 2007 年 11 月 23 日における波高の再現計算を行い、強非線形強分散内部波モデルにより良好な再現計算結果が得られることが分かった。
- 2) 強非線形強分散内部波モデルを用い、ストークスドリフトによる塩水浸入への影響評価を行い、河口付近での影響の大きさを示すことができた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、網走開発建設部治水課および網走港湾事務所から観測データを提供して頂きました。ここに感謝の意を記します。また、河川情報センターおよび科学研究費基盤(c)の助成

を受けて実施されました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 赤堀良介, 清水康行, 閉鎖性水域における密度流現象に関する 3 次元乱流モデルによる数値計算, 土木学会論文集, pp.113-125, 2001.
- 2) Nakayama K. and T. Kakinuma, Internal waves in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, International Journal for Numerical Methods in Fluids, in press, 2009.
- 3) 柿沼太郎, 山下啓, 中山恵介, 潜堤上における非線形内部波の伝搬特性, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.66-70, 2009.
- 4) Kakinuma, T., Yamashita, K., and Nakayama, K., A numerical study on propagation of nonlinear internal waves, Proc. 5th Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts, Vol.3, pp.208-214, 2009.
- 5) Nakayama K., T. Kakinuma, D. Horimatsu, Y. Sugawara, Y. Maruya and Y. Yonome, Reproduction of flow over sand waves using the variation principle River, Estuary and Coastal Morphodynamics, Vol. 6, pp.183-188, 2009.
- 6) 中山恵介, 堀松大志, 柿沼太郎, 菅原庸平, 丸谷靖幸, 鰻目淑範, 変分原理を用いた河床波上の流れの再現とその適用性, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.1087-1092, 2009.
- 7) 柿沼太郎, 中山恵介, 渦度を考慮した非線形波動方程式による表面波及び内部波の数値解析, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.6-10, 2007.
- 8) Kakinuma T., K. Nakayama, Numerical simulation of internal waves using a set of fully nonlinear internal wave equations, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 51, pp.169-174, 2007.