

網走川河口における塩水遡上への 吹送流の影響評価

佐藤 之信¹・中山 恵介²・新谷 哲也³・駒井 克昭⁴

¹正会員 株式会社豊水設計 海洋マネジメント部 部長
(〒065-0033 札幌市東区北33条東16丁目2-2)
E-mail:yuki.01.10@housui.co.jp

²正会員 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

³正会員 首都大学東京助教 都市環境部 都市基盤環境コース (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁴正会員 北見工業大学准教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

過去の研究において、網走川を遡上する塩水にradiation stressの効果が与えられると遡上量が増大することが示されている。しかし、同時に発生する風による水表面付近での吹送流の効果については検討が行われていない。そこで本研究は、網走川河口における塩分遡上に対する吹送流の影響について、現地観測の結果を踏まえ、無風状態、東風4m/sの状態および西風4m/sの条件下における検討を行った。塩水遡上の再現には、オブジェクト指向型環境流体モデルであるFantomを利用した。その結果、弱混合形態で遡上する塩水遡上初期段階における吹送流の役割が重要であり、遡上と同じ方向の風は塩水遡上量を抑制し、結果として塩水遡上量が減少することが分かった。一方で、逆方向の風は塩水遡上を促し、結果として無風状態とほぼ同等の塩水遡上量となることが分かった。

Key Words : salt water intrusion , wind induced current, brackish lake, radiation stress

1. はじめに

汽水湖である網走湖は、オホーツク海と僅か7.2 kmの河川とで接続されており、大潮や高潮時に湖水位より海水水面水位が高くなると塩水が遡上し網走湖内に流入する¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。網走湖には上流からの淡水が流入しているため、結果として明確な密度界面が形成される。そのため、下層において無酸素水塊が形成、および過大な栄養塩が生成されており、水質環境の悪化が問題となっている。その主たる原因は、河口からの塩水侵入による明確な密度界面の形成である。よって、オホーツク海から網走川河口を經由して遡上する塩水遡上の形態の理解、および塩水遡上に及ぼす主要因の解明が必要不可欠である。

過去の研究において、網走港における潮位と網走湖の水位の差を利用することにより、塩水の遡上量を推定できることが示されている⁴⁾。しかし、塩水遡上量の推定モデルと現実の遡上量との間には大きな隔たりが存在す

るため決定係数(相関係数)は0.531であり、塩水遡上量の再現モデルの高精度化が求められている。その一環として、風波による影響を考慮し、風速4m/s以上が与えられた際に河口から上流側に向けて発生するradiation stressが、塩水の遡上距離を増大させていることが示された⁵⁾⁶⁾⁷⁾。しかし、radiation stressを発生させる風は、塩水遡上と同方向に与えられることが多く、吹送流が塩水遡上へ影響を与える可能性がある。

塩水遡上が弱混合形態である場合には、閉鎖性水域における鉛直循環と同じ現象であると考えられ、遡上方向と同じ風向の風が与えら得る場合、吹送流は鉛直循環を抑制する役割を持つことが示されている⁸⁾⁹⁾。一方で、塩水遡上が強混合となる場合、遡上方向に一致する吹送流が与えられると塩水遡上距離が促進されることが予想される。網走川を遡上する塩水は河口付近では弱混合形態であり、数km遡上した段階で強混合形態へと変化することが示されている¹⁰⁾。そのため、網走川を塩水が遡上

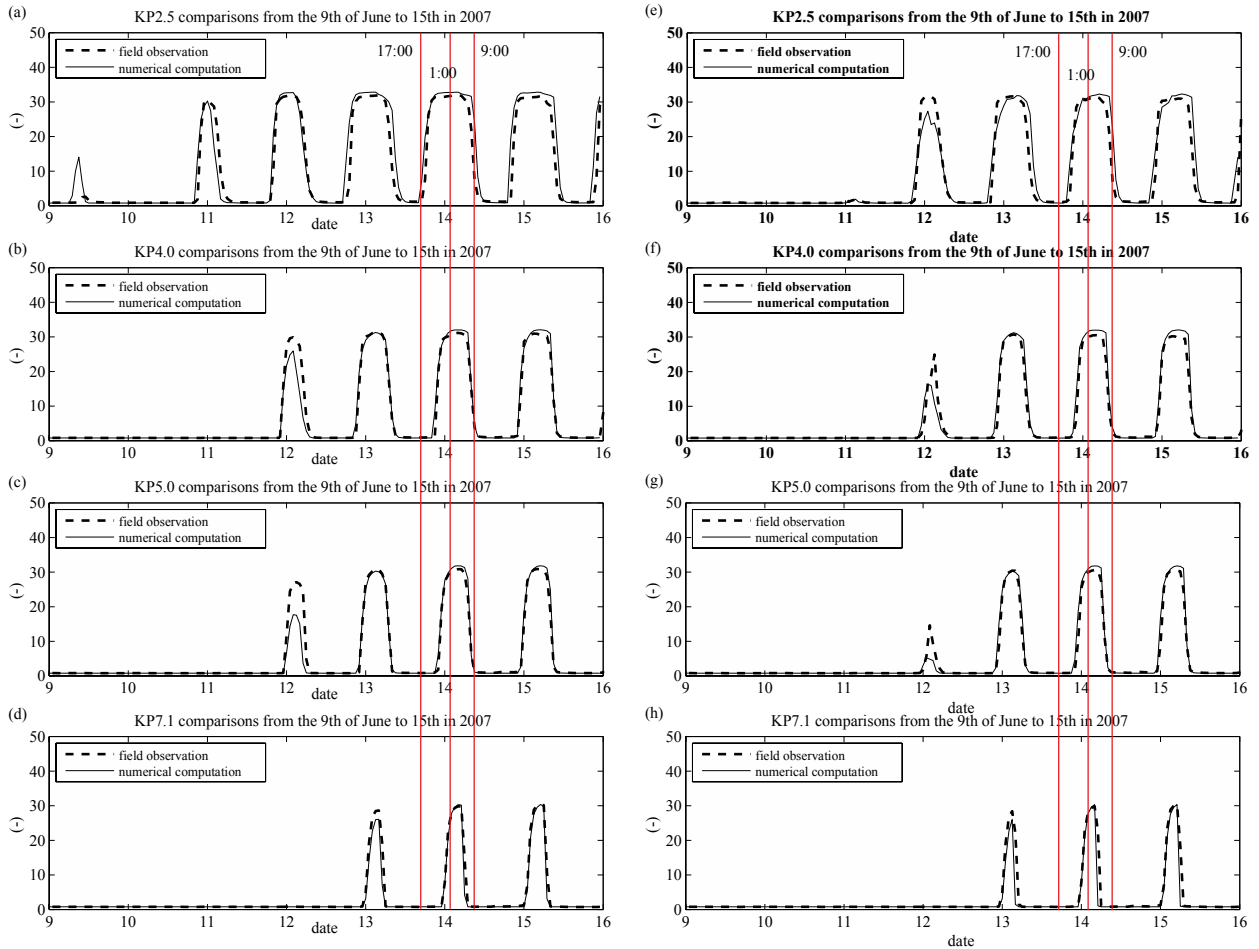


図-1 2007年6月9日から15日におけるKP2.5, KP4.0, KP5.0, KP7.1での底層付近での塩分濃度の観測結果と計算結果. (a)KP2.5底層. (b)KP4.0底層. (c)KP5.0底層. (d)KP7.1底層. (e)KP2.5水表面付近. (f)KP4.0水表面付近. (g)KP5.0水表面付近. (h)KP7.1水表面付近.

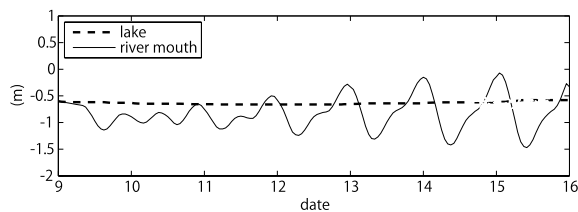


図-2 2007年6月9日から15日におけるKP7.1での水位(破線)および網走港における潮位.

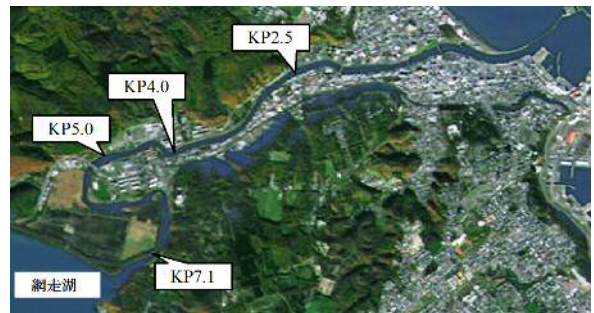


図-3 網走川における観測地点.

する方向と同じ吹送流が与えられる場合、強・弱混合形態それぞれの特徴を同時に考慮した検討が必要となる。

そこで本研究では、吹送流の影響を分離して評価するため、現地における塩水遡上を高精度に再現できる3次元数値計算モデル^{11) 12) 13) 14)}を利用し、網走川における典型的な風向における吹送流の塩水遡上への影響評価を行うことを目的とする。

2. 網走川における塩水遡上観測結果

(1) 網走川の概要

網走川は阿寒山系の阿幌岳にその源を發し、津別町市街より上流では狭い谷間を流れる溪流が多くみられ、これより下流は北よりに流路を向け美幌町市街西側をゆったりと流れ、女満別町で湛水面積34.1km²の網走湖に流入している。そして本研究で対象としている水域に接続

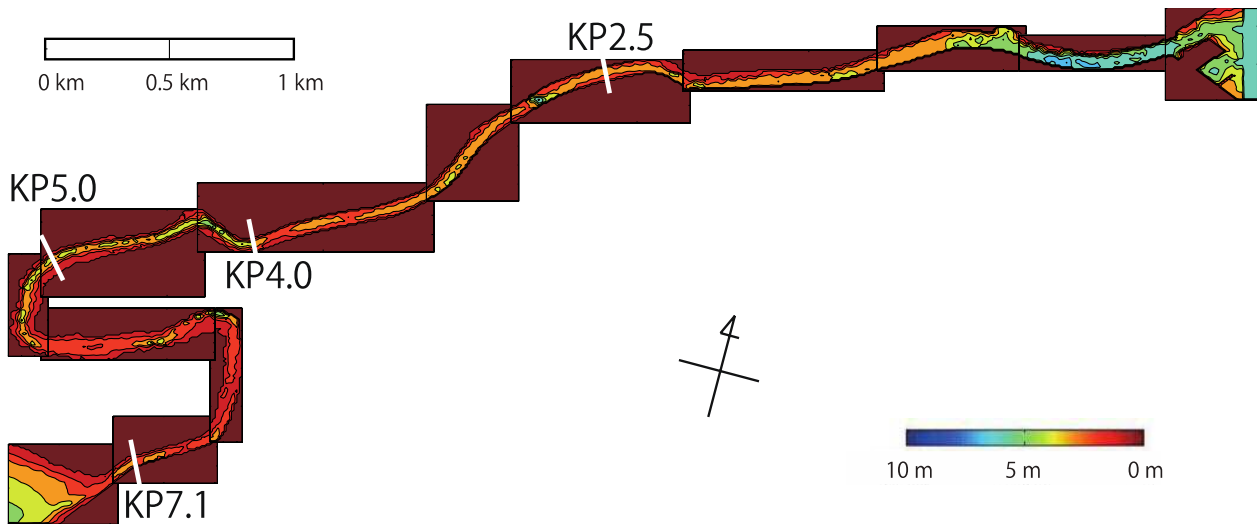


図-4 計算に利用した網走川の水深コンタ図. 各四角いドメインが並列計算の1単位に対応する. 湖(図左側)

し、網走市街を経てオホーツク海に注いでいる流域面積1,380km²、流路延長115kmの1級河川である。

(2) 観測結果

網走川では、KP2.5、KP4.0、KP5.0、KP7.1の上層・中層・下層において10分間隔で塩分濃度の測定を行なっている。その中で、塩水遡上が顕著に現れていた2007年6月9日から15日における上層および下層における塩分濃度の時間変化を示す(図-1)。塩水遡上の主要因である網走湖の水位とオホーツク海の潮位については、過去の研究³⁾に従い、KP7.1の水位を網走湖の水位、網走港における潮位をオホーツク海の潮位とした(図-2)。なおKP7.1における水位は潮位変化の影響を受けて1日以下程度の周期的な変化が含まれているため、その成分についてはハイパスフィルターにより除去した。

2007年6月10日午後11時に網走港における潮位がKP7.1における水位と一致しており、KP2.5底層において塩分濃度が急激に上昇していたことが分かった(図-1と図-2)。一方で、KP2.5水表面付近では塩分濃度の急激な上昇は見られず、KP2.5地点では成層状態が維持されており弱混合形態での遡上であったことが推測された。その後、6月11日午後11時に潮位がKP7.1の水位を超え、それに伴いKP5.0まで塩水が遡上していたことが確認された。KP5.0以降における塩水遡上は、底層および水表面付近での値がほぼ一致していることから、強混合形態へと変化して遡上したことが分かった。河口における水深が浅くなる直後まで塩水は弱混合の形態で遡上し、その後、水深が浅くなることにより強混合状態へと変化しながら遡上することが示された。

網走湖に塩水が流れ込む基準とされるKP7.1において

塩分濃度が上昇したのは、6月12日午後11時において網走港の潮位がKP7.1の水位を超えたときであった。網走港における潮位がKP7.1における水位を0.2m程度超えることで塩水が網走湖に遡上しており、低気圧の通過などの潮位の僅かな変化が塩水遡上に大きな影響を及ぼす可能性があることが確認された⁴⁾。

3. Fantomによる再現性の検討

(1) Fantomの概要と計算条件

再現計算には過去の研究により成層場における高精度な再現性が示されているオブジェクト指向に基づくFantomを利用した¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。スカラー量の移流計算にはULTIMATE QUICKESTスキームを利用し数値拡散を抑え、時間方向の離散化には2次精度のAdams-Bashforth法を利用している。地形の再現及び冠出・冠水については、Adcroftら¹⁵⁾により開発されたpartial-stepを利用して再現性の高精度化を行なっている。

網走川は、図-3に示されるとおり蛇行しているため、全領域を一つの計算ドメインで再現すること、速度および計算容量(メモリ)の効率が悪くなる。そこで網走川を合計15のドメインに分割し、各ドメインを連結することで網走川を再現することとした(図-4)。

湖(図-4左側)および網走港(図-4右側)には、湖および港において急激に面積が大きくなる効果を考慮するため、大面積の緩衝用ドメインを計算上与えた。図-4では、網走川の水深を詳細に示すために、それらの2つのドメインは描画が省略されている。水平方向および鉛直方向のメッシュサイズは、10m×10mおよび水深に応じて水表面付近のサイズを小さくするように1.0mから

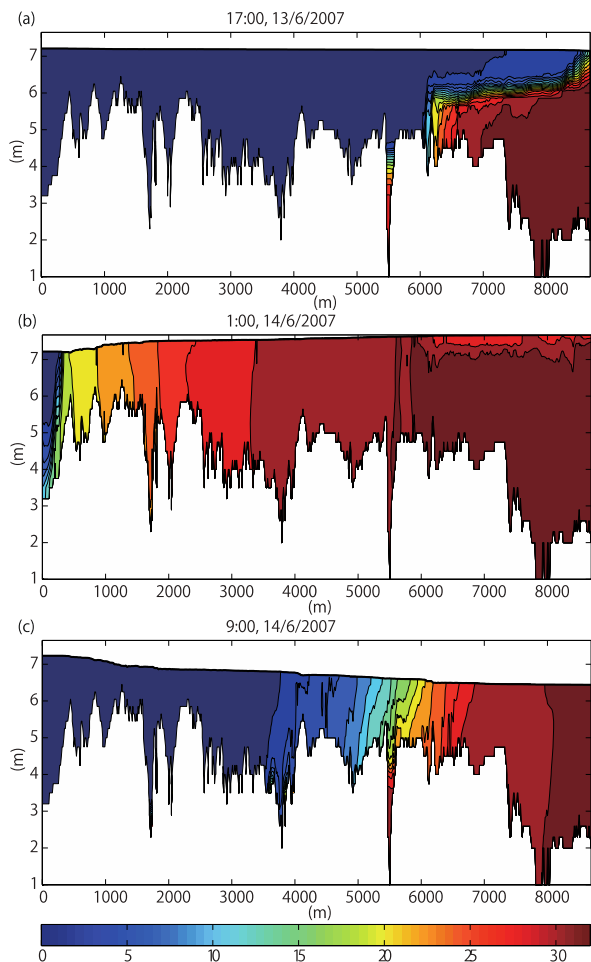


図-5 無風状態における計算結果. 図-2の赤線の時刻における滞筋での塩分濃度の鉛直分布. 横軸は網走湖への侵入口を0mとしている.

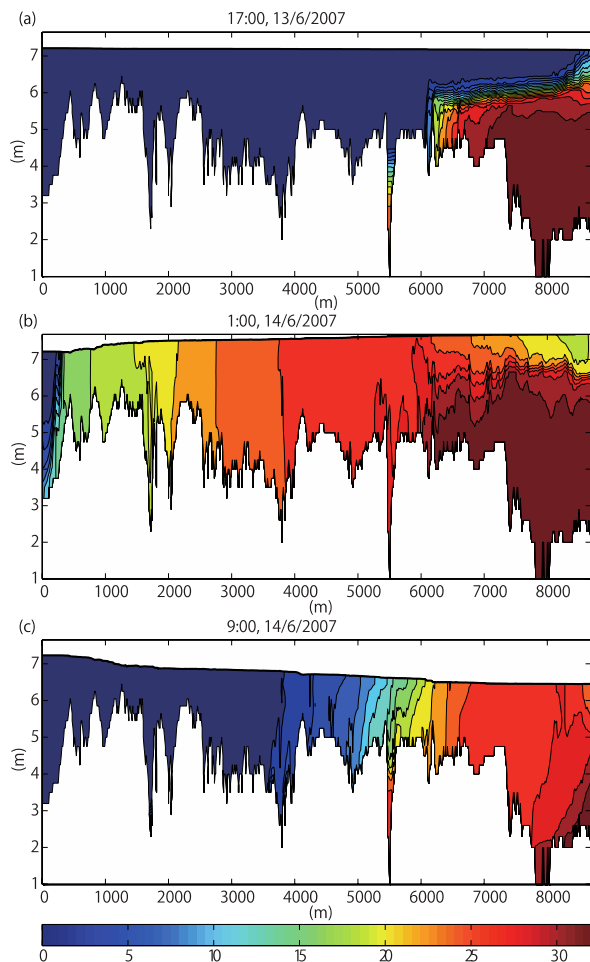


図-6 東風4m/sを与え続けた計算結果. 図-2の赤線の時刻における滞筋での塩分濃度の鉛直分布. 横軸は網走湖への侵入口を0mとしている.

0.25mのメッシュサイズを与えた. 計算時間ステップは2.0sとした. 網走川は網走湖およびオホーツク海に連結していることを考慮し, 上流及び下流端における水位を境界条件として与えて再現計算を行った. また, 本研究で対象としている風に関しては, 風速及び風向の影響を考慮すること, および計算対象期間における風速が約2m/s以下であったことを考慮し, 無風状態での再現計算を行い, 風速・風向の効果を検討しやすくした. その他の詳細な計算条件については, 参考文献¹⁰⁾をご参照いただきたい.

(2) 再現性の検証

再現計算の対象期間は, 2007年6月9日から15日とした. KP2.5, KP4.0, KP5.0, KP7.1における底層および水表面付近における観測結果と比較すると塩分濃度上昇のタイミングが良好に再現できていることが分かる(図-1). 僅かながら異なっているのは, 6月12日午前2時程度にみられる塩水遡上時での塩分濃度の過小評価である. しかし, 全体的に良好に塩分濃度の時間変化を底層および水

表面付近において再現することが出来ており, Fantomによる解析結果を利用した検討を行うことが可能であることを証明するものであると考えられる. なお, 計算開始直後のM2で潮汐分は定常的な変化に移行するまでに必要な期間であるため, 塩分濃度の実測と計算結果とに差が発生していた.

観測結果の考察から, 網走川を遡上する塩水は, 最初, 弱混合形態で遡上し, 強混合形態へと変化して網走湖に注ぐことが示された. 網走川の最深部(滞筋)における塩分濃度の鉛直断面について, 遡上開始時, 遡上最強時, 遡上終了時それぞれに関して描画したところ, 遡上形態の変化をFantomが再現できていることが確認された(図-5).

4. 吹送流の効果

(1) 東風4m/sのケース

過去の研究^{5) 7)}において網走川河口が東に向いていることもあり, 東風4m/s以上が与えられると塩水遡上量が

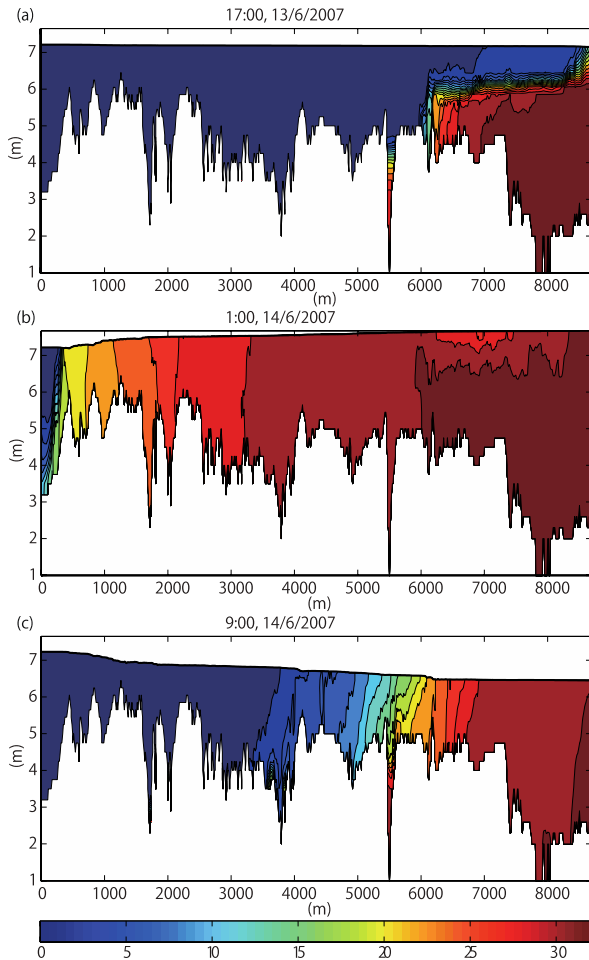


図-7 西風4m/sを与え続けた計算結果. 図-2の赤線の時刻における滞筋での塩分濃度の鉛直分布. 横軸は網走湖への侵入口を0mとしている.

増加することが示されている. その遡上量の増加は, radiation stressが主要因であることが示されている⁹⁾. しかし, 強混合時であれば, 東風は塩水遡上を促進する方向の風であり, 吹送流が遡上量を増大させている可能性も指摘されている. そこで本節では, 東風4m/sを与えて塩水遡上の再現計算を行い, 無風状態における前章の再現結果との比較・検討を行うこととする.

塩水遡上開始時には弱混合形態で遡上するため, 東風4m/sは遡上を抑制する鉛直循環を生み出し, 僅かながら塩水遡上量が小さくなることが分かった (図-5(a)と図-6(a)). その後, 強混合状態で塩水が遡上するが, 初期段階における塩水遡上の抑制の影響により, 網走湖に注ぎ込む塩分濃度が僅かながら小さくなることも示された (図-5(b)と図-6(b)). さらに, 東風4m/sは河口において常に塩水遡上を抑制し, 塩水遡上終了時における河口での塩分濃度の低下を発生させていた (図-5(c)と図-6(c)).

故に, 東風4m/sが与えられた場合に塩水遡上量が増大している主要因はradiation stressであり, 吹送流はそれを抑制する働きがあることが分かった. 過去の研究成果も

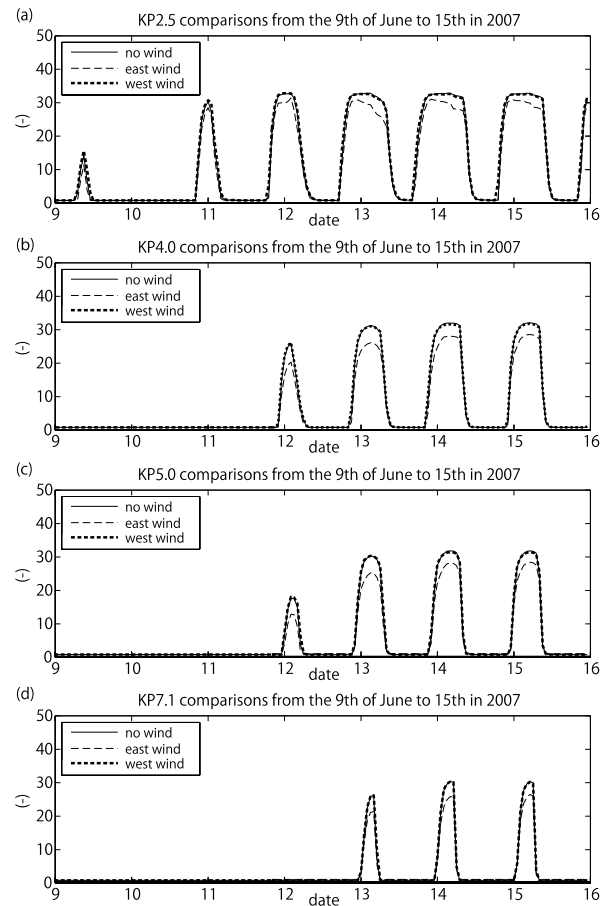


図-8 2007年6月における風なし(実線), 東風4m/s(破線), 西風4m/s(太点線)の各条件および(a) KP2.5, (b) KP4.0, (c) KP5.0, (d) KP7.1での底層付近での塩分濃度変化.

合わせて考えると, radiation stressの効果が吹送流の効果を上回っていることが推定される.

(2) 風向の効果検討

風向の効果を検討するために, 西風4m/sを与えた検討も行った (図-7). 塩水遡上初期において, 西風は遡上を促進する鉛直循環を生み出すことから, 遡上塩分濃度が全体的に高くなっている (図-5(a)と図-8(a)). 塩水遡上最強時に西風は遡上を抑制する働きをするが, 無風及び東風4m/sとの比較から, 網走湖に注ぎ込む塩分濃度は無風状態に近い状態であることが分かった (図-8). つまり, 塩水遡上初期段階における吹送流の役割が重要であり, 遡上と同じ方向の風は塩水遡上量を抑制し, その他の風は塩水遡上に大きな影響を与えないことが分かった.

5. おわりに

本研究では, 網走川における塩水遡上への吹送流の影響評価について検討を行った.

- 1) オブジェクト指向型環境流体モデルFantomを利用し、2007年6月9日から15日における塩水遡上の再現計算を行い、遡上初期の弱混合形態、およびその後の強混合形態を高精度に再現できることが確認された。
- 2) 塩水遡上初期段階における吹送流の役割が重要であり、遡上と同じ方向の風は塩水遡上量を抑制することが分かった。
- 3) 塩水遡上と逆方向の風は初期段階において塩水遡上を促進し、遡上塩分濃度が全体的に高くなっているが、無風及び東風4m/sとの比較から、無風状態に近い状態であることが分かった。
- 4) 今後は水制工等の規模による塩水遡上の影響についての研究も行っていきたい。
- 6) 中山恵介, 丸谷靖幸, 新谷哲也, 柿沼太郎, 中内勲, 米元光明: 塩水遡上へ与えるストークスドリフトの影響評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.326-330, 2010.
- 7) 早川博, 加藤淳子, 中山恵介, 崇田徳彦, 中内勲, 石田哲也, 風と塩水遡上の関連性に関する統計解析, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.68, No.4, pp.745-750, 2012.
- 8) Nakayama K., T. Okada and M. Nomura, Mechanism responsible for fortnightly modulations in estuary circulation in Tokyo Bay, *Estuarine Coast and Shelf Science*, Vol.64, pp.459-466, 2005, doi:10.1016/j.ecss.2005.03.002.
- 9) Nakayama K., M. Sivapalan, C. Sato and K. Furukawa, Stochastic Characterization of the Onset of and Recovery from Hypoxia in Tokyo Bay, Japan: Derived Distribution Analysis Based on "Strong Wind" Events, *Water Resources Research*, 46, 2010, doi:10.1029/2009WR008900.
- 10) 新谷哲也, 中山恵介, 網走川河口域で発生する塩水遡上に関する数値的検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.829-834, 2013.
- 11) 新谷哲也・中山恵介: 環境流体解析を目的としたオブジェクト指向型モデルの開発と検証, 水工論文集, 第53巻, pp.1267-1272, 2009.
- 12) Nakamoto A., K. Nakayama, T. Shintani, Y. Maruya, K. Komai, T. Ishida and Y. Makiguchi, Adaptive management in Kushiro Wetland in the context of salt wedge intrusion due to sea level rise, *Hydrological Research Letters*, Vol. 7, No. 1 p. 1-5, 2013.
- 13) Nakayama K., T. Shintani, K. Kokubo, Y. Maruya, T. Kakinuma, K. Komai and T. Okada, Residual current over a uniform slope due to breaking of internal waves in a two-layer system, *Journal of Geophysical Research*, vol.117, C10002, 11pp., 2012, doi:10.1029/2012JC008155.
- 14) Maruya Y., K. Nakayama, T. Shintani and M. Yonemoto, Evaluation of entrainment velocity induced by wind stress in a two-layer system, *Hydrological Research Letters*, Vol. 4, pp.70-74, 2010, doi:10.3178/hrl.4.70.
- 15) Adcroft, A., Hill, C. and Marshall, J.: 1997: Representation of topography by shaved cells in a height coordinate ocean model. *Mon. Wea. Rev.*, Vol.125, pp.2293-2315, 1997.

謝辞：北見工業大学大学院 丸谷靖幸君には数値計算等の解析にご協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 栗島知哉, 高橋克人, 宮島滋近, 平野道夫, 山田正: 塩淡二成層を形成している網走湖の塩水の流出入に関する研究, 水工学論文集, 第37巻, pp.305-312, 1993.
- 2) 池永均, 大東淳一, 三沢大輔, 内島邦秀, 樫山和男, 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, 第42巻, pp.775-780, 1998.
- 3) 池永均, 向山公人, 大島伸介, 山田正: 塩淡二成層を形成する汽水湖沼の長期的な界面変動予測手法の開発, 土木学会論文集, No.628/II-48, pp.77-96, 1999.
- 4) 網走湖水環境改善策検討委員会: 網走湖水環境改善施策検討最終報告書, 2010.
- 5) K. Nakayama, T. Shintani, T. Kakinuma, Y. Maruya, Y. Yonome, Y. Yonemoto and I. Nakauchi: Influence of Stokes Drift on Salt Wedge Intrusion Evaluated using Full-Nonlinear and Strongly-Dispersive Wave Equations, Proc. of 32nd Conference on Coastal Eng., current.34, ICCE, 2010.

SALT-WEDGE INTRUSION AND WIND DRIVEN CURRENT IN ABASHIRI RIVER

Yukinobu SATO, Keisuke NAKAYAMA Tetsuya SHINTANI and Katsuaki KOMAI

In Abashiri River, it is demonstrated that salt-water intrusion occurs when tidal level becomes more than the lake water level. It is expected that wind driven current enhances or suppresses. It is expected that wind driven current also enhances or suppresses salt-water intrusion. This study, thus, aims to investigate the influence of wind driven current on salt-water intrusion in Abashiri River by following the previous study, which reveals that easterly wind more than 4 m/s enhances salt-water intrusion. An object-oriented environmental fluid dynamics model is applied to investigate the effect of wind driven current on salt-water intrusion. As a result, easterly wind is found to suppress salt-water intrusion, which may support that radiation stress plays a great role in salt-water intrusion compared to wind driven current.