

鉛直2次元計算モデルを用いた 河川津波による塩水遡上現象に関する数値実験

Numerical Simulation of Salinity Intrusion by Tsunami in Rivers
with a Vertical 2D Model

北見工業大学 ○正員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
寒地土木研究所 正員 阿部 孝章 (Takaaki Abe)
室蘭工業大学 正員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)
寒地土木研究所 正員 船木 淳悟 (Jungo Funaki)

1. はじめに

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震による津波は、河川を遡上¹⁾し被害を拡大させた。河川津波は、陸域よりも遡上距離が長くなることが報告²⁾され、その危険性が再認識されている。河川津波による被害の一つとして、河川内の取水口に塩水が流入し取水障害を引き起こす被害がある。災害初期段階においては、取水障害により上水道の機能が失われると人命に関わる事態となる。

北海道東部の太平洋に面する釧路市では、新釧路川の河口から8.94kmに位置する取水口において、市の全水源を取水している。2011年3月11日は、取水口付近の河川水位が上昇したため、16時25分から18時30分の2時間5分、19時35分から21時55分の2時間20分の計2回の取水停止を実施している。また、釧路市では、3月11日16時00分から3月12日1時00分の期間で、取水した水の塩分測定を計28回実施している。取水口付近の河川水位が上昇し津波の遡上が確認された状況であったが、測定結果から取水した水は全て淡水であった。18万都市である釧路市は、全水源を1箇所から取水しており、取水障害は重要な問題となる。このため、河川津波によって塩水がどのように遡上・流下するのかに関する知見は有益であり、取水管理を行う上で重要な知見となる。

河川津波による塩水遡上に関する既往研究³⁾では、平面二次元津波挙動解により流動場を求め、塩水挙動は移流拡散方程式を用いて数値計算を実施し、津波が淀川を遡上する際の塩水挙動を明らかにしており、塩水遡上距離や塩分濃度変化を経時的に解析しており有益な知見が得られている。一方で、より高精度な現象解明のためには、塩水密度を考慮することの必要性を指摘している。

著者らは、密度を考慮した1次元2層流計算モデルを新釧路川へ適用し、河川津波の塩水遡上現象の解明を試みている⁴⁾。河川津波の塩水遡上現象は、第一波、第二波と津波が河川を遡上するタイミングで塩水は上流へと遡上し、引き波時には塩水はすぐさま流下しないことが推定されている。また、塩水が淡水を上流へと押し上げる段階で、淡水と塩水が混合し希釈されて塩水が上流へと遡上することが推察されているが、1次元2層流計算モデルでは、淡水と塩水の混合現象を表現できない課題があった。

本研究は、河川津波の塩水遡上現象を解明し、防災・減災対応を考える上での基礎資料を得ることを念頭に、

鉛直2次元計算モデルを構築し、河川津波による塩水遡上現象に関する数値実験を実施した。

2. 鉛直2次元計算モデル

本研究の計算モデルは、横断方向の流速はゼロとして、流れ方向をX軸、鉛直方向をZ軸とした鉛直2次元計算モデルを用いた。連続の式は次式を用いた。

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

u [m/s]: 流れ方向の流速で上流方向を正とした。 w [m/s]: 鉛直方向の流速で上空方向を正とした、

X軸とZ軸の運動の方程式は保存型の次式を用いた。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - g \quad (3)$$

t [sec]: 時間, ρ [kg/m³]: 流体の密度, P [N/m²]: 圧力, ν_x [m²/s]: 流れ方向の渦動粘性係数, ν_z [m²/s]: 鉛直方向の渦動粘性係数, g [m/s²]: 重力加速度であり9.8を与えた。圧力は、式(2)を x に関して偏微分した式と式(3)を z に関して偏微分した式を加算し、式(1)の右辺を変数に置き換えた式を代入して導かれるPoisson方程式により圧力の値を計算した。解法はGauss-Seidel法を用いた。

ν_x は、リチャードソンの4/3乗則⁵⁾に基づき、次式から求めた。

$$\nu_x = 0.01(\Delta x)^{\frac{4}{3}} \quad (4)$$

Δx [m]: 流れ方向の計算区間距離である。

ν_y については、既往研究⁶⁾において鉛直2次元計算モデルを用いて検討が実施されている。検討された乱流モデルの一つであるMunk & Andersonモデル⁷⁾は、実験結果との比較から、ある程度の妥当性が高い結果が得られている。本研究の ν_y の計算式は、下記のMunk & Andersonモデルを用いた。

$$\nu_y = \frac{\nu_0}{(1 + 10R_i)^{0.5}} \quad (5)$$

R_i : リチャードソン数は、次式となる。

$$R_i = \frac{g}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dz} \right) \left(\frac{du}{dz} \right)^{-2} \quad (6)$$

ρ は、流体密度の移流拡散方程式を用いた。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + D_z \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \quad (7)$$

D_x [m²/s] : 流れ方向の塩水の渦動拡散係数, D_z [m²/s] : 鉛直方向の塩水の渦動拡散係数である。

D_x は、次式により求めた。

$$D_x = \nu_x \quad (8)$$

D_z は、Munk & Anderson モデル⁷⁾の次式により求めた。

$$D_z = \frac{\nu_0}{(1 + 3.3R_i)^{1.5}} \quad (9)$$

流体密度 ρ は、 SS [psu] : 塩分濃度, ρ_w [kg/m³] : 淡水の密度として、次式の関係がある。

$$SS = 1000 \times \frac{\rho - \rho_w}{\rho} \quad (10)$$

3. 河川津波の塩水遡上現象の数値実験

河川津波の塩水遡上現象を解明するために、上流から下流へと淡水が流れている流況において、塩水が下流から上流へ遡上する現象を想定した数値実験を実施した。

(1) 実験条件

数値実験の概要を図-1に示す。図-1の U は上流から下流への淡水の流速, H_s は下流側の塩水塊の高さである。初期の淡水水深は 5cm, 塩水塊は海域からの津波を想定し、塩水塊の流れ方向の長さは 5m, 塩分濃度 30psu とした。水路幅は 1m, 河床勾配はゼロとした。

実験条件を表-1に示す。case1 は、初期の淡水水深 5cm に対して 2.0 倍の高さの塩水塊、淡水の流速 1cm/s, case2 は、初期の淡水水深 5cm に対して 2.4 倍の高さの塩水塊、淡水の流速 1cm/s, case3 は、初期の淡水水深 5cm に対して 3.0 倍の高さの塩水塊、淡水の流速 1cm/s, case4 は、初期の淡水水深 5cm に対して 3.0 倍の高さの塩水塊、淡水の流速 5cm/s とした。

新釧路川の河口での水深を 1m とすると、数値実験の縮尺は 1/20 となる。現地換算すると、case1 は 2.0m の津波で淡水の流速 4.5cm/s, case3 は 2.4m の津波で淡水の流速 4.5cm/s, case3 は 3.0m の津波で淡水の流速 4.5cm/s, case4 は 3.0m の津波で淡水の流速 22.4cm/s の実験条件となる。なお、2011 年 3 月 11 日の新釧路川河口の海域での津波の最高遡上高は 2.1m である。

(2) 計算条件

X 軸方向の計算区間は、図-1 の区間からさらに 25m 長い区間の計 50m とし、計算距離間隔 Δx は 0.1cm とした。 Z 軸方向の計算区間は、計 0.2m とし、 Δz は 0.01cm

表-1 数値実験条件

	塩水塊の高さ H_s [cm]	上流からの流速 U [cm/s]
case1	10	1
case2	12	1
case3	15	1
case4	15	5

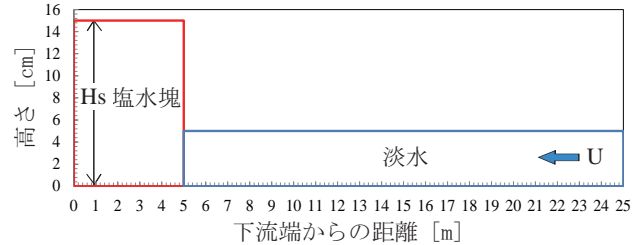


図-1 数値実験の概要

とした。計算時間は、計 9 秒とした。計算時間間隔 Δt は CFL 条件を満たすように式 (11) から算出した。

$$\Delta t = C_r \frac{\min(\Delta x, \Delta z)}{\sqrt{u_{max}^2 + w_{max}^2}} \quad (11)$$

$\min(\Delta x, \Delta z)$: Δx と Δz の内の小さい値, u_{max} [m/s] : ある時刻の計算区間内における流れ方向の最大流速, w_{max} [m/s] : ある時刻の計算区間内における鉛直方向の最大流速, C_r : クーラン数で 0.1 とした。

(3) 河川津波の塩水遡上現象に関する考察

実験規模が大きい case4 において、0 秒、1 秒、3 秒、5 秒、7 秒、9 秒毎の流体密度と流下方向流速を図-2に示す。図-2の黒の実線は、大気と流体の境の水面である。なお、流体密度と塩分濃度は式 (10) の関係がある。

図-2の流体密度をみると、赤で示された塩水塊が、実験開始 1 秒後には、重力の影響により鉛直下方向へと流れる。塩水塊と淡水の水面の接地点では、塩水は混合し塩分濃度が薄くなる。3 秒後には、塩水は上流方向へと遡上し、水面は上昇する。一方で、上流側での水面上昇区間の塩分濃度をみると希釈されて薄くなっている。5 秒、7 秒、9 秒と時間経過に伴い、水面は上流方向へと上昇する。これらの上流側の水面上昇区間の塩分濃度をみると、希釈されて薄くなっていることが分かる。高塩分濃度の塩水の遡上速度を平均すると約 0.4m/s, 水面の遡上速度を平均すると約 1.7m/s であり、塩水の遡上速度の方が遅い。本検討結果から、河川津波によって水位が上昇する場合、上昇した流体は必ずしも高塩分濃度であるとは言えず、上流の区間では塩分濃度が希釈されて薄くなっていることが分かった。

図-2の流下方向流速をみると、1 秒後には、重力の影響により塩水塊は鉛直下方向および上流方向へと流れ、塩水塊と淡水の水面の接地点では、上流方向への流速が速くなる。3 秒後では、上流から流れる淡水の水面上を乗り上げて、底面よりも水面上において上流方向への流速が速くなる。5 秒後、7 秒後、9 秒後と時間経過に伴い、水面上を流体が遡上する。この流体が上流へと遡上すると水位は上昇する。本検討結果から、上流からの流

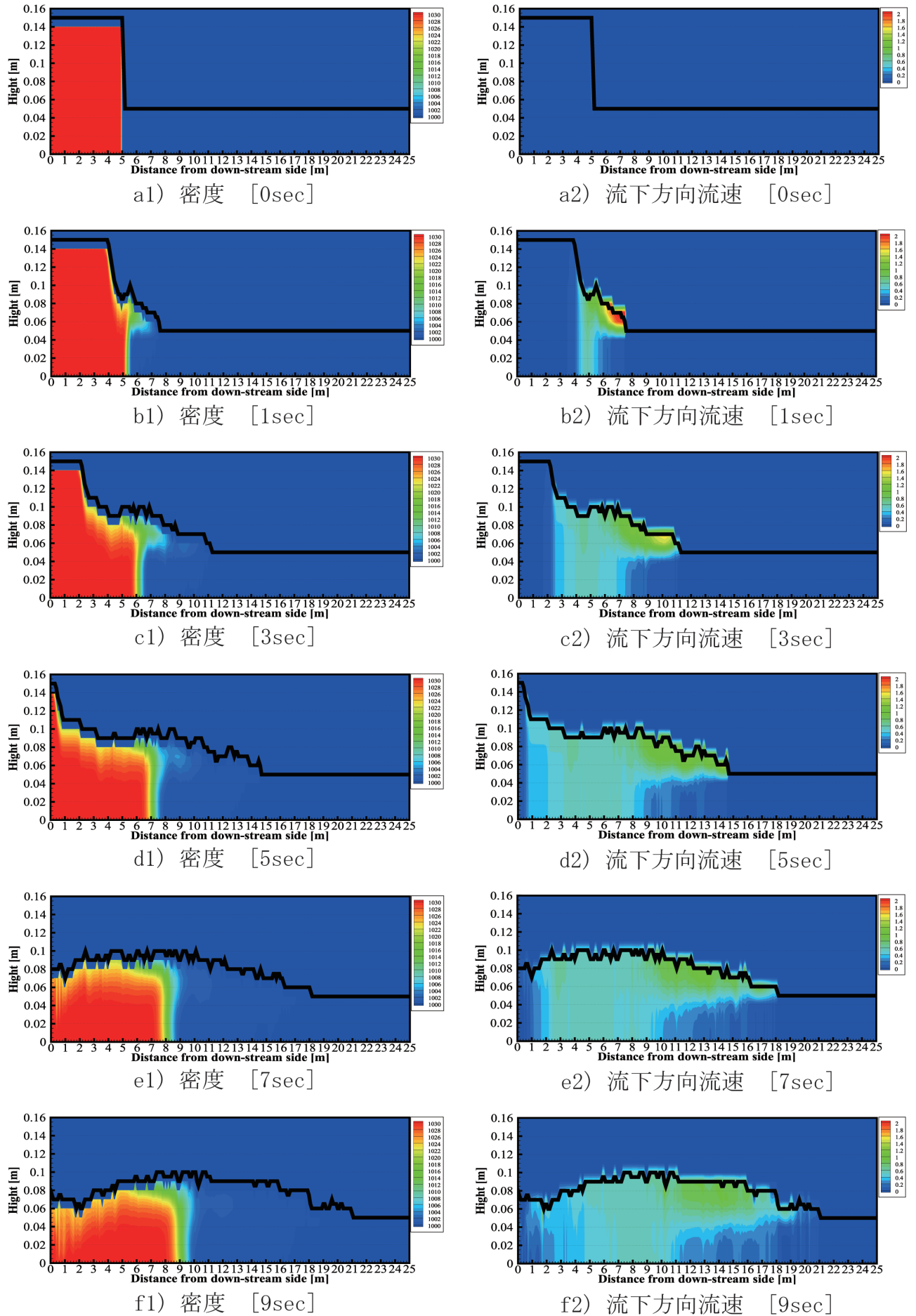


図-2 流体密度 [kg/m^3] と流下方向流速 [m/s] の計算結果 (case4)

れがある流況に、この流れの水深を超える塩水が遡上する場合には、上流から流れる淡水の水面上を乗り上げて遡上する。塩分濃度をみると、初期段階では乗り上げる流体は塩水であるが、上流へと遡上するに伴い淡水へと遷移していることが分かる。

(4) 塩水高と上流の流速が塩水遡上に与える影響

塩分濃度 5, 10, 20, 30psu の塩水の時間毎の遡上距離について、実験ケース毎に図-3, 4, 5, 6 に示す。図-3 の case1 より、30psu の塩水は、実験開始後に下流側へと後退し、約 6.6 秒後には完全に希釈される。5psu, 10psu, 20psu の塩水は、時間経過に伴い上流へと遡上する。case1 と case2 を比較すると、塩水塊の高さが高いほど、上流への塩水遡上速度は速いことが分かる。

図-4, 5 において、5psu と 10psu の塩水の遡上速度をみると、case3 は case2 に比べて速い。case3 において、5psu では約 5.6 秒後に、10psu では約 4.1 秒後に、その速度は減衰している。case3 よりも上流からの流れが速い case4 では、5psu と 10psu の塩水の遡上速度は、case3 に比べてより早く減衰している。5psu と 10psu の塩水の遡上速度の減衰の要因の一つとして、水面の上を乗り上げた流体が、上流からの淡水の流れによって希釈されることが考えられる。

本検討結果から、塩水塊の高さが高いほど上流へと遡上し、上流からの流れが速いほど塩水は希釈されることが分かった。

4. まとめ

鉛直 2 次元計算モデルを用いた数値実験より得られた知見を、実河川を踏まえて整理して以下に示す。

1. 河川津波によって水位が上昇する場合、上昇した流体は必ずしも高塩分濃度であるとは言えず、上流の区間では塩分濃度が希釈されて薄くなる。
2. 河川の水深を超える津波が遡上する場合には、河川水面を乗り上げて津波は遡上する。塩水と淡水との境界では乗り上げる流体は塩水であるが、上流へと遡上するに伴い淡水へと遷移する。
3. 津波の高さが高いほど上流へと遡上し、河川の流れが速いほど塩水は希釈される。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費基盤研究 (B)24360197, JSPS 科研費若手研究 (B)26870023 の助成を受けました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 河川津波対策検討会：河川への遡上津波対策に関する緊急提言，国土交通省報道発表資料，p.1, p.4, 2011 年。
- 2) 田中仁：河川遡上津波による被害の特徴，河川技術に関するシンポジウム，東日本大震災津波災害特別セッション「今次津波災害と河川技術」，2011。
- 3) 松宮弘信，米山望，田中尚，鯨島竜一，佐藤広章：河川遡上津波発生時の淀川大堰上流部における塩水挙動解析，自然災害科学自然災害科学，28-2，pp.125-135，2009。
- 4) 吉川泰弘，阿部孝章，中津川誠，渡邊康玄：河川結氷時における河川津波の流速分布特性，土木学会北海道支部，年次技術研究発表会論文報告集，70，B-30
- 5) 土木学会編水理公式集，土木学会，p.45-p.46，1985。
- 6) 工藤拓也，木村一郎，清水康行，安田浩保，清治真人：構造物を用いた塩水遡上の制御に関する数値シミュレーション，土木学会，水工学論文集，第 53 巻，pp.1351-1356，2009。

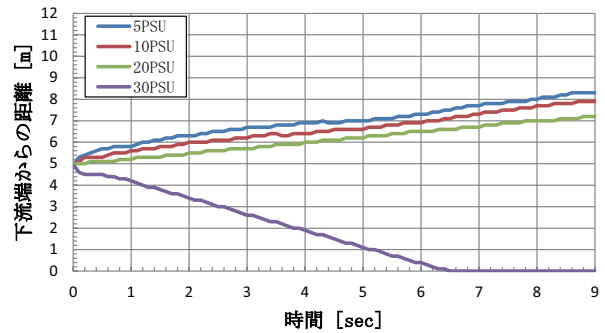


図-3 各塩分濃度の時間毎の遡上距離 (case1)

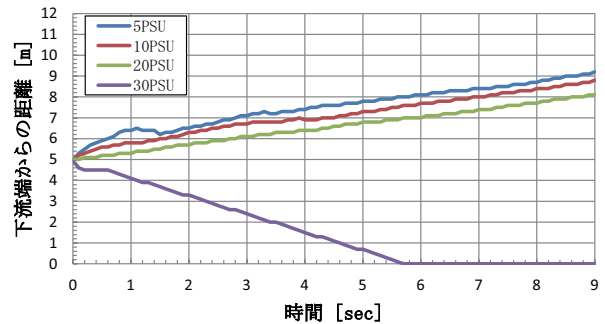


図-4 各塩分濃度の時間毎の遡上距離 (case2)

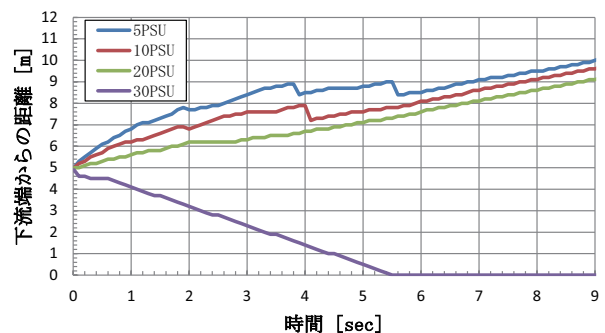


図-5 各塩分濃度の時間毎の遡上距離 (case3)

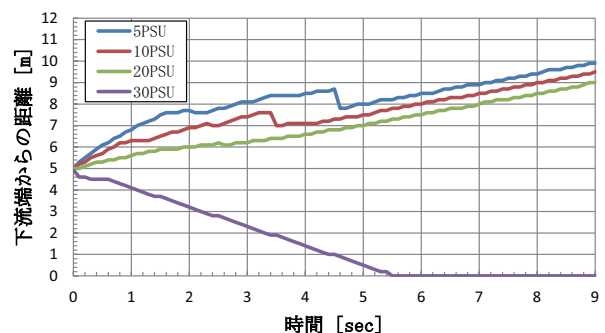


図-6 各塩分濃度の時間毎の遡上距離 (case4)

- 7) Munk, W. H., and Anderson, E. R.: Notes on the theory of the thermocline, Jour. of Marine Research, Vol.3, pp.276-295, 1948.