

# 平面二次元・三次元ハイブリッドモデルを用いた 津波来襲時の淀川大堰上流部における塩水挙動解析

## Salinity Transport Analysis during a Tsunami Attack in the Upstream Area of the Yodogawa Estuary Barrage by Using a Hybrid 2DH-3D Model

- 永島 弘士, 京大院, 京都市西京区京都大学桂, E-mail: nagashima@taisui5.dpri.kyoto-u.ac.jp
- 米山 望, 京大防災研, 京都府宇治市五ヶ庄, E-mail: yoneyama@taisui5.dpri.kyoto-u.ac.jp
- William PRINGLE, 京大院, 京都市西京区京都大学桂, E-mail: william\_pringle@taisui5.dpri.kyoto-u.ac.jp
- Hiroshi NAGASHIMA, Kyoto Univ., Kyotodaigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto
- Nozomu YONEYAMA, DPRI, Kyoto Univ., Gokasyo, Uji, Kyoto
- William Pringle, Kyoto Univ., Kyotodaigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto

An application of a hybrid 2DH-3D model to salt water behavior caused by a river-runup tsunami was conducted. The hybrid model is useful for coupling of tsunami propagation from the wave source in 2DH to the flow in the estuary area in 3D, where the density current should be considerable. Two conditions of river flow rate were considered to analyze the effects on the vertically-distributed salinity transport. It was shown that although free surfaces were similar between 2DH and 3D models, significant vertical distributions of the density were present in the 3D region, indicating applicability of the hybrid model to the situation.

### 1. はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災は、それまでの予想をはるかに超える大災害であった。これを受け、防災計画の見直しが進められている。近い将来には南海トラフ巨大地震の発生が予想されており、その対策の一つとして、津波により河川を遡上した塩分の河川内の滞留時間を予測することが挙げられる。本研究の対象とする淀川大堰上流域（詳細は3章で記述する）には浄水場の取水口が複数存在し、大阪市およびその周辺区域の多くの住民への飲料水の供給源となっている。淀川を遡上した津波が淀川大堰を越流して取水口から塩分が流入すると浄水場設備が故障してしまうため、取水口付近に塩分が滞留する間は取水を止める必要があるが、それが長時間に及んだ場合には飲料水の供給も止まることとなる。そのため、河川に滞留する塩分の分布と滞留時間をできるだけ正確に予測することが重要となる。

松宮ら<sup>1)</sup>は、東南海・南海地震津波を対象として、波源から淀川34 km 地点までの平面二次元解析を行い、その流速分布を用いて淀川大堰上流域の平面二次元および三次元の塩水挙動解析を行い、塩分の取水への影響を評価している。また、この研究を受けて米山ら<sup>2)</sup>は、塩水は密度差により沈降しながら拡散すると考えられるため、淀川河口から淀川大堰上流約10 kmの範囲を対象に三次元密度流解析を実施し、より詳細に取水影響評価を行っている。しかし、この解析では波源からの平面二次元解析により得られた水位変動を河口の境界条件として与えているが、淀川を遡上した津波が淀川大堰に到達してから2時間程度でこの水位変動と計算された淀川大堰からの反射波が整合しなくなり、淀川大堰上流域から塩分が流下し終えるまでの長時間の解析を実施するには至っていない。このような不整合を解消し、十分長い時間の解析を行うためには、解析領域を広げる必要がある。広大な領域を対象とする場合は、計算時間の観点から平面二次元解析を行うことが多いが、塩水挙動を解析対象とする場合には鉛直方向の流体の密度差を考慮できる三次元解析を行う必要がある。

そこで本研究では、平面二次元・三次元ハイブリッドモデルを用いて、波源から淀川大堰下流域までを平面二次元で解析し、淀川大堰周辺のみを三次元で詳細に解析することを試みた。Pringleら<sup>3)</sup>は、平面二次元非線形長波モデルとVOF (Volume of Fluid) 法

④を用いた三次元モデルを組み合わせた平面二次元・三次元ハイブリッドモデルを開発し、東北地方太平洋沖地震津波の釜石湾における津波挙動解析に適用して、そのモデルが高い解析精度を有することを確認していることから、本研究では、Pringleらのハイブリッドモデルを、三次元モデルの部分で塩分の移流拡散も解析できるように改良して使用した。また、河川遡上津波を解析対象とすることを鑑み、平面二次元モデルによる解析も併せて実施し、両モデルの解析結果を比較してどの程度の差異が生じるかを確認した。その上で、ハイブリッドモデルによる淀川大堰上流域における三次元塩水挙動解析結果について考察し、河川遡上津波発生時の塩水挙動解析における平面二次元・三次元ハイブリッドモデルの適用性を確認した。

### 2. 解析手法の概要

#### (1) 平面二次元解析

平面二次元解析の基礎方程式は、非線形長波理論に基づく以下の方程式である。

・連続方程式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

・運動方程式 ( $i = 1, 2$ )

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j M_i)}{\partial x_j} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x_i} + \frac{gn^2 M_i \sqrt{M_j M_j}}{D^{7/3}} = 0 \quad (2)$$

ここに、 $\eta$ : 水位、 $M_i = u_i D$ :  $x_i$ 方向の流量フラックス、 $u_i$ :  $x_i$ 方向の流速、 $g$ : 重力加速度、 $D$ : 全水深、 $n$ : マニングの粗度係数である。

式(2)および式(3)の差分化は、時間に関しては前進差分、移流項については第一次風上差分、圧力項および摩擦項は中央差分とした。式(1)の差分化は、時間に関して前進差分、空間に関して中央差分とし、leap flog法に基づいて計算を進めた。

また、平面二次元解析領域においては、広大な計算領域を効率的に計算するためにネスティング手法を用いた。<sup>(5)</sup>

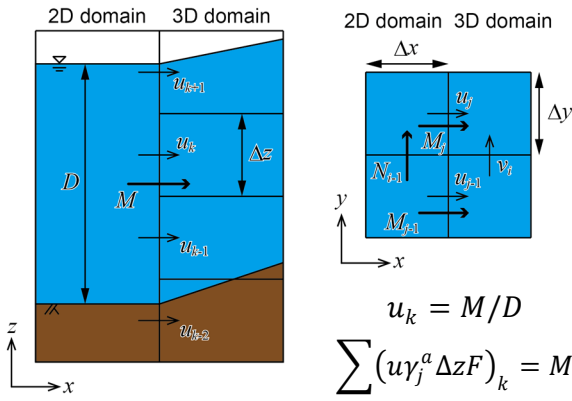


Fig. 1 Illustration of the 2DH-3D hybrid interface

## (2) 三次元解析

三次元流体挙動解析には、水面挙動の予測に VOF 法、境界形状の取り扱いに FAVOR (Fractional Area Volume Obstacle Representation) 法<sup>6)</sup>を用いた非圧縮流体解析手法を使用した。基礎方程式を以下に示す。

・連続方程式

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

・運動方程式 ( $i = 1, 2, 3$ )

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

・流体体積の移流方程式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

・塩分の移流拡散方程式

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( -S \cdot u_j + \frac{\nu + \nu_t}{S_c} \frac{\partial S}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

ここに、 $u_i$  : 流速の各方向成分、 $G_i$  : 単位体積あたりの外力、 $p$  : 圧力、 $\rho$  : 流体密度、 $\nu$  : 動粘性係数、 $F$  : 計算セルの流体充填率 (= 計算セル内の流体体積 / 計算セル内の空隙体積)、 $S$  : 塩分濃度、 $S_c$  : シュミット数 (= 0.833) である。また、水温  $T$ 、塩分濃度  $S$  と流体密度  $\rho$  の関係式は以下で与えられる。

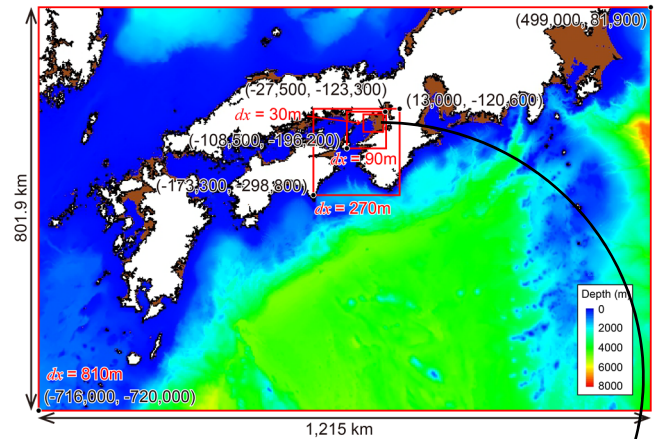
$$\rho = 1028.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 + (0.802 - 0.002T)(S - 35.0) \quad (7)$$

## (3) 平面二次元・三次元カップリング手法

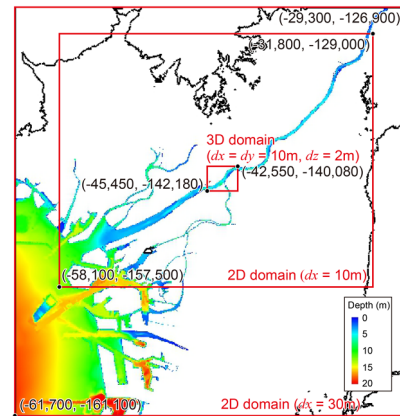
平面二次元解析領域と三次元解析領域の境界における物理量の受け渡し方法の概略図を Fig. 1 に示す。境界面では、平面二次元解析により得られた流速を三次元解析領域に一樣に与え、三次元解析により得られた水平方向流速は積分して均等に平面二次元解析領域に与える。また、境界面に平行な流速についても考慮している。

## 3. 解析対象領域および解析条件

本研究では、内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」の(以下、「検討会」)において検討されたモデルのうち、平面直角座標第 VI 系 (JGD2000) に基づく地形データ、粗度データおよび堤防データを使用した。解析対象領域は、Fig. 2 に示すように南西端を  $X = -716,000$  m,  $Y = -720,000$  m とする東西 1,215 km, 南北 801.9 km の範囲とし、計算格子の大きさは、外洋部で 810 m, 大阪湾に



(a) Calculation area of 2DH (mesh size = 810 m, 270 m, 90 m)



(b) Calculation area of 2DH (mesh size = 30 m, 10 m) and 3D

Fig. 2 Calculation area

近づくにつれ 270 m, 90 m, 30 m, 10 m の 5 段階で小さくした。計算格子サイズ 810 m の解析領域の境界条件は、北端で自由端、その他で自由端とした。また、三次元解析領域の計算格子サイズは、X, Y 方向 10 m, Z 方向 2 m (T.P. -12 m ~ 8 m) とした。津波断層モデルは、検討会において想定されている 11 ケースのうち、大阪府に最も大きな影響を与えるケース 10 の津波断層モデルを用いた<sup>6)</sup>。

淀川大堰は、淀川河口から約 10 km のところに位置し、塩水の浸入を防いで水道用水および工業用水を確保するとともに、淀川の水の一部を大川に供給する役割を担っている。淀川大堰は、中央に位置する幅 55 m の主ゲート 4 門と両端に位置する調節ゲート 2 門から成る。洪水時 (淀川の代表的な流量 : 62 m<sup>3</sup>/s) および平常時 (同 196 m<sup>3</sup>/s) には、調節ゲートの天端高をそれぞれ T.P.+2.3 m, T.P.+1.0 m に操作して淀川大堰上流側の水位を概ね T.P.+1.7 m に保ち、毛馬水門の操作と併せて大川への流量が 120 m<sup>3</sup>/s を超えないように調節している。(Fig. 3 および Fig. 4 参照)

このように、淀川大堰は淀川の流量に応じて天端高が異なる。淀川流量が多いときは調節ゲートの天端高が低いいため津波越流量も多くなるが、塩分が下流に流されるのも早くなると考えられる。本研究では、洪水時および平常時について解析を実施した。各ケースの解析条件をまとめて Tab. 1 に示す。ここで、淀川大堰下流側水位 T.P.+0.9 m は大阪湾朔望平均満潮位、淀川大堰上流側の塩分 0.03 psu は通常の河川の塩分、淀川大堰下流側の塩分 27.82 psu は既往の観測最大値である。また、水温は 27°C で一定とした。なお、本解析における淀川の上流端は Fig. 2 (b) の右上部分 (約 33 km 地点) とした。

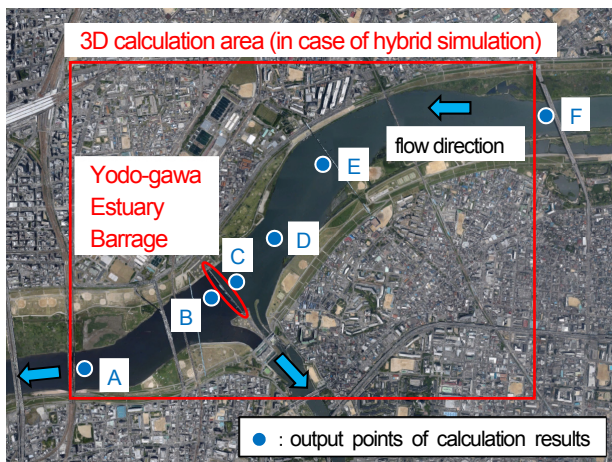


Fig. 3 Map around Yodo-gawa Estuary Barrage (from Google Map)

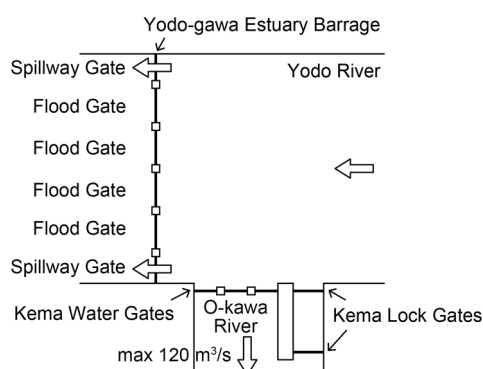


Fig. 4 Illustration of Yodo-gawa Estuary Barrage (non-flood condition)

Tab. 1 Calculation Conditions

	Drought	Ordinary
Flow rate of Yodo River	62 m <sup>3</sup> /s	196 m <sup>3</sup> /s
Flow rate of O-kawa River	62 m <sup>3</sup> /s	120 m <sup>3</sup> /s
Overtopping volume of barrage	0 m <sup>3</sup> /s	76 m <sup>3</sup> /s
Water level downstream of barrage	T.P.+0.9 m	T.P.+0.9 m
Water level upstream of barrage	T.P.+1.7 m	T.P.+1.7 m
Crest height of spillway gates	T.P.+2.3 m	T.P.+1.0 m
Crest height of flood gates	T.P.+2.5 m	T.P.+2.5 m
Salinity downstream of barrage	0.03 psu	0.03 psu
Salinity upstream of barrage	27.82 psu	27.82 psu

\*psu: Practical Salinity Unit

#### 4. 解析結果の比較

津波の解析に先立ち、平面二次元モデルおよびハイブリッドモデルのそれぞれについて、渇水時および平常時の淀川の流れの定常状態を作成した。解析結果のうち、ハイブリッドモデルによる渇水時の流量および水位時系列を Fig. 5 に示す。

津波解析は、各モデル、各ケースにおける淀川の定常状態の解析結果を初期条件として実施した。津波解析結果のうち、平面二次元津波伝播解析結果の例を Fig. 6 に、平面二次元モデルとハイブリッドモデルによる、Fig. 3 中の地点 A, B, C, F における水位変化の比較例を Fig. 7 にそれぞれ示す。津波は地震発生後約 1 時間で紀淡海峡を通過し、約 2 時間 30 分で淀川を遡上して淀川大堰に到達している。また、津波波形は、三次元解析領域内において

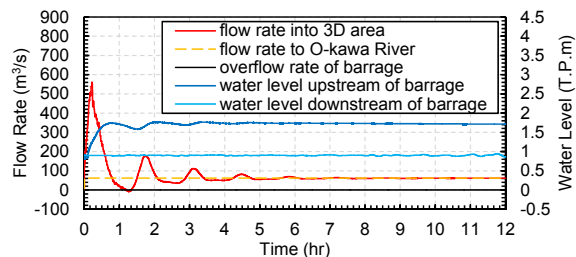
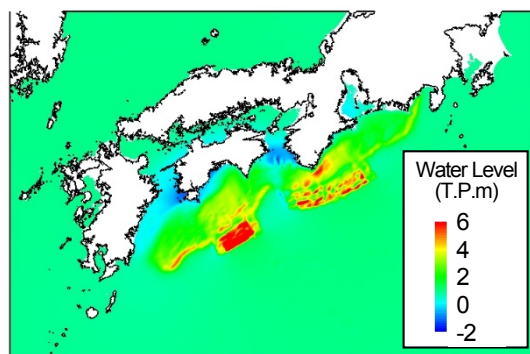
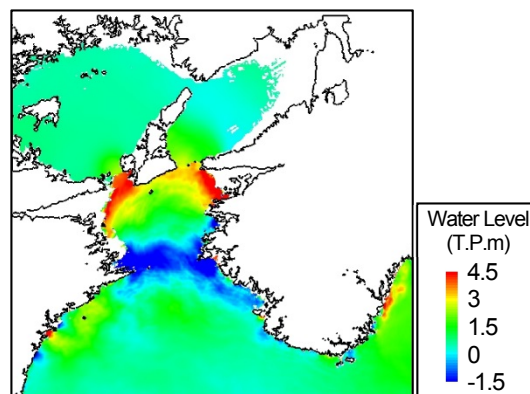


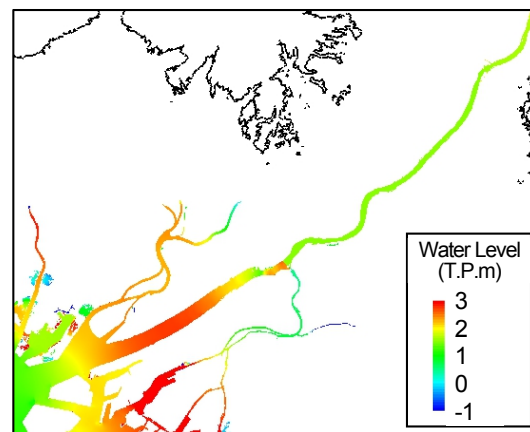
Fig. 5 Example of results of steady flow calculation (drought case by hybrid model)



(a) T = 0 (hr) (mesh size: 810 m)



(b) T = 1.0 (hr) (mesh size: 270 m)



(c) T = 2.5 (hr) (mesh size: 10 m)

Fig. 6 Example of 2DH tsunami propagation simulation

も平面二次元解析の結果とほぼ同じであり、河川遡上解析において、平面二次元解析とハイブリッド解析でほぼ同等の解析結果が



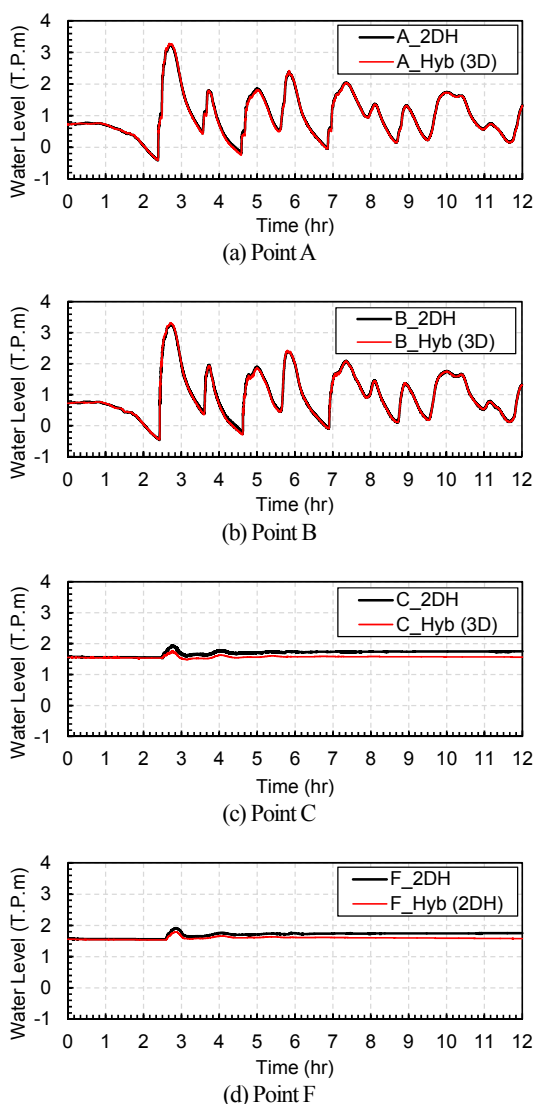


Fig. 7 Comparison of water level between 2DH and hybrid calculation (drought case)

得られたと考えられる。

渇水時および平常時におけるハイブリッドモデルによる塩水挙動解析結果のうち、水面における解析結果の例を Fig. 8 に、Fig. 3 中の地点 C, D, E における流体密度の鉛直分布の例を Fig. 9 および Fig. 10 にそれぞれ示す。津波が淀川大堰を越流した直後 ( $T = 2.58$  (hr)) には、淀川大堰の上流面 (地点 C) で鉛直方向の密度差が解析できていることがわかる。また、水面における塩分の平面方向の広がりが概ね最大となる  $T = 3.0$  (hr) においては、平常時よりも渇水時の方が塩分が地点 C および D に存在していることがわかる (Fig. 8, Fig. 9(b) および Fig. 10(b))。さらに、平常時は渇水時よりも淀川流量が大きいため、塩分が早く流下し、3 地点の流体密度がいずれも渇水時より小さくなっていることがわかる (Fig. 9(c) および Fig. 10(c))。

以上より、ハイブリッドモデルにより、波源からの平面二次元津波伝播解析と淀川大堰上流域における流体の密度差を考慮した三次元塩水挙動解析を十分長い時間にわたって実施できたと考えられ、河川遡上津波発生時の塩水挙動解析に平面二次元・三次元ハイブリッドモデルが適用可能であることが確認できた。また、解析時間は、12 時間の津波解析について、平面二次元モデルで約 6 時間、ハイブリッドモデルで約 23.5 時間であった。ハイブリッドモデルにより、平面二次元モデルよりも計算負荷を過大に増や

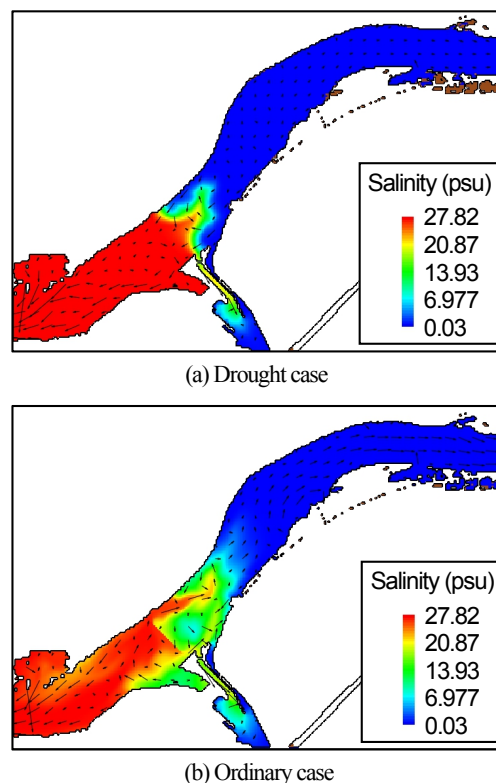


Fig. 8 Example of salinity transport simulation (Elevation = T.P.+0.0 m,  $T = 3.0$  (hr))

すことなく、必要な領域のみ三次元で詳細に解析することができた。ただし、現時点では水面下の計算格子数は 3 または 4 であり、鉛直方向の流体の密度差を考慮した解析を行うのに十分な解像度を有しているとは言い切れない。今後、塩水挙動が精度よく解析できるようにするため、三次元解析領域の計算格子を小さくすることも含めてさらなる検討を重ねる必要がある。

## 5. 結論

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- ・大阪市などの多くの住民に飲料水を供給する浄水場の取水口が複数存在する淀川大堰上流域について、平面二次元・三次元ハイブリッドモデルおよび平面二次元モデルを用いて南海トラフ巨大地震津波発生時の津波遡上解析を行った。解析ケースは渇水時 (淀川の代表的な流量:  $62 \text{ m}^3/\text{s}$ ) および平常時 (同  $196 \text{ m}^3/\text{s}$ ) とし、津波解析に先立って各モデルの各ケースについて淀川の流れの定常状態を作成した。津波解析の結果、淀川大堰周辺における水位変化が両モデルで概ね一致することを確認した。
- ・平面二次元・三次元ハイブリッドモデルにより、波源からの平面二次元津波伝播解析と淀川大堰上流域における流体の密度差を考慮した三次元塩水挙動解析を、十分長い時間にわたって行うことができた。また、淀川流量や津波の淀川大堰の越流状況に応じた三次元塩分挙動が解析できた。これより、河川遡上津波発生時の塩水挙動解析に平面二次元・三次元ハイブリッドモデルが適用可能であることが確認できた。

本研究においては、三次元解析領域の鉛直方向の計算格子数が少なく、鉛直方向の流体の密度差を考慮した解析を行うのに十分な解像度を有しているとは言い切れない。今後は、塩水挙動が精度よく解析できるようにするため、三次元解析領域の計算格子を小さくすることも含めてさらなる検討を重ねていく予定である。

参考文献

- (1) 松宮弘信, 米山 望, 田中 尚, 鮫島竜一, 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, 28(2), pp. 125-135, 2009.
- (2) 米山 望, 松宮弘信, 鮫島竜一: 淀川における河川遡上津波発生時の三次元塩水挙動解析, 河川技術論文集, 第 16 卷, pp. 265-270, 2010.
- (3) Pringle W., 米山 望: 2011 年東北地方太平洋沖地震津波に関する二次元・三次元ハイブリッドモデルの適用, 土木学会論文誌 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I\_306-I\_310, 2013.
- (4) Hirt C. W. and Nichols B. D.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, Vol.39, pp.201-225., 1981.
- (5) 永島弘士, 笹木将太, Pringle, W.J., 米山 望: 数値解析を用いた津波浸水被害優先対策箇所の選定方法に関する考察, 土木学会論文誌 B3 (海洋開発), Vol. 71, No. 2, pp. I\_509-I\_514, 2015.
- (6) Hirt C. W. and Sicilian J.M.: A Porosity Technique for the Definition Obstacles in Rectangular Cell Meshes, Proc. of 4th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, 1985.
- (7) 南海トラフの巨大地震モデル検討会: 南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第二次報告) 津波断層モデル編, 2012.

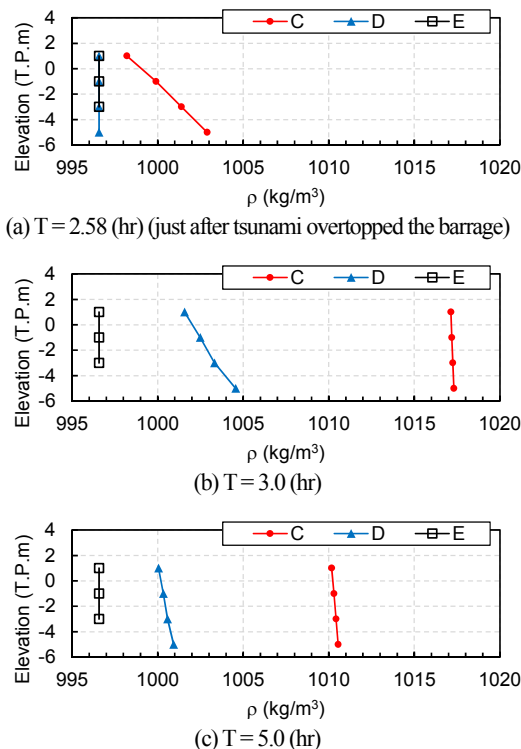


Fig. 9 Example of vertical distribution of fluid density calculated by hybrid model (drought case)

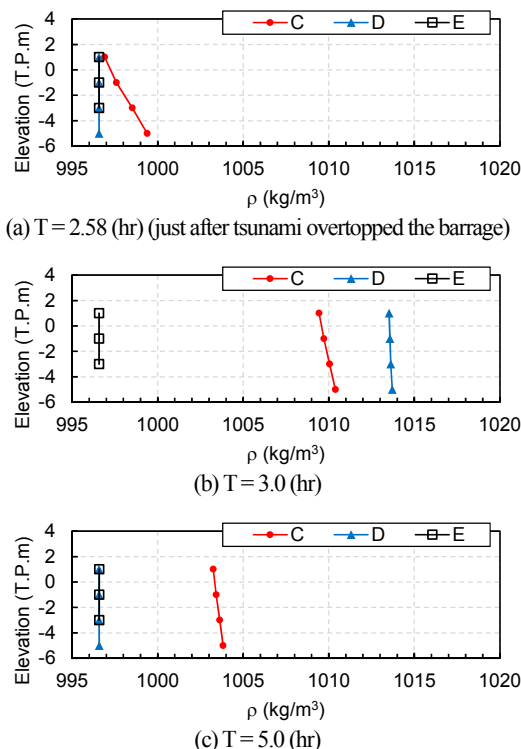


Fig. 10 Example of vertical distribution of fluid density calculated by hybrid model (ordinary case)