

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

APPLICATION OF A HYBRID 2DH-3D MODEL TO SALT WATER BEHAVIOR CAUSED BY A RIVER-RUNUP TSUNAMI

永島 弘士¹・米山 望²・William James PRINGLE¹
Hiroshi NAGASHIMA, Nozomu YONEYAMA and William James PRINGLE

¹学生会員 修(工) 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

²正会員 博(工) 京都大学防災研究所准教授 流域災害研究センター 都市耐水研究領域
(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

The Nankai Trough Earthquake Tsunami is predicted to occur in the near future in Japan. One of the countermeasures to be taken against the tsunami attack is to predict how long salt water carried by a river-runup tsunami would stay in the river to prevent a water purification plant from taking in salt water.

In this study, 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.

Key Words : tsunami, salt water, water purification plant, water intake, hybrid 2DH-3D model

1. 結論

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²⁾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って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³⁾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(12時間以上)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³⁾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を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 ($i = 1, 2$)

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

ここに、 η ：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 ：マン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よくかつ詳細に解析するためにネスティング手法を用いた⁵⁾。

(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⁶⁾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

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

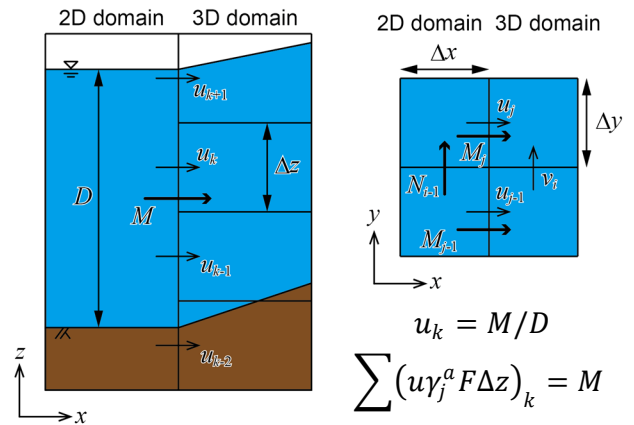


図-1 平面二次元解析領域と三次元解析領域の物理量の受け渡し

・運動方程式 ($i = 1, 2, 3$)

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

・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、 ρ ：流体密度、 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、 ν ：動粘性係数、 F ：計算格子の流体充填率（＝計算格子内の流体体積／計算格子内の空隙体積）、 S ：塩分濃度、 S_c ：シュミット数（＝0.833）、 ν_t ：渦動粘性係数である。また、水温 T 、塩分濃度 S と流体密度 ρ の関係式は以下で与えられる。

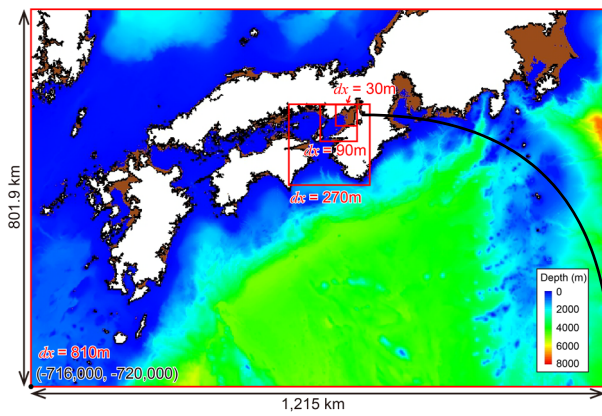
$$\rho = 1028.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 + (0.802 - 0.002T)(S - 35.0) \quad (7)$$

(3) 平面二次元・三次元カップリング手法

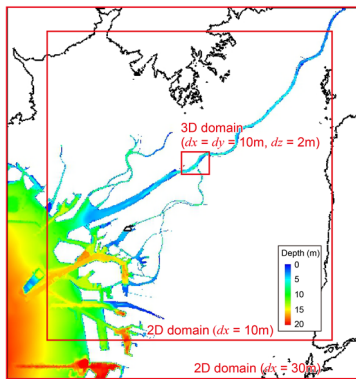
平面二次元解析領域と三次元解析領域の境界における物理量の受け渡し方法の概略図を図-1に示す。ここに、 γ_i^a ：計算格子境界面の開口率（＝計算格子境界面の開口面積／計算格子境界面全体の面積）である。境界面では、平面二次元解析により得られた流速を三次元解析領域に一樣に与え、三次元解析により得られた水平方向流速は積分して均等に平面二次元解析領域に与える。また、境界面に平行な流速についても考慮している。

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」⁷⁾（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



(a) 平面二次元（計算格子サイズ810m・270m・90m）の解析領域



(b) 平面二次元（計算格子サイズ30m・10m）および三次元の解析領域

図-2 解析対象領域

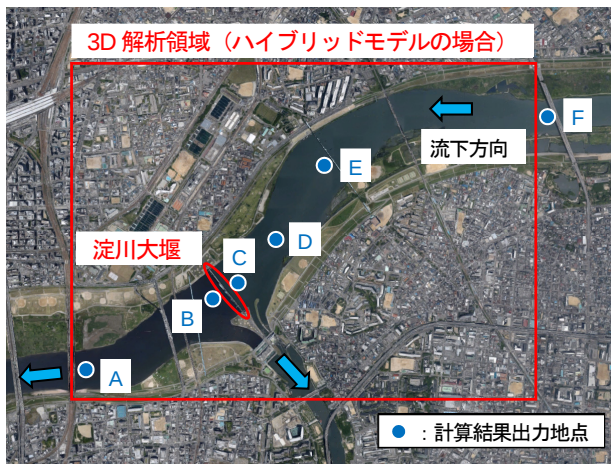


図-3 淀川大堰周辺図（背景図はGoogle Mapより引用）

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、図-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、検討会のモデルと同様に外洋部で810 m、大阪湾に近づくにつれ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、北端で固定端、その他で自由端とした。また、三次元解析領域は、松宮ら⁹⁾の解析を

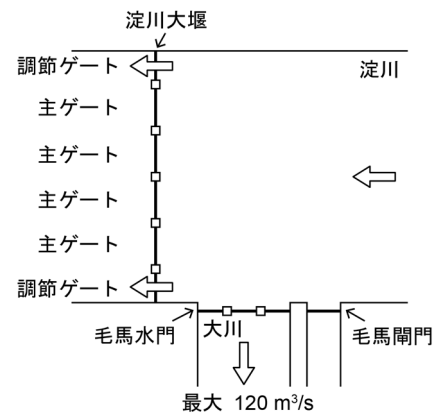


図-4 淀川大堰概略図（非洪水時）

表-1 解析条件

	渇水時	平常時
淀川流量	62 m³/s	196 m³/s
大川流量	62 m³/s	120 m³/s
淀川大堰越流量	0 m³/s	76 m³/s
淀川大堰下流側水位	T.P. +0.9 m	T.P. +0.9 m
淀川大堰上流側水位	T.P. +1.7 m	T.P. +1.7 m
調節ゲート天端高	T.P. +2.3 m	T.P. +1.0 m
主ゲート天端高	T.P. +2.5 m	T.P. +2.5 m
淀川大堰下流側塩分	27.82	27.82
淀川大堰上流側塩分	0.03	0.03

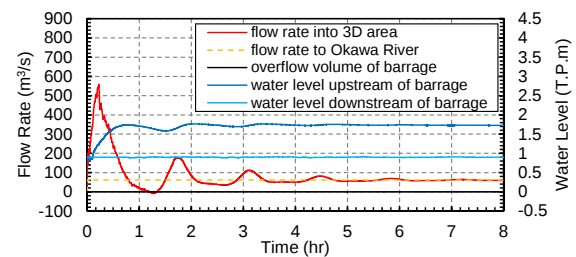
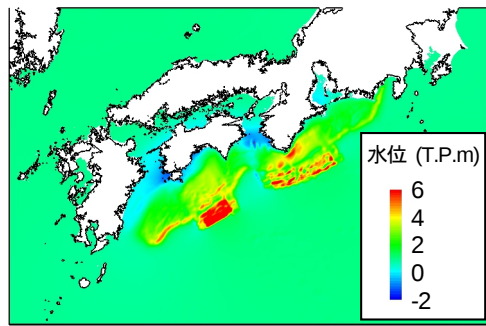


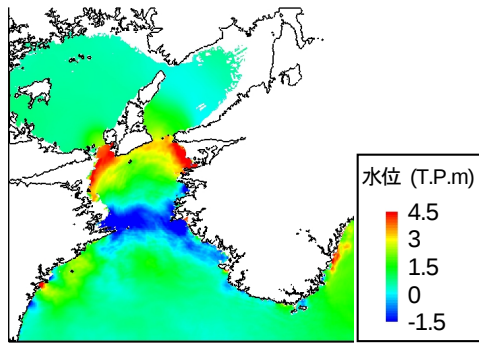
図-5 定常状態の解析結果の例（ハイブリッドモデルによる渇水時の流量および水位の時系列）

参考にして、南西端をX=-47,650 m、Y=-143,400 mとする東西7,860 m、南北5,740 mの範囲とし、計算格子サイズはX、Y方向10 m、Z方向2 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⁹⁾。

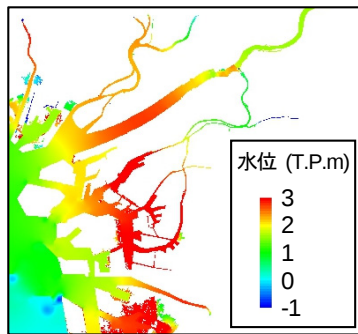
淀川大堰は、淀川河口から約10 kmのところの位置し、塩水の浸入を防いで水道用水および工業用水を確保するとともに、淀川の水の一部を大川に供給する役割を担っている。淀川大堰は、中央に位置する幅55 mの主ゲート4門と両端に位置する調節ゲート2門から成る。渇水時（淀川流量62 m³/s）および平常時（同196 m³/s）には、調節ゲートの天端高をそれぞれT.P.+2.3 m、T.P.+1.0 mに操作し、淀川大堰上流側の水位を概ねT.P.+1.7 mに保ち、大川への流量が120 m³/sを超えないように調節している。（図-3および図-4参照）



(a) T = 0 (hr) (計算格子サイズ810 mの領域の例)



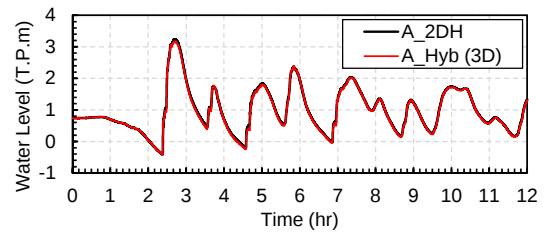
(b) T = 1.0 (hr) (計算格子サイズ 270 m の領域の例)



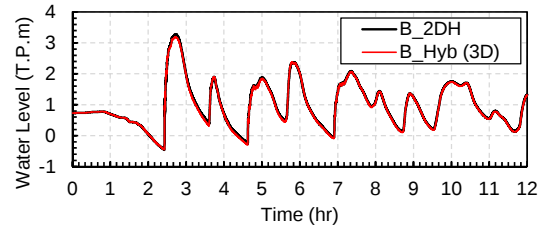
(c) T = 2.5 (hr) (計算格子サイズ 10 m の領域 (一部) の例)

図-6 平面二次元津波伝播解析結果の例

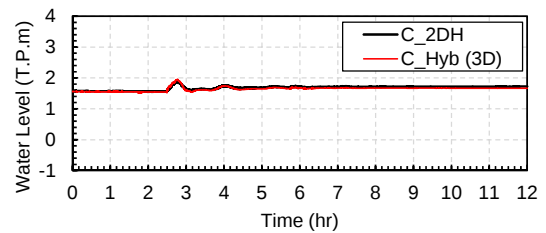
このように、淀川大堰は淀川の流量に応じて天端高が異なる。淀川流量が多いときは調節ゲートの天端高が低いため津波越流量も多くなると考えられるが、塩分が下流に流されるのも早くなると考えられる。本研究では、渇水時および平常時について解析を実施した。各ケースの解析条件をまとめて表-1に示す。ここで、淀川大堰下流側水位T.P.+0.9 mは大阪湾朔望平均満潮位、淀川大堰上流側の塩分0.03（実用塩分、以下同様）は通常の河川の塩分、淀川大堰下流側の塩分27.82は既往の観測最大値である。淀川大堰下流側の塩分27.82は、海水の塩分（約35）よりも小さいが、吉川ら⁹⁾は河川遡上津波によって水位が上昇する場合、上昇した流体の塩分は必ずしも高濃度であるとは言えないという知見を示していることを踏まえ、松宮ら⁹⁾および米山ら²⁾の研究も参考にして設定した。なお、水温は27℃で一定とし、本解析における淀川の上流端は、図-2 (b)の右上部分（約33 km地点）とした。



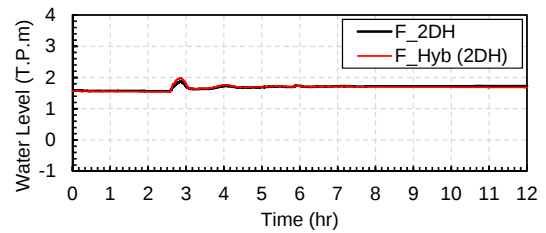
(a) 地点A



(b) 地点B



(c) 地点C



(d) 地点F

図-7 水位時系列の比較（渇水時）

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図-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図-6に、平面二次元モデルとハイブリッドモデルによる、図-3中の地点A, B, C, Fにおける水位変化を比較して図-7および図-8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

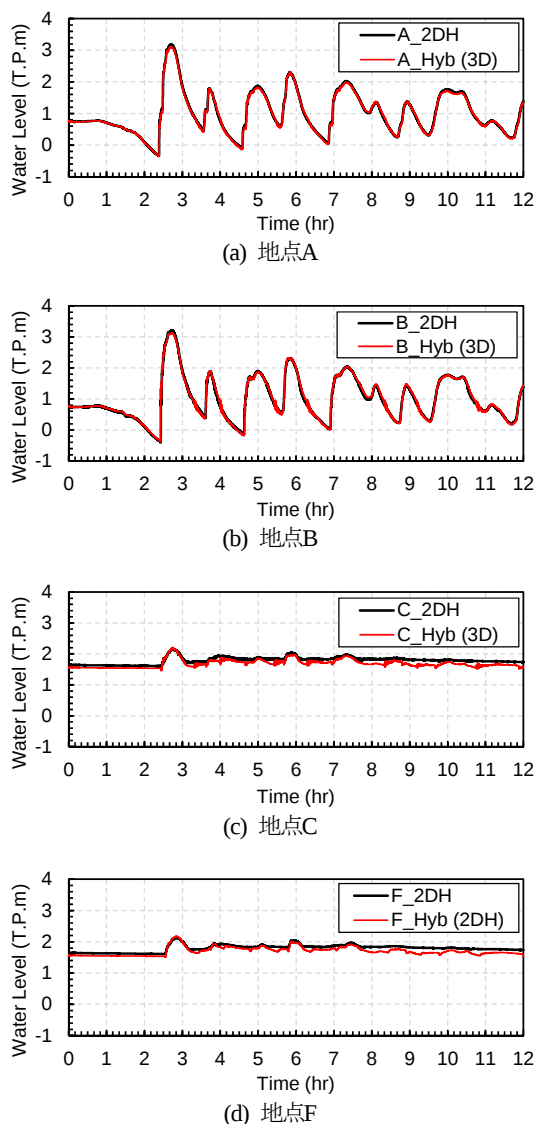


図-8 水位時系列の比較（平常時）

解析でほぼ同等の解析結果が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図-9に、図-3中の地点C、D、Eにおける塩分の鉛直分布の例を図-10および図-11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）で鉛直方向の塩分の分布が解析できていることがわかる（図-10 (a)および図-11 (a)）。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に多く存在していることがわかる（図-9、図-10 (b)および図-11 (b)）。さらに、平常時は渇水時よりも淀川流量が大きいいため、塩分が早く流下し、3地点の塩分がいずれも渇水時より小さくなっていることがわかる（図-10 (c)および図-11 (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

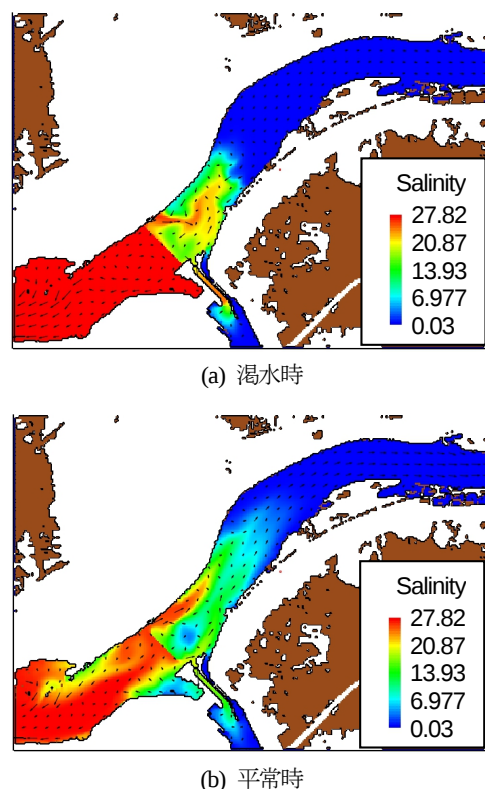


図-9 塩分解析結果の例（ハイブリッド解析の水面部分の解析結果・ともに $T = 3.0$ (hr)）

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14時間、ハイブリッドモデルで約38.5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。また、三次元解析領域の設定範囲により流動および塩分の挙動に違いが生じるかどうかについても確認しておく必要がある。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の大きさおよび範囲の設定を含め、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

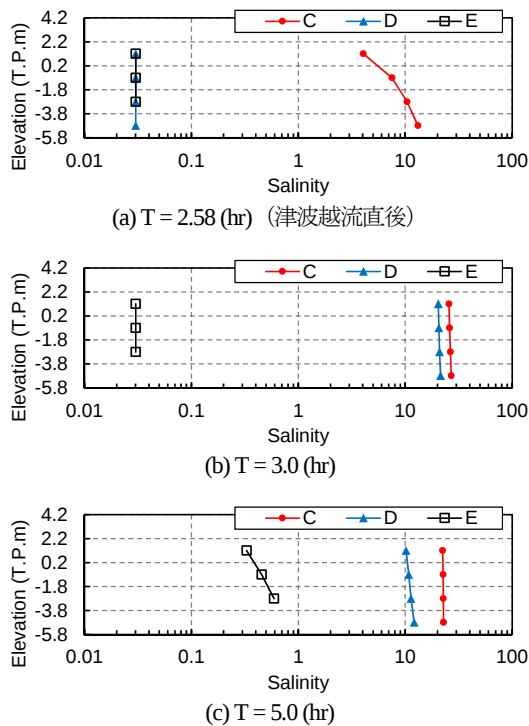


図-10 ハイブリッドモデルの三次元解析領域における塩分の鉛直分布の例（洪水時）

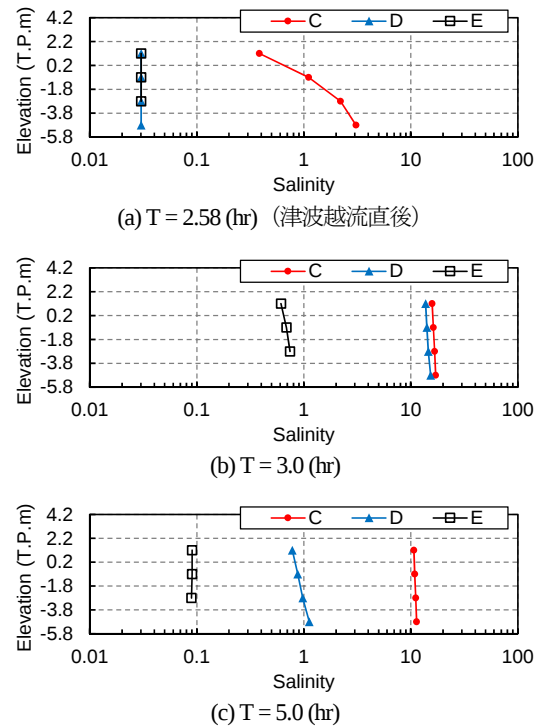


図-11 ハイブリッドモデルの三次元解析領域における塩分の鉛直分布の例（平常時）

津波発生時の津波遡上解析を行った。解析ケースは洪水時（淀川流量 $62 \text{ m}^3/\text{s}$ ）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きれない。また、三次元解析領域の設定範囲により流動および塩分の挙動に違いが生じるかどうかについても確認しておく必要がある。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の大きさおよび範囲の設定を含め、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巻, 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, 土木学会論文集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, 土木学会論文集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 of 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.
- 8) 吉川泰弘, 阿部孝章, 中津川誠, 船木淳悟: 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解析, 平成26年度土木学会北海道支部論文報告集第71号, B-33.

(2015. 9. 30受付)