

水工学シリーズ 21-A-6

2DH-3D解析を用いた都市域における 津波複合災害予測手法とその適用例

京都大学防災研究所 准教授

米山 望

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2021年8月

2DH-3D解析を用いた都市域における津波複合災害予測手法とその適用例

Prediction method for Tsunami complex disaster in urban area using 2DH-3D analysis and its applications

米山 望

Nozomu Yoneyama

1. はじめに

巨大津波が都市域に來襲すると多くの津波複合災害を引き起こす。津波複合災害とは本稿では津波遡上や津波氾濫が原因となって引き起こされた災害を指す。この災害をできるだけ正確に予測評価することが重要であることは言うまでもない。

津波は日本近海の海溝での地盤変動に伴う海面変動が海岸に到達したのち、都市域に來襲するが、津波波源から海岸までの広域津波伝播と海岸を越えて都市域に來襲する津波流動では現象が異なり、前者は主に波、後者は流れとなることから、それぞれ別の取り扱いが行われ、広域津波伝播は平面二次元解析、津波流動は三次元解析が用いられる。津波流動についても平面二次元解析が行われることも多いが、津波複合災害の予測評価では、都市域に來襲した津波が引き起こす被害を正確に予測するために、複雑な都市の地形や構造物の形状により三次元的に変化する流動を適切に評価必要があることから、三次元解析が望ましい。例えば、斜面を駆け上がる、または、駆け下りる流れを正確に解析したい場合や、衝突力を推定したい場合、また、以下で説明する、河川を遡上した塩分を含む津波が河川水との密度差により鉛直方向の運動を行う場合などは必ず三次元解析が必要である。

著者らはこれまで、平面二次元解析（以下、2DH解析）を用いた広域津波伝播解析を最初に行い、その結果から得られる水位や流速の値を三次元解析（以下、3D解析）に入力し、都市域や複雑な地形下における挙動解析を行ってきた[1]。この解析方法は、2DH解析から3D解析へ一方的に情報を与えることから、2DH-3D_One-Way解析と呼んでいる。しかし、2DH解析の時系列結果を3D解析に入力し続けるとその入力地点のすぐ内側の3D解析結果と2DH解析に基づく入力値の差が大きくなり計算が破綻することが分かった。その後、Pringleらが2DH解析と3D解析を同時に行い各計算ステップごとに相互の情報を交換しながら連動解析する2DH-3D_Two-Way解析手法を開発し[2]、さらに、ネスティング手法を適用した2DH解析（以下、2DHnest解析）と3D解析を連動させた2DHnest-3D_Two-Way解析を東北地方太平洋沖地震津波の釜石湾における津波挙動に適用しその妥当性を確認した[3]。

また、著者らは過去に、南海トラフ巨大地震津波が淀川に來襲し、淀川大堰を越えて塩水が押し寄せた際に、大堰直上流にある浄水場が取水停止し、飲料水などが供給できない事態を予測評価するため、2DH解析の時系列結果を3D密度流解析に入力する2DH-3Ddensity_One-Way解析で塩水遡上の挙動予測を行ったが、やはり、津波の第一波が淀川に侵入したあと大堰で反射し、再び三次元解析の計算境界に反射波が達した以降は計算が破綻し、24時間以上計算を続行する必要があったが、2時間しか解析できなかった[4]。そこで、Pringleらの2DHnest-3D_Two-Way解析手法に塩分挙動解析機能等を追加した2DHnest-3Ddensity_Two-Way解析モデル[2]を構築し、24時間以上の解析を可能にした[5]。

本稿では、3Ddensity解析および2DHnest解析の基礎式から解析の流れ、2DHnest-3Ddensity_Two-Way解析の方法について説明し、2DHnest-3Ddensity_Two-Way解析および2DH-3Ddrift_Two-Way解析の適用例について紹介する。

2. 2DHnest-3Ddensity_Two-Way 解析モデルの概要

2DHnest-3Ddensity_Two-Way解析モデルは、3D密度流解析を2DHnest解析と連動させ、両者を一体的に解析するものである。同モデルの詳細については、永島が博士論文に詳細に説明している[6]。ここでは、そのうちの、3Ddensity解析手法の概要、2DHnest解析手法の概要、3Ddensity解析と2DHnest解析の連動方法および2DH-3Ddensity_Two-Way解析の流れについて紹介する。

2.1 3Ddensity 解析手法の概要^[6]

3Ddensity解析手法は、著者ら[4]の三次元塩水挙動解析手法に基づくものであり、空間的に流体の密度分布がある非圧縮性流体を解析対象とする。本項では、3Ddensity解析手法の基礎方程式の導出、自由水面の取り扱いおよび3Ddensity解析の流れについて述べる。ここでは、塩分濃度による密度変化を対象とする。

2.1.1 基礎方程式

流体密度が変化する非定常流れの基礎方程式は、一般的に以下のように表される[7]。なお、 j に総和の規約を適用する。

- 連続方程式

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.1)$$

- 運動方程式 (RANS 方程式) ($i = 1, 2, 3$)

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \bar{\rho} G_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \bar{\rho} \overline{u_i' u_j'}) \quad (2.2)$$

ただし

$$\tau_{ij} = \bar{\rho} \nu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) \quad (2.3)$$

ここに、 ρ : 流体の密度、 u_i : 流速の各方向成分、 G_i : 単位質量あたりの外力の各方向成分、 p : 圧力、 τ_{ij} : 粘性応力テンソルの各成分、 ν : 動粘性係数、 δ_{ij} : クロネッカーのデルタ ($i = j$ のとき1, $i \neq j$ のとき0)、 $\bar{\quad}$: レイノルズ平均量、 $\tilde{\quad}$: ファーブル平均量、 $\prime \prime$: ファーブル平均量からの変動量である。なお、ファーブル平均は次式で定義される。

$$\tilde{u}_i \equiv \frac{\overline{\rho u_i}}{\bar{\rho}} \quad (2.4)$$

連続方程式(2.1)について、非圧縮性流体の場合は流体粒子の運動中にその密度は一定に保たれる、すなわち、

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j} = 0 \quad (2.5)$$

と表されるため、連続方程式(2.1)は次のように書き換えられる。

$$\frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.6)$$

運動方程式(2.2)中のレイノルズ応力項 $-\bar{\rho} \overline{u_i' u_j'}$ は、以下に示す標準 $k - \epsilon$ モデル[8]を用いて評価する。

$$-\bar{\rho} \overline{u_i' u_j'} = \bar{\rho} \nu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{ij} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{\rho} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - \bar{\rho} \epsilon \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{\rho} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \bar{\rho} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.9)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.10)$$

$$P_k \equiv -\bar{\rho} \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \cong \frac{1}{2} \bar{\rho} \nu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad (2.11)$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \quad C_{\epsilon 1} = 1.45, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09 \quad (2.12)$$

ここに、 $k (\equiv \overline{\rho u_j' u_j'} / 2\bar{\rho})$: 乱流エネルギー、 $\epsilon (\equiv \nu \overline{\rho u_i' u_i' u_j' u_j'} / \bar{\rho})$: 乱流エネルギー散逸率、 ν_t : 渦動粘性係数、 P_k : 乱流エネルギーの生成項である。

式(2.3)および式(2.7)より、運動方程式(2.2)は次のように書き換えられる。

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \bar{\rho} G_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{\rho} (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (2.13)$$

ただし、式(2.13)において $\bar{p} + \frac{2}{3} \bar{\rho} k$ を改めて \bar{p} としている。

一方、非定常流れにおける塩分の移流拡散方程式は、一般的に次のように表される。

- 塩分の移流拡散方程式

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{S} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \bar{S}}{\partial x_j} - \overline{S' u_j'} \right) \quad (2.14)$$

ここに、 S : 塩分、 α : 塩分の分子拡散率 (= 2.0×10^{-9} [m²/s]) [9]、 $'$: レイノルズ平均量からの変動量である。式(2.14)中の乱流拡散項は次式で評価する。

$$-\overline{S' u_i'} = \frac{\nu_t}{S_{ct}} \frac{\partial \bar{S}}{\partial x_i} \quad (2.15)$$

ここに、 S_{ct} : 乱流シュミット数であり、本研究では細田[10]の研究を参考に $S_{ct} = 1.0/1.2$ とした。

これより、式(2.14)は次のように書き換えられる。

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -\bar{S} \cdot \tilde{u}_j + \left(\alpha + \frac{\nu_t}{S_{ct}} \right) \frac{\partial \bar{S}}{\partial x_j} \right\} \quad (2.16)$$

流体密度は、次式に基づいて計算する。

- 流体温度、塩分と流体密度の関係式

$$\bar{\rho} = 1024.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 + (0.802 - 0.002T)(\bar{S} - 35.0) \quad (2.17)$$

ここに、 T : 流体の温度である。

また、 \tilde{u}_i と \bar{u}_i の関係は次のようになる。

$$\tilde{u}_i \equiv \frac{\overline{\rho u_i}}{\bar{\rho}} = \frac{\bar{\rho} \cdot \bar{u}_i + \overline{\rho' u_i'}}{\bar{\rho}} = \bar{u}_i + \frac{\overline{\rho' u_i'}}{\bar{\rho}} = \bar{u}_i - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\nu_t}{S_{ct}} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i} \quad (2.18)$$

以上より、3Ddensity解析手法の基礎方程式をまとめると以下のとおりとなる。

- 連続方程式

$$\frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.19)$$

- 運動方程式 ($i = 1, 2, 3$)

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \bar{\rho} G_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{\rho} (v + v_t) \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (2.20)$$

- 乱流評価式 (標準 $k - \epsilon$ モデル)

$$\frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{\rho} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - \bar{\rho} \epsilon \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{\rho} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{\epsilon 1} P_k \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \bar{\rho} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.22)$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.23)$$

$$P_k = \frac{1}{2} \bar{\rho} v_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad (2.24)$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \quad C_{\epsilon 1} = 1.45, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09 \quad (2.25)$$

- 塩分の移流拡散方程式

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -\bar{S} \cdot \tilde{u}_j + \left(\alpha + \frac{v_t}{S_{ct}} \right) \frac{\partial \bar{S}}{\partial x_j} \right\} \quad (2.26)$$

$$\alpha = 2.0 \times 10^{-9}, \quad S_{ct} = 1.0/1.2 \quad (2.27)$$

- 流体温度, 塩分と流体密度の関係式

$$\bar{\rho} = 1024.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 + (0.802 - 0.002T)(\bar{S} - 35.0) \quad (2.28)$$

- \tilde{u}_i と \bar{u}_i の関係式 ($i = 1, 2, 3$)

$$\tilde{u}_i = \bar{u}_i - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{v_t}{S_{ct}} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i} \quad (2.29)$$

2.1.2 自由表面の取り扱い

(1) 自由表面の表現方法

自由表面の取り扱いにVOF (Volume of Fluid) 法[11]を用いている。VOF法では、解析領域中の流体の存在を式(2.30)で定義される計算格子の流体充填率 F で表し、自由表面の移動は計算格子の流体充填率の変化として表される。

- 計算格子の流体充填率

$$F = \frac{\text{計算格子中の流体の体積}}{\text{計算格子の空隙部分の体積}} \quad (2.30)$$

流体充填率 F および周囲の計算格子の状況により、各計算格子を以下の4種類に分類する (図 2.1 参照)。

- ① 空セル：空隙部分があるが流体が存在しない計算格子
- ② 表面セル：内部に自由表面が存在する計算格子
- ③ 内部セル：空隙部分が完全に流体で満たされている計算格子
- ④ 物体セル：空隙部分がなく流体が入り込まない計算格子

上記のうち、表面セルにおいては、周囲の計算格子の流体量が最も多い面に流体を配置し、図 2.2に示すように自由表面はその面と平行になるように設定する。

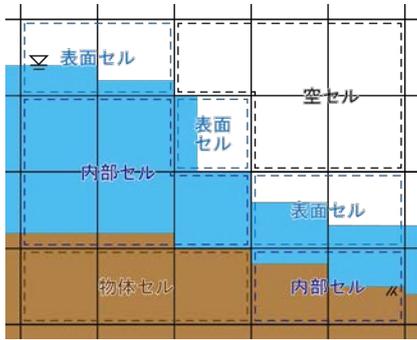


図 2.1 計算格子の分類^[6]

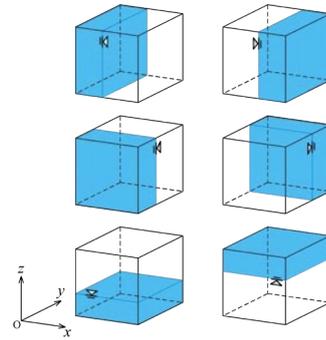


図 2.2 表面セルにおける自由表面の向きの設定^[6]

2.1.3 3Ddensity 解析の流れ

3Ddensity解析の流れは以下の通りである（図2.3参照）。

- ① 入力データを読み込む。
- ② 流速と圧力の境界条件を設定する。
- ③ SMAC法に基づき、時刻 $t + \Delta t$ における流速 u_t^{n+1} および圧力 p^{n+1} を計算する。
- ④ 時刻 $t + \Delta t$ における乱流エネルギー k^{n+1} ，乱流エネルギー散逸率 ϵ^{n+1} ，渦動粘性係数 ν_t^{n+1} を計算する。
- ⑤ 時刻 $t + \Delta t$ における流体充填率 F^{n+1} ，塩分 S^{n+1} ，流体密度 ρ^{n+1} を計算する。
- ⑥ 計算格子を分類する。
- ⑦ この時点で計算終了時刻であれば計算を終了し，そうでなければ②に戻る。

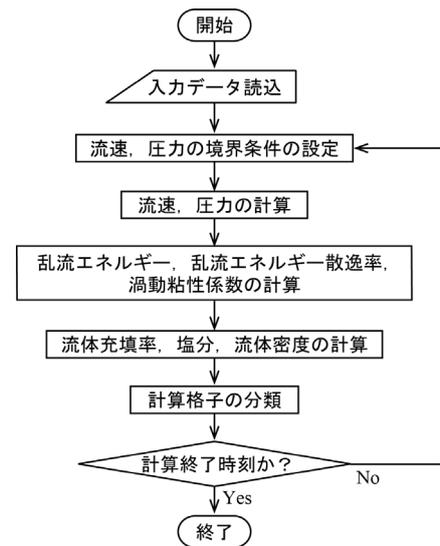


図 2.3 3Ddensity 解析の流れ^[6]

2.2 2DHnest 解析の概要^[5]

2DHnest解析には、非線形長波理論に基づくネスティング手法を適用した2DH解析手法を用いる。本項では、2DHnest解析の基礎方程式，ネスティング手法および広域津波伝播解析の流れについて述べる。

2.2.1 基礎方程式

非線形長波理論に基づく2DH解析手法の基礎方程式を以下に示す。

- 連続方程式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

- 運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{NM}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{7/3}} = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2 N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{7/3}} = 0$$

ここに、 η : 水位、 $M (= UD)$ 、 $N (= VD)$: 流量fluxの各方向成分、 U 、 V : 流速の各方向成分、 $D (= h + \eta)$: 全水深、 h : 静水深、 g : 重力加速度、 n : マニングの粗度係数である。

2.2.2 ネスティング手法

(1) 基本的な考え方

2DHnest解析では、広大な計算領域を効率よくかつ必要に応じて詳細に解析するために、計算領域の一部の計算格子間隔（以下単に、格子間隔）を細かくしている。格子間隔の異なる複数の計算領域において同時に解析を進めるためには、その接続部分において境界条件を適切に設定する必要がある。

格子間隔の異なる計算領域間の物理量の受け渡しの基本的な考え方について、後藤ら[12]は以下のように述べている。

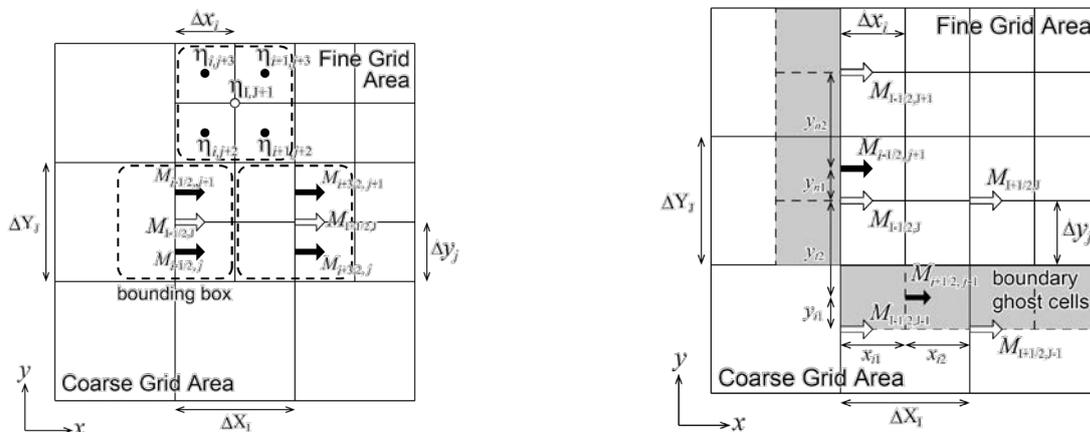
- 境界付近の水位は、計算格子の小さな領域（Fine Grid Area）（以下、FGA）から計算格子の大きな領域（Coarse Grid Area）（以下、CGA）に引き渡される。
- 境界付近の流量は、CGA から FGA に引き渡される。

これより、格子間隔の異なる複数の計算領域において解析を行うときの解析の順序は、次のようにする必要はある。

- 水位を計算する際には、FGA における解析を先に、CGA における解析を後に行う。
- 流量を計算する際には、CGA における解析を先に、FGA における解析を後に行う。

なお、本モデルのネスティング手法は後藤らの考え方をベースに、以下の様は特徴を加えている。

- 後藤らの考え方に加えて、FGA の解析結果を CGA に再び反映できるように、計算領域の大きな領域における境界条件として水位だけでなく流量も引き渡す。
- 後藤らのネスティング手法では、格子間隔の比率は奇数とし、FGA における水位および流量の計算時刻の一部は必ず CGA における水位および流量とそれぞれ一致するようにしているが、本解析モデルにおけるネスティング手法では、格子間隔の比率は奇数に限らず、格子間隔の異なる計算領域間で物理量を適宜補間して受け渡す。



(a) FGAから CGA への水位および流量fluxの引き渡し (b) CGAから FGA への流量fluxの引き渡し

図2.4 格子間隔の異なる計算領域間の物理量の受け渡し [6]

(2) 格子間隔の異なる計算領域間の物理量の受け渡し

本節では、 (x,y) に対応する離散化量を表す添字として、CGAの物理量には (I,J) を、FGAの物理量には (i,j) をそれぞれ用いることとし、図2.4に示すようにFGAの境界面 $(i-1/2,j)$ がCGAの境界面 $(I-1/2,J)$ に接しているとして、格子間隔の異なる計算領域間の物理量の受け渡し方法について説明する。

① FGA から CGA へ

CGAの境界条件として、FGAから水位および流量fluxを引き渡す。このとき、CGAの物理量は、その定義点を中心とする計算格子と同じ大きさの bounding box (辺を除く、図2.4(a)参照) を考え、それに含まれるFGAの物理量の平均値とする。

② CGA から FGA へ

FGAの境界条件として、CGAから流量fluxを引き渡す。このとき、FGAの境界の流量fluxは、近傍のCGAの流量fluxを基に内挿して計算する。

(3) 格子間隔の異なる計算領域間の時間的な接続方法

格子間隔の異なる計算領域では一般的に計算時間刻みが異なるため、両方の計算領域において必ずしも同時刻に水位または流量fluxが計算されているとは限らない。そのため、一方の計算領域において境界条件として必要となる物理量が他方の計算領域において計算されていない場合には、その物理量を何らかの方法により計算する必要がある。格子間隔の異なる計算領域の数を2、CGAの計算時間刻みを ΔT 、FGAの計算時間刻みを Δt 、これらの比率を $\Delta t/\Delta T = 1/2$ とし、両方の計算領域の流量fluxが時刻 $t - \frac{1}{2}\Delta T$ で計算されているとする(図2.5参照)と、一方の計算領域において境界条件として必要となる物理量が他方の計算領域において計算されていないことが、計算領域の大きな領域において水位および流量fluxを計算する1ステップの間に二度発生する。それぞれの時間的な接続方法を以下に述べる。

① CGA における時刻 t の水位の計算

CGAにおいて時刻 t の水位を計算するとき、計算領域を接続するための境界条件として、FGAにおける時刻 t の水位が必要であるが、この値はまだ計算されていない。そのため、FGAにおける時刻 $t - \frac{1}{4}\Delta T$ の水位を基に(2)①の方法でCGAの時刻 $t - \frac{1}{4}\Delta T$ の水位を計算し、次式により計算される時刻 t の水位をCGAにおける境界条件とする。

$$\eta_{i,j}^n = \eta_{I,J}^{n-1/4} - \frac{1}{4} \left\{ \frac{\Delta T}{\Delta X_I} (M_{I+1/2,J}^{n-1/2} - M_{I-1/2,J}^{n-1/2}) + \frac{\Delta T}{\Delta Y_J} (N_{I,J+1/2}^{n-1/2} - N_{I,J-1/2}^{n-1/2}) \right\}$$

② FGA における時刻 t の流量 flux の計算

FGAにおいて時刻 t の流量fluxを計算するとき、計算領域を接続するための境界条件として、CGAにおける時刻 t の流量fluxが必要となる。この値は、計算格子の大きな計算領域における時刻 $t - \frac{1}{2}\Delta T$ および時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の流量fluxを基に、次式により計算する。時刻 t の流量fluxを(2)②の方法でFGAに引き渡し、境界条件とする。

$$M_{I-1/2,J}^n = \frac{1}{2} (M_{I-1/2,J}^{n-1/2} + M_{I-1/2,J}^{n+1/2})$$

2.2.3 2DHnest 解析の流れ

2DHnest解析の流れを以下に示す(図2.5参照)。なお、ここでの格子間隔の異なる計算領域の数および各領域における計算時間刻みは2.2.2(3)と同様とする。

① FGAにおいて、時刻 $t - \frac{1}{4}\Delta T$ の水位 $\eta^{n-1/4}$ を計算する。

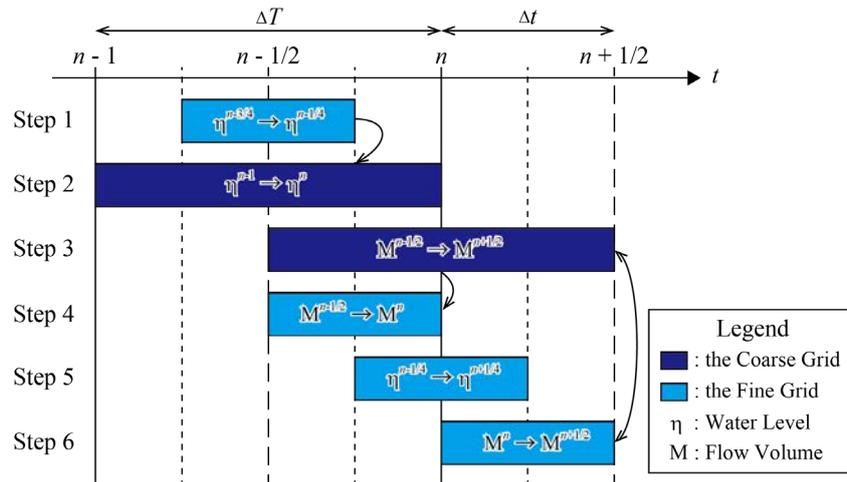


図 2.5 2DHnest 解析の流れ^[6]

- ② CGAにおいて、時刻 t の水位 η^n を計算する。このときの水位の境界条件は、2.2.2(3)①の方法により設定する。
- ③ CGAにおいて、時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の流量flux $M^{n+1/2}$ を計算する。
- ④ FGAにおいて、時刻 t の流量flux M^n を計算する。このときの流量fluxの境界条件は、2.2.2(3)②の方法により設定する。
- ⑤ FGAにおいて、時刻 $t + \frac{1}{4}\Delta T$ の水位 $\eta^{n+1/4}$ を計算する。
- ⑥ FGAにおいて、時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の流量flux $M^{n+1/2}$ を計算する。このときの境界条件は、CGAにおける流量fluxを基に2.2.2(2)②の方法により設定する。
- ⑦ CGAとFGAの接続部において、2.2.2(2)①の方法により、FGAにおける時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の流量flux $M^{n+1/2}$ をCGAに反映させる。
- ⑧ ①に戻る。

2.3 3Ddensity 解析と 2DHnest 解析の連動方法^[5]

3Ddensity解析と2DHnest解析は、解析領域の次元および算出される物理量の数や時刻が異なる。3Ddensity解析では、水位や流速、乱流エネルギー、塩分などの物理量が計算され、物理量は鉛直方向に分布を有している。また、これらの物理量は同時刻に算出される。一方、2DHnest解析では、水位および水平方向流速のみが計算され、水平方向流速は鉛直方向に一様である。また、Leap-Frog法を用いているため、水位と流速の算出時刻が異なる。このため、3Ddensity解析と2DHnest解析を連動させるためには、三次元解析領域（以下、3D領域）と平面二次元解析領域（以下、2DH領域）の接続部において、物理量の鉛直分布の有無と算出時刻を考慮し、双方向に適切に物理量を受け渡す必要がある。本項では、両解析領域の接続部における物理量の受け渡し方法と時間的な接続方法について述べる。

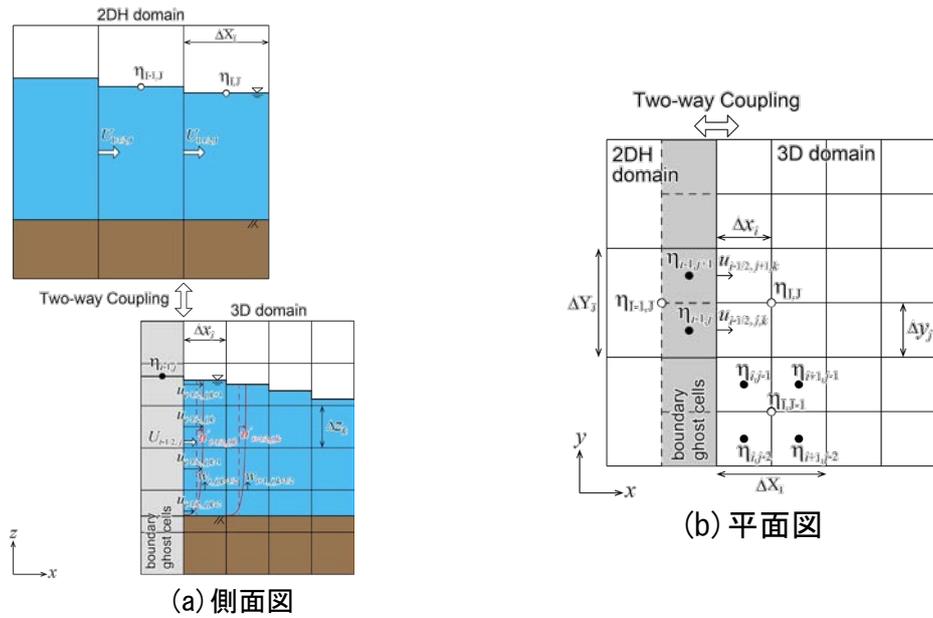


図 2.6 3Ddensity 解析と 2DHnest 解析の連動方法^[6]

2.3.1 物理量の受け渡し

本節では、 (x, y) に対応する離散化量を表す添字として、3D領域の物理量には (i, j) を、2DH領域の物理量には (I, J) をそれぞれ用いることとし、図 2.6に示すように3D領域の境界面 $(i - 1/2, j)$ が2DH領域の境界面 $(I - 1/2, J)$ に接しているとして、両解析領域間の物理量の受け渡し方法を説明する。

(1) 3D 領域から 2DH 領域へ

- ① 流速：次式に示すように、2DH 領域の境界面 $(I - 1/2, J)$ における流量 flux $M_{i-1/2,j}$ に 3D 領域の境界面における流量 flux の合計値を設定する。

$$M_{i-1/2,j} = \sum_k (u_{i-1/2,j,k} \cdot \gamma_{i-1/2,j,k}^a \cdot F_{i,j,k} \cdot \Delta z_k)$$

- ② 水位：3D 領域から 2DH 領域へ水位を受け渡す際には、次式に示すように、2DH 領域の計算格子 (I, J) における水位 $\eta_{I,J}$ に当該計算格子に含まれる 3D 領域の水位 $\eta_{i,j}$ の平均値を設定する。

$$\eta_{I,J} = \frac{\sum_{(i,j) \in (I,J)} \eta_{i,j}}{\sum_{(i,j) \in (I,J)}$$

(2) 2DH 領域から 3D 領域へ

- ① 流速：3D 領域の境界面 $(i - 1/2, j, k)$ における流速 $u_{i-1/2,j,k}$ を以下のように設定する。

$$u_{i-1/2,j,k} = U_{i-1/2,j} + u'_{i-1/2,j,k}$$

ここに、 $U_{i-1/2,j}$ ：3D 領域の境界面 $(i - 1/2, j)$ における断面平均流速， $u'_{i-1/2,j,k}$ ：3D 領域の境界面 $(i - 1/2, j)$ における流速の断面平均流速からの変動量であり、それぞれ以下で与えられる。

$$U_{i-1/2,j} = U_{I-1/2,J} = \frac{M_{I-1/2,J}}{D_{I-1/2,J}}$$

$$u'_{i-1/2,j,k} = u'_{i+1/2,j,k} \equiv u_{i+1/2,j,k} - \sum_k u_{i+1/2,j,k}$$

一方、3D領域の境界の計算格子 (i, j, k) における鉛直方向流速 $w_{i,j,k-1/2}$ は、隣接する計算格子の鉛直方向流速と同じとする。

$$w_{i,j,k-1/2} = w_{i+1,j,k-1/2}$$

② 水位：3D 領域の外側に計算格子一つ分の仮想境界格子を設定し、その位置の水位 $\eta_{i-1,j}$ を次式により計算する。

$$\eta_{i-1,j} = \frac{\Delta X_I + \Delta x_{i-1}}{\Delta X_{I-1} + \Delta X_I} \eta_{I-1,j} + \frac{\Delta X_{I-1} - \Delta x_{i-1}}{\Delta X_{I-1} + \Delta X_I} \eta_{I,j}$$

水位 $\eta_{i-1,j}$ を基に、次のように仮想境界格子の流体充填率 $F_{i-1,j,k}$ を計算する。

$$F_{i-1,j,k} = \begin{cases} 0 & (\eta_{i-1,j} \leq z_{k-1/2}) \\ (\eta_{i-1,j} - z_{k-1/2})/\Delta z_k & (z_{k-1/2} < \eta_{i-1,j} < z_{k+1/2}) \\ 1 & (\eta_{i-1,j} \geq z_{k+1/2}) \end{cases}$$

(3) 3D 領域のみで定義される物理量の設定

乱流エネルギー、乱流エネルギー散逸率および塩分は3D領域のみで定義され、水位等とともに仮想境界格子において値を設定する必要がある。仮想境界格子における乱流エネルギーおよび乱流エネルギー散逸率は、隣接する流体セルの値と等しいとする。また、仮想境界格子における塩分は、次式に示すように、流入時には想定する流入塩分の値 (S_{in}) を、流出時には隣接する流体セルの塩分と同じ値を設定する。

$$S_{i-1,j,k} = \begin{cases} S_{in} & (u_{i-1/2,j,k} \geq 0) \\ S_{i,j,k} & (u_{i-1/2,j,k} < 0) \end{cases}$$

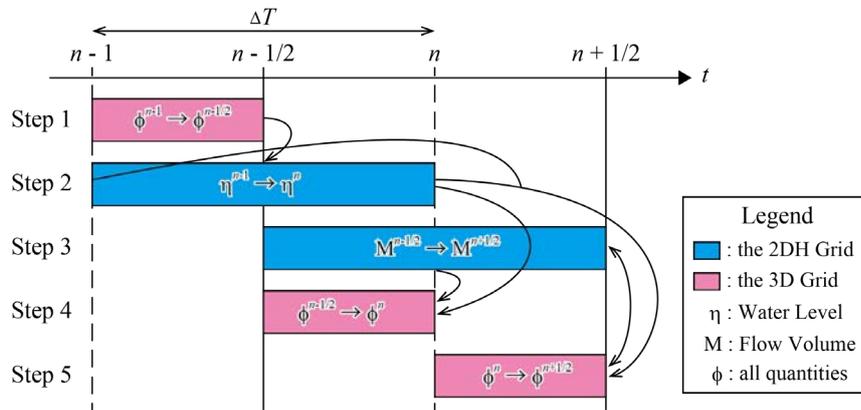


図 2.7 2DH 領域と 3D 領域の接続^[6]

2.3.2 時間的な接続

2DH領域における格子間隔の異なる計算領域間の接続 (2.2.2(2)) と同様に、2DH領域と3D領域を接続する際にも、両方の解析領域において必ずしも同時刻に水位または流量が計算されているとは限らず、その場合には物理量を何らかの方法により計算する必要がある。

図 2.7 に示すように、2DH領域 (計算領域は1つ) および3D領域における計算時間刻みをそれぞれ ΔT および Δt 、これらの比率を $\Delta t/\Delta T = 0.5$ とし、両方の解析領域の流速が時刻 $t - \frac{1}{2}\Delta T$ で計算されているとする。このとき、一方の解析領域において境界条件として必要となる物理量が他方の解析領域において計算されていないことが、2DH領域において水位および流量を計算する1ステップの間に三度発生する。一度目は、2DH領域において時刻 t の水位を計算するとき、二度目は、3D領域において時刻 t の物理量を計算するとき、三度目は、3D領域において時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の物理量を計算するときである。それぞれの時間的な接続の方法を以下に述べる。

(1) 2DH 領域における時刻 t の水位

水位の境界条件を設定するために3D領域における時刻 t の水位が必要であるが、この値はまだ計算されていない。そのため、3D領域における時刻 $t - \frac{1}{2}\Delta T$ の水位を基に2.3.1(1)②の方法により2DH領域の水位 $\eta^{n-1/2}$ を計算し、次式により時刻 t の水位 η^n を計算して、2DH領域の水位の境界条件とする。

$$\eta_{i,j}^n = \eta_{i,j}^{n-1/2} - \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta T}{\Delta X_i} (M_{i+1/2,j}^{n-1/2} - M_{i-1/2,j}^{n-1/2}) + \frac{\Delta T}{\Delta Y_j} (N_{i,j+1/2}^{n-1/2} - N_{i,j-1/2}^{n-1/2}) \right\}$$

(2) 3D 領域における時刻 t の物理量

境界条件を設定するために2DH領域における時刻 t の水位および流速が必要である。水位については、2DH領域において既に計算されているため、2.3.1(2)②の方法により3D領域における水位を計算できる。一方、流速については、2DH領域における時刻 $t - \frac{1}{2}\Delta T$ および時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の流量fluxを基に時刻 t の流量fluxを計算し、2.3.1(2)①の方法により3D領域の流速を計算して境界条件とする。

$$M^n = \frac{1}{2}(M^{n-1/2} + M^{n+1/2})$$

(3) 3D 領域における時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の物理量

3D領域において時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の物理量を計算するとき、3D領域における境界条件として時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の水位および流速が必要となる。2DH領域において時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の流速は既に計算されているため、2.3.1(2)①の方法により3D領域の流速を計算できる。一方、2DH領域において時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の水位は計算されていない。そのため、2DH領域における時刻 $t - \Delta T$ および時刻 t の水位を基に次式により時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の水位を計算し、2.3.1(2)②の方法により3D領域の水位を計算して境界条件とする。

$$\eta_{i,j}^{n+1/2} = 2\eta_{i,j}^n - \eta_{i,j}^{n-1}$$

2.4 2DHnest-3Ddensity_Two-Way 解析の流れ^[4]

2DHnest-3Ddensity_Two-Way解析の流れを以下に示す（図2.8参照）。なお、ここでは、3Ddensity解析を行う3D領域の外側に2DH解析を行う格子間隔の異なる2DH領域が2つあり、接続する計算領域間の計算時間刻みの比をともに2として説明する。

① 3D領域において、時刻 $t - \frac{1}{2}\Delta T$ の物理量 $\phi^{n-1/2}$ を計算する。

② 2DH領域のFGAにおいて、時刻 $t - \frac{1}{4}\Delta T$ の水位 $\eta^{n-1/4}$ を計算する。このときの水位の境界条件は、2.3.2(1)の方法により設定する。

③ 2DH領域のCGAにおいて、時刻 t の水位 η^n を計算する。このときの水位の境界条件は、2.2.2(3)①の方法により設定する。

④ 2DH領域のCGAにおいて、時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の流量flux $M^{n+1/2}$ を計算する。

⑤ 2DH領域のFGAにおいて、時刻 t の流量flux M^n を計算する。このときの流量fluxの境界条件は、2.2.2(3)②の方法により設定する。

⑥ 3D領域において、時刻 $t - \frac{1}{4}\Delta T$ の物理量 $\phi^{n-1/4}$ を計算する。このときの境界条件は、2.3.2(2)の方法により設定する。

⑦ 3D領域において、時刻 t の物理量 ϕ^n を計算する。

このときの境界条件は、2.3.2(3)の方法により設定する。さらに、2.3.1(1)①の方法により、3D領

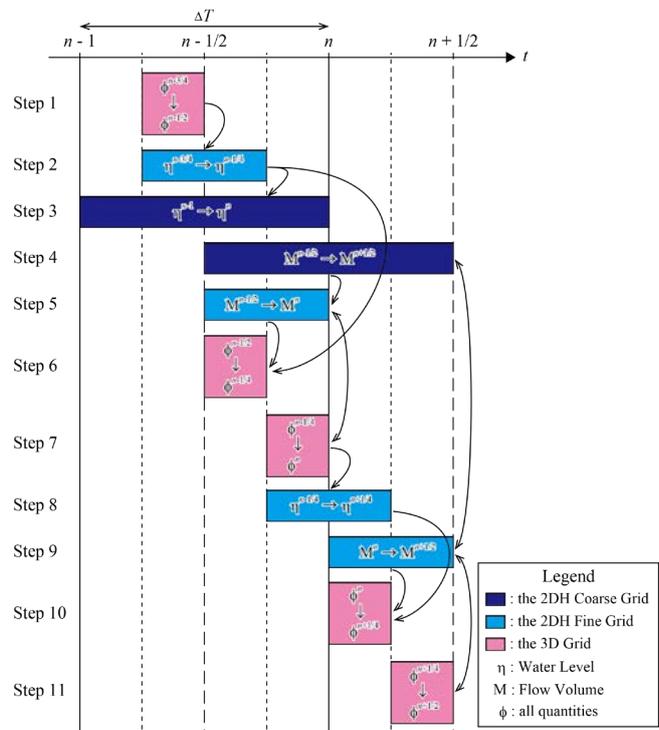


図2.8 2DHnest-3Ddensity_Two-Way 解析の流れ^[6]

域において計算された時刻 t の流速を2DH領域のFGAに反映させる。

- ⑧ 2DH領域のFGAにおいて、時刻 $t + \frac{1}{4}\Delta T$ の水位 $\eta^{n+1/4}$ を計算する。このときの境界条件は、2.3.2(1)の方法により設定する。
- ⑨ 2DH領域のFGAにおいて、時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の流量flux $M^{n+1/2}$ を計算する。さらに、2.2.2(2)①の方法により、計算された流量fluxを2DH領域のCGAに反映させる。
- ⑩ 3D領域において、時刻 $t + \frac{1}{4}\Delta T$ の物理量 $\phi^{n+1/4}$ を計算する。このときの境界条件は、2.3.2(2)の方法により設定する。
- ⑪ 3D領域において、時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の物理量 $\phi^{n+1/2}$ を計算する。このときの境界条件は、2.3.2(3)の方法により設定する。さらに、2.3.1(1)①の方法により、3D領域において計算された時刻 $t + \frac{1}{2}\Delta T$ の流速を2DH領域のFGAに反映させる。
- ⑫ ①に戻る。

3. 2DHnest-3Ddensity_Two-Way 解析の適用例

以上説明した2DHnest-3Ddensity_Two-Way解析手法を淀川大堰周辺における津波来襲時の塩分遡上解析に適用した例を紹介する。この解析は、上述したように、南海トラフ巨大地震津波が淀川に來襲し、淀川大堰を越えて塩水が押し寄せた場合、大堰直上流にある浄水場が取水停止し、飲料水や工業用水などが供給できない事態を予測評価するため行ったものである。この中では、全体を2DHnest解析した場合と、2DHnest-3Ddensity_Two-Way解析した場合の水位解析結果の比較も行っている。

3.1 解析領域^[5]

解析データは、内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」[13]（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基に設定した。広域津波伝播解析を行う2DH領域は、図 3.1に示すように、波源から淀川に近づくにつれて格子間隔が小さくなるように設定した。格子間隔が最も大きい解析領域の境界条件は、北端を固定端、それ以外を自由端とした。3Ddensity解析を行う3D領域は、淀川大堰の周辺域に設定した。

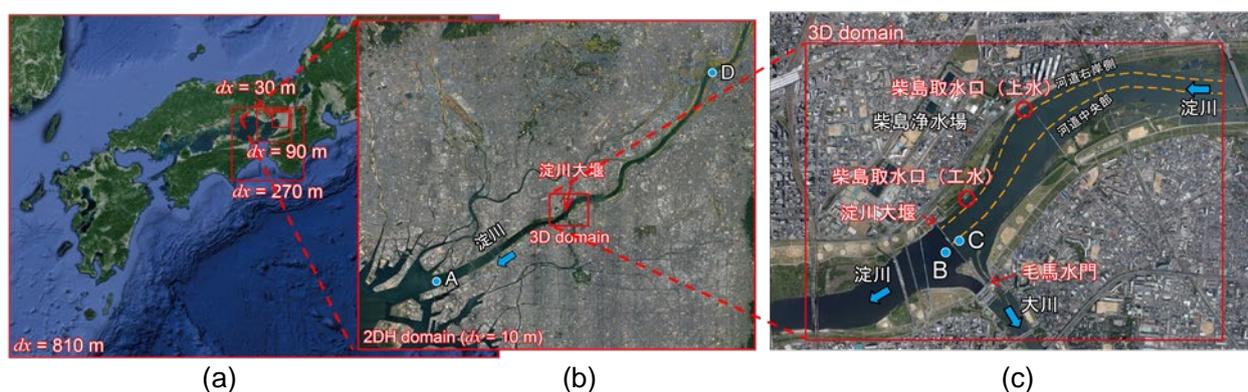


図 3.1 解析対象領域^[5]

(画像 ©2017 CNES / Airbus, Digital Earth Technology, DigitalGlobe, Landsat / Copernicus, 地図データ ©2017 Google, ZENRIN)

津波断層モデルは、検討会において想定されている南海トラフ巨大地震の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[13]を用いた。解析対象とする淀川流量は、湧水時に想定される最小の流量である62 m³/sおよび平水時の代表的な流量である196 m³/sとした。初期潮位は大阪湾の

朔望平均満潮位であるT.P.+0.9 mとし、初期の塩分は、淀川大堰下流側は27.82（実用塩分，以下同様）を、淀川大堰上流側は0.03をそれぞれ一様に設定した[3]。解析ケースをまとめて表-1に示す。各ケースについて淀川の定常状態を作成し、それを初期条件として津波解析を実施した。

表-1 解析ケース^[5]

ケース名	淀川流量 (m ³ /s)	3D領域の有無	3D領域の 格子間隔(m)	
			水平方向	鉛直方向
Case 1	62	なし	—	—
Case 2		あり	10	2
Case 3		あり	10	1
Case 4		あり	5	1
Case 5	196	なし	—	—
Case 6		あり	10	2
Case 7		あり	10	1
Case 8		あり	5	1

3.2 解析結果と考察^[5]

地点A～D（図 3.1(c) 参照）におけるCase 1～4の水位の時間変化を図 3.2に、塩水挙動の解析結果の例として水面および淀川大堰上流部の河道右岸側および河道中央部の縦断面の塩分の分布を図 3.3に、柴島取水口（工水）および柴島取水口（上水）における塩分の時間変化を図 3.4にそれぞれ示す。なお、図 3.3において、縦断面は水平方向に対して鉛直方向を10倍に拡大して表示している。Case 5～8についても同様に、解析結果を図 3.5～図 3.7に示す。

3.2.1 淀川流量 62 m³/s

Case 1～4について、津波第一波は地震発生後約2時間30分で淀川大堰に到達し、淀川大堰を越えた津波は地震発生後約3時間20分で地点D（河口から約26 km地点）にまで到達していることがわかる。

①水位の時間変化

水位の時間変化を比較すると、Case 2～4の結果はCase 1の結果と概ね一致し、2DH領域と3D領域の境界において反射波は発生していないことから、2DH領域と3D領域の間の物理量の受け渡しは適切に行われていると考えられる。また、3D領域において塩分の空間分布が解析できていることがわかる。

②塩分の時間変化

取水口における塩分の時間変化を比較すると、柴島取水口（工水）では全ケースで概ね一致しているのに対し、柴島取水口（上水）では塩分時間変化の傾向は似ているものの、塩分の到達時刻および最大値に差が生じている。一般に、格子間隔が異なると、離散化式の計算格子間距離が異なるため流動にも差異が生じる。また、解析では塩分は計算格子の中で均一に存在すると仮定するため、ある計算格子に塩分が流入すると次の計算ステップでは隣接する計算格子に塩分が流入することになり、格子間隔が粗いほど計算1ステップで塩分が伝わる距離が長くなる。淀川大堰直上流は淀川大堰を越流した津波と淀川の流れにより複雑な三次元の流れが生じる箇所であり、格子間隔と流動や塩分の移流拡散の間に明確な関係性を見出すことは難しいが、柴島取水口（上水）が位置する右岸側では淀川大堰を越流した津波による上流向きの流れが格子間隔によりわずかに異なり、Case 2で最も大きく算定され、次いでCase 4、Case 3の順となり、これに伴い柴島取水口（上水）における塩分の到達時刻および最大値に差が現れたと考えられる。

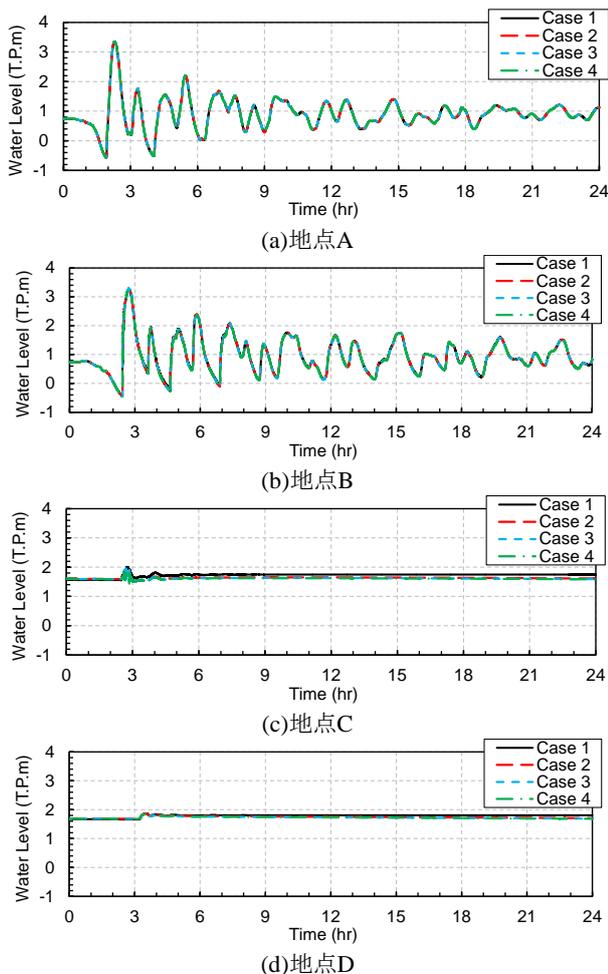


図 3.2 水位の比較 (Case 1~4) [5]

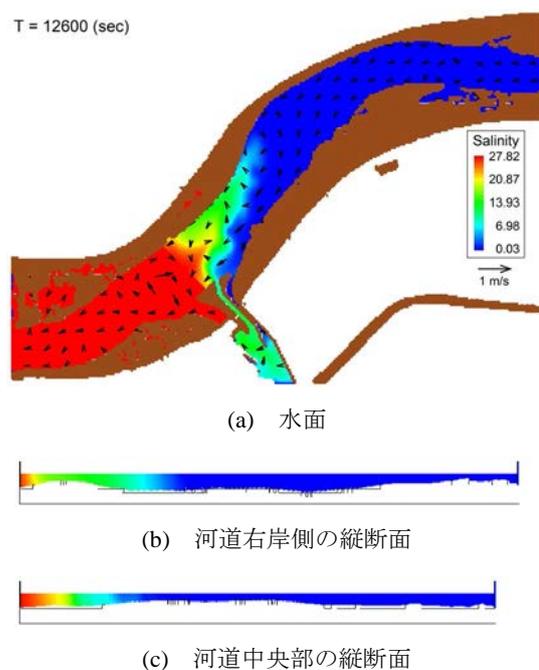


図 3.3 塩分の解析結果 (Case 2 の例) [5]

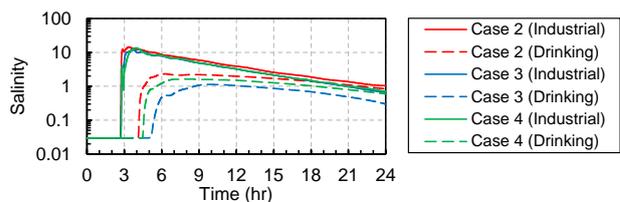


図 3.4 柴島取水口における塩分の比較 (Case 2~4) [5]

3.2.2 淀川流量 196 m³/s

Case 5~8について、淀川大堰を越えた津波第一波は、Case 1~4と同様に地震発生後約3時間20分で河口から約26 km地点にまで到達していることがわかる。

①水位の時間変化

水位の時間変化を比較すると、Case 6~8の結果はCase 5の結果とほぼ一致し、2DH領域と3D領域の境界において反射波は発生していないことから、2DH領域と3D領域の間の物理量の受け渡しが適切に行われていると言える。また、3D領域において塩分の空間分布が解析できていることがわかる。

②塩分の時間変化

取水口における塩分の時間変化を比較すると、柴島取水口（工水）では塩分の到達時刻は全ケースで概ね一致しているものの、最大値および低減の様子が異なる。柴島取水口（上水）においては、Case 6では塩分が到達しているのに対しCase 7およびCase 8では塩分は到達していない。これらの差は、Case 2~4と同様に、格子間隔による三次元的な流動および塩分の移流拡散の差異に起因し、右岸側ではCase 6においてCase 7およびCase 8よりも淀川大堰を越流した津波による上流向きの流れがやや大きく算定されたため、取水口地点における塩分の時系列に差が現れたと考えられる。

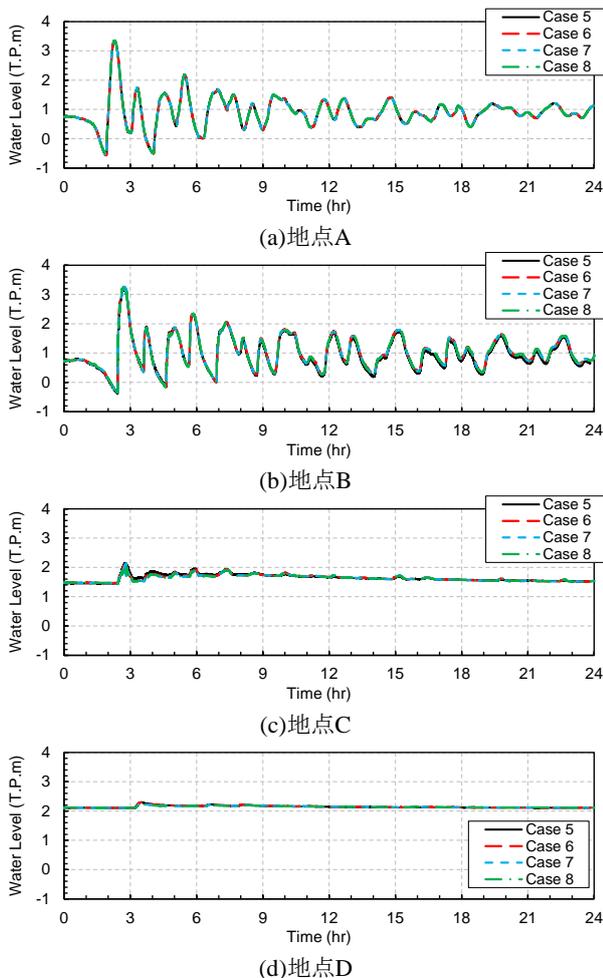


図 3.5 水位の比較 (Case 5~8) [5]

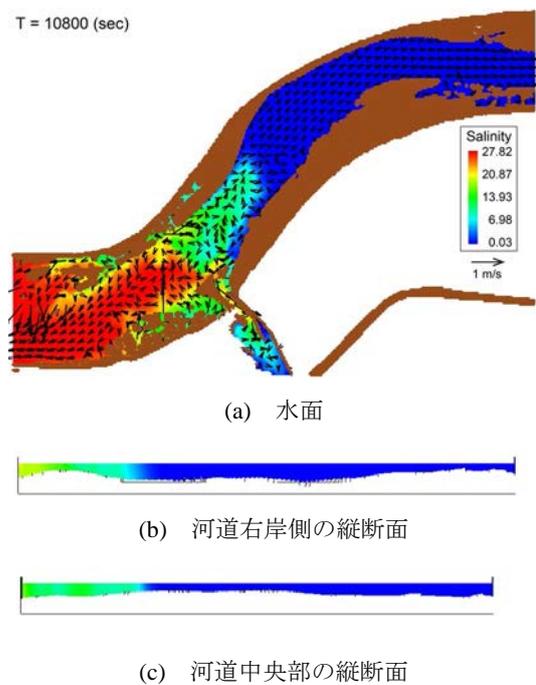


図 3.6 塩分の解析結果 (Case 8 の例) [5]

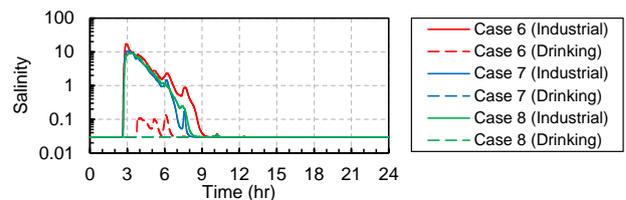


図 3.7 柴島取水口における塩分の比較 (Case 6~8) [5]

以上より、3D領域の格子間隔に関わらず、2DHnest-3Ddensity_Two-Way解析モデルにより広域の津波伝播解析と淀川大堰周辺域の三次元塩水挙動解析がその境界の影響を受けることなく一体的かつ長時間にわたって解析できた。

4. 2DH-3Ddrift_Two-Way 解析と 3D 解析を比較した例

前章では、全体を2DH解析したケース (Case1およびCase5) と、2DH-3Ddensity_Two-Way解析したケースを水位に関し比較した結果、両者は同等の結果を示すことが確認された。以下では、海底地すべり挙動解析で、すべてを3D解析した結果と2DH-3Ddrift_Two-Way解析した結果を比較した例を紹介する。ここで、3Ddriftとは、三次元流体剛体連成解析を意味し、詳細な計算手法などは文献[14]を参照頂きたい。

4.1 解析条件

藤井ら[15]は、地すべり挙動とそれに伴って発生する津波波高の関係を把握するため、図 4.1の平面水槽の斜面上端 (赤破線枠部) から地すべり塊を模した固体を自重または引張により滑落させることで津波を発生させた実験を行い、図中のH1~H16に設置された容量式波高計で水位変動を計測している。浦上らは、地すべり塊を水中で自重滑落させたケースに3D解析および2DH-3Ddrift_Two-Way解析を適用した。

解析領域には、実験と同様、長さ12m、幅12m、高さ1.5mの平面水槽に勾配2:1の斜面を取り付けたものを設定した (図 4.1)。そのうち、地すべり周辺の長さ5m、幅2m領域のみ3D領域 (図 4.1赤枠)、それ以外

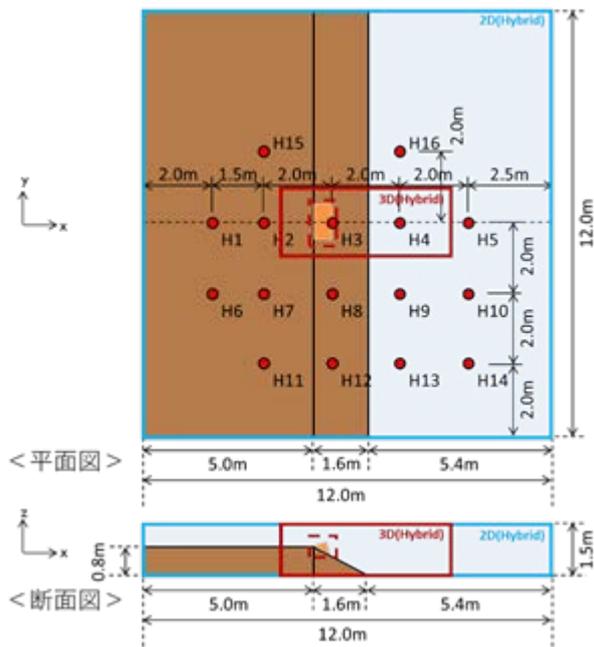


図 4.1 解析領域

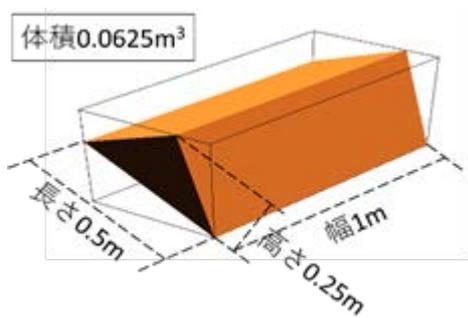


図 4.2 地すべり塊の形状

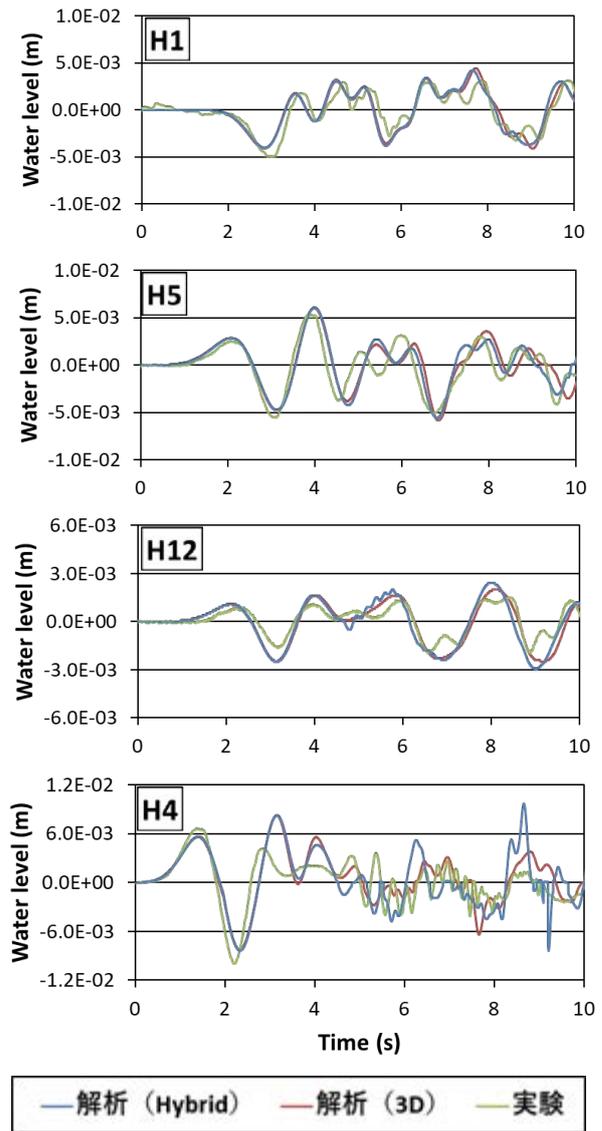


図 4.3 時刻歴波形の比較

を2DH領域（図 4.1青枠）とした。計算格子数は、3D領域で $250 \times 40 \times 75$ ，2DH領域で 600×240 である。地すべり塊には図 4.2の二等辺三角柱を用いた。

4.2 解析結果

解析結果を図 4.3に示す。同図では、2DH-3Ddrift_Two-Way（同図ではHybridと表示）、3Ddrift（同図では3Dと表示）、実験の結果を比較している。計測点H1、H5、H12はそれぞれ3D解析領域外の地すべり方向岸側、地すべり方向沖側、地すべり方向の側方であり、2DH-3Ddriftと3Ddriftの水位変動は概ね一致していることが確認される。このことから、3D領域から2DH領域へのデータ受け渡しが良好なことが分かる。一方、2DH-3Ddrift_Two-Way解析においても3D解析を適用している領域であるH4は、計算開始から4秒程度までの水位変化が完全に一致しているが、それ以降はずれが大きくなる。これは、3D領域から2DH領域に広がり境界で反射し再び3D領域に戻った津波の挙動が3Ddrift解析のみを行った場合とは異なることを意味し、境界をまたぐにつれて解析精度が落ちていくことが示唆される。以上の検証からは、2DH-3Ddrift_Two-Way解析では、3Dから2DHへの伝達において、3Ddrift解析と遜色ない解析結果がえられるが、境界で反射するような状況では注意を要することが分かった。なお、解析に要した時間は、3Ddrift解析では約10日半、2DH-3Ddrift_Two-Way解析では約15時間だった。

5. おわりに

以上のように、津波複合災害を予測評価するために必要になる平面二次元解析と三次元解析を同時並行的に連動実施する方法（2DH-3D_Two-Way解析）について説明し、それを用いて行った解析例について紹介した。

- 淀川における津波遡上解析を例として、2DHnest-3Ddensity_Two-Way 解析と 2DHnest 解析で津波水位の時間変化が概ね一致することを示した。
- 海底地すべり挙動解析を例として、2DH-3Ddrift_Two-Way 解析と 3Ddrift 解析の解析結果を比較し、両者の解析は概ね一致するが、条件によっては、解析結果の差が大きくなる場合があることが分かった。
- また、海底地すべり挙動解析において、2DH-3Ddrift_Two-Way 解析の解析時間は 3Ddrift 解析の 1/16 となり、計算時間に関する 2DH-3D_Two-Way 解析の優位性が確認された。

2DH解析と3D解析では鉛直分布の有無により結果に差が出ることはやむを得ないとも言えるが、その差を小さくしていく努力は続けていく必要がある。また、さらなる発展形として、

- 2DH 領域内に複数の 3D 解析領域を設定することや、
- 現在 2D 解析のみに適用しているネスティング手法を 3D 解析にも適用することなどの改良を行い、対象とする現象に対して柔軟に次元とメッシュ幅を設定した解析を可能にしていく予定である。

参考文献

- [1] 米山 望, 松山昌史, 田中寛好: 1993 年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析, 土木学会論文集, No. 705/II-59, pp. 139-150, 2002.
- [2] Pringle W. J., Yoneyama N. and Mori N.: Two-way coupled long wave - RANS model: Solitary wave transformation and breaking on a plane beach, *Coastal Engineering*, Vol. 114, pp. 99-118, 2016.
- [3] William J. Pringle, Nozomu Yoneyama, Nobuhito Mori, Multiscale coupled three-dimensional model analysis of the tsunami flow characteristics around the Kamaishi Bay offshore breakwater and comparisons to a shallow water model, *COASTAL ENGINEERING JOURNAL* 60(2) 2018.7 pp. 200-224,
- [4] 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.
- [5] 永島弘士, 米山 望: 津波来襲時の河道内塩水遡上に関する数値解析手法の提案, 土木学会論文集 B2(海岸工学), No.73(1), pp. 19-32, 2017.
- [6] 永島弘士: 津波来襲時の河道内塩水遡上に関する数値解析的研究, 学位論文, 京都大学, pp. 5-50, 2017.
- [7] 数値流体力学編集委員会: 数値流体力学シリーズ 1 非圧縮性流体解析, 東京大学出版会, 1995.
- [8] J. H. ファーツィガー, M. ペリッチ: コンピュータによる流体力学, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2003.
- [9] 日本化学会: 化学便覧 基礎編 2 改定 5 版, 丸善, p. II-66, 2004.

- [10] 細田 尚：開水路流れにおける乱流拡散機構に関する水理学的研究，学位論文，京都大学，p. 153, 1990.
- [11] 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.
- [12] 後藤智明，小川由信：Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法，東北大学工学部土木工学科，1982.
- [13] 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.
- [14] 浦上佳太，米山望，三次元流体剛体連成解析手法の地すべり津波に対する再現性検証，自然災害科学，40-2，2021，印刷中.
- [15] 藤井直樹，松山昌史，森勇人：地すべりによる津波の平面水槽を用いた水理模型実験，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 74, No. 2, I_145-I_150, 2018.