2次元・3次元ハイブリッド津波解析手法に関する研究

保坂　幸一[1]・松山　昌史[2]・加藤　勝秀[3]

[1]正会員　八千代エンジニヤリング株式会社　事業統括本部国内事業部河川部
（〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8 CSタワー）
E-mail: kc-hosaka@yachiyo-eng.co.jp (Corresponding Author)
[2]正会員　(一財)電力中央研究所　原子力リスク研究センター（〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1）
E-mail: matsu@criepi.denken.or.jp
[3]中部電力株式会社　原子力本部原子力土建部（〒461-8680 愛知県名古屋市東区東新町1番地）
E-mail: Katou.Katsuhide@chuden.co.jp

実務に幅広く適用可能な2way手法による平面2次元・3次元ハイブリッド津波解析手法を調査・検討した．検討対象として，オープンソースソフトウェアであるOpenFOAMの非標準ソルバ（shallowInterFoam）を活用した．既往の水理模型実験結果を検証データとして防波堤開口部の流況解析における適用性を検討した結果，実験結果を概ね再現できるとともに，3次元解析結果と平面2次元・3次元ハイブリッド解析結果が整合することを確認した．また平面2次元と3次元の接続境界での物理量の受け渡し方法について，非構造格子の適用を可能にする等の，より実用性が向上する改良を行った．

Key Words : *tsunami, two-dimensional and three-dimensional hybrid analysis, coupling method, OpenFOAM, boundary conditions*

1. はじめに

沿岸部の構造物周辺の3次元的な津波挙動および構造物に作用する波力の定量評価には，3次元流体モデルによる津波解析が有効であるが，3次元の広域津波解析は膨大な計算時間がかかる．そのため，広域を平面2次元モデル，構造物周辺等を3次元モデルで解析するハイブリッド津波解析手法が提案されている．それには平面2次元モデルの水位・流速を3次元モデルに入力する1way手法と相互に水位・流速を受け渡す2way手法がある．最大津波高発生時の陸上の津波浸水範囲や構造物への作用波力評価では，OpenFOAM等による1way手法が提案されており[1),2),3)]，実務へ適用しやすい状況となりつつある．一方，発電所の取水性評価や港湾内津波挙動の評価での，比較的長時間の津波挙動の解析には，1way手法では平面2次元と3次元の津波の連続性が確保できないため，2way手法が必要となる場合がある．しかし，2way手法は限られた研究者により研究・開発されているものの[4),5),6),7),8)]，実用段階には至っていない．そこで本研究では2way手法による平面2次元・3次元ハイブリッド解析手法の津波評価への実用化に向けて，既往の解析手法の実用上の課題を抽出し，その改善を図ることを目的とした．

2. 津波解析手法の概要

解析にはMintgen等[7),8)]により開発されたshallowInterFoamソルバを活用した．これはOpenFOAMの3次元の二相流を対象としたinterFoamソルバ(3D)と平面2次元非線形長波理論(2D)を組み合わせたものである．本節ではshallowInterFoamソルバを構成する平面2次元解析モデルと3次元解析モデルの概要，計算格子の構造，2つのモデル間の物理量の接続方法について述べる．

(1) 平面2次元解析モデル(2D)

2D領域では，非線形長波理論に基づいたモデルを使用している．基礎方程式は連続式（式(1)）と運動方程式（式(2)）である．

・連続式(i=1,2)

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

・運動方程式(i=1,2，j=1,2)

$$\frac{\partial q_i}{\partial t}+\overline{u_j}\frac{\partial q_i}{\partial x_j}=-\frac{1}{2}g\frac{\partial h^2}{\partial x_i}-gh\frac{\partial z_b}{\partial x_j}-\frac{\tau_{bi}}{\rho}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu_t\left(\frac{\partial q_i}{\partial x_j}+\frac{\partial q_j}{\partial x_i}\right)\right] \tag{2}$$

ここで，tは時間，xは位置，$\bar{u}$は鉛直方向平均流速，hは全水深，qは線流量，z_bは地盤高，τ_bは底面摩擦力，

ν_tは水平渦動粘性係数，gは重力加速度，ρは密度である．底面摩擦力τ_bはManningの粗度係数nを用いた以下の式(3)で算定される．

$$\frac{\tau_{bi}}{\rho} = \frac{n^2 g}{h^{1/3}} \bar{u}_i |\bar{u}| \tag{3}$$

ここで，$|\bar{u}|$は流速ベクトルの絶対値である．水平渦動粘性係数ν_tについては，水深方向に放物線分布になると仮定した渦動粘性係数を水深平均した以下の式(4)から，カルマン定数$\kappa = 0.41$と底面摩擦力τ_bから計算される摩擦速度u_*により算定される．

$$\nu_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \tag{4}$$

(2) 3次元解析モデル(3D)

3D領域における計算手法はOpenFOAMの非圧縮性・不混和流体の二相流を対象としたinterFoamソルバを元に構築されており，基礎方程式は連続式，Navier-Stokes方程式である．気液界面の追跡にはVOF法を使用している．乱流モデルには，SST-k-ωモデル[9]が採用されている．基礎方程式は，interFoamソルバと同じであることから，本論文での説明は省略する．

(3) 計算格子の構造

空間の離散化には有限体積法を用いており，計算格子は OpenFOAM で使用される多面体セルが利用可能である．3D 領域の場合は図-1 (a)に示すとおり，地盤高z_bは計算領域の底面としてモデル化され，2D 領域では領域底面は水平面とし，z_bを各格子に変数として与える．3D 領域，2D 領域の内部の計算格子形状は任意の形状が設定できるが，接続境界に隣接する計算格子形状は図-1 (b)のように隣接する 3D 格子は水平方向に同じ形で，さらに隣接する 2D 格子との接続面が水平方向で一致している必要がある[7]．

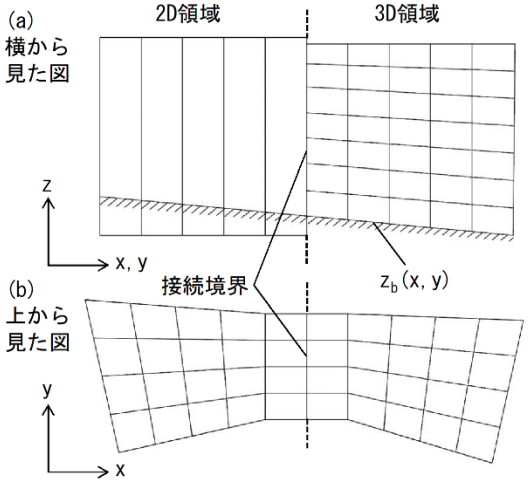


図-1 計算格子と接続部のイメージ

表-1 境界条件一覧(n_dは法線方向)

流れの状態	2Dでのh，q	3Dでのα_1，p_d，u_i
a:常流 2D→3D (Fr≦1)	$h = h^{3D}$ $\partial q_i/\partial n_d = 0$	$\partial\alpha_1/\partial n_d = 0$ $\partial p_d/\partial n_d = 0$ $u_i = f_u(q_i, h)$
b:射流 2D→3D (Fr>1)	$\partial h/\partial n_d = 0$ $\partial q_i/\partial n_d = 0$	$\alpha_1 = f_\alpha(h)$ $\partial p_d/\partial n_d = 0$ $u_i = f_u(q_i, h)$
c:常流 3D→2D (Fr≦1)	$\partial h/\partial n_d = 0$ $q_i = q_i^{3D}$	$\partial\alpha_1/\partial n_d = 0$ $p_d = f_p(h)$ $\partial u_i/\partial n_d = 0$
d:射流 3D→2D (Fr>1)	$h = h^{3D}$ $q_i = q_i^{3D}$	$\partial\alpha_1/\partial n_d = 0$ $\partial p_d/\partial n_d = 0$ $\partial u_i/\partial n_d = 0$

(4) モデル間の物理量の接続方法

接続位置での物理量の受け渡しは，表-1に示すとおり流れの方向，流れの状態（射流／常流）を各タイムステップで判断し，各物理量に対してノイマン条件・ディリクレ条件を組み合わせた境界条件を切り替える方法となっている．流れの状態の判定は接続位置における水深と2D領域および3D領域の平均流速から算定されるフルード数による．表中のh^{3D}とq^{3D}は接続境界に隣接する3D領域の水深および流量である．物理量をϕとしたときの$\partial\phi/\partial n_d = 0$ (n_dは法線方向を意味する)はノイマン条件における勾配0を意味する．$f_u(q,h)$，$f_p(h)$，$f_\alpha(h)$は2Dの流量と水深から，3Dの流速，圧力，VOF値の鉛直分布を特定の関数型を当てはめて算定することを意味する．それらの関数型の詳細はMintgen・Manhartによる論文[7]を参照されたい．

3. 検証計算

(1) 検証データ

正村ら[4]による防波堤開口部の流れを扱った水理模型実験（縮尺1/200）を検証データとして2D・3Dハイブリッドモデルの適用性を検証した．実験水槽平面図および防波堤断面図を図-2に示す．3次元解析の対象範囲は正村ら[4]による解析結果を参考に開口部を中央とした2.5m×2.5mの範囲（図-2の赤ライン）とした．

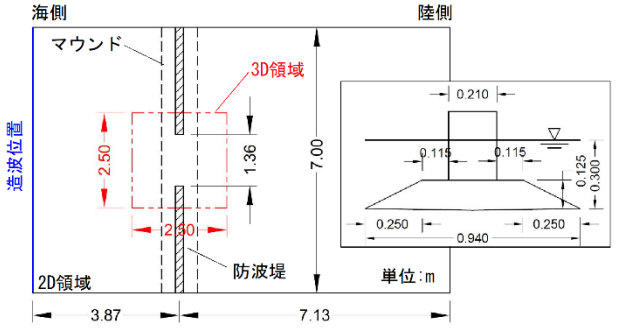


図-2 実験水槽と領域配置

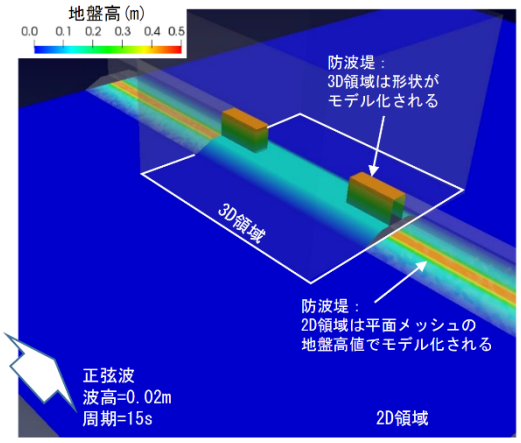
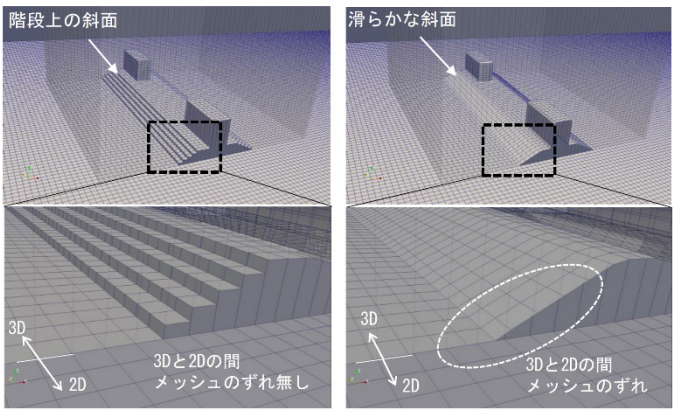


図-3　解析モデル



(a) 構造格子モデル　(b) 非構造格子モデル

図-4　接続部における計算格子配置

表-2　解析条件一覧

解析手法	項目		ハイブリッドケース【shallowInterFoam】	3Dケース【interDyMFoam】	2Dケース
2D	計算格子間隔		Δx=Δy=0.05m		Δx=Δy=0.05m
	計算時間間隔		最大クーラン数により自動調整		0.01s
	離散化スキーム	時間発展	1次精度陰解法		後藤・小川[10]による Leap-frog法
		移流項	1次精度風上差分		
	粗度係数n		0.015s/m$^{1/3}$		0.015s/m$^{1/3}$
	水平渦動粘性係数		式(4)による		考慮せず
3D	計算格子間隔		Δx=Δy=0.05m，Δz=0.025m		
	計算時間間隔		最大クーラン数により自動調整		
	離散化スキーム	時間発展	1次精度陰解法		
		移流項	2次精度中心差分＋ＴＶＤ制限		
	乱流モデル		SST k-ωモデル		
	壁面条件		no-slip条件，乱流粗面，相当粗度ks=0.0022m		
	動粘性係数ν		空気：1.48×10^{-5}m^2/s，水：1.00×10^{-6}m^2/s		
	密度ρ		空気：1kg/m^3，水：1000kg/m^3		

(2)　解析モデル・解析条件

解析モデルは，OpenFOAMの格子作成ライブラリで作成した構造格子モデルと非構造格子モデルを用いた．計算格子サイズは，正村ら[4]を参考に水平格子間隔を5cm，3次元領域の鉛直格子間隔を2.5cmとした．解析モデルを**図-3**に，構造格子と非構造格子モデルの接続部の計算格子配置を**図-4**に示す．非構造格子モデルの場合は，3Dの領域のみ非構造格子を自動作成したため接続部（**図-4**の白ライン）で2Dと3Dの水平格子位置にずれが生じた．

解析ケースは，ハイブリッドケース（構造格子ケース・非構造格子ケース）のほか，比較ケースとして全ての領域を3次元モデルとしたケース(3Dケース)および平面2次元モデルとしたケース(2Dケース)を対象とした．

入力津波について，正村ら[4]の実験では波高約2cm，周期15sの正弦波をピストン型造波装置で造波したとしているが，詳細な入射波形が示されていない．そこで3Dケースでは，OpenFOAMのinterFoamソルバに移動メッシュ機能が追加されたinterDyMFoamソルバを用いて，造波板位置の壁移動を考慮した解析を実施し，波高約2cm，周期15sの正弦波が発生するような造波板の位置の時系列データを作成することで造波させた．2Dケースおよびハイブリッドケースでは，3Dケースで得られた造波板移動速度を流入速度として換算した線流量の時系列データを造波板位置から流入した．

3Dケースおよびハイブリッドケースの解析条件は**表-2**に示すとおりである．2Dケースは，従来から用いられている手法と比較する観点から後藤・小川[10]による非線形長波モデルを適用した．底面摩擦は，2D領域においては正村ら[4]に基づきManningの粗度係数n=0.015s/m$^{1/3}$を設定した．3D領域では，Mintgen[7,8]に基づきOpenFOAMで標準的に使用可能な乱流粗面の壁関数を用いた．その条件として必要となる相当粗度k_sは，Manningの平均流速公式と，それを相当粗度k_sを用いて書き直されたManning-Stricklerの式との関係から得られる以下の式(5)から，k_s=0.0022m (n=0.015s/m$^{1/3}$)と設定した．

$$k_s = \left(7.66n\sqrt{g}\right)^6 \qquad (5)$$

(3)　解析結果および考察

実験水槽海側から陸側に向かって防波堤開口部で速い流れが生じる計算開始から7s後の流況（流速ベクトル図）を**図-5**に示す．**図-5(a)**の3Dケースと**図-5(b)**のハイブリッドケース（構造格子）を比較すると概ね同様の流況となっている．一方，**図-5(c)**のハイブリッドケース（非構造格子，改良前）では防波堤マウンド付近で速い乱れた流れが生じた．前述のとおり接続境界に隣接する計算格子

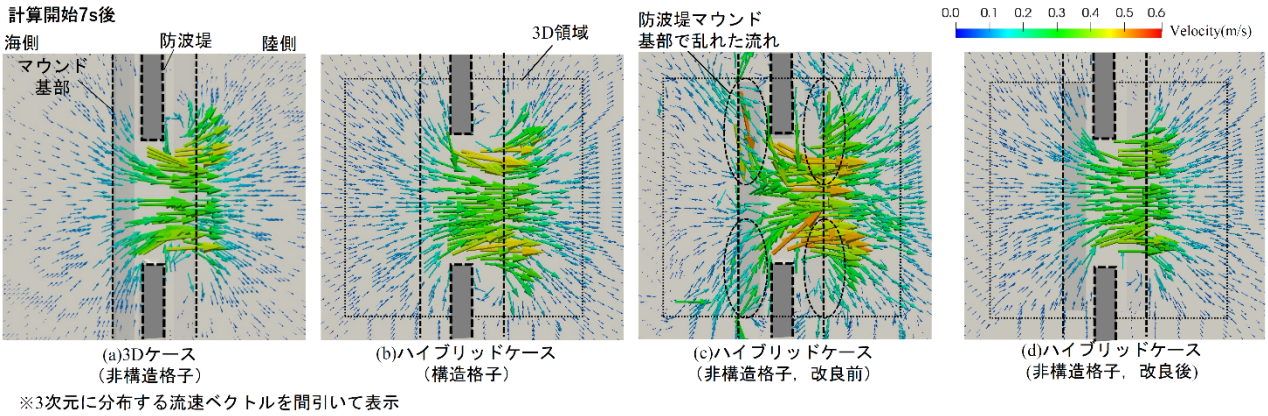


図-5　防波堤開口部周辺の流速ベクトル図(3Dケース，ハイブリッドケース)

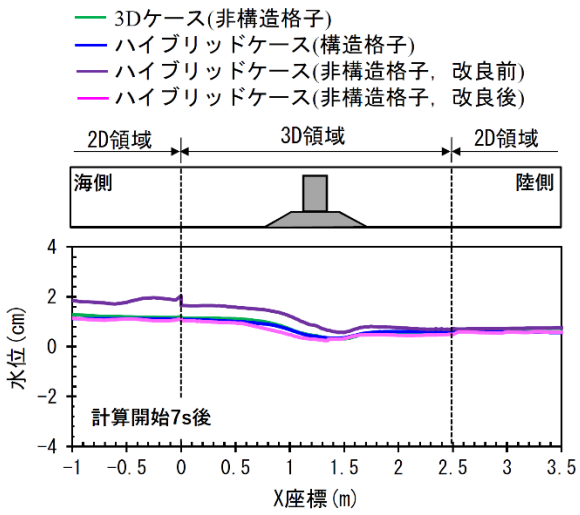


図-6　水面形の比較(3Dケース，ハイブリッドケース)

形状は水平方向で3D領域と2D領域との接続面を一致させる必要があり，図-4に示したとおり非構造格子ケースでは2Dと3Dの接続面にずれが生じていることが原因で発生した乱れと考えられる．図-5と同時刻の各ケースの防波堤開口部中央を通る水槽中央ライン上の水面形の比較結果を図-6に示す．ハイブリッドケース（非構造格子，改良前）は，他ケースに比べ海側の水位が高くなっており，海側の接続境界では2Dと3Dで水面が不連続となった．よって境界部の流れの乱れが水面形にも影響を与えていると判断された．このためMintgenによる方法[7][8]では，詳細な構造物や地形の自動作成，2Dと3Dで計算格子サイズを変える等の実用上必要となるモデル化が困難である．

(4)　接続方法の改良

2Dと3Dの接続面にずれが生じている場合に安定した流れが接続されない要因として，Mintgenによる方法[7][8]では3Dと2Dの接続部では互いの境界格子の最も近い格子点の物理量を受け渡しており，空間的なずれが生じるためと考えられる(図-7(a))．そこで，接続面格子にずれがある場合や2Dと3Dで水平格子サイズを変える場合に問題なく物理量を受け渡すことを可能とするため，2Dと3Dの接続面で面積による重み付き平均を行い物理量を受け渡す機能を追加した(図-7(b))．改良した手法による流況を図-5(d)に示す．図-5(d)の流況は図-5(a)の3Dケースに概ね一致しており，図-5(c)で発生していた防波堤マウンド付近の乱れた流れが低減された．さらに，この改

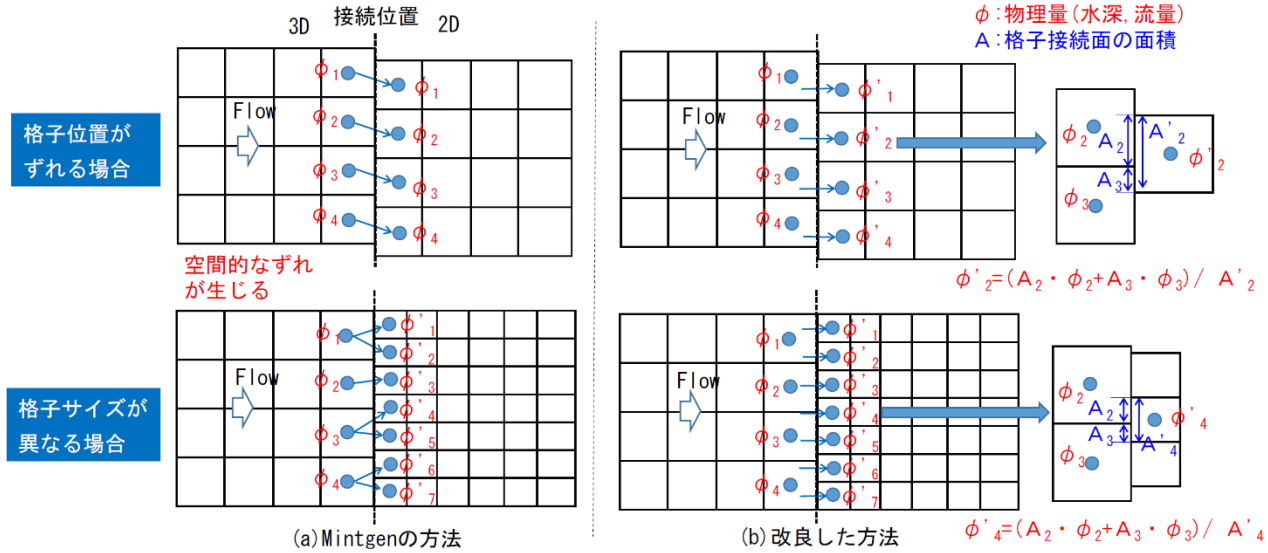


図-7　接続方法模式図(上から見た図，3D領域から2D領域へ流れる場合)

良により非構造格子モデルの場合でも水槽センターライン上の水面形は3Dケースと整合することを確認した（図-6マゼンタライン）．

津波防災の観点からは，防波堤による最大打ち上げ高の変化，漂流物挙動を予測するために開口部付近の陸向き流速の再現が特に重要である．図-8は正村ら[4]で示されている防波堤開口部付近の水平流速の時系列を比較した結果である．計算開始から20～26s頃において，3Dケースおよびハイブリッドケースでは実験結果と同様に陸向き(正)の流速が発生しているが，2Dケースの鉛直方向の一様流速ではほとんど陸向きの流れが発生していない．なお，3Dケース等の陸向き（正）の流速が実験に対して過小評価している理由として，格子サイズや諸条件の影響も考えられるが，実際の入射津波波形が確実に再現できているわけではないことも考えられる．

正村ら[4]の実験，3Dケース，ハイブリッドケース，2Dケースの防波堤開口部から陸側へ向かう水平方向の流速鉛直分布を比較した(図-9)．計算開始後26s後の地点Aでは，概ね鉛直方向に一様の流速分布となっているものの，3Dケース，ハイブリッドケースでは底面付近で水平流速が遅くなっており，底面から離れた流速は実験と整合するとともに，2Dケースに比べ速くなっている．地点Bでは鉛直方向に流速の変化が大きく，図-8のように1点で見た場合は水平流速の再現性にバラツキがあるものの，ハイブリッドモデルの水平流速の鉛直分布形状の実験再現性は，3Dモデルと同程度であることが確認された．

図-10(a)に計算開始 16 s 後における Line1（防波堤開口部中央から防波堤先端側 20cm）の断面流速ベクトル分布を示す．3D モデルケースとハイブリッドケースの流況は同様の傾向となり，2D と 3D の接続境界付近の流れも整合している．一方，図-10(b)に示す計算開始から 22s 後の Line2（防波堤開口部中央）では，3D ケースとハイブリッドケースの流速分布が異なっており，特にハイブリッドケースの海側の接続境界付近で，3D ケースで発生していない鉛直渦が生じている．図-11 に計算開始 22s 後の 3D ケースにおける平面流況を示す．防波堤開口部より沖側は複雑な渦が発生しており，ハイブリッドケースでは，その渦の範囲が3Dモデルで完全にはカバーされていない状況となっているため，そのような箇所に接続境界を設定すると，安定した流れの受け渡しが困難であると推定された．そのため，実用上は3次元的な流れを評価したい範囲（防波堤開口部）に対して，3次元領

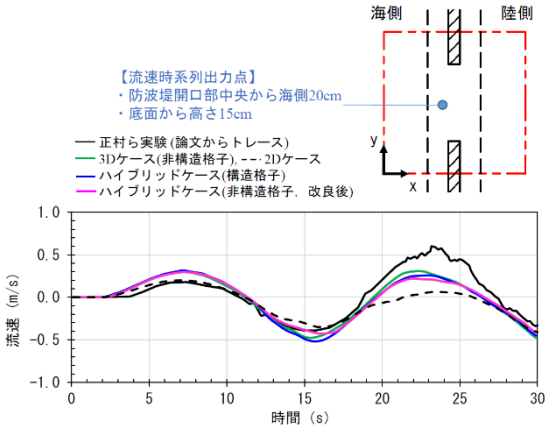


図-8　水平流速時系列の比較

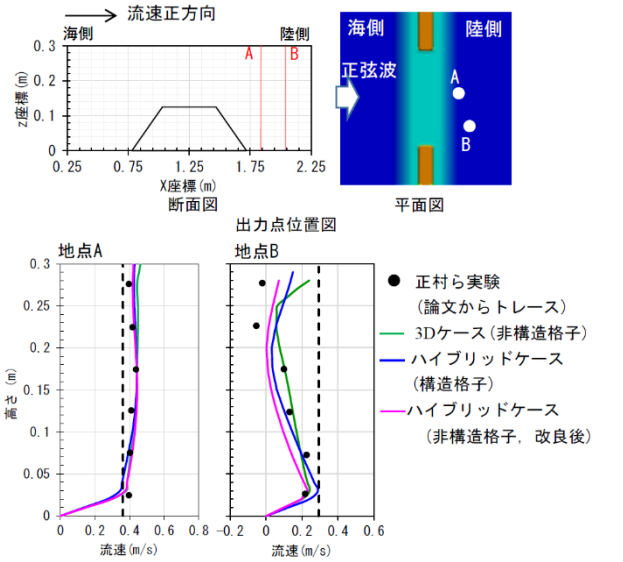


図-9　水平流速鉛直分布の比較

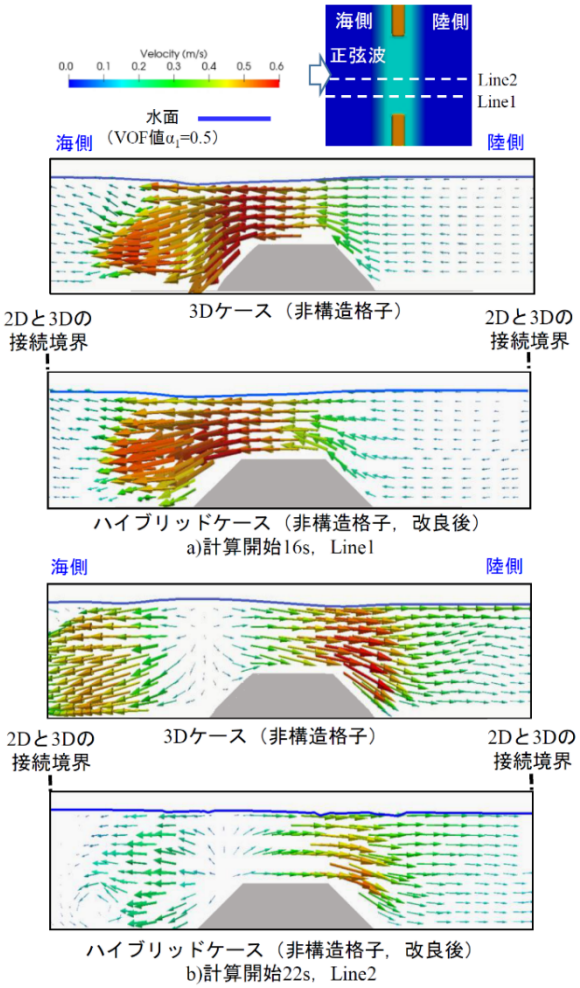


図-10　断面流速ベクトル図の比較

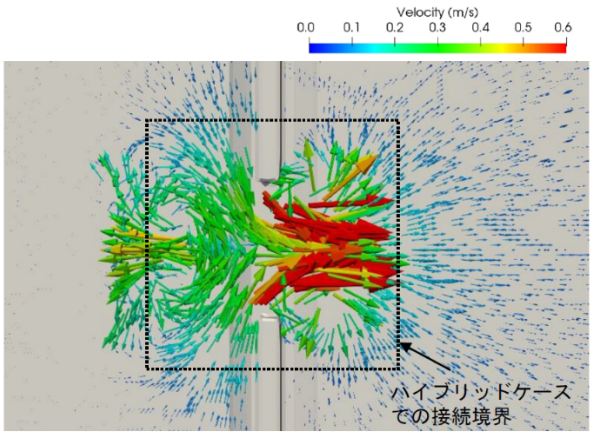


図-11　計算開始22 s後の流況(3Dケース，非構造格子)

域を広めに設定する必要がある．

4. まとめ

OpenFOAMの非標準ソルバであるshallowInterFoamソルバを用いて2way手法による2D・3Dハイブリッド解析手法で既往水理模型実験を検証データとして防波堤開口部流況に対する適用性を検討した．その結果，概ね水理模型実験結果を再現でき，3次元的な流れが生じない位置に適切に接続境界を設定することで3Dケースとハイブリッドケースが整合的な結果となることが確認された．また2Dと3Dの接続位置での物理量の受け渡し方法について，3D領域で非構造格子を適用しやすくする等の，より実用性が向上する改良を行った．shallowInterFoamソルバはオープンソースソフトウェアであり，誰でも使用・改良可能であるため，今後ユーザーが増えることによって，さらに実用化へ向けた発展が期待できる．

今後，3次元領域範囲の設定方法，接続の安定化の検討を含め，陸上の津波浸水や構造物に対する津波波力評価，実規模の地形および津波に対する適用性の検証等のさらなる検討を重ねていく予定である．

謝辞：本研究は電力11 社による原子力リスク研究センター共研として実施した成果であることを付記するとともに，土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会（委員長高橋智幸関西大学教授）の委員各位に研究成果をご議論頂き，有益なご助言を賜りました．関係各位に謝意を表します．

参考文献

1) ファム バン フック，長谷部雅伸，髙橋郁夫: VOF 法を用いた 3 次元津波解析に関する研究,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No.2, pp. I_71-I_75, 2012.
2) 川崎浩司，松浦翔，坂谷太基: 名古屋港周辺を対象とした南海トラフ巨大地震に関する平面 2 次元-3 次元津波解析，土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No.2, I_391-I_395, 2014.
3) 本橋英樹，野中 哲也，中村 真貴，原田隆典，坂本佳子: 広域 3 次元津波シミュレーションにおける造波境界の設定方法，土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No.2, pp.I_181-I_185, 2014.
4) 正村憲史，藤間功司，後藤智明，重村利幸: 2D/3D ハイブリッドモデルによる構造物に作用する流体力の検討，水工学論文集，45 巻，pp.1243-1248, 2001.
5) Pringle, W.J., Yoneyama, N., and Mori, N.: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, Volume 60, Issue 2, pp.200-224, 2018.
6) 有川太郎，関克己，大木裕貴，平野弘晃，千田優，荒木和博，石井宏一，髙川智博，下迫健一郎: 階層型連成シミュレーションによる高精細津波遡上計算手法の開発，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，第 73 巻，pp. I_325-I_330, 2017.
7) Mintgen, F. and Manhart, M: A bi-directional coupling of 2D shallow water and 3D Reynolds-averaged Navier-stokes models, Journal of Hydraulic Research, pp.771-785, 2018.
8) Mintgen, F.: Coupling of Shallow and Non-Shallow Flow Solvers - An Open Source Framework, PhD dissertation, Technical University of München, 166p, 2018.
9) Menter, F. R.: Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA Journal, 32 (8), pp.1598-1605, 1994.
10) 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，52p，1982.

(Received March 17, 2021)
(Accepted July 22, 2021)

STUDY ON NUMERICAL SIMULATION OF TSUNAMI BY USING 2D-3D HYBRID MODEL

Koichi HOSAKA, Masafumi MATSUYAMA and Katsuhide KATO

In this study, the two-dimensional and three-dimensional hybrid model by the solver “shallowInterFoam” that works on the OpenFOAM platform, was verified the relevance of its analysis in comparison with the results of hydraulic model experiments on the flow around the breakwater. Hybrid model calculation results were consistent with the hydraulic model experiment data and three-dimensional model calculation results. Furthermore, the practical improvement was achieved by improving the coupling method between the 2D model and the 3D model, such as enabling the application of unstructured grids.