土木学会論文集, Vol.80, No.17, 24-17051, 2024.

2次元・3次元のハイブリッド津波解析におけるカップリング位置の検討と実津波への適用について

保坂　幸一[1]・木原　直人[2]・鈴木　和磨[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　一般財団法人電力中央研究所　サステナブルシステム研究本部　気象・流体科学研究部門
（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）
E-mail: kihara@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: Suzuki.Kazuma@chuden.co.jp

広域を平面2次元モデル(2D)，陸域や構造物周辺を3次元モデル(3D)とする双方向で水位・流量を受け渡す2D・3Dハイブリッド津波解析手法を用いる場合の2Dと3Dの適切なカップリング位置に関する知見は少ない．本研究では，まず既往水理模型実験を対象に，ハイブリッドモデルの2Dに分散項を考慮する場合・考慮しない場合で，カップリング位置を変化させた解析結果から，分散性による津波波形の変化が3Dへの接続後の津波再現性に影響を与えることを確認した．さらに，2011年東北地方太平洋沖地震津波による女川町の遡上の再現を対象に，カップリング位置の設定方法を検討した上で痕跡高との比較，浸水深・流速の検証を行った結果，ハイブリッドモデルは2Dに比べ，構造物を考慮した陸上の津波遡上の再現性が向上すると推定された．

Key Words : *tsunami, two-dimensional and three-dimensionalhybrid analysis, coupling position, long wave theory, dispersive wave theory, OpenFOAM*

1.　はじめに

3次元モデルによる津波解析は，陸上部や構造物周辺の3次元的な流況を再現する場合に有効な手段となるが，津波の発生，海洋伝播，陸上遡上を全て3次元モデルで実施するには膨大な計算資源が必要になる．そのため近年，広域を平面2次元モデル(2D)，陸域や構造物周辺を3次元モデル(3D)とする双方向で水位・流量を受け渡す2wayの2D・3Dハイブリッド津波解析手法が提案されている[1),2),3)]．2D・3Dハイブリッド津波解析手法を用いて陸上部の津波遡上高や浸水範囲，構造物へ作用する津波波力等の評価を行う場合に，さらなる計算負荷低減のためには3D領域を対象構造物等近傍の限定的な範囲とすることが望ましい．しかしながら，2Dと3Dのカップリング位置に関する知見は少なく適切なカップリング位置の設定が難しい．本研究では，陸域近傍の津波伝播及び陸上遡上を対象に2D・3Dハイブリッドモデルのカップリング位置が津波再現性に与える影響を検討した．

2.　津波解析手法の概要

平面2次元・3次元ハイブリッド津波解析手法として，OpenFOAMの3次元の二相流を対象としたinterFoamソルバと平面2次元非線形長波理論を組み合わせたものであるshallowInterFoamソルバ[4),5)]を活用した．また，津波の分散性が2Dと3D間の接続に与える影響を検証するために，平面2次元解析モデルに分散項を考慮した方法についても検討した．

(1)　平面2次元解析モデル(2D)

基礎方程式は平面2次元の連続式及び運動方程式である．以下に示す式の記載にはアインシュタインの縮約記法を適用しており，添え字のi，jは水平2方向を表す．

■連続式

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

ここで，tは時間，xは位置，hは全水深，qは線流量で

ある．運動方程式は非線形長波理論に基づく式(2)と既存のOpenFOAMのブシネスクモデル[6]を参考に式(2)に分散項を追加した式(3)を使用した．

■運動方程式-非線形長波理論

$$\frac{\partial q_i}{\partial t}+\bar{u}_j\frac{\partial q_i}{\partial x_j}=-\frac{1}{2}g\frac{\partial h^2}{\partial x_i}-gh\frac{\partial z_b}{\partial x_j}-\frac{n^2 g}{h^{1/3}}\bar{u}_i|\bar{u}|+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu_t\left(\frac{\partial q_i}{\partial x_j}+\frac{\partial q_j}{\partial x_i}\right)\right] \quad (2)$$

■運動方程式-非線形分散波理論

$$\frac{\partial q_i}{\partial t}+\bar{u}_j\frac{\partial q_i}{\partial x_j}=-\frac{1}{2}g\frac{\partial h^2}{\partial x_i}-gh\frac{\partial z_b}{\partial x_j}-\frac{n^2 g}{h^{1/3}}\bar{u}_i|\bar{u}|+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu_t\left(\frac{\partial q_i}{\partial x_j}+\frac{\partial q_j}{\partial x_i}\right)\right]+\left(B+\frac{1}{3}\right)h^2\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial^2 q_i}{\partial t\partial x_j}+\frac{\partial^2 q_j}{\partial t\partial x_i}\right)+Bgh^3\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial^2\eta}{\partial x_j^2}+\frac{\partial^2\eta}{\partial x_i^2}\right) \quad (3)$$

ここで，$\bar{u}$は水平方向の平均流速，z_bは地盤高，ν_tは水平渦動粘性係数，gは重力加速度，ρは密度，nはマニングの粗度係数，Bは分散項の補正係数(Madsen-Sørensen[7]に基づき本研究では1/15とした)である．既往研究[8),9)]の非線形分散波モデルと同様に，陽的な離散化と陰的な離散化を併用したスキームが適用されている．

(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[10]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．

表-1 境界条件一覧

流れの状態	2Dでのh，q_i	3Dでのα，p_d，u_i
2D→3D (Fr≦1)	$h=h^{3D}$ $\partial q_i/\partial n=0$	$\partial\alpha/\partial n=0$ $\partial p_d/\partial n=0$ $u_i=f_u(q_i,h)$
2D→3D (Fr>1)	$\partial h/\partial n=0$ $\partial q_i/\partial n=0$	$\alpha=f_\alpha(h)$ $\partial p_d/\partial n=0$ $u_i=f_u(q_i,h)$
3D→2D (Fr≦1)	$\partial h/\partial n=0$ $q_i=q_i^{3D}$	$\partial\alpha_1/\partial n=0$ $p_d=f_p(h)$ $\partial u_i/\partial n=0$
3D→2D (Fr>1)	$h=h^{3D}$ $q_i=q_i^{3D}$	$\partial\alpha/\partial n=0$ $\partial p_d/\partial n=0$ $\partial u_i/\partial n=0$

Fr:フルード数，h:全水深，q_i:線流量，α:VOF値，p_d:動圧，u_i:流速，n:法線方向

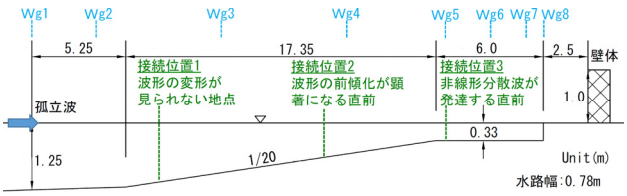

図-1 実験断面図及び水位計設置位置

(3) モデル間の物理量の接続方法[4)]

カップリング位置での物理量の受け渡しは表-1に示すとおり，流れの方向や状態(射流と常流)を各タイムステップ，各境界格子点で判断し，境界条件を切り替える方法が用いられている．$f_u(q,h)$，$f_p(h)$，$f_\alpha(h)$は，2Dの流量と水深から3Dの水平方向流速，圧力，VOF値の鉛直分布を特定の関数型を当てはめて算定していることを意味する．それらの関数型の詳細はMintgenによる論文[4)]を参照されたい．また，既往研究[8)]における平面2次元非線形分散波モデルの領域接続では，境界部で分散項の計算に必要な計算諸量が確保できないことから，領域境界に隣接する計算格子での流量は分散項を除く非線形長波方程式で計算されている．本解析手法で2Dに分散項を考慮する場合の2Dと3Dの接続も同様の問題が生じたため，3D領域に隣接する2D格子の流量は，分散項を除いた非線形長波方程式で計算することとした．

3. 水理模型実験の再現計算

(1) 検証データ

2D・3Dハイブリッド津波解析におけるカップリング位置の再現性へ与える影響を確認するため，有川[11)]による水理模型実験結果[注1)]を対象に再現計算を行った．図-1に実験水路の概要を示す．図のWgは波高計の位置である．水路陸域に高さ1.0mの直立壁が設置されている．入射波は波高20cmの孤立波である．

(2) 解析条件

ハイブリッドモデルの解析条件を表-2に示す．比較用に解析領域全体を3D及び2Dとしたケースも実施した．水位時刻歴からハイブリッドモデルのカップリング位置

表-2 解析条件

手法	項目	設定値
2D	格子間隔	Δx=0.16m，Δy=0.08m
	計算時間間隔	自動調整[注2)] (最大クーラン数0.5)
	粗度係数n	0.012m$^{-1/3}$・s
	乱流モデル	ゼロ方程式モデル
3D	格子間隔	Δx=0.16～0.005m，Δy=0.08～0.01m Δz=0.04m～0.005m
	計算時間間隔	自動調整[注2)] (最大クーラン数0.5)
	乱流モデル	SST k-ω モデル
	壁面条件	海域:No-slip(相当粗度 k_s=0.569mm)[注3)] 側面・陸域・壁体:slip，上端:大気開放
	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
	表面張力	空気-水:0.07N/m

として**図-1**に示した接続位置1～3の3ケースを設定した．津波の入力位置は水深1.25mのWg1の位置として，水位時刻歴波形から津波入力データを作成した．解析では実験の30sから入射開始し，計算時間は30s間とした(以降に示す時刻歴等の結果は実験の時間に合わせて表示した)．

(3) 解析結果

実験と3Dケースの水位時刻歴波形を**図-2**に示す．3Dケースの実験波形の再現性は良好である．**図-3(a)**に2Dケース，**図-3(b～d)**にハイブリッドケースの接続位置1～3と3Dケースとを重ね合わせた1秒間隔の空間波形を示す．2Dケースは，斜面中央付近から3Dケースに比べ津波の前傾化が大きくなる．ハイブリッドケースの2D解析を非線形長波モデルとした場合，接続位置1は水路全域で3Dケースと空間波形が概ね整合した．接続位置2は3Dケースに比べ2D領域での前傾化が進み，3D領域に入ると3Dケースよりも先に水位増幅が生じる．接続位置3では接続位置で水面の乱れが大きく，非線形分散効果が顕著に現れる位置で2Dと3Dを接続したため，安定した流れの接続ができていない可能性が高い．接続位置2，3では3Dケースよりも砕波が早く，汀線位置の水位が3Dケースに比べて下がる傾向が見られた．ハイブリッドケースの2D解析を非線形分散波モデルとする場合は，非線形分散効果が顕著に現れている接続位置3の場合でも，2D領域での波形の前傾化が抑えられ，3Dモデルケースに対する波形の再現性が向上した．

以上より，分散性の影響が現れる津波を対象とする場合に，2Dを非線形長波モデルとすると，分散性の影響が無い範囲まで3D領域を広げる必要があること，2Dを非線形分散波モデルとすると，カップリング位置を陸域近くに設定することが可能であることが確認された．

(4) カップリング位置の検討

2Dに非線形長波モデルを用いた2D・3Dハイブリッド津波解析を行う場合に，先の検討のように事前に実波形または3次元解析による波形が確認できないため，実津波へ適用する際には事前に分散性の影響が現れる地点を推定しなくては適切なカップリング位置の設定ができない．そこで，分散波の影響が現れる地点の目安の設定方法として，松山ら[13]の分裂波の発生を検知するパラメータである水表面流速波速比と平均流速波速比の差であるω(式(4))により，再現解析結果におけるカップリング位置における非線形分散効果の影響を検討した．

$$\omega = \frac{u_s}{c} - \frac{\bar{u}}{c} = -\frac{D}{3}\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \tag{4}$$

ここに，u_sは水表面流速[13]，cは波速である．ωは分裂波が発生する状況では10^{-2}のオーダー，分裂波が成長して砕波が近づくと10^{-1}のオーダーになるとされている．**図-4**に非線形長波モデルの2Dケースで0.5s間隔で出力した接続位置1～3付近に津波水位のピークが存在する時刻における水位空間波形及びその時刻の津波前面(津波先端～最高水位発生位置)におけるωの最大値を示した．接続位置2を津波が通過する40.5sでは，ωが10^{-1}より大きくなっている．接続位置3を津波が通過する42.5sでは，非線形分散効果が波形に現れている地点であることから，2Dケースでは津波の前傾化が極端になってい

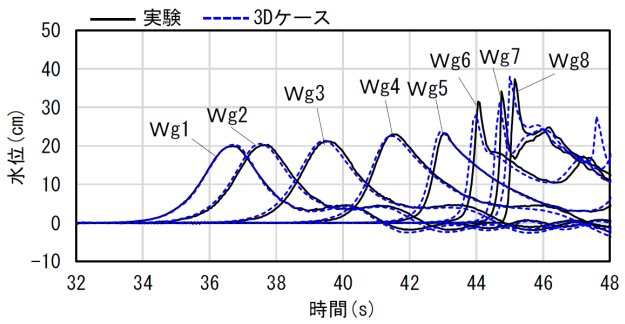

図-2 水位時刻歴波形（実験・3Dケース）

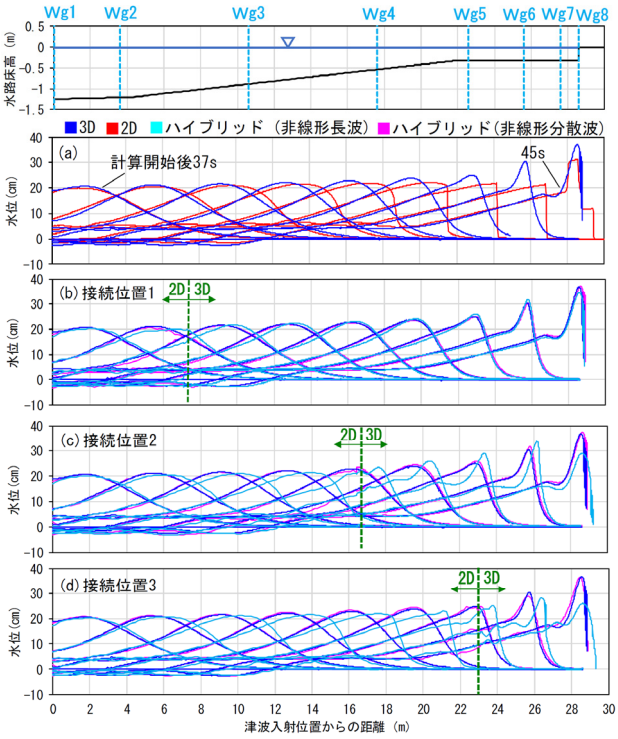

図-3 水位空間波形

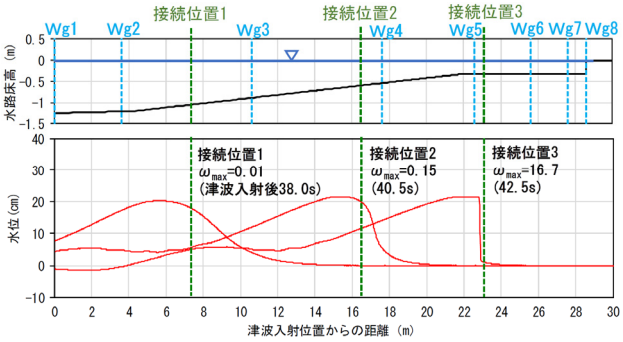

図-4 2Dケースにおけるカップリング位置でのωの算定結果

るため，ωは16.7と大きくなっている．以上から，2Dモデルによる波形を用いた分裂波の発生を検知するパラメータωでカップリング位置を検討する場合，ωが 10^{-1} のオーダーより大きい地点では，2D と 3D の接続が津波波形の再現性に影響を及ぼし，その影響を小さくするには，ωが 10^{-2} のオーダー以下の範囲にカップリング位置を設定する必要があると推定された．

4. 実津波への適用

対象津波は2011年東北地方太平洋沖地震津波とし，対象地点はファムら[14]，佐藤ら[15]でも対象としている宮城県女川町とした．ファムら[14]は女川湾周辺の3次元領域に1wayで平面2次元解析の水位・流量を接続する方法，佐藤ら[15]は女川町近傍に3D領域を設定した2wayの2D・3Dハイブリッド解析手法を用いている．どちらも2D解析には非線形長波モデルを適用し，2Dと3Dのカップリング位置には着目していない．本研究では前節のカップリング位置の検討方法及び非線形長波モデル，非線形分散波モデルの使い分けに着目した検討を行った上で，2D・3Dハイブリッド津波解析手法の実津波の再現性を検証した．

(1) 波源域を含む津波伝播の2D解析

津波波源の再現性の確認及びカップリング位置検討のための事前解析として，波源域から女川町までの平面2次元解析を実施した．解析領域を図-5に示す．解析領域・地形は中央防災会議が公開するデータ[注4]を用いた．

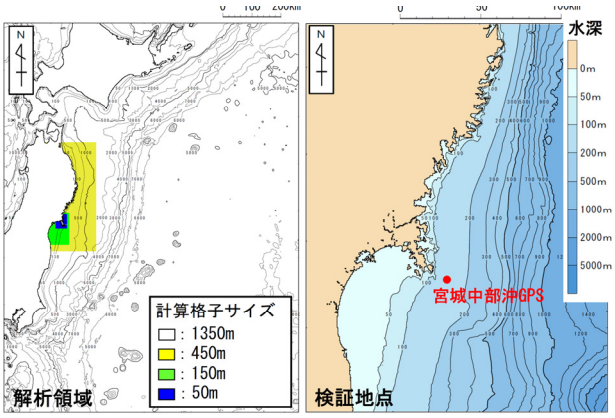

図-5 解析領域と波形検証地点

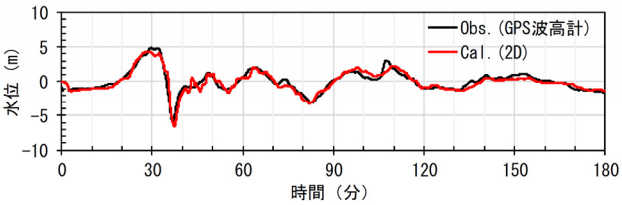

図-6 宮城中部沖の水位時刻歴波形

沿岸部の最小格子サイズは50mである．マニングの粗度係数nは一律0.03m$^{-1/3}$・sとした．解析手法は後藤・小川[12]に基づく非線形長波モデルとし，波源モデルはSatakeら[16]による55枚モデルとした．津波時の潮位はT.P.-0.4mとし，地震発生から4時間を時間刻み0.2sで解析した．

宮城県中部沖のGPS波高計と解析の水位時刻歴波形の比較結果を図-6に示す．解析結果は女川湾沖合の観測波形を良好に再現できることを確認した．

(2) カップリング位置の検討

前節の平面2次元解析結果を用いて，ハイブリッド解析における2Dと3Dのカップリング位置を検討した．図-7に女川湾（計算格子サイズ50m）における津波水位分布，図-8に図-7のA-A'断面における水位とωの空間分布を示す．図-7，図-8から確認されるとおり，女川町周辺に到達する津波の波長は長く，女川湾全体で緩やかに水位が上昇している．ωは最大でも0.001程度で，2Dと3Dの接続が津波波形の再現性に影響を及ぼすωの値（$>10^{-1}$）よりも2オーダー小さい．

以上から，対象津波・対象地点において，陸地近傍まで分散性の影響は現れないものと推定され，2Dを非線形長波モデルとして問題なく，3D領域を陸域近傍の限定的な範囲とすることができると判断された．

(3) 2D・3Dハイブリッド津波伝播・遡上解析

a) 解析モデル

ハイブリッドモデルにおける2D解析には，非線形長波モデルを適用することとした．解析領域は解析負荷低

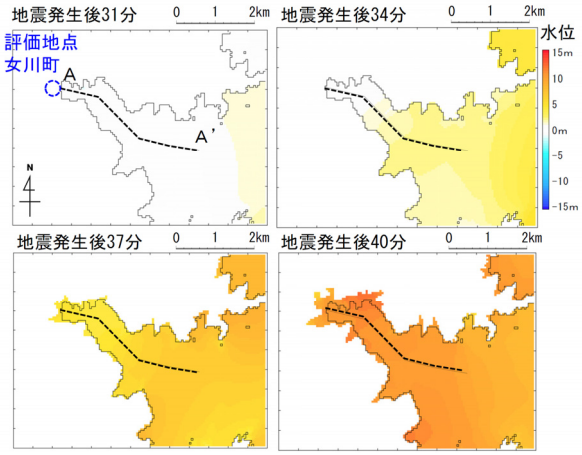

図-7 女川湾の津波水位分布

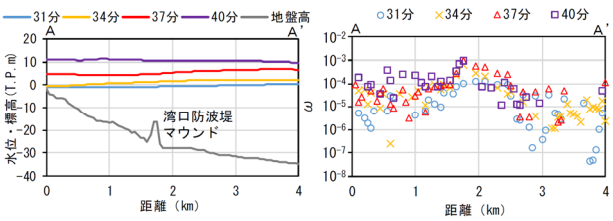

図-8 A-A'断面における水位とωの空間分布

減のため，前節の波源域を含む平面2次元解析の50m格子領域内に配置し，津波の入力境界条件は平面2次元解析(前節)における流量をハイブリッド解析領域境界に1wayで与える方法とした(図-9左)．3D領域は佐藤ら[15]を参考に陸域近傍の東西方向約800m，南北方向約700mの範囲とし，非構造格子として地形及び構造物形状を表現した．3D領域の地形を図-9右に示す．3D領域の格子サイズは佐藤ら[15]と同様に水平方向2m，鉛直方向2mを基本とし，初期水面付近は計算初期の水面の安定化のため，鉛直格子サイズを1mとした．2D領域は3D領域とのカップリング位置で格子サイズを2mとし領域外縁で50mになるように連続的に粗くした．地形データは中央防災会議のデータ[注4]に加え，女川町近傍の陸上部に国土地理院の基盤地図情報5mメッシュデータ[注5]を反映した．なお，地盤高には波源モデルから計算される50m格子による地盤変動量を内挿して見込んでいる．陸上建物は2011年以前の基盤地図情報データ(建築物)[注5]を用いてモデル化した．建物データは堅牢建物(鉄筋コンクリート等)，普通建物(木造等)に分類されており，木造は津波により流出するという考えのもとに堅牢建物のみをモデル化した．また建築物高さのデータがないため，2階建て相当とし高さを一律10mとした．防波堤等の構造物は用いた地形データに含まれている場合にその高さを考慮した(湾口防波堤は中央防災会議の地形データ[注4]に含まれているマウンド部のみ考慮した)．

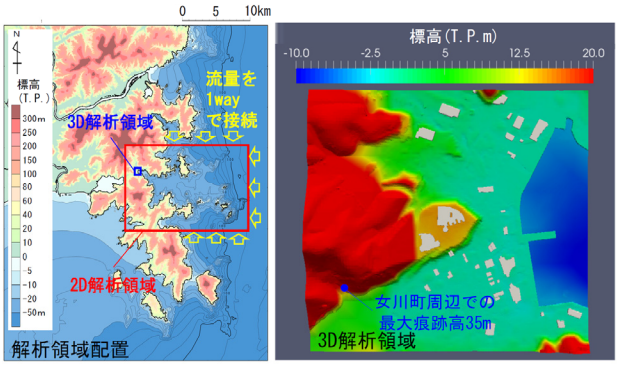

図-9　ハイブリッド解析領域の配置と3D領域地形

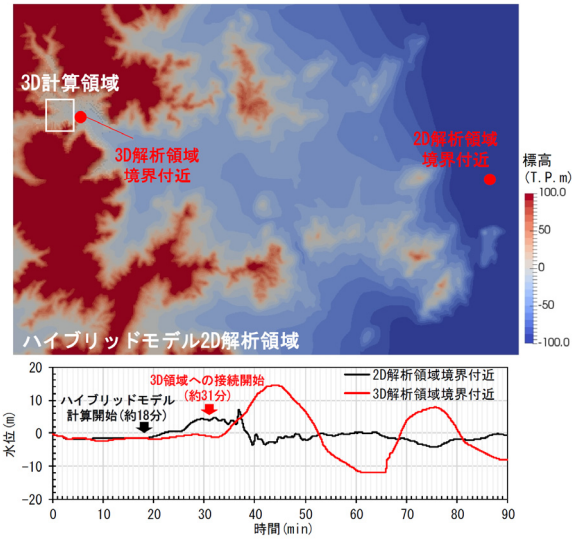

図-10　平面2次元解析による女川湾の水位時刻歴波形

b)　解析条件

ハイブリッドモデルの2D領域及び3D領域境界付近の平面2次元解析(前節)による水位時刻歴波形を図-10に示す．2D解析領域境界付近に主要な津波の第1波が到達する時刻が地震発生後約18分以降であるため，ハイブリッドモデルへの津波の流入開始を地震発生後18分とした．また，3D領域内でほとんど水の動きがなくとも，3Dモデル解析を実施すると解析時間が長くなるため，3D領域境界前面に主要な津波が到達する時刻が地震発生後約31分であることを考慮し，ハイブリッドモデルでの2Dと3Dのカップリング開始を地震発生後31分とした．ハイブリッド領域における初期水位・流速は，地震発生時刻から地殻変動により水の流動が生じるが，主要な津波到達時に比べ影響は小さいため，初期水位をハイブリッドモデル開始時刻の水位(T.P.-1.5m)，初期流速を0m/sとした．解析条件を表-3に示す．比較用に3D領域を配置せず，全て2Dモデルとしたケースも実施した．計算時間は，女川町での最大水位発生時刻が含まれるように，地震発生後48分までとした．ハイブリッドモデルの解析時間は，24コア並列解析で約2週間程度であった．

c)　解析結果

相田[17]による痕跡高に対する計算津波高の再現性評価指標である幾何平均K，幾何標準偏差κは，ハイブリッドケースの場合にK=0.958，κ=1.272，2Dケースの場合にK=1.035，κ=1.343となり，どちらのケースも再現性は良好であるが，ハイブリッドケースの方がばらつきを表すκが1に近い結果となった．3D領域における痕跡高と計算津波高を比較した結果を図-11に示す．最大遡上高

表-3　解析条件

手法	項目	設定値
2D	格子間隔	Δx=Δy=2m(3Dとの境界)→ Δx=Δy=50m(解析領域外縁)
	計算時間間隔	自動調整[注2)] (最大クーラン数0.5)
	粗度係数n	$0.03m^{-1/3}$・s
	乱流モデル	ゼロ方程式モデル
3D	格子間隔	Δx=Δy=2m Δz=2m(初期水面付近1m)
	計算時間間隔	自動調整[注2)] (最大クーラン数0.5)
	乱流モデル	SST k-ωモデル
	壁面条件	No-slip(相当粗度 k_s=0.139m)[注3)] 上端:大気開放
	動粘性係数ν	空気：$1.48\times10^{-5}m^2/s$ 水：$1.00\times10^{-6}m^2/s$
	密度ρ	空気：$1kg/m^3$，水：$1000kg/m^3$
	表面張力	空気-水:0.07N/m

(T.P.+35m)が再現できていない要因は，格子サイズ2mでは局所的な地形の影響の考慮が不十分であったためと考えられる．**図-12**に**図-11**の青丸地点で越村ら[18]により映像記録から推定された浸水深・流速の時刻歴と解析結果を示す．どちらのケースも浸水開始時刻が約2分程度早くなっているが浸水深の大きさ及び時間変化傾向は整合的である．浸水開始時刻のずれは，湾口防波堤をモデル化していないことが要因として考えられる[14]．流速は2Dケースに比べ，ハイブリッドケースの方が速く，特に水面流速は映像記録による推定値に近い結果となっている．

浸水開始直後の流速分布を**図-13**及び**図-14**に示す．地震発生後34.3分においてハイブリッドケースでは2Dケースに比べ，陸域と海域の境界(岸壁部)の流速が速くなっており，岸壁による堰上げに伴って，速い流れが陸上部に流れ込んでいると推察される．36.3分ではハイブリッドケースは2Dケースに比べ，北側での陸上部の津波流速が速く，浸水範囲が広くなっている．反対に2Dケースはハイブリッドケースに比べ，岸壁形状の影響が現れにくくなっていると考えられる．以上から，ハイブリッドケースは2Dケースに比べ，構造物による3次元的な津波挙動の再現性が向上しているものと判断された．

5. まとめ

既往水理模型実験を検証データとして2D・3Dハイブリッドモデルのカップリング位置設定方法を検討した．その結果，2D解析を非線形長波モデルとすると，津波の分散性の影響が大きくなる位置で2Dと3Dをカップリングした場合，その位置での津波波形の前傾化が極端になり，3D領域における津波波形の再現性が低下すること，3D解析に非線形分散波モデルを用いれば，分散性の影響が大きい位置でカップリングしても波形の再現性が確保できることが確認された．また，適切なカップリング位置及び2D解析で非線形分散波モデルが必要か否かは，津波の分散性に関する既往研究(松山ら[13]等)を参考に評価できる可能性が高い．さらに，以上を踏まえてハイブリッドモデルを実津波へ適用した結果，ハイブリッドモデルは平面2次元モデルに比べ，構造物を考慮した陸上の津波遡上の再現性が向上すると推定された．

浸水開始時刻の観測値と計算値の時間差については，湾口防波堤の影響等を確認する必要がある．ただし，防波堤開口部においても3次元的な流れの影響が生じることが推察されるため，3次元領域を複数配置する解析方法も検討する必要がある．また，痕跡高の再現性に着目した格子サイズ，3次元モデルにおける粗度や流体密度の影響，建築物の影響や3次元領域を狭くすることによる計算時間短縮効果について引き続き検討が必要である．

謝辞：本研究は電力10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．

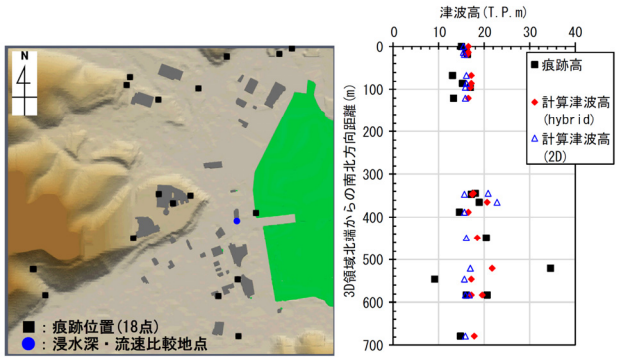

図-11　痕跡高と計算津波高の比較

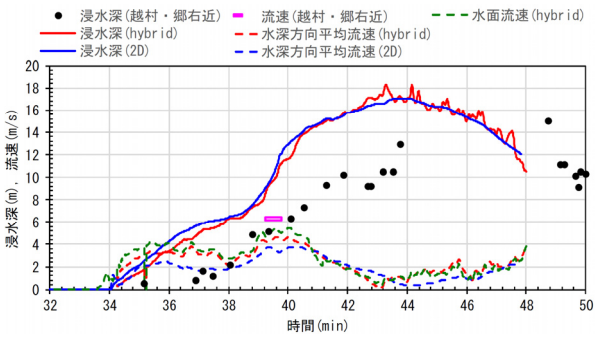

図-12　浸水深・流速時刻歴の比較

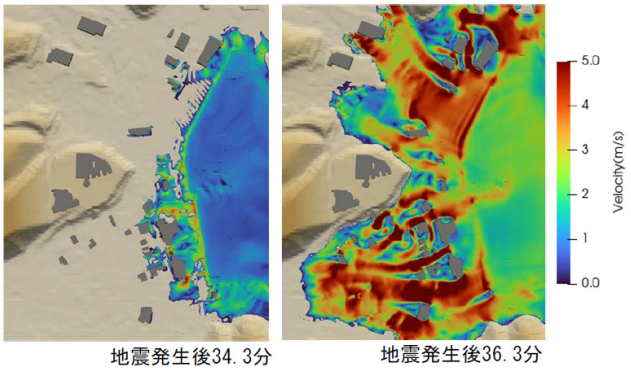

図-13　流速分布(hybrid，水面流速)

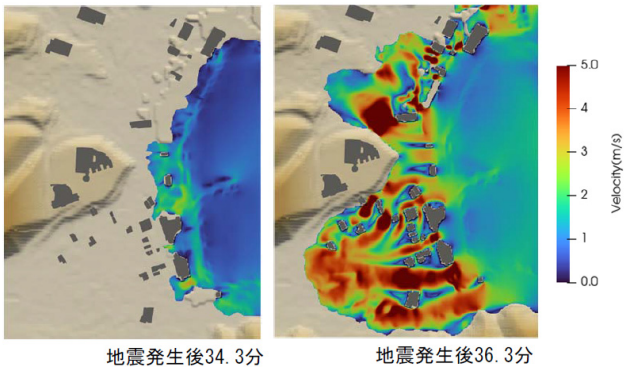

図-14　流速分布(2D，水深方向平均流速)

NOTES

注1) 有川らの水理模型実験データは津波ポータルサイト(https://tsunami-portal.bosai.go.jp/index)のベンチマーク問題で公開されているものを使用した.

注2) 2D と 3D で計算時間間隔は共通である.

注3) 乱流粗面とし, Manning-Strickler の式($k_s^{1/6}/n\sqrt{g} = 7.66$)に基づき，2D の粗度係数$n$に相当する相当粗度$k_s$を設定した.

注4) 内閣府中央防災会議日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会による津波解析データであり，G 空間情報センター(https://front.geospatial.jp/)で公開されているものを使用した.

注5) 国土交通省国土地理院基盤地図情報サイト(https://www.gsi.go.jp/kiban/)の数値標高モデルの 5m メッシュ及び基本項目の建築物の外周線データを使用した.

REFERENCES

1) 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. [Masamura, K., Fujima, K., Goto, C. and Shigemura, T.: Examinations of fluid forces on the structure by using 2D/3D hybrid model, *Proceedings of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol.45, pp.1243-1248, 2001.]

2) 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*, Vol.60, Issue 2, pp.200-224, 2018.

3) 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), Vol.73, No. 2, pp. I_325-I_330, 2017. [Arikawa, T., Seki, K., Oki, Y., Hirano, H., Chida, Y. , Araki, K. , Ishii, K. , Takagawa, T. and Shimosako, K.: Development of high precision tsunami runup calculation method coupled with structure analysis, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 73, Issue 2,pp.I_325-I_330, 2017.]

4) 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.

5) 保坂幸一，松山昌史，加藤勝秀：2 次元・3 次元ハイブリッド津波解析手法に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.77，No. 2，pp. I_19-I_24, 2021. [Hosaka, K., Matsuyama, M. and Kato, K.: Study on Numerical simulation of tsunami by using 2D-3D hybrid model, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 77, Issue 2, pp. I_19-I_24, 2021.]

6) KouKounas, D.: Solvers for boussinesq shallow water equations, *In Proceedings of CFD with OpenSource Software*, Edited by Nilsson, H., 2018.

7) Madsen, P. A. and Sørensen O. R.: A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. *Coastal Engineering*, Vol.18, pp.183-204, 1992.

8) 岩瀬浩之，見上敏文，後藤智明: 日本海中部地震津波の分裂に関する数値計算，海岸工学論文集，Vol.48，pp.361-365，2001. [Iwase, H., Mikami, C. and Goto, C.: A numerical simulation for disintegrated waves of Nihonkai-Chubu earthquake tsunami, *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, Vol. 48 pp. 361-365, 2001.]

9) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2007): 津波評価手法の高精度化研究, 土木学会論文集 B, 63 巻, 2 号, pp.168-177. [Tsunami Evaluation Subcommittee, The Nuclear Civil Engineering Committee, Japan Society of Civil Engineers: Research for developing precise tsunami evaluation methods, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B*, Vol. 63, pp. 168-177, 2007.]

10) Menter, F. R.: Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal*, Vol.32 Issue 8, pp.1598-1605, 1994.

11) 有川太郎: 水理模型実験による防潮壁に作用する孤立波の波圧特性に関する検討, 土木学会論文集 B2（海岸工学）Vol. 71, No. 2, pp.I_889-I_894, 2015. [Arikawa, T.: Consideration of characteristics of pressure on seawall by solitary waves based on hydraulic experiments, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 71, Issue 2, pp.I_889-I_894, 2015.]

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，52p，1982. [Goto, C. and Ogawa Y.: Numerical calculation method using the leapfrog method, *Tohoku University of Engineering Department of Civil and Environmental Engineering Material*, 52p, 1982.]

13) 松山昌史，池野正明，榊山勉，武田智吉: 大陸棚上における津波のソリトン分裂波に関する砕波モデル,海岸工学論文集,Vol.53, pp.226-230, 2006. [Matsuyama, M., Ikeno, M., Sakakiyama, T. and Takeda, T.: Wave breaking model after soliton fission on a continental shelf in tsunami numerical simulation, *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, Vol.53, pp.226-230, 2006.]

14) ファムバンフック, 今津雄吾, 佐川隆之, 長谷部雅伸(2014) : VOF 法を用いた東北地方太平洋沖地震津波の再現と建物の転倒メカニズムの解明, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp. I_156-I_160, 2014. [Phuc, P. V., Imazu, Y., Sagawa, T. and Hasebe, M.: Tsunami smulation using VOF method and falling mechanism of a building in Tohoku-Pacific Coast Earthquake, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 70, Issue 2,pp.156-I_160, 2014.]

15) 佐藤祐子，米山望，奥村与志弘，清野純史 : 杭基礎建物の津波転倒メカニズム検討のための 3 次元津波氾濫解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.72, No.2, pp.I_961-I_966, 2016. [Sato, Y., Yoneyama, N., Okumura, Y. and Kiyono, J.: Three dimentional tsunami analysis for the damage mechanism of the pile-supported rc building, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 72, Issue 2, pp.I_961-I_966, 2016.]

16) Satake, K.,Fujii, Y. Harada, Y., and Namegaya, Y.:Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku Earthquake as inferred from tsunami waveform data, *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol.103, Issue 2B, pp.473–1492, 2013.

17) 相田勇: 三陸沖の古い津波のシミュレーション, 地震研究所彙報, 東京大学, Vol.52, pp.71-101, 1977. [Aida I.: Simulations of large tsunamis occurring in the past off the coast of the Sanriku District, *Bulletin of the earthquake Research Institute*, Vol. 52, pp.71-101, 1977.]
18) 越村俊一, 郷右近英臣: 東北地方における津波浸水範囲および津波被害の調査, 津波工学研究報告, 第 28 号, pp.147-151, 2011. [Koshimura, T. and Gokon, H.: Survey of tsunami inundation area and tsunami damage in the Tohoku region, *Tsunami Engineering research Report*, Vol. 28, 147-151, 2011.]

(Received March 14, 2024)
(Accepted July 18, 2024)

STUDY OF COUPLING POSITION IN NUMERICAL SIMULATION OF TSUNAMI BY USING 2D-3D HYBRID MODEL AND ITS APPLICATION TO ACTUAL TSUNAMI

Koichi HOSAKA, Naoto KIHARA and Kazuma SUZUKI

There is limited knowledge on the appropriate coupling position between the two-dimensional model (2D) and the three-dimensional model (3D) of the 2D/3D hybrid tsunami analysis method, in which the water level and flow rate are transferred in both directions when a 2D model is used for a wide area and a 3D model is used for the land area and around the structure. In this study, simulations of existing hydraulic model experiments were conducted with and without the dispersion term in the 2D of the hybrid model, varying the coupling position. As a result, it was confirmed that the change of tsunami waveform due to dispersion affects the reproducibility of tsunami after the coupling to the 3D model. In addition, the coupling position of the hybrid model was investigated to reproduce the tsunami run-up in Onagawa town by the 2011 Tohoku tsunami, and the comparison with the run-up height records of the tsunami, inundation depth and flow velocity were verified. As a result, it was estimated that the hybrid model can reproduce the tsunami run-up on land with the consideration of structures better than the 2D model.