

## 2次元・3次元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

八千代エンジニアリング (株) 正会員 ○保坂 幸一  
 (一財) 電力中央研究所 正会員 松山 昌史  
 中部電力 (株) 加藤 勝秀

## 1. はじめに

広域を平面2次元(2D)モデル、陸域や構造物周辺を3次元(3D)モデルとする2D-3Dハイブリッド津波解析手法を用いて陸上構造物へ作用する津波波力の評価を行う場合は、計算負荷低減のため3D領域を対象構造物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、海底斜面を伝播する津波を対象に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. 検証データ

有川<sup>1)</sup>による水理模型実験を対象にハイブリッドモデルによる再現計算を行った。図-1に実験水路の概要を示す。造波水路(長さ105m, 幅2.5m, 深さ2.0m)のうち、水路幅を2つに区切り斜面模型が0.78mの幅で設置されている。海域は1/20の1様勾配、陸域は勾配なしの水平床である。図のWgは波高計の設置位置である。構造物は水路陸域に設置されている高さ1.0mの直立壁で、作用波圧が計測されている。計測データは、「津波防災研究ポータルサイト」で公開されているものを使用した。

## 3. 解析手法

本研究では2D-3Dハイブリッド津波解析手法として、OpenFOAMの3次元の非圧縮性不混和二相流を扱うinterFoam(3D)と平面2次元非線形長波理論(2D)を組み合わせたshallowInterFoamソルバ<sup>2)</sup>を基に、著者らの先行研究<sup>3)</sup>でカップリング方法を改良した手法を活用した。2Dと3Dの境界位置で双方向において水位・流量等の物理量を受け渡す2wayカップリング手法である。

解析条件を表-1に示す。比較用に解析領域全体を3Dおよび2Dとしたケースも実施した。図-2の実験の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として「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、Wg1の水位時刻歴波形から津波入力データを作成した。

キーワード 津波, 数値解析, 2D-3Dハイブリッドモデル, カップリング位置, OpenFOAM

連絡先 〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8 八千代エンジニアリング(株) TEL03-5822-6269

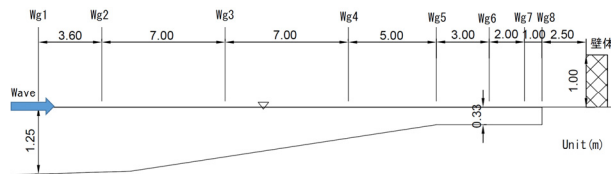


図-1 実験断面図および水位計設置位置

表-1 計算条件

| 解析手法        | 項目   | ハイブリッドケース<br>【shallowInterFoam】  | 3Dケース<br>【interFoam】 | 2Dケース                     |                          |
|-------------|--|--|----------------------|---------------------------|--------------------------|
| 2D          | 計算格子間隔   | $\Delta x=0.16m, \Delta y=0.08m$   |                      | $\Delta x=\Delta y=0.02m$ |                          |
|             | 計算時間間隔   | 最大クーラン数により自動調整   |                      | 0.001s                    |                          |
|             | 離散化スキーム  | 時間発展   | 1次精度陰解法              |                           | Leap-frog法 <sup>4)</sup> |
|             |  | 移流項  | 1次精度風上差分             |                           |                          |
|             | 粗度係数n  | 0.012s/m <sup>1/3</sup>  |                      |                           | 0.012s/m <sup>1/3</sup>  |
|             | 水平渦粘性係数  | ゼロ方程式モデル   |                      | 考慮せず                      |                          |
| 3D          | 計算格子間隔   | $\Delta x=0.16\sim 0.02m, \Delta y=0.08m$<br>$\Delta z=0.04m\sim 0.005m$ |                      |                           |                          |
|             | 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次精度線形風上差分           |                           |                          |
|             | 乱流モデル  | SST k- $\omega$ モデル  |                      |                           |                          |
|             | 壁面条件   | no-slip条件  |                      |                           |                          |
| 動粘性係数 $\nu$ | 空気: $1.48 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ , 水: $1.00 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ |  |                      |                           |                          |
| 密度 $\rho$   | 空気: $1 \text{kg}/\text{m}^3$ , 水: $1000 \text{kg}/\text{m}^3$                                |  |                      |                           |                          |

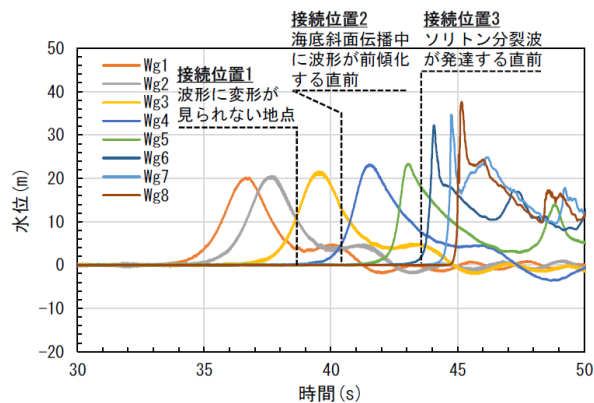


図-2 実験による水位時刻歴

## 4. 解析結果

実験と3Dケースの水位時刻歴波形を図-3に示す。3Dケースの実験波形の再現性は良好である。図-4に2Dおよび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ケースは伝播に伴い、3Dケースで波の前傾化が生じ始める地点(Wg4, 5)で波形の前傾化がより顕著になり、ソリトン分裂波が生じる地点(Wg6~8)では最高水位が

過小評価となった。一方、ハイブリッドケースの接続位置1は、実験再現性はほぼ3Dケースと同等であった。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ケースよりも先にソリトン分裂波が発達する。汀線付近の最高水位は若干過小評価となるが、その差は小さい。接続位置3は、3D領域で急激にソリトン分裂波が発達するがその最高水位は3Dケースに対して過小評価となった。

接続位置1, 3で津波波形の最高水位が生じている時刻の水面水粒子鉛直加速度分布を図-5に示す。ソリトン分裂波が発生している接続位置3では、水面水粒子鉛直加速度が接続位置1に比べ大きくなっている。水面水粒子の鉛直加速度が大きい位置では、2Dから3Dに流れる場合の水位と水平方向平均流速に基づくカップリング方法(2Dの水平方向平均流速に対数則を仮定した水平流速鉛直分布を3D領域に接続している)では水面形が不連続になり、波形の再現性が低下するものと考えられる。

## 5. まとめ

海底地形が津波波形に与える影響が小さく分散性の影響が小さい位置でハイブリッドモデルの2Dと3Dとのカップリング位置を設定することにより、3Dモデルと同等の精度で陸上付近の水位を再現できる可能性が高いことが確認された。分散性の影響が大きい(水面の鉛直加速度が大きい)地点に接続境界を設定すると、2Dと3Dの波形の不連続が顕著になり、ソリトン分裂波の再現性が低下する可能性が高い。

**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。

## 参考文献

- 1) 有川: 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, I\_889-I\_894, 2015.
- 2) Mintgen and Manhart: A bi-directional coupling of 2D shallow water and 3D Reynolds-averaged Navier-stokes models, Journal of Hydraulic Research, pp.771-785, 2018.
- 3) 保坂ら: 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, I\_889-I\_894, 2021.

4) 後藤, 小川: 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.

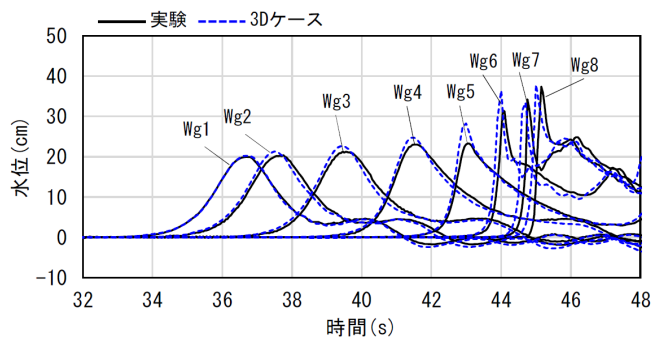


図-3 水位時刻歴 (実験・3D ケース)

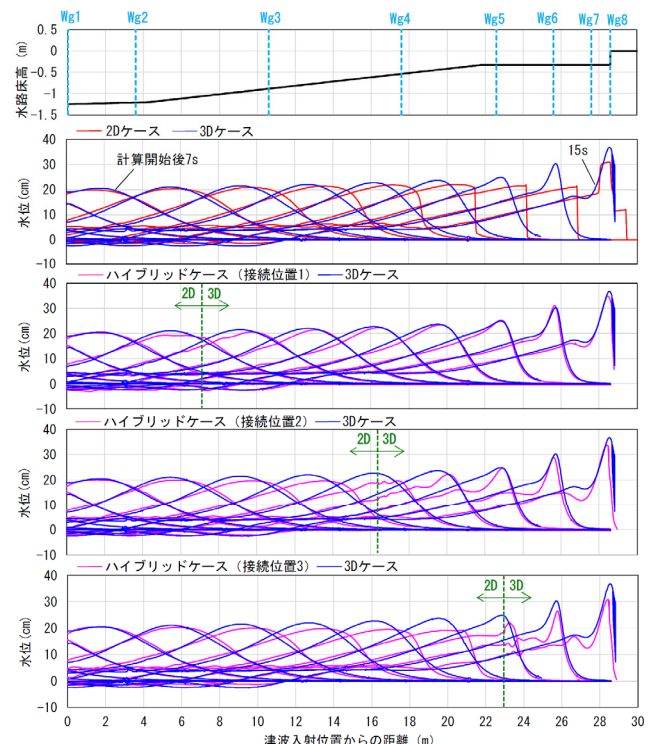


図-4 斜面を伝播する津波の空間波形の比較

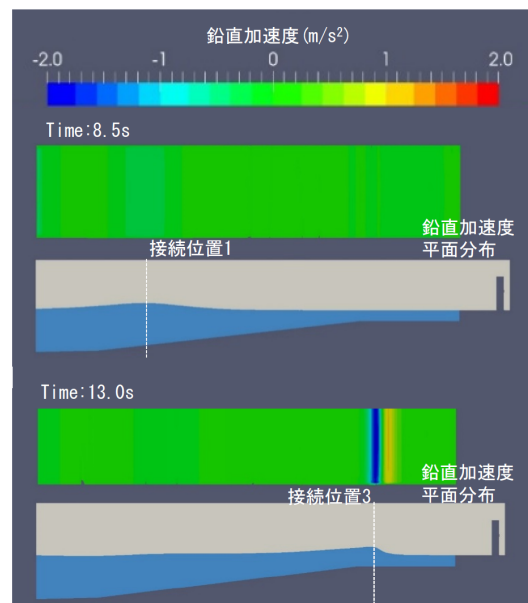


図-5 水面水粒子の鉛直加速度分布