

# 工場内津波浸水予測および対策への 広域3D津波シミュレーションの適用

金井 則之<sup>1</sup>・本橋 英樹<sup>2</sup>・野中 哲也<sup>3</sup>・中村 真貴<sup>4</sup>・  
古村 孝志<sup>5</sup>・原田 隆典<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 新日鐵住金株式会社防災推進部 (〒100-8071 東京都千代田区丸の内 2-6-1)  
E-mail: kanai.94y.noriyuki@jp.nssmc.com

<sup>2</sup> (株) 地震工学研究開発センター主幹研究員 (〒880-0902 宮崎県宮崎市大淀 3-5-13)  
E-mail: motohashi@eerc.co.jp

<sup>3</sup> 正会員 (株) 地震工学研究開発センター代表取締役 (〒880-0902 宮崎県宮崎市大淀 3-5-13)

<sup>4</sup> 正会員 宮崎大学研究員 工学部社会環境システム工学科 (〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西 1-1)

<sup>5</sup> 東京大学教授 情報学環 総合防災情報研究センター (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

<sup>6</sup> 正会員 宮崎大学教授 工学部社会環境システム工学科 (〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西 1-1)

一般的に、津波シミュレーションには、平面二次元津波解析が用いられている。これに対して、高精度な三次元津波解析は、膨大な計算時間を必要とするため、ほとんど使用されていない。本研究では、正確に工場内の津波浸水状況と施設への波力等の津波の影響を予測し、適切な対策を実施するため、ハイブリッドモデルによる高精度な広域三次元津波シミュレーションを実施した。このハイブリッドモデルは、平面二次元津波解析と三次元津波解析を組合せたものであり、波源域から対象地点の工場までの領域に対して、効率よく津波シミュレーションが行える。さらに、本シミュレーションを用いて、工場内の浸水状態を予測するだけでなく、重要施設への津波浸水対策等についても検討した。

**Key Words :** tsunami simulation, three-dimensional analysis, tsunami mitigation, industrial factory

## 1. はじめに

平成 24 年 8 月 29 日に中央防災会議から発表された南海トラフ巨大地震の津波浸水想定によれば、和歌山市沿岸部にある検討対象の工場がほぼ全域浸水する。津波到達まで約 45 分あり人的避難は対応できるが、重要施設の津波対策が必要となっている。発生確率が低いが発生すると大きな被害が想定される災害に対し、経済性を考慮した対策が企業に求められている。

津波対策として防潮堤等が考えられるが、津波が直接襲来する外洋に面した地点と本工場のように紀伊水道に面した地点では、津波襲来の挙動が異なるため、本工場においては防潮堤に要求される仕様が一般的な仕様と異なる可能性がある。そこで、高精度な津波シミュレーションを実施することによって、津波浸水挙動を明らかにした上で必要最低限の津波浸水対策を計画している。

筆者らは、広域の三次元津波解析を効率よく行うため、遠洋海域(津波波源を含む)を計算する平面二次元解析モデルと沿岸海域から陸域までを計算する三次元解析モデルを組み合わせたモデル(以下、「ハイブリッドモデル」と呼ぶ)を提案してきた<sup>1)</sup>。このモデルによって、平面

二次元解析(以下、「2D解析」と呼ぶ)を実施した結果から、計算結果に影響ない範囲の三次元解析の空間と時間を決定し、三次元流体力学解析ツールOpenFOAM<sup>2)</sup>による三次元津波解析(以下、「3D解析」と呼ぶ)を精度よく実施することができる。

本研究では、本工場に対して本ハイブリッドモデルによる広域三次元津波シミュレーションを、スーパーコンピュータ「京」上で実施して、工場内の詳細な津波浸水を予測する。さらに、その予測結果を基に重要施設の津波浸水対策等についても検討する。

## 2. 解析方法と対象領域

### (1) 解析手法の概要

2D解析では、非線形長波理論の方程式をLeap-Frog差分法を用いて計算する(詳細は文献<sup>3)</sup>を参照)。3D解析には三次元流体解析ツールOpenFOAMを用いる。OpenFOAMについては、2004年からGPL社によって公開されたオープンソースであり、検証や適用についての研究が進んでいる。川崎ら<sup>4)</sup>は、OpenFOAMのソルバ

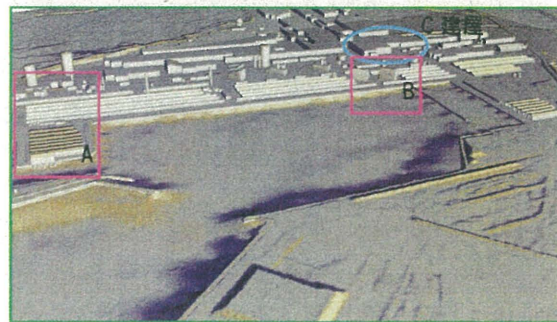
interFoam による自由表面解析手法の妥当性を検討している。本 3D 解析でも、この interFoam を用いる。interFoam は、VOF 法を採用した界面を捕獲する不混和流体の非圧縮性・等温の二相流のソルバであり、Navier-Stokes 方程式と連続の式を有限体積法で空間を離散化し、PIMPLE 法により圧力と流速を計算する手法である。また、時間の離散化には Euler 1 次精度陰解法を、空間の離散化には二次精度の中心差分を採用している。

(2) 対象領域および 3D 解析モデル

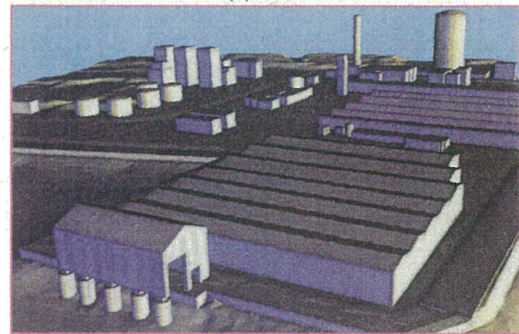
沿岸海域から陸域の工場までの領域 (図-1 の黄色枠内: 4.9km×6.9km) を、3D 解析の対象領域として、広域三次元津波シミュレーションを実施する。図内には、2D 解析の最小メッシュサイズ 10m の領域も示している。なお、3D 解析では解析範囲および造波条件を考慮して、図-1 に示すように 2D 領域と異なり約 45 度回転させた領域とした。3D 解析においては複雑な地形と建物の実形状を再現するため、国土地理院の 5m メッシュの標高データと日本水路協会の海図データおよび航空写真、工場内図面などを基に、工場周辺の防波堤、防潮堤、工場内の建物等のモデル化を行った。図-2(a)に 3D 解析領域の港湾付近 (図-1 の緑線で囲む領域)、図-2(b)に同図(a)内の A 領域の三次元メッシュ図を拡大して示す。メッシュサイズについては、沿岸海域を 5m (湾内は 3m)、陸域を 3m としている。さらに、陸上の構造物周辺についてはリメッシュ機能を使って最小メッシュサイズを 75cm とした。後述する津波浸水対策後の通路幅に対しては、10 分割程度のメッシュモデルとなっている。このようにして作成した 3D 解析領域全体のメッシュ数は、約 2 億となる。



図-1 3D 解析領域の設定



(a) 全体



(b) A の拡大図

図-2 3D 解析領域の三次元メッシュ図 (約 2 億メッシュ)

3. 広域三次元津波シミュレーションの実施

(1) 平面二次元解析の実施

津波波源モデルとして、中防防災会議から公表された南海トラフの M9 波源モデルのケース 3 (対象工場において最も津波高さが高いケース) を用いることとし、この波源モデルによる 2D 解析を実施する。

(2) 造波境界と初期値の設定

一般的な三次元流体解析においては、一造波境界で、一方向の入射がほとんどである。しかし、津波の場合は、沿岸部の複雑な地形の影響を受け、多方向からの波が干渉・屈折しながら襲来してくるため、一方向の造波 (入射) 境界では不十分である。そこで、3D 解析の境界に対し、図-1 に示したように境界を複数 (Bn, Ln, Rn) に分け、複数多方向流入可能な造波境界を提案してきた<sup>5)</sup>。

これによって、複数の造波境界から、時々刻々と変化する津波 (2D 解析結果) を、正確に 3D 解析の内部領域 (3D 領域) へ流入させることができる。なお、ネスティング法を用いて 2D 解析と 3D 解析を統一的に解くこと (two-way) も可能である<sup>6)</sup>が、本解析法は広域を効率よく解くため、2D の解析結果を用いて 3D 解析だけを実行する one-way である。

複数の造波境界には、2D 解析の水位と流速ベクトルを時間の関数として、ディリクレ条件で与えた。また、流入側の流れの連続性を保つために、圧力をノイマン条件とした。一方、複数の透過境界にも、圧力の混合条件を設け、境界液面が 2D 水位以下ではノイマン条件を適用させ、2D 水位より高い場合はディリクレ条件で境界の圧力を制御した。透過境界の流速には、移流の放射条件を適用させた。

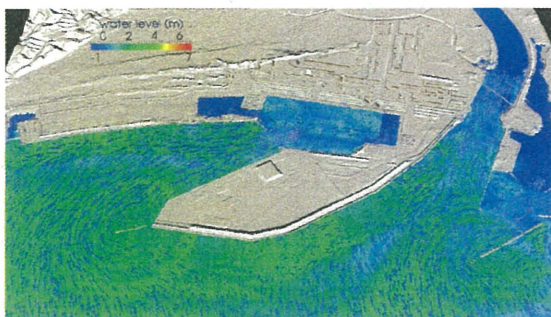


図-3 津波襲来直前の沿岸付近の水位分布  
(地震発生 50 分後)

3D 内部領域の初期値については、境界の連続性を保つため、3D 解析の開始時（地震発生から 50 分後）の 2D 水位と流速の空間分布を内挿補間によって、3D 解析内部領域に設定した。流速の鉛直方向分布としては、2D 解析の近似と同様に一様と仮定した。図-3 に、3D 解析領域に設定した初期値（水位と流速ベクトル）を示す。

(3) 計算条件の設定

3D 解析の領域上の境界点（図-1 内の B1～B6）における 2D 解析結果の水位変化を図-4 に示す。3D 解析は、2D 解析結果を基に、津波浸水範囲が最大と予想できる第 1 波を含む 900 秒間（地震発生から 50 分後の 15 分間）で行った。また、解析上の安定性を配慮し、2D 波形の流入成分（内部領域に入る成分）のみを入射させ、流出成分（境界から外部に引き出す成分）については 3D 解析を制御させないこととした。なお、3D 解析の内部領域からの流出波は、複数の透過境界を介して自由に透過できる。

(4) 計算環境

本 3D 解析は広域に対する全体系の三次元津波解析より効率的であるが、通常の 2D 解析によるシミュレーションより、膨大な計算時間を必要とする。そのため、本研究では理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用し、並列処理を行って計算を実施した。本解析規模は約 2 億メッシュであり、これまでの経験からその規模のモデルを効率よく解くため、384 計算ノード（3072 個のプロセス）を使用した。

(5) 3D 解析の結果および考察

a) 浸水状態

地震発生から 62 分（50 分を基準に 700 秒）後の工場内（図-2(a)内の A 領域）の津波浸水状態のスナップショットを図-5 に示す。この図から、工場全体ではないが、工場内に津波が浸水しているのがわかる。特に、詳細な津波浸水状態（工場内の建物間の路上の流れ、建物の背後に回り込む等の三次元的挙動）が確認できる。

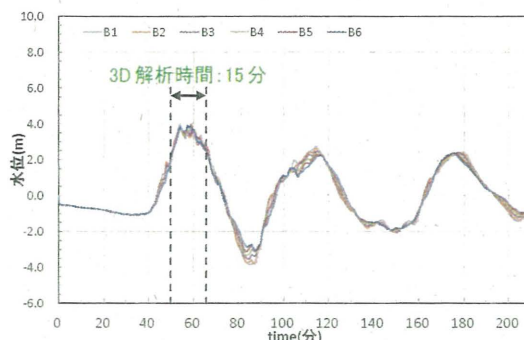


図-4 2D 水位波形と 3D 解析の区間

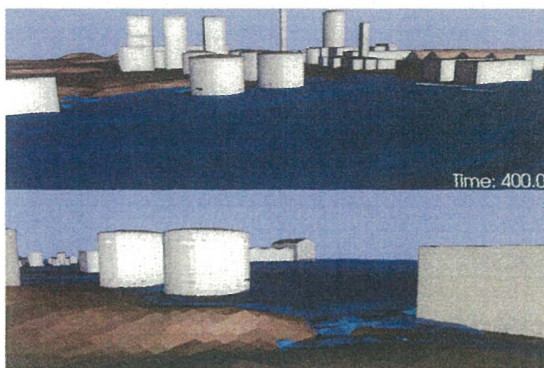


図-5 3D 解析の津波伝播様子（図-2 の A 領域）

なお、本シミュレーションでは、約 57.5 分で工場内の浸水が始まり、約 64.2 分で津波浸水の勢いは弱くなり浸水範囲は最大となった。この浸水範囲は、中央防災会議から平成 24 年 8 月 29 日に公表された工場内の浸水範囲より大幅に減少している。

b) 2D との比較

工場内の陸域以外の海域や河川の代表点（図-1 内の評価点）において、2D 解析と 3D 解析の結果を比較して図-6 に示す。

入射境界に近い河川の河口沖の P01 地点（同図(a)）においては、2D 解析と 3D 解析の結果が概ね一致している。すなわち、この地点は、津波が襲来して堤防等に反射することなく川を遡上するため構造物等による三次元効果は小さい地点といえる。また、本 3D 解析の境界においては、グラフの 0 秒付近の水位が 2D 解析と 3D 解析でほぼ一致していることから 2D 解析結果の波形（水位と流速）が正確に入射されていることもわかる。なお、100 秒弱まで水位が短周期で振動しているのは、3D 解析の初期状態の流速設定において、2D 解析結果の流速を用いているためであり、釣り合うまで振動する現象となった。

工場の湾内 P02 地点（同図(b)）においては、水位上昇が 2D 解析と 3D 解析では異なり 3D 解析の水位上昇が急で、その最大水位が 2D 解析より約 1m 高い結果となった。この水位差が出た理由として次のことが考えられる。

2D解析の地形モデルは、国土地理院から公開されている地盤データを基にして作成されたもので、湾に面した防潮堤や構造物が正確にモデル化されていない。そのため、2D解析において、襲来した津波が湾の防潮堤を早く越流して工場内に広く浸水し、湾内の水位が3D解析と比較して上昇しなかったと考えられる。一方、3D解析は、正確に地形モデルを作成しているため、津波が平均的に広範囲に浸水するのではなく、防潮堤や構造物の間を抜けて浸水することになり、湾内に溜まる傾向を示し湾内の水位上昇が2D解析より急で最大水位も高くなったといえる。特に、護岸付近のマウンドによる津波遡上の抑制効果の影響が大きいと考えられる。なお、2D解析でも同様に細かいメッシュサイズにすれば、3D解析と同様な結果になる可能性はあるが、容易に本3D解析ほどメッシュサイズを細かくできず、3D解析では有限体積法で離散化して非構造格子（実構造物に近い形状）となっているため、本2D解析で同様な結果を出すのは困難であると考えられる。

工場の護岸からある程度離れたP3地点（同図(c)）においては、概ね3D解析と2D解析結果は一致するが、後半は3D解析の水位が高くなり約1mの差が発生した。これは、前述したように3D解析の水位が湾内で2D解析より高くなり、その高くなった影響がP3地点にも現れたと考えられる。なお、入射境界に近い地点P3は、図-1において前面(B1~B6)および左側面(L1~L4)からの流入があり、同図(c)の前半まで2D解析と3D解析がよい精度で一致していることから、多方向流入がうまく処理されているといえる。

#### 4. 津波対策ブロックに対する三次元津波解析の検証

##### (1) 検証条件

津波浸水対策として、対策ブロックの設置（例えば1m程度のサイコロ状のブロックを必要に応じて配置）、防潮堤の嵩上、および防波堤の強化等が挙げられる。特に対策ブロックの設置は、工場内の津波浸水対策に対して非常に有効であると考えている。具体的には、この対策ブロックを適切な場所に設置することにより、津波の侵入を低減させるという方法であり、減災という考え方に従ったものである。

ここでは、津波が遡上して対策ブロックに衝突する現象が、本3D津波解析で正確にシミュレーションできるかどうか、過去に実施された模型を用いたの水力実験<sup>4)</sup>により検証することにした。

対策ブロックと類似の構造物を用いた水力実験を図

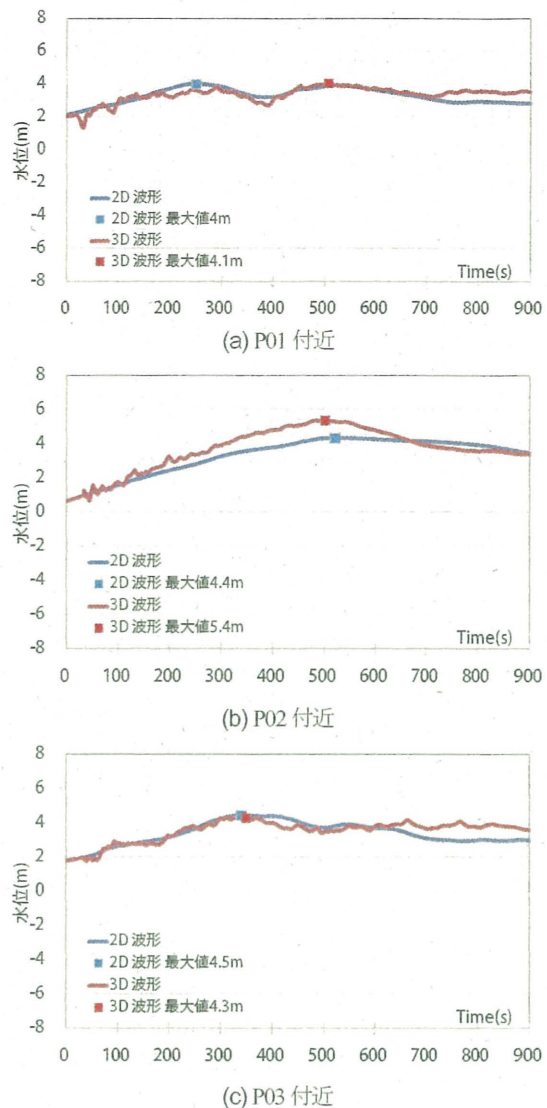


図-6 2D解析結果との比較

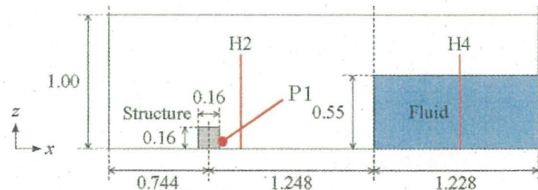


図-7 三次元段波-構造物衝突問題の模式図<sup>4)</sup>

-7に示す。文献<sup>4)</sup>を参考にパラメータ  $C\alpha$  を0.5に設定して、OpenFOAMによる三次元流体解析を実施する。

##### (2) 検証結果

三次元流体解析結果のスナップショットを図-8に示す。この図から、水が勢よく模型のブロックに当たり、跳ね上がっていることがわかる。また、ブロック手前の位置H2（図-7参照）における水位変化を図-9(a)、ブロックに当たり大きな波力が発生する位置P1における波圧変化を同図(b)に示す。これらの図から、実験とよい精

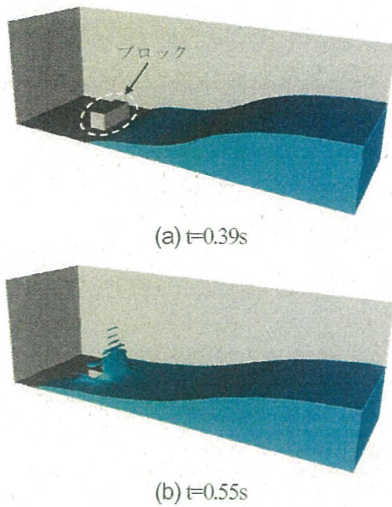
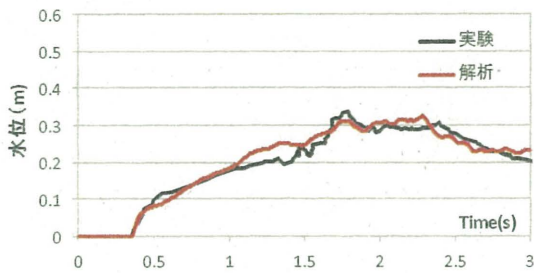
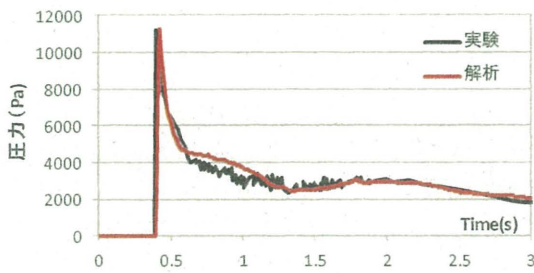


図-8 三次元段波一構造物衝突問題の計算結果 ( $C\alpha=0.5$ )



(a) H2 地点の水位変化



(b) P1 地点の圧力変化

図-9 構造物前面における時間変化

度で一致していることがわかり、本解析法により、実際の津波の浸水状態および対策ブロックへの衝突現象は再現できると思われる。特に、2D 解析では直接得られない津波波力が精度良く求まっているといえる。

## 5. 津波浸水対策を実施した三次元津波シミュレーションの実施

### (1) 津波浸水対策方法

本検討の津波浸水対策は、重要施設 (図-2(a)内の C 建屋等) を守るため、前述の対策ブロックを設置 (図-10) して通路幅を制限 (通路幅 10m) すること、および河川

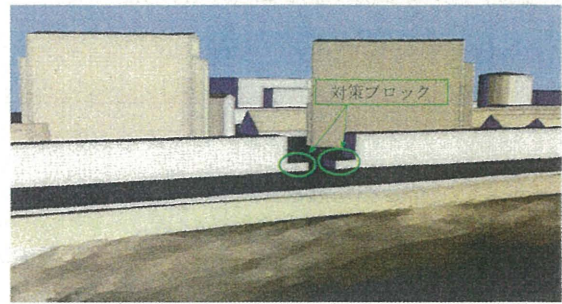


図-10 対策後のメッシュ図



(a) 現状



(b) 対策後

図-11 現状と対策後の浸水状態比較

からの津波侵入を防ぐように、河川に沿った防潮堤 (図-1 内の L 領域) の嵩上 (約 1m) も実施することである。なお、この図は、図-2(a)内の B 領域を拡大した図であり、対策ブロックの設置により通路幅は狭くなるが、通常の業務に支障はない。

### (2) 津波浸水対策後の三次元津波シミュレーション

前述の津波浸水対策を実施した場合の三次元津波シミュレーションの結果 (地震発生から 50 分を基準に 850 秒後、津波浸水深さ 10cm 以上を白~青色で着色) を対策前の現状と合わせて図-11 に示す。この図から、最重要施設への浸水が低減できているのがわかる。特に、図内の点線で囲まれた領域では、大幅に浸水が低減できている。

また、対策ブロックに作用する波力についても本シミュレーションにより算出することができ、その例を図-12 に示す。この図は、図-10 内の対策ブロック (前面および背面) に作用する波圧 (単位幅当たりの波圧) の

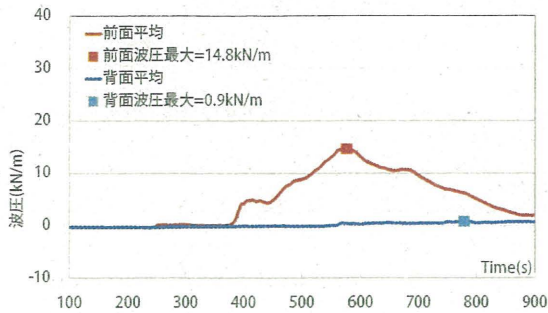


図-12 対策ブロックに作用する波圧

時刻歴を示したものである。ブロックを水平方向に移動させる力（前面波圧－背面波圧）および津波浸水深さが平均 30cm 程度であることから、本対策ブロックは十分に抵抗できるといえる。さらに、対策ブロックだけでなく工場内の重油タンク群に対しても、文献7)を参考にし、同様な津波波力の評価を行い、タンク内容液の流出やタンクの崩壊等が起こらないことを確認している。

## 6. おわりに

本研究では、本ハイブリッドによる広域三次元津波シミュレーションを、実際の工場に適用した。その結果、工場内の詳細な津波浸水を予測した。また、対策ブロックの設置や防潮堤の嵩上等による重要施設の津波浸水対策に対しても、本シミュレーションを有効に活用することができた。現在、この結果を踏まえて、実際に本津波浸水対策の実施に向けて検討中である。

このように、本シミュレーションを用いれば、国と同じ平面二次元解析の津波伝播挙動をそのまま三次元解析の境界に反映させることができるため、国の津波波源から対象地点までの津波挙動や津波が遡上してからの詳細な浸水状況が正確に評価でき、かつ、施設に作用する津

波の波力が正確に算出できることから、本シミュレーションは今後の津波防災・減災対策の大幅なコスト縮減に役立つ手法であるといえる。

なお、本研究における 3D 解析は、前述したようにもつとも影響が大きいと予想される第 1 波しか行っておらず、より正確な津波浸水状態を評価するには、第 2 波、第 3 波を含む長時間のシミュレーションの実施が必要であり、今後の課題としたい。

**謝辞：**本論文の結果は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものである（課題番号:hp140045）。また、水理実験の再現解析方法について、名城大学川崎浩司特任教授にご教授いただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 本橋英樹, 菅付紘一, 野中哲也, 川崎浩司, 原田隆典: 小泉大橋の津波被害再現解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, I\_831-I\_835, 2013.
- 2) OpenFOAM Foundation: OpenFOAM User Guide, <http://www.openfoam.org/docs/user/>, 参照 2013-11-07.
- 3) 後藤智明, 小川由信: Leap-forg 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資料, P52, 1982.
- 4) 川崎浩司, 松浦翔, 坂谷太基: 3 次元数値流体力学ツール OpenFOAM における自由表面解析手法の妥当性に関する検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 69, No. 2, I\_748-I\_753, 2013.
- 5) 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, I\_181-I\_185, 2014.
- 6) 正村憲史, 藤間功司, 後藤智明, 飯田邦彦, 重村利幸: 2 次元・3 次元ハイブリッドモデルを用いた津波の数値解析, 土木学会論文集, No.670, II-54, pp.49-61, 2001.
- 7) 菅付紘一, 原田隆典, 野中哲也: 貯蔵タンクに対する地震・津波被害の判定方法, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 70, No. 2, I\_822-I\_827, 2014.

## Tsunami Flood Prediction and Its Application of Mitigation of an Industrial Factory using Wide Scale 3D Simulation

Noriyuki KANAI, Hideki MOTOHASHI, Tetsuya NONAKA, Masaki NAKAMURA, Takashi FURUMURA and Takanori HARADA

Generally, two-dimensional tsunami analysis is used for the tsunami simulation. On the other hand, since huge computation time is needed, highly precise three-dimensional tsunami analysis is not usually used. In this study, the highly precise wide scale three-dimensional tsunami simulation has been carried out by the hybrid model in order to predict correctly the tsunami flood situation in a factory. This hybrid model combines two-dimensional tsunami analysis and three-dimensional tsunami analysis, and can perform a tsunami simulation efficiently from a wave source region to the factory of an object point. Moreover, the effect of the mitigation methods have been showed concretely against tsunami flood of important industrial factory using this simulation.