

**拡張スライスグリッド SPH 粒子法コードによる  
建屋への浸水を含む大規模津波遡上解析**  
Large Scale Tsunami Run-up Simulation using an expanding slice grid SPH code  
Taking Consideration of Flooding into Buildings

榎野 泰河 (九州大・工) 浅井 光輝 (九州大・工) 古市 幹人 (海洋開発研究機構) 西浦 泰介 (海洋開発研究機構)  
Taiga MAKINO, Kyushu University  
Mitsuteru ASAI, Kyushu University  
Mikito FURUICHI, JAMSTEC  
Daisuke NISHIURA, JAMSTEC  
FAX: 092-802-3371, E-mail: makino@doc.kyushu-u.ac.jp

The Tsunami caused by the 2011 Tohoku Earthquake caused tremendous damage. We should prepare carefully for future huge earthquakes such as the Nankai trough earthquake in order to prevent damages from these earthquakes and tsunamis. Due to future tsunami disaster prevention planning, it is strongly desired a simulation tool that accurately predicts possible damage level for structures and human resources in the inundation area. To achieve that goal we proceeded the development of large scale tsunami run up simulation using 3-dimensional particle method, which is capable for accurate prediction of large scale inundation area. In this paper, a high fidelity tsunami run-up model in the part of Fukushima nuclear power plant, which can resolve the inside of structure of the power plant, is simulated using the expanding slice grid method.

## 1. はじめに

東日本大震災では観測史上最大の津波が発生し、東北地方の沿岸部を中心に、甚大かつ広域的な被害をもたらした。最大クラスを想定した災害への備えが不十分であったことが指摘されており、想定し得る最大規模の浸水等へ対策の措置が講じられている。減災のためには、津波による沿岸地域への安全性・危険性を把握することが重要であり、特にソフト防災の一環として行う津波防災地域づくりにおいては、浸水域が的確に推定できる手法が必要とされている。本研究では、可能な限り正確に津波被害を想定するための、特に遡上後の浸水までを含む津波解析手法を開発することを目的とし、1. 津波初期水位 設定方法の見直し、2. 粒子法による 3 次元遡上解析<sup>1)</sup>の高詳細化の 2 点を実施した。

## 2. 動的負荷分散機能付き陽的 ISPH 法

解析手法として安定化 ISPH(Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics)法を陽解法化した陽的 ISPH 法を用い計算コストの削減を試み、また拡張スライスグリッド法による動的負荷分散技術と組み合わせることで高詳細な津波遡上解析を 3 次元で実施することを可能とした。

### 2. 1 安定化 EISPH 法

Asai<sup>1)</sup>らは、非圧縮性流体解析用の ISPH 法において、解析精度と安定性の両者の向上を目的とし、微圧縮性を一部許容した下記の圧力ポアソン方程式を提案した。

$$\langle \nabla^2 p_i^{n+1} \rangle \approx \frac{\rho^0}{\Delta t} \langle \Delta \cdot u_i^* \rangle + \alpha \frac{\rho_i^0 - \langle \rho_i^n \rangle}{\Delta t^2} \quad (1)$$

$$\langle \nabla^2 p_i^{n+1} \rangle = \sum_j m_j \frac{2 r_{ij} \nabla W(r_{ij}, h)}{\rho^0 r_{ij}^2 + \eta^2} (p_i^{n+1} - p_j^{n+1}) \quad (2)$$

表記の簡便化のため、 $A_{ij}$ ,  $B_i$  を、圧力ポアソン方程式の係数行列とソース項とすると次式により記述できる。

$$p_i^{n+1} = \frac{B_i + \sum_j A_{ij} p_j^{n+1}}{\sum_j A_{ij}} \quad (3)$$

$$A_{ij} = m_j \frac{2 r_{ij} \nabla W(r_{ij}, h)}{\rho^0 r_{ij}^2 + \eta^2} \quad (4)$$

$$B_i = \frac{\rho^0}{\Delta t} \langle \Delta \cdot u_i^* \rangle + \alpha \frac{\rho_i^0 - \langle \rho_i^n \rangle}{\Delta t^2} \quad (5)$$

式(3)において、 $n$  ステップから  $n+1$  ステップまでの微小な時間間隔では圧力の変動が小さいものと仮定し、右辺中の近傍粒子の圧力は前ステップで近似できるものとするれば、圧力が陽的に更新できる。

$$p_i^{n+1} = \frac{B_i + \sum_j A_{ij} p_j^n}{\sum_j A_{ij}} \quad (6)$$

以上、安定化 ISPH 法における圧力の陰的評価箇所を簡略化し陽的な評価を行う手法を陽的 ISPH 法と呼ぶ。

### 2. 3 2次元スライスグリッドによる動的負荷分散

領域分割型の並列解析により大規模解析を実施した。並列化効率を向上するには、動的負荷分散を考えた領域分割方法の導入が必要である。本研究では、深さ方向には浅く広領域な氾濫解析が必要のため、深さ方向には分割せず氾濫する平面方向のみに分割する 2 次元スライスグリッドによる分割を用いた (Fig. 1 参照)。領域分割

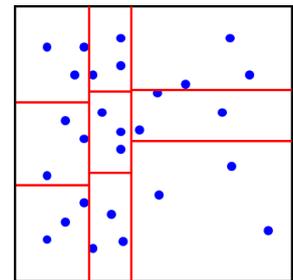


Fig. 1 2D slice grid method

方向を  $xy$  平面とすると、まずは  $x$  方向に ( $i=1,2,3,\dots,N_x$ ) の列要素に一次元領域分割を行い、その後に  $y$  方向には各列ごとに最適な分割 ( $j=1,2,3,\dots,N_y$ ) を行うのがスライスグリッド法である。各要素は袖領域を持ち、その領域の粒子群は MPI 通信により整合性を毎ステップ担保する。

粒子法による計算では、時間とともに粒子配置が大きく変動するため、適切な領域を更新する動的負荷分散が必要となる。粒子法の並列計算では、粒子数を均等化すること

動的負荷分散を実現することが多い。しかし、自由表面近傍、壁粒子近傍、内部領域では計算コストが異なるため、粒子数の均等化だけでは適切な負荷分散が実現できないことがある。そのため、本研究では通信を含んだ計算時間を均等化するため、偽ニュートン法による動的負荷分散手法を適用した。

## 2. 4 拡張スライスグリッド法

一般的な粒子法では、壁領域までを粒子離散化した解析モデルを用いることが多い。津波遡上現象では、時間とともに解析領域が拡張していくが、解析前から浸水が想定されるすべての壁粒子を事前に用意していく必要がある。このため、必要ない領域までも粒子データとして記憶しておき、計算機上のメモリを圧迫するだけでなく、計算効率を落とす原因となり得る。そこで本研究では、前述の2次元スライスグリッドの対象領域を水域のみに限定し、津波遡上に併せて必要となる壁粒子を逐次拡張する拡張スライスグリッド法へと改良した。

## 3. 解析対象

本研究では建物内部への浸水解析を行う事を目的に、2011年東日本大震災による津波で浸水した福島第一原子力発電所を解析対象として設定し、1号機建屋内部の浸水解析を行った。対象モデルの大きさはFig. 2に示すように326m × 537mとなっている。粒子径には、建屋内部を解像するための必要最低限の値と考え得る30cmを採用した。建屋内部の詳細図はFig. 3に示す通りである。その他粒子数及び解析条件についてはTable.1に示す。また、2次元スライスグリッドによる動的負荷分散を行うため、本研究では、計算領域を100分割しており、50ノードを用いて計算を行った。

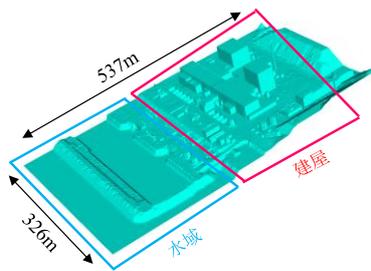


Fig. 2 Fukushima Nuclear Power Plant

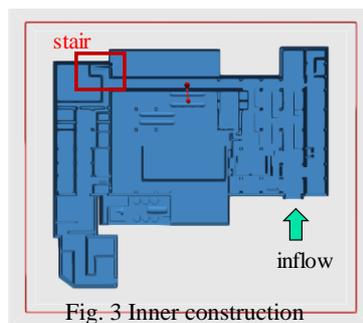


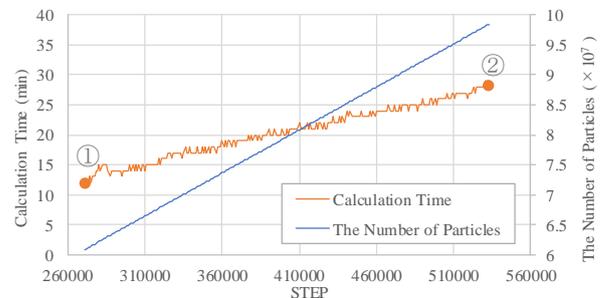
Fig. 3 Inner construction

Table. 1 Calculation condition

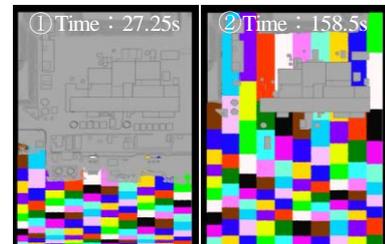
|          |       |            |
|----------|-------|------------|
| machine  |       | Camphor2   |
| particle | wall  | 23,710,256 |
|          | water | 28,500,186 |
|          | total | 53,088,027 |
| dt       |       | 0.0005     |
| $\alpha$ |       | 0.0002     |
| nodes    |       | 50         |

## 4. 解析結果

提案した拡張スライスグリッド法による動的負荷分散を考慮した陽的 ISPH 法の性能評価をこの福島第一原子力発電所の津波遡上解析を通して検証した。本解析モデルでは、遡上現象だけでなく、建屋の内部への浸水までを含んだ高詳細なモデルになっており、それに伴い現象も複雑な例題である。解析モデルにおける粒子間隔は30cmとすることで建屋内部までの詳細な形状を表現した。初期粒子数は5,300万粒子であり、追加して流入させる水粒子を含めると最終的には1億規模の粒子モデルとなる。しかし安定化EISPH法により計算負荷を低減したアルゴリズムを用い、さらには拡張スライスグリッドによる動的負荷分散技術を併用することで、50ノード程度の計算資源での解析を可能とした。各時間ステップでの計算時間と要した粒子数の時間発展の様子をまとめてFig.4に示す。津波流入により粒子数が線形的に増加しているが、計算時間は単調には増加しておらず、ほぼ一定となるように制御している様子が伺える。



(a) The relationship between calculation time and number of particles



(b) The area of responsibility for the process

Fig. 4 Calculation efficiency

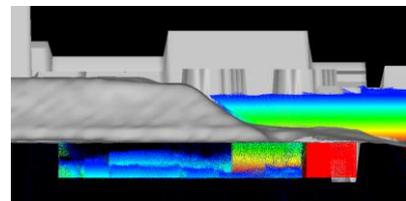


Fig. 5 Analysis result (inner construction)

## 5. 参考文献

- 1) 小笠原圭太, 浅井光輝, 古市幹人, 西浦泰介: 大規模津波遡上解析に向けた安定化 ISPH 法の陽的時間積分スキーム, 土木学会論文集 A2, Vol 73(2), I\_397-I\_404, 2017
- 2) M. Asai, A.M. Aly, Y. Sonoda, and Y. Sakai: A stabilized Incompressible SPH method by relaxing the Density invariance condition, Journal of Applied Mathematics, vol.2012,139583,pp 1-24, 2012