

拡張スライスグリッドを用いた SPH 法による建屋への浸水を含む大規模津波遡上解析

九州大学大学院	学生会員	○	槇野泰河
九州大学大学院	正会員		浅井光輝
海洋研究開発機構			古市幹人
海洋研究開発機構			西浦泰介

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。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¹⁾の高詳細化の 2 点を実施した。

2. 動的負荷分散付き陽的 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

Asai²⁾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、下記の圧力ポアソン方程式を提案した。

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

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

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。

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

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

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

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とすれば、圧力が陽的に更新できる。

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

以上の手法を陽的 ISPH 法と呼ぶ。

2. 2 2次元スライスグリッドでの動的負荷分散

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、冗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。領域分割方向を x , y 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 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、時間と共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、粒子数を均等にすることで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。

キーワード：粒子法、陽的 ISPH 法、拡張スライスグリッド、津波遡上解析、浸水解析

連絡先：〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地、E-mail：makino@doc.kyushu-u.ac.jp

2. 3 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、時間と共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全ての壁粒子を事前に用意しておく必要がある。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ことを目的に、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、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326m×537mとなっている(図-1)。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図-2に示す通りである。粒子数及び解析条件については、表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。

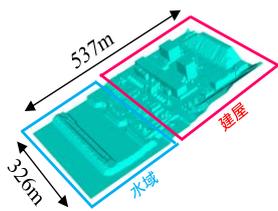


図-1. 解析モデル



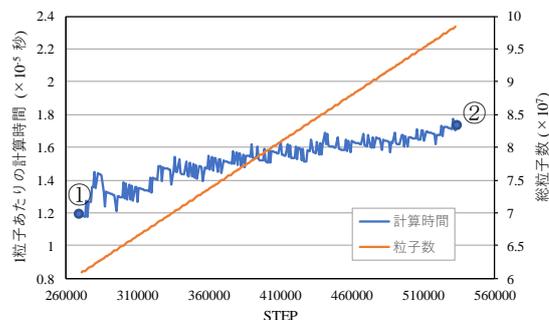
図-2. 建屋内部構造

表 1. 計算条件

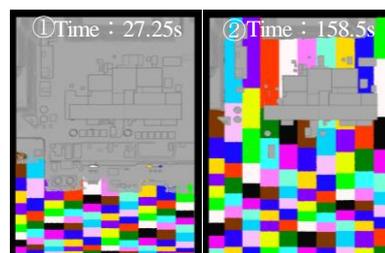
計算機		Camphor2
粒子数	壁	23,710,256
	水	28,500,186
	合計	53,088,027
時間増分		0.0005
α		0.0002
ノード		50

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 法の性能評価を実施した。本解析モデルでは、遡上現象だけでなく、建屋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、現象も複雑な例題である。初期粒子数は5,300万粒子であり、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 法及び、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事で、50ノード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図-3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、計算時間の増加は鈍化しており、動的負荷分散が機能し、計算効率が向上する様子が伺える。



(a) 計算時間と総粒子数の関係



(b) 各プロセス担当領域

図-3. 計算効率の検証

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