

# 大規模津波遡上解析に向けた ISPH 法の高速度化アルゴリズムと並列解析

九州大学大学院 学生会員 ○ 藤本 啓介  
 九州大学大学院 正会員 浅井 光輝  
 九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

## 1. はじめに

2011年3月11日に起きた東日本大震災での津波被害の教訓から、沿岸地域の防災・減災技術の再検討が急務である。安全・安心な沿岸地域を形成するには、津波被害を事前に精緻に想定し、十分な強度を確保した防波堤を構築する必要がある。本研究では、沿岸構造物の設計援用を目的とした新規の流体-構造連成シミュレータの開発を進めている。流体解析にはメッシュフリー解析法の一つである SPH 法、構造解析には大変形解析までを対応可能な非線形有限要素法を採用したことが開発シミュレータの特徴である。本報では特に、非圧縮性流体解析用に開発された Incompressible SPH (ISPH) 法の改良案である安定化 ISPH 法の高速度化アルゴリズムについて述べ、その並列化効率の検証結果を報告する。

## 2. 解析手法の概要

SPH 法は、格子を必要としない粒子型解法の一つであり、粒子上（計算点）に解くべき物理量を与える。SPH 法の詳細は文献[1]に委ねる。本研究で採用した ISPH 法では、圧力ポアソン方程式の解法と近傍粒子検索に計算時間の多くを費やす。本稿では近傍粒子探索手法についてのみ議論する。

### 2.1 近傍粒子の探索手法

粒子探索手法として、all-pair 探索、linked-list 探索、tree 探索の3つの探索アルゴリズムが代表的である。表-1 に各手法の計算回数を示す。ここでは、tree 探索の一種である KDtree 探索と、linked-list 探索の2つの探索アルゴリズムの概要を示す。

#### (1) KDtree 探索

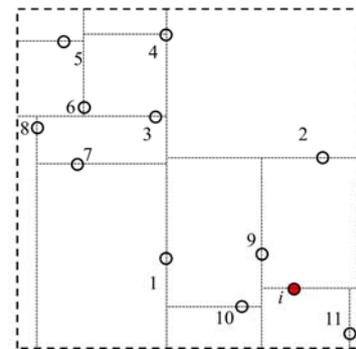
KDtree 探索とは、K 次元の空間を座標系の垂直軸に沿って分割する手法で、図-1(a)の KDtree の構造を二分木で示したものが図-1(b)である(簡便のため2次元木を仮定する)。この KDtree を正しく構築すれば、レベル  $i$  の節点はレベル  $i+1$  の長方形の約2倍の長方形で表すことが可能であり、近傍粒子を  $O(N \log N)$  の計算で効率的に見つけることができる。

#### (2) linked-list 探索

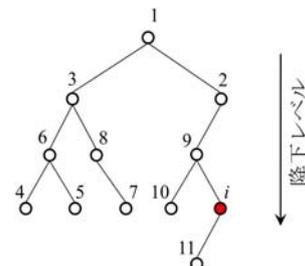
linked-list 探索アルゴリズムは、図-2 に示すバックグラウンドセルを用いることで、検索すべき近傍粒子の候補を限定する。SPH 法へと適用するには、セルの各辺の大きさを粒子径の2倍とすれば、検索候補となる粒子は対象粒子が属するセルと隣接するセルのみに限定でき、 $O(N)$  の演算で近傍粒子を検索できる。

表-1 各手法における計算回数

手法	all_pair	linked_list	tree
計算回数	$O(N^2)$	$O(N)$	$O(N \log N)$



(a) KDtree による領域細分化



(b) KDtree の構造

図-1 KDtree 探索の概略

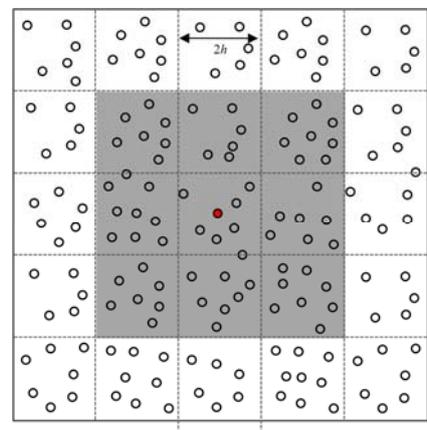


図-2 linked-list 探索の概略

## 2.2 並列化手法

次に、並列演算効率について議論する。本研究では、OpenMP, MPI を用いたスレッド並列およびプロセス並列の両者を用いたハイブリッド並列化を実施した。KDtree 探索は、スレッド並列を考慮することが困難であり、さらに全ノード間で粒子の全データの受け渡しが必要不可欠であるため、通信に多大な時間を要する。故に、解析対象とする粒子数が増加し、使用するノード数を増やすほど並列化効率が期待できなくなる。それに比べて、linked-list 探索はハイブリッド並列化が比較的容易であり、粒子番号をセル番号でソートすれば、計算に必要となるデータの通信量を減らすことができ、高い並列化効率が期待できる[2]。

## 3. 解析例 (3次元水柱崩壊)

今回、計算の高速化の検証例題として、Kleefsman らによって行われた実験結果を採りあげ、link-list 検索を用いた際の並列化効率を検証する。検証実験の諸元を図-3に示す。障害物には、図-4に示す8か所の圧力センサーが設置されている。図-5では、側面の  $ps_3$  に設置したセンサーの出力値を示す。また、図-6では、0.06sec, 0.50sec における圧力コンター図を示す。解析には九州大学のスパコンを用いた。その環境については、ノード数は Fujitsu PRIMERGY RX200 S6 , Intel Xeon X5670(2.93GHz)12core, メモリ容量は 48GB である。表-2に解析時間を示す。また、 $2 \times 2$  を基準として並列化効率を算出した。

表-2 解析時間の比較

ノード数×コア数	2×2	2×8	4×4	4×8	8×4
解析時間(10step)	5m05s	1m53s	2m01s	1m19s	1m33s
並列化効率	1.00	2.70	2.52	3.86	3.28

並列化効率の理想値は、それぞれ4倍、4倍、8倍、8倍であるが、今回の計測値はそれぞれ理論値に対して67.5%、63.0%、48.3%、41.0%の効率であった。また、全コア数で同じケースにおける解析時間の比較より、ノード数が多いほど並列効率の低下がみられる。これは、ノード間の通信時間が増えることに起因するものと考えている。

## 4. おわりに

SPH法の演算の中で、計算コストの高い近傍粒子探索のアルゴリズムの比較検討を行い、同時にハイブリッド並列を実施することで、計算時間の削減を試みた。

今後は、高速化された粒子法を用いて、大規模津波遡上解析、および流体構造連成シミュレータへと発展させる予定である。

参考文献 1)酒井讓, ほか2名: SPH法による非圧縮性粘性流体解析手法の研究, 日本機械学会論文集B編, 70巻 666号, pp.47-54, 2004

2)西浦泰介, 阪口秀: GPUを用いたDEMの高速化アルゴリズム, 日本計算工学論文集, 2010, Paper No.20100007, 2007

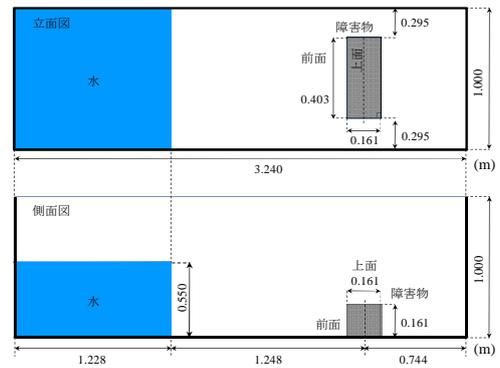


図-3 比較検証実験の諸元

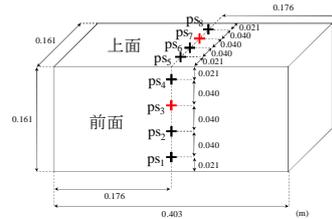


図-4 障害物の詳細

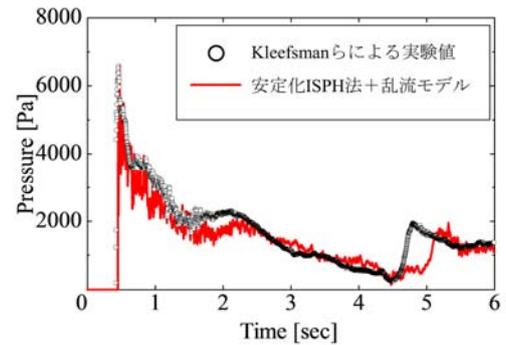


図-5  $ps_3$ における圧力値の比較

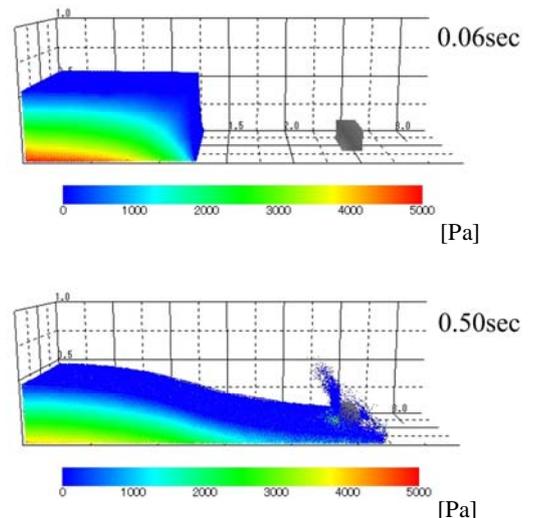


図-6 3次元水柱崩壊解析結果  
(圧力分布 [Pa])