

津波防災に向けた大規模 SPH-DEM 連成シミュレーションによる混相流解析

Multiphase Flow Analysis Using a Large-scale SPH-DEM Coupled Simulation for Tsunami Disaster

- 西浦 泰介, 海洋機構, 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25, E-mail:nishiura@jamstec.go.jp
- 古市 幹人, 海洋機構, 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25, E-mail:m-furuic@jamstec.go.jp
- 岩本 哲也, 東電設計, 東京都江東区東雲 1-7-12, E-mail:t-iwamoto@tepsco.co.jp
- Daisuke Nishiura, JAMSTEC, 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa
- Mikito Furuichi, JAMSTEC, 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa
- Tetsuya Iwamoto, TEPCO, 1-7-12 Shinonome, Koto-ku, Tokyo

We introduce the state-of-the-art technique of parallel computing for particle simulation method with short-range interactions. This technique can be useful for high performance computing of both particle methods of SPH and DEM. To take advantage of the computational performance, our multi-phase (soil-water-structure) flow simulation method has been developed by using the SPH and DEM. The SPH-DEM coupled simulation can be applied to many scientific and engineering problems for the soil dynamics with the transition between continua and discontinua associated with a free-surface fluid flow. Here, some tsunami disaster problems are solved by the large-scale SPH-DEM coupled simulation using our parallel computing method, which are including a ground liquefaction, soil erosion, tsunami sediment transport, and breakwater collapse.

1. はじめに

粒状体を含む混相流現象は様々な相互作用力が働くために非常に複雑な非線形性を伴う。そのため、実験だけでは解明することが困難な現象も数多く存在し、詳細な解析が可能なシミュレーションに対する期待は大きい。

一般的に粒状体を含む混相流のシミュレーションでは、粒子-流体間相互作用力を考慮した上で、流体流れに対してはオイラー法（格子法）やラグランジュ法（粒子法）を用いて計算し、粒状体の運動は Discrete Element Method (DEM) といった粒子法を用いて計算される。特に現在では、流体計算手法として有限差分法や有限体積法などの格子法をはじめ、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) や Moving Particle Semi-implicit (MPS) の様な粒子法、さらに Lattice Boltzmann Method (LBM) を用いた混相流シミュレーション手法⁽¹⁾⁻⁽³⁾が開発されており、対象とする現象に合わせて最適な手法を選択することが可能である。

本研究では主に、流体計算に SPH、粒状体計算に DEM を用いた SPH-DEM 連成による混相流シミュレーションの開発を行っている。粒子法の利点は、粒子自体の移動を直接計算するため、例えば津波の様な流体の破碎や地盤の洗掘破壊といった不連続境界面が生じる問題に対しても安定に計算できる点にある。さらに、SPH と DEM は粒子間力や粒子運動を計算するための基本的なアルゴリズムが同じであるため、両者を連成したシミュレーション手法の開発を容易にし、さらに大規模計算のための並列化アルゴリズムも同じ手法を両者に用いることが可能である。

本講演では、粒子法の大規模並列化手法と SPH-DEM 連成シミュレーション手法の実装方法、津波防災に向けたその応用例について発表する。

2. シミュレーション手法

2.1 粒子法の大規模並列計算

High Performance Computing (HPC) 分野においては、粒子法に対する大規模高速化アルゴリズムの開発が近年急速に進んでいる。格子法とは異なり、粒子法は計算が進むに

つれて粒子が自由に動くため、計算途中で計算領域を変更して負荷分散を行う動的負荷分散手法や、さらには空間充填曲線を用いた計算領域分割法など、粒子法に対する高効率な並列計算手法の開発が進められてきた^{(4), (5)}。そのため、近年では Fig. 1 に示す様に粒子法で億単位の粒子数を扱えるようになってきており、HPC に関する最大の国際会議である SC18 で発表も行われている⁽⁶⁾。

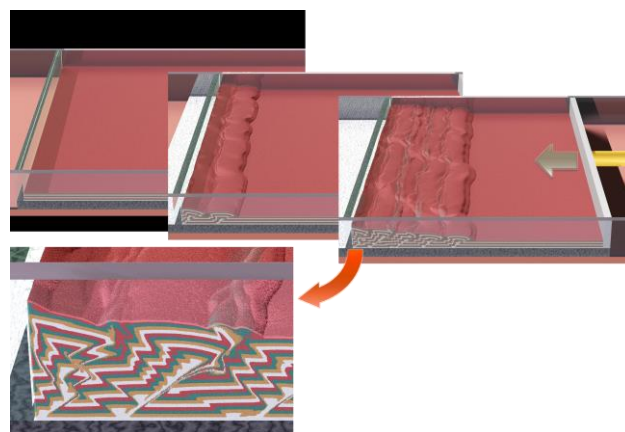


Fig. 1 Large-scale DEM simulation using 2.4 billion particles for accretionary prism formation.

本研究では、まず OpenMP による共有メモリ並列化を行っている⁽⁸⁾。また MPI による分散メモリ並列については、Fig. 2 に示す様な 2 次元改良型スライズグリッド法を用いた動的負荷分散手法を粒子法計算の並列化に採用している⁽⁵⁾。本手法では直交系において x 方向に $(I=1, 2, 3, \dots, N_x)$ の列要素に一次元領域分割をまず行い、Z 方向には各列で各々異なる分割を $(J=1, 2, 3, \dots, N_z)$ 行う。その結果、計算領域は各要素（サイズ: $dx_ [I], dz_ [I, J]$ ）に 2 次元領域分割される。領域分割の最小単位 dx は、粒子法の種類によって異なるが、SPH では有効半径サイズ、DEM では粒子直径サイズによっておおよそ与えられる。各要素は袖領域 (halo) 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。

粒子法では粒子が計算領域を移動するため、各分割領域での計算負荷が動的に変化する。そのため、効率的な並列計算を行うために動的に領域分割を変更して、計算機ユニット毎に計算負荷を均質にする。計算負荷の評価は、前回の領域更新からの粒子計算に必要な算術時間と、MPI 通信に費やされる時間の和を 1 ステップあたりに平均化した実行時間によって行う。

さらに、通信に関わる袖領域とそれ以外の領域に分け、袖領域の粒子計算をした後、袖領域以外の粒子計算と同時に袖領域の通信を行うことにより、通信と演算をオーバーラップさせて並列化効率の向上も試みている。

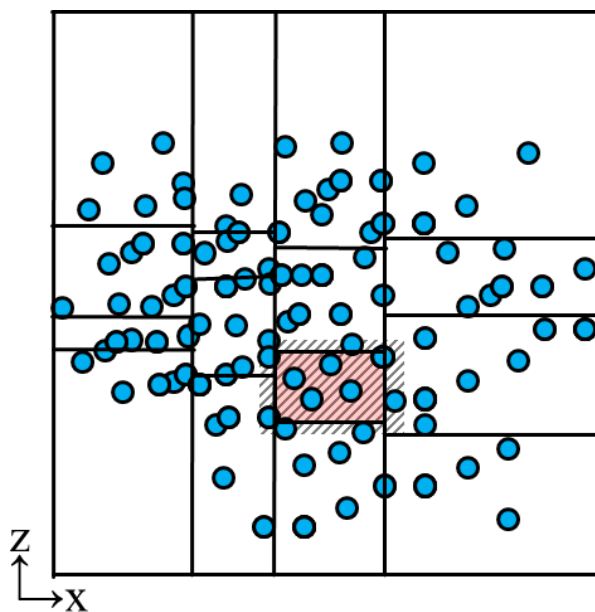


Fig. 2 Domain decomposition on 2-d slice grid method.

2. 2 SPH-DEM 連成解析モデル⁽⁸⁾

粒状体の運動を計算する DEM では、粒子間の摩擦を考慮した粘弾性接触力と転がり摩擦力を考慮し、個々の粒子の並進と回転の運動方程式を解く。一方、流体流れを計算する SPH では、ラグランジュ形式で表記された連続の式とナビエ・ストークス式を本研究では陽解法で解く。粒子の速度や圧力などの物理量は、カーネル半径（影響半径）内に存在する粒子の物理量から重み付き平均して求める。まず、ナビエ・ストークス式から粒子速度を求め、その速度に基づいて粒子を動かす。さらに、SPH では極僅かな圧縮性を許すことで、圧力場を陽的に求めることができる。つまり、連続の式から密度の時間発展を解き、この密度を状態方程式に代入して圧力を求める。

SPH と DEM の相互作用モデルは、DEM の計算対象が剛体が粒状体であるかによって異なる。DEM で剛体を計算する場合は、剛体内部に単純立方格子状に DEM 粒子を配置し、同じ点に SPH 粒子も配置する。これにより、剛体内部に配置された SPH 粒子が受ける圧力と粘性応力を同じ位置に存在する DEM 粒子に作用させ、剛体運動を計算することで剛体運動の時間発展を解く。そして、その移動した DEM 粒子の位置に SPH 粒子も移動させることによって、SPH と DEM の相互作用計算が可能である。一方、地盤工学で扱う問題の

様に多数の地盤粒子を DEM で計算する場合は、SPH の影響半径内に存在する DEM 粒子の体積から空隙率と平均速度を計算し、経験則に基づく流体抵抗力モデル⁽⁹⁾から相互作用力を計算する。また、連続の式やナビエ・ストークス式および状態方程式も空隙率を考慮した式を用いる。これにより、地盤の中を流体が流れる浸透流を計算することができる。そのため、津波による地盤の洗堀や流動とそれに伴う防潮堤の倒壊 (Fig. 3) や地震による地盤液状化など、地震・津波災害研究への応用が期待できる。

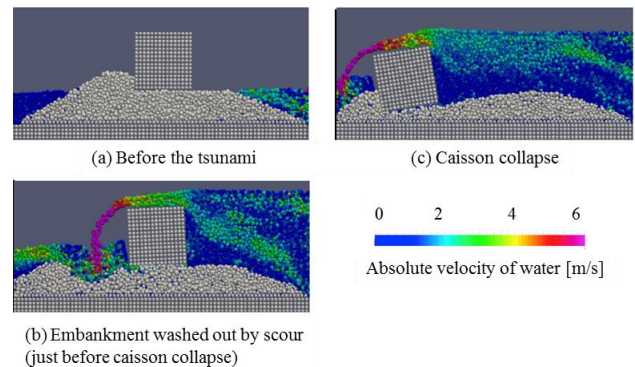


Fig. 3 Soil erosion and breakwater collapse by tsunami flow.

3. シミュレーション結果

3. 1 並列計算効率

本研究で実装した粒子法の並列計算手法の性能を調べるために、演算部分と通信部分に分けて検討を行った。なお性能測定は京コンピュータ (K) と地球シミュレータ (ES) を用いて行った。それぞれのハードウェアの性能は Table 1 に示す通りである。

Table 1. Computer performance

	<i>K</i> -computer (<i>K</i>)	Earth Simulator (<i>ES</i>)
Peak performance	128 GFLOPS	256 GFLOPS
Memory size	16 GB	64 GB
Memory bandwidth	64 GB/s	256 GB/s
Interconnect	5GB/s×2	4GB/s×2

まず、演算部分の性能測定結果を Fig. 4 に示す。演算部分に掛かる経過時間は、*K* と *ES* ともに CPU 数に対して良くスケールしていることが見て取れる。しかし、同じ CPU 数では *ES* の方が *K* よりも 2 から 2.5 倍程度高速であり、*K* と *ES* の理論性能比以上の差が有る。これは、我々の実装における作用反作用の法則を用いた相互作用力の足し込み計算手法では、メモリアクセスの効率が大きく実行性能に寄与するためであり、Byte/Flops 値が高い *ES* の方が効率的な計算が可能である。

次に、通信部分の性能を Fig. 5 に示す。演算コストが CPU 数に比例して減少するのに対して、通信コストは CPU 数の二乗根に比例して減少している。したがって、CPU 数の増加に伴い全体に占める通信のコストが支配的になり並列化率が低下する。特に *ES* では、*K* とほぼ同じ通信バンド幅であるのに対してピーク演算性能が高いために通信コストの影響が大きく、*K* よりも並列化率が低い結果となった。

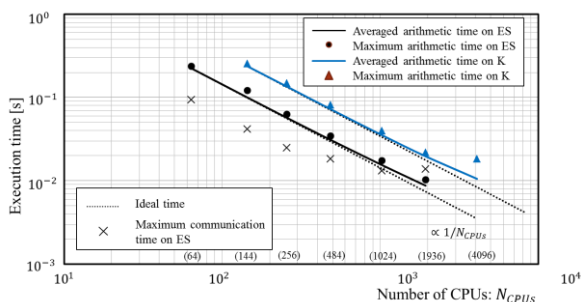


Fig. 4 Strong-scaling performance in arithmetic part.

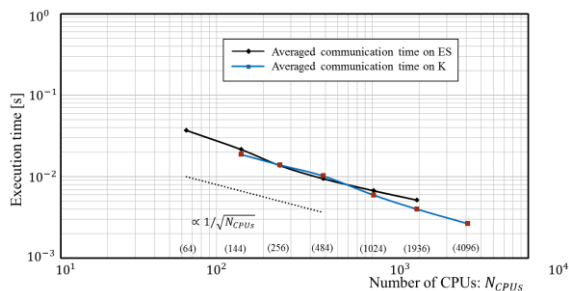


Fig. 5 Strong-scaling performance in communication part.

3. 2 計算精度

本手法の計算精度を検証するために、SPH による構造物に対する波力と SPH-DEM による粒子層に対する浸透流の解析を行い実験結果と比較した。

まず、波力についての検証結果を示す。Fig. 6 に示す様にダムブレイク方式で構造物に波を当て、構造物上の各点 (P1~P8) での水圧を測定した。ここでは代表して P1, P3, P5, P7 の点について、実験⁽¹⁰⁾とシミュレーションで得られた水圧の経時変化を Fig. 7 に示す。全ての測定点について、概ねシミュレーションで得られた水圧は実験結果を再現できていることが確認できた。しかし、実験に比べるとシミュレーションでは波力の振動が大きいことがわかる。これは、測定のサンプリングレートや圧力の測定点の大きさにもより、当然ながらサンプリングレートを低くして測定点の面積も大きくして平均化すれば測定値の振動を抑えることができる。また、本手法は陽解法の粒子法であるために根本的に圧力振動を起こしやすい特徴が有り、さらに粒子 1 点での圧力を測定しているため、波力の振動が大きくなったと考えられる。

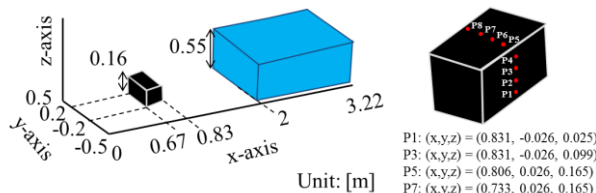


Fig. 6 Dambreak system to validate the wave force acting on the structure in numerical method.

次に、SPH-DEM による浸透流解析を行い、粒子層中の流速を実験と比較した。Fig. 8 に示す様に、ケーソン構造物の下に空隙率が 0.45 となる様に粒子層を DEM 粒子でモデル化し、まず初めにケーソンの前後で水位差が有る状態にし

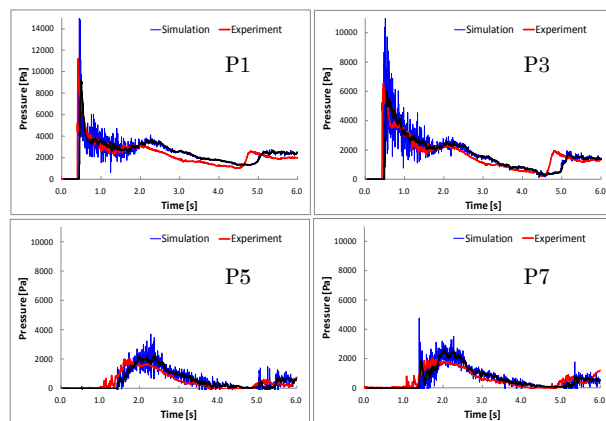


Fig. 7 Water pressure acting on each point on the surface of structure obtained by the simulation and experiment.

た。そして、ケーソン後方から水槽中に流入させる水量を変化させることにより、水位差を変えながら粒子層中の流速を測定した。なお、ケーソンおよび粒子層は固定した状態でシミュレーションを行い、これと同等の条件で実験も行った。Fig. 9 に得られた水位差と流速の関係を示す。水位差が大きくなるにつれて粒子層内の流速は増加し、シミュレーションにより実験結果を定量的に正しく再現できていることが確認できた。したがって、粒子-流体間相互作用を SPH と DEM の連成により精度良く計算できることが確認できた。

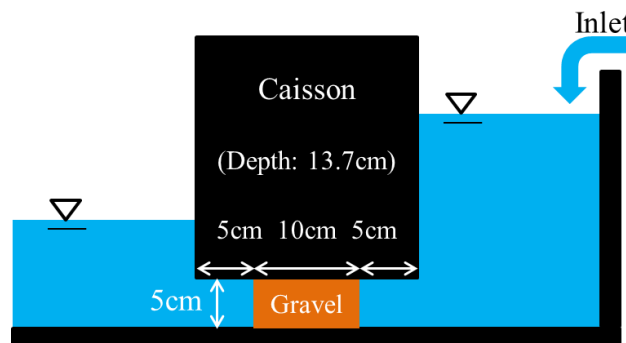


Fig. 8 Cross section of the permeability test model for the SPH-DEM simulation.

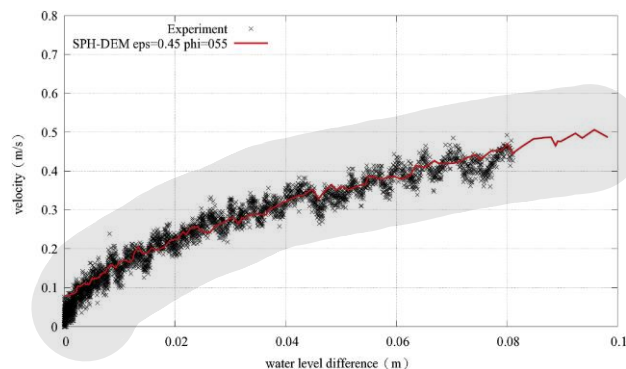


Fig. 9 Relationship between the water flow velocity and water-level difference.

3. 3 津波による海底土砂移動問題

津波は海底や陸地の土砂を巻き上げながら陸に遡上する。この時、津波は土砂を含むことで破壊力が大きく増すと考

えられている。また、津波が引いた後の土砂堆積物は、場所によって異なった粒度分布をしており、過去に起きた津波の発生時期や規模、津波到達域などを知る上でも重要な情報を含んでいる。さらに、津波で被災した建物内に堆積した土砂からは、各階で粒子系分布に偏りが有ることも発見されている。一方、地震などの衝撃によって海底斜面で地滑りが生じると、その土砂移動によって津波が発生する要因になることも指摘されている。海底地滑りは乱泥流へと発達した場合には、海底の非常に広い範囲にまで影響を及ぼし、海底ケーブルの損傷などを起こす。そのため、津波や海底地滑りなどによる土砂の動きを解明することは、津波の被害を予測したり過去の津波被害を推定する上で有用な情報となる。Fig. 10 は、津波水槽を用いて土砂が津波によって運ばれ、さらに3階建ての構造物に土砂混じりの津波が侵入する様子を SPH と DEM の連成により解析した結果である。土砂を模擬した DEM 粒子には3種類の大きさの異なる粒子を混ぜており、津波によって土砂が輸送されて建物内に堆積する過程で、粒子径分布の偏析挙動を解析することが可能となっている。

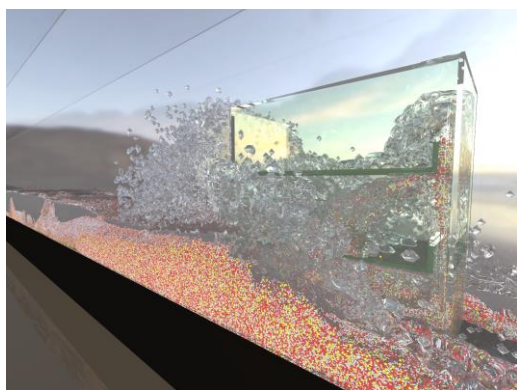


Fig. 10 SPH-DEM simulation for tsunami sediment transport.

3. 4 矢板施工時における海底地盤のボイリング問題

海岸における矢板や堤防などの施工において、それら構造物の前後で水位差が有る場合に、地盤内で脆弱な部分に浸透水が集中すると、やがてパイプ状の水の通り道ができることがある。そして、水の通り道で動水勾配が大きくなると地盤の流動化が起こり、水と共に土砂が急激に移動する。動水勾配の大きさによっては、土砂が噴出する様に激しく動きボイリング現象が起きることもある。そのため、海岸や河川など、大量の水が地盤に作用する土木工事の現場では、この様な地盤の流動化現象が起きないようにするための設計や施工計画が重要になる。Fig. 11 は、SPH と DEM を連成することによってボイリング現象を再現した事例である。矢板の前後に水位差が有る場合、矢板の下端部分の地盤が徐々に流動化し始め、急激に矢板後方から地盤が上に巻き上げられている様子が確認できる。この様な、地盤の大規模な流動化現象を再現できるのも SPH と DEM による混相流解析手法の一つの大きな利点である。

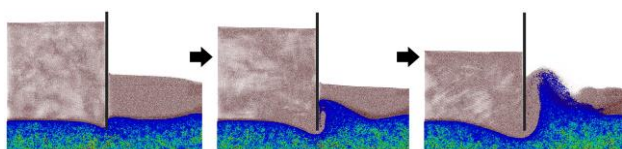


Fig. 11 SPH-DEM simulation for boiling phenomena in coast.

4. まとめ

大規模並列化手法を実装した SPH や DEM の様な近距離相互作用系の粒子法に対する大規模並列計算手法を開発し、SPH と DEM の連成による大規模混相流シミュレーションを可能にした。本手法を津波防災に役立てるために、まず最初に津波-地盤-構造物の相互作用問題に対するシミュレーションの精度検証を行った。その結果、地盤中の浸透流や構造物に対する波力を精度良く再現することができた。また、本手法を地盤の移動問題に適用し、津波による土砂の移動やボイリング現象への応用可能性を示すことができた。今後は、実際の都市スケールでの津波遡上問題に本手法を適用し、津波に強いインフラ整備に有用な情報が得られるようにしたい。

謝辞:本研究は JSPS 科研費 24740310, 15K17754, 19KK0110 並びにポスト京重点課題3の助成を受けた。また、RIST ならびに NEC と Fujitsu のコード高度化支援を受けた。

参考文献

- (1) 原崎, 浅井, 合田, 笠間, 西浦, “SPH-DEM カップリング解析による防波堤マウンドのパイピング破壊解析,” 土木学会論文集 A2, 73 (2017), pp. I_295-I_304.
- (2) 岩本, 中瀬, 西浦, 鶴ヶ崎, 宮本, 清野, “津波による防波堤捨石マウンドの変形問題における流体抗力モデルに基づいた SPH-DEM カップリング解析の適用性,” 土木学会論文集 A2, 71 (2015), pp. I_579-I_586.
- (3) 渡辺, 青木, 長谷川, 河原, 橋本, “格子ボルツマン法による物体を含む自由界面流れの大規模シミュレーション,” 混相流, 33 (2019), pp. 55-62.
- (4) Furuichi, M. and Nishiura, D., “Iterative load-balancing method with multigrid level relaxation for particle simulation with short-range interactions,” *Comp. Phys. Comm.*, 219 (2017), pp. 135-148.
- (5) Iwasawa, M., Tanikawa, A., Hosono, N., Nitadori, K., Muranushi, T. and Makino, “Implementation and performance of FDPS: a framework for developing parallel particle simulation codes,” *Publ. Astron. Soc. Japan*, 68 (2016), Paper No. 54.
- (6) https://sc18.supercomputing.org/proceedings/tech_poster/tech_poster_pages/post136.html
- (7) Nishiura, D. and Sakaguchi, H., “Parallel-Vector Algorithms for Particle Simulations on Shared-Memory Multiprocessors,” *J. Comput. Phys.*, 230 (2011), pp. 1923-1938.
- (8) Iwamoto, T., Nakase, H., Nishiur, D., Sakaguchi, H., Miyamoto, J., Tsurugasaki, K., Kiyono, J., “Application of SPH-DEM coupled method to failure simulation of a caisson type composite breakwater during a tsunami,” *Soil. Dyn. Earthq. Eng.*, 127 (2019), 105806
- (9) Tsuji, Y., Kawaguchi, T. and Tanaka, T., “Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed,” *Powder Tech.*, 77 (1993), pp. 79-87
- (10) Kleefsman, K.M.T., Fekken, G, Veldman, A.E.P., Iwanowski, G, and Buchner, B., “A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact,” *J. Comput. Phys.* 206 (2005), pp. 363-393