

jh130031-NA18

## 階層分割型数値計算フレームワークを用いた波源から地上構造物までの実地形津波解析

室谷浩平(東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻)

**概要** 本研究では、津波が地上構造物へ及ぼす影響を解析するためのマルチフィジックス解析を 3 つに分けて行う。第 1 の解析は、震源で発生する波源から沿岸部までの津波伝播計算である。第 2 の解析は、沿岸部に押し寄せた津波が地上へ遡上し浮遊物を運搬する計算である。第 3 の解析は、構造物が受ける水圧と浮遊物の衝突による構造解析である。津波が地上構造物へ及ぼす影響を解析するために、それぞれの解析ステージで適した解析手法を用い、それぞれの解析ステージにおいて高性能で高精度な解析を実現する。

### 1. 研究の目的と意義

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災によって引き起こされた津波により、東日本は甚大な被害にみまわれた。構造物への被害は、水圧によるだけでなく、浮遊する瓦礫が構造物にぶつかり構造物に被害を及ぼすケースが多くあった。我々は、津波による構造物への被害を検討する際には、津波の遡上計算を行うだけでは不十分と考えており、浮遊物の衝突を含んだ構造解析が必要であると考えている。

本研究では、津波が地上構造物へ及ぼす影響を解析するためのマルチフィジックス解析を 3 つに分けて行う。第 1 の解析は、震源で発生する波源から沿岸部までの津波伝播計算である。この解析は、数十～数百キロ四方の広範囲な解析が必要となるため、粘性浅水波方程式を有限要素法で解くことにする。第 2 の解析は、沿岸部に押し寄せた津波が地上へ遡上し浮遊物を運搬する計算である。この解析は、遡上計算と浮遊物の取り扱いが容易な粒子法を用いて計算を行う。粒子法は、解析領域に比例する粒子数を必要とするため、数 km 四方程度の中規模な範囲の解析しか行うことができない。第 3 の解析は、構造物が受ける水圧と浮遊物の衝突による構造解析である。この解析は、複数材料の弾塑性非線形解析であるため、有限要素法を用いて計算を行う。

我々は、津波が地上構造物へ及ぼす影響を解析するために、それぞれの解析ステージで適した解

析手法を用いる。これらの異なる 3 つの解析手法を効率的に組み合わせるために、我々は「階層分割型数値計算フレームワーク」を開発し、そのフレームワークを用いて、それぞれの解析ステージにおいて高性能で高精度な解析を実現する。

### 2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

#### (1) 共同研究を実施した拠点名および役割分担

「階層分割型数値計算フレームワーク」の開発に関する役割分担は次の通りである。

- ✓ 荻野正雄(名古屋大学情報基盤センター), 塩谷隆二(東洋大学総合情報学部総合情報学科):階層領域分割型ソルバーライブラリの開発(大規模並列計算向け連立 1 次方程式反復解法ライブラリ)
- ✓ 塩谷隆二, 河合浩志(諏訪東京理科大学システム工学部), 石川格(東洋大学計算力学研究センター):連続体力学向け DSL(Domain Specific Language, 問題領域専用言語)の開発(連続体物理モデル向け行列・テンソル積ライブラリとトランスレータ)
- ✓ 和田義孝(近畿大学 理工学部 機械工学科), 荻野正雄:VSCG ライブラリ(Versatile Scientific Computing Graphics library)の開発(大規模並列オフラインレンダリングライブラリ)

「各解析の物理モデル」の開発に関する役割分担は次の通りである。

- ✓ 金山寛(名古屋大学情報基盤センター), 檀啓(九州大学大学院工学研究院機械工学部門): 津波を粘性浅水波方程式で解くための物理モデルの構築
  - ✓ 越塚誠一(東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻), 室谷浩平(東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻): 津波の沿岸から遡上までを浮遊物を含めて粒子法で解くための物理モデルの構築
  - ✓ 塩谷隆二, 河合浩志: 地上構造物への水圧や浮遊物の衝突による構造解析のための物理モデルの構築
- 「連続体力学向け DSL」の開発と「各解析の物理モデル」の開発は連携しながら開発を進めている。

## (2) 共同研究分野

大規模数値計算, 高精度高速計算, 大規模可視化, 粘性浅水波方程式による津波解析, MPS(Moving Particle Simulation)法による津波遡上解析, 地上構造物の衝突構造解析。

## (3) 当公募型共同研究ならではの事項など

連続体力学系シミュレーションは, 従来からの有限要素法, 有限体積法, 境界要素法など非構造格子アプローチに加え, 近年ではメッシュフリーや粒子ベース手法による大規模計算の台頭が目覚ましい。非構造格子および節点, 粒子ベースモデルを統一的に扱える連続体力学系シミュレーション向けフレームワークが整備されれば, 連続体力学系シミュレーションでのスーパーコンピュータ利用の拡大に大きく貢献することができる。さらに, 「連続体力学向け DSL」を用いれば, 数学記述(例えば, 行列, テンソルの式を `tex` 形式で記述)から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたコードを生成するので, ユーザーが連続体物理モデルを自由にカスタマイズすることができる。この「連続体力学向け DSL」の機能によって, スパコンの知識が無い人でも, スパコンを利用して, 新しい連続体物理モデルを解くことができるようになるため, 従来と比較にならないくらい高精度で大規模な連続体力学系シミュレーションを, 短い開発期間で行うことがで

きるようになる。これらを, 複数のアーキテクチャ上で最適化し, ポストペタコンに向けたアプリ側の課題を明確にすることで, 計算科学への貢献を行うことができる。また, 研究成果を幅広く還元することができるようになる。

本研究課題では, 荻野正雄, 塩谷隆二, 河合浩志, 石川格, 和田義孝らが開発した「階層分割型数値計算フレームワーク」を利用して, 金山寛と檀啓は「粘性浅水波方程式による津波解析」, 越塚誠一と室谷浩平が「MPS 法による津波遡上解析」を行っている。この様に, 各種計算機に応じたチューニングと各解析の物理モデルの構築を分業することで, 開発コストを大幅に向上させることに成功した。今回は, 高並列かつ長時間利用における課題を明らかにするため, 九大 CX400(Xeon + K20)と名大 CX400(Xeon + Xeon Phi)を対象にして研究開発を進めている。

## 3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

### (1) 研究成果の詳細について

#### 【中間報告書までの成果】

本研究課題では, 3 段階の津波計算を行っている。第 1 の解析では震源で発生する波源から沿岸部までの津波伝播計算(数十～数百キロ四方程度), 第 2 の解析では沿岸部に押し寄せた津波が地上へ遡上する解析(数 km～10km 四方程度), 第 3 の解析では, 市街地に浮遊物が衝突しながら浮遊する市街地浸水解析(500m 四方程度)である。現在, 第 1 解析と第 2 の解析が完了したので, その研究成果を述べる。

本研究課題では, 石巻市街地の津波解析をターゲットとしている。図 1 は東アジアでの石巻市の位置, 図 2 は宮城県での石巻市の位置を示している。

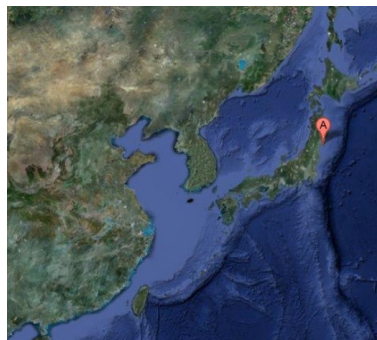


図 1. 東アジアでの石巻市の位置  
(©2013 Google)



図 2. 宮城県での石巻市の位置  
(©2013 Google)

図 3 は石巻市から提供して貰った 5m 間隔の標高データを元に作成した石巻市の地形モデルである。テクスチャーには、NTT 空間情報から購入した航空写真を用いている。



図 3. 石巻市の地形モデル  
(©NTT 空間情報(航空写真))

図 4 は石巻市の市街地モデルである。Google が提供する建物 3D から、東日本大震災前の町並みを再現したポリゴンモデルである。テクスチャーには、NTT 空間情報から購入した航空写真を用いている。



図 4. 石巻市の市街地モデル  
(©NTT 空間情報(航空写真))

第 1 の解析は、震源で発生する波源から沿岸部までの津波伝播計算である。解析領域は、 $667\text{km} \times 525\text{km}$  で、要素数(三角形数)17,970,848 の約 250m のメッシュを用いてモデルを作成した。海底座標は、JTOPO30 のグリッド水深データ(1km の解像度)を用い、時間ステップ 0.25 秒で 4,000 秒間の計算をした。初期値には、東日本大震災時の津波の初期水位を用いた。

計算モデルのサイズから、第 1 の解析は MPI 並列を行わず、OpenMP 並列のみ行うことにした。本解析を Intel core i7 960 (3.2GHz) 4core を搭載した PC で解析した結果、7.7 時間かかった。図 5 は、1,000 秒後の水位である。

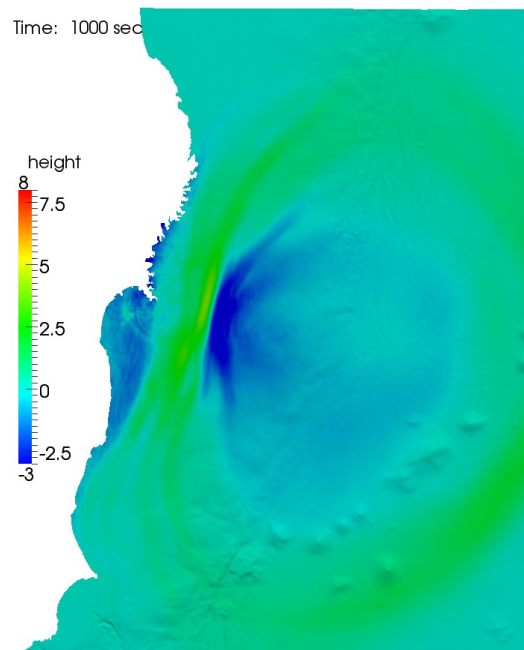


図 5. 1,000 秒後の水位

第 2 段階の津波遡上解析の入力条件に、第 1 段階の粘性浅水波方程式による解析結果を用いた。第 2 段階の津波遡上解析は、解析領域  $4.5\text{km} \times 3\text{km}$  のモデル(解析モデル a)と、解析領域  $10.5\text{km} \times 10\text{km}$  (解析モデル b) のモデルを作成し、それぞれ、800 秒間と 2000 秒間の解析を行った。

図 6 では、粒子直径 1m の石巻市に津波が遡上する解析を行った結果である。実時間 800 秒の解析に、東京大学情報基盤研究開発センターの FX10 の 144 計算ノードを用いて約 7 日間かかり、最大 2.6 億粒子の解析となった。



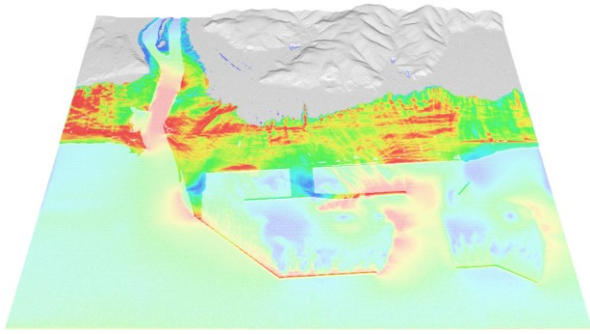


図 6. 解析モデル a(400 秒後)

図 7 では、粒子直径 2m の石巻市に津波が遡上する解析を行った結果である。実時間 2000 秒の解析に、筑波大学計算科学研究センターの T2K-Tsukuba の 32 計算ノードを用いて約 13 日間かかり、最大 1.3 億粒子の解析となった。

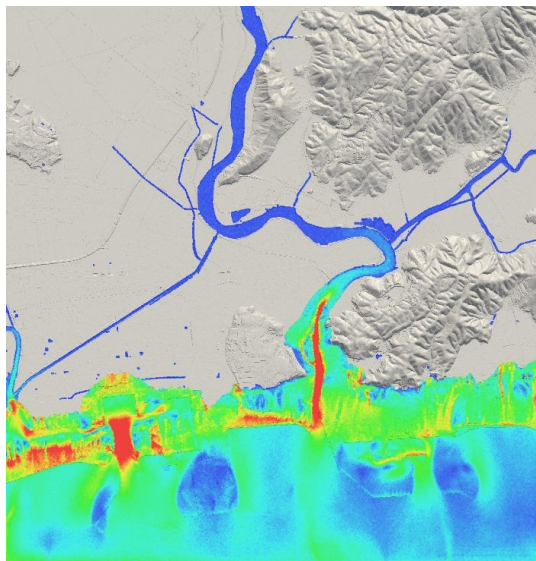


図 7. 解析モデル b(800 秒後)

第 3 段階の解析は、遡上した津波が浮遊物を運搬し、構造物に衝突する解析である。第 3 段階の解析では、2 種類の解析モデルを作成した。一つ目の解析では、400m×550m の市街地をモデル化して、2 個の浮遊物(10m 級タンク)を流す市街地浸水解析を 200 秒間行った(解析モデル c)。二つ目の解析では、660m×810m の市街地をモデル化して、431 個の浮遊物(地上構造物)を流す市街地浸水解析を 400 秒間行った。現段階では、浮遊物は剛体であり、構造解析は行っていない。

図 8 では、粒子直径 0.2m の石巻市街地に津波が侵入する解析を行った。実時間 200 秒の解析に、九

州大学情報基盤研究開発センターの CX400 の 32 計算ノードを用いて約 1 ヶ月かかり、最大 4 億粒子の解析となった。本解析では、固定されていた水色とピンク色の 2 個のタンクタンクが、60 秒後に解放され流されていく解析である。

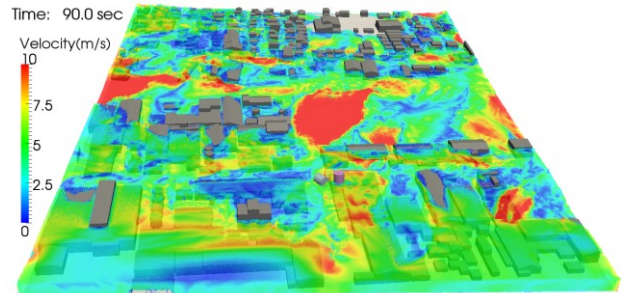


図 8. 解析モデル c(90 秒後)

図 9 では、粒子直径 0.3m の石巻市街地に津波が侵入する解析を行った。実時間 400 秒の解析に、九州大学情報基盤研究開発センターの CX400 の 32 計算ノードを用いて約 1 ヶ月かかり、最大 4 億粒子の解析となった。本解析では、固定されていた 431 個の地上構造物が、120 秒後に解放され流されていく解析である。図 9 では 431 個の地上構造物が上に向かって流されている様子が見て取れる。

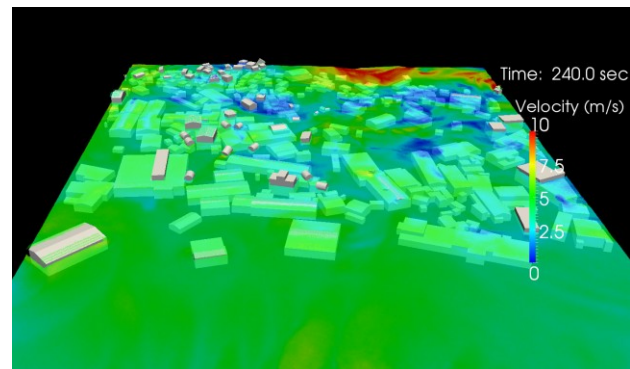


図 9. 解析モデル d(240 秒後)

第 2,3 段階の解析モデルは次の通りである。  
 (解析モデル a) 第 2 段階の 800 秒間の津波遡上解析 (4.5km×3km)  
 (解析モデル b) 第 2 段階の 2,000 秒間の津波遡上解析 (10.5km×10km)  
 (解析モデル c) 第 3 段階の 2 個の浮遊物(10m 級タンク)ある 200 秒間の市街地浸水解析(400m×550m)  
 (解析モデル d) 第 3 段階の 432 個の浮遊物(地上構造

物)ある 400 秒間の市街地浸水解析(660m×810m)

各解析の計算時間は、表 1 にまとめる。

本研究課題で、第 2,3 段階の解析で最も計算量を必要とする、並列 MPS 法コードのピーク性能値を示す。表 2 は MPS 法コードのピーク性能値である。九大 CX400 はプロファイラーが無いので東大 FX10 で測定した推定値である。SPARC 系と Intel 系向けにチューニングされた連続体向け DSL を用いてチューニングした結果、全体で東大 FX10 では 7%、九大 CX400 では 12%でているので、連続体計算としては十分な結果であると言える。

表 1. 各解析モデルの計算時間

解析対象	計算機	粒子直径	粒子数	計算時間
a	東大 FX10ー 144 ノード	1m	2.6 億	7 日間
b	筑波大 T2Kー 32 ノード	2m	1.3 億	13 日
c	東大 FX10ー 600 ノード	0.5m	4000 万	6 時間
c	九大 CX400ー 32 ノード	0.2m	4 億	1 ヶ月
d	九大 CX400ー 32 ノード	0.3m	4 億	1 ヶ月

表 2. MPS 法コードのピーク性能値

	東大 FX10	九大 CX400
	Flops/Peak	Flops/Peak
Total	7.4262	12.8124
重力・粘性による力の計算 (空間 2 次精度)	11.1396	19.0215
Collision (例外処理)	7.4224	12.5120
圧力計算	7.2425	12.6185
圧力勾配による力の計算 (空間 1 次精度)	7.0555	12.1003

### 【中間報告書後の成果】

図 10 では、解析モデル c を用いて、地上構造物を線形弾性体として、圧力による応力解析を行った。流体・剛体粒子から地上構造物への力の渡し方は、流体・剛体粒子の圧力勾配から求めた面荷重を外力として与える片方向連成方法を用いた。構造解析には、ADVENTURE\_Solid を用いた。本解析では、名古屋大学 CX400 を用いた。図 10-a,b,c のように時間が経過する(浸水領域が広がるに)につれて、圧力によって応力分布が発生している地上構造物が広がっていることが見て取れる。地上構造物 1 つに注目した所、水流の変化が激しい、角の部分に大きな応力が発生していることが見て取れる。

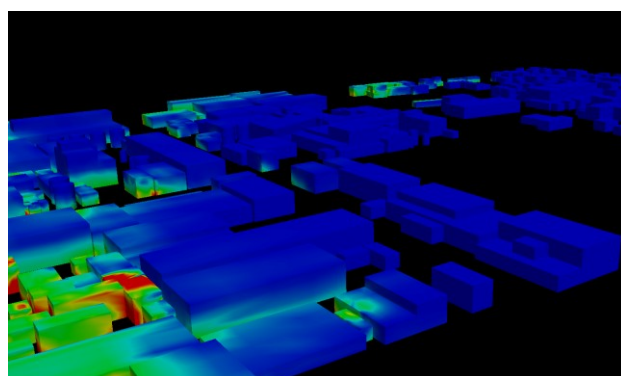


図 10-a. 地上構造物の応力解析(30 秒後)

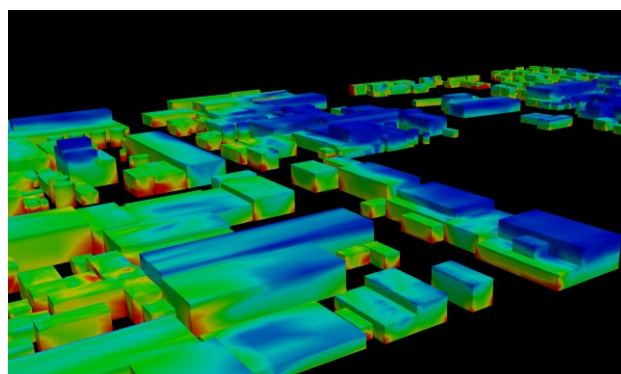


図 10-b. 地上構造物の応力解析(75 秒後)

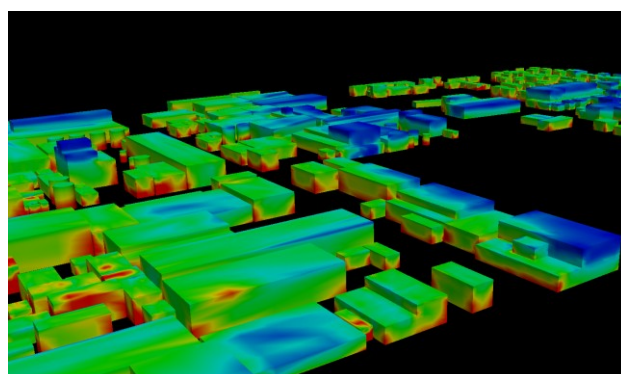


図 10-c. 地上構造物の応力解析(100 秒後)



図 11 は、JST-CREST プロジェクト研究課題「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で開発されたマルチプラットフォーム大規模領域分割型並列可視化ライブラリ VSCG (Versatile Scientific Computing Graphics library) を用いて生成した  $15,000 \times 20,000$  ピクセルの画像である。VSCG がこれまでの非構造格子向けに持っていた機能を、粒子系シミュレータに対応できるように拡張した。これまでは、解析モデル c で生成された 8TB のバイナリデータを九州・東京間でインターネットを用いたデータ転送に 1 ヶ月かかっていた。VSCG ライブラリを用いれば、10 万 $\times$ 10 万ピクセルを超える高解像度画像をスパコン上で作成することができる。また、VSCG は依存ライブラリが数学関数のみであることから、将来を含めた多様な計算機環境で動作することが可能である。

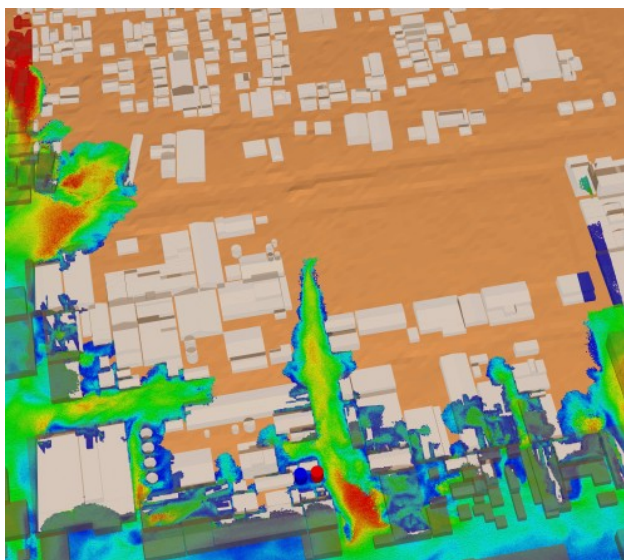


図 11. VSCG による可視化結果

表 3 は、影響半径=(平均粒子間距離 $\times$ 4.1)として、132,651 粒子のダムブレイク解析の 1 タイムステップ当りの計算時間を、Intel Core i7-3820, Intel Xeon E5-2697 v2 x2(名古屋大学 CX400), SPARC64TM Ixfx(東京大学 FX10), NIDIA Tesla K20m(九州大学 CX400), Intel Xeon Phi 3120P(名古屋大学 CX400) を用いて比較した結果である。

いずれのコードも、リンクリストの間接参照の

非ダイレクトメモリアクセスから、粒子データのソートによる直接参照のダイレクトメモリアクセスにアルゴリズムが変更されている。

Intel 系 CPU, MIC のコンパイラオプションは -fast である。CUDA 向けチューニングでは、CUDA の一般的な最適化をおこなっている (constant メモリやキャッシュの活用など)。SPARC64 向けチューニングでは、novrec, swp, simd の 3 つの最適化指示子を最内ループに設定して、コンパイラオプションに -Kfast, openmp, parallel -Kocl を設定して、ソフトウェアパイプラインと SIMD ベクトル化が有効にしてある。今回は、CPU 向けと GPU 向けチューニングは進んでいるが、MIC 向けチューニングは、まだ行っていない前提での測定結果の比較である。

空間微分離散化モデルには、標準 MPS の簡易微分モデルと、空間高次精度モデル(ラプラシアン 2 次多項式精度, 勾配 1 次多項式精度)を用いた。空間高次精度モデルは、近傍粒子の相対位置ベクトルの外積の重ね合わせをとるモーメントマトリックスの逆行列を求めるので、演算量が非常に多いのが特徴である。

表 3 から、標準 MPS モデルと高次精度モデルの間で、CPU と MIC では似た傾向あることが分かる。一方で、GPU は、標準 MPS モデルでは非常に高速であるにもかかわらず、高次精度モデルでは、非常に低速になっている。PTX でスレッド当りのレジスタ数を確認すると、標準 MPS モデルでは 50 以下である一方で、高次精度モデルでは 200 以上もレジスタを必要とする。このため、高次精度モデルを GPU で解くと、レジスタ数が不足して、グローバルメモリヘスワップが発生し演算性能が低下していると推測できる。CPU や MIC では、標準 MPS モデルと高次精度モデルの間で演算量の増加ほどの計算時間に差は発生しておらず、メモリバンド幅ネックの演算になっていることが分かる。表 3 の結果から、標準 MPS モデルを用いる場合は、GPU を用いると最も高速に解けるが、高次精度モデルを用いたいときは、Xeon や MIC を用いる方が高速に解けることが分かる。

表 3. MPS 法コードのプロセッサ間の比較

プロセッサ	理論性能 (GFLOPS)	標準 MPS モデル		高次精度モデル	
		Time(s)	Speed up	Time(s)	Speed up
Core i7-3820	115.2	1.358	1.000	1.839	1.000
Xeon E5-2697 v2 x2	518.4	0.310	4.378	0.414	4.446
Tesla K20m	1174.7	0.158	8.612	1.333	1.379
Xeon Phi 3120P	1003.2	0.444	3.059	0.614	2.995

## (2) 当初計画の達成状況について

今年度の開発進捗は 90% とする。課題申請書に記述した研究計画で達成できなかった項目は下記の 2 項目である。

- [1] 【10 月～3 月】3. 粒子法を「階層分割型数値計算フレームワーク」を用いて MPS 半陰解法を開発し、MPS 陽解法とのトレードオフを検討する。【未達成箇所：達成率 50%】MPS 半陰解法を開発は行ったが、比較検討までには至らなかった。
- [2] 【10 月～3 月】6. HDDM 構造解析：1000 万要素のモデルで物理時間 15 分間の解析を行う。【未達成箇所：達成率 90%】構造解析は 100 万要素程度の解析に留まった。この項目は主に連成解析のためのインターフェイス部分の開発が目的であった。更に、今回は粒子サイズとの関係で 100 万要素程度でも十分な要素数となったため、達成率を 90% とした。

## 4. 今後の展望

今年度は、九大 CX400 の TeslaK20 と名大 CX400 に Xeon Phi の利用のおかげで、アクセラレータ向け開発が大きく進んだ。今後も引き続き、名大 CX400 を用いて、Xeon Phi 向けチューニングを進めて行っていく予定である。

本研究課題では、地上構造物は弾性体として扱ったが、浮遊物は剛体のままであった。今後は、浮遊物も弾性体として解析を行えるようにするのが次の目的である。更には、浮遊物と地上構造物の弾性衝突を解けるようにするのが本研究の最終目的の一つとなる。

## 5. 研究成果リスト

### (1) 学術論文（投稿中のものは「投稿中」と明記）

- [1] [荻野正雄](#), “領域分割法の対角スケーリング前処理に関する考察”, Transaction of JSCES, Vol. 2013, 20130013, 2013 (DOI: 10.11421/jscs.2013.20130013).
- [2] [Hiroshi Kanayama](#), [Masao Ogino](#), Shin-ichiro Sugimoto and Seigo Terada, Large-Scale Magnetostatic Domain Decomposition Analysis Based on the MINRES Method, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, No. 5, pp.1565-1568, May 2013. (DOI: 10.1109/TMAG.2013.2238612)
- [3] [Kohei Murotani](#), Shin-ichiro Sugimoto, [Hiroshi Kawai](#) and Shinobu Yoshimura, Hierarchical Domain Decomposition with Parallel Mesh Refinement for Billions-of-DOF Scale Finite Element Analyses, International Journal of Computational Methods, published via internet, 21 June 2013. (DOI: 10.1142/S0219876213500618).
- [4] [Hiroshi KANAYAMA](#) and [Hiroshi DAN](#), A Tsunami Simulation of Hakata Bay Using the Viscous Shallow-water Equations, Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Volume 30, Issue 3, pp 605-624, 2013/11. (DOI: 10.1007/s13160-013-0111-7)
- [5] A.M.M. Mukaddes, [Masao Ogino](#), and [Ryuji Shioya](#), “Performance Evaluation of Domain Decomposition Method with Sparse Storage Schemes in Modern Supercomputer”, Special

IJCM Issue based on ICCM2012 (in press).

- [6] N. MITSUME, S. YOSHIMURA, K. MUROTANI and T. YAMADA: MPS-FEM PARTITIONED COUPLING APPROACH FOR FLUID-STRUCTURE INTERACTION WITH FREE SURFACE FLOW, International Journal of Computational Methods, (in press).
- [7] Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Tasuku Tamai, Kazuya Shibata, Naoto Mitsume, Shinobu Yoshimura, Satoshi Tanaka, Kyoko Hasegawa, Eiichi Nagai and Toshimitsu Fujisawa: Large-scale Tsunami Analysis with Floating Objects Using a Hierarchical Domain Decomposition Explicit MPS Method, Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering (JASSE), 「投稿中」.
- [8] Kentaro Tanaka, Satoshi Tanaka, Kyoko Hasegawa, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka: Translucent Visual Analysis of Large Scale 3D Point Data Generated by Particle Fluid, Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering (JASSE), 「投稿中」.

(2) 国際会議プロシーディングス

(3) 国際会議発表

- [1] Kohei MUROTANI, Seiichi KOSHIZUKA, Kazuya SHIBATA, Tasuku TAMAI, Naoto MITSUME, Shinobu YOSHIMURA, Satoshi TANAKA, Kyoko HASEGAWA, and Toshimitsu FUJISAWA, “Large-scale parallel realistic tsunami analysis with floating objects on Ishinomaki city using hierarchical domain

decomposition explicit MPS method (Invited Lecture)”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics (APCOM & ISCM 2013), Singapore, December 11-14, 2013.

- [2] Masao Ogino, “A Balancing Domain Decomposition Method Combined with Diagonal Scaling Preconditioner for Multi-materials (Key note)”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics (APCOM & ISCM 2013), Singapore, December 11-14, 2013.

(4) 国内会議発表

- [1] 室谷浩平, 越塚誠一, 金山寛, 安重晃, 藤澤智光, 玉井佑, 柴田和也, 三目直登, 吉村忍: 津波波源から浅水波方程式を用いて生成した入力境界条件による MPS 法市街地遡上解析, 日本機械学会 第 26 回計算力学講演会 (CMD2013), 佐賀大学, 2013 年 11 月 2 日--4 日.
- [2] 室谷浩平, 越塚誠一, 玉井佑, 山田祥徳, 柴田和也, 三目直登, 吉村忍, 田中覚, 長谷川 恭子, 藤澤 智光: 粒子系シミュレーション並列化フレームワークの開発と大規模津波解析, 第 18 回計算工学講演会, 東京大学生産技術研究所, 2013 年 6 月 19 日--21 日.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

- [1] 越塚誠一, 柴田和也, 室谷浩平: 粒子法入門, 丸善出版, 256 ページ, 2014 年 6 月下旬初版出版.