

Jh160037-NAJ

## 高精度即時予測のための GPU 津波シミュレーターの開発

青井 真 (国立研究開発法人 防災科学技術研究所)

概要 津波即時予測の精度向上のためには、事前にあらゆる可能性を考慮した大量の津波シミュレーションが必要であるが、津波数値計算は計算負荷が非常に大きく、時間がかかる。本研究ではこのような時間のかかる津波数値解析を GPU を用いて高速化し、大量のケースのシミュレーションを効率的に実行できるシミュレーターを開発する。本年度前半では CPU 用の津波数値解析コードを GPU に移植し、GPU において効率的に計算できるようにアルゴリズムやメモリアクセスの改善、チューニングを行なった。また TSUBAME 上で多数の計算が実行できるように環境を整備した。また、同時に地震動の評価も GPU 上で行うことによって、計算結果に大きく影響を与える堤防などの沿岸構造物に及ぼす地震動の地域的な違いについても明らかにすることができた。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

東京工業大学

#### (2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

#### (3) 参加研究者の役割分担

研究総括：青井真 (防災科学技術研究所)

津波ソルバーの GPU 化および高速化：鈴木進吾 (防災科学技術研究所)

津波ソルバーの評価：高橋成美 (防災科学技術研究所)

津波シミュレーターの構築：藤原広行・功刀卓 (防災科学技術研究所)

沿岸地震動の評価：前田宜浩・鈴木亘・岩城麻子 (防災科学技術研究所)

各種ソルバーの高速化分析：青木尊之 (東京工業大学)

### 2. 研究の目的と意義

東日本大震災では、事前の想定および発災時に発令された津波警報等の情報において、それまで想定されていた津波シナリオが限定されていたことが、地域によっては予防力・対応力を過小にさせ、甚大な人的被害を引き起こした。このことは、

津波防災の事前対策において、次に発生する津波の規模や浸水域などの特性を事前に一意に決めることができないという状況下で、考える限りのあらゆる津波シナリオについてそのシミュレーションを実施し知見としてのデータあるいは津波浸水可能性評価を充実させておく必要があることを示している。その上で、発災時にはリアルタイムで津波観測を実施し、その観測結果と事前に計算しておいたデータをもとに即時予測を行うこと、平常時にはこのデータを元に地域のリスク分析を行い、避難や災害対応の計画を立てることが、人的被害を軽減する上で重要となる。

しかしながら、現在の一般的な津波シミュレーション技術では、想定に必要とされる最小 10m 格子の空間分解能で、10km 四方程度の範囲の、地震発生から 6 時間後までの津波浸水を計算するのに、1CPU で 1 ケース 27 時間も要する。このように計算負荷が非常に高いなかでは、上述したようなあらゆるシナリオをシミュレーションすることができず、結果としてこれまでのように限定的なシナリオを計算することにとどまっている。

防災科学技術研究所では、このような問題意識に立脚し、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の下、日本海溝沿いに敷設されたケーブル式地震津波観測網 (S-net) から得られる水圧情報を常時監視し、津波発生時にはあらかじめ計算しておいた膨大な数の津波発生・伝播・浸水

解析結果のデータベース（津波シナリオバンク）と観測結果をリアルタイムに照合し、津波検知後即時に遡上域までを予測する研究を行っている。また、全国の津波ハザード評価を地震学的知見に基づいた様々な発生パターンを考慮して行うことで確率論的な津波ハザード評価を行っている。いずれの取り組みにおいても、発生しうる津波の規模や位置、断層破壊の特性等が様々であると考えられるため、この検討において、どれだけ多くの津波シナリオを考慮し尽くすことができたかが、即時予測およびハザード評価情報の精度に大きく影響し、それは即ちどれだけ多くの人的被害を抑制できるかにつながる。

そこで、本研究では、上述のような非常に計算コストが大きい津波シミュレーションを GPU を用いて高速化したシミュレーターを開発する。さらに、このシミュレーターを多数の GPU を有する東京工業大学の TSUBAME 上で実行することによって、いまだかつて行われてこなかった規模のケース数の津波シナリオの伝播・遡上をシミュレートする。これにより、現在気象庁が行っている量的津波予報の中心である 10 万ケースの津波データベースをはるかに超える規模で、沿岸波高のみならず遡上域も含めたより高精細な津波シナリオバンクを構築し、それを用いた即時予測の高度化・高精度化を目指すことを目的とした。

津波の被害を軽減するためには、津波の発生までの長い期間を活用してハザード評価を十二分に行い、個人および自治体において地域の津波脆弱性に対する理解を確立し具体的な対策を練る、緊急時には十二分に充実された津波シナリオバンクをもとに正確に予測情報を出すことが重要である。本研究で目標とする大規模なケースの津波シミュレーション結果データの構築は、これら 2 方面から防災力を向上させるものである。津波シミュレーションにかかる計算リソースが低減できれば、自治体の津波想定はより充実し、具体的な対応を検討する時間を増やすことができる。また、東日本大震災を受けて世界的に類を見ない広範囲かつ稠密さで整備

されている海底津波観測網を用いた高精度・高速な即時予測・状況把握を強力に推し進め、次の津波に対する対応力を向上させることができる。

また、将来はこのように蓄積されたシミュレーションビッグデータをもとに、津波のメカニズムおよび多様性をよりわかりやすく教える対話型の防災教育コンテンツや、リスク情報を考慮したインフラや企業等の各種システムの緊急時制御システムの開発など、津波防災に関わる予防、予測、対応において、様々な応用分野への展開が期待できるなど、本研究は大きな意義を持つものと考えられる。

### 3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究の目的とする高精度の即時予測および詳細な確率論的ハザード評価のための大規模シミュレーションには、高速かつ大規模な数値計算基盤が必要である。これまでの研究から津波数値シミュレーションは GPU で十分に高速化できる見込みがついており、世界に冠たる大規模な GPU 計算基盤を有する東京工業大学 TSUBAME 環境を利用することで、未だかつてなされていなかった大量の津波数値シミュレーションを実施することが可能となり、結果、我が国沿岸海域の津波来襲特性がこれまでにないほど包括的なレベルで明らかになるという可能性があり、とても意義が高い。

本研究によって得られる大規模数値解析結果は、現在進められている確率論的ハザード評価を促進し、それに基づく地域に応じた的確な津波防災対策に資する。また、発災時には住民の的確な避難に必要なより高精度であらゆる可能性をも網羅する緻密な津波予報が可能となり、津波による人的被害の軽減に大きく貢献するものである。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本年度からのプロジェクトのため、該当しない。

### 5. 今年度の研究成果の詳細

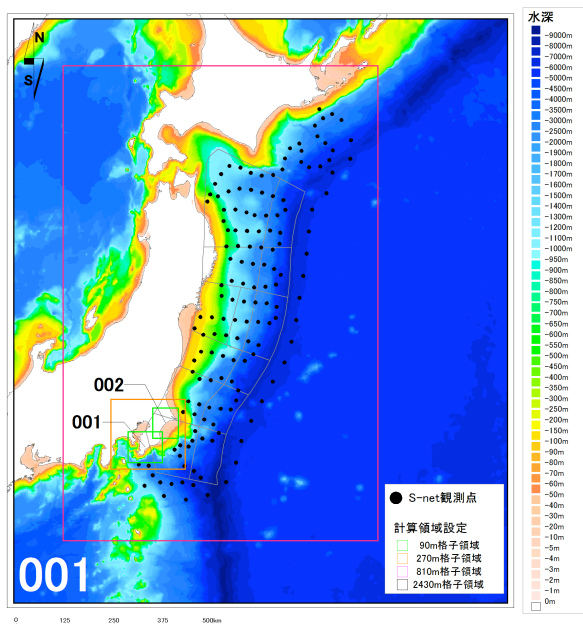


図1 全範囲の水深データ（2430m 格子、S-net による観測値を用いた、データベース駆動型の即時津波予測に、計算結果を利用するため、S-net 観測点のある全範囲を中心に、千島・日本海溝、相模トラフ、南海トラフのうち千葉県に影響を及ぼす海域が入るように設定した。）

研究の目的に示したような大規模なケースの津波の数値解析を効率的に実行できるようにするためには、津波数値解析を行うソルバー自体の高速化とともに、計算すべきケース数を効果的に減らす取り組み、計算を実行する前に必要な計算条件入力や計算後の結果処理の効率化が必要である。本年度はこれらそれぞれについて、GPU を用いた津波ソルバーの高速化、地震動による沿岸構造物被害の評価手法の検討、計算を効率的に投入できる体制の整備を実施した。

### 津波数値解析ソルバーの GPU 化

まず初めに、本研究を実施するため、津波数値計算に必要なデータを整理した。計算範囲は千葉県外房地域沿岸とした。津波数値計算はネスティングを使用し、最小格子間隔 10m の領域を 13 領域設定し、波源を含む全体の範囲を最大格子間隔 2430m とし、その間を 30m、90m、270m、810m と 1:3 で接続するようにした。図 1 に全範囲（2430m 格

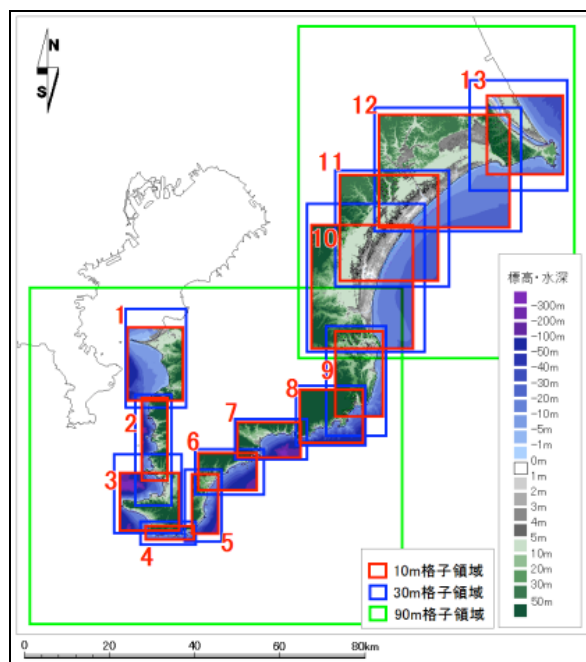


図2 10m 格子の標高・水深と 30m、90m 格子の領域（10m 格子で遡上を計算する範囲は、津波が高くなりやすい外房沿岸地域とし、富津から銚子までの範囲とした。）

子) の水深データと、810m 格子、270m 格子の範囲を、図 2 に 10m 格子の標高・水深データと、30m、90m 格子の領域の範囲を示す。

これにより、津波数値計算が処理しなければならない、空間格子数は表 1 のようになる。各領域は遡上範囲を加味して設定されるので、リアス部では遡上範囲が小さくなるため領域も小さくなるが、平野部では大きくとらなければならない。また、1つの波源シナリオ（1ケースという）に対して、10メートル格子の 13 領域分を計算しなければならないため、総計の約 8300 万格子分の計算が 1 ケースあたり必要となる。

この 1 ケースを、1CPU を用いて計算した場合の計算時間は、およそ 1,410,889 秒であった。すなわち 1 ケースの計算に 16 日と 8 時間を要するものであり、このように津波数値解析は膨大な計算をしなければならず、本研究が目指す大量の数値解析結果に基づく漏れのない津波予測、津波想定には高速かつ大規模な計算資源が必要であることがわかる。

次に一般に津波想定で用いられている、津波ソ

表 1 各領域の空間格子数

10m 領域 No.	空間格子数	10m 領域 No.	空間格子数
1	5,741,464	8	5,255,356
2	4,573,552	9	5,794,276
3	5,348,740	10	10,993,324
4	3,590,896	11	9,472,612
5	4,189,828	12	12,159,364
6	4,537,876	13	6,879,352
7	4,549,324	総計	83,085,964

ルバーを GPU に移植した。ここでいう一般的に津波想定で用いられる津波ソルバーとは、支配方程式を非線形長波理論とし、これを Staggard 格子を用いた Leap-Flog 法で差分化し解くものをいう。

本研究でベンチマークとして用いる津波数値解析の計算条件を表 2 に一括して示す。移植した GPU 津波ソルバーを用いて、1 ケース、13 領域の津波数値解析を行い、計算時間を計測した。その結果を CPU による計算時間と比較して表 3 に示す。CPU プログラムは可能な場合、時間方向に 1:3 の比率でネスティングされた各領域の計算を間引くが、GPU は全領域一定で計算する。このことから一概に比較はできないが、この結果によると、GPU 津波ソルバーは CPU に比べて 12 倍から 102 倍の速度で計算できることがわかる。これにより 1 ケースの計算にかかる時間は約 10 時間 (35,172 秒) に短縮された。

次に CPU プログラムを単に移植しただけでは GPU の性能を十分に発揮できていないと考えられたため、GPU 用津波数値解析プログラムのチューニングを行った。

まず、GPU 用津波数値解析プログラムのカーネルは、CPU 用津波数値解析プログラムのサブルーチンを移植したものであり、連続の式による水位の計算、沖側境界条件の処理、ネストされた領域間の水位の接続、運動方程式による流量の計算、ネストされた領域間の流量の接続、次のステップのためのデータの更新を逐次処理する。

これらは各格子サイズの領域ごとには順番に実行されなければならないが、各時間ステップ内に

表 2 本研究の津波数値計算の計算条件

項目	条件
支配方程式	非線形長波理論
沖側境界条件	完全無反射の透過境界
陸側境界条件	陸域への遡上を考慮
施設条件	構造物条件なし
計算時間	地震発生から 6 時間
計算時間間隔	CPU は時間方向間引きあり、GPU は時間方向間引きなし
初期水位	M8.4 の地震による津波を想定
潮位条件	なし
粗度係数	10m 格子は土地利用に基づく粗度を設定。その他は一律 0.025 を設定

表 3 移植した GPU 津波ソルバーによる計算時間

10m 領域 No.	CPU 計算時間 (秒)	GPU 計算時間 (秒)	比 CPU/GPU
1	105,669	2,238	47.2
2	60,559	4,356	13.9
3	92,502	5,544	16.7
4	32,230	1,224	26.3
5	52,923	2,286	23.2
6	65,940	2,436	27.1
7	58,953	4,764	12.4
8	74,877	1,992	37.6
9	77,090	1,638	47.1
10	231,133	2,256	102.4
11	177,344	1,992	89.0
12	244,786	2,460	99.5
13	136,883	1,986	68.9
計	1,410,889	35,172	40.1

において、それぞれの処理は領域間での同期をとる必要はない部分が多い。すなわち同一時間ステップにおいてある格子サイズの領域の処理と、別の格子サイズの領域の処理は、隣接領域との接続を適切なタイミングで行えば、非同期で実行できる。そこで、これらを CUDA Streams を用いて非同期で実行できるように改善し、高速化した。

次に、津波数値解析において負荷のかかる条件分岐の見直しを行った。津波数値解析には水がある領域とない領域の境界における処理、流量計算時における風上差分、また、水がある領域とない領域で異なった処理をする場合などで、多数の分岐がある。GPU において CPU と同様の条件分岐処理を行うと非効率的になる。そこで、if 節内にある必要のない計算を外へ出す、If 節を統合する、計算の順序を入れ替えたり、変数を使用することで条件分岐を減らすなど、if 節による条件分岐を最小限にするなどの改善を行った。

次にグローバルメモリアクセスの削減を行った。津波計算においては、1 億近い格子のデータを格納するためにグローバルメモリを使用するが、グローバルメモリへのメモリアクセスには時間がかかるため、頻繁にアクセスするグローバルメモリ上の変数については、いったんレジスタに読み込んで、すべての処理が終わったらグローバルメモリに書き戻すようにし、メモリアクセスを少なくした。時間ステップを更新する際には、ステップ  $t$  の計算結果として得られたステップ  $t+1$  のデータを次の計算のためにステップ  $t$  のデータの領域にコピーするようになっていたが、これをやめ、時間ステップごとに交互に領域を使用するようにした。また、CPU の計算においては、計算量の削減のために、複数回使用される変数については、領域全体にわたって 1 度計算した結果をメモリに記憶しておいて、それを後で必要になった時に参照する形をとっていたが、この方法ではメモリアクセスに時間がかかっていたため、これを廃止し、必要になった時に再計算するように変更した。同時にコアレスなメモリアクセスによる速度向上のため、各スレッドがアクセスするメモリが連続的になるようにした。これらの変更により、高速化が実現された。

さらに、カーネルの呼び出し回数を削減するために、カーネルの統合を行った。x 方向線流量の計算と y 方向線流量の計算を別に行っていたが、統合した。また水位の最大値を記録するカーネルなどを削除し、水位を計算する際に同時に記録す

表 4 プログラム改善による効果

10m 領域 No.	改善前 (秒)	改善後 (秒)	比 後/前
1	2,238	1,046	0.47
2	4,356	1,879	0.43
3	5,544	2,424	0.44
4	1,224	537	0.44
5	2,286	997	0.44
6	2,436	1,052	0.43
7	4,764	2,074	0.44
8	1,992	822	0.41
9	1,638	655	0.40
10	2,256	898	0.40
11	1,992	823	0.41
12	2,460	981	0.40
13	1,986	866	0.44
計	35,172	15,054	0.43

るようにするなどの変更を行っている。そして、領域境界の処理部においては、ブロック分割を境界の処理用に最適化し、無駄なカーネルの呼び出しを避け、GPU 使用率の向上を図っている。

また、計算時間のかかる除算の削減、pow のより高速な cbrt, sqrt などへの置き換え、自動的な double 型から float 型への変換を削除するなどの変更を行った。

最後に、グリッドサーチにより、最も高速に実行できるブロックの形状を明らかにし、スレッド数・ブロック数を調整した。

これらのチューニングを行って、高速化した効果を表 4 に示す。これによると、これらのチューニングにより改善前に比べて計算時間を約 6 割に削減することができた。チューニング後の 1 ケースあたりの計算時間は 4 時間 10 分 (15,054 秒) となった。CPU の実行時間に比較すると、90 分の 1 程度の時間で実行できるようになった。

そして、このプログラムを TSUBAME 上で実行できるようにした。TSUBAME での実行に備えて、1 ノードあたり、同程度の時間で実行が終わるような

3 領域を選び、OpenMP によって 3 並列で G キューを用いて計算を同時に実行できるようにした。また、MPI を用いて複数のケースを複数のノードに投入できるようにした。

### 沿岸地震動の評価

津波浸水の不確定性は、波源特性と沿岸構造物の被害程度に大きく依存する。波源（断層面）が同じであったとしても、断層面内の破壊の不均質性により地震動の周期特性が変わり沿岸構造物の被害程度が変化するため、地震動の解析がなければ沿岸構造物の被害程度も多ケースを考慮して計算しなければならなくなる。そこで、GPU 用に開発された GMS を用いて、同じ波源でも地震動にどの程度の幅があるかを見積もるべきかをパラメータスタディにより検討した。

検討の対象としたのは  $M=8.2$  の震源モデルである（図 3）。津波計算用に設定された波源に対して、強震動計算用に震源域内で最初に破壊が始まる場所（破壊開始点）や地震波を強く励起する領域（アスペリティ）を複数設定した特性化震源モデルを作成した（図 3）。破壊開始点は海溝軸方向、深さ方向に 12 か所設定した。アスペリティは震源域内に 3 個（大 1 個、小 2 個）配置し、大きいアスペリティの位置を海溝軸方向に 3 パターン、深さ方向に 3 パターン変化させ、合計 108 個の特性化震源モデルを作成した。

地震波伝播シミュレーションには浅部・深部統合地盤モデルから東西方向 220km、南北方向 275km、深さ方向 100km を切り出して用いた。

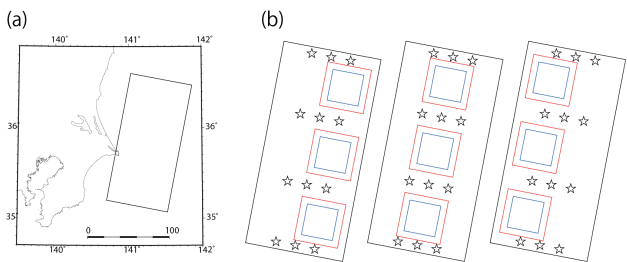


図 3 (a)震源断層面（計算領域）、(b)アスペリティ（赤矩形：大、青矩形：小）と破壊開始点（星印）。

計算の対象周期は周期 1 秒以上である。シミュレーションでは、地下構造モデルを水平方向に  $9 \times 9$  の部分領域に分割して、それぞれ 1 つの GPU を割り付けて計算処理を行った。計算結果は、GMS の 1D Dump 機能を利用し、沿岸構造物のある約 2500 地点における地動速度の 1 成分を 1 ファイルとして東西、南北、上下の 3 成分について出力した。計算では TSUBAME2.5 の S キュー (X キュー) を利用し、64000 タイムステップの計算に 81GPU (27 ノード) を使用した実行時間は概ね 2.5~3 時間程度であった。

出力された 1D Dump ファイルに対してフィルタ処理、ダウンサンプリング処理を行い、各地点の速度時刻歴を抽出するとともに、速度応答スペク

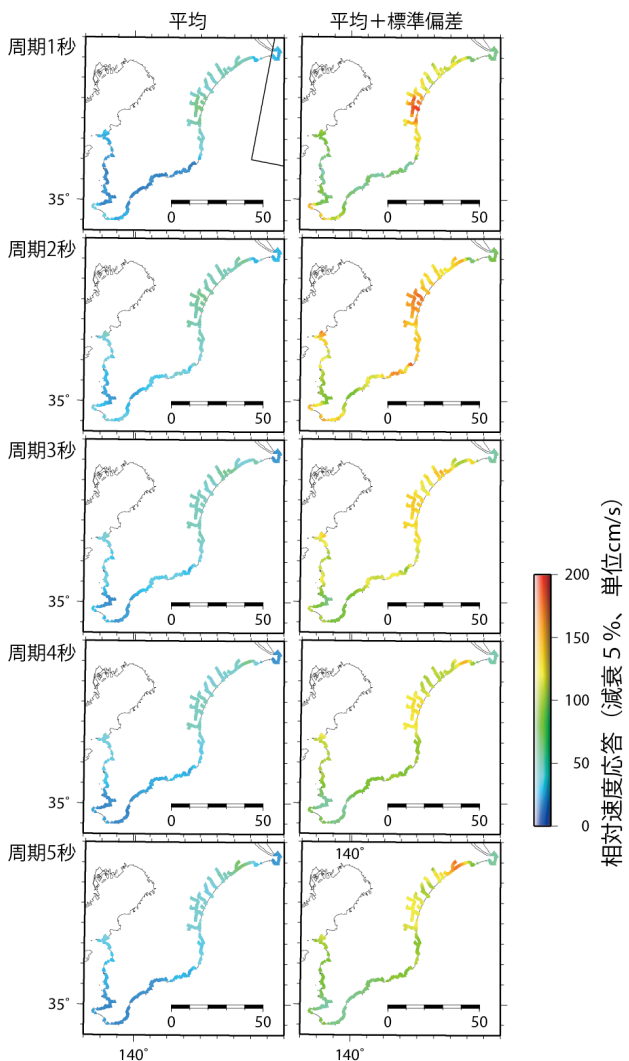


図 4 速度応答値（減衰 5%）の平均と平均+標準偏差の分布。

トル (Sv) を求めた。さらに、108 ケースの計算結果から平均と標準偏差を算出した。周期 1 秒から 5 秒までの速度応答値の平均値と平均値+標準偏差の分布を図 4 に示す。平均値ではいずれの周期帯でも 100cm/s を下回っているが、平均値+標準偏差では 100cm/s を超える地点が多くみられ、中には 200cm/s 程度の地震動レベルとなる地点もあり、津波に対しては同じ震源域とみなせても地震動としては大きく変わり得ることがわかる。今後は、こうした地震動の違いが沿岸構造物の被害程度にどの程度の影響を及ぼすかを明らかにすることが重要である。

### 津波シミュレーターの構築

以上のように開発された津波ソルバーを用いて大規模計算を実施するためのシミュレーターの準備を行った。

上述の地形データ、粗度、構造物データを入力データとして、S-net 観測点と千葉県沿岸に配置した津波高さの観測点を出力用データとして TSUBAME 上のディレクトリに配置し、実行プログラムから参照しながら計算ができるようにした。

実行プログラムは上述で開発したソルバーを使用し、ノード内はソルバーによる OpenMP を用いた SMP 並列、ノード間はジョブ制御用プログラムによる OpenMPI を用いた MPI 並列を使用し、シミュレーション作業全体でのスループットの向上を図った。ジョブ制御用プログラムは依存性のないジョブを最大で 10 個選択して同時に計算を進めるものとなっている。

実行は以下の手順で行われる。

- (1) ディレクトリテンプレートを使用して、断層モデルの断層コード分だけ計算実行用のディレクトリを作成する。
- (2) 10 波源ごとにジョブ実行用のシェルスクリプトを作成する。
- (3) それぞれのシェルスクリプトを G キューに逐次投入する。

以上のような環境を津波シミュレーターとして作成し、計算を実行した。この環境を用いて、表

表 5 波源モデル

発生場所	$\beta$ (Mo-S 関係式の係数)	波源モデルの総数
太平洋プレート	1.77	1,785
太平洋プレート	6.00	1,615
相模トラフ	1.77	661
相模トラフ	6.00	1,630

表 6 津波数値計算の計算条件

項目	条件
支配方程式	非線形長波理論
空間格子間隔	2430m, 810m, 270m, 90, 30m, 10m
沖側境界条件	完全無反射の透過境界
陸側境界条件	陸域への遡上を考慮
施設条件	構造物破壊なし
計算時間	地震発生から 6 時間
計算時間間隔	0.05 秒
出力間隔	5 秒
潮位条件	なし
粗度係数	10m 格子は土地利用に基づく粗度を設定。その他は一律 0.025 を設定
初期水位	表 5 の波源モデルの数だけ設定されたモデルに基づく初期水位

5 に示す総数 5,691 個の断層モデルについて、それぞれ 3 領域分の計算を実施した。計算を実施した回数は 17,073 回(断層モデル・領域)となった。計算の諸条件は表 6 に示す。

この計算により、これまで津波シナリオバンクに登録されていなかった 3 領域の 5,691 ケースが計算され、最大水位、水位の時系列変動、遡上範囲や浸水深をデータとして得ることができた。

### 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度の研究により、平面二次元の非線形長波理論式をリープフロッグ法を用いて差分化し津波のシミュレーションを行う一般的な津波解析プログラムを GPU 上で実行できるようにし、GPU の特性に応じた高速化やチューンナップを実施した。

その結果、断層破壊の 1 シナリオを 1 県分計算するためにかかる時間を大幅に短縮することができた。また、この計算を **TSUBAME** 上で実行できるように、並列化を行い、多数の計算を投入し、実行し、結果を処理できるように環境を整備した。

また、本研究と同期して、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）では送られてくる観測データと、事前に計算しておいた津波数値シミュレーション結果データベース（津波シナリオバンク）とを照合し、リアルタイムで高精細な遡上予測を行う研究開発を行っている。11 月 22 日に発生したマグニチュード 7.4 の福島県沖地震では、このリアルタイム予測システムを用いて、**S-net** で観測した津波波形から津波シナリオバンクを検索し、予測した結果と実際の津波高さを比較したところ、沿岸の津波高さを比較的精度よく予測できる可能性があることが明らかになった。今後、津波シナリオバンクに格納される津波数値シミュレーションケースが充実することによって、精緻な予測が現実となると考えられる。

今後はこれらによって得られた成果を基礎に、ソルバーやプレポスト処理を拡充する。そして、北海道から関東に至る太平洋沿岸域において 50m 格子、千葉県沿岸で 10m 格子を最小格子間隔とする地形データを用いて、プレート境界面上及び地殻内、アウターライズを含む約 10 万ケースの網羅的な断層パラメータセットを作成し、これらによる大規模な津波数値解析を実施する。10 万通りの津波波源について、津波数値解析から、**S-net** 観測点などにおける時系列水位変動情報、沿岸における時系列水位変動情報、沿岸の津波浸水範囲と浸水深さ、沿岸の浸水開始時刻を取得し、引き続き、リアルタイム津波予測システムのデータベースに追加していくことで、リアルタイム津波予測システムの精度向上に貢献する。

また、一方で、この大量の計算結果から、**S-net** 観測点などにおける水位変動の特徴量と、沿岸の時系列水位、浸水範囲、浸水深、時刻などの特徴量がどのように関係するのかを、機械学習等を用いて分析し、関係性を導き出すことによって、大

規模な津波数値解析に基づく津波の伝播特性を可視化する。具体的には、各地域に津波が影響を及ぼす場合とは、あるいは沿岸である範囲が浸水する場合とは、津波がどこで、どのような規模で発生した場合なのか、**S-net** ではどのように観測される場合なのかを明らかにする。そして、このようなビッグデータ解析による結果も併用することによって、効率的にリアルタイム津波予測システムの高精度化を行っていききたい。

## 7. 研究成果リスト

### (1) 学術論文

なし

### (2) 国際会議プロシーディングス

なし

### (3) 会議発表(口頭, ポスター等)

山本直孝・青井真・平田賢治・鈴木亘・功刀卓・中村洋光, 沖合水圧記録の順解析による津波即時予測手法の開発, 日本地球惑星科学連合 2016, 幕張メッセ, 2016. 5. 22~25

山本直孝・青井真・鈴木亘・平田賢治・高橋成実・功刀卓・中村洋光, 千葉県九十九里・外房沿岸地域を対象とした津波遡上即時予測プロトタイプシステムの作成, 日本地震学会 2016 年度秋季大会, 名古屋国際会議場, 2016. 10. 5~7

### (4) その他(特許, プレス発表, 著書等)

なし