

# 並列 GPU を用いた大規模地震波伝播シミュレーション

竹中博士

(九州大学大学院理学研究院)

**概要** 本研究では並列 GPU による大規模地震波伝播シミュレーションを実際の問題に適用することによって技術的な課題を抽出し、性能向上のための解決法を考察することを目的とする。今までのところ、地形や海水層を考慮した地震波伝播シミュレーション、月における地震波観測のシミュレーション、および地球内部構造推定問題の各サブテーマにおいて、数百から 1000 基の GPU を用いた大規模計算を実施した。最初の 2 つのテーマについて暫定的な科学成果を得ることができた。これらの計算は数百 GB から 1TB 程度の計算結果出力を伴う実用計算である。それでも最大で、1000-1152 GPU, 出力ファイルサイズ 580-1000 GB の場合に 30 TFlops から 60 TFlops を超える実効性能を達成できた。また、計算結果を各ノードのローカルディスク (SSD) に書き出すことで、Lustre ファイルシステムへの負荷をほぼゼロにするようにした。これはシステムの安定性に貢献するが、実効性能の向上には必ずしもつながらないことが明らかになり、その部分ではさらに改良が必要であることがわかった。

## 1. 研究の目的と意義

本研究では、地球科学のなかで分野横断的にサブテーマを定め、それらに GPU(Graphics Processing Unit) を用いた大規模地震波伝播シミュレーションプログラムを応用していくための課題を設定して基礎研究を行う。本課題研究で設定するサブテーマは次の 3 つである。

1. 地球内部構造の推定 (地震発生域の探査)
2. 地震動に地形や海水層が及ぼす影響の考察 (強震動地震学)
3. クレータ等の地形や不均質性を考慮した惑星環境での地震動の研究 (惑星科学・惑星探査)

地震波は惑星内部を通過してくることから、地球や惑星の内部を探るうえで基本的なデータとなっている。また地球においては、地震そのもの、および強震動や津波などの地震に伴う諸現象のメカニズムを解明することが理学的にも社会的にも必要とされている。なかでも、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (マグニチュード 9) は、強い地震動と巨大な津波によって東日本地域に計り知れないほどの被害をもたらした。そのため特に、巨大地震の発生条件や巨大津波励起の仕組みを探ることが地球科学においてきわめて重要な課題となっている。

現実的な地球や惑星モデル内を伝播する地震波の計算では大規模な数値手法を利用することが不

可欠である。そのため、理論地震波波形を高速に計算できる手法を開発し応用することは、上述のような地球科学研究や防災研究を進めていくうえで非常に重要である。そのために我々はこれまでに、食い違い格子型の差分法 (FDTD: finite-difference time domain) にもとづいて、GPU を用いた地震波伝播シミュレーションの並列計算プログラムを開発し、CPU を用いた場合よりも高速な計算が可能になることを示してきた。本研究では、これまでに開発してきたプログラムをベースとして、冒頭に述べた実際の応用問題に適用していくために必要となる計算技術や可視化に関する研究を行う。

## 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大学名と研究体制

大学名：国立大学法人東京工業大学

研究体制：

国立大学法人九州大学	
研究代表者	竹中 博士
国立大学法人東京工業大学	岡元 太郎
	青木 尊之
独立行政法人海洋研究開発機構	中村 武史
宇宙航空研究開発機構	小林 直樹

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

本研究では多数の GPU を用いた大規模並列計算によって地震波伝播のシミュレーションを行う。東京工業大学国際学術情報センターの TSUBAME2 スーパーコンピュータは 2.4 ペタフロップスのピーク性能を有する、世界最高レベルの GPU クラスタである。そのため、本研究を進めていくうえで最適な環境を利用することができる。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

本研究では、これまでに開発してきたプログラムを地球惑星科学の研究に応用することと、計算技術や可視化に関する課題を抽出することが目的となっている。そこで、まず計算手法について概要を述べる。次に今年度の項目に関する研究内容について紹介する。なお、今回紹介するのは全て弾性体版のプログラムでの結果となる。

3.1 研究成果の詳細について

3.1.1 計算手法の概要

差分格子 本研究では時間領域の差分法 (FDTD: finite-difference time domain) を用いる。この差分法では媒質の粒子速度 ( $v_i (i = x, y, z)$ ) と応力 ( $\tau_{ij}$ ) とを変数として、図 1 に示す食い違い格子を用いて計算領域を離散化する。本研究で利用するプログラムでは、空間差分精度は 4 次精度とした。時間差分は 2 次精度とした。

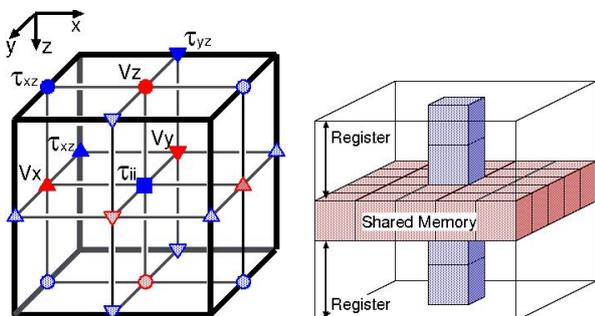


図 1 左図：本研究で用いた食い違い格子と変数の配置。図示した格子は単位セルに相当する。右図：共有メモリとレジスタを併用して 3 次元ブロックを確保することの概念図。

メモリ利用法の効率化 差分法は大きな記憶領域に繰り返しアクセスする memory intensive 型の計算となる。そのため、GPU によって差分法計算を行う場合には、GPU 内部のメモリ (グローバルメモリ) に差分法領域の変数全てを保存し、その変数に対して演算を行うことになる。これは、PCI バスを介した GPU とホスト計算機との間の通信量をなるべく減らすためである。

グローバルメモリと演算ユニット間のメモリ帯域幅は、通常の CPU とメモリ間の帯域幅に比べると非常に大きい。しかしそれでもグローバルメモリから演算ユニットへのデータ転送には 400-600 サイクルの遅延が発生する。そのため、演算ユニット内部にある高速な共有メモリを「キャッシュメモリ」として利用することが性能向上のためには重要である。

そこで本研究では、共有メモリとレジスタとを併用して 3 次元ブロックを確保する (図 1)。すなわち、横方向への差分操作が必要になる 2 次元平面上のセルのデータは共有メモリに配置し、同時にこの 2 次元平面上の各セルに一つのスレッドを割りあてる。縦方向へ計算を進めていく際に共有メモリまたはレジスタに一度読み込んだデータを (パイプラインのように) レジスタと共有メモリとの間で交換することによって、グローバルメモリへのアクセスを低減することができる (Abdelkhalik et al. 2009; Micikevicius 2009; Komatitsch 2010; 岡元・他 2010; Okamoto et al. 2010)。

並列計算の効率化 GPU のグローバルメモリのサイズはあまり大きくない (M2050 の場合 3 GB)。そのため大規模計算のためには計算領域を分割して複数の GPU のそれぞれに副領域を割り当てるのが不可欠となる。本研究で利用するプログラムでは 3 次元領域分割を採用し、副領域間の通信には MPI を用いる。

GPU 計算では副領域間の通信に、ホスト計算機と GPU 間の通信を仲介する必要がある。その際に必要となる cudaMemcpy 等の関数を実行する回数はできるだけ少ない方がよい。そこで、本研究では袖領域通信にメモリ領域 (バッファ) を用意する。これによって袖領域内の不連続なメモリ並びを解消し、通信の効率を高めている。

また、通信と計算をオーバーラップさせることによって、副領域間の通信を実行している間に内部領域の計算を行い、計算効率を高めている。そ

のために、側面ブロックのみを処理するカーネルと内部ブロックのみを処理するカーネルの 2 つのカーネルを作成して利用している。

並列計算性能の例 TSUBAME-2.0 で全領域サイズを変えて並列 GPU 計算を実行したときの性能を図 2 に示す。この例では副領域サイズを固定しているので、グラフは弱スケーリング性能を示すことになる。図からわかるように、800 GPU の場合まで理想的なスケーリングに近い (GPU 数にほぼ比例する) 実効性能が得られている。絶対値としても、800 GPU の場合に約 50 TFlops、1200 GPU の場合に約 61 TFlops という、非常に高い実効性能を達成できた (いずれも単精度性能)。

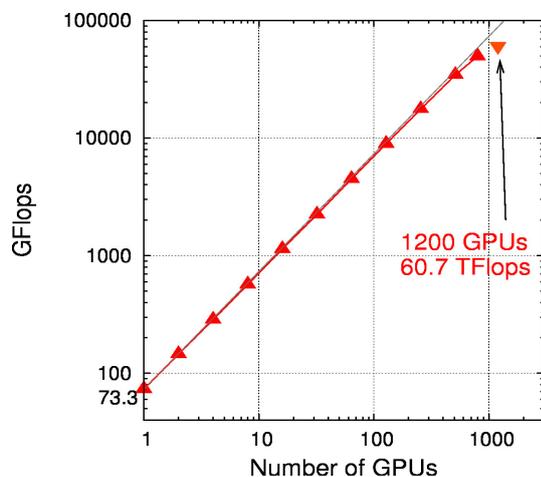


図 2 TSUBAME-2.0 での実効性能。副領域サイズを  $320 \times 320 \times 320$  に固定して、全領域サイズを変えて (つまり分割数 = GPU 数を変えて) 弱スケーリング性能を測定したもの。

### 3.1.2 地形や海水層を考慮した地震動の計算

今年度は、不規則自由表面 (地形) や不規則液体・固体境界 (海底地形) が地震動にもたらす影響について、シミュレーション結果とデータの比較によって詳細な検討を行った (Nakamura et al., 投稿中)。その上で、冒頭 (§ 1.) にも述べたように、我々は、2011 年 3 月 11 日に発生して東日本地域に甚大な被害をもたらした東北地方太平洋沖地震に関する研究を進めている。ここでは、これまでに実施したシミュレーション例を紹介し、そこで明らかになった計算手法・計算技術上の課題について検討する。

構造モデルと震源モデル 地球内部、特に表面に近い部分は不均質性が強くなっていることから、地震波伝播シミュレーションのためには、対象地域に関する地球内部構造モデルを設定する必要がある。また、地震の震源も、強度や放射パターンが異なる震源が、2 次元面 (断層面) の上に分布するものとなっていることから、震源に関するモデルも設定する必要がある。構造モデルについては、表 1 に参考にしたモデルをまとめた。

本報告書では 2 つの地震に関する計算例を紹介する。一つは東北地方太平洋沖地震、もう一つはその約 18 時間前に発生した小地震 (2010/03/11/01:56 JST) である。前者の震源モデルは我々自身が推定した暫定モデル (Okamoto et al., AGU 2011)、後者には Global CMT Project ([www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org)) によるものを利用した。

モデル	出典
地形 (陸域と海域)	Kisimoto (1999)
堆積物	Fujiwara et al. (2009)
地殻と太平洋プレート	Baba et al. (2006)
フィリピン海プレート	Nakamura et al. (2010)

表 1 構造モデルの出典

シミュレーション結果と問題点について シミュレーションで用いたパラメータの概要は表 2 にまとめた。表 2 の総実行時間は、ファイル出力時間も含めたものである。この時間をもとにして、実効的な性能を GFLOPS で表に示した。上のケースはすべて TSUBAME2 の G キューを利用して、3GPU/ノードの条件で実行した。そこで、図 2 に示された性能のうち同じ条件で実行した 1200 GPU の場合 (60650 GFLOPS) との単純な比較を試みると、ケース 1 からケース 3 の場合には、およそ 72.1 %、89.6 %、63.9 % となって、いずれもある程度の性能低下が見られることがわかる。これは、図 2 に示された性能は計算結果の出力を伴わない場合のものであるのに対して、今回の計算では計算結果を出力するためのオーバーヘッドが加わっていることが原因である。

現在のプログラムでは、一つの副領域を一つの MPI プロセスが担当して計算する。ファイル出力

	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
対象地震	小地震	小地震	東北沖地震	東北沖地震
全格子サイズ	2560×3200×1152	2560×3200×1152	6400×3200×1152	6400×3200×1600
副領域サイズ	320×320×384	320×320×384	320×320×384	320×320×320
格子間隔 (km)	0.15	0.15	0.15	0.15
全領域サイズ (km)	384×480×173	384×480×173	960×480×173	960×480×240
時間間隔 (秒)	0.005	0.005	0.005	0.005
GPU 数	240	240	600	1000
ステップ数	30000	30000	30000	44000
総実行時間 (秒)	6018	4839	6801	5768
GFLOPS	8740	10873	19377	33223

表 2 シミュレーションのパラメータ

では、各プロセスは自分が計算した結果だけを書き出すため、出力するデータを持っているすべてのプロセスが同時にファイルを開くことになる。例えば、上のケース (1-3) では、地表面に位置するプロセスがファイルを出力する。この方法は、プログラム作成が容易であること、書き出し準備 (データ統合) のためのプロセス間通信が不要であること、出力されたファイルとプロセス番号との対応が簡単につけられること、などのために採用された。好条件の場合 (TSUBAME で採用されている Lustre ファイルシステムへの負荷や、ネットワークへの負荷が低い状況) には、この手法でも性能低下は小さい (ケース 2) ことがわかる。しかしケース 1,3 のような状況を考えると、やはりファイル出力部分に改良が必要であることがわかる。

また、1 ノードあたり GPU 数が 3 基の場合には、2 基の場合よりも性能が低下するという問題がある。図 2 に示した性能を、完全な (仮想的な) スケーリング性能と比較すると、800 GPU (2GPU/ノード) の場合には 85 %、1200GPU (3GPU/ノード) の場合には 69 % となっている。これは後者の場合には MPI プロセス間通信が増加する一方で、TSUBAME のノードあたり Infiniband が 2 本であることが関係していると考えられる。

これら 2 つの計算性能上の技術課題 (ファイル出力部分とノード間通信) のうち、ファイル出力について次のような検討を行った。Lustre ファイルシステムに出力すると、多くのユーザープロセスからのアクセスが集中した場合に負荷がかかり、結果的に処理時間が長くなる。そこで各 MPI プロセスからの書き出しを、該当ノードのローカルディスク (SSD) に対して行うように実装を変更した。

その結果の一例がケース 4 である。一方、ケース 1 から 3 までは Lustre ファイルシステムへの書き出しである。このケース 4 の総計算時間には、あとでファイルを回収するのに要した時間は含まれていない。表 2 からわかるように、結果的にはケース 3、ケース 4 のどちらの場合も実効性能には大きな違いはなかったと言える。ただし、ケース 3 は条件が良かった場合のものであることに注意されたい。ファイルシステムへの負荷が高い場合には、計算に非常に長い時間を要する場合もあった。例えば表 2 には掲載していないが、ケース 3 と同じパラメータで 15780 ステップを計算するのに 20793 秒を要した場合もある。これは、本計算で出力するファイルは個数 (ケース 4 の場合には 44 万ファイル) と総サイズ (1TB) が非常に大きいため、システム全体への負荷が非常に高い場合にはフェイル出力のオーバーヘッドが非常に大きくなるためであろうと考えられる。そのため、大きな性能向上には繋がらないとしてもローカルディスクの利用は推奨されると言える。ただし、計算終了後に各ノードに分散したファイルを全て回収する時間がかかり必要になることもわかってきたので、引き続き全体の手順について考察と改良が必要である。

ノード間通信の効率化については、ノード内をメモリ共有型のマルチスレッド・プログラムとして、ノード間のみ MPI 通信を用いる形態に改良するための検討と準備を始めた。現在、ノード内並列化には POSIX スレッドライブラリ (pthreads) を利用し、ノード内 GPU 間通信には CUDA4 で実装された peer-to-peer データ転送を利用する形の改良を進めている。これは、来年度に継続する

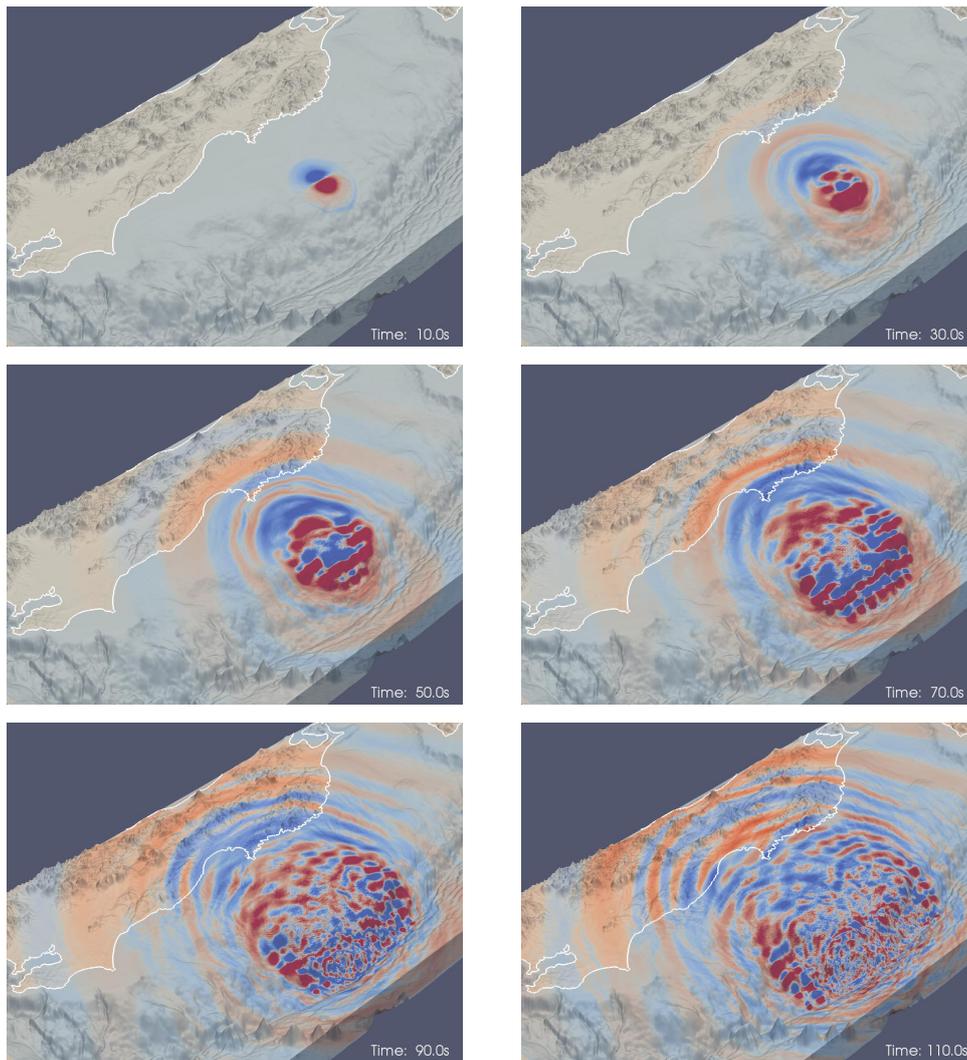


図 3 東北地方太平洋沖地震についてのシミュレーションによる地震波伝播のスナップショット。地表および海底の固体側表面での鉛直地動速度を可視化したもの。赤と青はそれぞれ上方向、下方向への動きを示す。左上から右下にかけて、破壊開始時刻から 10 秒後、30 秒後、50 秒後、70 秒後、90 秒後、110 秒後のスナップショットを示す。可視化されていないが、海水中の音波伝播は計算で考慮されている。

課題とする。

計算結果例 ここでは、ケース 4 による計算結果例を紹介する (Okamoto et al., 2012a)。計算した地震波動場を可視化したものを図 3 と図 4 とに示す。これらの計算では、Okamoto et al. (AGU, 2011) によって推定された暫定震源モデルを用いた。このように可視化された図から、断層各部からの波動場が地形や構造による散乱も加わって非常に複雑に干渉しながら伝播していく様子がわかる。これらの総合的な効果で直達波の後にくる後続波が構成されることになる。また 130 秒後から 150 秒後にかけて、上向き速度と下向き速度の強いパターンを持つ領域がペアになって福島県海岸線付近に現れ、震央付近から到来する波動のパターンを掻き

消すような様子になっていることもわかる (図 4)。このペアの領域をもたらした波源域は福島県海岸線付近でのやや大きなすべり領域である (この付近での断層面の深さは 50 ~ 60 km 程度)。このような領域は陸上観測点の強震動記録からも推定されており、福島県海岸線付近を始め数か所の SMGA (strong-motion-generation-area) が推定されている (例えば Kurahashi and Irikura 2011)。このような強震動発生領域を含めて、震源モデル全体と 3 次元構造モデルを改良しながら、今後研究を続ける必要がある。

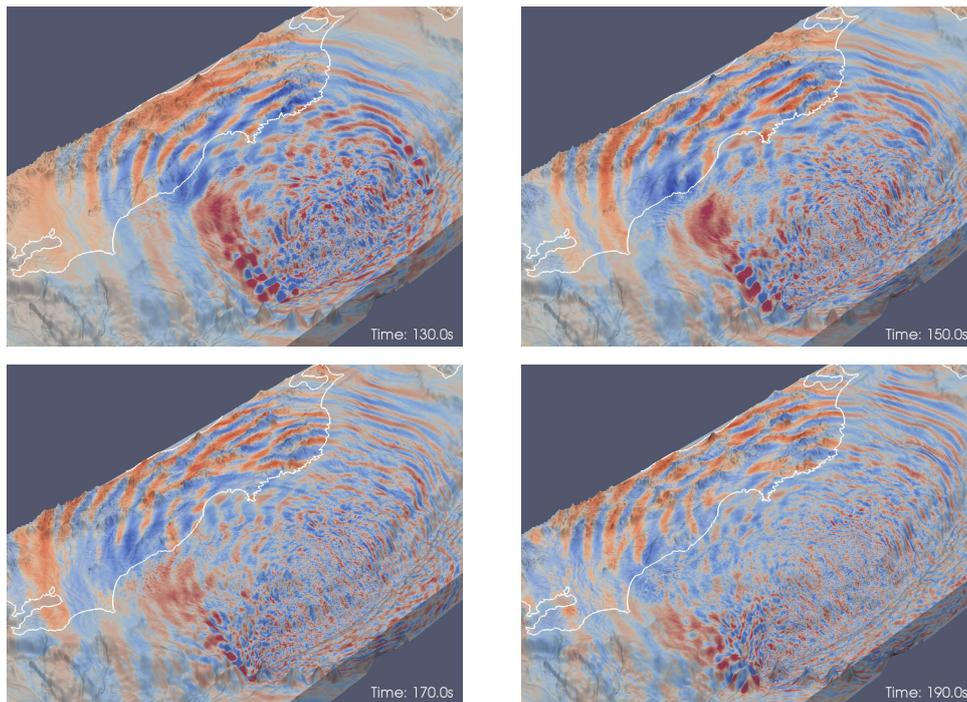


図 4 東北地方太平洋沖地震について、破壊開始時刻から 130 秒後、150 秒後、170 秒後、190 秒後のスナップショット。

### 3.1.3 惑星環境での地震動

「セレーネ 2 月広帯域地震計チーム」は、次期月探査計画に向けて広帯域地震計による観測を提案している。ここでは、月広帯域地震計観測の実現可能性検証のための研究を紹介する。

研究の背景 月においてはアポロ計画によって地震計による観測が 8 年間にわたって実施され、人工インパクト・隕石インパクト・浅発月震・深発月震からなる多くのイベントが観測された。これらの観測データから地震波の到着時刻 (travel time 走時) を読み取り、月の地震学的な構造が推定されている。

アポロ計画によって明らかになった月における地震波伝播の大きな特徴は、地球におけるよりもはるかに強く長い「コーダ」波形、すなわち紡錘形状のエンベロープを持ち、数十分近く続く後続波形が現れることである。これは、月表面付近の強い不均質性やクレーター等の不規則地形の効果によって地震波が強く散乱されるためであると考えられており、このコーダ波形の特徴から月表面付近の散乱特性が推定されている。しかしこのような強いコーダ波形は、月内部の不連続面で変換あるいは反射されたフェーズをマスクするため、地球では強力な手法として用いられている変換波や

反射波の波形を用いた内部構造探査が、アポロ月震データでは困難になっている。

アポロ計画では観測機器の特性のために比較的短周期側 (約 2 秒以下) の観測が中心であった。一方、一般に地震波探査では長周期側になるほど微細な不均質性の影響は小さくなり、大きな構造による影響が抽出できるようになる。そのためセレーネ 2 月広帯域地震計チームは将来の月探査において、アポロ計画よりも長周期側を測定する広帯域地震計の搭載を提案している。ここでは、不規則地形や内部不均質性による散乱の効果がある程度に広帯域 (あるいは長周期) 波形に影響を及ぼすかを、時間領域の差分法を用いた地震波伝播シミュレーションによって考察する。

シミュレーション設定の概要 この報告書では、不規則地形が「深発月震」からの広帯域地震波に及ぼす影響に関する計算例を紹介する。不規則地形の典型例としては「かぐや」のレーザー高度計データ (出典: 宇宙航空研究開発機構) からティコ・クレーター周辺の地形を抽出した (図 5)。さらに、Nakamura (1980) の構造を参考にして表層構造や月の地殻構造を設定した。深発月震とは月の深さ 900 km 前後で発生している地震である。観測点までの距離が長いので、深発月震からの地震

	ケース 1	ケース 2
全格子サイズ	2560×1920×1200	5120×3840×2400
副領域サイズ	320×320×400	320×320×400
格子間隔	0.2 km	0.1 km
全領域サイズ	512×384×240 km	512×384×240 km
時間間隔	0.005 s	0.0025 s
GPU 数	144	1152
ステップ数	20000	40000
総実行時間	2879 s	5566 s
GFLOPS	7680	63170

表 3 クレーター計算のパラメータ

波は近似的に平面波で表現することができる。そこで本研究のシミュレーションは、月クレータ地形に平面波が入射したときの広帯域（長周期）地震波応答を調べるというものになる。

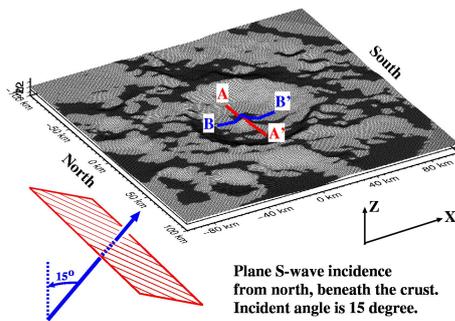


図 5 ティコ・クレータ及び周辺の鳥瞰図と、シミュレーションにおける平面波入射の模式図。

このようにして計算した波形の例を図 6 に示す (Okamoto et al., 2012b)。波形からはクレーター中央丘付近での散乱波など、パルス幅 4 秒の波に対してもクレーター地形の効果はかなり現れていることがわかる。また、地形だけではなく表層の薄い低速度層の効果も大きいことが明らかになった。このような波形に対してレシーバー関数解析\*を行い、周期 10 秒程度でもレシーバー関数波形へのクレーター構造の影響が小さくないことが明らかになった。この課題も、今後多くのシミュレーションによって不規則地形や内部構造の影響評価を進める必要がある。

数値計算の概要 この計算で用いたパラメータの概要を表 3 にまとめる。§ 3.1.2と同様にして

\*レシーバー関数とは、水平（上下）動成分波形を上下（水平）動成分波形でデコンボリューションしたもので、観測点下に存在する地震波速度不連続面での変換波を強調するものである。

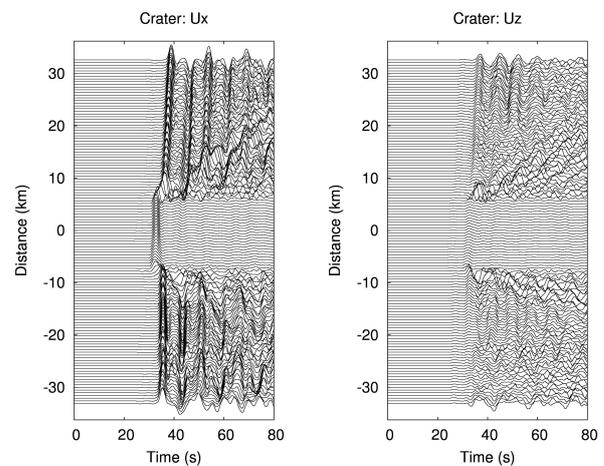


図 6 表 3 のケース 2 に関する計算波形例。深発月震からの SV 波入射を想定した場合の、クレーター中央丘を通る測線（図 5 の B-B'）に並べて置いた観測点での変位波形である。左側が入射 SV 波の振動方向の水平動成分（ $U_x$ ）、右側が上下動成分（ $U_z$ ）である。仮定した構造モデルでは、0 km（クレーター中心）から数 km までの範囲では低速度の薄い表層を置いていない。そのためクレーター中心付近では表層内での多重反射波が現れず、波形は単純となっている。

1200 GPU の場合の性能と単純な比較をすると、ケース 1 では約 106 %、ケース 2 では約 108 % の性能を達成している。これは地震波計算のケース 2 と同様に、現状の方法でも条件が良ければそれほど性能低下は発生しないことの例となる。また、上のケース 2 は TSUBAME のノード占有型キュー（H キュー）、図 2 の 1200GPU のケースはノード共有型キュー（G キュー）で計算したという違いも関係する可能性がある。

全格子サイズ	6400×3200×1600
副領域サイズ	320×320×320
格子間隔	0.15 km
全領域サイズ	960×480×240 km
時間間隔	0.005 s
GPU 数	1000
ステップ数	(1) 36000, (2) 40000×3, (3) 44000
総実行時間 (秒)	(1) 7135, (2) 7859, 7928, 7929, (3) 8886
GFLOPS	(1) 30706, (2) 30528, 30642, 30558, (3) 30028

表 4 相反計算のパラメータ

### 3.1.4 地球内部構造の推定

ここでは、標準地球モデルからのずれの量（摂動量）を波形をもとにして推定するという面から地球内部構造推定の問題を考える。つまり、観測波形データと理論波形との差を、構造モデルの摂動量に変換する逆問題として定式化できる。一次摂動理論に基づくと、地震の震源から放射された波動場（フォワード波形）と観測点に仮想的に置いた力源からの波動場（相反波形）との畳み込み積分波形が、構造モデルパラメータを求めるための積分核形式の偏微分係数となる。

今年度は、東日本地域の日本海溝周辺の海域および陸域を対象として、フォワード計算と相反計算を実施して、積分核計算に伴う技術的な課題を検討する予定である。これまでに表 4 に示したパラメータで 1000 GPU を用いたフォワード計算を試験的に実施した。この計算は 580 GB の計算結果出力を伴うものであるが、それでも 30 TFlops の実効性能を達成できている。今後、フォワード計算等を進めていく予定である。

### 3.2 当初計画の達成状況について

昨年 3 月に、申請時には予想していなかった巨大地震（東北地方太平洋沖地震）が発生した。そのため今年度は、この地震に直接に関連する課題であるサブテーマ 2（地震動に地形や海水層が及ぼす影響の考察）に多くの研究時間と資源を費やした。その結果、現実的な 3 次元構造モデルのもとで、この地震のシミュレーションを含む多くの計算を実施し、研究成果を国際会議の発表やプロシーディングスにまとめることができた。また、サブテーマ 3（惑星環境での地震動の研究）についても、仮定した 3 次元構造モデルを用いて大規模

計算を実施し、研究成果を各学会で発表した。また、ファイル出力に伴う実行時の性能低下について、考察と対策を行った。これらのサブテーマについては、当初計画の目標をおおむね達成できたと考える。一方、サブテーマ 1（地球内部構造の推定）については、相反計算は試験的にいくつかのケースで大規模計算を実施したが、実際の積分核計算にまでは至らなかった。

### 4. 今後の展望

冒頭に述べたように、東北地方太平洋沖地震によって東日本地域に甚大な被害がもたらされた。そして、巨大地震の発生条件や巨大津波励起の仕組みを解明することが地球科学においてきわめて重要な課題となってきた。さらに、今後発生するであろう同様の海溝型巨大地震（つまり、東北地方太平洋沖地震と同様の沈み込み帯のプレート境界型地震）に関する地震動の予測も非常に重要である。

そのため次年度以降はテーマを海溝型巨大地震の大規模な地震波伝播シミュレーションにしばって、研究を進めていく予定である。つまり、沈み込み帯の浅い地震からの地震波を高精度かつ安定に計算するための手法の改良を行い、海底や島嶼地域を含む日本列島域にわたる地震動の計算を海溝型巨大地震（特に東北地方太平洋沖地震）に対して実施して観測データとの比較検討を進める。

なお、今年度は技術課題として主に計算結果出力のオーバーヘッドについて議論することになった。ここを解決しなければ、GPU で演算部分を加速できたとしても全体での性能が向上しにくくなるので、GPU のようなアクセラレータ型の演算装置を実問題に応用するためには重要な課題である

と考えるためである。

また、もう一つの課題となるノード間通信の効率化については、ノード内をメモリ共有型のマルチスレッド・プログラムとして、ノード間だけに MPI 通信を用いる形態に改良するための検討と準備を始めている。現在、ノード内並列化には POSIX スレッドライブラリ ( pthreads ) を利用し、ノード内 GPU 間通信には CUDA4 で実装された peer-to-peer データ転送を利用する形の改良をすすめている。これも、来年度に継続して研究を進めていく予定である。

## 5. 研究成果リスト

### (1) 学術論文

Nakamura, T., H. Takenaka, T. Okamoto and Y. Kaneda, FDM simulation of seismic wave propagation for an aftershock of the 2009 Suruga Bay earthquake: Effects of ocean-bottom topography and seawater layer, *Bull. Seism. Soc. Am.*, submitted.

### (2) 国際会議プロシーディングス

Okamoto, T., H. Takenaka, T. Nakamura, and T. Aoki, Large-scale simulation of seismic-wave propagation of the 2011 Tohoku-Oki M9 earthquake, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, 349–360, 2012a. (開催地：東京都)

### (3) 国際会議発表

Okamoto, T., H. Takenaka, T. Hara, T. Nakamura, and T. Aoki, Rupture Process and Waveform modeling of the 2011 Tohoku-Oki, magnitude-9 earthquake, *American Geophysical Union 2011 Fall Meeting*, U51B–0038, San Francisco, USA, 2011 年 12 月 9 日.

Okamoto, T., N. Kobayashi, H. Takenaka, K. Ogawa and SELENE-2 LBBS Science Team, Simulation of seismic-wave scattering by irregular structure of crater for future lunar seismic explorations, *Scientific Preparations for Lunar Exploration* (ESA/ESTEC),

Noordwijk, The Netherlands, 6–7 February 2012b.

### (4) 国内会議発表

岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之, 2011 年東北地方太平洋沖地震の破壊過程と近地全波形シミュレーション, 地震学会 2011 年秋季大会, D32–08, 静岡県静岡市, 2011 年 10 月 12 日 .

岡元太郎・小林直樹・竹中博士・セレーネ 2 月広帯域地震計チーム, 月表面地形・表層構造を考慮した月の地震波伝播モデリング, 日本惑星科学会秋季講演会, S13–05P, 2011 年 10 月 23 日 .

## 参考文献

Abdelkhalek, R., H. Calandra, O. Coulaud, J. Roman, and G. Latu, Fast seismic modeling and reverse time migration on a GPU cluster, *International Conference on High Performance Computing & Simulation*, 36–43, 2009.

Baba, T., A. Ito, Y. Kaneda, T. Hayakawa, and T. Furumura, 3-D seismic wave velocity structures in the Nankai and Japan Trench subduction zones derived from marine seismic surveys, Abstr. Japan Geoscience Union Meet., S111-006, Makuhari, 2006.

Fujiwara, H., S. Kawai, S. Aoi, N. Morikawa, S. Senna, N. Kudo, M. Ooi, K. X.-S. Hayakawa, N. Toyama, H. Matsuyama, K. Iwamoto, H. Suzuki, and Y. Liu, A study on subsurface structure model for deep sedimentary layers of Japan for strong-motion evaluation, Technical Note of the National Research Institute for Earth Science Disaster Prevention No.337, 2009.

Kisimoto, K., Combined bathymetric and topographic mesh data: Japan250m.grd, Geological Survey of Japan, Open-file Report No. 353, 1999.

Michéa, D., and D. Komatitsch, Accelerating a three-dimensional finite-difference wave propagation code using GPU graphics cards, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04616.x, 2010.

Micikevicius, P., 3D finite-difference computation on GPUs using CUDA, in *GPGPU-2: Proceedings of the 2nd Workshop on General Purpose Processing on Graphics Processing Units*, pp. 79–84, Washington DC, USA, 2009.

Nakamura, T., T. Okamoto, H. Sugioka, Y. Ishihara, A. Ito, K. Obana, S. Kodaira, Suetsugu, M. Kinoshita, Y. Fukao, and Y. Kaneda, 3D FDM simulation for very-low-frequency earthquakes off Kii Peninsula, Abstr. Seism. Soc. Japan, P1-0 Hiroshima, 2010.

Nakamura, Y., Seismic velocity structure of the lunar mantle, *J. Geophys. Res.*, Vol. 88, No. B1, 677–686, Jan. 10, 1983.

Okamoto, T., H. Takenaka, T. Nakamura, and T. Aoki,  
Accelerating Large-Scale Simulation of Seismic Wave  
Propagation by Multi-GPUs and Three-Dimensional  
Domain Decomposition, *Earth, Planets and Space*,  
**62**, 939–942, 2010.

岡元太郎・竹中博士・中村武史, GPU による地震波伝播シ  
ミュレーション, 先進的計算基盤システムシンポジウム  
(SACISIS2010) 論文集, 141–142, 2010.