

TSUBAME 共同利用 平成 30 年度 学術利用 成果報告書

利用課題名 LRnLA アルゴリズムを用いた物理シミュレーション  
 英文 : Simulation of Physical Processes with LR n LA Algorithm

善甫 康成

Yasunari Zempo

法政大学 情報科学部

Computer and Information Sciences

<http://cis.k.hosei.ac.jp/>

永久凍土地域の地震探査で注意しなければならないことに、不凍土層(talik)の存在が地震記録に干渉を引き起こすことが知られていることである。この干渉はシミュレーションで予測することができ、その記録を解析することにより不凍土層に起因した地震波の解析結果について補正を行い、地震波を正確にとらえることが可能である。この解析では以前に開発された DTmaxwell を基に高度に改良した DiamondSeism を使用した。このコードは 1 秒間に最大 14 億のセル更新を実行し、層状媒体の地震弾性波解析を行うことが可能である。我々は Putorana 台地の地震モデルを使用し、1 件あたり約 50GB のメモリが必要なシミュレーションを 1000 件以上行うことができた。

In the seismic surveys in the areas of permafrost, the regions of melted soil, talik, are known to cause interference on the seismograms. The interference may be predicted with computer simulation, and this is used to introduce corrections into real seismogram analysis. We use the code DiamondSeism, which is an advanced version of a previously developed and tested code DTmaxwell. The code simulates seismic elastic waves in a layered media with a performance up to 1.4 billion cell updates per second. We have used the seismic model of the Putorana plateau, and obtained results for more than 1000 simulations, while each required about 50GB of memory.

**Keywords:** LRnLA Algorithm, Hooke's law, synthetic seismogram, FDTD

## 背景と目的

永久凍土(permafrost)がある地域での地震波トモグラフィーを用いる際に注意しなければならないことの一つに不凍土層(Talik)の存在の有無がある。不凍土層があると地震計の記録に干渉によるノイズが発生することが知られている。3 次元全波数値シミュレーションを使用すると、推測した位置にある不凍土層を含む地震層モデルから理論的な地震波が得られる。その記録を解析することにより不凍土層に起因した干渉の検出が可能になり地震波トモグラフィーの解析について補正を行い、地震波を正確にとらえることが可能である。

計算コストの観点から、不凍土層は低速度層であるので、解析の解像度は空間ステップによって決まり、それがモデルの全計算量を決める。4 次近似の数値スキームを使用すれば、空間ステップは一番短い波長の 8 分の 1 程度で、十分であり必要な精度が得られるモデルリングが可能である。不凍土層の P 波の伝播速度は  $V_p \sim 2400$  m/s, S 波の伝播速度は  $V_s \sim 1550$  m/s であるので、長さが  $\sim 10$  km 程度のシミュレ

ーションを行うと、データ量は 50GB 以上になる。また幾つかの震源位置での地震解析の結果を得るには、必要な計算を 1000 ケース以上行う必要がある。

このためには効率的なアルゴリズムを持つ並列コードと高性能計算機の利用が不可欠となる。本プロジェクトでは、GPU を使用して地震波の伝播現象をシミュレーションする高性能コード DiamondSeism を many-GPU の環境である TSUBAME3.0 に移植し不凍土層を含む地震層モデル計算を実施した[1]。

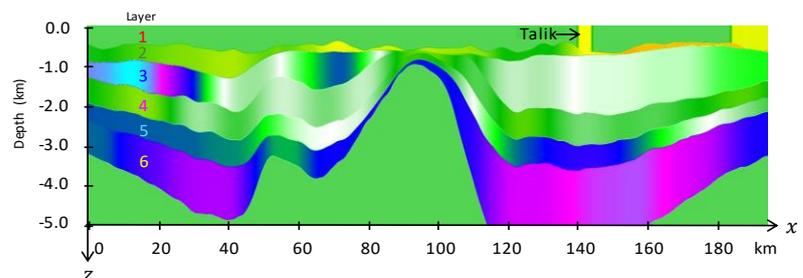


図 1. 地震層モデル。Layer1 の 141200m-144925m が Talik 層である。地震源は 134925m から 151200m の空間にあるとした。

## 概要

地震波の伝播の数値モデルはフックの法則とニュートン運動の法則からなる[2]。モデルは、応力テンソルと変位速度ベクトルの時間発展をあらわす。使用されている **Finite-Difference** 数値スキームは空間で4次近似、時間で二次近似である[3]。境界条件として **PML** を使用し、地震波源のため **TF/SF** 法を使用している。なお本モデルは以前、**DTmaxwell** コード[4]を基本に **TSUBAME2.5** と **TSUBAME3.0** 上で開発してきた解析を実施してきた実績のあるものである。

図1に地震層モデルを示す。地表から地球内部に

向かって主要な構造が6層ある。これらの層を用い図2に示す層のパラメータ依存性を考慮しシミュレーションを行った。図2に密度の空間依存性、P波およびS波の伝播速度との空間依存性を、それぞれ図3および図4に示す。本プロジェクトで用いたモデルは3次元データを用いた3次元解析であるが、1断面をとり2次元の表示としている。伝播速度が低い **Talik** 層は **Layer1** 中の **141200m-144925m** に示してある。

本コードの特徴は、**LRnLA** アルゴリズムの使用していることである。この数値計算スキームでは局所依存性を考慮し、メモリバンド幅への負担をできるだけ最小化・緩和する。また **LRnLA** アルゴリズム

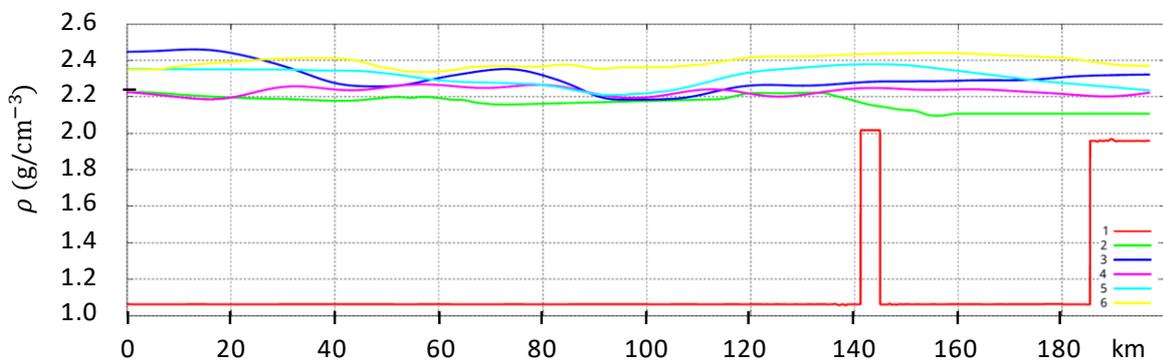


図2. 密度の空間依存性

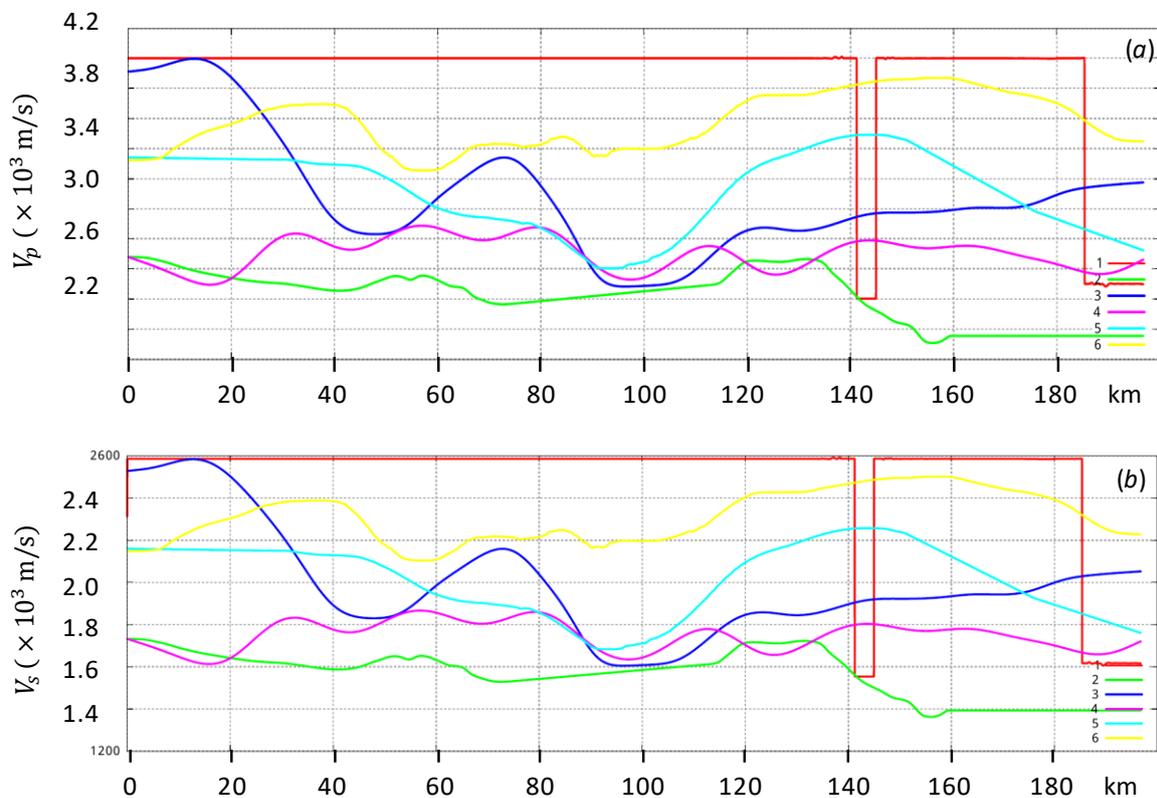


図3. P波(a)およびS波(b)の伝播速度の空間依存性

ムは、全メモリ階層と全並列法を考慮し temporal blocking[5]の考え方を更に進めた形になっている。GPU の場合、計算のデータを比較的大きいレジスタファイル内に閉込め CUDA-スレッドの並列性を使う[4]。このため Many-GPU とプロセス並列性も併用することができるため、並列スケーラビリティは必然的に良くなる。これらの結果は 2018 年迄の我々の成果報告で既に示した通りである。

### 結果および考察

TSUBAME3.0 のノード内の 4 つの NVIDIA Tesla P100 を用い計算を行った。

震源の振動数は 30 Gz である。モデルの 134925 m から 151200 m までの空間内で 50 m ごとに 325 個の地震波源がある。地震波センサーは地表に 25 m 毎に 650 個設置した。シミュレーション領域は地震計を設置した線に沿って長さ 10 km である。深さは 5 km である。空間のメッシュ数は  $1500 \times 600 \times 256$  個である。地震計の線の垂線の方向で 128 メッシュ内には PML 層も含んでいるが、球形の波面を持つ地震波の伝播距離にからすると減衰は十分である。

計算データは 13 GB となるので、ノード内で 4 つの独立なシミュレーションを実施することが可能である。時間ステップは  $\sim 0.667$  秒であるため、5 秒の伝播を図るためには 15000 ステップ必要である。現在のパフォーマンスは  $3.1 \times 10^9$  cell update per second であり一つの計算は 12 分程度で済む (図 3. 参照)。

計算結果の例として、図 4 では理論的に求めた地震計の記録が表している。これは、 $t-x$  のグラフで変位の速度の  $V_z$  である。z-軸は下に向いている。不凍土層による反射が良く見える。

### まとめ、今後の課題

これまでに開発した LRnLA アルゴリズムを使ったコードを地震波の伝播計算に応用した。TSUBAME3.0 でバッチ計算を実施した。低速度層によって空間ステップ、及びクーラント条件で決める時間ステップの制限が厳密であるが、短時間で 600 位上の理論的な地震波解析が可能となった。

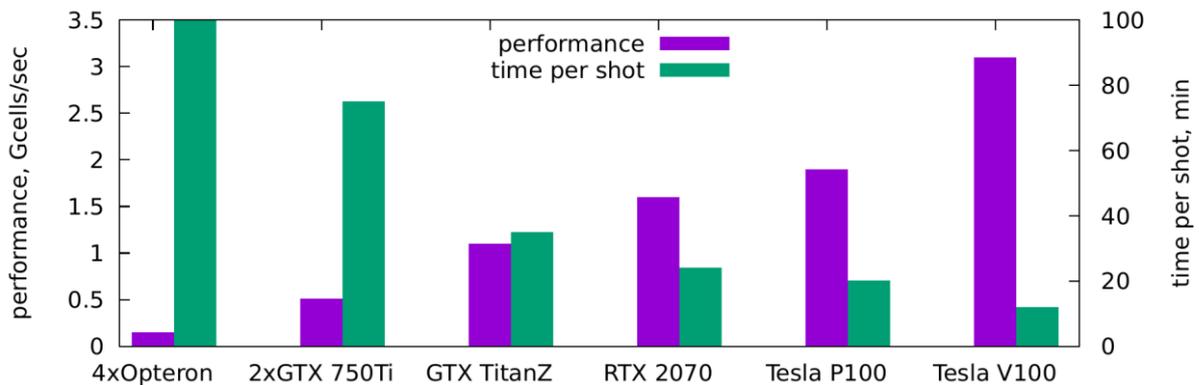


図 3. 計算処理のパフォーマンス

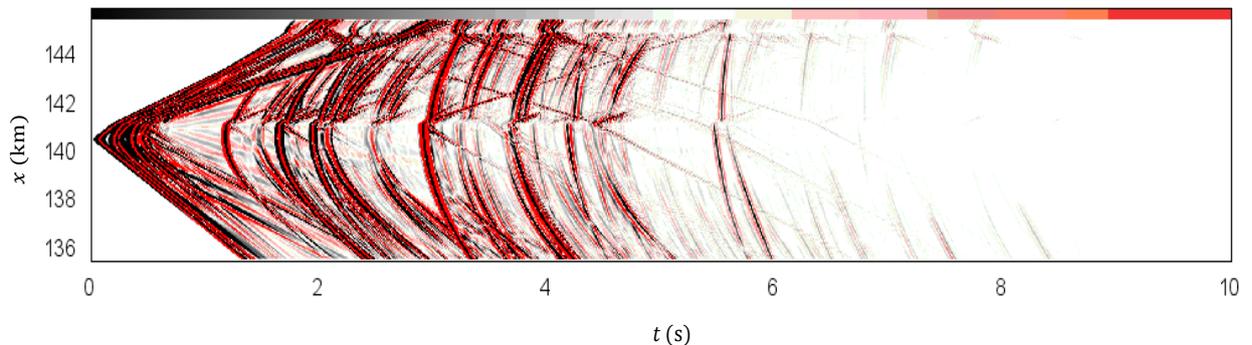


図 4. 理論的に求めた地震波。震源付近での変位の速度の大きさを表している。

参考文献

- [1] T. Levchenko, V. Rok, V. Levchenko, A. Perepelkina, Y. Zempo, “Computer modelling specifics of the geological structure with contrasting inhomogeneities under the permafrost conditions” GEOEurasia-2019, Materials of the International geologic and geophysics conference and exhibition (Feb. 4-7, 2019, Moscow), pp. 814-817  
<https://www.gece.moscow/>  
<https://drive.google.com/file/d/1Z7o5H8ZQ6FYqgpatcbBEGlaKiEMFiarh/view?usp=sharing>
- [2] Aki, Keiiti, and Paul G. Richards, “Quantitative seismology”, 2002.
- [3] Levander Alan R. Fourth-order finite-difference P-W seismograms // Geophysics. **53**(11), p1425-1436., 1988
- [4] A. Zakirov, V. Levchenko, A. Perepelkina, Y. Zempo, “High performance FDTD algorithm for GPGPU supercomputers”, J. Phys.: Conf. Ser. **759** 012100, 2016
- [5] Endo, Toshio. "Applying Recursive Temporal Blocking for Stencil Computations to Deeper Memory Hierarchy." 2018 IEEE 7th Non-Volatile Memory Systems and Applications Symposium (NVMSA). IEEE, 2018.