

GPU クラスタを用いたモンテカルロシミュレーションによる 地殻変動被害予測

Estimation of Crustal deformation by Monte Carlo method using GPU clusters

東京大学 工学部 社会基盤学科 学生会員 ○山口拓真

東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 学生会員 縣亮一郎

東京大学准教授 工学部社会基盤学科 正会員 市村強

東京大学教授 工学部社会基盤学科 正会員 堀宗朗

東京大学准教授 工学部社会基盤学科 正会員 M. L. L. Wijerathne

1. はじめに

2011 年 3 月に発生した東日本大震災では、地殻変動が大きな災害要因となることが示された。このような被害の軽減を図る上では、地震時の地殻変動をシミュレーションし、想定外の事態を最小限に抑えた被害予測を行うことが重要となる。地殻変動がもたらしうる被害として現在、琵琶湖西岸断層帯と琵琶湖疏水の関係性が懸念されている。琵琶湖疏水は京都盆地へと水を供給する重要な水路だが、琵琶湖西岸断層帯を横切る形で流れているため、断層帯の活動により流路が断絶する可能性が考えられている。

地殻変動シミュレーションを行う上では要求される分解能が高く、扱う領域が大きいため、自由度の大きな問題を解く必要がある。既往の研究¹⁾では断層帯の活動による地表面上下変位が予測されてきたが、シミュレーションは岡田の解²⁾によるものであり、複雑な地殻構造がモデル化されていない。さらに計算量の多さから、想定される地震シナリオは数ケースのみを設定して解析を行うという、決定的論的側面の強い被害予測に留まっている。

そこで本研究では有限要素法による高速な地殻変動解析手法を用い、モンテカルロシミュレーションを行うことで不確定要素の多い地殻変動に対する被害を定量的に評価する。GPU クラスタを計算資源として利用することにより、地殻変動解析に含まれる各種演算を高速化させ、実用可能な時間内で多数回の解析を行う。また GPU の導入により、小規模な計算機環境での超多自由度問題のシミュレーションを実現させる。

2. 手法

2.1 有限要素法定式化

解析には、詳細な地殻データをモデル化するのに適した有限要素法を用いる。現象としての時間スケールは数日単位の短いものであるため、地殻を線形弾性体とみなし、食い違い断層に対する地殻変動解析を行う。基礎方程式を離散化すると、解析は以下の連立一次方程式に帰着する。

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{f}$ はそれぞれ全体剛性マトリクス、変位ベクトル、外力ベクトルである。

2.2 有限要素モデル生成手法

三次元有限要素モデル生成では、成層構造の地殻データ（数値標高データと物性値）を入力とする。モデル生成の時間を短縮するためにバックグラウンド構造格子を利用しており、これにより剛性マトリクスの計算も高速化される。モデルは四面体二次要素で構成されており、側面と底面には無限要素を用いることで半無限性が導入される。

2.3 連立一次方程式求解手法

解析内では連立一次方程式の求解が計算負荷の大部分を占めるため、ソルバーの選択が計算時間に大きく影響を与える。本研究では我々のグループで開発された、可変的前処理付共役勾配法によるソルバー³⁾を用いる。表-1 にアルゴリズムを示す。ソルバー内では前処理行列 $\mathbf{M}=\mathbf{K}$ としてメモリ使用量を抑え、前処理にも共役勾配法を用いる。前処理自体の収束性を向上させるために、元の四面体二次要素モデルを分解能の低い四面体一次要素モデルに変換して初期解の推定を行う。また前処理内の反復は単精度、共役勾配法自体の反復は倍精度で計算する。このような精度混合演算の導入により、最終的な精度を保ったまま計算時間を短縮できる。

```

r ← f - r
β ← 0, i ← 1
while ||r||2/||b||2 ≥ ε
    solve Mz = r ... 前処理
    if i > 1 then
        γ ← (z, q)
        β ← γ/ρ
    end if
    p ← z + βp
    q ← Kp
    α ← (z, r) / (p, q)
    r ← r - αq, u ← u + αp
    i ← i + 1
end while

```

表-1 共役勾配法アルゴリズム

Key Words: CUDA Fortran, Finite Element Method, multi scenarios, Conjugate Gradient method, variable preconditioning, multiple precision arithmetic

〒120-0005 東京都文京区弥生 1-1-1

E-mail: yamaguchi@eri.u-tokyo.ac.jp Tel: 090-4281-4132

2.4. GPUの導入による高速化手法

本研究では CPU と GPU のヘテロコンピューティングによって解析の更なる高速化を試みる。共役勾配法内の可変的前処理は計算量が大きく、前処理部の高速化が解析全体の高速化に寄与する。前処理部に含まれる演算は単精度による疎行列ベクトル積とベクトルの線形演算であるため、GPU の導入が高速化に有効であると考えられる。

今回は NVIDIA Tesla K40 が 64 枚搭載された GPU クラスタを計算に用いる。GPU の開発環境としては CUDA Fortran を利用し、GPU に対する詳細なチューニングを行うことで、本来 GPU が持つ演算性能を最大限に発揮させる。GPU の導入と適切なデータ構造の検討により、ソルバー全体の計算がおよそ 7 倍高速化された。

また本手法で計算された解と半無限均質弾性体の解析解との比較により本手法の数値検証を行い、数値解と解析解の十分な一致を確認した。

3. 琵琶湖西岸断層帯の地殻変動シミュレーション

解析高速化手法を用いた、琵琶湖西岸断層帯周辺の地殻変動に対する地表面上下変位の統計的解析を試みる。モデル化の対象範囲は $240\text{km} \times 240\text{km} \times 300\text{km}$ とする。地殻構造は 32 層構造で、各層が異なる物性値を持つ。生成したモデルの自由度は 423,052,212 となった。

次にモンテカルロシミュレーション手法について簡潔に述べる。本研究では地震シナリオを 10,000 ケース作成するが、10,000 回解析を繰り返すことは計算コストの増加につながる。そのため解析回数を削減するために、地表面変位応答関数（グリーン関数）の重ね合わせによって地震シナリオを再現する。地震シナリオの想定にあたっては、各種パラメータの設定は J-SHIS を参考とした。断層面上にあると仮定される格子点を 1km 間隔で 541 点配置する。各格子点の単位地震モーメントに対するグリーン関数を、本手法によって計算する。このグリーン関数を、正規分布を利用して確率的に加算することを繰り返して 10,000 ケースの地震シナリオを作成する。解析時間は GPU の導入と解析回数の削減により 5 時間 18 分 47 秒となった。図-1 は地表面上下変位の平均値、図-2 は標準偏差を表す。これにより本手法が大規模地殻変動の多数回解析に適用可能であることが示された。また図-3 は琵琶湖疏水取水部における地表面上下変位の分布を表したものである。地震シナリオごとの上下変位は裾の重い分布となり、モンテカルロシミュレーションの有用性が示された。

4. おわりに

本研究では、多自由度となる地殻変動解析を多数回計算することでモンテカルロシミュレーションを適用し、統計的な被害予測を行った。莫大な計算負荷を克服するために GPU クラスタを導入し、ソルバー内の演算を GPU に計算させた。これによりソルバーの計算時間は 1/7 に短縮され

た。適用例では 4 億程度の自由度を持つ領域に対して、地殻変動におけるモンテカルロシミュレーションに必要な解析が 5 時間強で計算可能となった。これらのシミュレーション結果の、他の経済影響評価との検討は今後の課題とする。また今後は解析高速化手法を利用して、地震時断層すべりの推定のような逆解析を行うことを予定している。

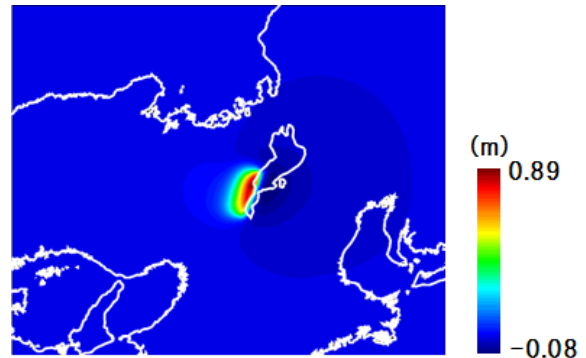


図-1 上下方向変位 平均値

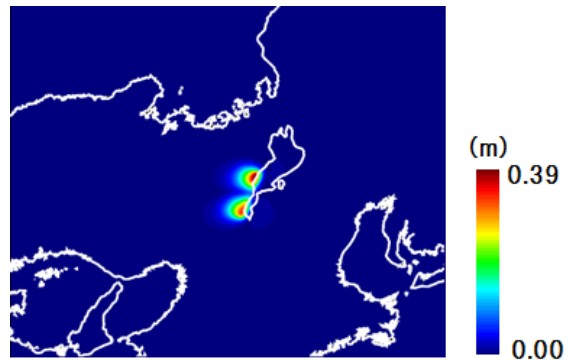


図-2 上下方向変位 標準偏差

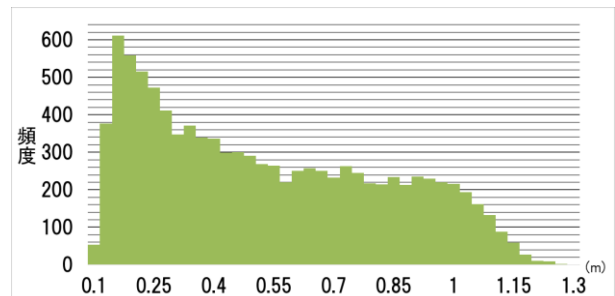


図-3 琵琶湖疏水取水部 上下方向変位ヒストグラム

参考文献

- 1) 川崎一朗 他：琵琶湖西岸断層帯南部の仮想地震による地殻変動と琵琶湖疏水，歴史都市防災論文集，vol.6，pp.97-103，2012.
- 2) Okada, Y. : Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of Seismological Society of America, 82, 1018-1040, 1992.
- 3) Ichimura, Tsuyoshi, et al. "Physics-based urban earthquake simulation enhanced by 10.7 BlnDOF× 30 K time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation." Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. IEEE Press, pp.15-26, 2014.