マルチ GPU を用いた高速な疎行列ベクトル積による 多数回地殻変動計算

Multiple crustal deformation computations using fast sparse matrix vector products by multi-GPUs

東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 学生会員 ○山口拓真
理化学研究所 計算科学研究機構 正会員 藤田航平
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

地震対策を考慮する上では、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.近年では地殻構造観測・推定技術の発展 により、高精度な観測網が利用可能となっている.観測デー タをもとにした高分解能の地殻モデルも提案されており、従 来と比較して分解能・精度の高い地殻変動計算が実現可能と なりつつある.一方で高い分解能での解析を行う場合、問題 の自由度が大きくなる.さらに、逆解析やモンテカルロシミ ュレーション、感度分析などの解析を対象とすると、地殻変 動計算を 10²~10³ 回繰り返し行う必要がある.このため、シ ミュレーションには莫大な計算コストが要求される.

我々のグループでは、大規模計算機環境を利用した地殻変 動計算高速化手法の開発が進められてきた.この手法は、 CPU をベースとした京コンピューターなどの大規模計算機を 対象として開発されたものである.一方で、近年では多様な 並列計算機およびアクセラレータが普及しており、より汎用 性の高い計算手法への需要が高まっている.また、GPU に ついては OpenACC 等の開発環境が整備されており、低い開 発コストによって高速な GPU 計算を導入可能である.

そこで本研究では GPU を含んだ小規模な計算機環境によ る地殻変動計算高速化手法を開発し、現実的な計算時間での 多数回解析を行う.解析内で大部分の計算コストを占める疎 行列ベクトル積については Element-by-Element 法による演算 方法を採用し、GPU の計算特性に適したアルゴリズムへの 修正を行う.これにより GPU の演算性能を引き出した計算 が可能となり、計算の高速化が実現する.適用例では自由度 80,000,000 程度となる地殻変動計算を 360 回行うことによっ て、東日本大震災における地震時断層すべり量を推定する.

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.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.

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} \tag{1}$$

ここで, **K**, **u**, **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. 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を用いる.共役勾配法をベースに可 変的前処理、マルチグリッド法、精度混合演算を組み合わせ られており、従来のソルバーと比較して演算量、メモリアク セス量が軽減されるように設計されている. また、計算量 の 90%以上が可変的前処理部分にあたるため、可変的前処理 部分の高速化がソルバーの高速化に大きく寄与する. そのた め、本研究では可変的前処理部について、OpenACC を用い た GPU 計算を導入する.

OpenACC は様々なアクセラレータに対応した規格で,対応する指示行を挿入することによって GPU に計算を指示することが可能である.一方で,GPU の性能を引き出して高速に計算を行うには,GPU に適さない演算や操作を抑える必要がある.以下では,連立一次方程式ソルバーの中で最も多くの計算コストを占める疎行列ベクトル積の GPU 計算手法について,詳細を示す.

Key Words: Finite Element Method, OpenACC, Element-by-Element method, Conjugate Gradient method 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

E-mail: <u>vamaguchi@eri.u-tokyo.ac.jp</u> Tel: 090-4281-4132

2.3. 疎行列ベクトル積計算手法

疎行列ベクトル積はメモリへの不規則なアクセスを必要と するため本来 GPU には不向きな演算となる.本研究では Element-by-Element 法を導入し,要素剛性マトリクスを作成 しながらベクトルとの積を計算する. GPU 内での計算では, 各要素にスレッドを割り当てることによって並列化が可能で ある.各スレッドにおけるメモリ使用量は小さいため,キャ ッシュを利用した計算が可能となり,ランダムメモリアクセ スによる計算コストを軽減することができる.疎行列格納に よる行列ベクトル積と比較した際の全体のメモリアクセス量 も軽減される.また,本研究では複数 GPU を用いた MPI 並 列計算を行う.このとき計算領域が GPU ごとに分割される ため,疎行列ベクトル積では GPU 間での演算結果の袖通信 が必要となる.本手法では通信が必要な領域を先に計算する ことで演算と GPU 間通信とをオーバーラップし, GPU 計算 のボトルネックの一つであるデータ転送時間の隠蔽を行う.

3. 適用例

本章では提案手法を用いた東北沖地震時断層すべりの推定 を行う.すべり量の推定は過去の地震の分析や、将来起こり うる地震の被害予測を行う上で重要と考えられる.一方です べり量推定には 10²回以上の地殻変動計算が必要となるため、 高分解の地殻データから生成される自由度 10⁸ 程度のモデル を使用する場合、計算コストは膨大なものとなる.そこで本 ソルバーを用い、多数回の地殻変動計算を実用可能な時間内 で行うことによって、提案手法の有用性を示す.計算には、 Tesla P100 GPU を 8 枚搭載した NVIDIA DGX-1 を使用する. 解析対象は、図-1(a)、(b)に示されており、モデルの自由度は



82,196,106となり、四面体要素数は19,921,530である.

すべり量を推定する上では、図-1(c)のように配置された単 位すべりに対する、全360のグリーン関数を計算する必要が ある. 360回の地殻変動計算によって得られるグリーン関数 と観測点のデータとを用いた逆解析を行うことで、図-2のよ うに地震時すべり量が推定される.ここで、グリーン関数の 計算については360回の地殻変動計算に2,925秒を要し、1 回当たり8.1秒で計算されていることが確認された.



図-2 推定される断層すべり量分布

4. おわりに

本研究では、GPU を用いた地殻変動計算高速化手法を開発した.計算時間に大きく影響する疎行列ベクトル積に関しては適切なアルゴリズムを構築することで、GPU の特性を活かした計算が可能となった.適用例では、東日本大震災における地震時断層すべり量の推定を行い、10²回に及ぶ自由度80,000,000程度の地殻変動計算が、実用可能な時間内で計算されることを示した.今後は10⁵回以上の多数回計算を行い、地殻構造の不確定性を定量的に評価する予定である.

謝辞: NVIDIA DGX-1の使用にあたっては, NVIDIA社 Craig Toepfer氏, 平野幸彦氏から全面的にご協力いた だいた. 記して謝意を表する次第である.

参考文献

- Ichimura, Tsuyoshi, et al. "An elastic/viscoelastic finite element analysis method for crustal deformation using a 3-D island-scale high-fidelity model." Geophysical Journal International, 2016
- Fujita, Kohei, et al. "Acceleration of element-by-element kernel in unstructured implicit low-order finite-element earthquake simulation using OpenACC on pascal GPUs." Proceedings of the Third International Workshop on Accelerator Programming Using Directives, 2016.