

固体地球シミュレータGeoFEMの開発（大規模構造解析）

Development of Solid Earth Simulator GeoFEM (Large Scale Structural Analysis)

柄谷 和輝 [1]

Kazuteru Garatani [1]

[1] 高度情報

[1] RIST

<http://geofem.tokyo.rist.or.jp/>

GeoFEMは固体地球のシミュレーションを行うための並列有限要素法プログラムである。GeoFEM/Tigerは並列有限要素法により一億自由度の解析を行うことを目標のひとつとしており、本稿ではGeoFEMの大規模構造解析機能について述べる。GeoFEMは分散メモリ型の並列計算機を想定し領域分割法を採用しており、全ての自由度を反復法で解いている。現在、GeoFEMは線形弾性問題において、東京大学のHitachi SR2201の1,000PEにより、1億自由度を超える解析を高い並列効率の基に実施している。

1. 緒言

GeoFEMは固体地球のシミュレーションを行うための並列有限要素法プログラムである。GeoFEMの構造解析サブシステムは地球の固体的挙動を扱う。現在、この機能により解析することが期待されているのは、岩石圏のプレート挙動である。これらの問題を解析するには大規模かつ複雑な非線型性を扱う必要があるが、ここでは第一次近似として大規模な線形静的問題について議論する。

2. 並列有限要素法における解析手法

並列有限要素法では、一般に分散メモリ型並列計算機を想定し、領域分割法が用いられる。領域分割法には種々の方法が提案されているが、GeoFEMでは、ソルバーの安定性と各種非線型問題への適用性を考慮し、全体の自由度を反復ソルバーにより解く。この方法では安定かつ高速に解を得るために、適切な領域分割と前処理が重要である。

3. 計算機資源の見積り

ここでは、前節で述べた解析手法を用いた場合、1億自由度程度の大規模問題で、どの程度の計算機資源が必要になるかを見積る。解析モデルは、単位立方体モデルとする。モデルは、X,Y,Z方向に単位長さの立方体であり、各々の辺の分割数を変化させることによって、任意の問題規模を設定できる。

3.1 メモリ容量の見積り

構造問題において、C.G.法等の反復法で必要になるメモリを見積るには、全体剛性行列を記憶するために必要なメモリを概算すればよい。非零項のみを記憶するとし、概略を見積るなら以下の式が得られる。

$$(\text{ソルバーで必要なメモリ容量}) = (1,000 \times (\text{自由度数}) [\text{バイト}]) \dots (1)$$

上式によると1PEあたり256MBのメモリを1,024個もつ東京大学のSR2201を用いれば、2.56億自由度までの解析が可能である。

3.2 処理時間の見積り

処理時間の推定においては、実際にSR2201の1PEで単位立方体モデルを解析し、時間計測を行った。なお、ソルバーとして用いたのは、局所不完全コレスキー分解付き共役勾配法である。計測より処理時間の推定式として以下の式が得られた。

$$(\text{ソルバーでの処理時間}) = 6.65 \times 10^{-5} \times (\text{自由度数})^{1.321} [\text{秒}] \dots (2)$$

並列計算において並列化効率100%を想定するなら、この式で得られる1PEでの処理時間を単純にPE数で割ればよい。これは、処理時間の下限値を示すものであるが、例えばSR2201の1,024PEを用いるなら、一億自由度の解析が約40分で完了することになる

4. 大規模解析例

以上のような検討をもとに、SR2201を用いて実際に大規模並列解析を実施した。解析モデルは単位立方体とし、全節点数は $330 \times 330 \times 330 = 35,937,000$ 、107,811,000自由度の解析をSR2201の1,000PEにより実施した。計算は弾性解析を1ステップとしたが、全処理時間は5,347.12秒（1時間29分）であった。東大のSR2201は、その運用上の制限より、257PE以上のジョブは処理時間が1時間に制限されている。よって、今回の解析にはリスタート計算を実施している。リスタートによるオーバーヘッドを除くと、処理時間は5,131.89秒であり、このうちソルバーに4,920.87秒を要している。収束判定は、残差の2乗ノルムを 10^{-6} 以下としたが、得られた変位は十分な精度を有していた。この解析では並列性能の評価として並列化効率61.24%、スピードアップ612.4が得られたが、効率の低下は主に前処理を局所化したことに起因しており、CPU利用率は96.79%となった。

5. 結言

以上、本稿ではGeoFEMの構造解析機能のうち、特に大規模問題に焦点をあて、並列有限要素法での解析手法、

計算機資源の見積りと解析を行った。現在GeoFEMはSR2201の1,000PEにより1億自由度を超える大規模問題を約1時間半で解析し、高い並列化効率を達成している。2001年に完成する地球シミュレータは数千PEでピーク性能、30Tflopsを目指している。この値は1,024PEのSR2201の約100倍である。従って現状のSR2201では一億自由の解析が簡単な形状の線形問題にしか適用できないが、地球シミュレータが完成すれば、複雑形状の非線形問題へも適用可能になり、実用的な固体地球の問題がGeoFEMによって解析できるようになると予測される。