

ESの全ノードを用いた全球地震波形計算による地球内部構造の解明

課題責任者

坪井 誠司 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター

研究分野

固体地球分野

1. 研究の目的と意義

地球内部の構造がどのようなものとなっているかは、表面で観測される地震や火山などの地球物理学的現象の原因を考える上で重要な研究テーマである。我々は現在、地球は地殻、マントル、核という成層構造を成していることを知っているが、そもそも、このような成層構造が46億年前の地球形成時の環境に依るものであるかは、地球が形成されてから今日までの地球の進化を考える上で極めて重要な問題である。このような場合、有効な手段は電磁波を用いて構造を探索することである。しかしながら、固体地球に対して電磁波は透過しないため、地球深部までの構造を知るために他の手法を用いざるを得ない。このためには、地震により励起された地震波を用いる地震学的手段による研究手法が有効な手段となる。地震により励起され地球内部を伝播する地震波は、弾性体力学の運動方程式で記述され、地球が完全な球であるならば理論的な解析解が存在する。しかしながら、地球は回転楕円体の形状をしており、地球内部の構造も球構造からの摂動成分は大きく、理論的に地震波を計算するためには解析的手法を用いることは期待できない。一方、地球を構成する岩石の弾性的性質により、地震波速度がkm/secのオーダーであり、地震波のP波およびS波では周期1秒の波が卓越することが知られている。したがって、観測された地震波形を再現する理論地震波形を計算する上で周期1秒の精度は到達すべき目標であった。近年、大型計算機の発展と共に、数値的手法により理論的な地震波形を計算することは大きな進歩を成し遂げてきたが、現実的な地球モデルに対して全球を伝播する地震波形を周期1秒の精度で計算することは、計算規模が大きすぎるために行われたことがなかった。本研究では、地球シミュレータの全ノードを用いて現実的な地球モデルに対して周期1秒の精度で地震波形を計算することを目的とする。このような規模での理論地震波形の計算は、我々のグループが京コンピュータを用いて行った以外には例がなく、地球シミュレータ規模の計算機を用いることで初めて可能となるものである。このような理論地震波形が計算できれば、特に地球内部の核・マントル境界等の極めて不均質な領域の構造を決定するために大きな貢献が期待できる。

2. 研究内容

我々は、これまでも地震波動場の数値解法であるスペクトル要素法を用いて現実的な地球モデルに対する地震

波動の数値計算を実施してきた。初代地球シミュレータでは、4056CPUを用いて周期3.5秒の精度での計算を達成したが、周期1秒の実現は困難であった。現在、京コンピュータを用いることで周期1秒の精度での計算は実現しつつあるが、京コンピュータでは計算機資源が限られており、試行的な計算に限定されているのが実情である。京コンピュータと同じ規模の計算は、地球シミュレータの5,046ノード(20,184コア)により実現可能と推測され、地球シミュレータを用いることで周期1秒の精度での理論地震波形計算を研究に用いることが可能になると思われる。

全球を伝播する地震波形の理論計算は、これまで我々が用いてきたものと同じ、スペクトル要素法を用いた数値解法により計算する。スペクトル要素法の計算プログラムであるSPECFEM3D_GLOBEはスカラー計算機向けに開発されているので、まずこのプログラムのベクトル計算機向けチューニングを行う必要がある。プログラムのチューニングを実施した上で、全ノードを用いた場合に予想される計算時間等の見積もりを行う。さらに、クラスタ間通信を実施するための方策について検討する。

現実的な地球モデルに対して全球を伝播する地震波形を周期1秒の精度で計算することは、到達すべき大きな目標であったので、それが現実的な計算時間で実現できるならば、地震学には大きな影響を及ぼすと期待できる。周期1秒の精度で例えば震央距離40度程度の観測点で地震波形を計算することが可能となれば、地震の震源破壊過程の研究にも大きな進展が期待できる。2015年5月30日に小笠原諸島西方沖を震源として発生した深発地震は震源の深さが678kmと極めて深く、これまで観測された深発地震の中でも最深の地震の一つとなっている。さらに、この地震の震源はこれまでの地震活動とは離れた場所で起きており、沈み込む太平洋プレートの境界か、あるいはマントル内で起きているかは議論となっている。地震の震源過程を研究する際に地震波形の周期が短いほどより詳細な破壊過程を求めることが可能となるが、特に震央距離が10度以内のような震源に近い観測点の場合は、水平方向に大きな不均質構造を持つ地殻内を伝播する距離が大きいために、地殻構造の影響を受けやすい。しかし震央距離40度程度ならば、伝播経路はマントル内が大きな割合を占めるため、地殻の影響は最小限ですませることが出来るので、より詳細な震源過程研究が可能となる。図1には、タイのCHTO観測点における3成分観測波形と、2枚の断層面について低角モデルと高角モデルを用いて計

算した理論地震波形との比較を示した。図 1 (a) は周期 8 秒でのローパスフィルター、図 1 (b) は周期 50 秒のローパスフィルターを適用したものである。これらの結果からは、周期 50 秒以上の帯域では、断層面の違いによる理論波形の差異は小さく、断層面を決定するには周期 1 秒程度までの短周期の精度を持つ理論地震波形記録が必要となることが分かった。このように周期 1 秒の精度で理論地震波形を計算することは固体地球科学全般に大きな波及効果を及ぼすと考えられる。

3. 研究成果

地球シミュレータは 2,048 ノードの拡張クラスタ 1 台と、512 ノードの基本クラスタ 6 台から構成される。クラスタ間は 10G のネットワークで接続しているが、この上では MPI 通信が出来ず、全ノードを用いた MPI 通信による計算を実行するためには、10G のネットワーク上の MPI 通信を可能とするためのシステムの開発が必要となる。用いているスペクトル要素法のプログラムでは、京コンピュータのノード数を 24 ノードから最大で 3,025 倍の 72,600 まで、各ノードに同様な負荷を割り振って計算した結果、24 ノードで計算した時の演算性能を 100% と

した時に、72,600 ノードでの計算時には 97.9% の性能が得られ、高いウィーク・スケーリングを示すことが分かっている (図 2)。特に 7 万ノード以上の大規模計算時でも、通信に掛かる時間は計算時間全体の 10% 程度であり、地球シミュレータでクラスタ間通信を実現するための MPI

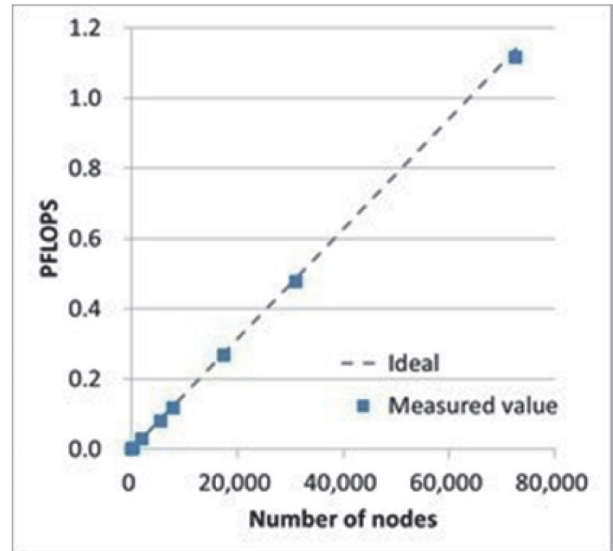


図 2 SPECfem3D_GLOBE の weak scaling

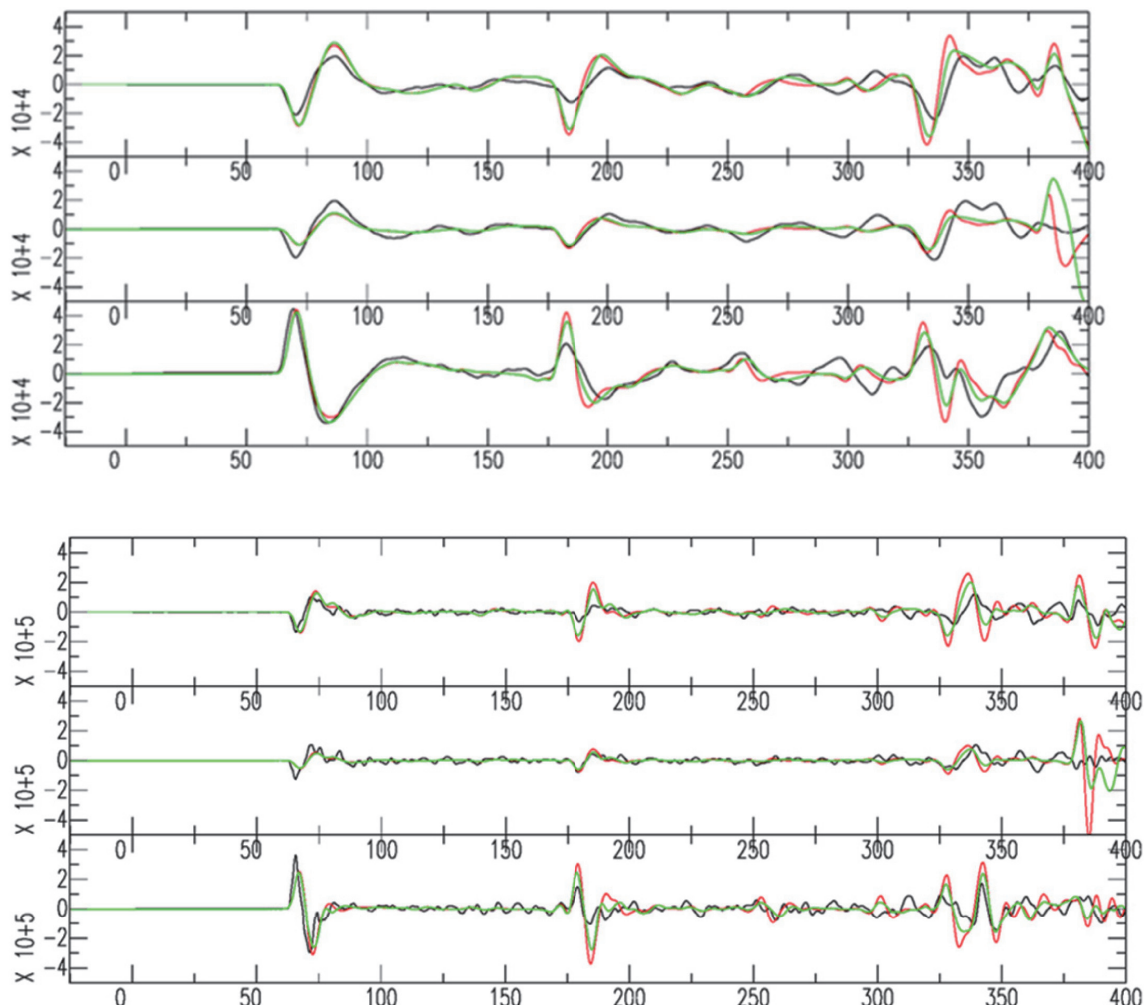


図 1 CHTO の観測波形と理論波形の比較。上から EW、NS、および Z 成分の 400 秒間の速度記録を示す。黒線が観測波形で赤線が低角モデル、緑線が高角モデルの理論波形を示す。(a) 8 秒の low pass filter を適用。(b) 50 秒の low pass filter を適用。

通信に対する負荷も計算に対する負荷と比較すれば小さいことが予想される。しかしながら、この開発では、適切な通信の状態を把握することが課題となり、全ノードを用いた MPI 通信を実現することは出来なかった。

4. 想定される波及効果

今期の研究期間中には全ノードを用いた理論地震波形計算を実現することは出来なかったが、研究目的でも述べたように、地球深部の特に核・マントル境界付近は、地球マントル内のスーパープレームと呼ばれる熱的な上昇流の発生源と考えられ、水平方向には熱的にも地震波速度などの物質的性質も大きく変化していることが予想されている。このような領域の構造を詳細に調べることは、これまでは地震波の到着時のみを用いることが一般的であり、高精度な地震波形を現実的な地球内部構造モデルに対して計算して、観測波形と比べることは行われてこなかった。もし、地球シミュレータを用いて周期 1 秒の精度で全球を伝播する地震波形を計算することが可能となれば、このような地球内部構造を推定する上で極めて有効な手段を提供することになり、詳細な構造を決定することが可能となると期待できる。引き続き、周期 1 秒の理論地震波形記録計算の実現を目指して行くことが必要と考える。

5. 計算および計算機技術サポートとの連携

本課題の実現には、10G のネットワーク上の MPI 通信を可能とするためのシステムの開発が必要となり、全面的なサポートを依頼した。しかしながら今回の開発では、システムリソースの枯渇について有効な対策を取ることが出来ず、全ノードでの MPI 通信を実現することが出来なかった。クラスタ間の MPI 通信を実現する MPI ライブラリは開発できたようであるが、全ノードを用いた規模の計算では極めて限定的な規模の計算しか実現できていないようであった。この原因としては、クラスタ間の MPI 通信は 10G のネットワークではなく 1G のネットワーク上で実現することを試みたことがある。クラスタ間の 10G のネットワーク上で MPI 通信を実現するためには、ライブラリの追加開発では済まないような開発要素があり、今回の特別推進課題では対応は出来ない規模であったようである。このような状況の報告が技術サポートから行われたために、今回は全ノードを用いた規模の計算はあきらめざるを得なかった。

6. 今後の予定

より効率的に MPI 通信を 10G ネットワーク上で実行するライブラリを開発を進めることで、全ノードでの MPI 通信を実現して、周期 1 秒の精度での理論地震波形記録計算を実行したい。

7. 特別推進課題に対する意見

全ノードでの MPI 通信を実現した計算を実行するためには、メンテナンス時期などにおける計算を実施する機会が必要であり、そのための機会を与えるという意味で特別推進課題には期待したい。

Global Seismic Wave Simulation Using Full Nodes of the Earth Simulator

Project Representative

Seiji Tsuboi Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Author

Seiji Tsuboi Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Keywords: Spectral-Element Method, Seismic wave propagation

Destructive earthquakes are caused by large-scale ruptures inside the Earth, which break along hundreds of kilometers of a geological fault and generate seismic waves shaking ground and buildings. Because large earthquakes cause serious damage to human societies, the study of earthquake source mechanisms is a crucial topic in seismology. As electromagnetic waves do not penetrate far into the Earth's solid rock interior, the use of seismic waves is almost the only way to probe the inside of our planet at high resolution. In this regard, modeling seismic waves excited by earthquakes is a fundamental scientific problem.

The use of the Spectral-Element Method (SEM) for numerical modeling of seismic wave propagation in realistic 3-D models at the scale of the full Earth has been prevailing in recent years (Komatitsch et al., 2005) [1]. The SEM is an optimized high-order version of the finite-element method that is very accurate for linear hyperbolic problems such as wave propagation. In addition, its mass matrix is perfectly diagonal by construction, which makes it favorable to implement on parallel systems because no linear system needs to be inverted. The 3-D SEM was first used in seismology for local and regional simulations and adapted to wave propagation at the scale of the full Earth. Here we use the 3-D SEM package SPECFEM3D GLOBE to try if it will be possible to simulate global seismic wave propagation with an accuracy of about 1 second for a realistic Earth model on the Earth Simulator.

The new Earth Simulator system consists of one cluster with 2,048 nodes and six clusters with 512 nodes. Each cluster is connected by 10 gigabit Ethernet but it is not possible to use MPI connections on this network. Thus, we cannot use entire 5,120 nodes as single computational job. We already have analyzed load balancing among the compute nodes in SPECFEM3D_GLOBE code on the K computer. We measured load balancing between the different MPI processes of each section of the program in the case of 72,600 compute nodes of the K computer. The cost of arithmetic operations dominates and represents 83% of the total cost; that cost is also well balanced. The communication cost is only 10% of the total cost because

the SPECFEM3D GLOBE code uses non-blocking MPI and thus communication is efficiently overlapped with calculation. Thus, the communication cost does not cause performance degradation, even in the case of 72,600 compute nodes. This demonstrates that MPI parallelization of the original code is already efficient and well optimized in this respect. Therefore, it is just necessary to develop MPI libraries, which should run on the 10 gigabit Ethernet so that we will use the entire 5,120 nodes for large scale SEM computation.

We have continued to ask technical support section and manufacturer of NEC SX system, eventually, to develop this MPI library. It became clear that it is necessary to have an appropriate combination of communication nodes and computational nodes to realize an efficient performance for large scale computation. The technical support section has tried to examine several cases of this combination by using the MPI library developed for the 10 gigabit Ethernet. However, it was not possible to get optimized numbers for communication nodes and computational nodes within this project term and we could not run large scale SEM simulation using full nodes of the Earth Simulator. It was not clear if there was a technical problem on the hardware of 10 Gbit Ethernet connecting between the clusters to accomplish a good performance using the MPI library. We hope that the development of this MPI library will continue to realize large scale computation using the full nodes of the Earth Simulator in the future.

References

- [1] D. Komatitsch, S. Tsuboi, and J. Tromp. The spectral-element in seismology, in *Seismic Earth: Array analysis of broadband seismograms*, Geophys. Monograph 157, AGU, pp. 205-227, 2005.