

# 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も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(図1)、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に限られており、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。

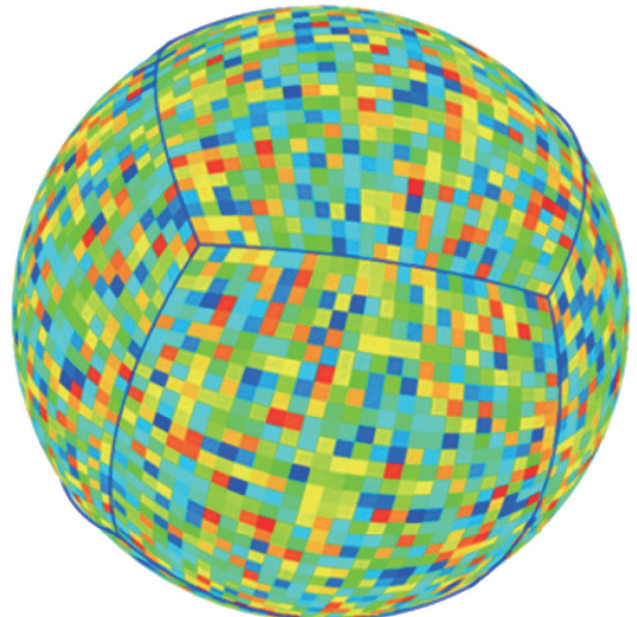


図1 4056CPUを用いて理論地震波形記録を計算した際のメッシュ形状。

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が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(図2)。一方、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。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。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。今期は、このMPIライブラリの開発を技術サポートをお願いした。計算を効率的に行うためには、MPI通信を行う上で、IXS通信の方がEthernet通信よりも高速のため、通信プロセスの割当を減らした方が良いが、クラスタ間の通信を効率的に行うには、通信プロセスの割当を増やした方が良い。アプリケーションの通信パターンによって、最適な計算プロセスと通信プロセスの負荷バランスを調整する必要がある。(図3)

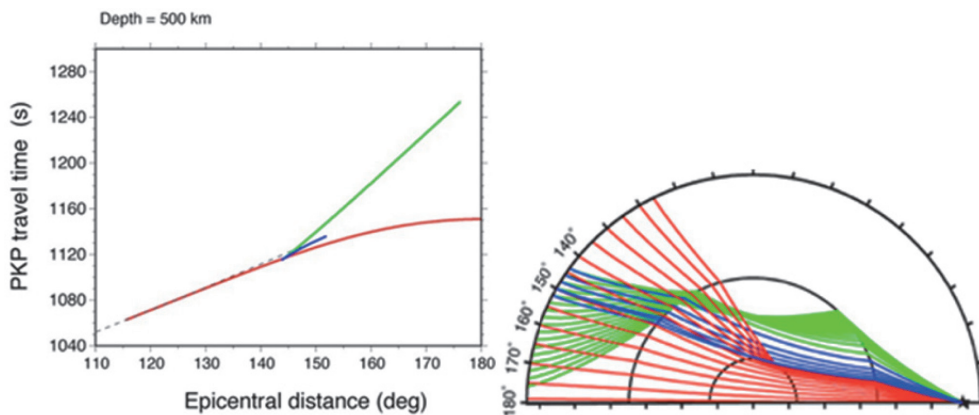


図2 地震波は外核・内核を通過する際に複雑な伝播経路を持つ。その中で、赤い線で示した波線と走時曲線はPKIKP波あるいはPKP-DFフェイズと呼ばれ、内核の情報をもたらす。PKIKP波は地表から観測点までおよそ20分かけて伝わるが、内核を通過する時間は100秒程度であり、地殻やマントルの影響も強く受ける。地殻や上部マントルの構造の影響はPKIKP波と他のフェイズとの時間差を取るによってかなり減らすことができる。他の波との時間差は1秒程度であり、この精度での理論地震波形計算が望ましい。

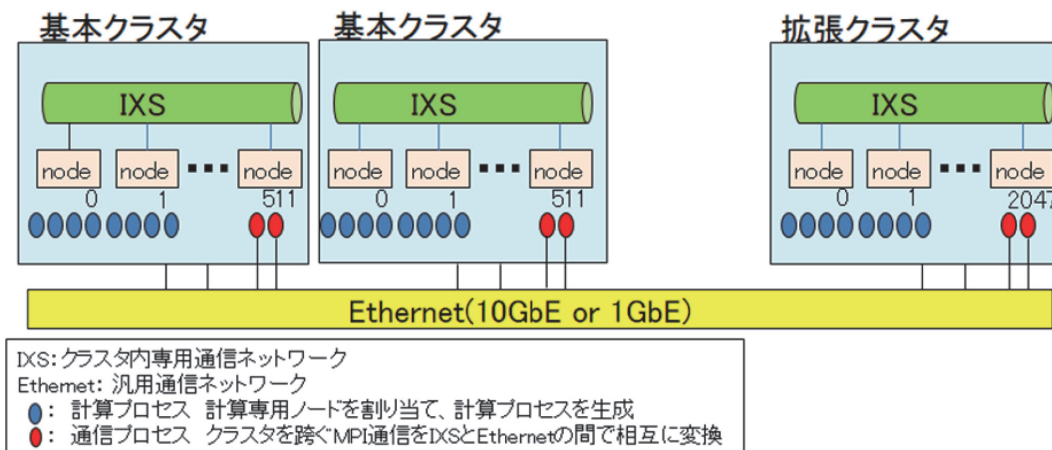


図3 クラスタ間MPI通信を実現するためのイメージ。

今期の開発では、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、研究内容でも述べたように、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。

# 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

Seismic waves are simulated by solving the equations of motion for an elastic or viscoelastic body. There exists an analytical solution only if the Earth is considered to be a perfect sphere and the Earth model spherically symmetric. However, the real Earth exhibits various significant deviations from spherical symmetry, such as ellipticity as well as heterogeneous structures in the crust and mantle, which makes it impossible to obtain analytical solutions. Traditionally, assuming that the Earth can be represented by a spherically-layered structure, normal-mode summation algorithms have been used to calculate seismograms, but these algorithms are typically accurate down to seismic periods of 8 seconds. However, in modern seismology the community is interested in seismic waves that are characterized by a dominant period of about 1 second. Therefore, it is desirable to calculate theoretical seismograms with a precision of 1 second for realistic three-dimensional (3-D) Earth models.

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 asked 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. This should be a target which will be continued to the next term of this project.

## References

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