

## 科学技術振興調整費による研究開発

### - 1 高精度の地球変動予測のための並列ソフトウェア開発に関する研究

Development of software for vector-parallel supercomputer to perform accurate numerical simulations of the Earth's activity

(研究期間 平成 10～14 年度)

国際地震工学センター

International Institute of Seismology and Earthquake Engineering

原 辰彦

Tatsuhiko Hara

Synopsis- We have developed and implemented the Direct Solution Method (DSM) codes on the Earth Simulator. We show that the computational efficiency of the DSM is greatly improved by using parallel computing, and that it is possible to enhance the resolution of Earth models by using the DSM to analyze large datasets.

**【研究目的及び経過】** 本研究の目的は超並列ベクトル計算機「地球シミュレータ」を使って地球変動を予測するための数値シミュレーションコードを開発することである。建築研究所は固体地球内部を伝播する弾性波動場シミュレーションコードの開発と地球内部構造推定への応用を担当した。第 1 期（平成 10～12 年度）は単一 PE (Processing Element) 用に開発したソフトウェアの並列化を行った。第 2 期（平成 13～14 年度）は、地球シミュレータへの実装と地球内部構造の推定を行った。

**【研究内容】** 研究内容は以下の通りである。

地震波速度構造と減衰構造の同時波形インバージョン解析

長周期表面波を用いた巨大地震の多重震源解析

並列コードの地球シミュレータへの実装と地球内部構造波形インバージョン解析への応用

**【研究結果】** 上記の各項目について記す。

周波数帯 2.00-4.10 mHz のスペクトルを Direct Solution 法(DSM)<sup>1)</sup>を用いた線形波形インバージョンで解析し、深さ 11～888km の S 波速度・減衰パラメタ Q の 3 次元分布を推定した。3 次元構造は水平方向には球面調和関数展開（最大次数 16、水平波長にして約 2500 km）で、深さ方向には層構造（11-216、216-421、421-671、671-888 km の 4 層）でパラメーター化した。解析には IRIS DMC の長周期表面波データを用いた（地震数 20、震源・観測点ペア数は 1119）。

マントル遷移層の地震波速度分布と減衰パラメタ Q の分布を図 - 1 に示す。高速度域と低減衰領域にはよい相関が認められ、温度の効果を反映していると考えて矛盾しないことが分かった。低速度領域と高減衰領域の相関は顕著ではなく、温度以外の効果を反映している可能性がある。

Q の解像度を改善するために、観測スペクトルの実部、

虚部の自乗和と差をデータとする新しい推定手法を提案し、有効性を確認した。

高精度理論地震波形計算法の応用として、長周期表面波を用いて、3 つの巨大地震（2000 年 6 月 4 日スマトラ Mw7.9、2000 年 6 月 18 日南インド洋 Mw7.9、2001 年 6 月 23 日ペルー沖地震 Mw8.4）の多重震源解を求め

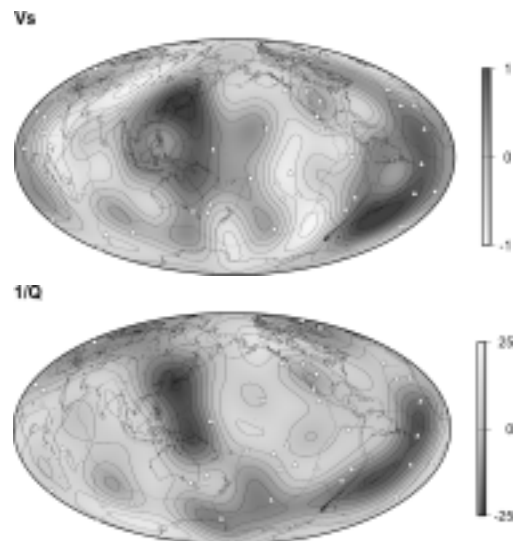


図 - 1 マントル遷移層における S 波速度（上）と  $Q^{-1}$ （下）の水平方向不均質構造（2、4、6、8 の偶数次のみ。共に球対称部分に対する割合を%で表示（コンター間隔はそれぞれ 0.2%、5%）。△はホットスポット火山。Figure 1. The laterally heterogeneous  $V_s$  (upper) and  $Q^{-1}$  (lower) model in the transition zone. The lateral heterogeneity is specified as a percentage of the spherically symmetric part at the corresponding depth. Only the even angular degree heterogeneities (up to  $s=8$ ) are plotted. The contour intervals are 0.2% and 5%, respectively. The triangles are hot spots.

た。推定は 3 ステップで行った。第 1 ステップではサブイベント数を 1 として、通常の CMT 解を求めた（解析周波数帯は 2-3 mHz）。第 2 ステップでは、第 1 ステップの解を基に 2 つのサブイベントの CMT 解を求める解析を行った（解析周波数帯は 2-4 mHz）。第 3 ステップでは、表面波の解析で推定が難しい Mrt、Mrf 成分以外の値を第 2 ステップの値で固定し、2 つのパラメタの最適値を探すパラメタサーチを行った。

得られた結果は実体波の解析結果と調和的であり、解析法の有効性を確認した。2000 年 6 月 4 日のスマトラ地震では震源メカニズムの変化が顕著であり、2 つの断層面を仮定して実体波の解析を行うことにより、さらに正確な震源過程モデルを得られる可能性がある。

DSM の並列コードを地球シミュレータへ実装した。並列化は以下の方法で行った。

- ・ ノード間並列化：MPI 使用。
- ・ ノード内並列化：自動並列化・強制並列化指示行使用。移植した並列コードを使った波形インバージョン解析

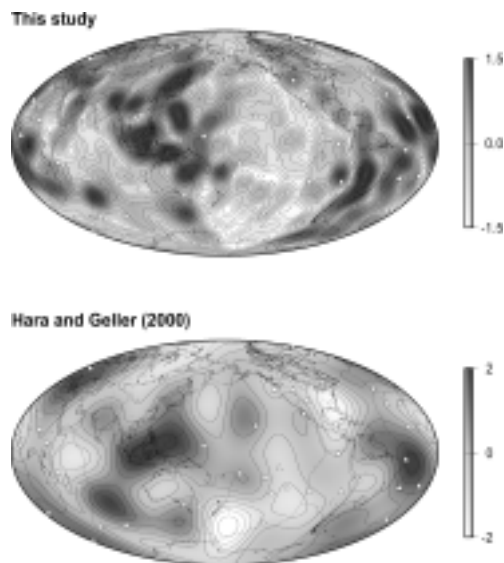


図 - 2：本研究で推定したマントル遷移層における S 波速度の水平方向不均質構造（上）。（下）は単一 PE 用コードで求めた Hara and Geller (2000) のモデル。球対称部分に対する割合を % で表示した（コンター間隔はそれぞれ 0.25%、0.5%）。

Figure 2.  $V_s$  model in the transition zone obtained by this study (upper), and the model obtained by Hara and Geller (2000) using a single PE (lower). The lateral heterogeneity is specified as a percentage of the spherically symmetric part at the corresponding depth. The contour intervals are 0.25% and 0.5%, respectively.

により、3 次元 S 波速度構造を推定した。解析周波数帯やモデルパラメタ化は の解析と同様である（ただし、球面調和関数の最大次数は 24、地震数 97、震源・観測点ペア数は 5110）。解析に使用したノード数は 10（80PE）である。

得られたマントル遷移層の構造を図 - 2 に示す。Hara and Geller (2000)<sup>2)</sup> のモデルと長波長構造はよい一致を示している。新しいモデルでは高解像度化によって、日本、マリアナ、インドネシアなどの沈み込み帯に対応した高速度領域やホットスポット下の顕著な低速度（南太平洋、アイスランドなど）が得られている。

本研究で用いた並列化コードの性能は以下の通りである。(i) 理論波形計算部分のベクトル化率、並列化率はそれぞれ 99.9%、99.6%。(ii) 偏微分係数計算部分のベクトル化率、並列化率はそれぞれ 98.7%、99.6%。この並列化率に基づけば、3 倍程度のノード数（30 ノード）で計算効率の改善が飽和する。さらに多くのノード数を使った大規模計算を行うためには、原 (2001)<sup>3)</sup> のアルゴリズムが有効である。

#### 【参考文献】

- 1) Hara, T., Tsuboi, S. and Geller, R. J., Inversion for laterally heterogeneous earth structure using a laterally heterogeneous starting model: preliminary results, *Geophys. J. Int.* 104, 523-540, 1991.
- 2) Hara, T. and Geller, R. J., Simultaneous waveform inversion for three-dimensional Earth structure and earthquake source parameters considering a wide range of modal coupling, *Geophys. J. Int.*, 142, 539-550, 2000.
- 3) 原 辰彦、Direct Solution 法を用いて理論地震波形の 3 次元構造モデルパラメタに対する偏微分係数を計算する際の効率の改善について、2001 年地球惑星科学関連学会合同大会。

#### 【備考】

- ・ Tatsuhiko Hara, Waveform inversion for 3-D earth structure using the Direct Solution Method implemented on vector-parallel supercomputer, submitted to *Physics of the Earth and Planetary Interiors*.
- ・ 原 辰彦、Direct Solution 法を用いた上部マントル及び下部マントル最上部の S 波速度と Q の同時波形インバージョン、地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会。
- ・ 原 辰彦、長周期表面波を用いた巨大地震の多重震源解析、日本地震学会 2002 年度秋季大会。