

### 3. 研究報告

#### 3. 1 長周期地震動予測に資するデータ・資料の収集等

##### (1) 研究の内容

(a) 研究の題目 長周期地震動予測に資するデータ・資料の収集等

(b) 担当者

| 所属機関                | 役職 | 氏名    |
|---------------------|----|-------|
| 国立大学法人 東京大学地震研究所    | 教授 | 瀨瀨 一起 |
| 国立大学法人 東京大学地震研究所    | 助教 | 三宅 弘恵 |
| 国立大学法人 鳥取大学大学院工学研究科 | 教授 | 香川 敬生 |

(c) 研究の目的

長周期地震動予測のために必要な震源モデル、地下構造モデル、計算手法、及びそれらに関する各種データ・資料等、地震本部が公表している長周期地震動予測地図 2009 年試作版の成果等を収集するとともに、サブテーマ②及び③で実施する南海地震を対象とした長周期地震動予測のための手法検討・時刻歴計算等、及び広帯域地震動予測のための手法検討等で利用できるように改良・整備・管理する。

##### (2) 平成 22 年度の成果

(a) 研究の要約

南海地震（昭和型）を対象とした長周期地震動予測に必要な震源モデル、地下構造モデル、計算手法、及びそれらの構築や改良に関するデータ・資料を収集・整理した。

南海地震（昭和型）の震源モデルに関して、Murotani (2007)<sup>1)</sup>を参照し、震源断層の形状、震源断層各点の深さ、波形インバージョンにより得られたすべり分布、すべり角、すべり時間関数、及び破壊開始時刻を収集・整理した。

地下構造モデルに関して、統合化地下構造モデルデータベース（藤原・他，2006<sup>2)</sup>）における全国 1 次地下構造モデル（Koketsu *et al.*, 2008<sup>3)</sup>）から、工学的基盤から地震基盤までの各層、上部地殻、下部地殻、最上部マントル、フィリピン海プレートの情報を収集した。地下構造モデルの構築に用いられる既存の探査データやボーリングデータを収集した。防災科学技術研究所の K-NET 及び KiK-net の自然地震観測記録を収集し、それらを用いて地下構造モデルの構築と改良に関する標準的手法（Koketsu *et al.*, 2009<sup>4)</sup>）を適用して地下構造モデルを改良した。

長周期地震動の計算手法に関して、三次元地下構造に対応した計算に広く用いられている差分法と差分法による計算事例についての資料（Pitarka, 1999<sup>5)</sup>）を収集した。

また、長周期地震動予測地図 2009 年試作版（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2009<sup>6)</sup>）より、長周期地震動予測地図に関する成果及び高度化に向けた課題等を収集・整理した。

以上の震源モデル、地下構造モデル、計算手法をとりまとめて、サブテーマ②で実施する時刻歴計算やサブテーマ③で実施する広帯域地震動予測のための手法検討で利用できる

ように整備した。

#### (b) 研究の実施方法

海溝型巨大地震であり観測記録が得られている 1946 年昭和南海地震の震源モデルを収集し、フィリピン海プレートの形状と震源断層の位置の関係、海溝型地震に特徴的な強震動を励起するアスペリティの位置・面積と強さ、破壊伝播の様式等について整理する。

統合化地下構造データベースから、日本国内の様々な領域で構築された既存の地下構造モデルを統合した 1 次地下構造モデル、地下構造モデルの構築と改良に用いられる、屈折法探査、反射法探査、微動アレイ探査等のデータ、重力異常データ、ボーリングデータ、及び地下構造モデルの改良や妥当性検証に用いるための、防災科学技術研究所の K-NET や KiK-net で観測された地震記録を収集する。地震観測記録から S 波の走時、R/V スペクトル比（レーリー波のラディアル成分と上下成分との比）のピーク周期等を解析し整理するとともに、地下構造モデルの妥当性検証のために観測波形を整理する。

長周期地震動の揺れの強さ、周期や継続時間に大きな影響を及ぼす平野や盆地等を中心とした工学的基盤から地震基盤までの構造について、長周期地震動が影響する範囲を含む広域で詳細な三次元地下構造モデルを検討し、収集した地震観測記録から得られる R/V スペクトル比のピーク周期を用いるなどして改良し、観測波形記録と再現計算によるシミュレーション波形との比較等によって妥当性を検証する。

長周期地震動の計算手法について、広く用いられている差分法に関する資料を収集し、計算の安定性と短周期側の有効周期の問題点を整理する。

震源モデル、地下構造モデル、地震動の計算手法は、サブテーマ②において行うシミュレーションによる時刻歴波形の計算と妥当性の吟味、サブテーマ③において行う広帯域地震動予測に関する検討で利用できるように整備する。

#### (c) 研究の成果

長周期地震動予測のための海溝型巨大地震の震源モデルと三次元地下構造モデルが構築・改良され、計算手法が、サブテーマ②及び③で実施される時刻歴波形計算や手法改良の検討に利用できるように整備された。

##### 1) 震源モデル等の収集

昭和南海地震の震源モデルについては Murotani (2007)<sup>1)</sup>の研究成果を収集した。収集した昭和南海地震の震源モデルの震源断層各点のすべり分布を図 3.1.1 に、破壊開始時刻を図 3.1.2 に、震源断層の深さ分布を図 3.1.3 に、長周期地震動予測計算時における震源断層位置の断面図を図 3.1.4 に示す。同じく Murotani (2007)<sup>1)</sup>から、世界の遠地観測点、国内の気象庁観測点で得られた地震波観測記録、及び国内の地殻変動データを収集し整理した。遠地地震記録の得られた観測点位置を図 3.1.5 に、近地地震記録と観測位置を図 3.1.6 に、地殻変動データの得られた地点を図 3.1.7 に示す。

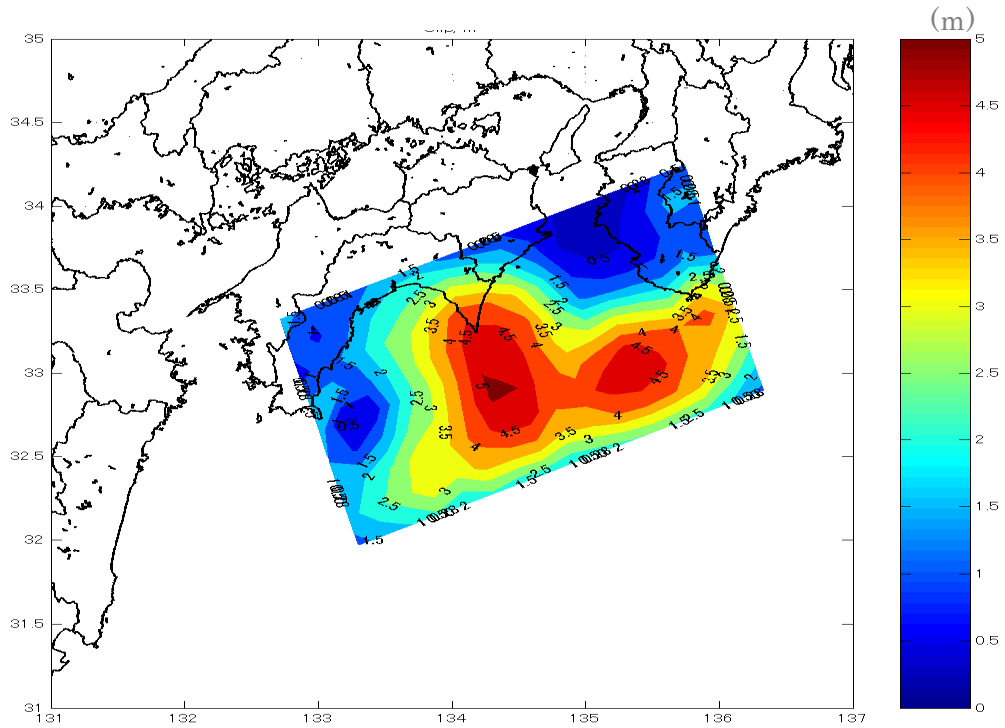


図 3.1.1 収集した昭和南海地震の震源モデルのすべり分布 (Murotani, 2007<sup>1)</sup>)。

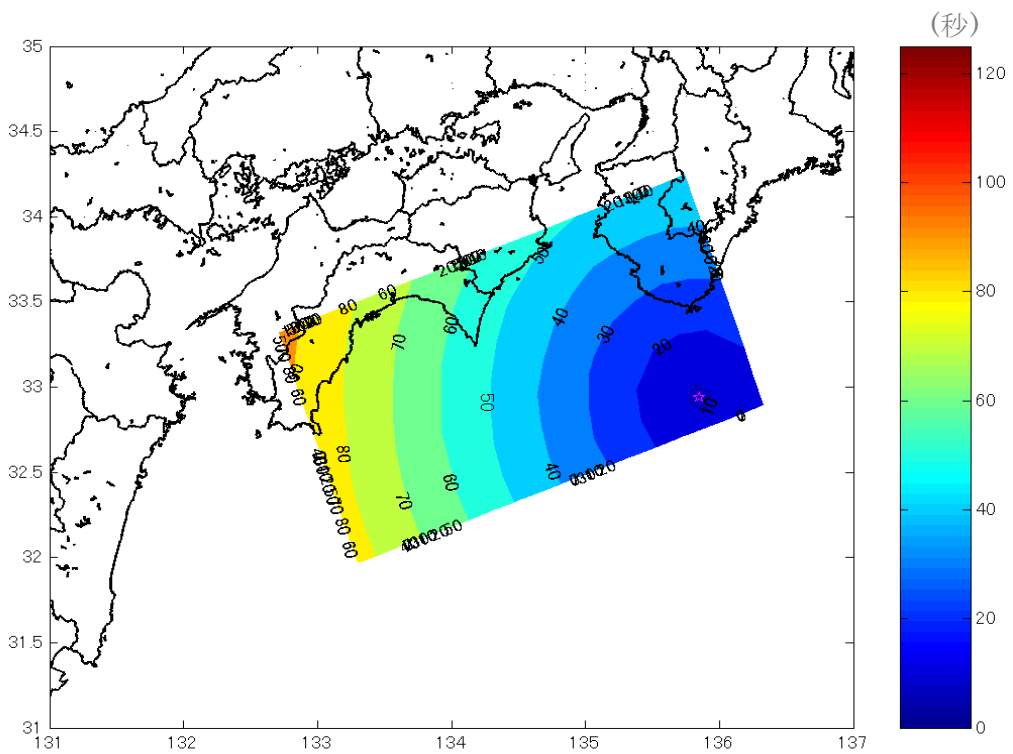


図 3.1.2 収集した昭和南海地震の震源モデルの破壊開始時刻 (Murotani, 2007<sup>1)</sup>)。

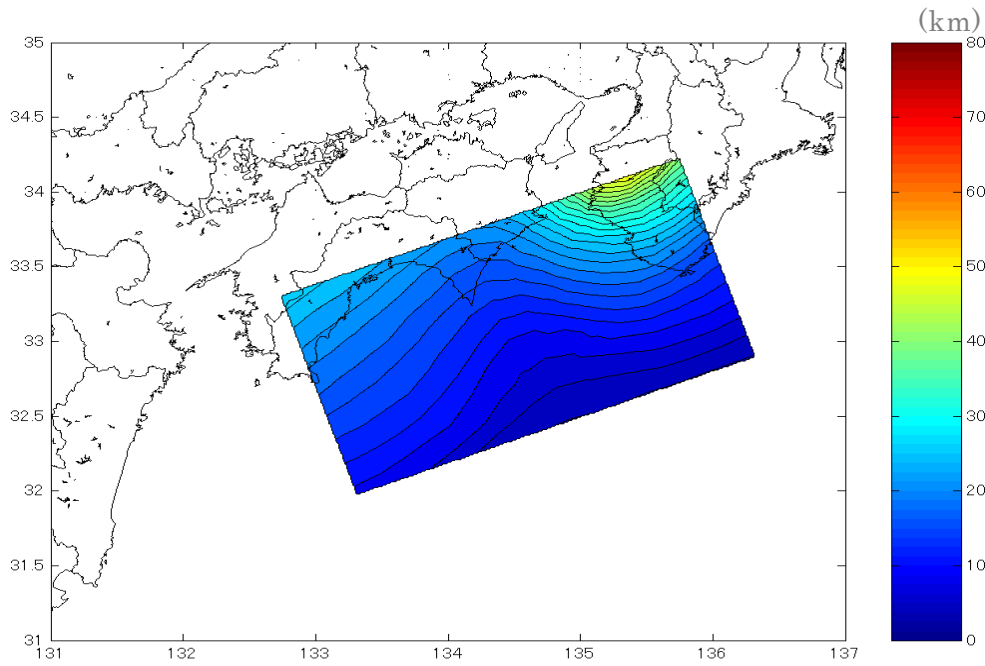


図 3.1.3 収集した昭和南海地震の震源モデルの震源断層深さ (Murotani, 2007<sup>1)</sup>)。

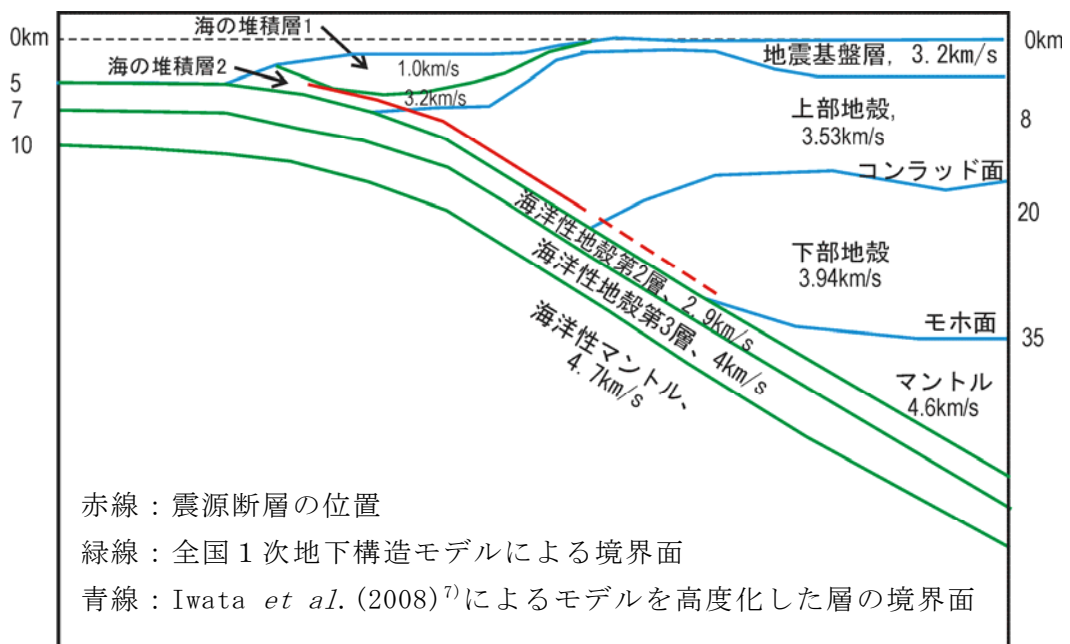


図 3.1.4 南海地震（昭和型）の長周期地震動予測における震源断層位置。

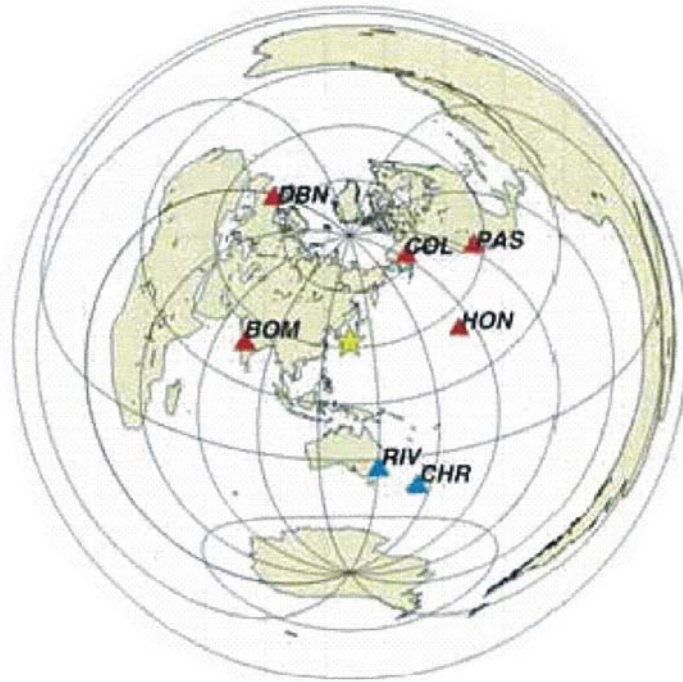


図 3.1.5 収集した昭和南海地震の遠地地震観測点位置 (Murotani, 2007<sup>1)</sup>)。

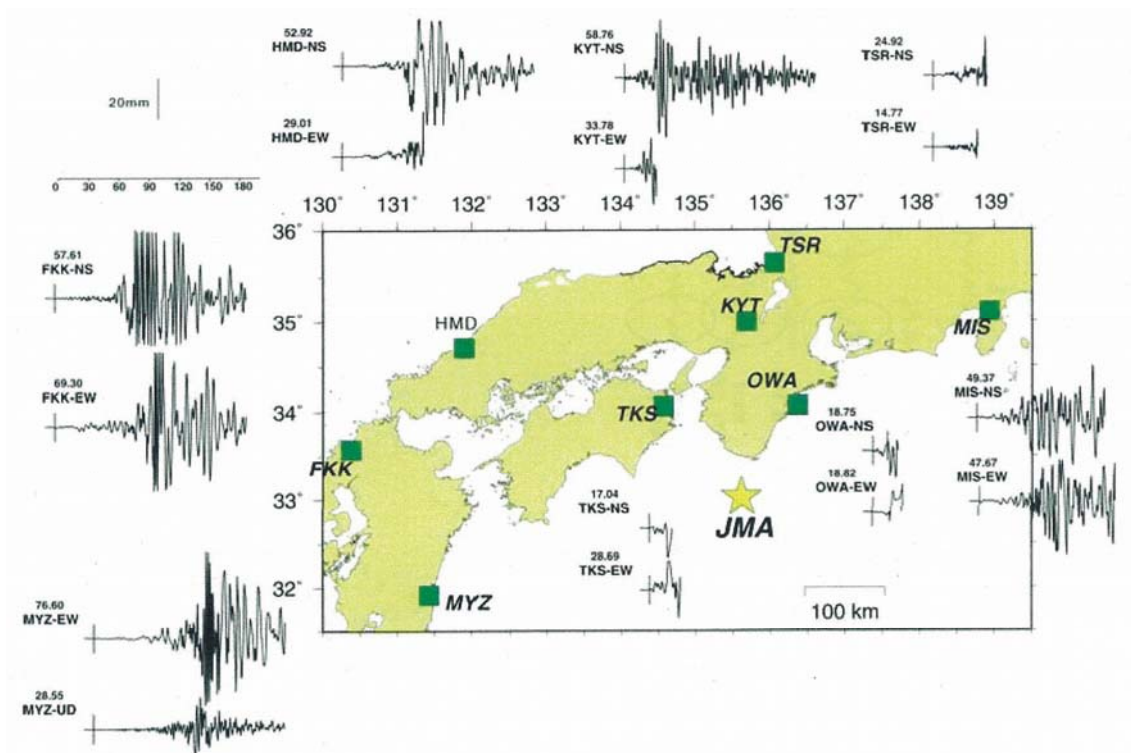


図 3.1.6 収集した昭和南海地震の近地記録と気象庁観測点位置 (Murotani, 2007<sup>1)</sup>)。

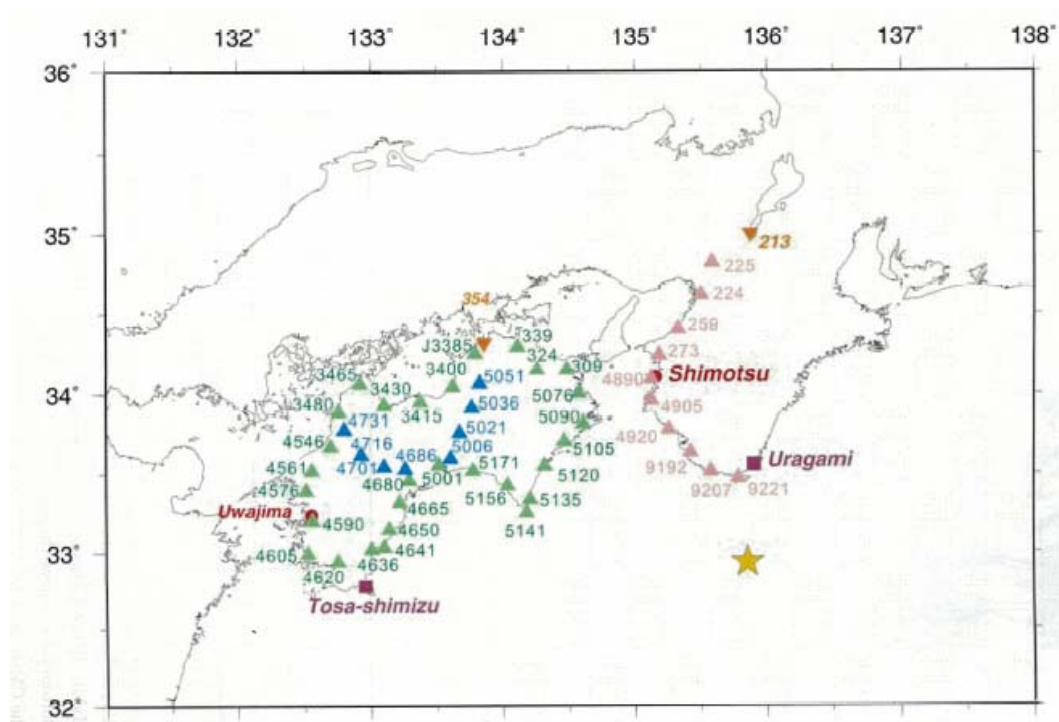


図 3.1.7 収集した昭和南海地震の地殻変動データの得られた地点 (Murotani, 2007<sup>1)</sup>)。

## 2) 地下構造モデル等の収集

統合化地下構造モデルデータベース(藤原・他, 2006<sup>2)</sup>)の全国 1 次地下構造モデル(Koketsu *et al.*, 2009<sup>3)</sup>)を収集し、南海地震の震源断層を含む広い領域で三次元地下構造モデルを収集した。地殻構造や海域構造を含む収集した地下構造モデルは 20 層からなり、各層の物性値は図 3.1.8 に示すとおりである。第 7 層は付加体、第 14 層は地震基盤である。図 3.1.9 に地下構造モデル各層の上面深さを示す。

| Layer | Vp(km/s) | Vs(km/s) | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Qp  | Qs  |                      |
|-------|----------|----------|-----------------------------|-----|-----|----------------------|
| 1     | 1.7      | 0.35     | 1.80                        | 119 | 70  |                      |
| 2     | 1.8      | 0.5      | 1.95                        | 170 | 100 |                      |
| 3     | 2.0      | 0.6      | 2.00                        | 204 | 120 |                      |
| 4     | 2.1      | 0.7      | 2.05                        | 238 | 140 |                      |
| 5     | 2.2      | 0.8      | 2.07                        | 272 | 160 |                      |
| 6     | 2.3      | 0.9      | 2.10                        | 306 | 180 |                      |
| 7     | 2.4      | 1.0      | 2.15                        | 340 | 200 | 付加体                  |
| 8     | 2.7      | 1.3      | 2.20                        | 442 | 260 |                      |
| 9     | 3.0      | 1.5      | 2.25                        | 510 | 300 |                      |
| 10    | 3.2      | 1.7      | 2.30                        | 578 | 340 |                      |
| 11    | 3.5      | 2.0      | 2.35                        | 680 | 400 | 地殻最上部層               |
| 12    | 4.2      | 2.4      | 2.45                        | 680 | 400 | 地殻最上部層               |
| 13    | 5.0      | 2.9      | 2.60                        | 680 | 400 | 地震基盤(近畿圏)            |
| 14    | 5.5      | 3.2      | 2.65                        | 680 | 400 | 地震基盤(上部地殻第1層)        |
| 15    | 6.0      | 3.53     | 2.70                        | 680 | 400 | 上部地殻第2層              |
| 16    | 6.7      | 3.94     | 2.80                        | 680 | 400 | 下部地殻                 |
| 17    | 7.8      | 4.60     | 3.20                        | 850 | 500 | マントル                 |
| 18    | 5.0      | 2.9      | 2.40                        | 340 | 200 | 海洋性地殻第2層(フィリピン海プレート) |
| 19    | 6.8      | 4.0      | 2.90                        | 510 | 300 | 海洋性地殻第3層(フィリピン海プレート) |
| 20    | 8.0      | 4.7      | 3.20                        | 850 | 500 | 海洋性マントル(フィリピン海プレート)  |

|  |   |
|--|---|
|  | 地震本部などによる地下構造モデル  |
|  | Ludwig et al. (1970)                                    |
|  | Yamada and Iwata (2005)                                 |
|  | H17年度大大特広域モデル   |
|  | $Q_s = V_s/5$ $Q_p = 1.7 * Q_s$ $Q_s$ が400を超える場合は400とする |

図 3. 1. 8 収集した全国 1 次地下構造モデルの物性値。

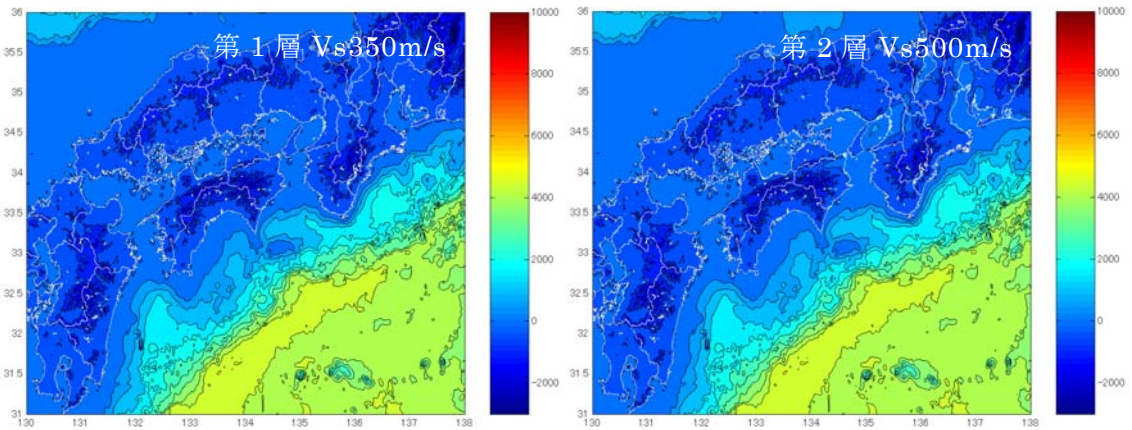


図 3. 1. 9(a) 収集した全国 1 次地下構造モデルの層上面の深さ (単位 m)。

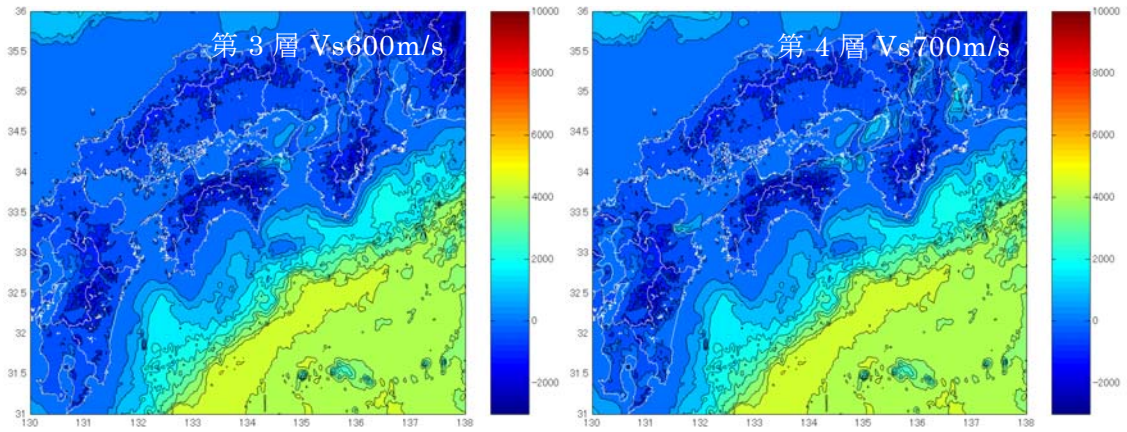


図 3.1.9(b) 収集した全国1次地下構造モデルの層上面の深さ (単位 m)。

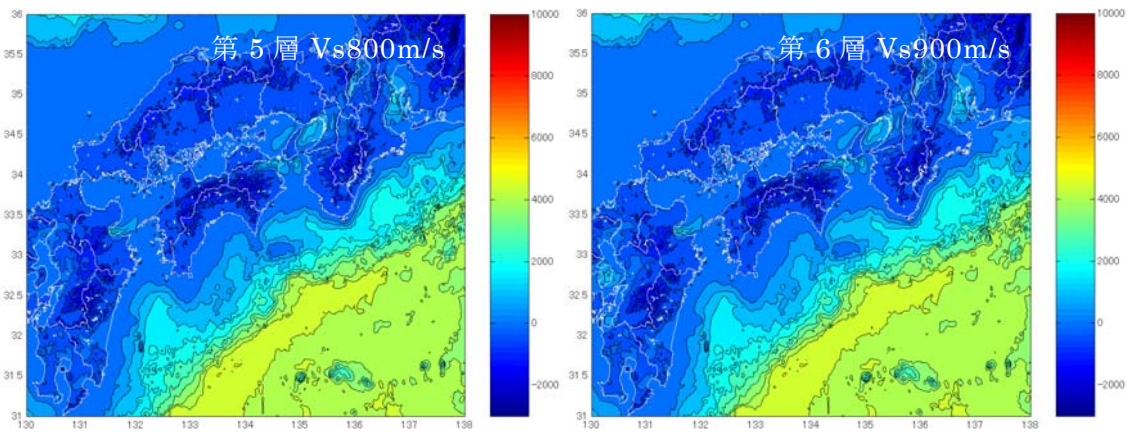


図 3.1.9(c) 収集した全国1次地下構造モデルの層上面の深さ (単位 m)。

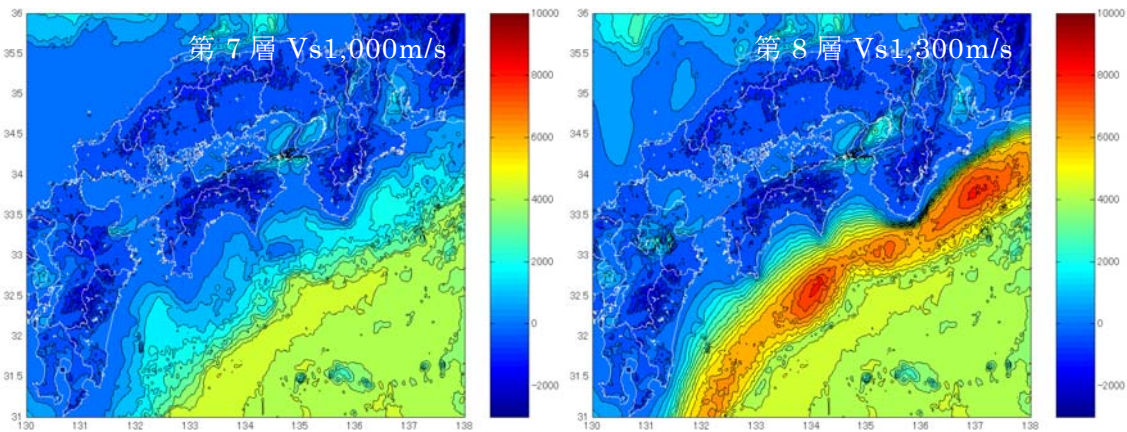


図 3.1.9(d) 収集した全国1次地下構造モデルの層上面の深さ (単位 m)。



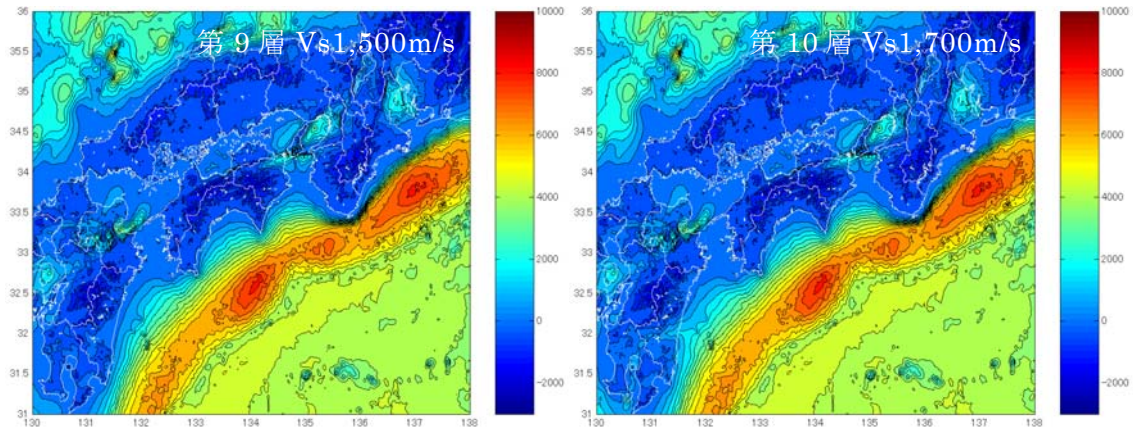


図 3.1.9(e) 収集した全国1次地下構造モデルの層上面の深さ (単位 m)。

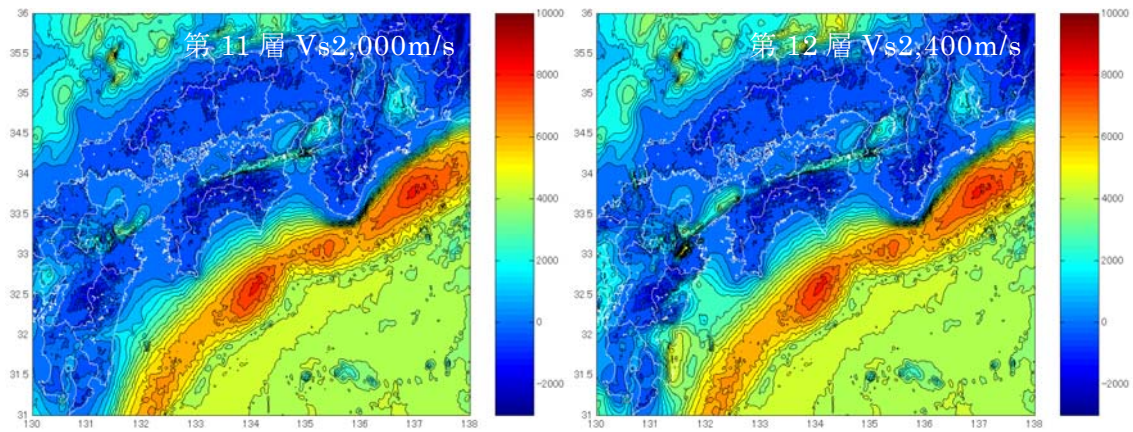


図 3.1.9(f) 収集した全国1次地下構造モデルの層上面の深さ (単位 m)。

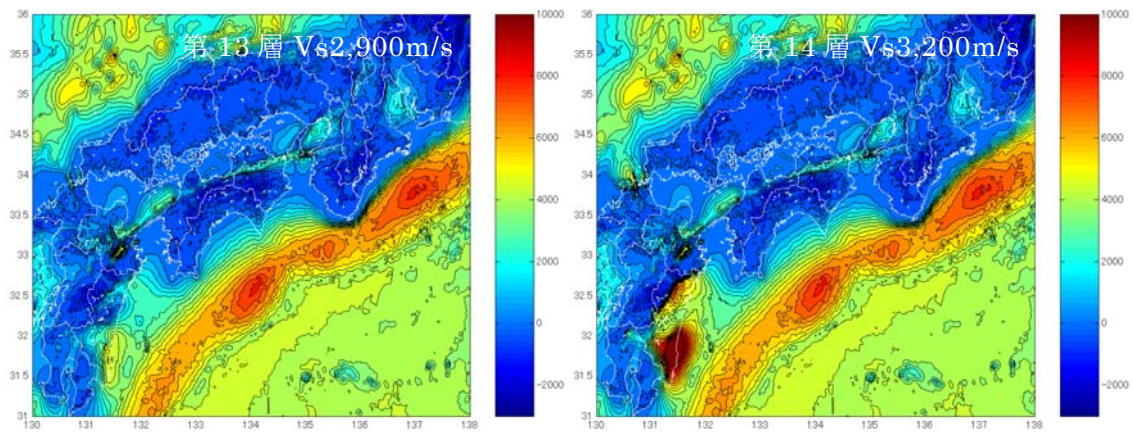


図 3.1.9(g) 収集した全国1次地下構造モデルの層上面の深さ (単位 m)。

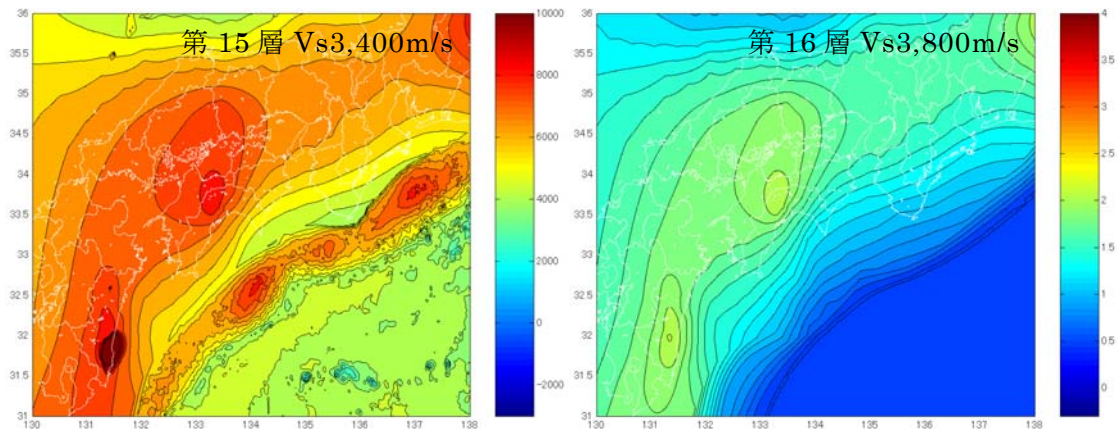


図 3.1.9(h) 収集した全国 1 次地下構造モデルの層上面の深さ  
(左：単位 m、右：単位 10 km)。

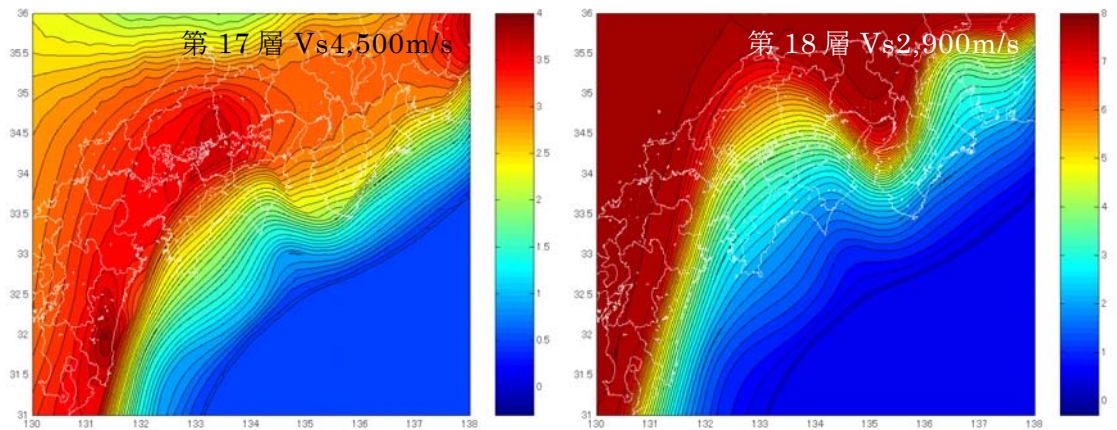


図 3.1.9(i) 収集した全国 1 次地下構造モデルの層上面の深さ (単位 10 km)。

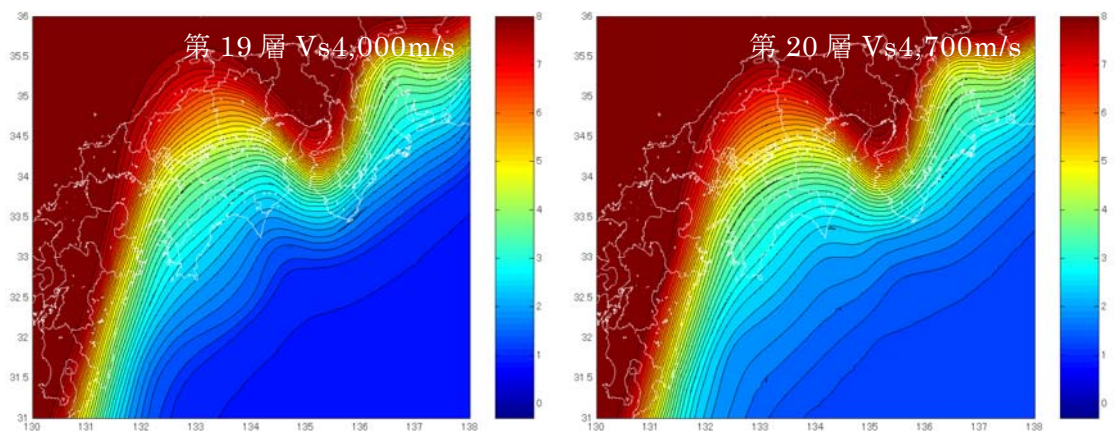


図 3.1.9(j) 収集した全国 1 次地下構造モデルの層上面の深さ (単位 10 km)。

### 3) 地下構造モデルの改良

収集した地下構造モデルについて、長周期地震動を高精度で予測するために、モデルから計算される R/V スペクトル比（レーリー波のラディアル成分と上下成分との比）のピーク周期が、自然地震の観測記録から得られる値に一致するように、工学的基盤から地震基盤までの各層の厚さを調整した。モデル修正に用いた地震の震央を図 3.1.10 に、用いた K-NET、KiK-net 観測点の位置を図 3.1.11 に示す。図 3.1.12 に、香川県内の KiK-net 大内観測点（KWGH04）における R/V スペクトル比のピーク周期による地下構造モデルの修正の例を示す。モデルにより計算される R/V スペクトル比のピーク周期が、観測値と一致するように各層の厚さを調整した。

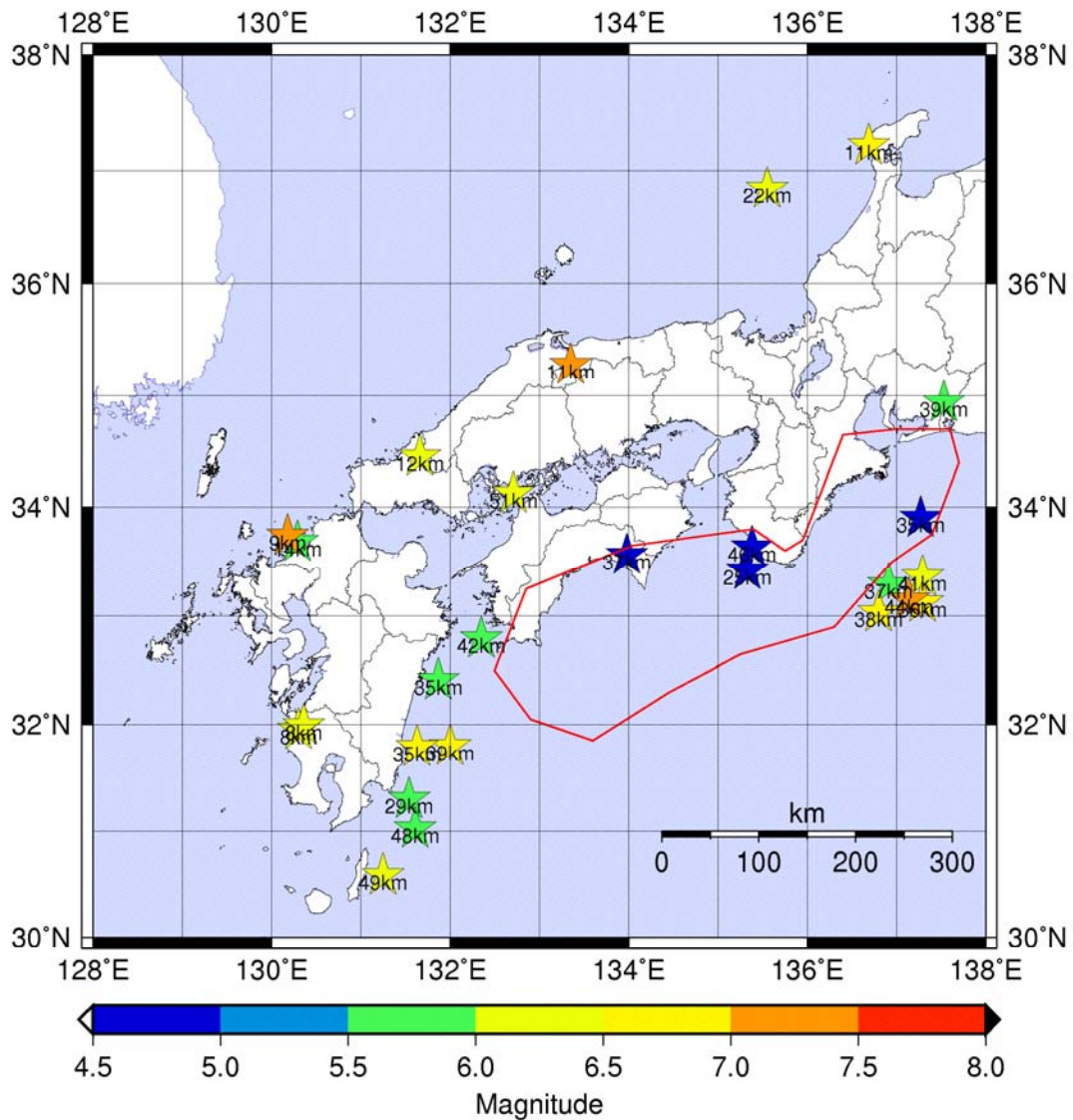


図 3.1.10 地下構造モデルの修正に用いた地震の震央。

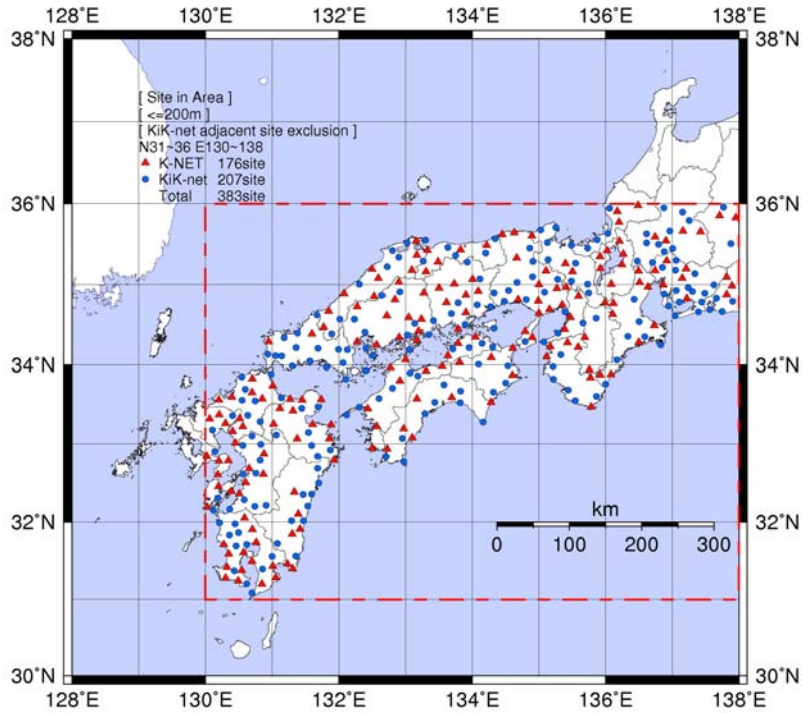


図 3. 1. 11 地下構造モデルの修正に用いた観測点位置。

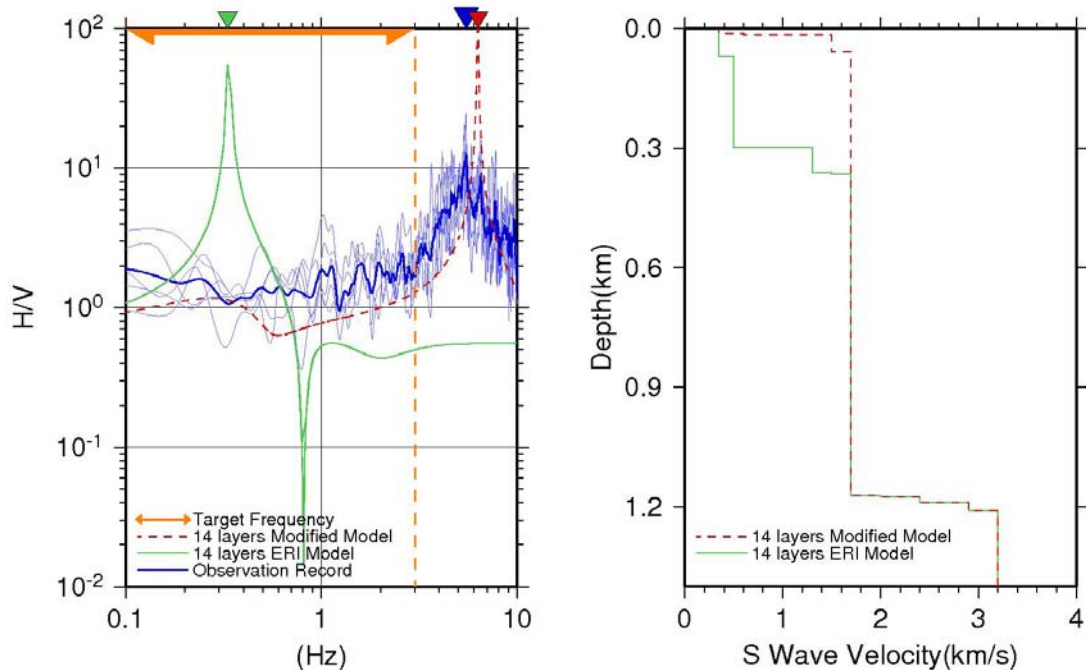


図 3. 1. 12 R/V スペクトル比のピーク周期による地下構造モデルの修正。左図の青線は R/V スペクトル比の観測値。緑実線は修正前、赤点線は修正後の地下構造モデルによる計算値。右図の緑実線は修正前、赤点線は修正後の地下構造モデル。

#### 4) 計算手法等の収集

長周期地震動のシミュレーションは、解析的手法によるものと数値的手法によるものに

大別される。水平成層構造を仮定した地下構造モデルに対しては前者が見通しはよく効率的であるが、現実の三次元的構造のモデルに対しては後者が効率的である。数値的手法には差分法や有限要素法があるが、本研究では三次元地下構造を用いたシミュレーションの際に一般に広く用いられている差分法に関する資料(Pitarka, 1999<sup>5)</sup>)を収集し、広い領域での計算を効率的に行うための問題点を検討した。図 3.1.13 に、差分法による地震動シミュレーションの概要を示す。

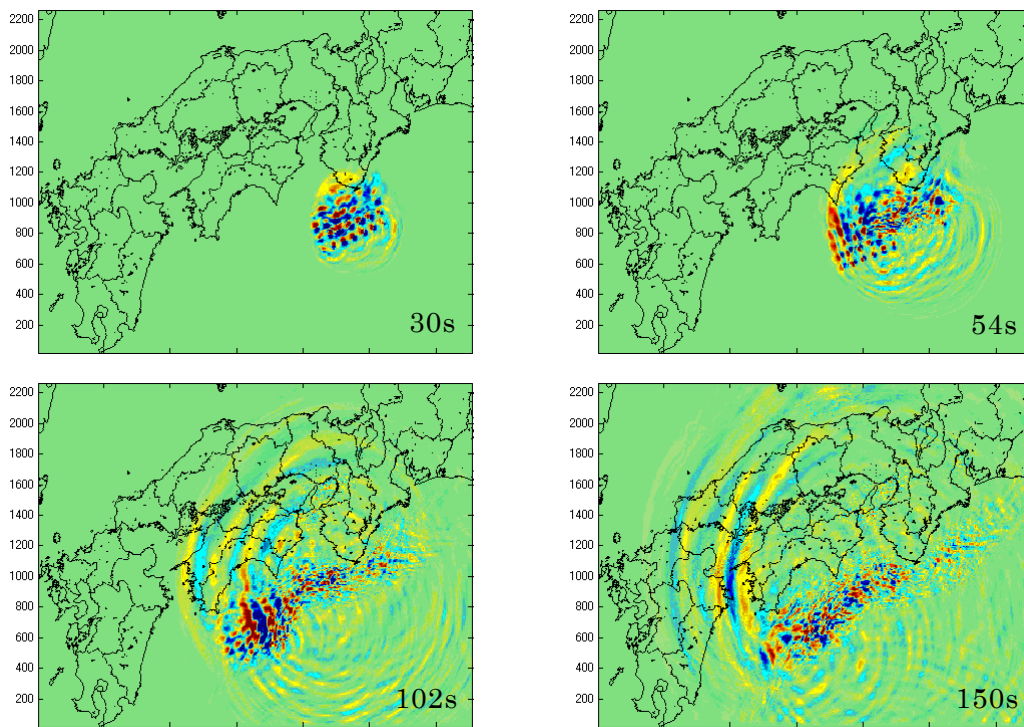


図 3.1.13 差分法による計算のスナップショットの例。

#### 5) 震源モデル、地下構造モデル、計算手法の整備

計算の有効周期を短周期側に拡張する場合、差分格子間隔及び差分時間間隔が従来よりも短くなり、広い領域を対象とした計算では空間格子数と時間ステップ数が両者とも膨大になる。表 3.1.1 に有効周期を 2 秒以上とした場合の地震動シミュレーションの必要諸条件を示す。通常レベルの計算機による通常のシミュレーション・コードは現実的ではなく、超並列計算機システムと三次元 MPI 差分コードが現実的であり一般的である。図 3.1.14 に、MPI を利用する三次元差分プログラムのグリッドモデル分割法のイメージを示す。

差分格子モデルの分割数、必要となるメモリ容量、及び現実的な計算時間を考慮して、東京大学情報基盤センターの HA8000 システムを利用することとした。

東京大学情報基盤センターの HA8000 システムの利用に際して、利用可能な上限 64 ノードとした。1 ノードあたりの利用可能メモリは 32 GB である。連続する計算時間の上限は 48 時間である。

海溝型巨大地震である南海地震による長周期地震動は、地震発生からの地震動継続時間が長く、長周期地震動の特徴を把握するために、地震発生から 400 秒程度の時間に対して

シミュレーションを行うこととした。その場合、計算にかかる時間は長時間にわたるため、連続する計算時間の上限 48 時間毎に、一回の計算の中間結果をバイナリファイルに出力し、その中間結果を読み込んで計算を再開し、継続するように工夫した。

表 3.1.1 有効周期を 2 秒以上とした場合のシミュレーションの必要諸条件

|                |                              |                         |
|----------------|------------------------------|-------------------------|
| 有効の最短周期、秒      | 2.0                          |                         |
| グリッド間隔 (m) と範囲 | 水平方向                         | 140                     |
|                | 鉛直方向                         | 70・140・280・560          |
|                | 深さ範囲                         | 0~4000~7000~40000~70000 |
| 波形時間           | 400                          |                         |
| 時間ステップ数        | 70000                        |                         |
| 計算範囲           | E129.5 - 138、N31 - 36        |                         |
| 格子数            | 5820 (EW)・4185 (NS)・259 (Z)  |                         |
| メモリ利用          | 580 Gb                       |                         |
| コア数            | 305 以上 (1 ノードあたり 1.9 Gb の場合) |                         |

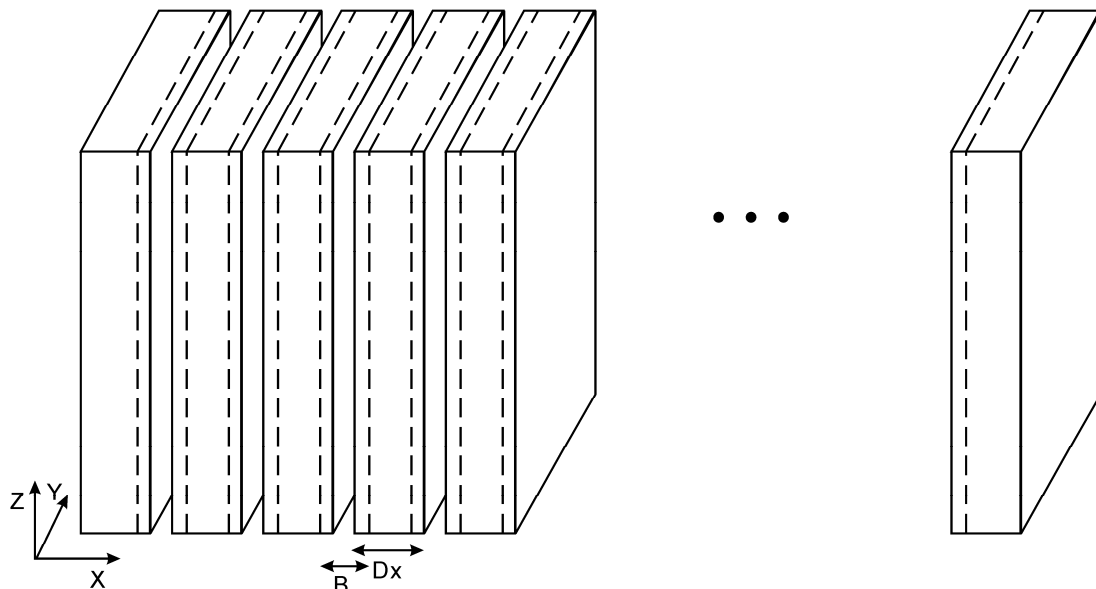


図 3.1.14 MPI を利用する三次元差分プログラムのグリッドモデルの分割法のイメージ (Dx : X 方向の分割領域のサイズ、B : バッファのサイズ)。

(d) 結論ならびに今後の課題

南海地震（昭和型）を対象として、サブテーマ②において長周期地震動の時刻歴計算を実施し、サブテーマ③において広帯域地震動の高度化に向けて有効周期を短周期側に拡張する検討を行うために、震源モデル、地下構造モデル、計算手法を収集・整理し、地下構造モデルについては、物理探査データ・ボーリングデータ・重力異常データ・自然地震の観測記録等を用いて改良・検証した。

南海地震（昭和型）の震源に関しては、Murotani (2007)<sup>1)</sup>の成果から震源モデル、遠地

及び近地の地震観測記録や地殻変動データを収集し、差分法による長周期地震動シミュレーションや震源インバージョンで利用できるように整理した。

長周期地震動シミュレーションや震源インバージョンの際のグリーン関数の計算に必要な三次元地下構造モデルは、統合化地下構造モデルデータベース(藤原・他, 2006<sup>2)</sup>)の全国1次地下構造モデル(Koketsu *et al.*, 2009<sup>3)</sup>)を収集し、長周期地震動に大きな影響を及ぼす工学的基盤から地震基盤までのモデルについては、標準的手法(Koketsu *et al.*, 2009<sup>4)</sup>)に従って、物理探査データ・ボーリングデータ・重力異常データ・防災科学技術研究所のK-NETやKiK-netの観測記録を用いて精緻化した。

長周期地震動の計算手法に関しては、三次元地下構造に対応した計算に広く用いられている差分法(Pitarka, 1999<sup>5)</sup>)を用いることとし、広い計算領域と周期2秒程度まで拡張した短周期側の有効周期でのシミュレーションに対応するための改良について検討した。

以上のように、サブテーマ①では、長周期地震動予測地図 2009年試作版(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2009<sup>6)</sup>)における検討の実績を参照して、南海地震(昭和型)長周期地震動予測地図の高度化に向けた検討を行った。

本研究で得られた長周期地震動予測の高度化に関する主な課題は、以下のものである。

- ・長周期地震動を精度よく予測するためには、過去に発生した大地震や中小地震の観測記録を再現できるように震源モデル・地下構造モデルを継続的に高度化することが重要である。

- ・有効周期を短周期側に2秒程度まで拡張し広帯域地震動予測を高度化するためには、周期2秒までの精度を確保できる震源インバージョンを可能とするグリーン関数ができるような三次元地下構造モデルの更なる精緻化が必要であり、震源モデルや地下構造モデルの妥当性を検証するための観測記録が不可欠である。

#### (e) 引用文献

- 1) Murotani, S., Source process of the 1946 Nankai earthquake estimated from seismic waveforms and leveling data (地震波形と水準測量データから見た1946年南海地震の震源過程), 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻学位論文, 2007.
- 2) 藤原広行・河合伸一・青井真・先名重樹・大井昌弘・松山尚典・岩本鋼司・鈴木晴彦・早川譲, 強震動評価のための深部地盤構造全国初期モデル, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, 1466-1469, 2006.
- 3) Koketsu, K., H. Miyake, H. Fujiwara, and T. Hashimoto, Progress towards a Japan integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, S10-038, 2008.
- 4) Koketsu, K., H. Miyake, Afnimar, and Y. Tanaka, A proposal for a standard procedure of modeling 3-D velocity structures and its application to the Tokyo metropolitan area, Japan, Tectonophysics, 472, 290-300, 2009.
- 5) Pitarka, A., 3D elastic Finite-Difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, Bull. Seismol. Soc. Am., 89, 54-68, 1999.
- 6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「長周期地震動予測地図」2009年試作版, 2009.

- 7) Iwata, T., T. Kagawa, A. Petukhin, and Y. Onishi, Basin and crustal velocity structure models for the simulation of strong ground motions in the Kinki area, Japan, *J. Seismol.*, 12, 223-234, 2008.
- 8) Ludwig, W. J., J. E. Nafe, and C.L. Drake, Seismic Refraction, in “The Sea, Vol. 4” , edited by A. E. Maxwell, Wiley Interscience, New York, 53-84, 1970.
- 9) Yamada, N. and T. Iwata, Long-period ground motion simulation in the Kinki area during the Mj7.1 foreshock of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes, *Earth Planets Space*, 57, 191-202, 2005.