

地震の予測精度の高度化に関する研究

スペクトル要素法による理論地震波形計算と 地下構造推定

坪井誠司・三好崇之・大林政行・東野陽子

独立行政法人海洋研究開発機構

本研究の概略

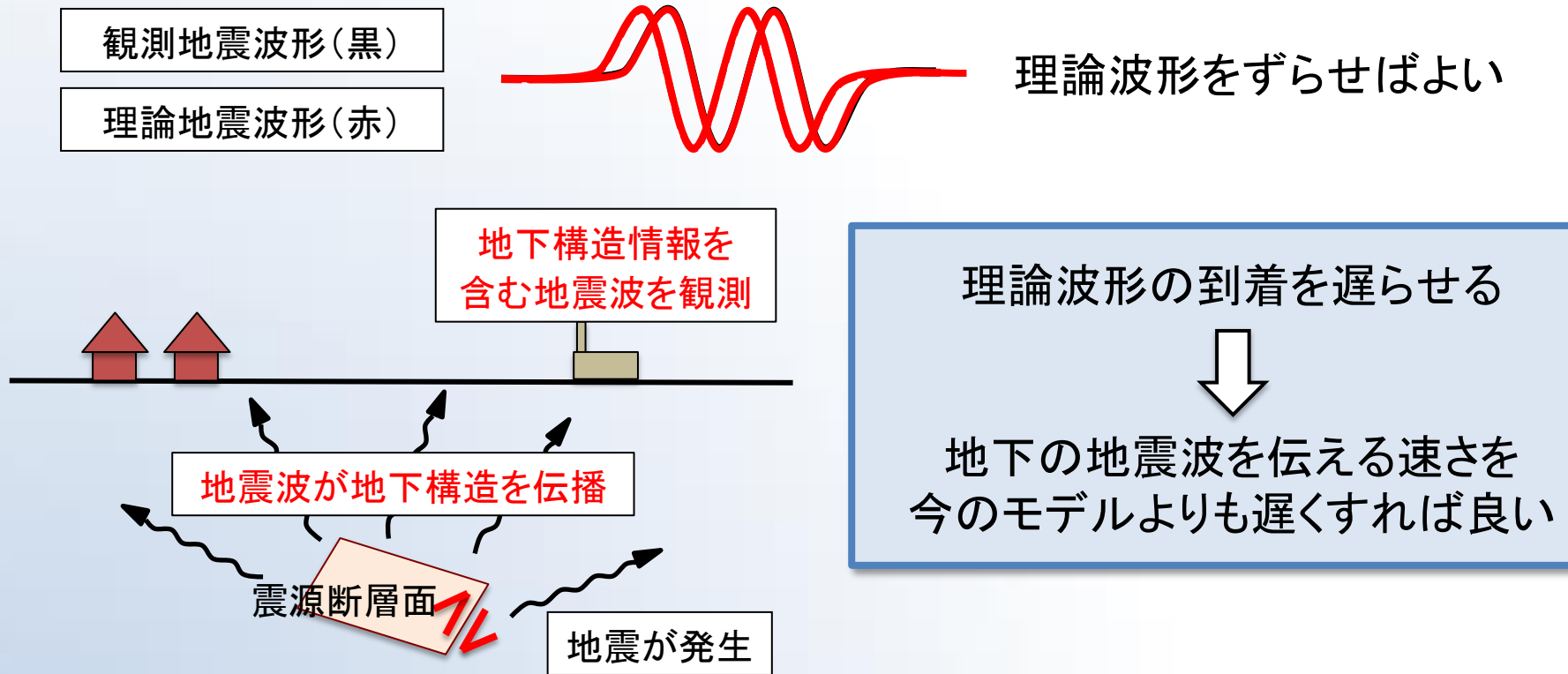
厳密な波動理論に基づく理論地震波形 + 豊富な地震観測波形
大規模数値計算による波形インバージョン
(アジョイントトモグラフィ)



- 地震観測波形を再現する日本列島の地下構造モデルを構築
- ・周期15秒以上の地震動を説明する日本列島規模モデル
 - ・周期2秒以上の地震動を説明する平野規模モデル

観測された地震波形を再現するには？

理論波形を観測波形に近づけるにはどうすればよいか？



波形インバージョン:

観測波形と理論波形を比較して最もよいモデルを推定する方法
本研究では地下構造のうち地震波速度構造を推定する

本研究の背景と目的

従来の地震波速度構造推定: 地震波走時トモグラフィーなど波線理論に基づいてP波・S波速度構造を推定

- ・地震波の走時を説明するモデルであり、地震波形の再現は目的としていない
- ・不均質性の強い構造に対して正しくない

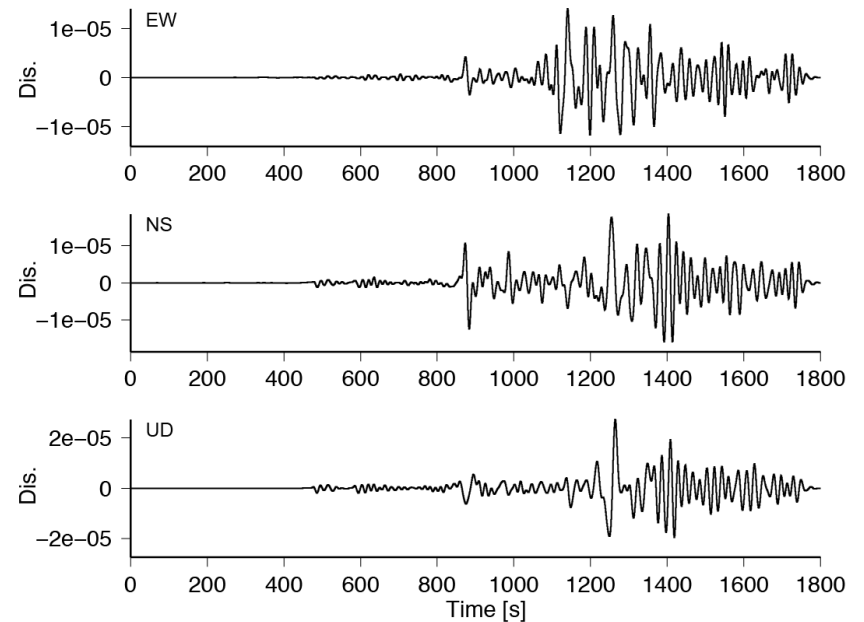
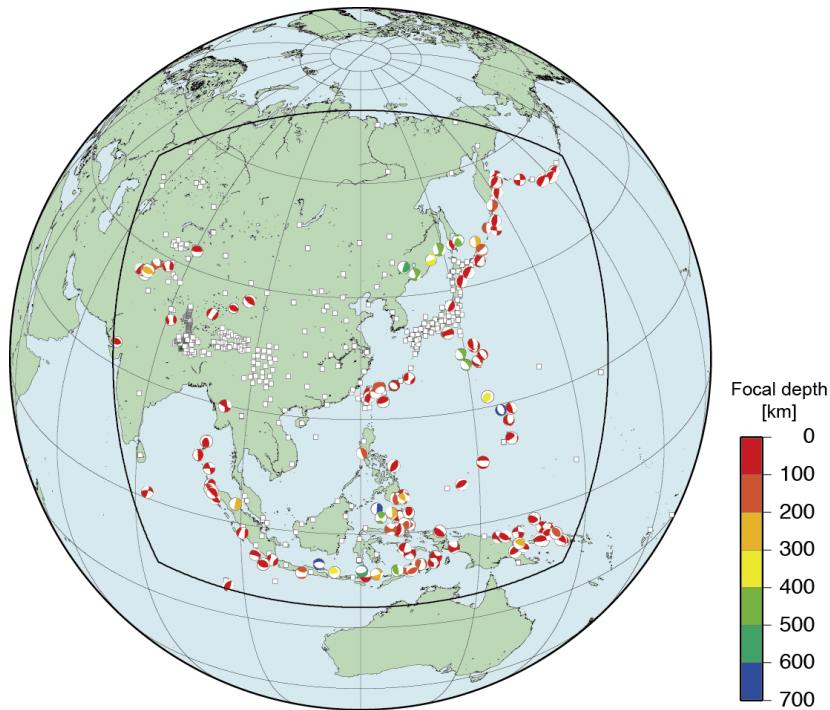
- ・厳密な波動理論に基づく数値解法の発達
- ・京コンピュータなどスーパーコンピュータの発達
- ・日本列島の高密度地震観測網で得られた波形データ

本研究の目的: 厳密な波動理論に基づく理論波形の大規模数値計算と豊富な観測波形を用いた波形インバージョン(アジョイントトモグラフィー法)によって観測波形を再現する地震波速度構造モデルを構築する

解析領域と地震波形データ

解析領域: 日本列島を含む東アジア地域

地震波形データ: 東アジア地域で観測された広帯域地震波形
日本列島とその周辺で発生したM5.5以上の地震



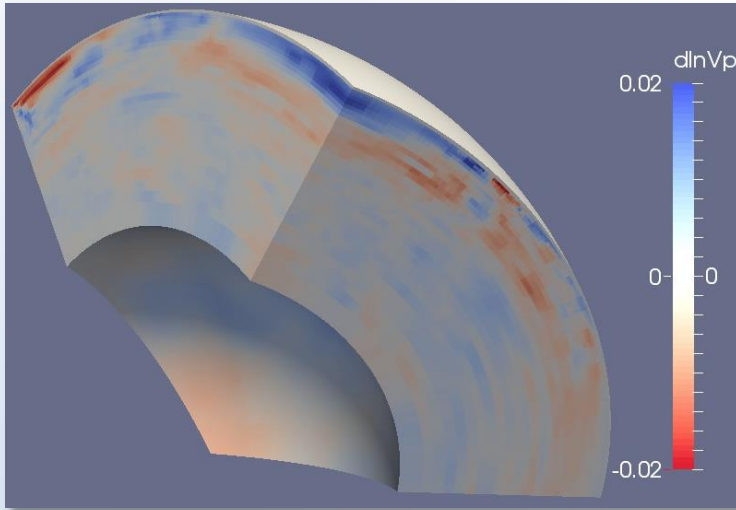
2001年11月20日(M6.2 Banda Sea eq.)による観測波形の事例. これらの再現をめざす.

地震数: 147個

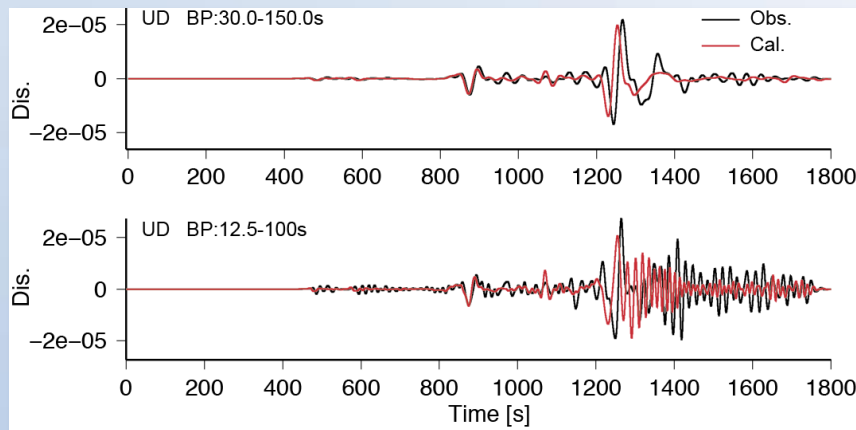
観測点数: 1地震の平均100点

理論地震波形計算

スペクトル要素法 (Komatitsch and Tromp 2001) を用いて理論地震波形を数値計算



地表から核-マントル境界の初期モデル
(一次元P波速度構造モデルからのずれを示す)



- ・運動方程式をスペクトル要素法で解く
→地震観測点での変位波形を得る
- ・初期構造は三次元P波速度構造モデル (GAP-P2; Obayashi et al. 2009)

以下の設定で計算を実施

- ・対象領域を約70万要素、約5000万節点で表現
- ・約14GBメモリを要する
- ・256CPU(京32ノード)並列
- ・1地震40分間の波形計算に約25分
- ・理論地震波形の精度約15秒

2001年11月20日(M6.2)の理論波形と観測波形.

インバージョンにおける計算資源量

大規模数値計算を含む以下の作業を観測波形と理論波形の差が小さくなるまで繰り返す。

1. 理論地震波形を計算:

256CPUコア並列計算, 14GBメモリ

計算時間: $25分 \times 147 = 61時間$

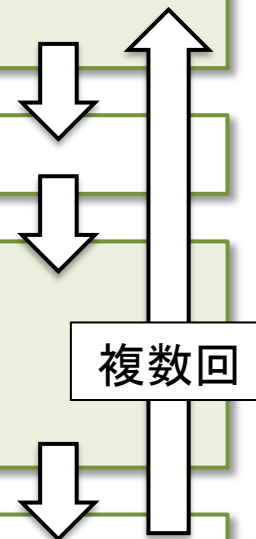
2. 観測波形と理論波形を比較して差を見積もる

3. 地震波速度構造の修正量見積もり:

256CPUコア並列計算, 23GBメモリ

計算時間: $2時間 \times 147 = 294時間$

4. 地震波速度構造モデルの修正



20回の反復で約200万CPU時間(約1年)を要する大規模問題

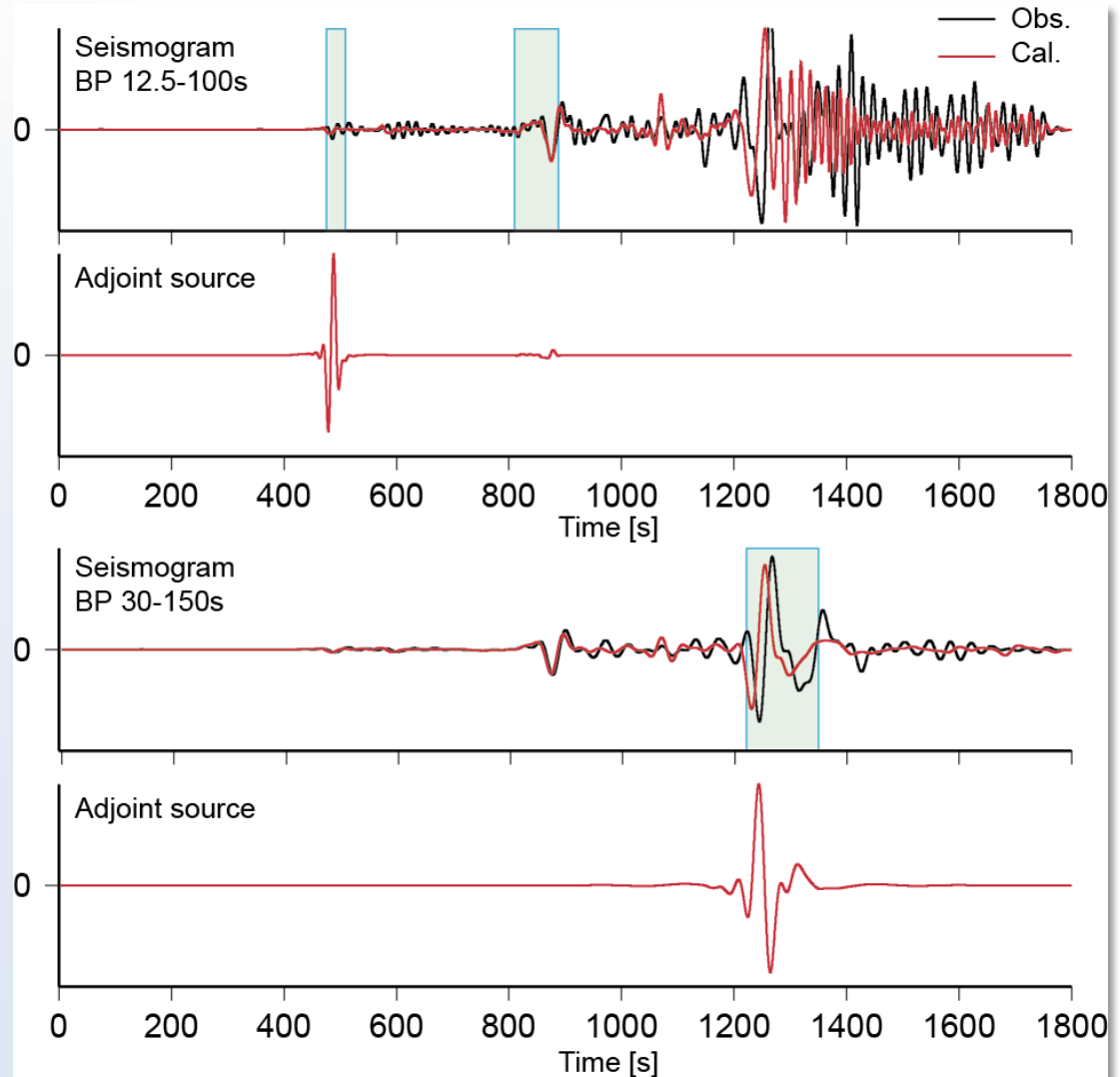
京コンピュータなどの大型計算機資源が必須

(256コア20ジョブ並走で計算時間が約16日に短縮される)

アジョイント波形の作成

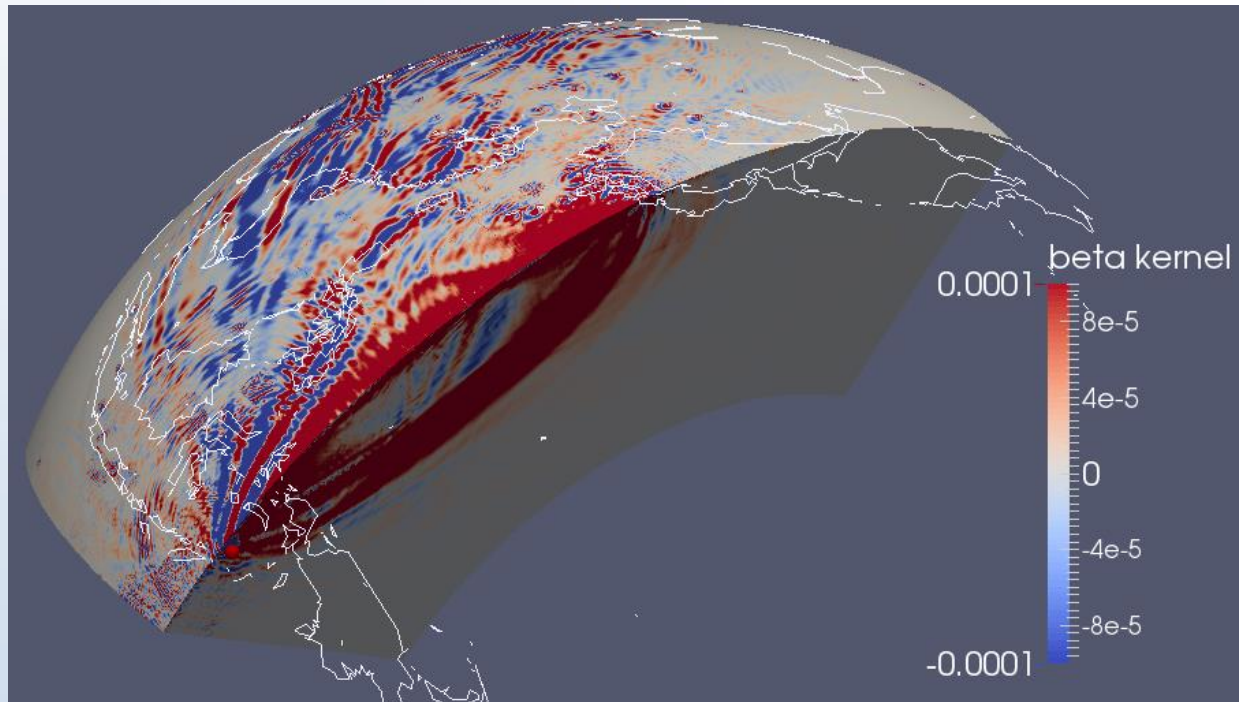
理論波形と観測波形を比較。位相を抽出してその差分を算出する。
アジョイント法 (Liu and Tromp 2006) による単純化の利用。

地震波形の帯域：
12.5-100秒 (実体波)
30-150秒 (主に表面波)



イベントカーネルの計算

アジョイント波形を用いて地震波速度構造モデルの修正量を計算



β カーネル(S波速度に関する量)の分布の例
2001年11月20日(M6.2)の地震

赤:モデルを遅く修正
青:モデルを速く修正

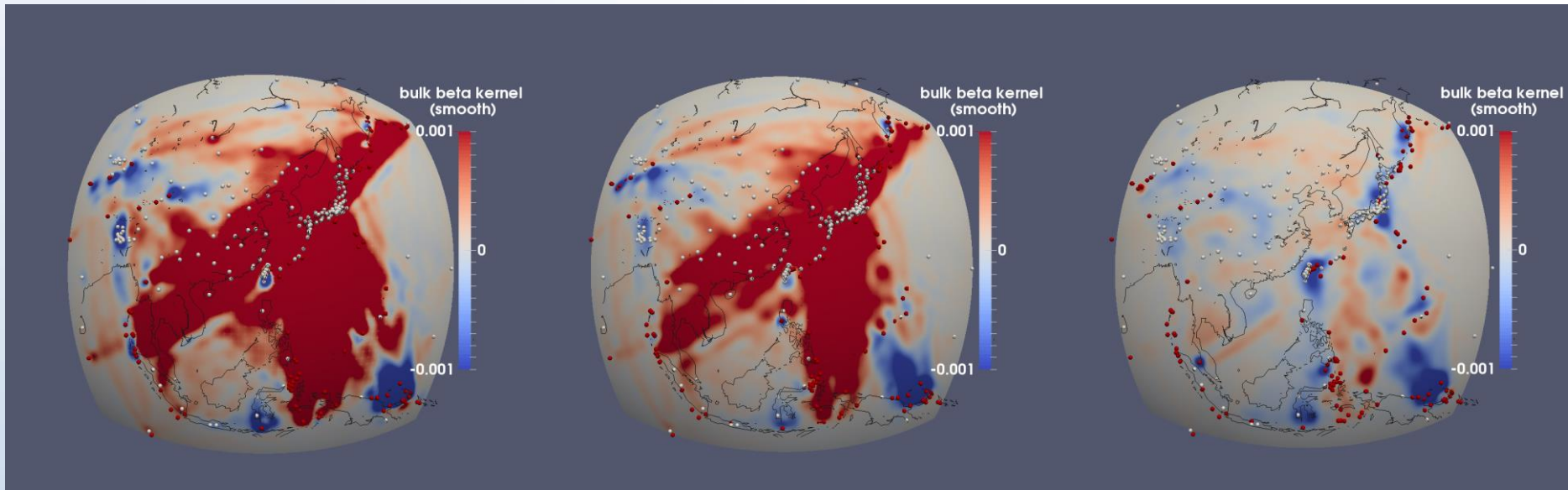
以下の設定で計算を実施

- ・対象領域を約70万要素、約5000万節点で表現
- ・約23GBメモリを要する
- ・256CPU(京32ノード)に分配して並列計算
- ・計算時間は1地震につき約2時間

モデルの修正量カーネルを計算

すべてのイベントカーネルを足し合わせて修正量カーネルを計算

bulk beta kernel (S波速度に対応)



深さ50km

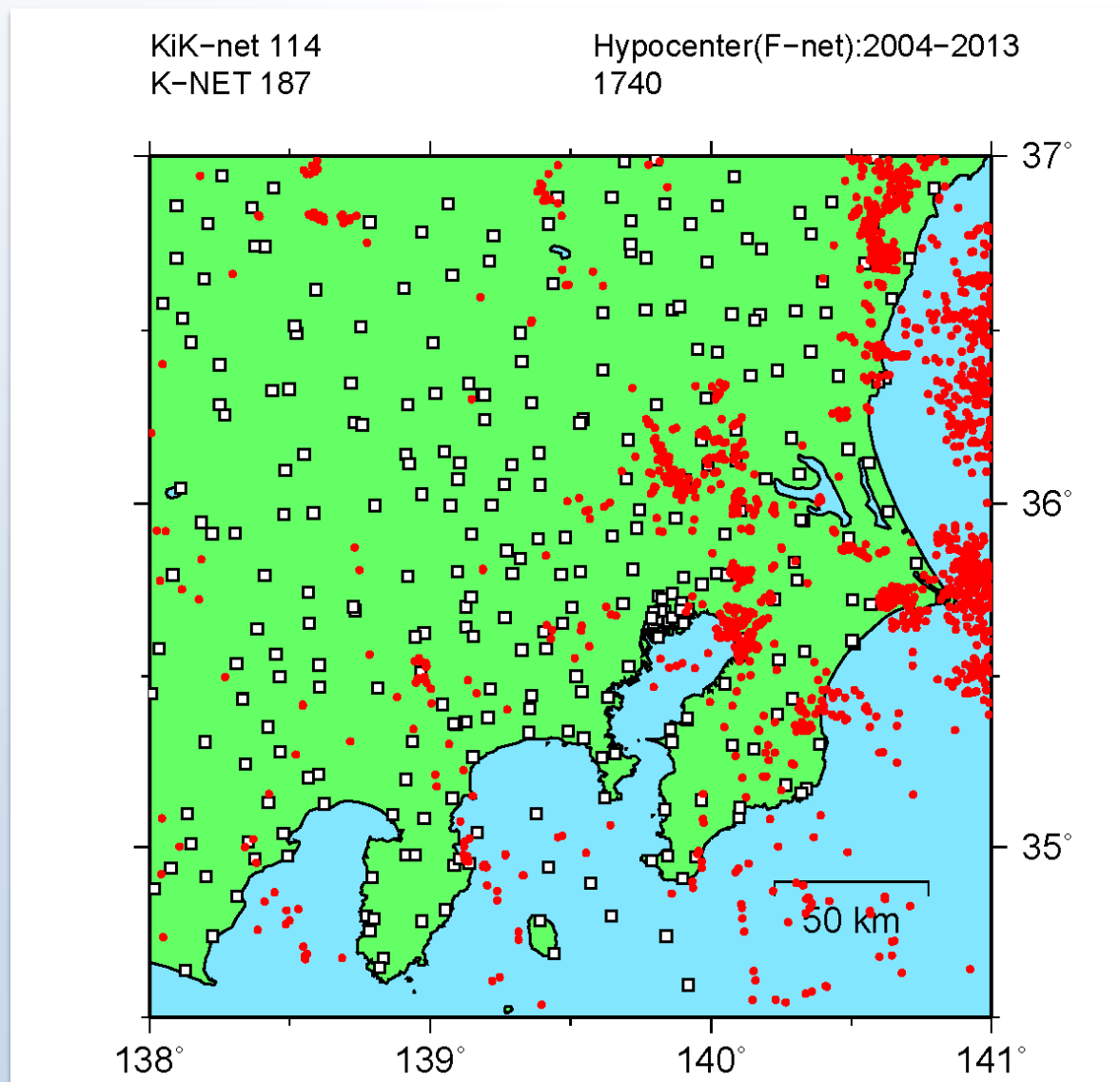
100km

200km

これらの量をもとに地震波速度構造モデルを修正する

関東平野におけるインバージョン計画

10年間にこの領域で起きた地震から約200個を選び、強震動観測点約300点の記録を用いて周期5秒の精度で地下構造決定を行いたい。



まとめと今後の課題

まとめ

大規模数値計算と豊富な観測記録を用いて、波形インバージョン法(アジョイントトモグラフィ法)によって、日本列島とその周辺の三次元地震波速度構造モデルの構築を現実的な計算時間で実現できることを示した。

1. 推定されたモデルは三次元初期構造モデルよりもP波速度・S波速度がやや小さくなった。
2. 修正モデルを用いて計算された理論波形は、初期モデルに比べて観測波形の再現性が高まった。

今後の課題

- さらに反復を繰り返し波形改善を試み、よりよいモデルを構築する。
- 得られた構造モデルを初期モデルとして、列島規模さらには平野規模でより短周期側のモデル構築を行う。