

# 地震波形モデリングによる 大阪堆積盆地の3次元基盤面形状推定

岩城 麻子・岩田 知孝 (京都大学防災研究所) e-mail: iwaki@egmdpri01.dpri.kyoto-u.ac.jp



**動機と背景:** 大規模堆積盆地構造は地震動の長周期成分(数秒~数十秒)の増幅・伸長に大きく寄与することが知られており、信頼性の高い長周期帯域の地震動予測のためには高精度な3次元深部地盤構造モデルの構築が不可欠である。地震記録を活用した3次元盆地速度構造モデルの推定手法が数多く提案されており、その多くは1次元水平成層構造の仮定に基づいている。一方、堆積盆地の3次元構造が地震動に及ぼす影響が指摘されており、1次元構造の仮定ではその影響が十分に説明できない場合があることが分かっている。そのような場合、盆地内の波動伝播を考慮した手法、すなわち地震波形インバージョンによる3次元構造の推定が必要となる。

**本研究の概要:** 大阪堆積盆地をテストフィールドとして、地震波形インバージョンによる盆地基盤面形状推定手法を提案した。盆地の基盤面形状を表すB-spline関数の係数をモデルパラメータとして観測波形と合成波形の差のL2ノルムを最小とするインバージョンを行う。波形のモデルパラメータに対する感度の時空間的な違いを利用して、2段階マルチインバージョン法を提案し、周期3-10秒の範囲で実地震記録に適用した。インバージョンの結果推定された地下構造モデルから計算される速度波形はより良く観測速度波形を説明し、H/Vスペクトル比の卓越周期の再現性も向上した。本検討により、観測地震波形を用いて3次元盆地基盤面形状を直接推定することが可能であることが示された。

## 解析手法

盆地の基盤面形状を表すモデルパラメータを  $m$  として、観測方程式  $u(m) \approx u^{obs}$  を線形化 (Aoi, 2002)

$$u_i(m') + \sum_{k=1}^K \frac{\partial u_i}{\partial m_k} \delta m_k' \approx u_i^{obs} \quad (i = 1, 2, \dots, N).$$

differential waveform

$$A_{ik} \equiv \frac{\partial u_i}{\partial m_k} = \frac{u_i(m' + \Delta m_k') - u_i(m')}{\Delta m_k'}$$

モデルパラメータの揺らぎ  $\Delta m$  を用いて差分近似

$$m^{l+1} = m^l + \delta m^l \quad \text{residual} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [u_i^{obs} - u_i(m)]^2$$

次のイテレーションへ

**初期モデル:** Iwata et al. (2008) による大阪堆積3次元盆地構造モデル

Table 1. 地盤構造モデル (Iwata et al., 2008) の物性値

|                     | $V_p$<br>(km/s) | $V_s$<br>(km/s) | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $Q_0$ | Depth<br>(km) |
|---------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|-------|---------------|
| Sedimentary layer 1 | 1.60            | 0.35            | 1700                           | 175   | 0.0           |
| Sedimentary layer 2 | 1.80            | 0.55            | 1800                           | 275   | $r_1 z$       |
| Sedimentary layer 3 | 2.50            | 1.00            | 2100                           | 500   | $r_2 z$       |
| Seismic bedrock     | 5.50            | 3.20            | 2700                           | 500   | $z$           |
| Upper crust         | 6.00            | 3.45            | 2800                           | 1000  | 3.1           |
| Lower crust         | 6.70            | 3.90            | 2900                           | 500   | 15.0          |

3層の堆積層深さはその地点における地震基盤深さ  $z$  に比例する。比例定数  $r_1, r_2$  はボーリングによって基盤深さが得られている3観測点において観測地震記録の後続波のH/Vスペクトル比 (Iwaki and Iwata, 2010) の卓越周期を説明できるように調節した値 ( $r_1=0.120, r_2=0.410$ ) を用いる。

## モデルパラメータ

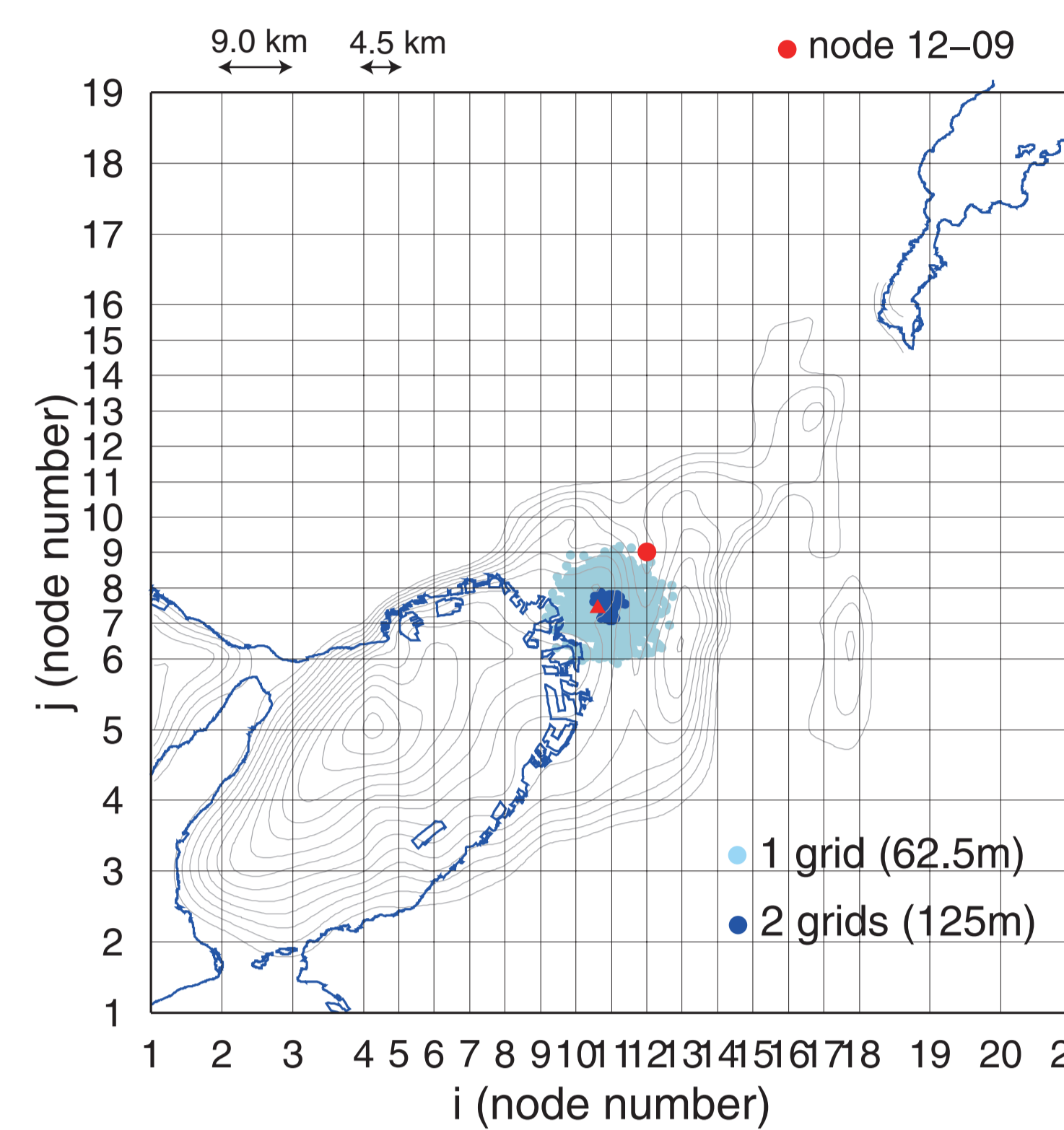


図1. スプライン関数のノード。青い点は例として  $i=12, j=9$  のノードにおけるスプライン係数が揺らいだときの基盤深さの鉛直方向の変化を差分格子子の数で表している。コンターは初期モデルの基盤深度分布を表す。

Iwata et al. (2008) のモデルでは基盤面形状が B-spline 関数で表されている (Kagawa et al., 2004)。本研究では各ノード (図1の格子点) で定義されている spline 係数をインバージョンで推定するモデルパラメータ  $m$  とする。

モデルパラメータの揺らぎは  $\Delta m=0.2$  とする。→基盤深さの鉛直方向の揺らぎは 62.5m 間隔の差分格子子にして1~2格子分に相当する。(図1の青い点)

## 使用した強震波形記録

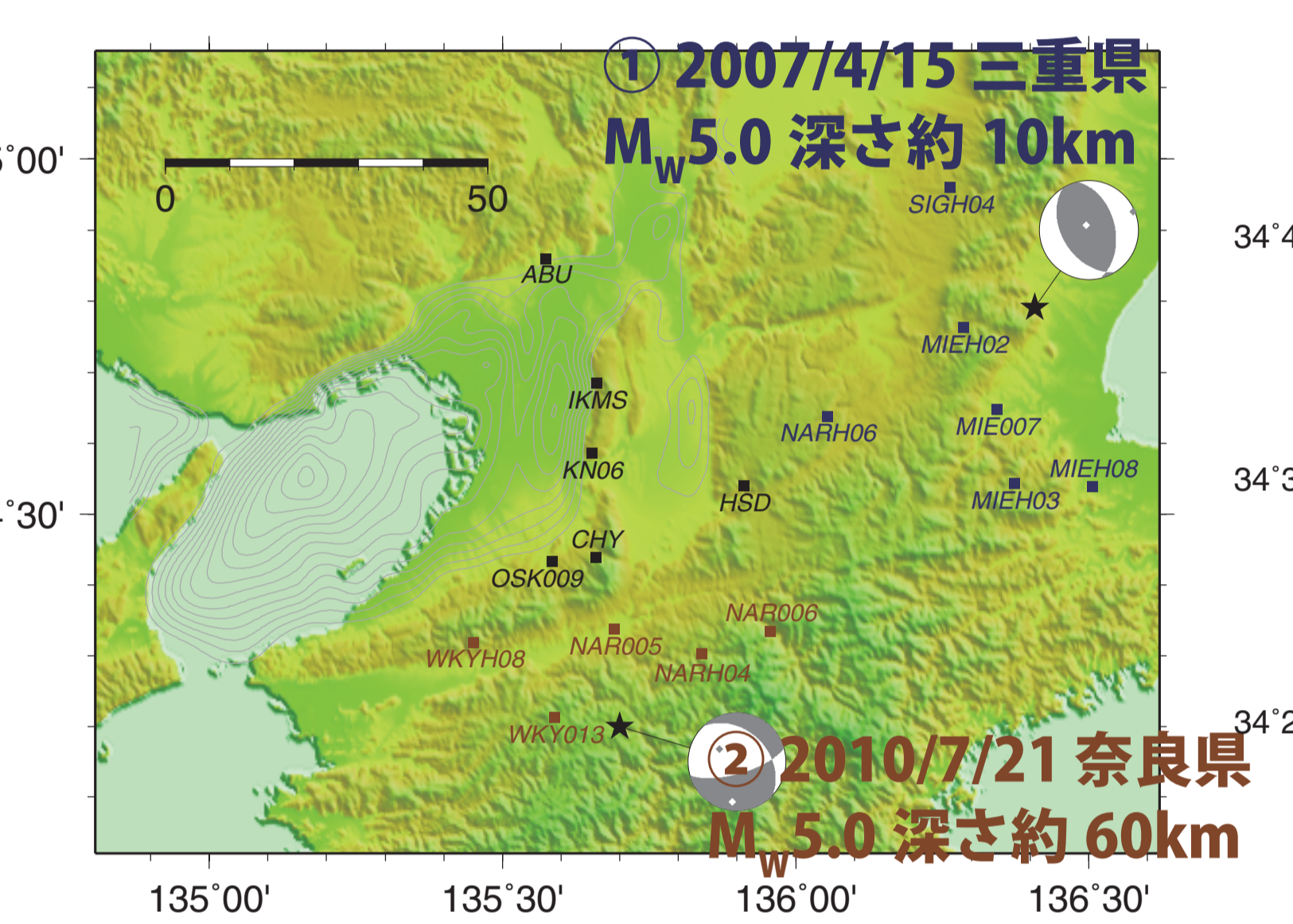


図2. 使用する2つの地震の震央位置と岩盤観測点

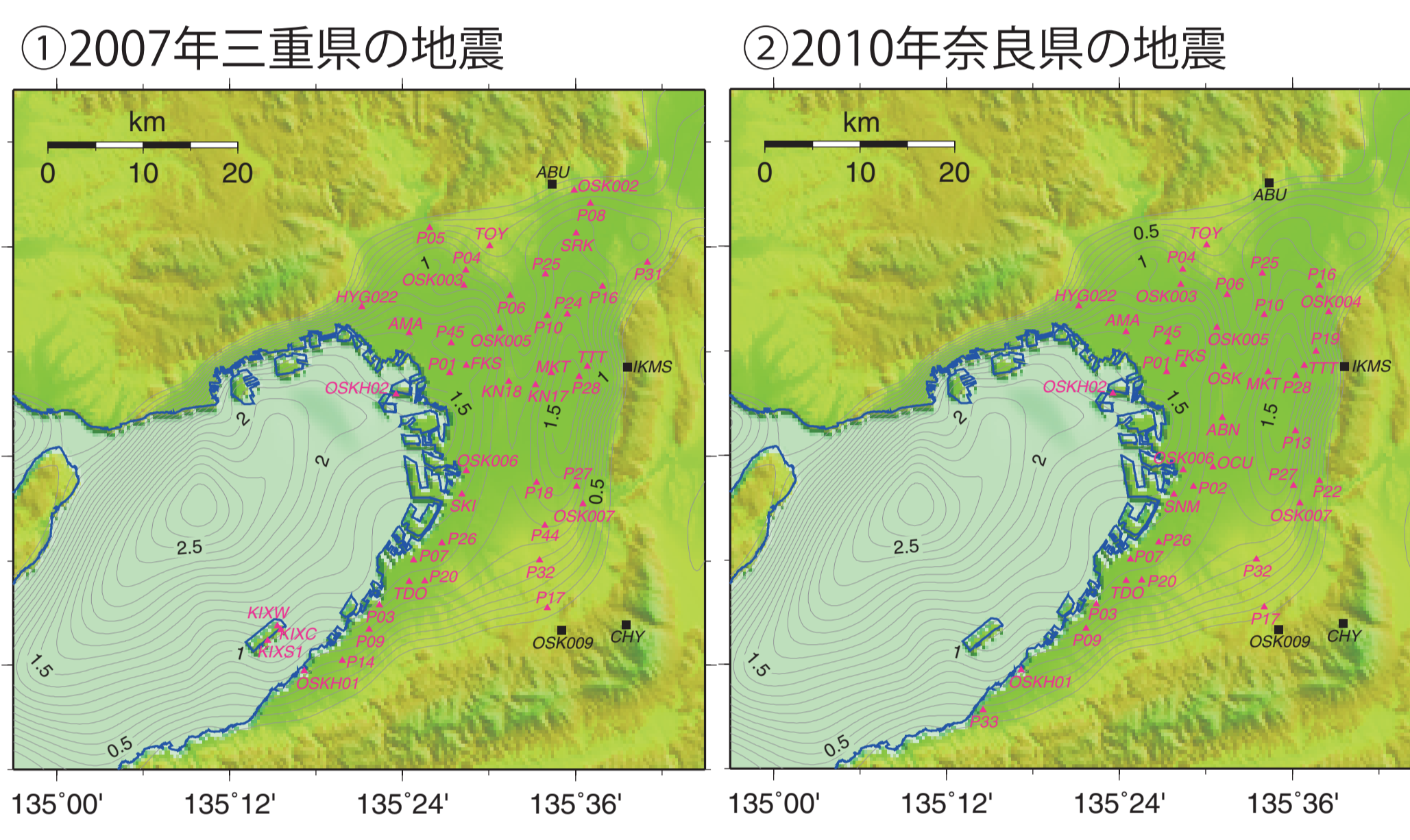


図3. ▲インバージョンに使用する盆地内の観測点。

## 使用した観測点

関西地震観測研究協議会, 防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net, F-net, 気象庁震度計, 大阪府自治体震度計, 電力共通研究, 関西電力(株), 関西国際空港(株).

## 理論波形の計算

- ・3次元差分法 (Pitarka, 1999) 周期3秒以上。
- ・盆地内 125m (水平方向), 62.5m (鉛直方向) 格子間隔
- ・地殻速度構造モデルは Iwata et al. (2008) を参考に構築。
- ・点震源 (震央: 気象庁) とし, 震源深さ・メカニズム・震源継続時間は震源近傍の観測点での速度波形を用いてグリッドサーチで推定。

観測・理論波形とも周期3-10秒でバンドパスフィルターをかけ、全観測点の観測最大値で正規化したものを使用。

## モデルパラメータに対する感度

モデルパラメータの微小変化に対する波形の揺らぎを表す differential waveform の最大振幅値を各ノードについて色で示した (観測点 FKS における南北成分の例)。

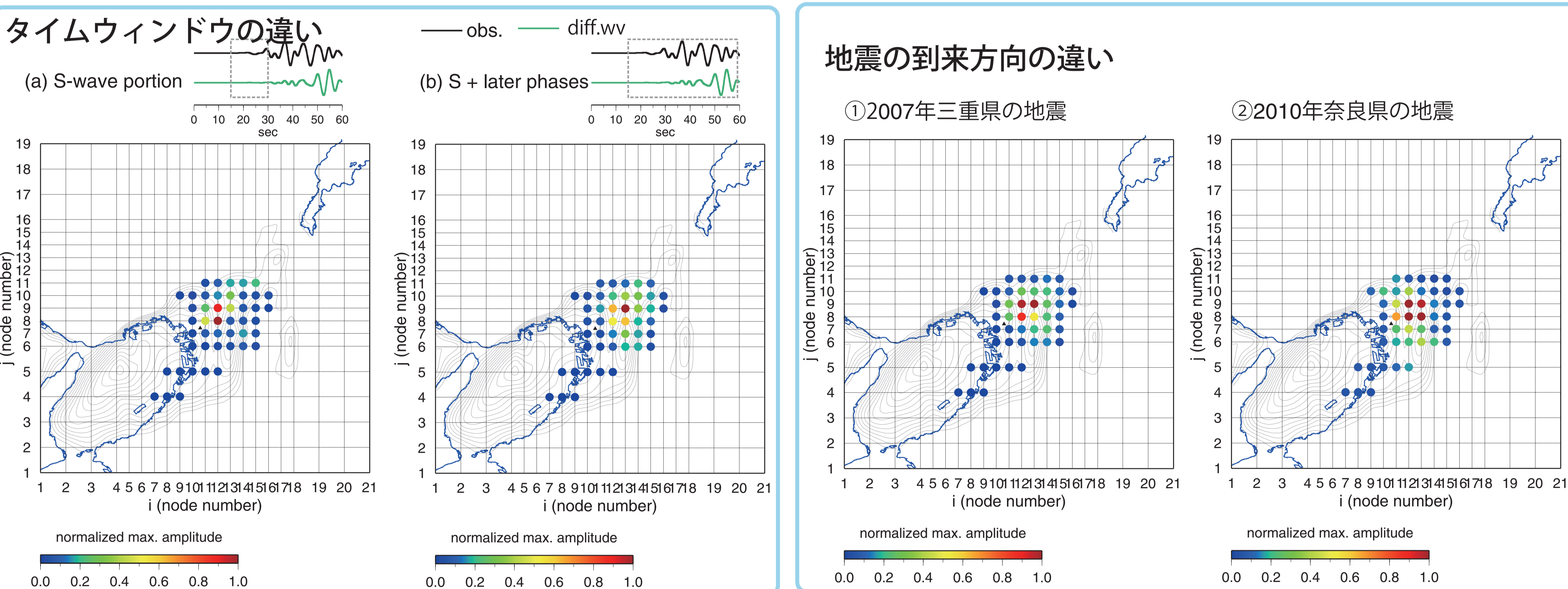
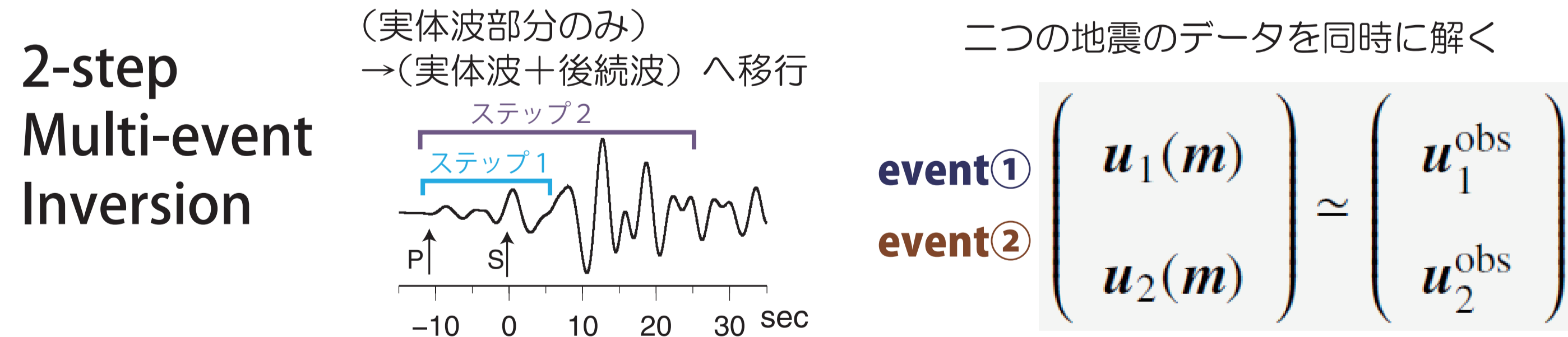


図4. FKSにおける、各モデルパラメータについての differential waveform の最大振幅値 (最大値で正規化)。(左) 2007年三重県の地震記録を使用し異なるタイムウィンドウで比較。S波初動から (a) 6秒後まで、(b) 25秒後まで。(右) 異なる到来方向の地震で比較。S波初動から25秒後までを使用。①東方向からの地震, ②南方向からの地震。

- ・実体波部分に比べ、後続波部分はより広い領域の影響を受ける。
- ・S波初動から25秒後までのタイムウィンドウにおいては、地震の到来方向に位置するモデルパラメータに対してより感度が高い。
- これらを踏まえて波形インバージョンを実地震記録に適用する。

## 実記録への適用



手法を実記録に適用し、計8回のイテレーションを行った。得られたモデルから計算される波形は観測波形との合いが改善した(図8)。大阪府中央部におけるH/V卓越周期の再現性も改善した(図7)。

## 波形の比較

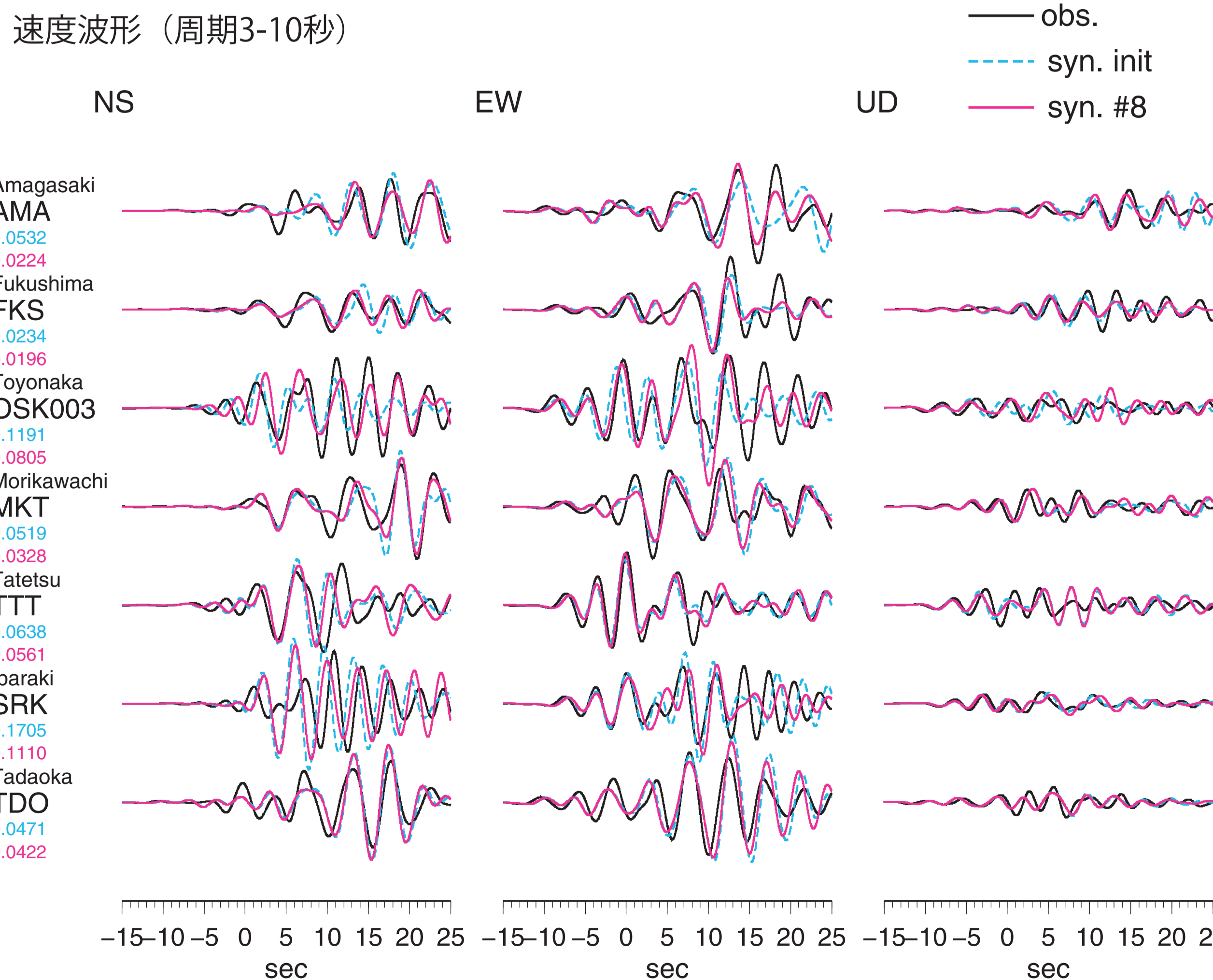


図5. 観測波形(黒色), 初期モデルによる合成波形(青色破線), 推定モデルによる合成波形(ピンク色)の比較。ここでは2007年三重県の地震についての一部の観測点のみを示している。

## 基盤深度分布の比較

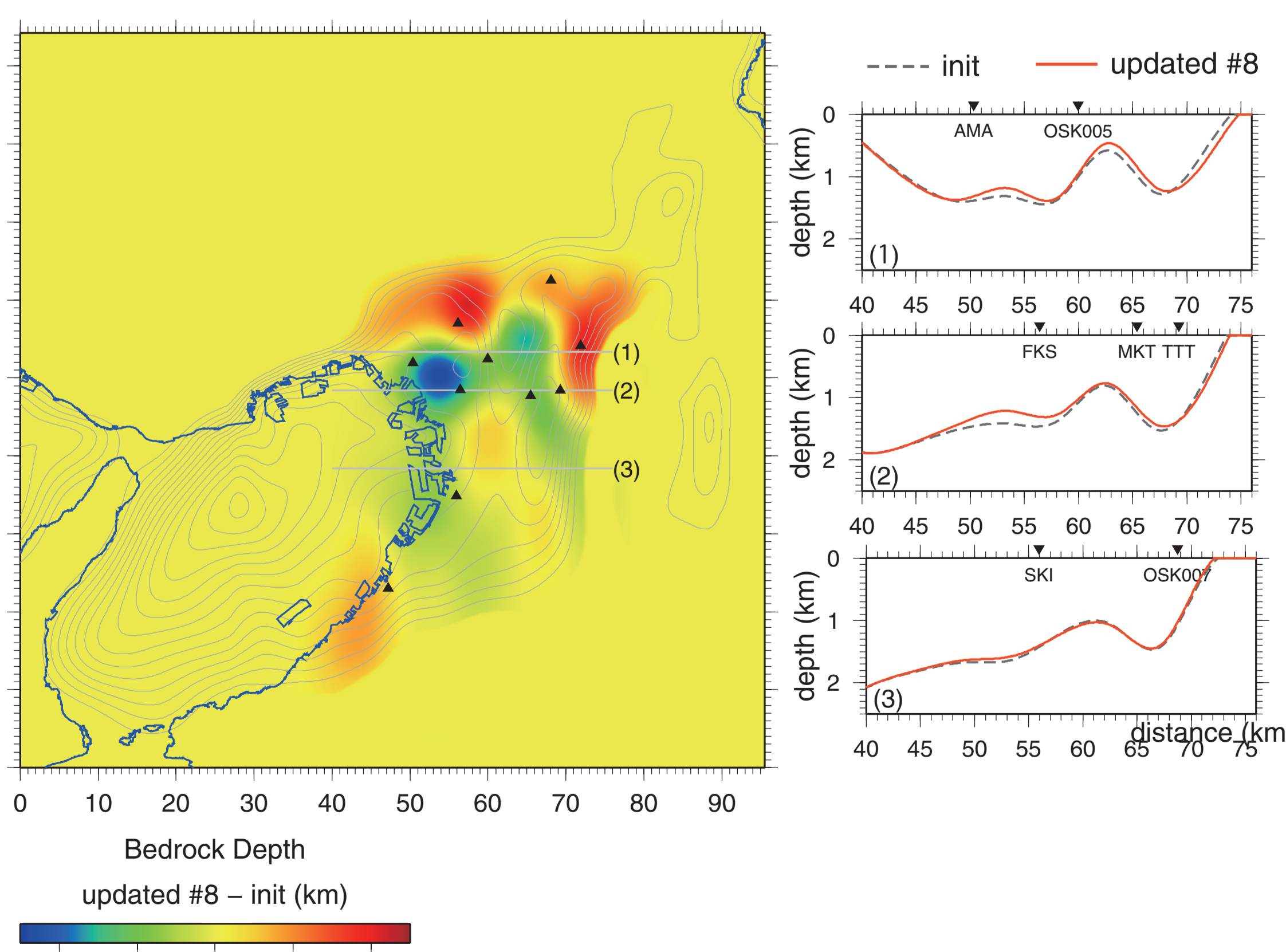


図6. 初期モデルと推定モデルの自信基盤深度の差。(左) 暖色は推定モデルが深くなったことを表す。(右) 東西方向の断面図。

## H/V スペクトル比の比較

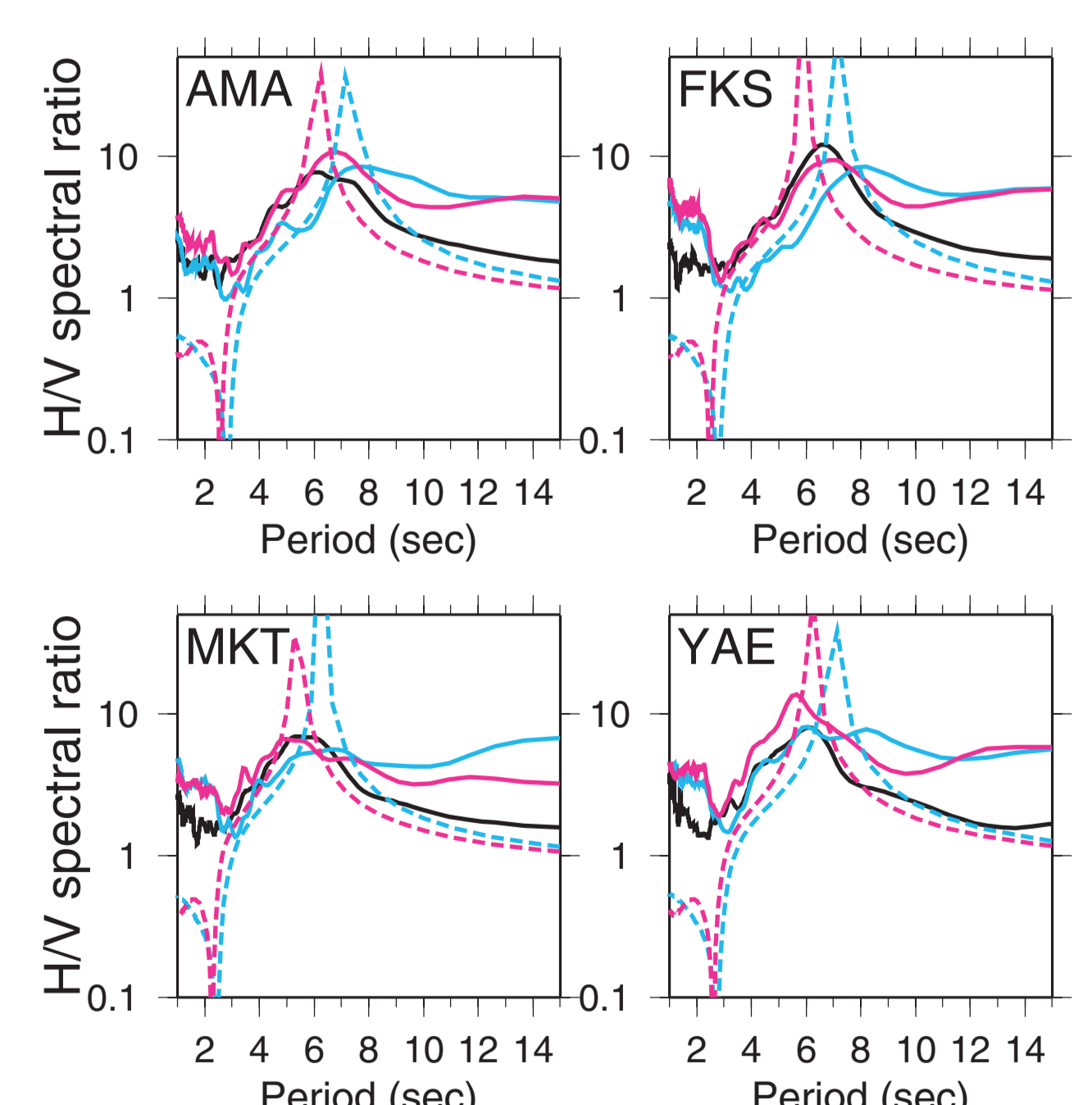


図7. 観測地震動によるH/Vスペクトル比(黒)と初期モデル・推定モデルによる合成波形から計算されるH/Vスペクトル比の比較(3DHV, 青とピンク)。1DHV(破線)は各観測点直下の1次元構造から得られるRayleigh波基本モードの理論楕円率。

## 謝辞

本研究では関西地震観測研究協議会, (独) 防災科学技術研究所, 気象庁, 大阪府, 電力共通研究, 関西電力(株), 関西国際空港(株)による強震記録, および気象庁一元化震源情報を使用しました。記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- Aoi (2002). *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 2410-2418.  
 Iwata et al. (2008). *J. Seismol.*, **12**, 223-234.  
 Iwaki and Iwata (2010). *Geophys. J. Int.* **181**, 1062-1076.  
 Kagawa et al. (2004). *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 1353-1368.  
 Pitarka (1999). *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 54-68.