

2008年岩手・宮城内陸地震の
震源モデルと強震動
- なぜ4000ガルの強震動が生成されたのか -

入倉孝次郎・倉橋奨
(愛知工業大学地域防災センター)

要約

本研究は、2008年11月7日に東京大学の山上会館で行われた日本活断層学会2008年度秋季学術大会のシンポジウム「活断層から地震発生予測の諸問題～岩手・宮城内陸地震を例として～」で発表した「2008年岩手・宮城内陸地震の震源モデルと強震動 - なぜ4000ガルの強震動が生成されたのか -」のPPTである。講演予稿集をまとめた後、さらに検討を加えた内容となっている。この地震の強震動を説明するための震源断層モデルは本資料が最新のものとなっている。震源極近傍の観測点(一関西)で4000ガルの強震動の生成の原因となったP波速度構造モデルについても、本資料で最新の結果がまとめられている。

「なぜ4000ガルの強震動が生成された」の主な原因は、この観測点直下の地盤構造が地表近傍で極めて遅いP波速度をもつていたため、高周波震動が大きく増幅されたことにある。しかしながら、このモデルでは観測に見られる上下震動の非対称性(下向き震動が-1gで飽和)は説明できず、トランポリン効果のような非線形効果を合わせて考慮する必要がある。

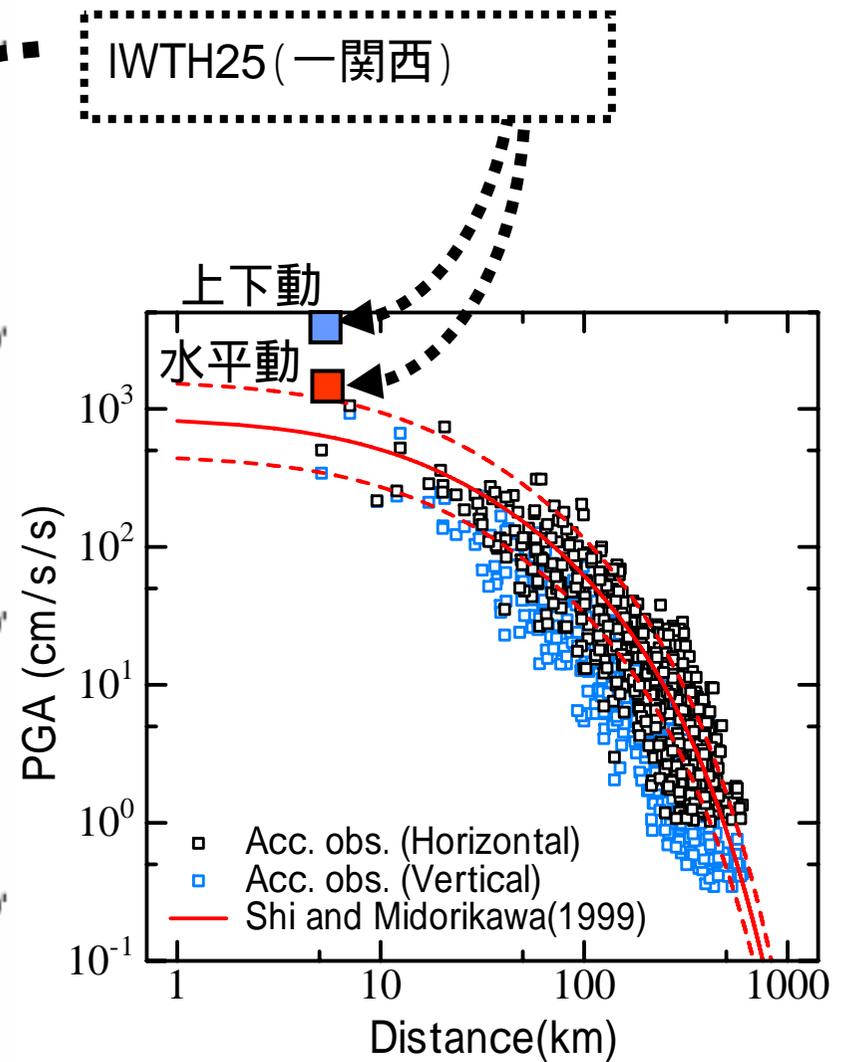
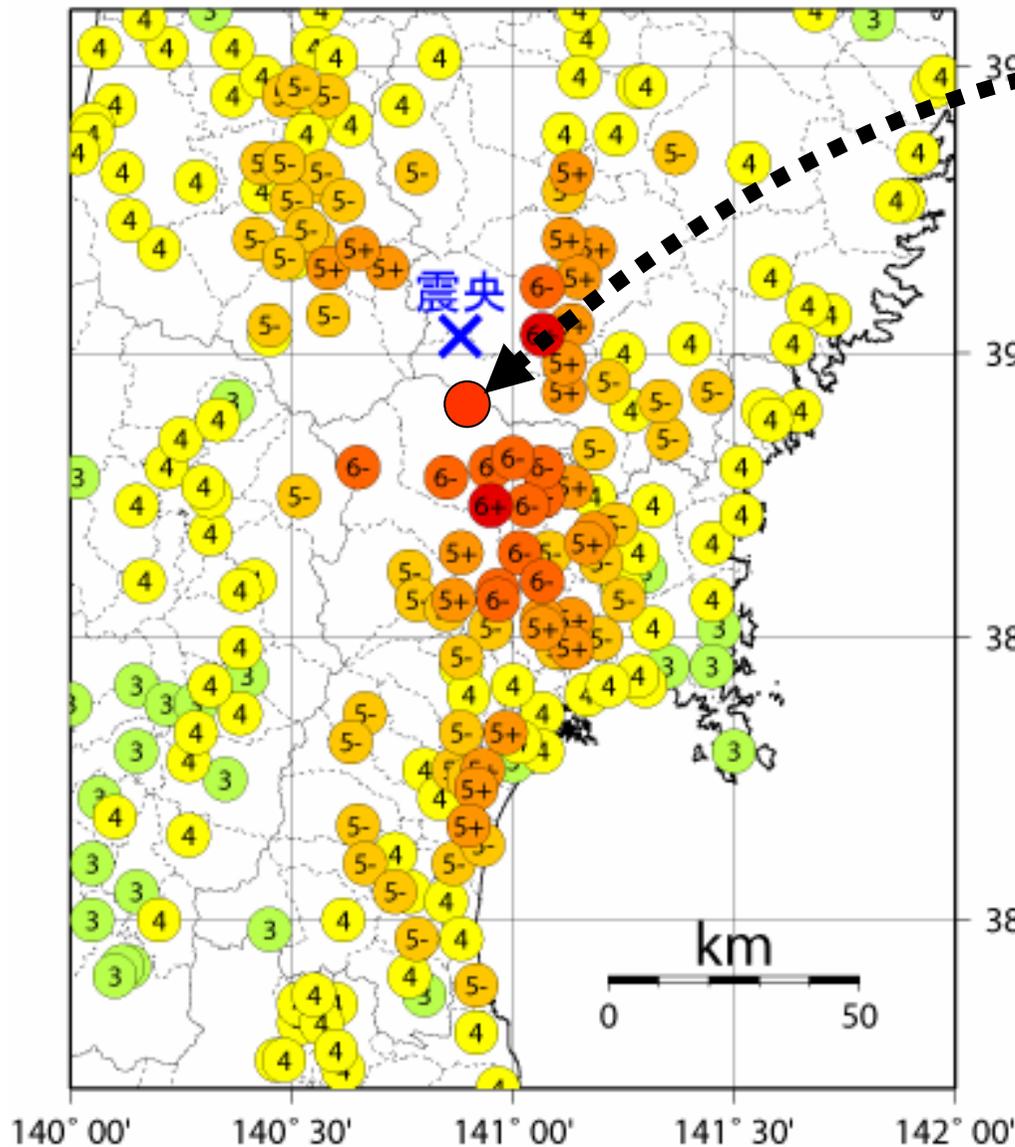
はじめに

この地震では、震央距離約3kmの位置にあったKIK-NET観測点、IWTH25(一関西)において、地表の上下動成分で最大加速度3866galという非常に大きな強震動が観測された。これまでの地震観測において、2Gを超えるような加速度記録は観測されたことがなかった。その理由の1つとして、用いられていた計器が2Gでクリップするものが多かったことが挙げられるが、これまでの観測記録を見る限り地盤上の地震動については必ずしも計器上の制約とはいえない。この地震で、このような非常に大きな強震動がなぜ観測されたのかを知ることは、今後の強震動予測や地震動発生メカニズムを解明するにあたり非常に重要である。

このIWTH25(一関西)の地表の上下震動は極めて高加速度であったことに加えて、上向きと下向きの振幅が顕著な非対称性を示している。Aoi et al. (2008)によりScienceの10月31日号において「トランポリン効果」という興味深い解析結果を報告している。本研究は主として上下震動が高加速度となった原因の解明を目指しており、「トランポリン効果」の考えを補足するものとなる。

岩手・宮城内陸地震(Mj7.2)の震度分布

岩手・宮城内陸地震 2008年6月14日 8時43分

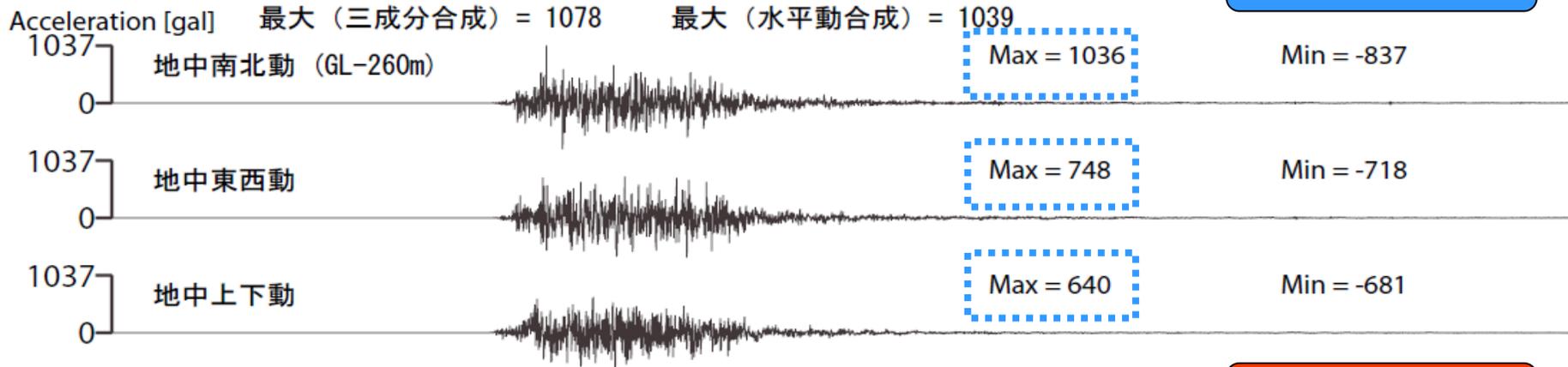


最大加速度記録と距離減衰式

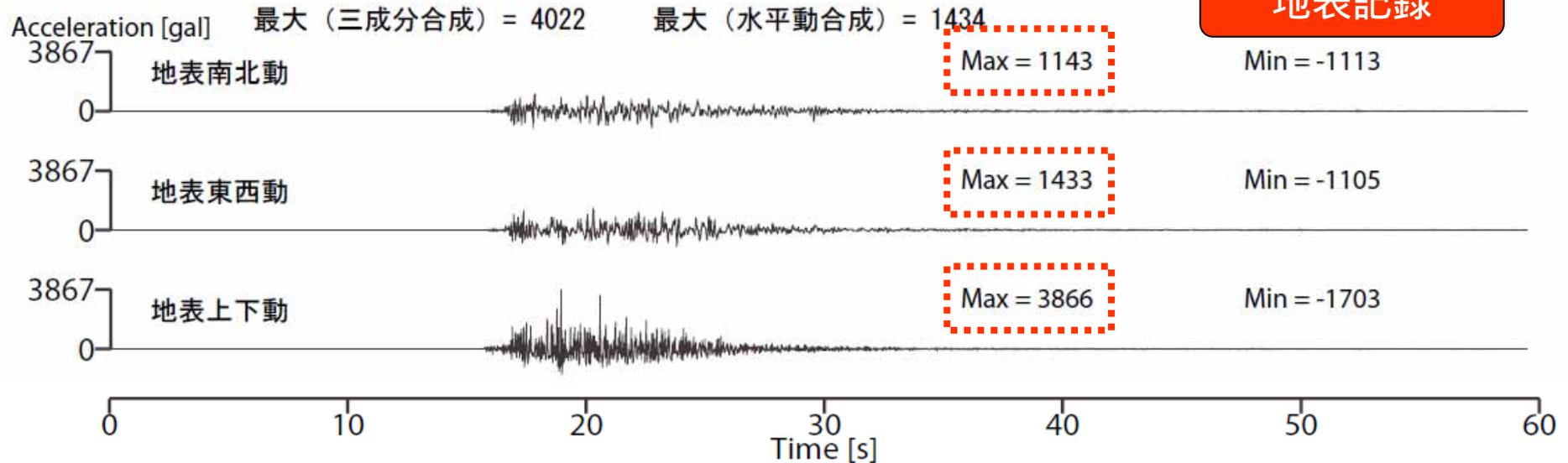
IWTH25 (一関西) における観測波形

IWTH25 2008/06/14 08:43:46

地中記録

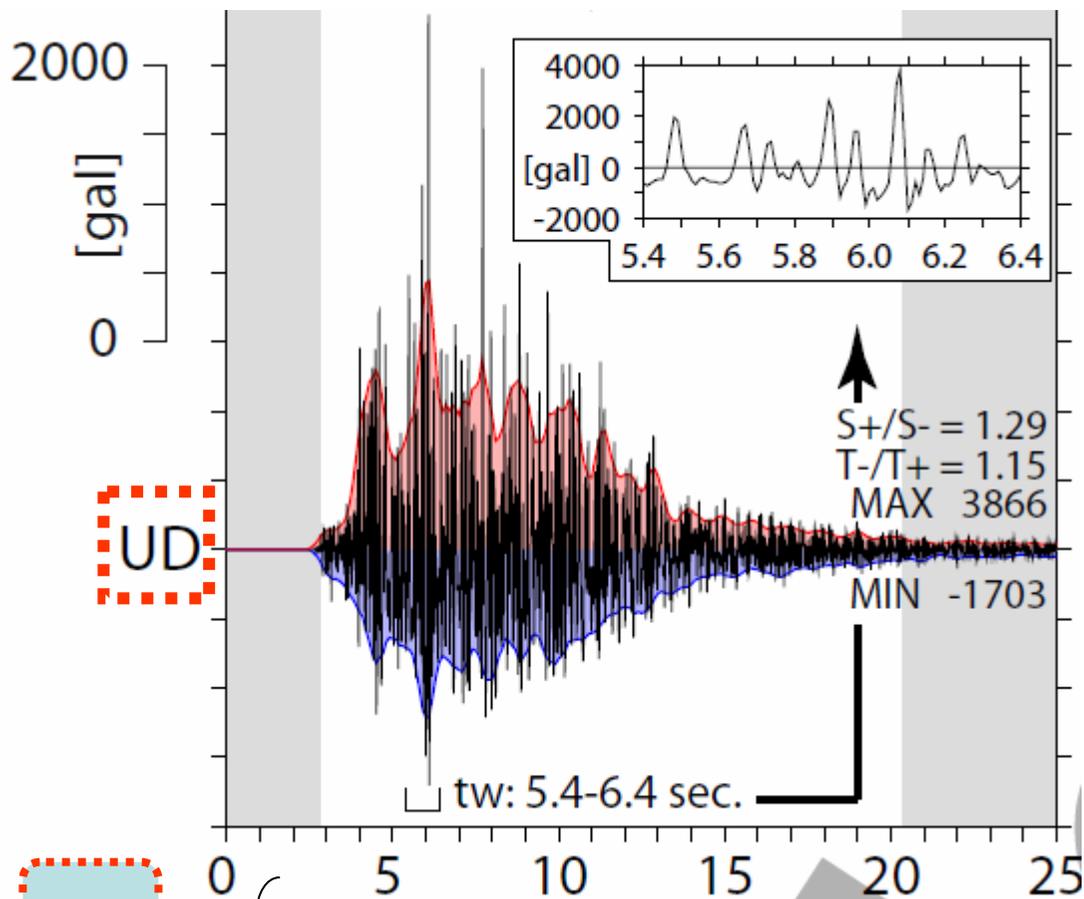


地表記録

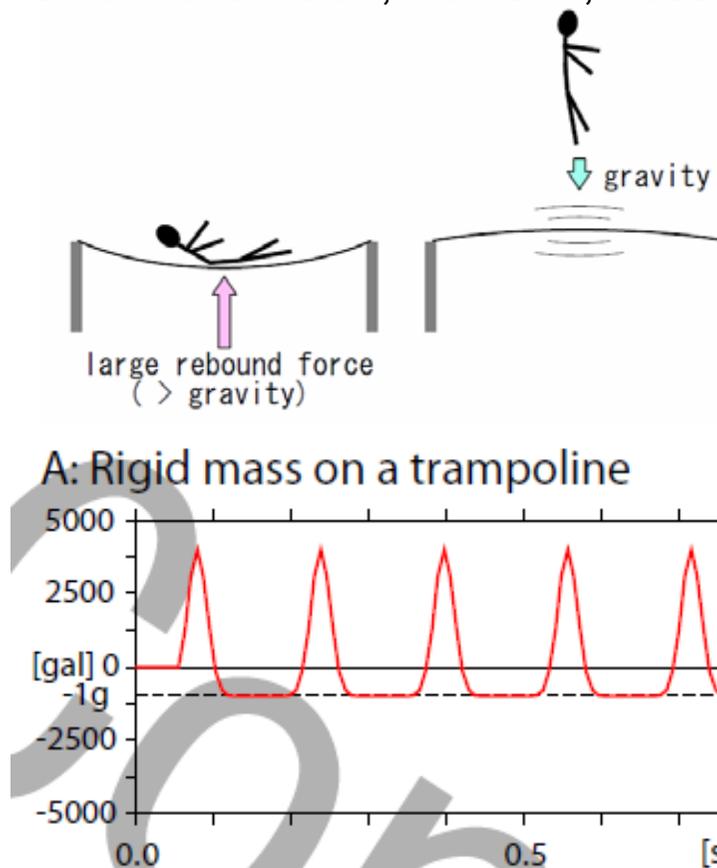


地表記録は, Trampoline Effectが含まれる (Aoi et. al., 2008)
本研究では, 地中記録を採用

Trampoline Effect (Aoi et. al., 2008)



Science 31/Oct, Vol. 322, 2008



トランポリン

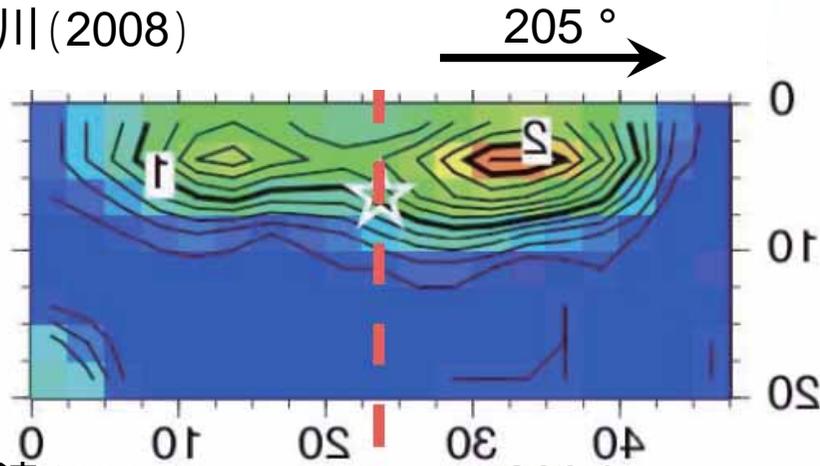
- ・上方向の震動は短周期でスパイク状に対し、下方向の震動は相対的に周期が長く一定レベル(約 -1g)で飽和される傾向がみられる。1
- ・その原因として、1gを超えると、上向き震動に対して媒質の粒子は互いの粘着力を保って弾性体としてふるまうが、下向き震動に対しては粘着力をもたない粒状体として振舞うため、その加速度は - 1gで飽和してしまう、と考えられる。

本研究の内容

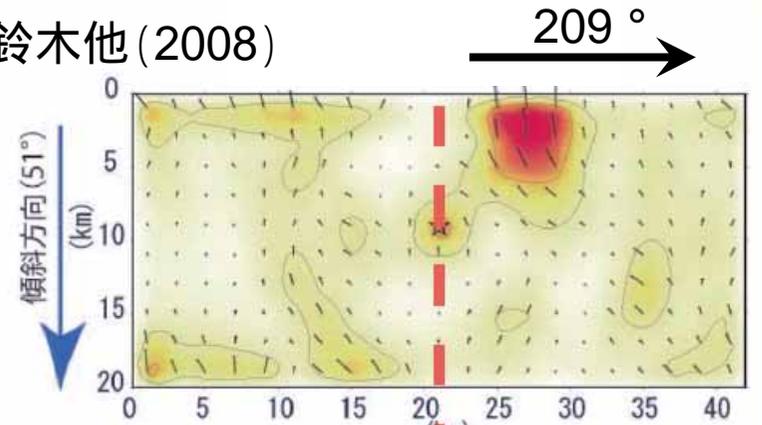
1. 強震動計算のための震源モデルの構築
 - ・ 波形インバージョンでは用いられない短周期成分を含む広帯域地震動(0.2 ~ 10Hz)に対応した震源モデルの構築を経験的グリーン関数法により試みる.
 - ・ 震源近傍の観測点[例えば、I W T H 2 5 (一関西)]の地中観測点におけるシミュレーション波形と観測波形の比較により、震源モデルの有効性の検証を行う。
2. I W T H 2 5 (一関西)での上下動地震動の生成原因の考察
 - ・ 弱震動(余震)時の表層構造による伝達関数の評価。
 - ・ 強震動(本震)時の表層構造による伝達関数の評価。
 - ・ 上で求めた伝達関数を用いて、本震時の地中地震動から地表地震動を推定し、観測記録と比較。

波形インバージョンによる震源破壊過程

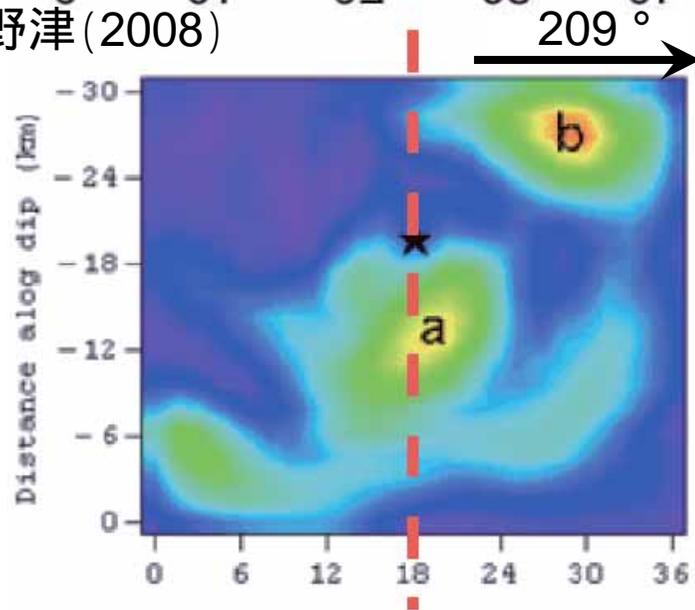
堀川 (2008)



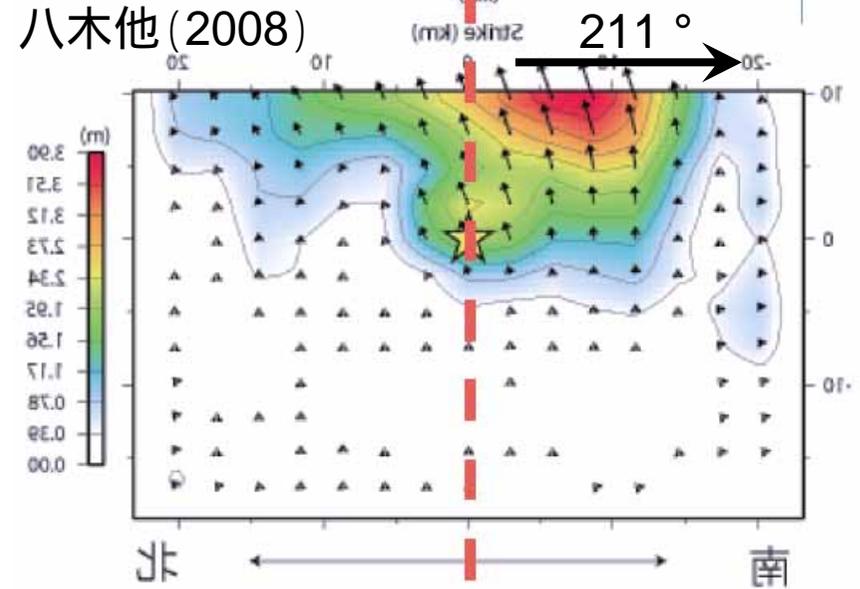
鈴木他 (2008)



野津 (2008)



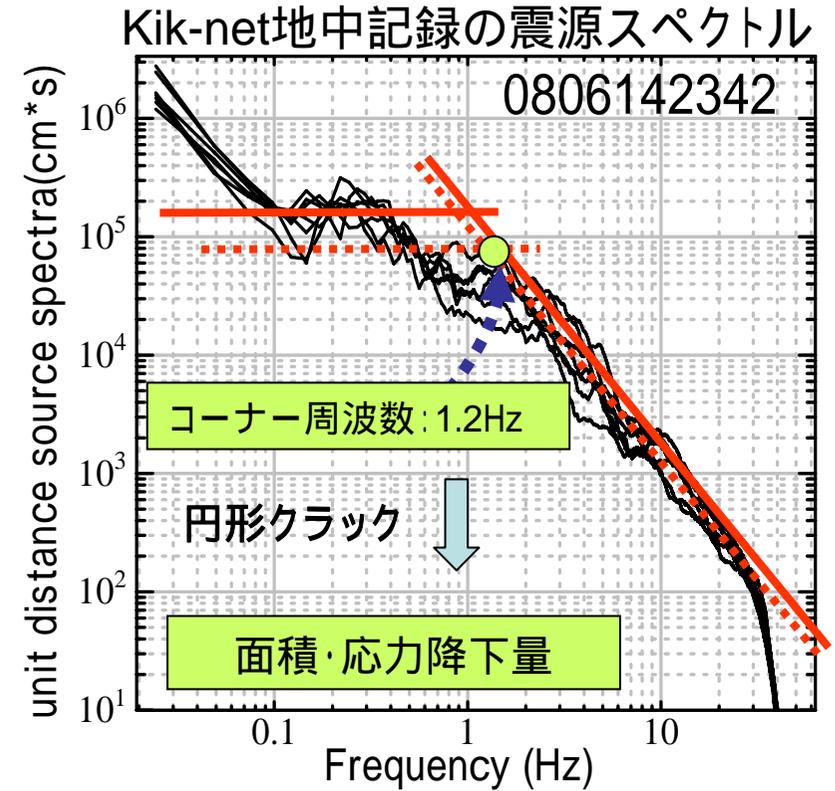
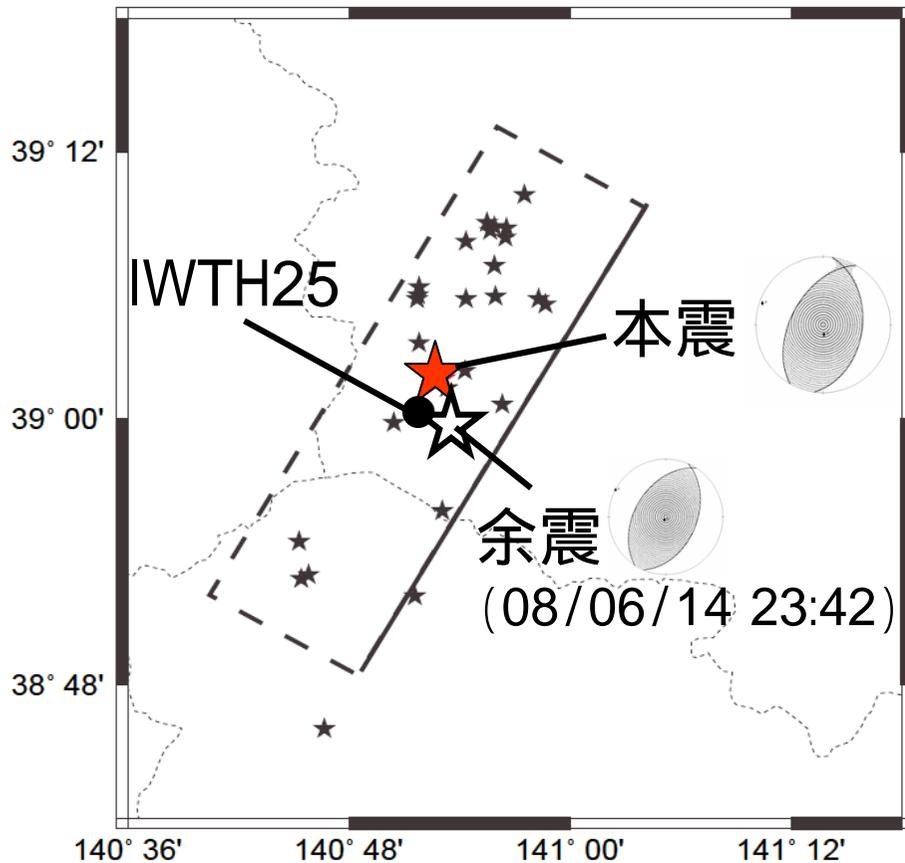
八木他 (2008)



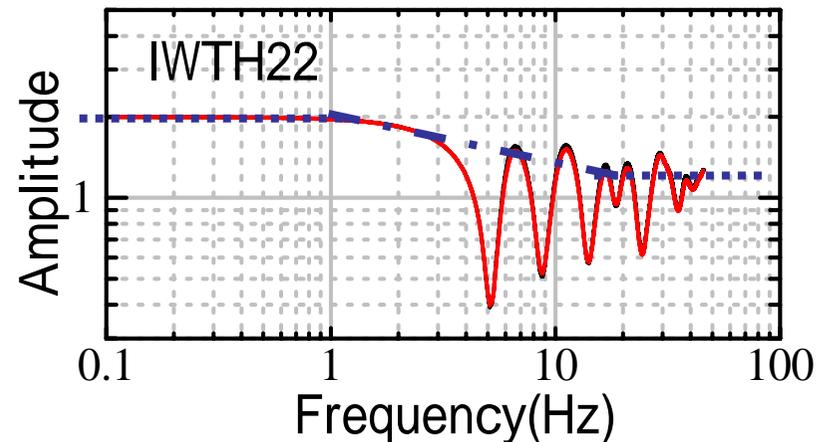
震源よりも南側に大きなすべりが存在

グリーン関数となる余震の選定

- ・本震のメカニズムと近似している
- ・震源がアスペリティに近いもの



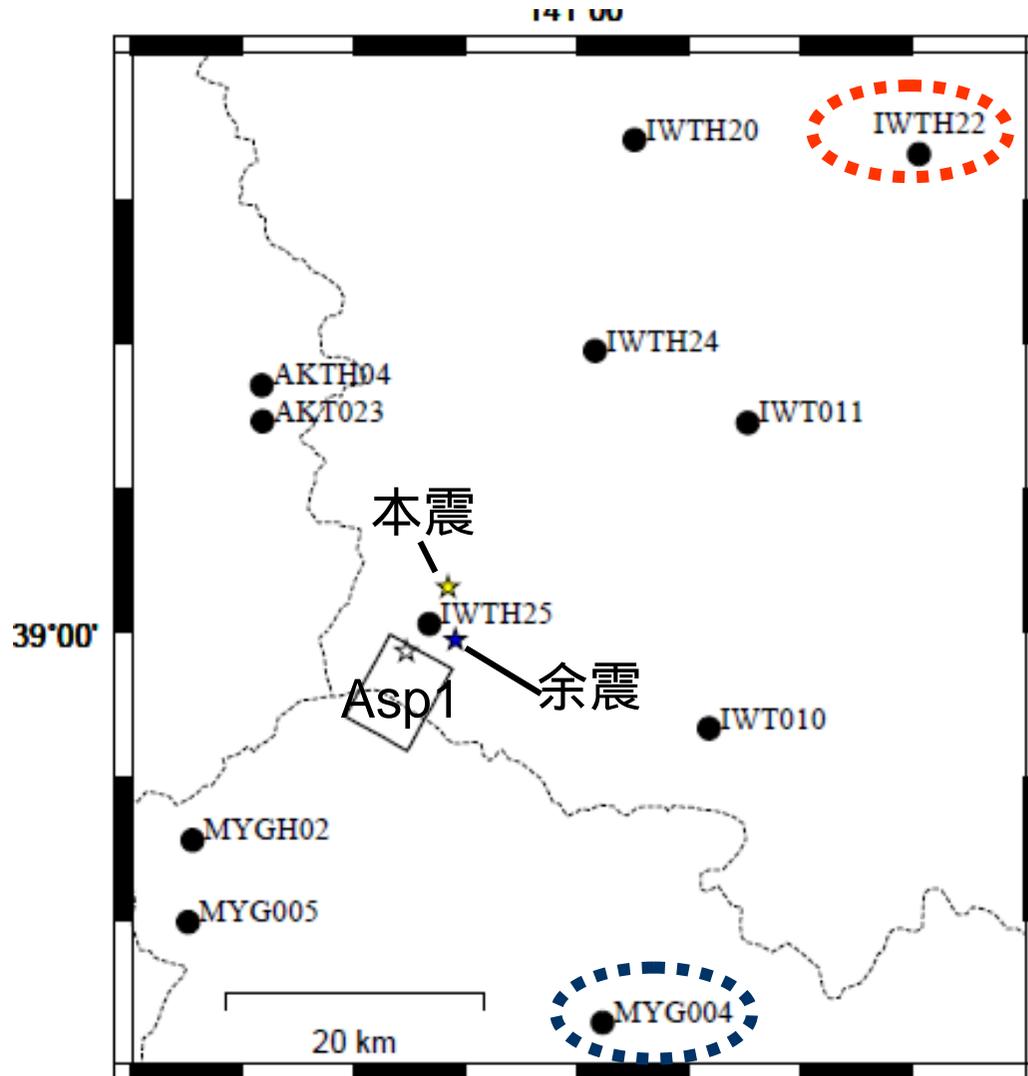
地中における応答 $(E+F) / E$
 低周波: 2倍 高周波: 1.5倍



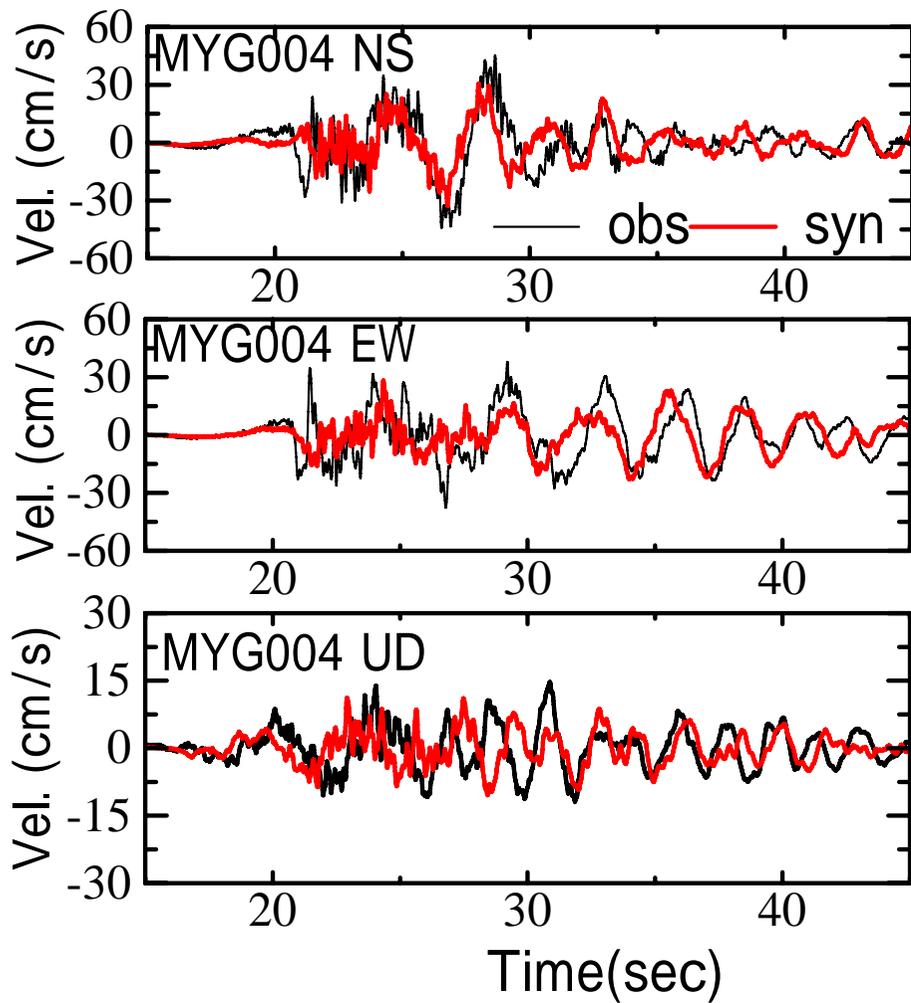
IWTH22地点の地中観測点の応答

震源モデルによる合成波形と観測波形と比較

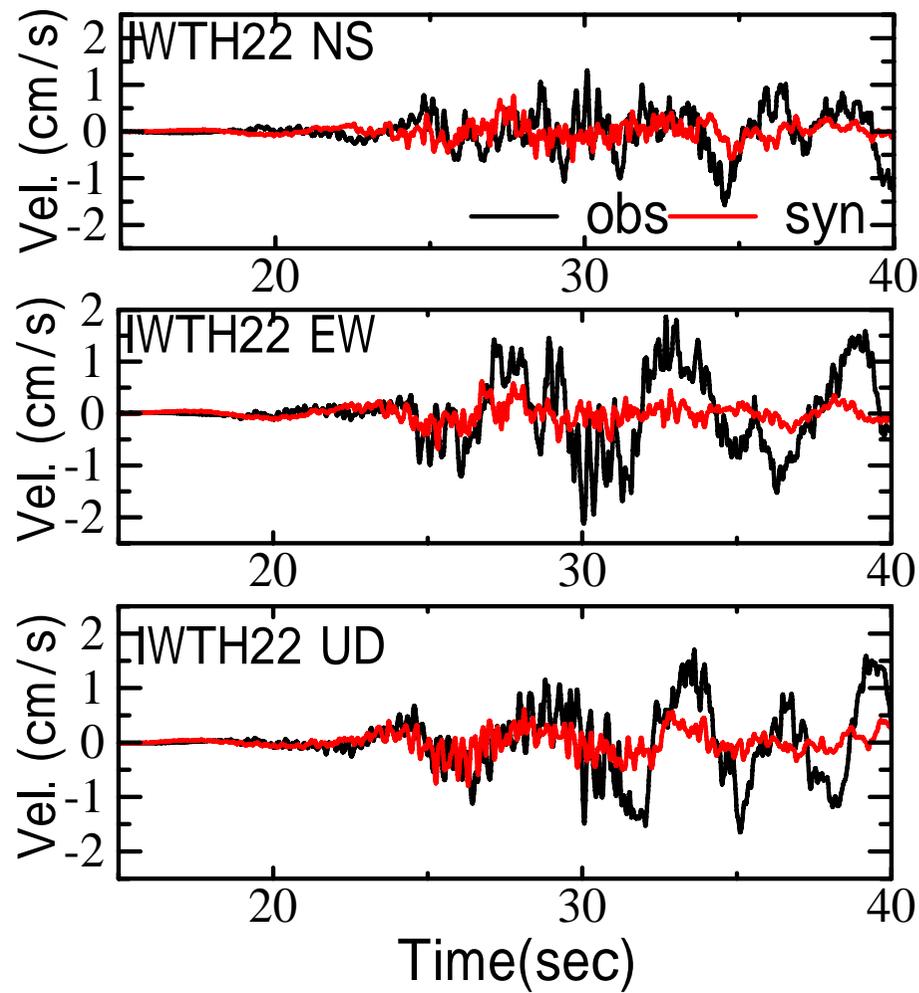
- ・ すべり量の大きい南側に強震動生成域を設定して解析を実施．
- ・ アスペリティが南側のみでは，北側の観測は再現されない．



震源の南側の観測点

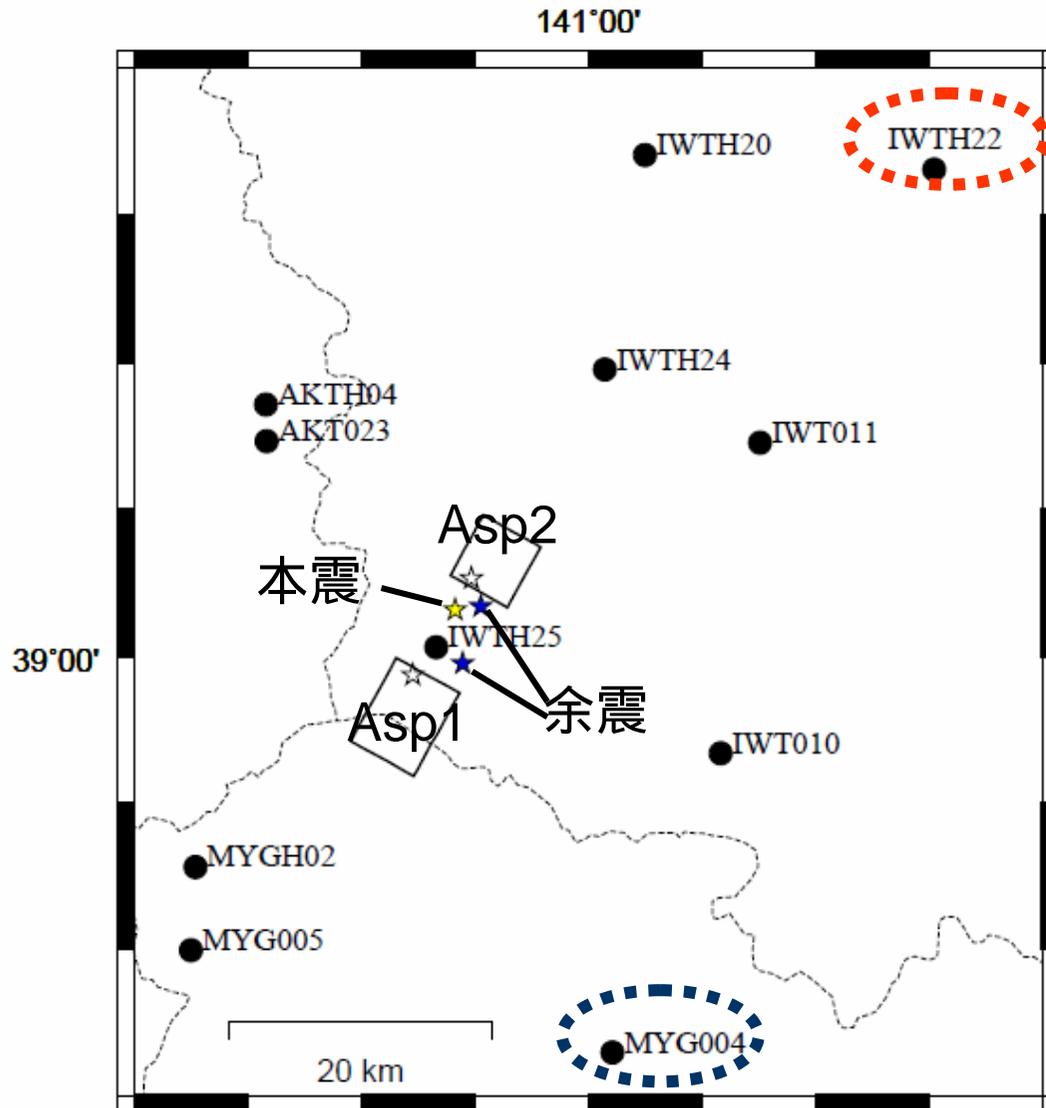


震源の北側の観測点



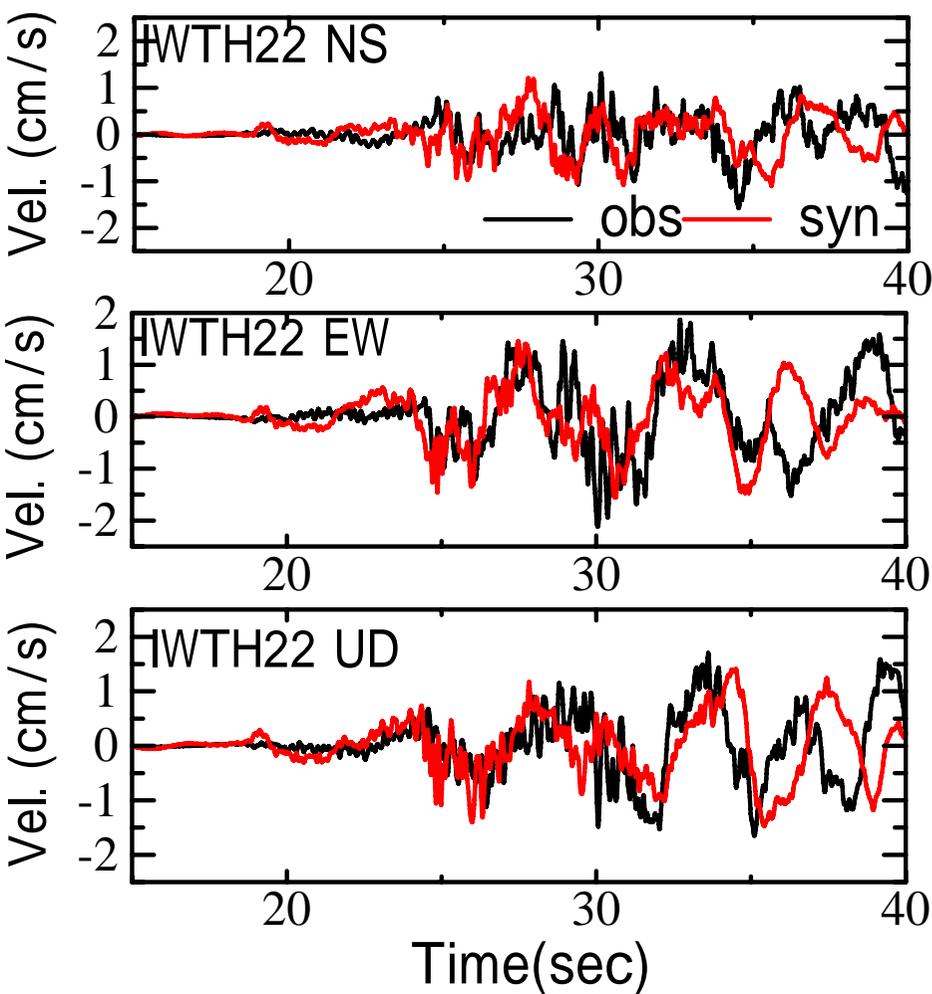
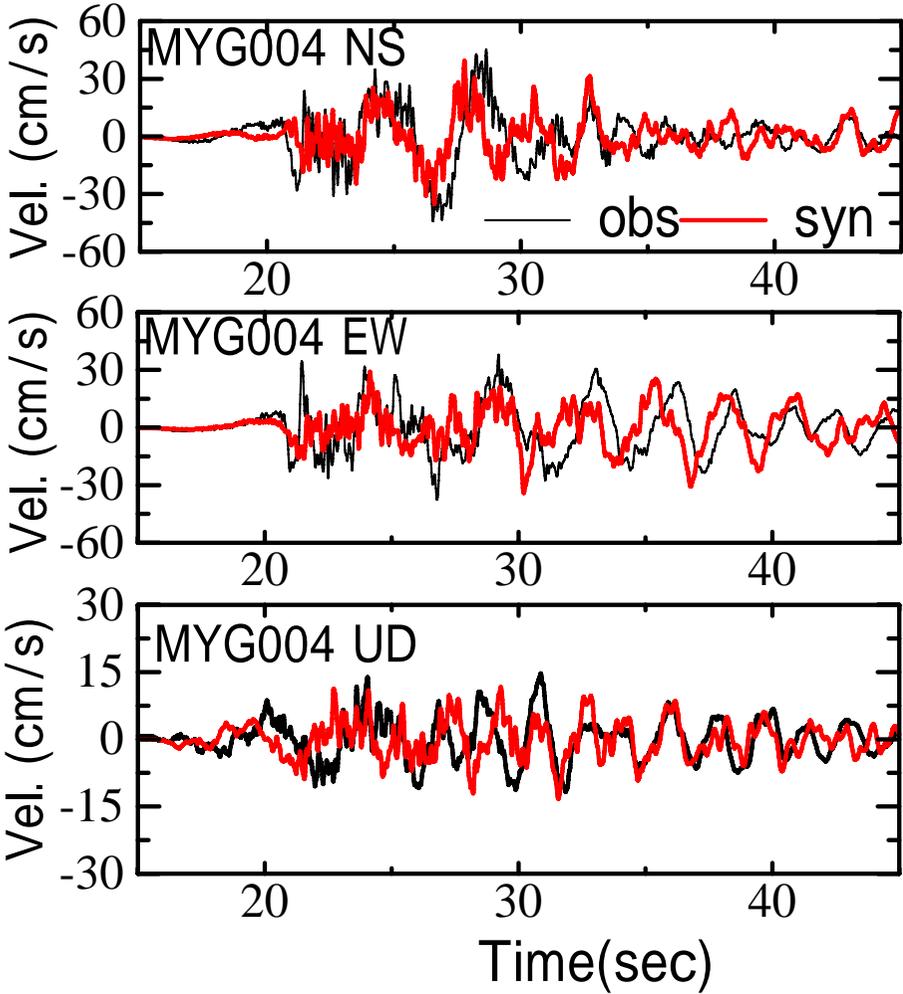
震源モデルによる合成波形と観測波形と比較

- ・北側にアスペリティを設定することにより、北側の観測記録の再現性が向上した。
- ・アスペリティの位置と観測点の位置関係により、余震1と余震2を使い分ける。



震源の南側の観測点

震源の北側の観測点

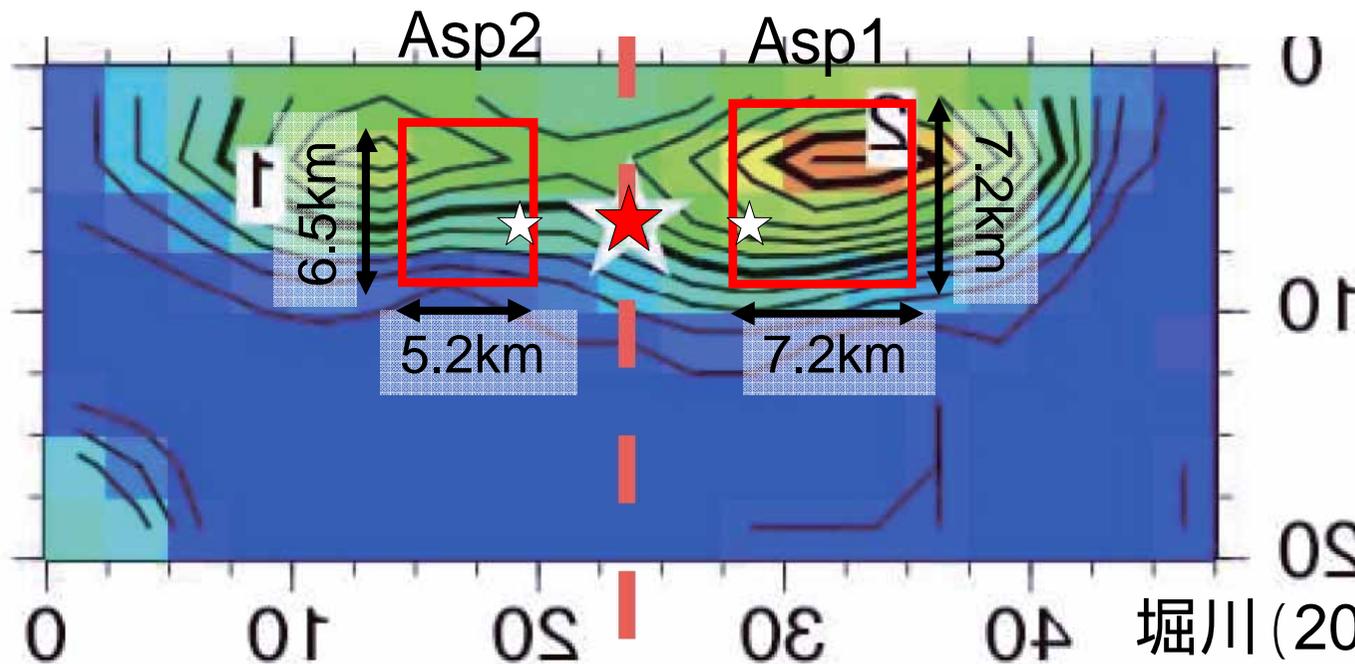
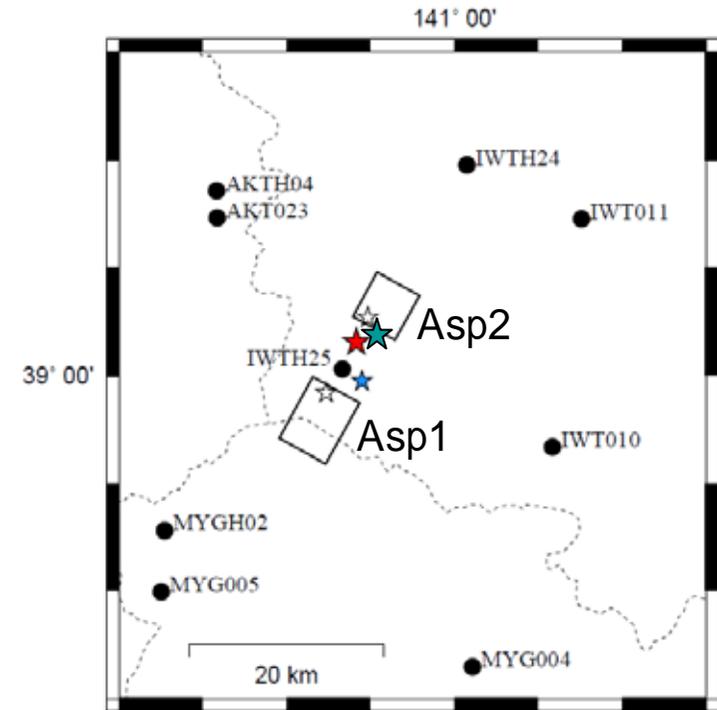


構築した震源モデル

走向: 209° 傾斜角 49°

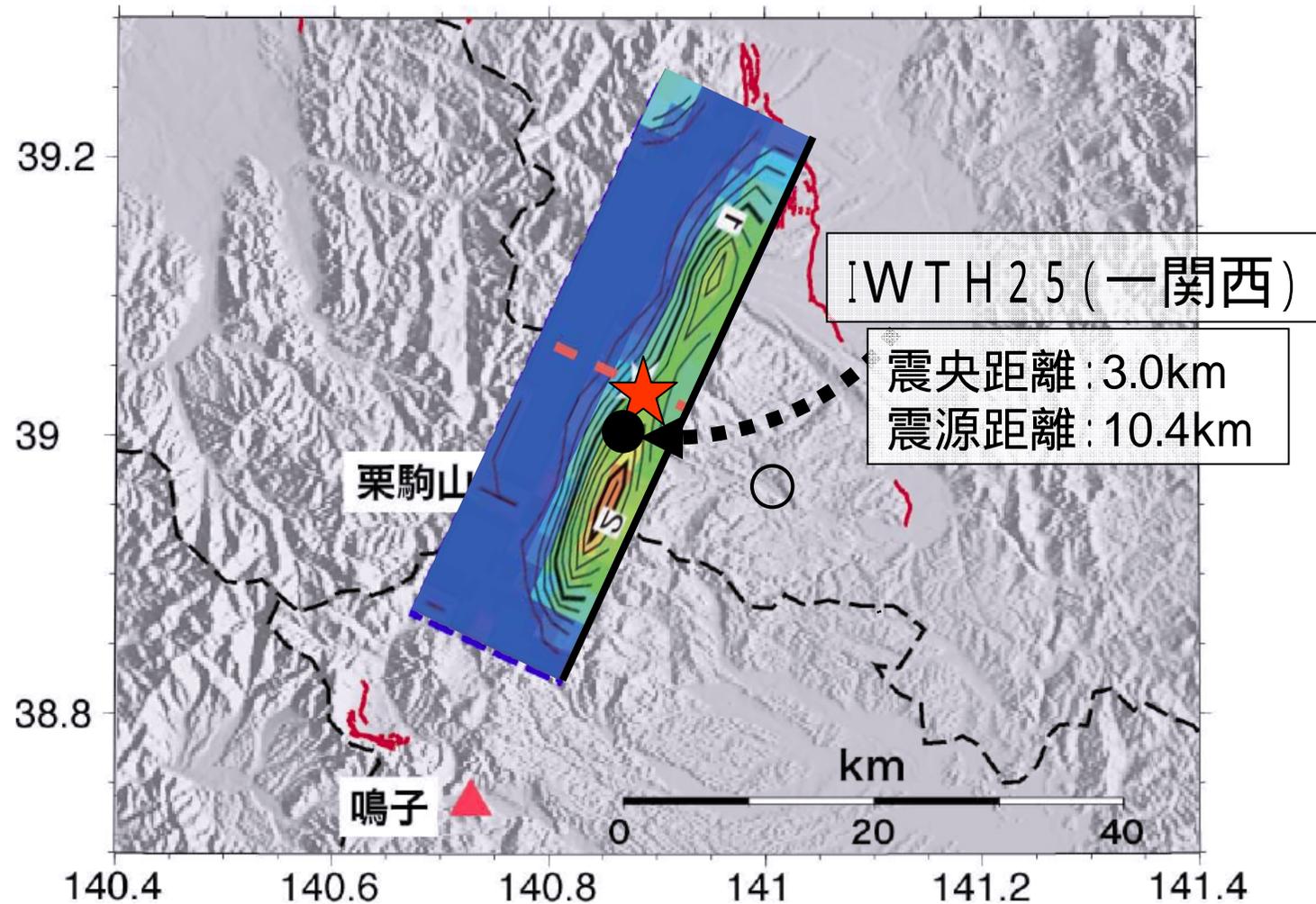
	Asp1	Asp2
面積	51.84km ²	33.8km ²
応力降下量	17.0MPa	18.5MPa
地震モーメント	2.6E+18Nm	1.8E+18Nm

破壊速度: $V_r = 2.7\text{km/s}$



堀川(2008)に加筆

波形インバージョンによる震源破壊過程(堀川, 2008)と I W T H 25(一関西)との幾何学的位置関係

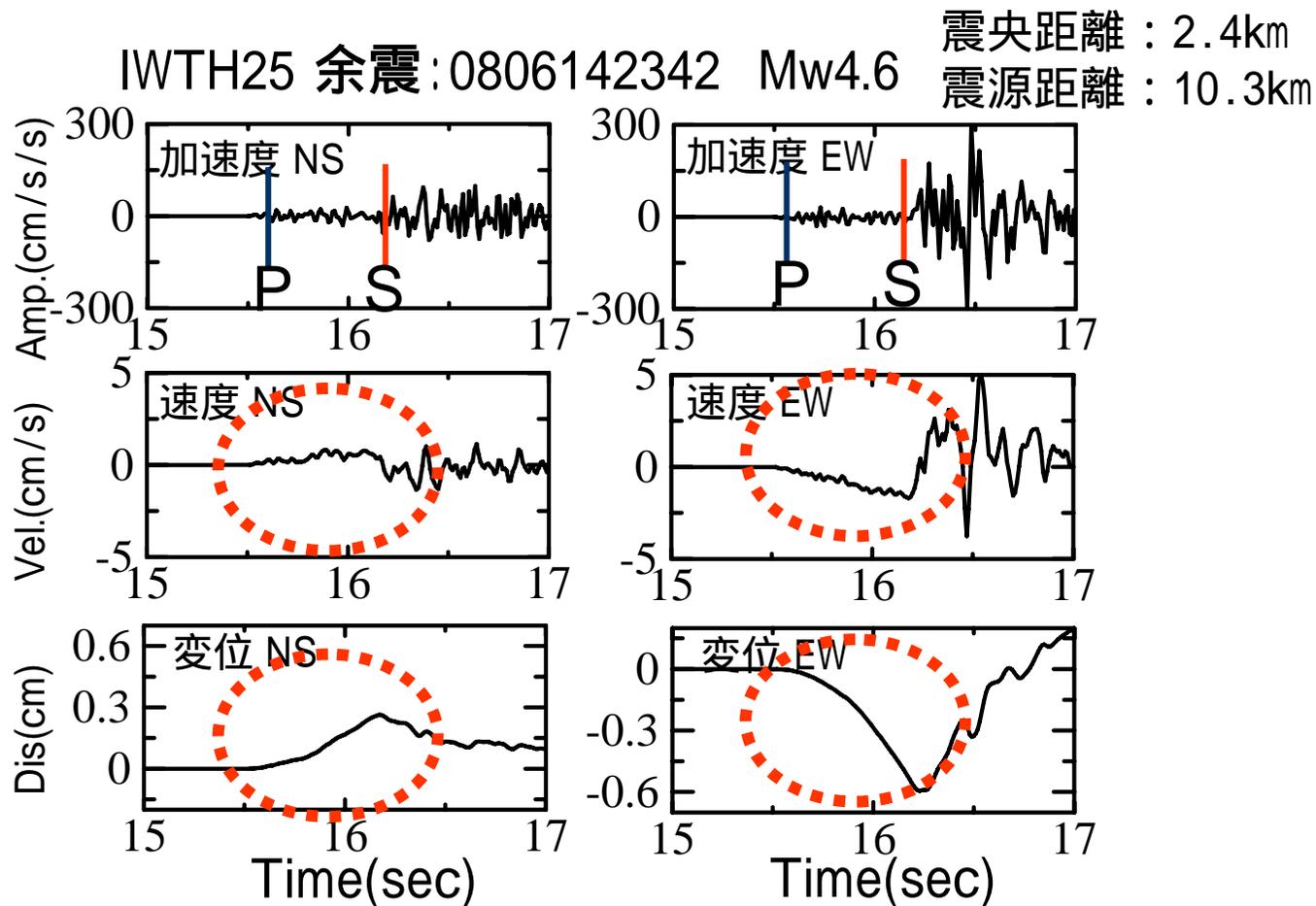


堀川(2008)に加筆

震源極近傍地点における検討

IWTH25(一関西)における余震観測記録の近地項の影響

P波とS波の間に、低周波の変動が見られる。(近地項の影響)
震源モデルの構築の際には、IWTH25の記録は使用しない。



震源極近傍地点における検討

均質等方な全無限弾性体中のせん断くい違いを考えた場合の任意点 \mathbf{x} における n 方向に生ずる変位

$$u_n(\mathbf{x}, t) = \frac{M_0}{4\pi\rho} \left[R_n^N \frac{1}{r^4} \int_{\frac{r}{\alpha}}^{\frac{r}{\beta}} \tau f^s(t - \tau) d\tau \right. \\ \left. + \frac{1}{\alpha^2} R_n^{IP} \frac{1}{r^2} f^s\left(t - \frac{r}{\alpha}\right) + \frac{1}{\beta^2} R_n^{IS} \frac{1}{r^2} f^s\left(t - \frac{r}{\beta}\right) \right. \\ \left. + \frac{1}{\alpha^3} R_n^{FP} \frac{1}{r} \dot{f}^s\left(t - \frac{r}{\alpha}\right) + \frac{1}{\beta^3} R_n^{FS} \frac{1}{r} \dot{f}^s\left(t - \frac{r}{\beta}\right) \right]$$

{ 距離減衰が大きい : 近地項
P波とS波の間

: 中間地項

: 遠地項

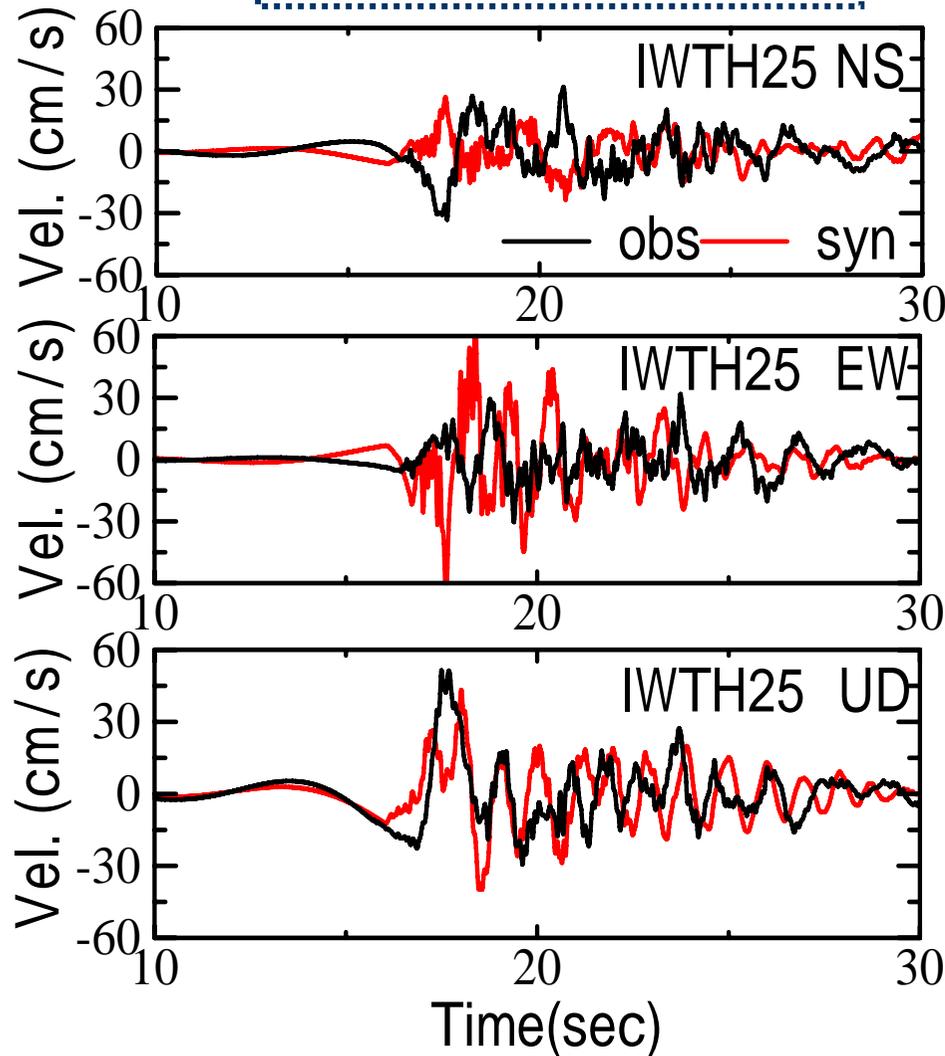
・震源極近傍の観測記録では，近地項および中間地項の影響が無視できない。

・経験的グリーン関数法(Irikura, 1986)では，遠地項のみが考慮されている。

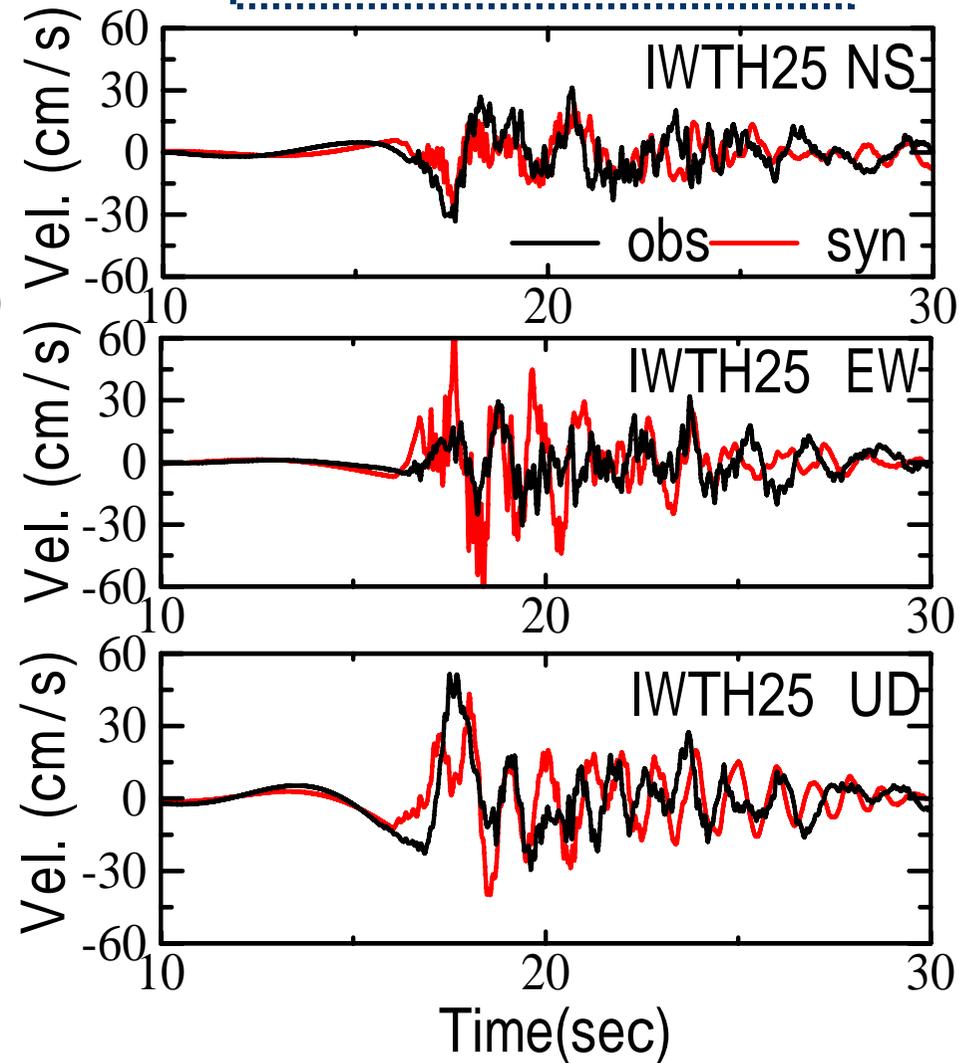
IWTH25(一関西)の波形シミュレーション

- ・ 近地項の影響は長周期成分に現れるため、変位よりもその影響の少ない速度で、観測波形とシミュレーション波形を比較

ラディエーションパターンの補正なし



ラディエーションパターンのセンスのみ補正

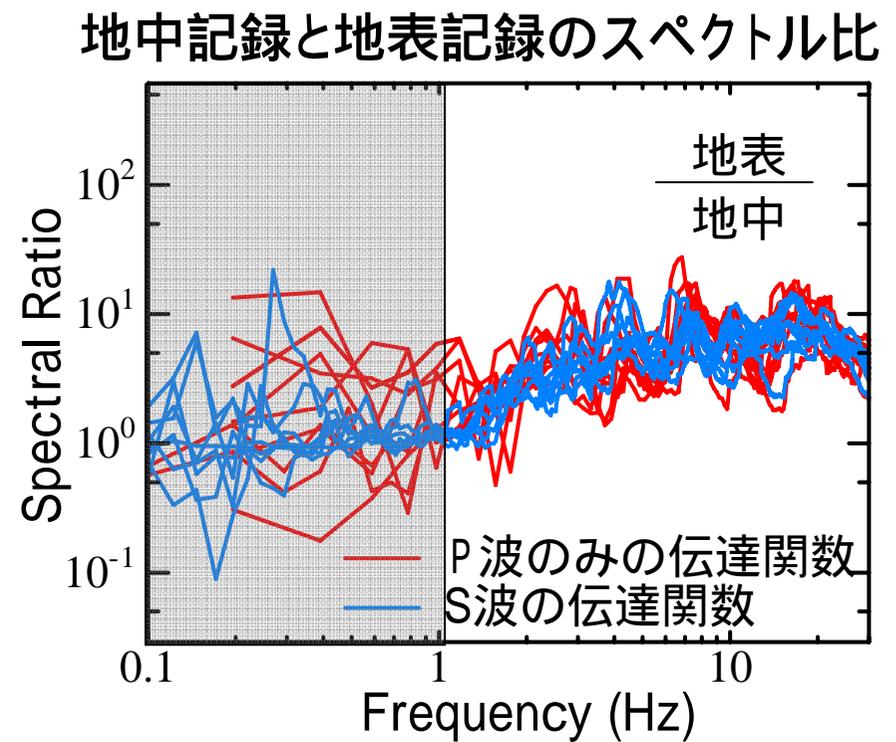
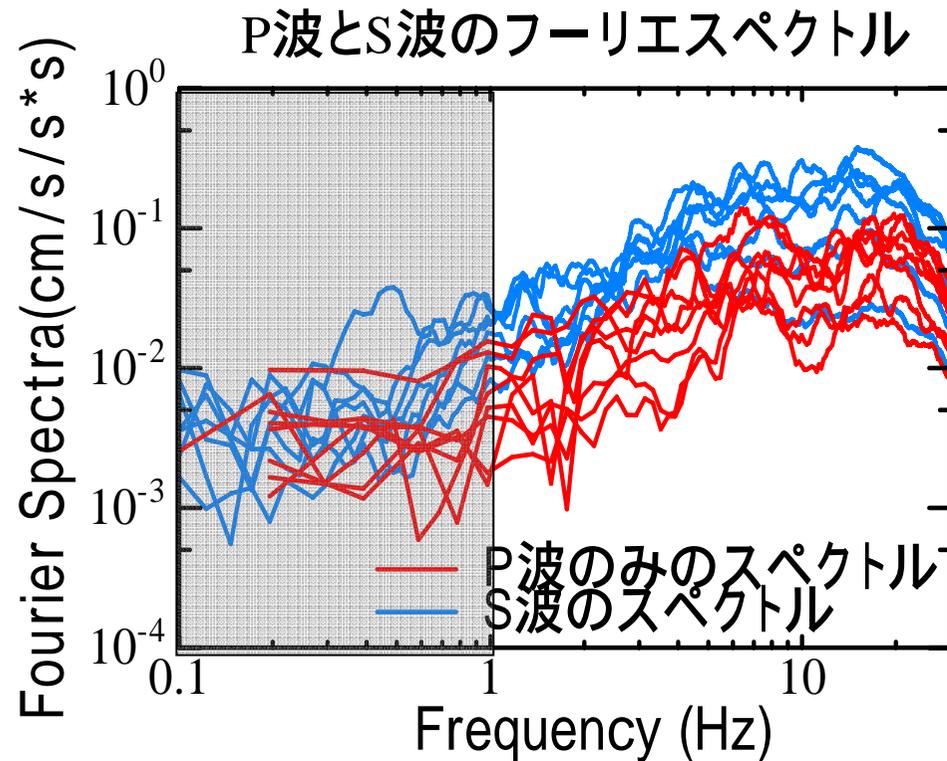


震源極近傍観測点 IWTH25(一関西)での高加速度の生成原因

- この観測点は震央距離約3 kmに位置。
- 最大加速度： 上下動 地表で 3866 ガル、地中(-260 m)で 640 ガル
水平動(NS) 地表で 1143 ガル、地中(-260 m)で 1036ガル
水平動(EW) 地表で 1433 ガル、地中(-260 m)で 748ガル
- 地表での水平震動は、弱震動のときは軟弱な表層により大きく増幅されるが、強震動になると地盤の非線形効果により、増幅されなくなる(せん断波の性質)。
- 一方、地表での上下震動は、強震動のときにも地盤の非線形効果の影響は小さく、弱震動のときと同様に増幅される。
- 今回の観測は最大加速度としては上記の傾向と一致しているが、これまで地盤上では2gを超えるような高加速度は記録されたことがなかった。

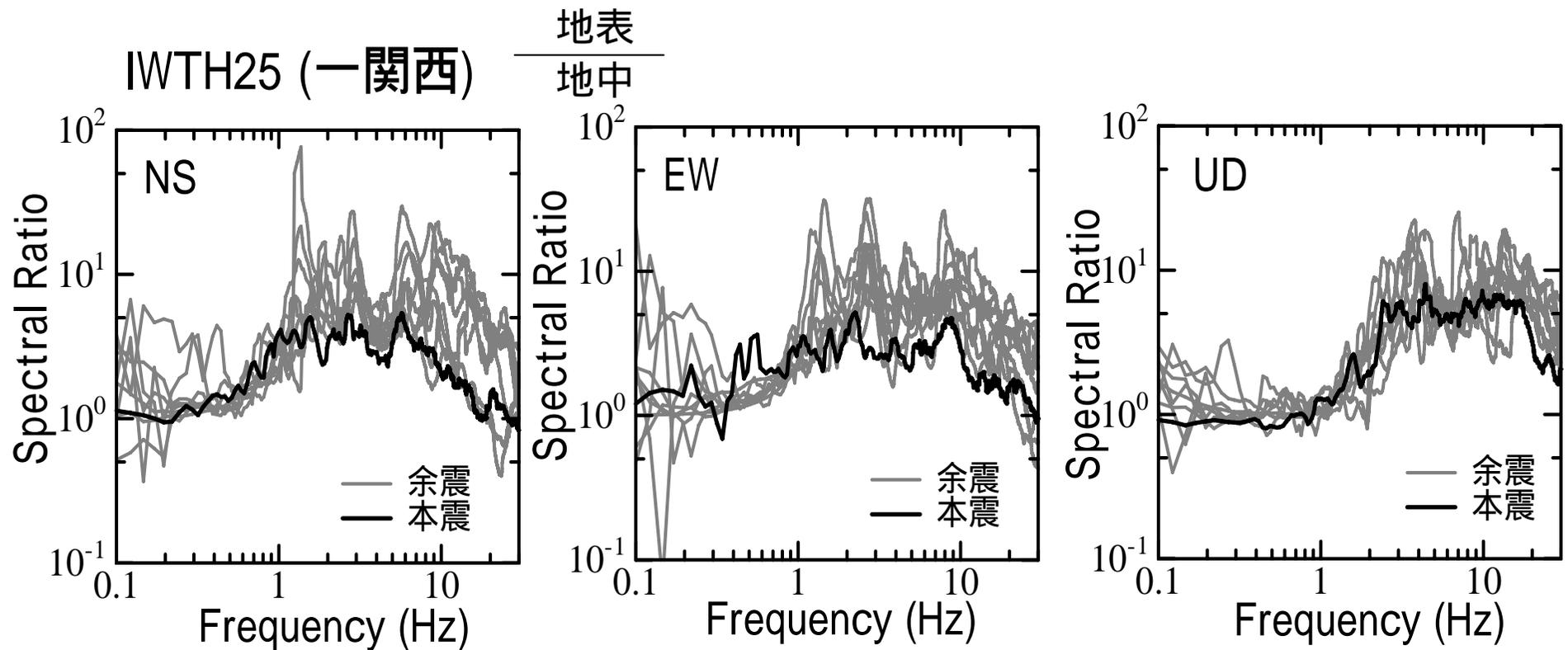
P波部分とS波部分のスペクトルおよび 地表と地中記録のスペクトル比

P波部分のスペクトルとS波部分のスペクトル形状は、概ね調和的
上下動の増幅度は、P波速度構造で決まる



本震記録と余震記録の地表と地中のスペクトル比

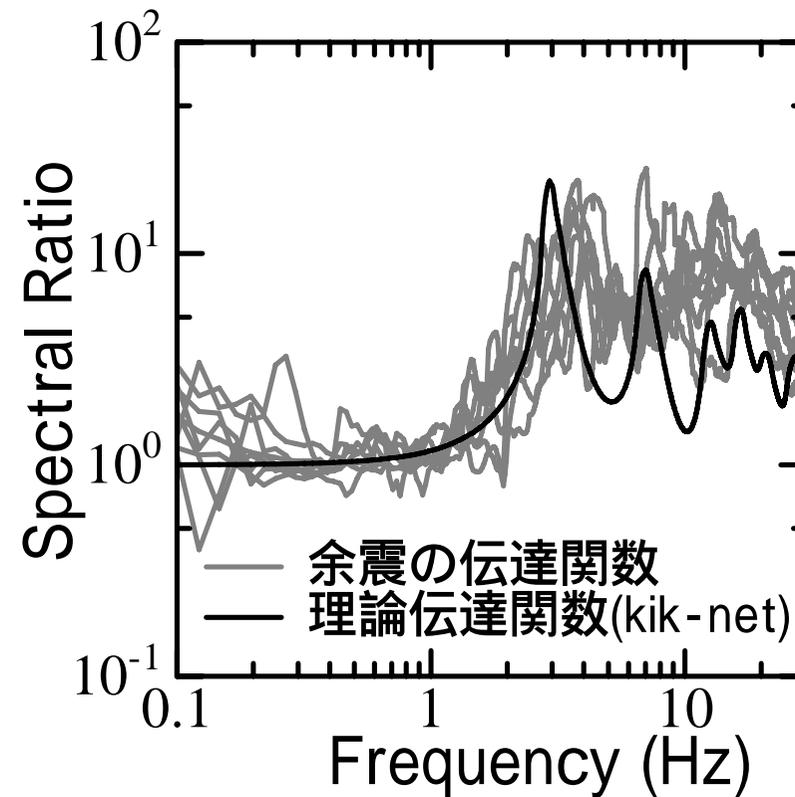
- ・本震のスペクトル比は、余震よりも振幅が小さい
地表の非線形化による影響と考えられる。
- ・上下動成分は、高周波でも振幅が大きい
大加速度の原因の一つと考えられる



余震のスペクトル比と理論伝達関数

KIK-NETのボーリングデータでは、高周波帯域で過小評価

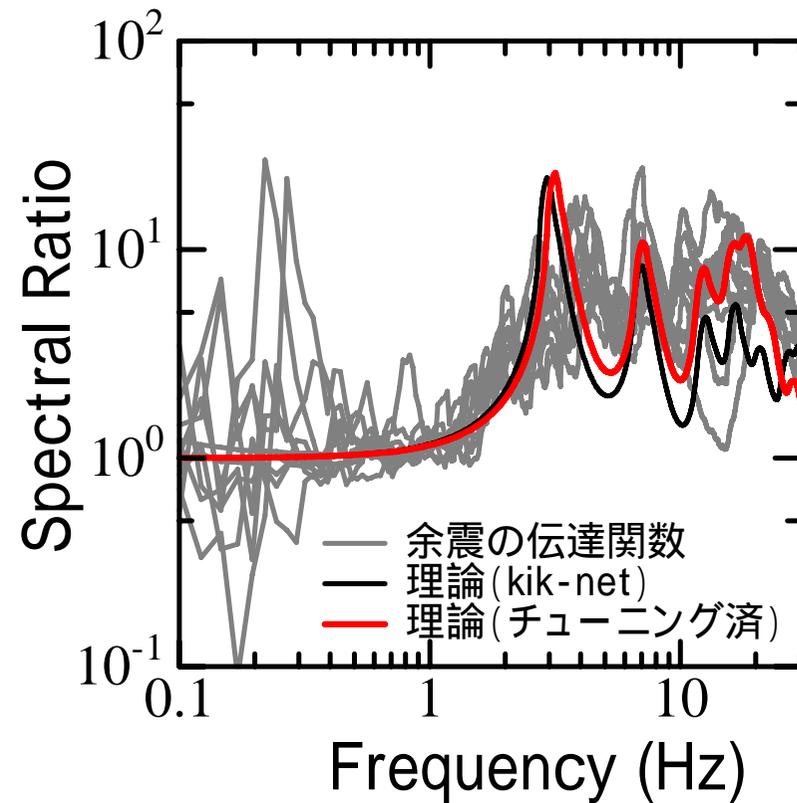
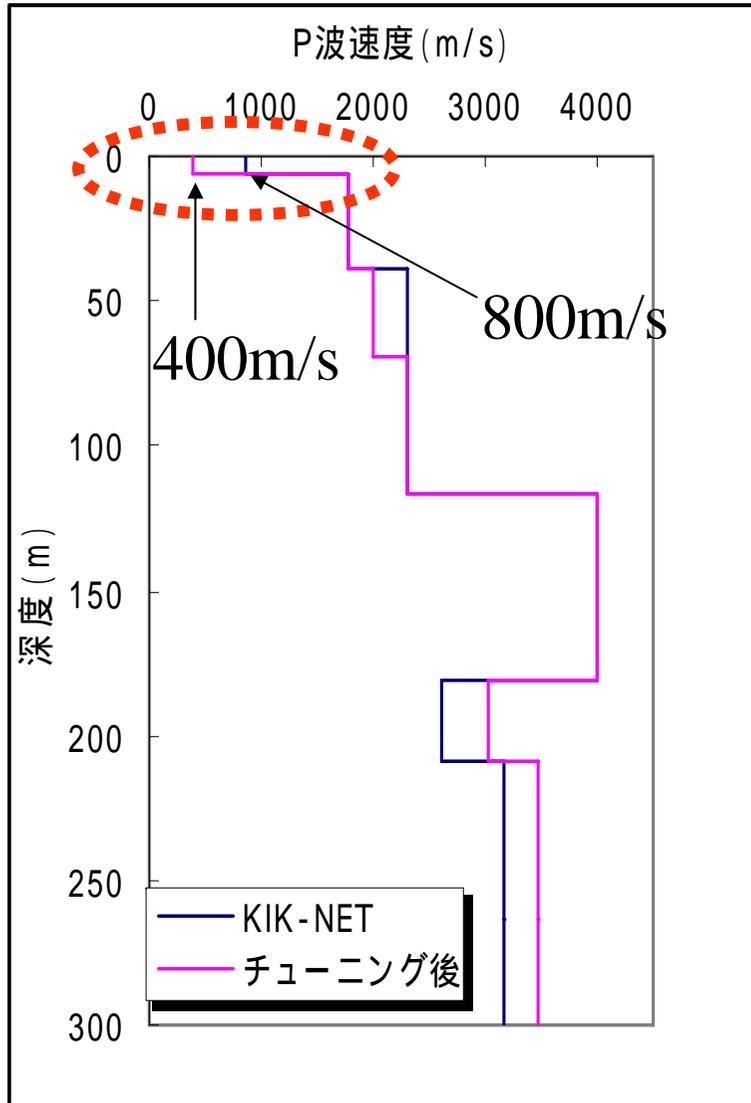
余震のスペクトル比を基に、地盤構造をチューニングする

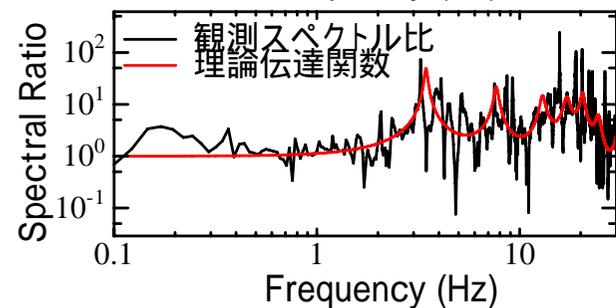
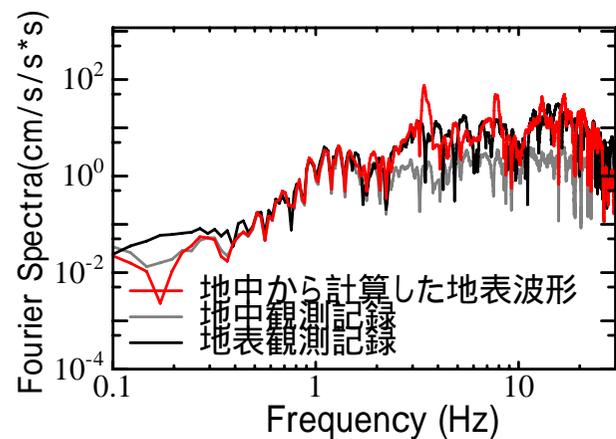
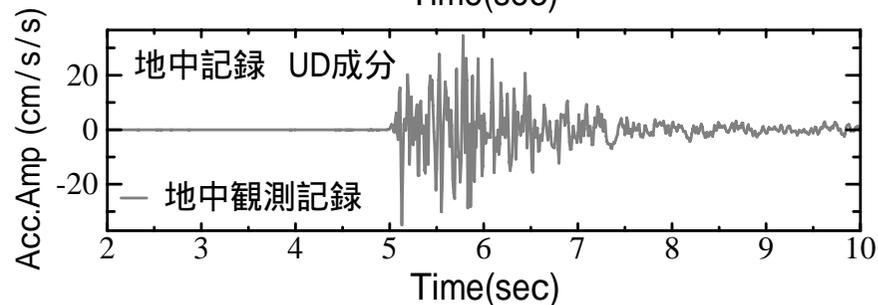
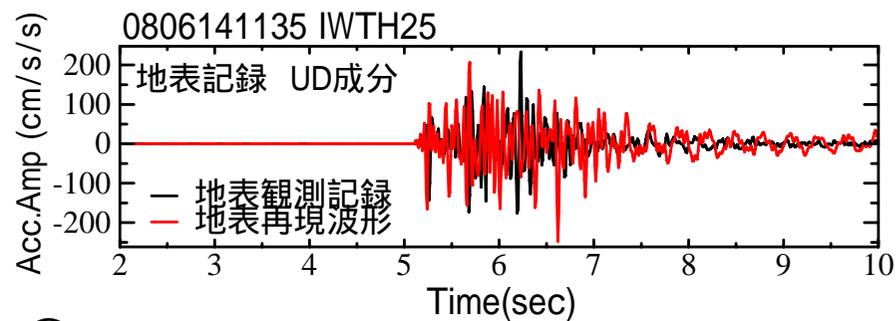
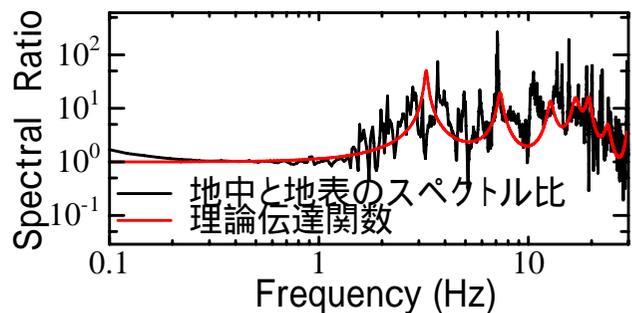
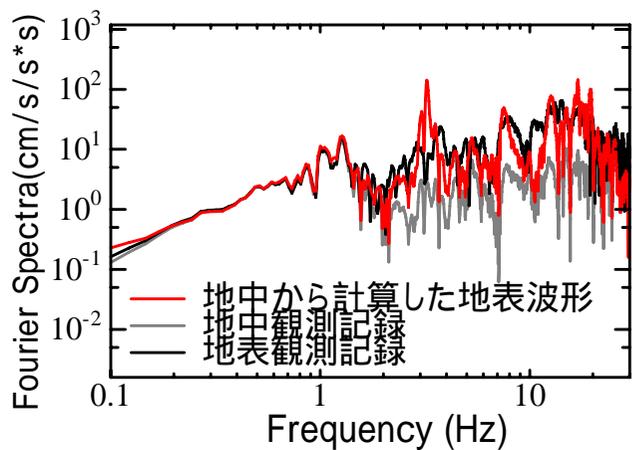
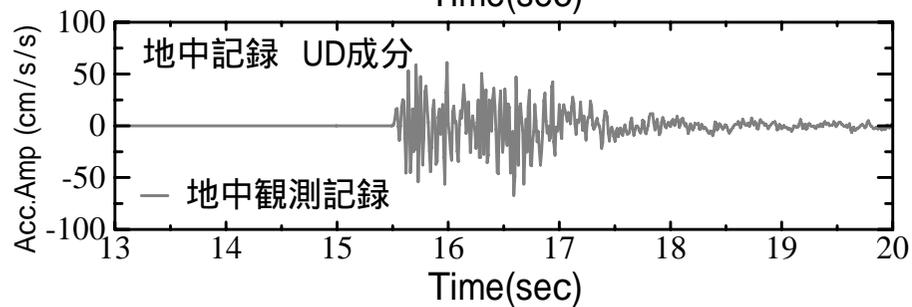
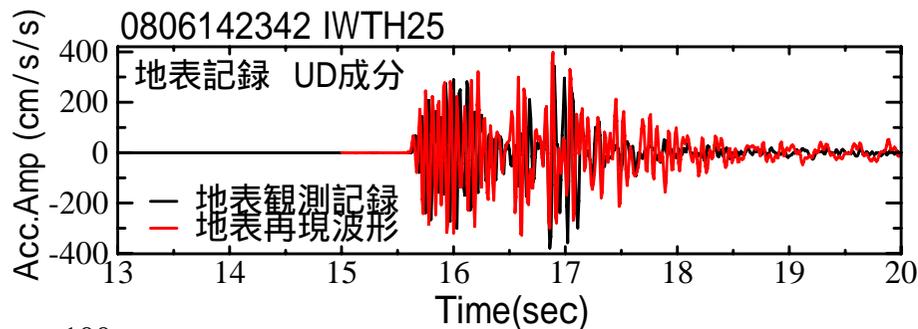


主な地盤構造の変更点

第一層のP波速度

850m/s 400m/s に変更により
高周波の振幅を大きくする。





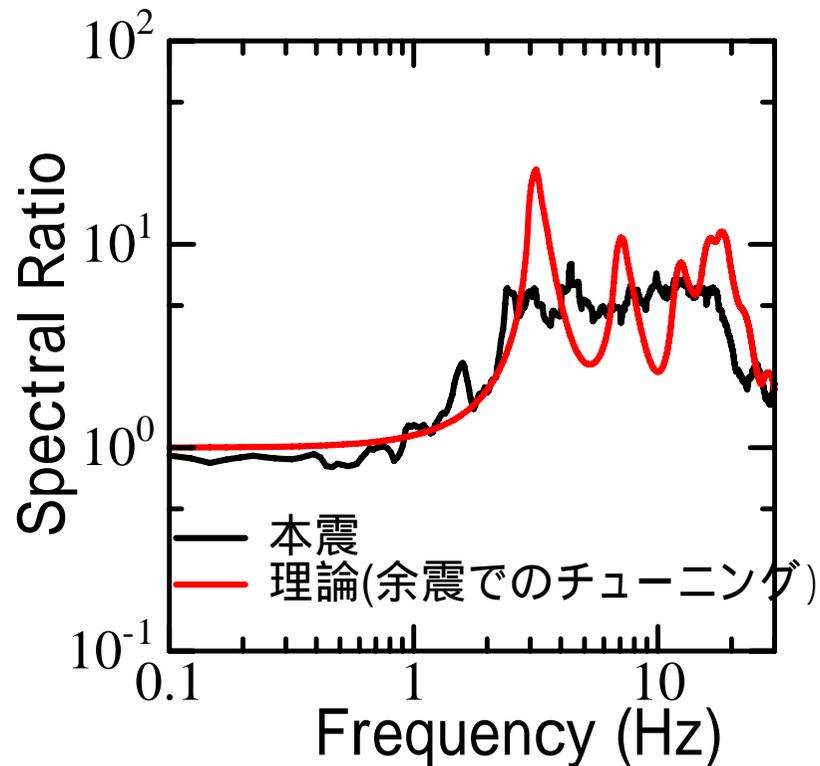
本震記録による地盤構造の推定

余震記録からチューニングした地盤構造モデルでは、本震記録のスペクトル比と調和的でない。

本震のスペクトル比により、再度地盤構造をチューニングする必要がある。

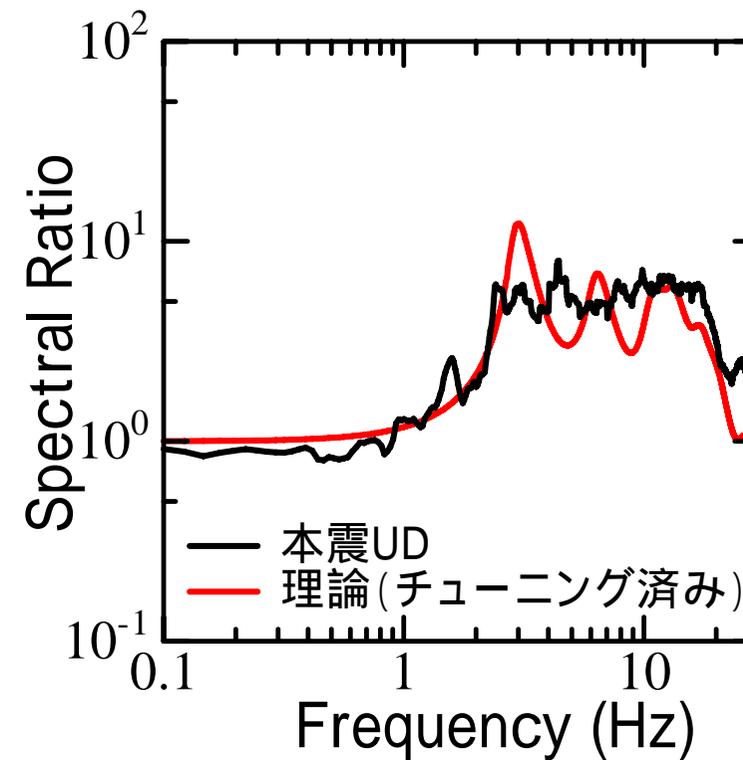
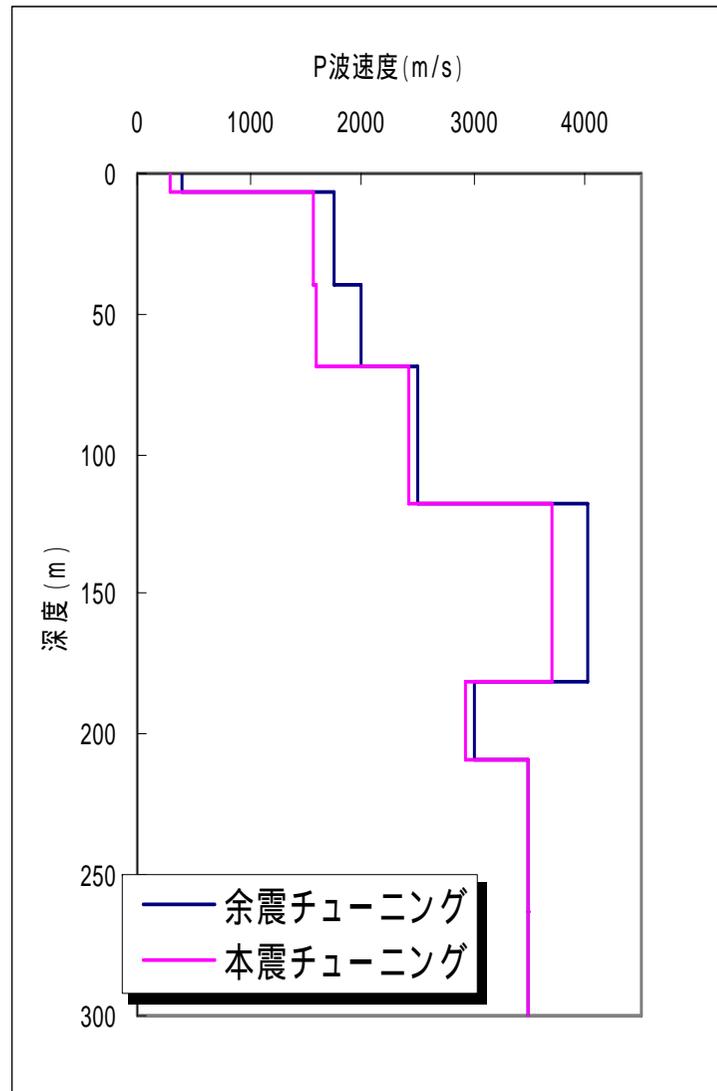
高周波の振幅を下げる

第一ピークの振幅を下げる



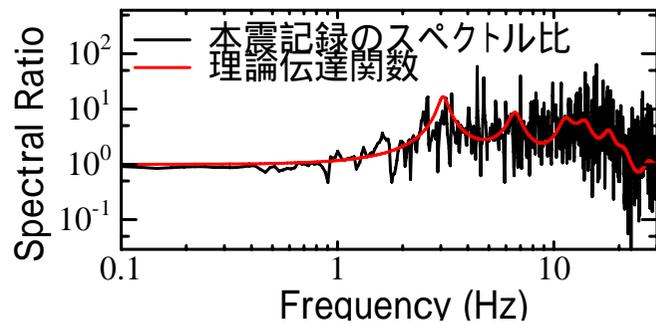
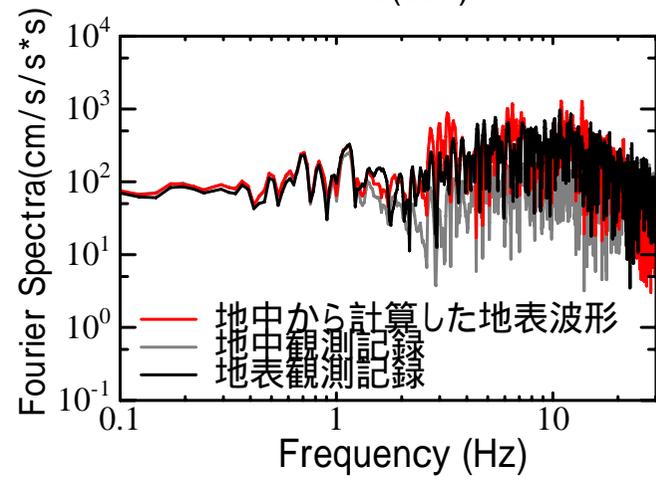
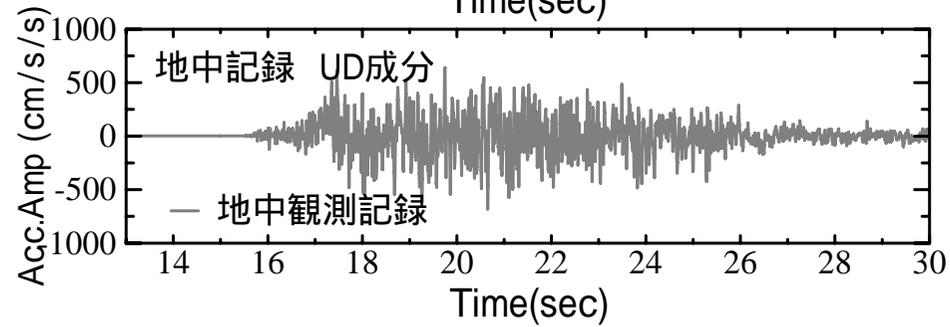
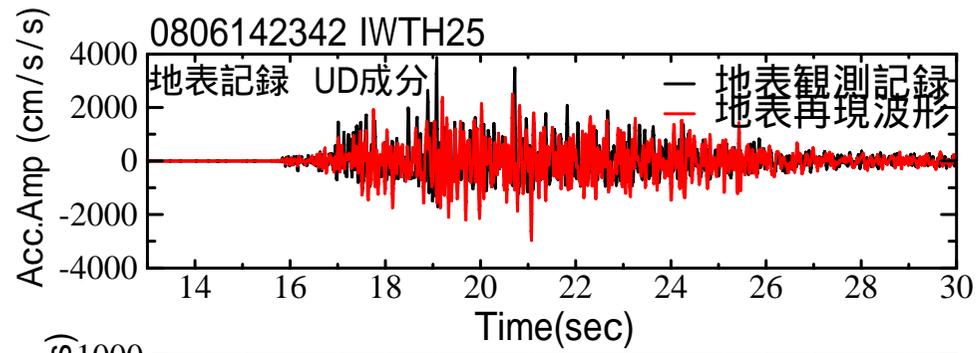
振幅を下げるために, Q値を劇的に小さくしている.

各層 $Q = 10$ 程度

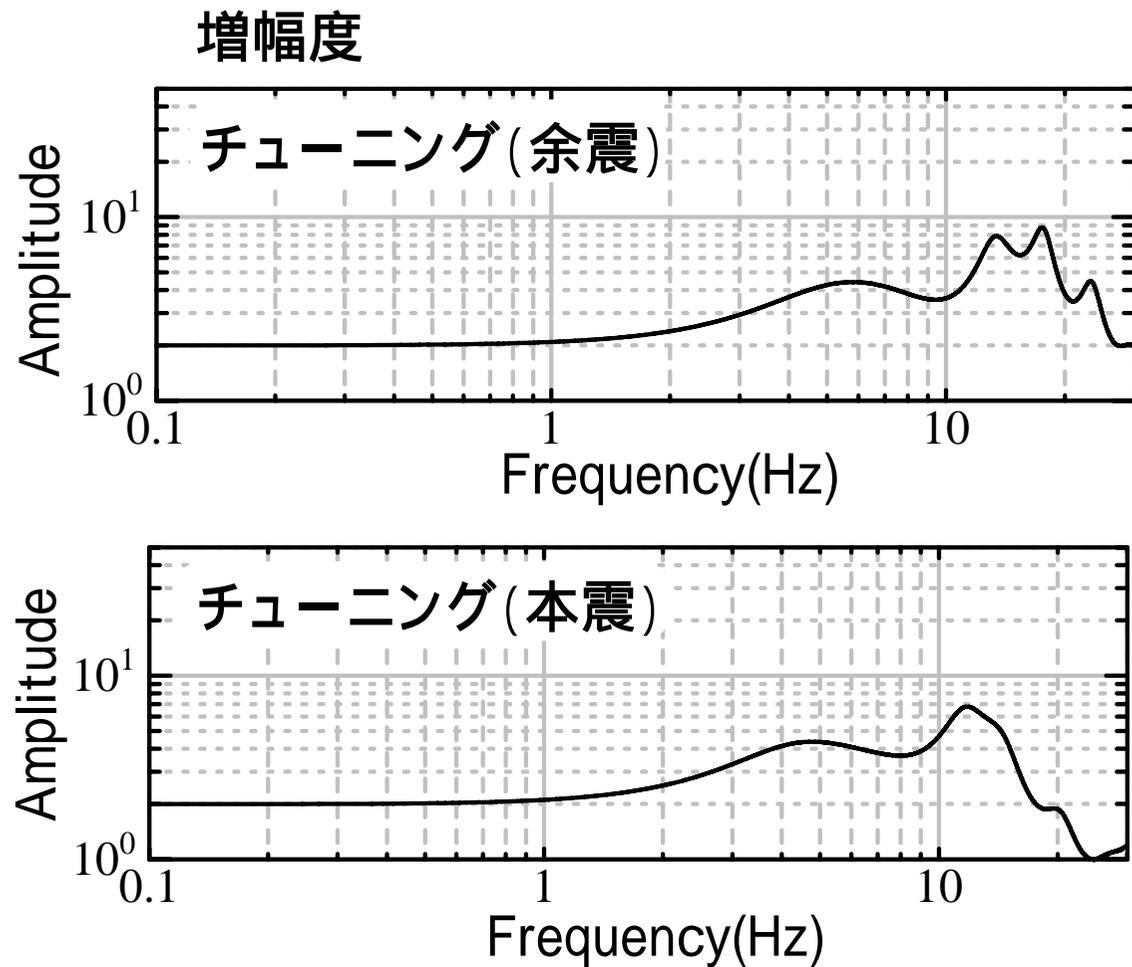


本震記録でチューニングした速度構造

密度	変更Vp	Vp	層厚	深さ	変更Qp	Qp
1.6	300	400	6	6	6.3	10.8
1.6	1570	1770	33	39	6.3	13.3
1.6	1610	2010	30	69	6.8	17
1.7	2410	2510	48	117	8.4	28
2	3710	4010	64	181	13.4	44.5
1.8	2920	3020	28	209	10.4	34.5
2.1	3480	3480	54	263	13.6	45.3
2.1	3480	3480	-	-	13.6	45.3



余震記録によりチューニングした地盤構造の増幅度と 本震記録によりチューニングした地盤構造の増幅度



まとめ - 広帯域強震動のための断層震源モデル

- 広帯域の強震動のための断層震源モデルを経験的グリーン関数法により構築した。
- 断層震源モデルは、破壊開始点の南側に大きな強震動生成域に加えて北側にもやや小さい強震動生成域をもつ。
- この震源モデルによる、震源極近傍のIWTH25（一関西）における合成波形は観測波形とよく一致する結果が得られた。ただし、経験的グリーン関数の選定にあたっては、ラディエーションパターンの吟味が必要である。
- 震源極近傍の観測点では、ラディエーションパターンの影響を大きく受けるが、本震の強震動のシミュレーションのためには、経験的グリーン関数とアスペリティからの震動のセンスを一致するように補正を行うことが有効となる。

まとめ ー関西(IWTH25)観測点での高加速度の生成原因ー

- 弱震動記録（余震）の解析により、上下震動は遅いP波速度をもつ表層（約 6m）により高周波数で大きく増幅されたことが明らかになった。
- しかしながら、弱震時の上下震動の増幅度はPS検層のP波速度では説明できず、表層はより遅いP波速度をもつ可能性が高い。
- 本震の地表と地中の観測記録のスペクトル比から、水平震動については、地盤の非線形効果により地表の地震動はほとんど増幅しなかったが、上下震動に対しては、地盤の非線形効果が相対的に小さく、大きく増幅された、と考えられる。
- 本震記録を用いてチューニングされたP波速度とQ値の一次元構造を仮定して、地中記録から推定された地表の上下震動はほぼ観測記録に対応する。
- しかしながら、このモデルでは観測に見られる上下震動の非対称性（下向きの震動が $-1g$ で飽和）は説明できず、別の原因（例えば、トランポリン効果）を考える必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、(独)防災科学技術研究所によるKIK-NETの観測記録を使用いたしました。ここに記して感謝いたします。