

## A1. 深さ方向の不均質性を考慮した動力学シミュレーション結果の整理方法について

### A1.1 規格化 Yoffe 関数のパラメータ推定方法

動力学シミュレーションで得られた断層面上のすべり速度時間関数（以下、対象関数）に対して、規格化 Yoffe 関数を用いたフィッティングを行った。規格化 Yoffe 関数は図 1 に示したように $\tau_R$ と $\tau_S$ という 2つのパラメータを設定する必要がある。そこで、グリッドサーチによって対象関数を説明するパラメータ値を探索した。なお、対象関数は立ち上がりが明瞭ではない場合があるため、破壊開始時刻から 1 秒の範囲で時間方向についても探索を行った。ここで、破壊開始時刻はすべり速度がはじめて 0 以外の値となった時間とした。各パラメータの探索範囲は以下の通りである。フィッティングの度合いは RSS（残差二乗和）で測定した。

- $\tau_R$  : 1.1~21.1 秒 (0.1 秒刻み)
  - $\tau_S$  :  $\tau_R$  の 5~50 % (5 %刻み)
  - 時間 : 破壊開始時刻から 1 秒間 (0.03295 秒刻み) ※刻みはデータの時間刻み
- ※ただし、規格化 Yoffe 関数は  $2\tau_S < \tau_R$  で定義されているため、 $\tau_S$  の探索範囲上限である 50% は 49.9 % として設定した。

グリッドサーチを試算した結果、規格化 Yoffe 関数で適切に対象関数の形状を表現できないものが見られた。1 例を図 2 に示すが、フィッティングの度合いとは別の問題としてライズタイムを適切に表現できていないことが分かる。これは、対象とする関数が複数の山からなる複雑な形状をしていることによる。そこでグリッドサーチの前処理として関数の平滑化を行った。平滑化の際には 3 点移動平均を用いたが、移動平均のサイクル数は平滑化の度合いを確認しながら試行錯誤的に 100 サイクルを採用した。

平滑化の適用有無によるグリッドサーチ結果の変化を図 3 に示すが、平滑化後の方が、ライズタイムをより適切に表現できていることが分かる。

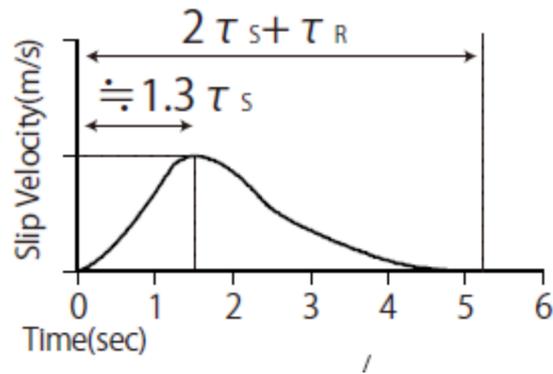


図 1 規格化 Yoffe 関数の形状 (田中・他, 2018)

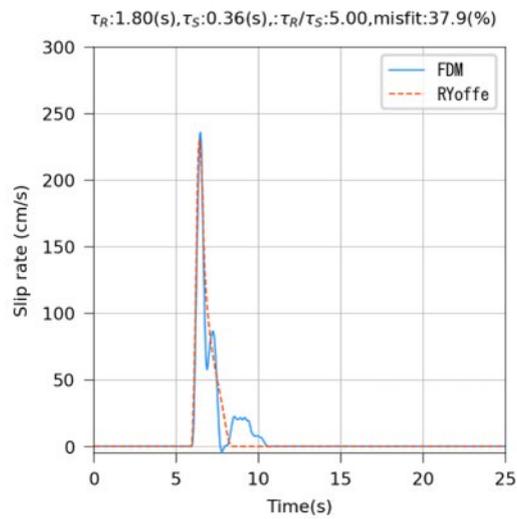


図 2 規格化 Yoffe 関数によるフィッティングがうまくいかない例 (シナリオ 1)  
 青線 : 動力学シミュレーションの結果、オレンジ線 : 規格化 Yoffe 関数

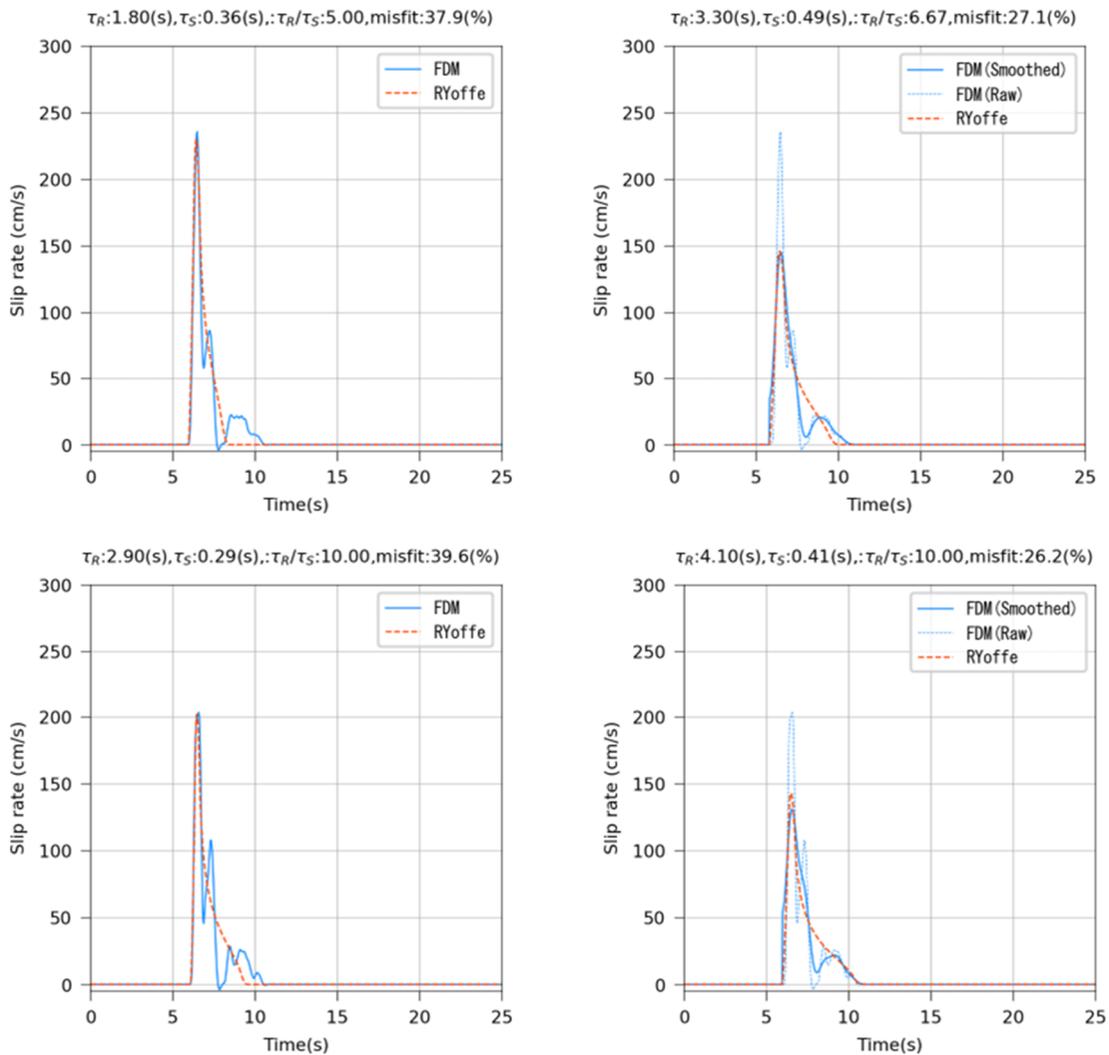


図 3 平滑化の前後での対象関数と探索された規格化 Yoffe 関数の形状の 1 例 (シナリオ 1)

上図：平滑化前 (左)、平滑化後 (右) (strike 方向：15.2 km、断層上端)

下図：平滑化前 (左)、平滑化後 (右) (strike 方向：15.8 km、断層上端)

凡例は下記の意味で付けている。

FDM もしくは FDM (RAW)：対象関数 (平滑化前)

FDM (Smoothed)：対象関数 (平滑化後)

RYoffe：規格化 Yoffe 関数

## A1.2 破壊伝播速度の推定方法

動力学シミュレーションで得られた断層面上の破壊開始時刻のデータを用いて破壊伝播速度の推定を試みた。その際、背景領域とアスペリティで分けて議論するために、面的データの各計算点がどちらに属するか領域区分した。判断できない場合にはどちらにも含まれないものとして区分した。これらのデータ処理は 0.2 km 間隔の面的データに対して実施した。シナリオ 1 に対して領域区分した後の応力降下量の面的分布を図 4 に示す。アスペリティは strike 方向に沿って Asp.1、Asp.2、Asp.3 とした。

領域区分した破壊開始時刻のデータに対して、破壊伝播速度の推定をした。推定する際には、破壊の方向が破壊開始時刻のコンターに対して法線方向であると仮定した。この場合、破壊伝播速度 $V_r$ は下式で表現されるように破壊開始時刻 $T_{rup}$ の空間に対する勾配関数 $grad$ の絶対値の逆数に相当する。

$$V_r = |grad(T_{rup})|^{-1}$$

グリッド間隔 0.2 km で推定された破壊伝播速度の面的分布を図 5 に示す。シナリオによって推定された値にばらつきがあるものの、背景領域では破壊伝播速度が極端に遅い領域が占める割合が大きい。また、スーパーシアとなる地点が背景領域とアスペリティの両者に見られる。

そこで、グリッドを間引いて 1.0 km とした場合の傾向を確認した。グリッド間隔 0.2 km の場合と 1.0 km の場合の面的分布の比較を図 6 及び図 7 に示すが、アスペリティにおいては概ね速度が極端に遅いもしくは速い領域は少なくなっているように見える（ただし、シナリオ 2 の Asp.2 では間引くことでスーパーシアの領域が拡大している）。そのため、グリッド間隔が 3 km の場合の結果について議論することとする。

図 8 から図 10 には最終すべり量、応力降下量、最大すべり速度に対する破壊伝播速度の関係を示す。ただし、破壊伝播速度は今回のシミュレーションで用いた地盤モデルの最下層の  $V_s$  に相当する 3.4 km/s までのデータを用いている。

各パラメータと応力降下量の関係調べた結果、最終すべり量と破壊伝播速度（図 8）では相関が弱いことが分かった。一部相関係数の高いもの（シナリオ 2、3 の Asp.1）もあるが、シナリオによって相関の正負がはっきりしない。次に、応力降下量と破壊伝播速度の関係（図 9）については、最終すべり量と同様に全体的な傾向としては相関が弱いことが分かった。ただし、こちらは相関係数が高い場合には正の相関を示した。最後に最大すべり速度（図 10）については、アスペリティにおいては全体的な傾向として正の相関がみられた。ただし、Asp.3 はシナリオ 2、3、5 では相関係数は低い。背景領域は相関関係が不明瞭な場合（シナリオ 3）と正の相関を示す場合（そのほかのシナリオ）があるが、相関を示す場合も相関係数は 0.4 程度の弱い正の相関であった。

相関関係が確認できた最大すべり速度と破壊伝播速度の関係についてグリッド間隔 0.2 km の場合についても回帰式を求めた。その結果を図 11 に示すが、アスペリティでは相関

係数はグリッド間隔が荒い（1.0 km）方がやや改善するものの、回帰式は概ね似たような直線となることから分かるため、回帰係数は安定的に推定されているものと考えられる。Asp.1ではシナリオ2、3で回帰式に乖離が見られるが、これらのシナリオではスーパーシアとなる領域が Asp.1 に広く分布しているため、破壊伝播速度の推定精度が悪いことが原因となっている可能性がある。

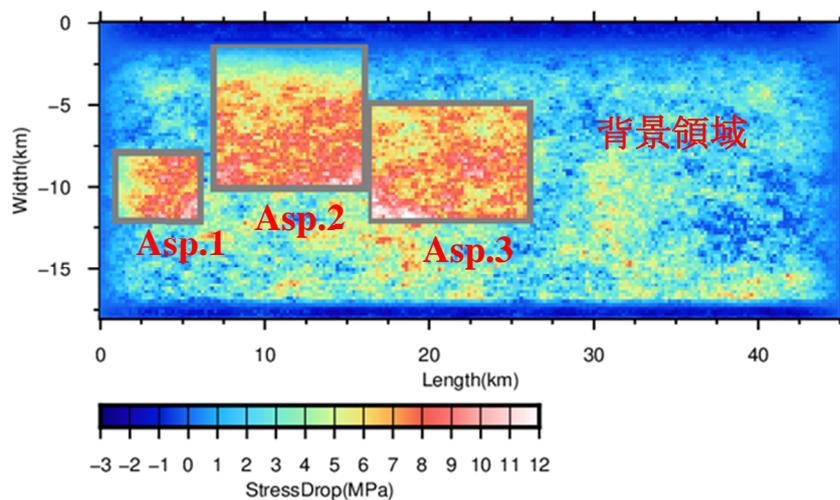


図 4 応力降下量の面的分布と領域の区分（シナリオ1）

Asp. 1 から Asp. 3 : アスペリティ 1 から 3

灰色の領域は背景領域・アスペリティどちらにも属さないものとした。

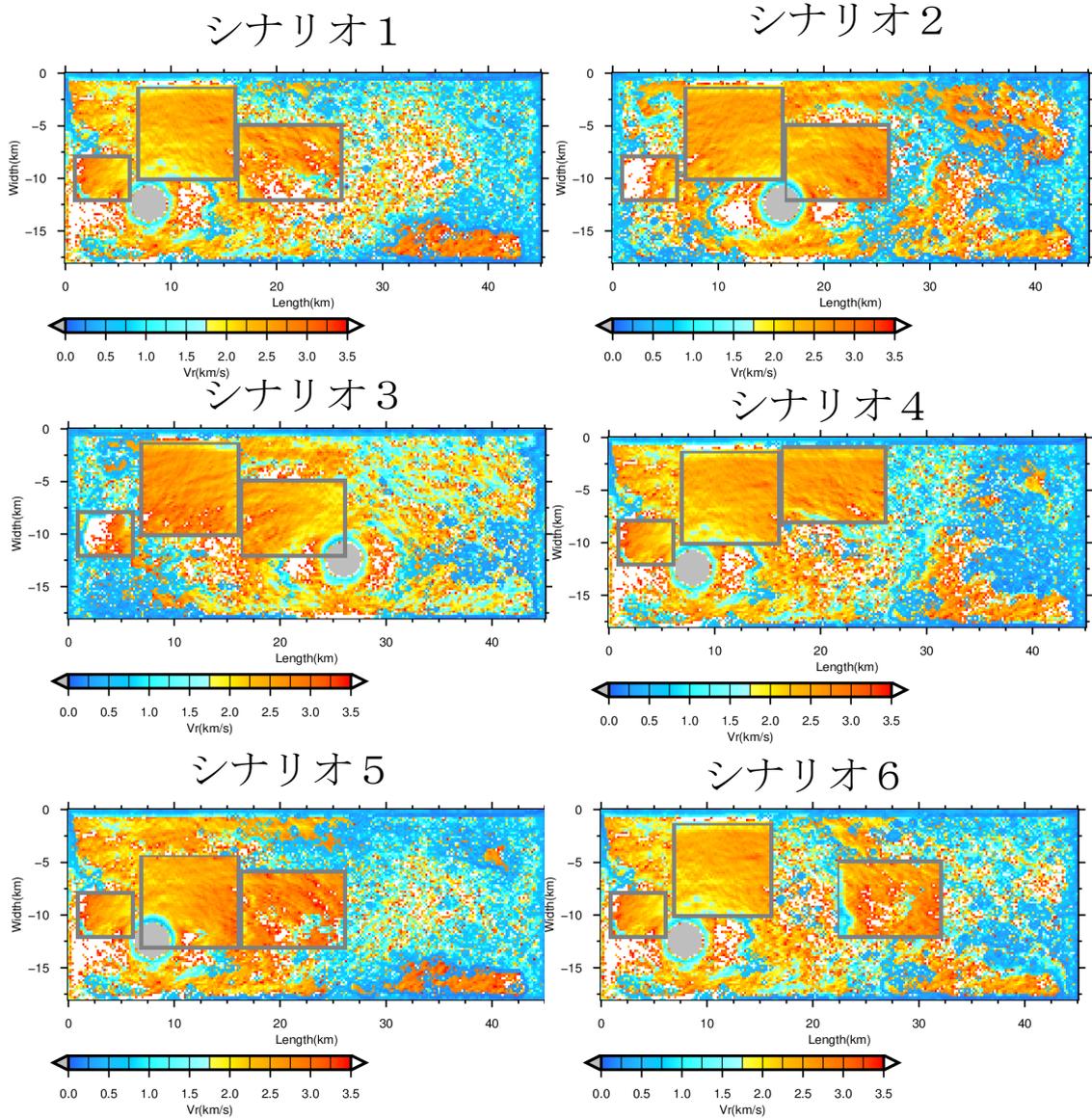


図 5 推定された破壊伝播速度の面的分布  
震源付近は同時に破壊しているため、破壊伝播速度の推定はせず灰色で表記している。

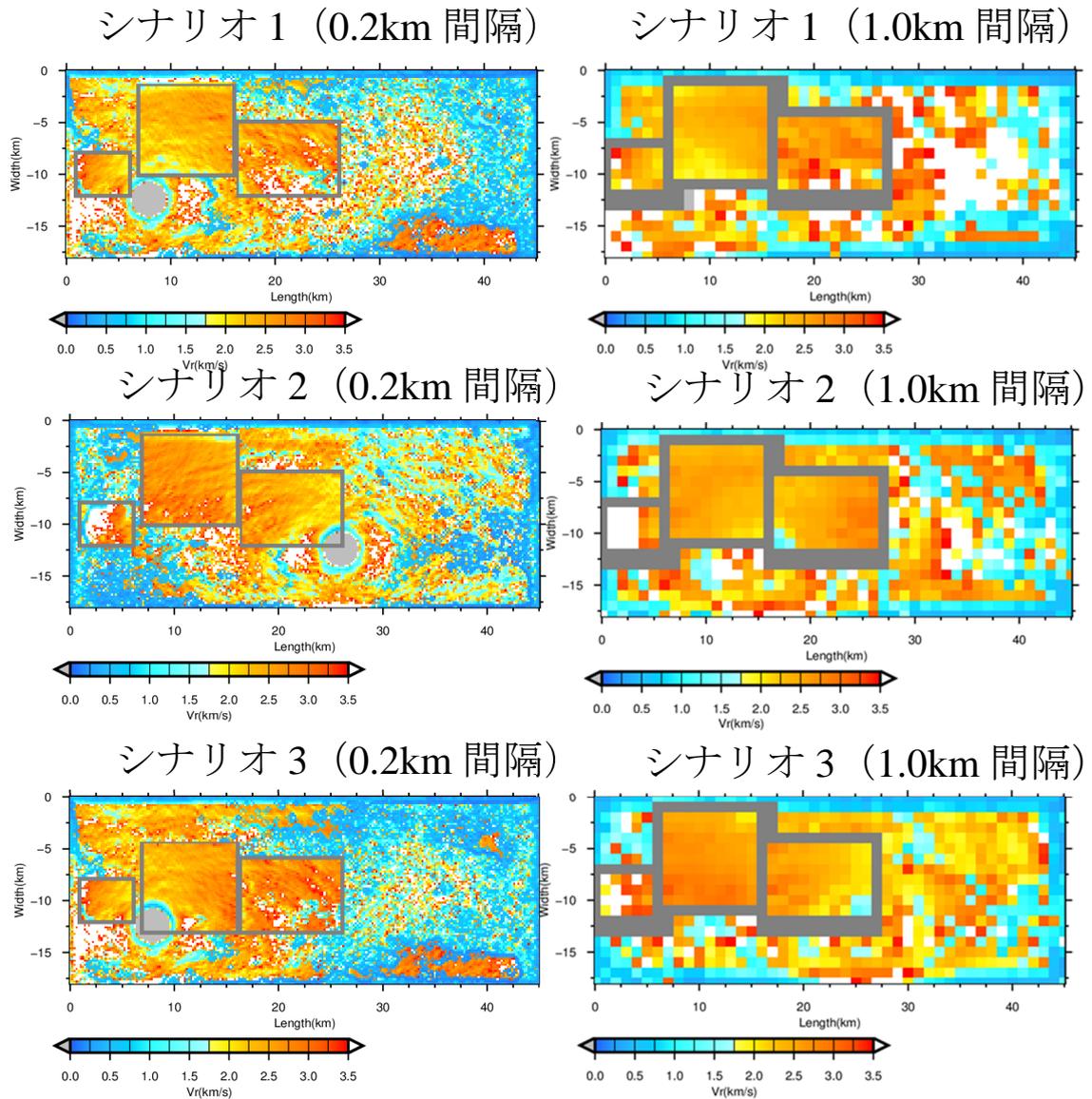


図 6 異なるグリッド間隔における破壊伝播速度の面的分布の比較  
(シナリオ 1 から 3)

震源付近は同時に破壊しているため、破壊伝播速度の推定はせず灰色で表記している。

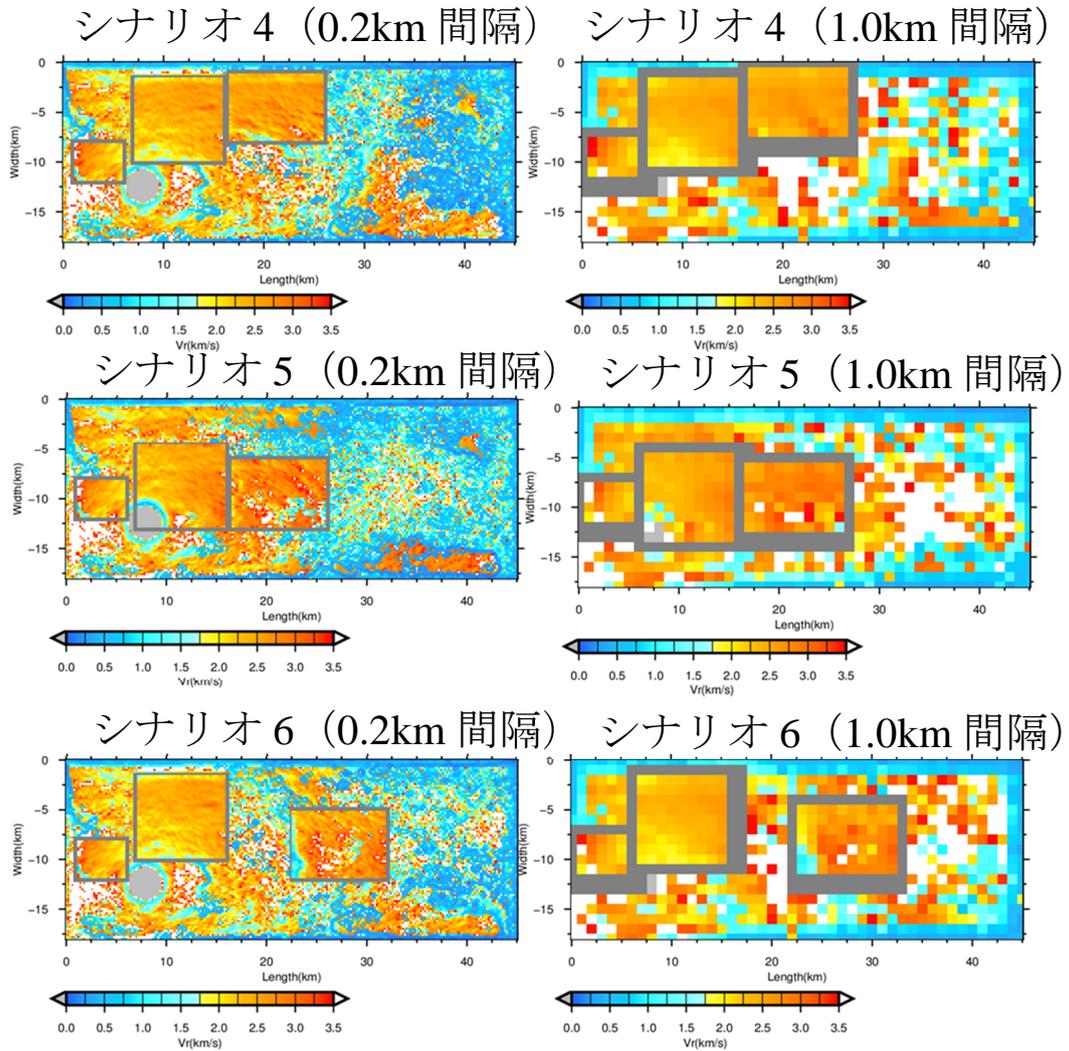


図 7 異なるグリッド間隔における破壊伝播速度の面的分布の比較  
(シナリオ 4 から 6)

震源付近は同時に破壊しているため、破壊伝播速度の推定はせず灰色で表記している。

領域名 (サンプル数、回帰係数) : 回帰式

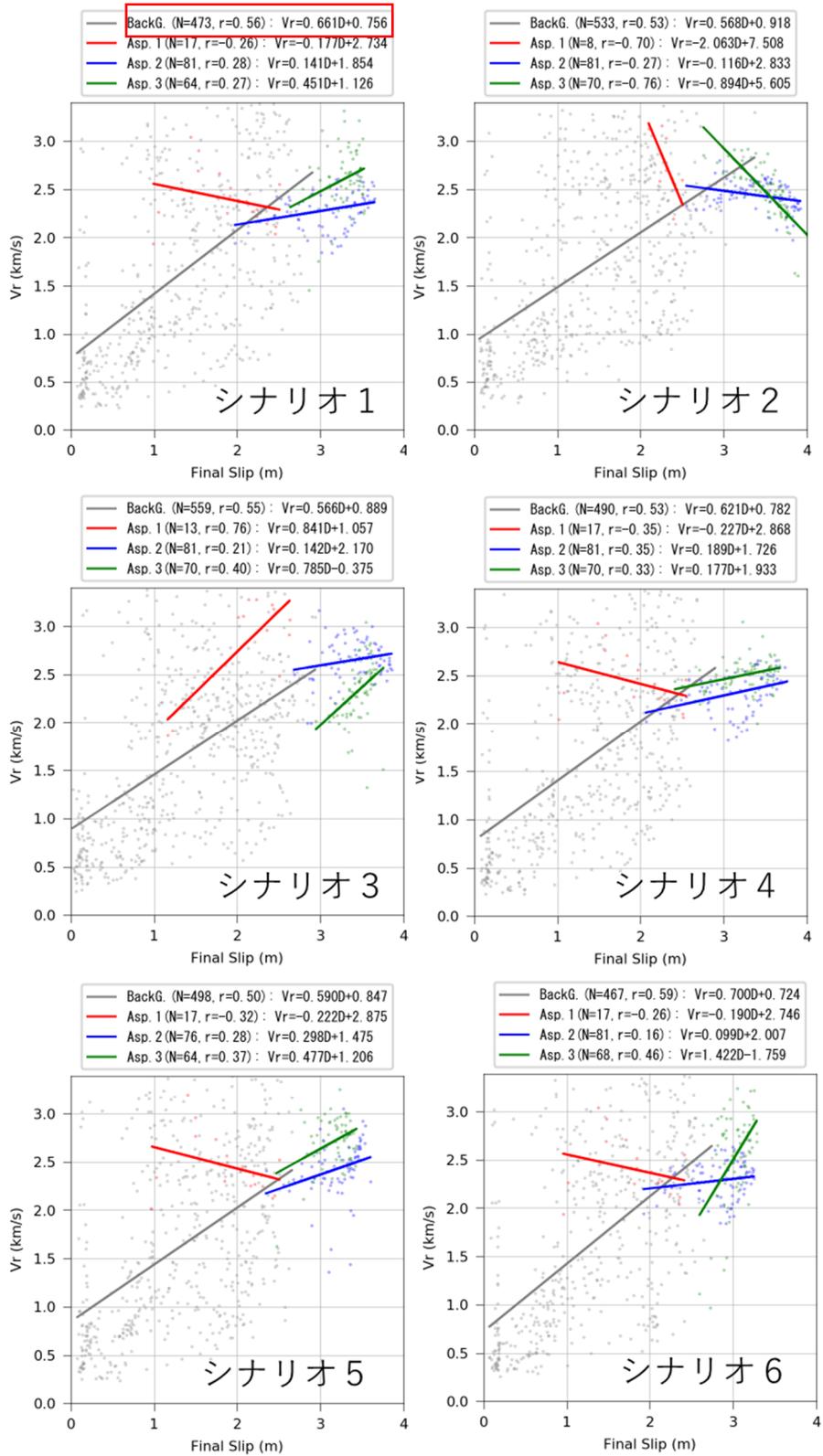


図 8 シナリオ毎の最終すべり量と破壊伝播速度の関係

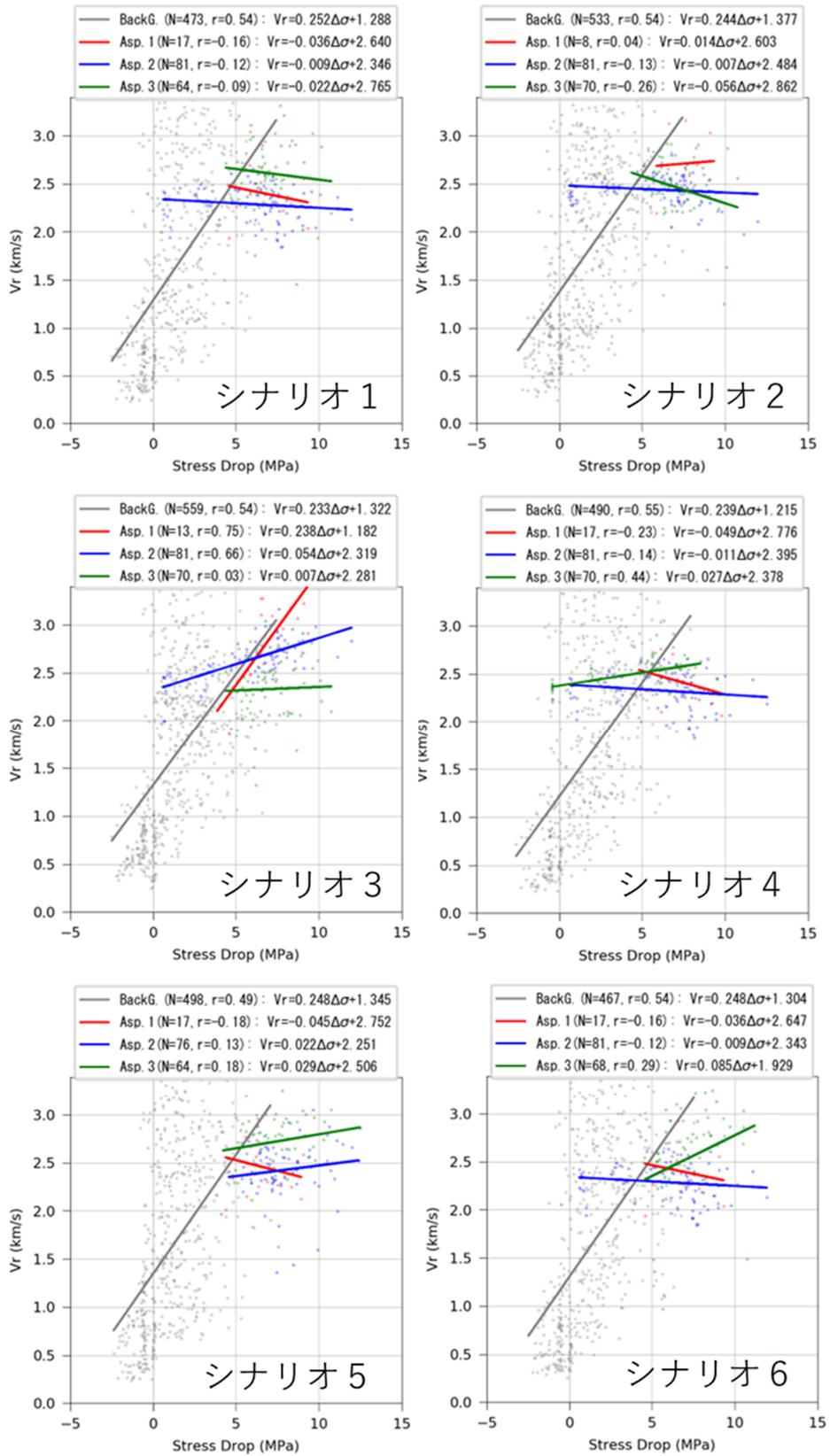


図 9 シナリオ毎の応力降下量と破壊伝播速度の関係

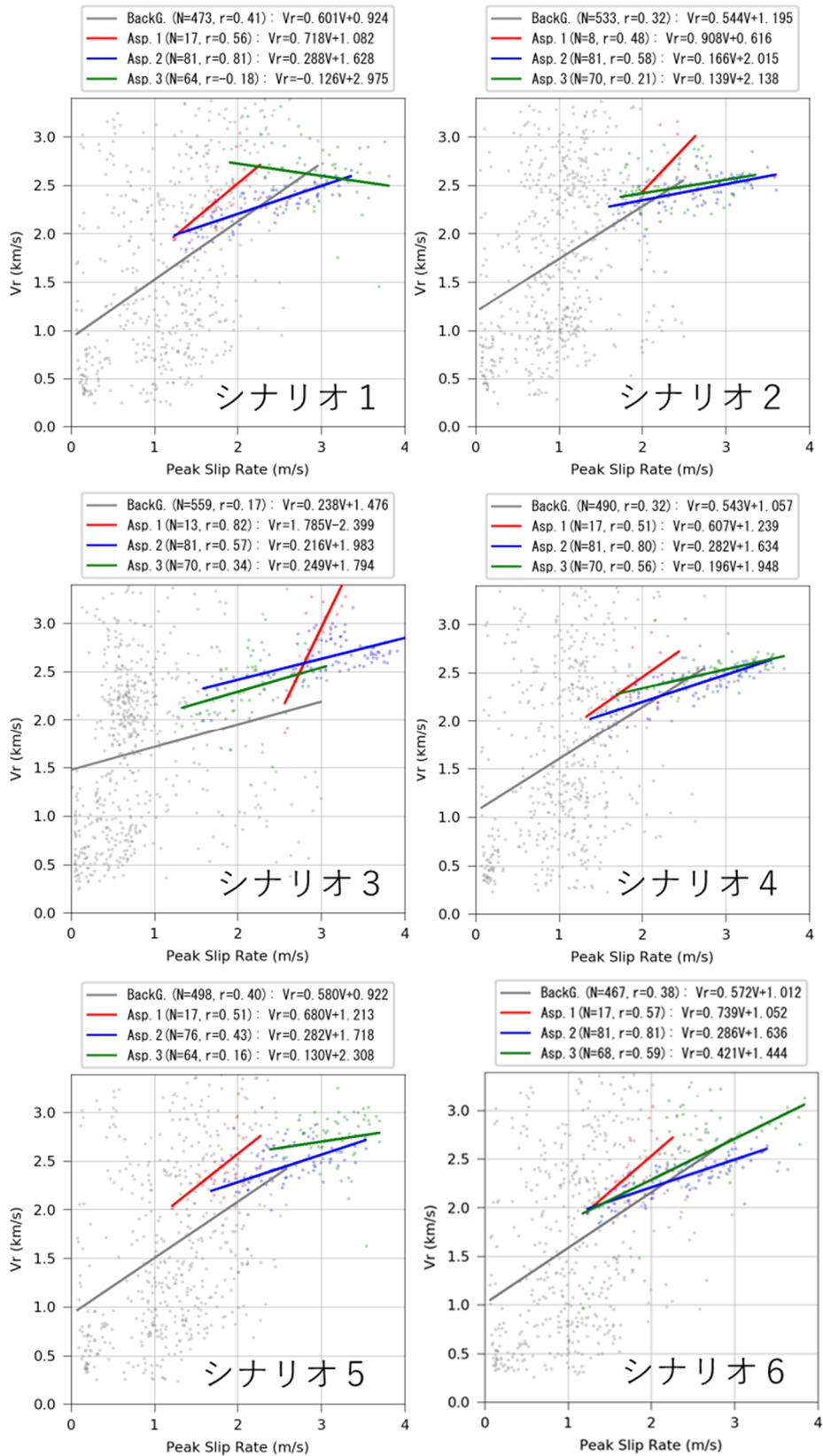


図 10 シナリオ毎の最大すべり速度と破壊伝播速度の関係

領域名\_グリッド間隔 (サンプル数、回帰係数) : 回帰式

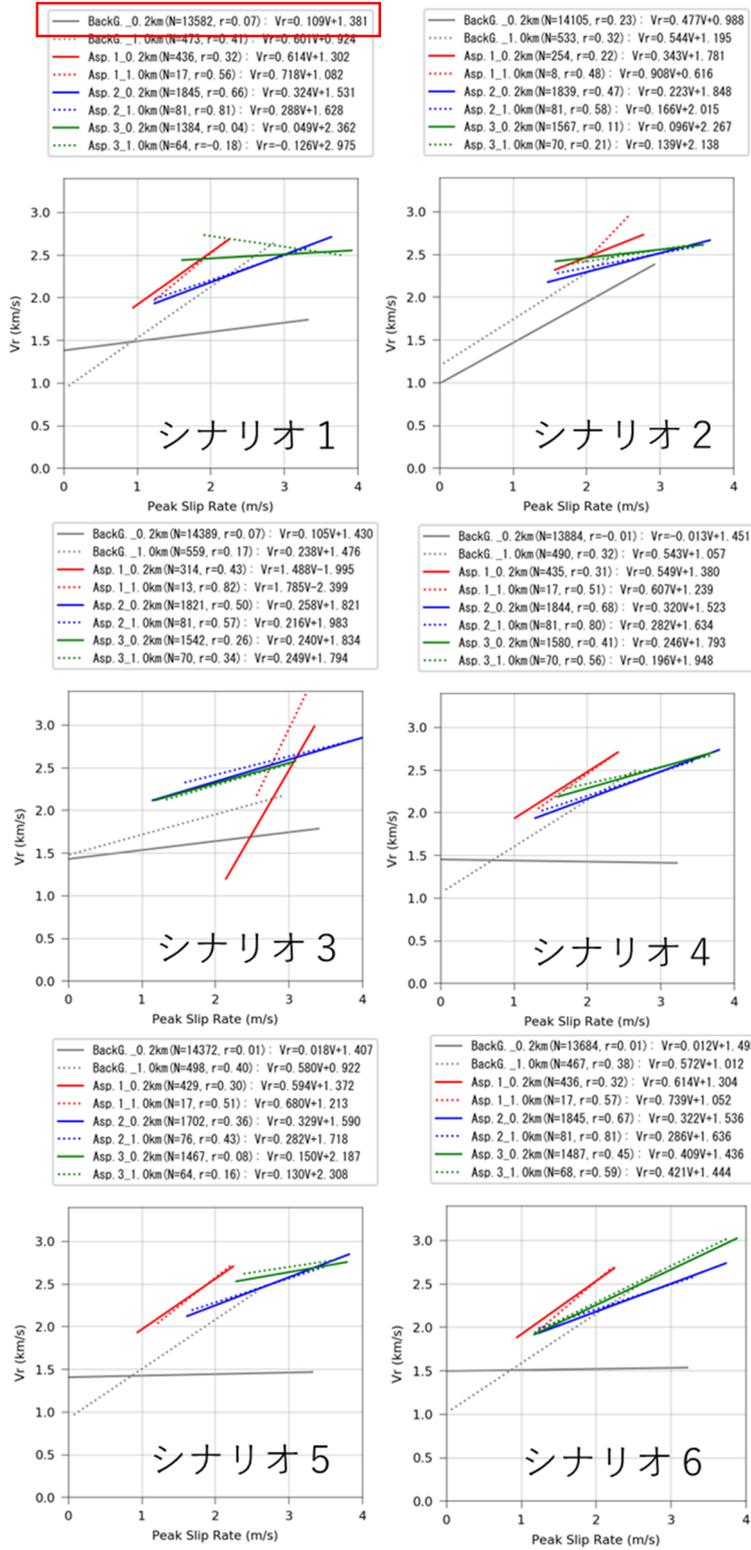
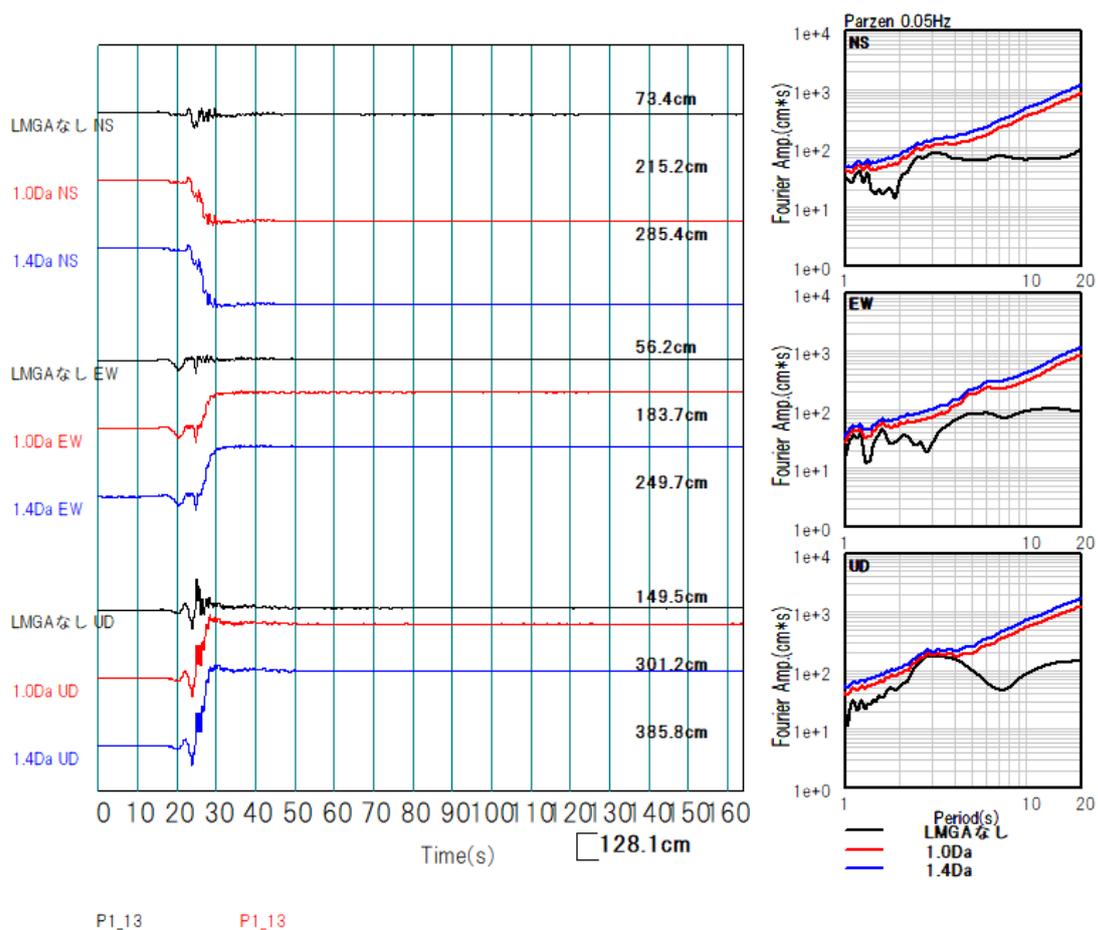
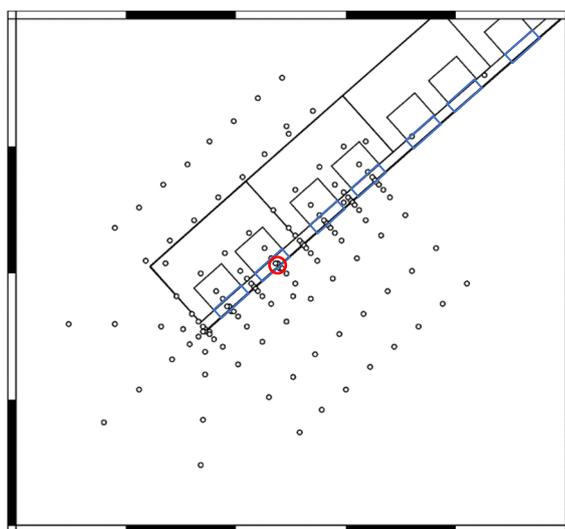


図 11 シナリオ毎の最大すべり速度と破壊伝播速度の関係  
グリッド間隔 0.2 km (実線) と 1.0 km (破線) の比較

## A2. 特性化震源モデルのパラメータの不確かさによる影響度の検討の波形比較

5章の波形計算結果のうち、主なケースの波形比較を示す。速度波形は0.05 Hzのハイパスフィルタを施している。

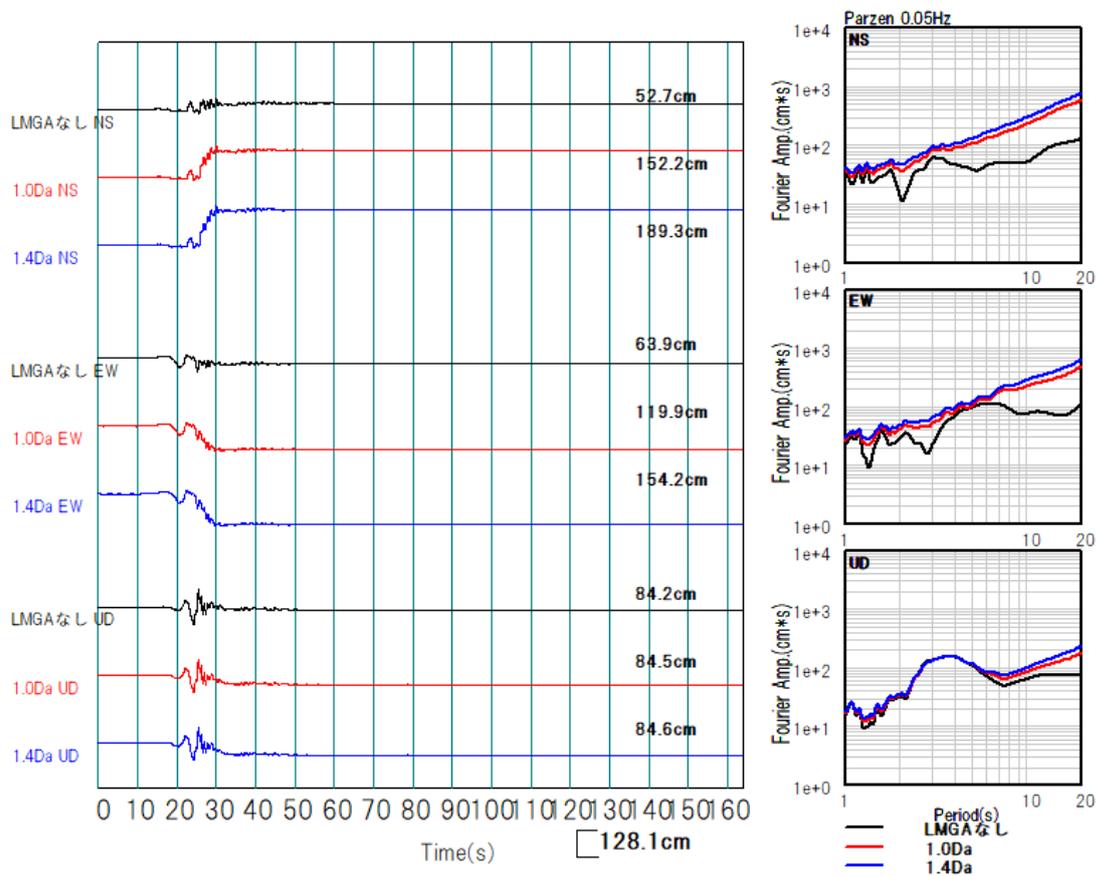
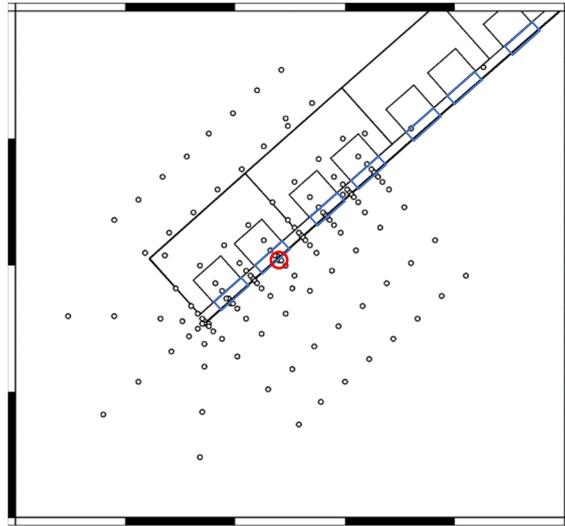
(1) LMGAの有無、LMGA すべり量の比較 (Case1\_A、Case2\_A、Case3\_A)



P1\_13

P1\_13

図 1 変位波形 地表断層 1km 上盤側 LMGA 直上



P1\_5

P1\_5

図 2 変位波形 地表断層 1km 下盤側 LMGA 直上

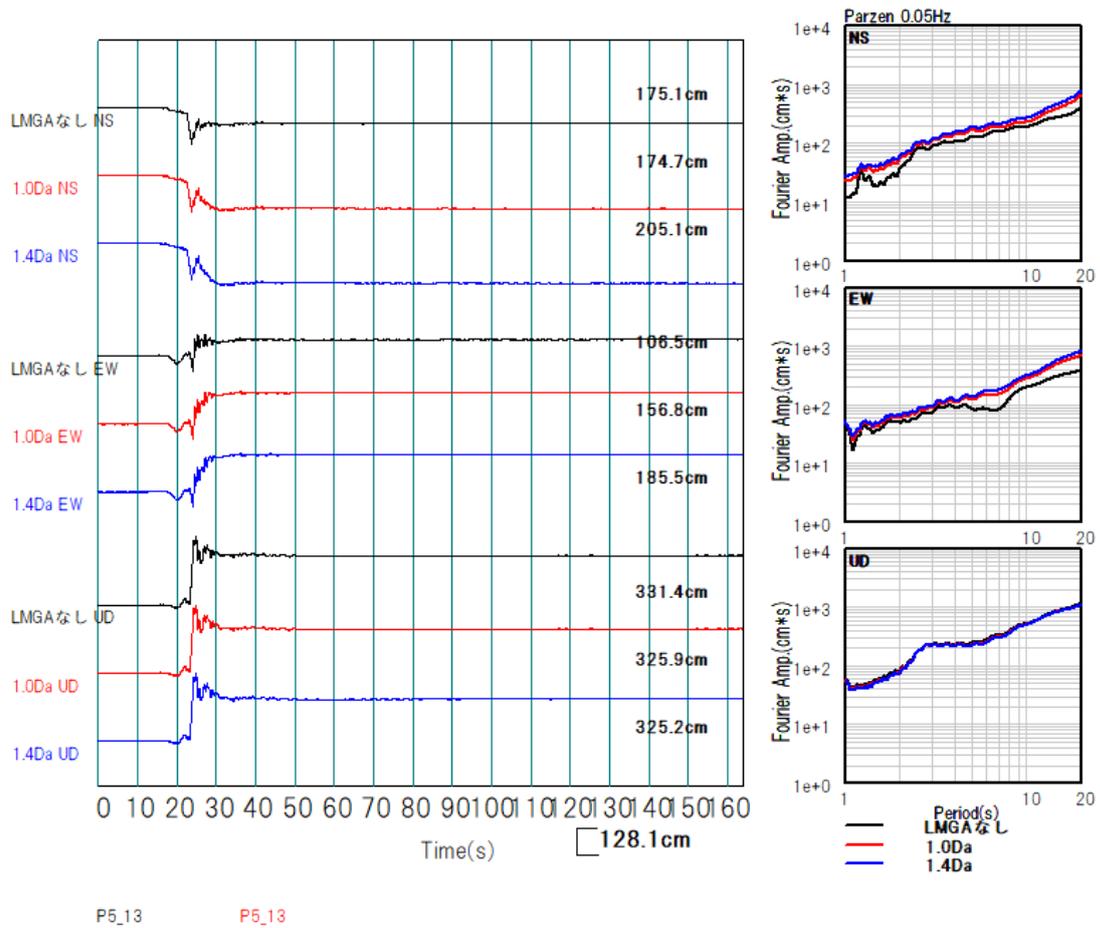
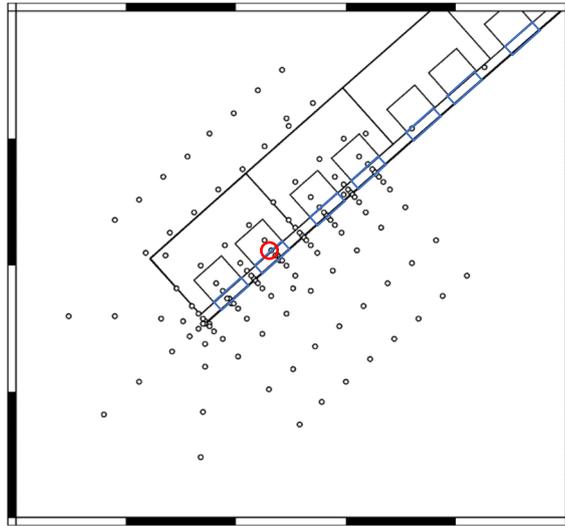


図 3 変位波形 地表断層 5km 上盤側 ASP 直上

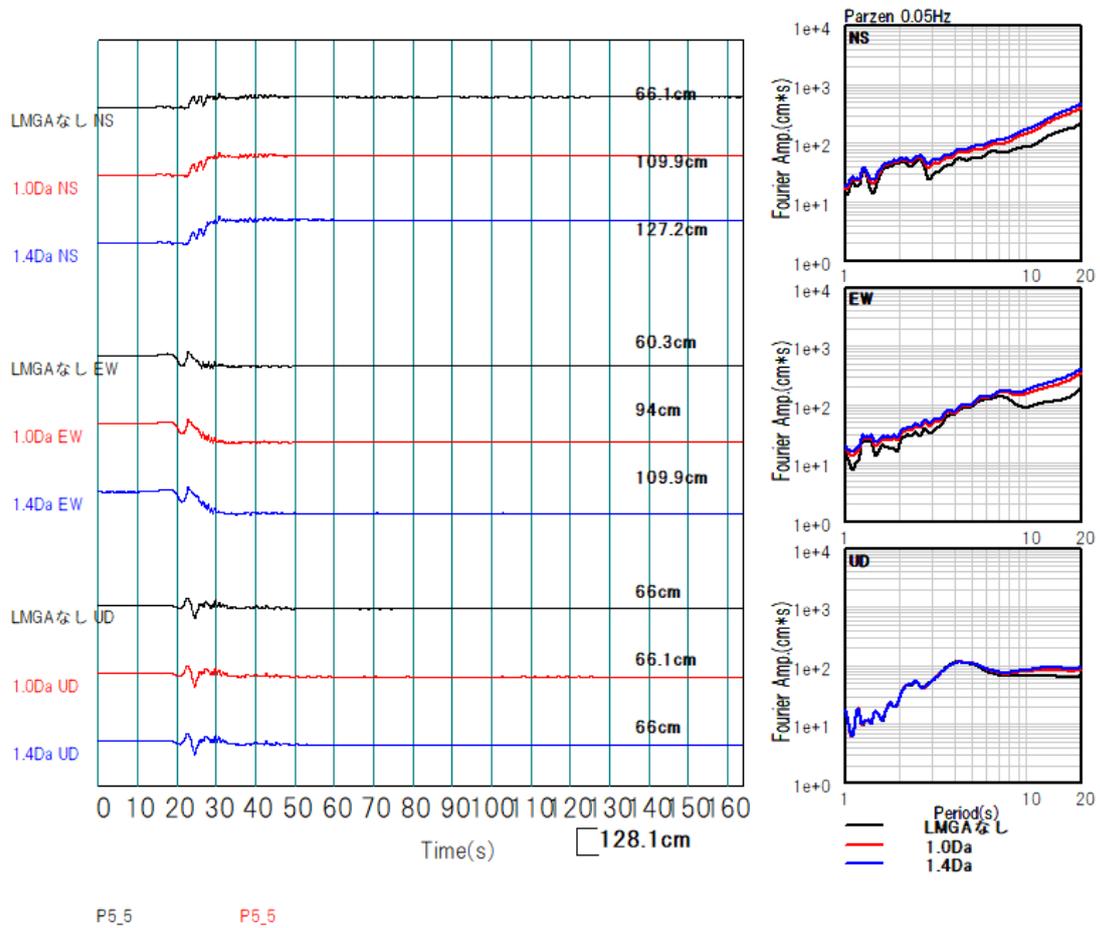
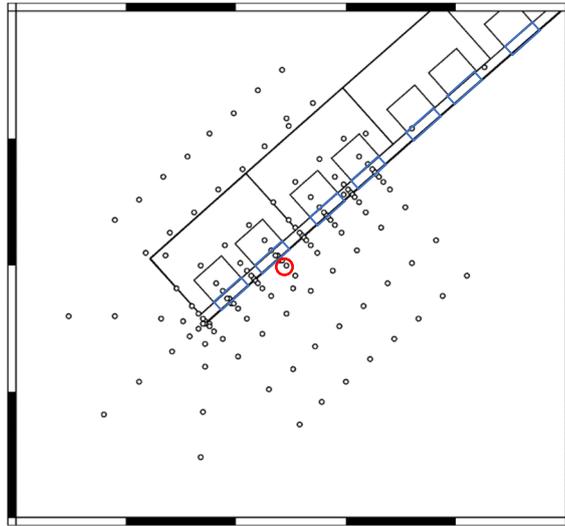


図 4 変位波形 地表断層 5km 下盤側

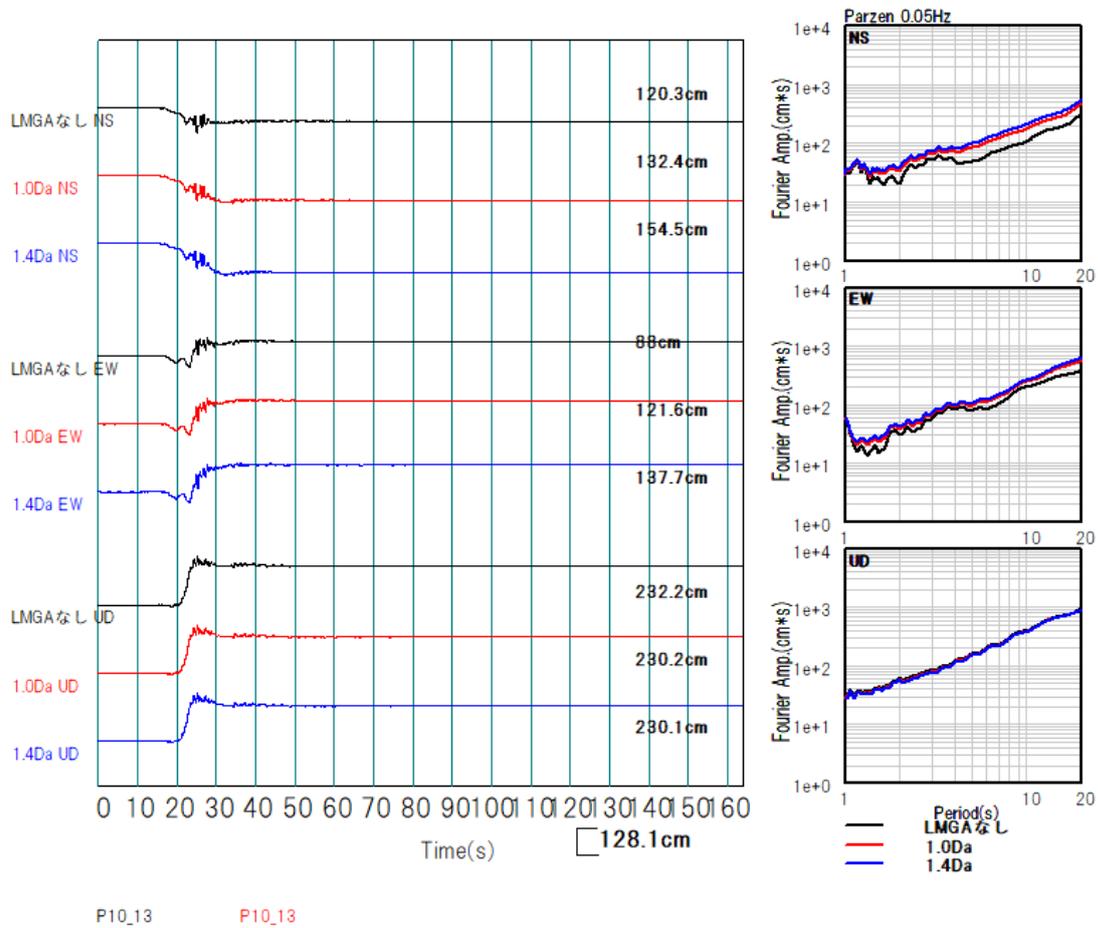
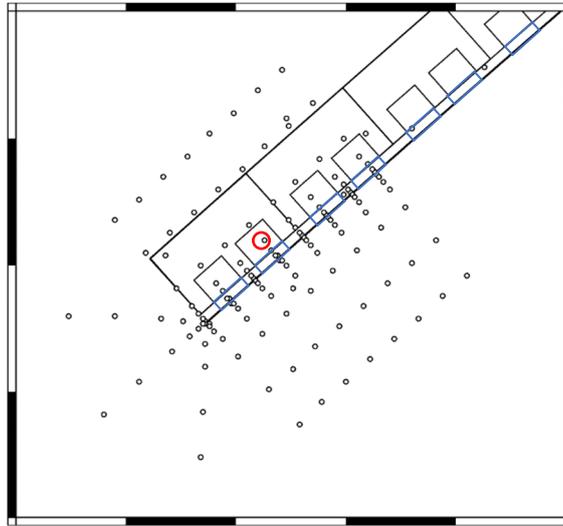


図 5 変位波形 地表断層 10km 上盤側 ASP 直上

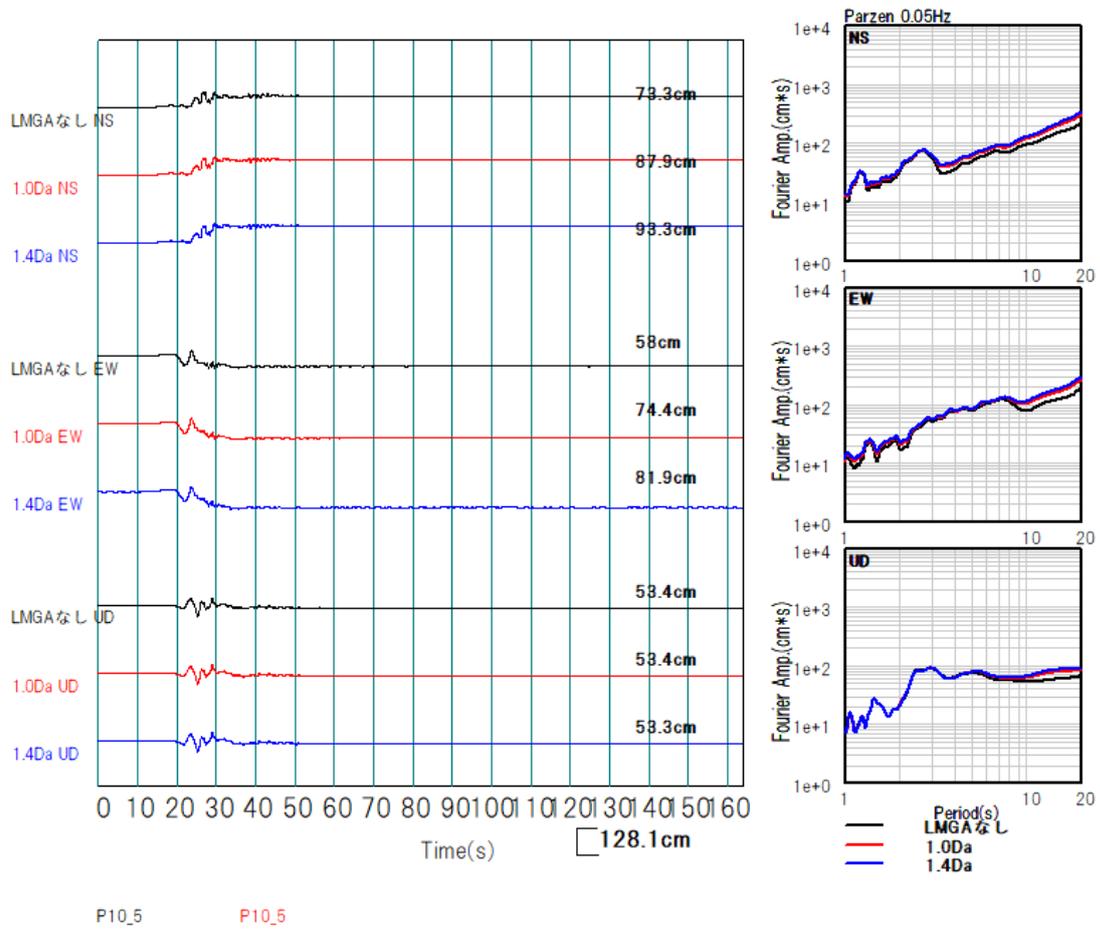
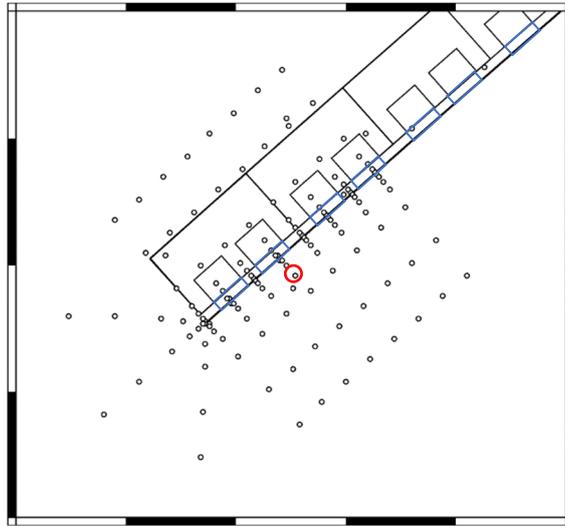
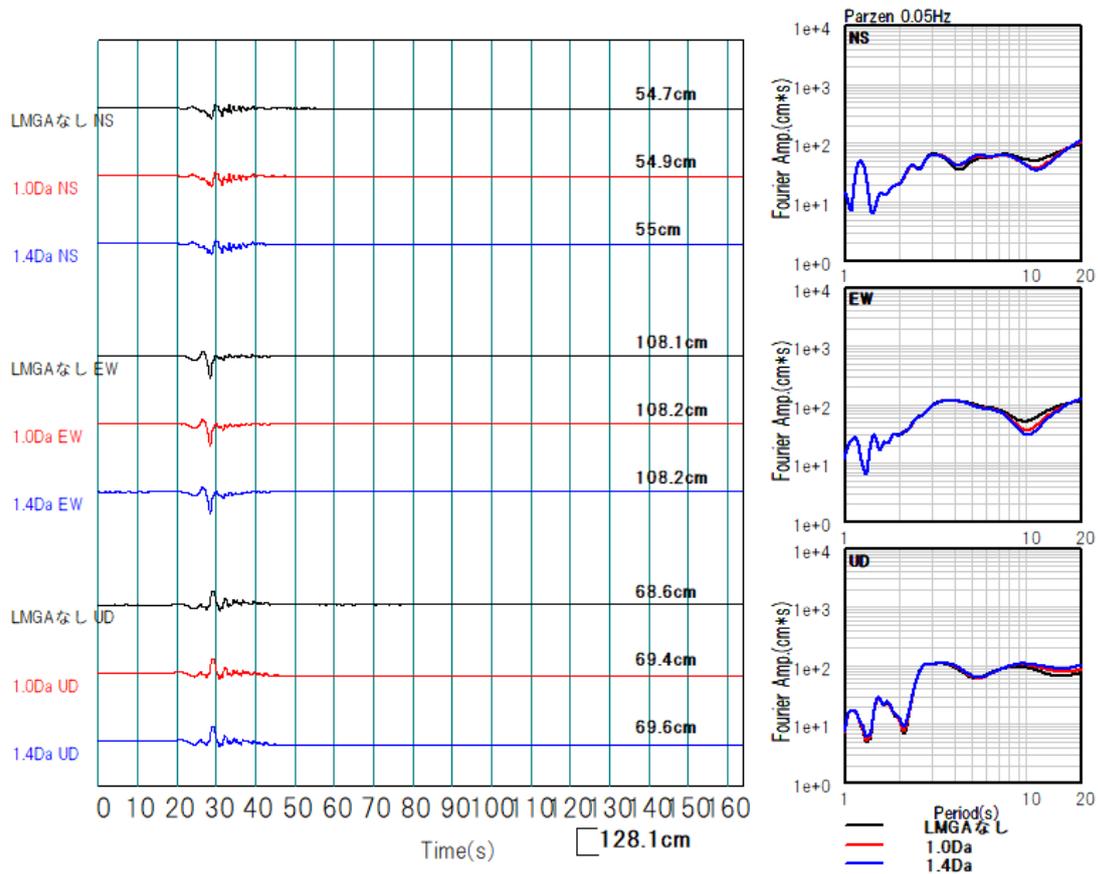
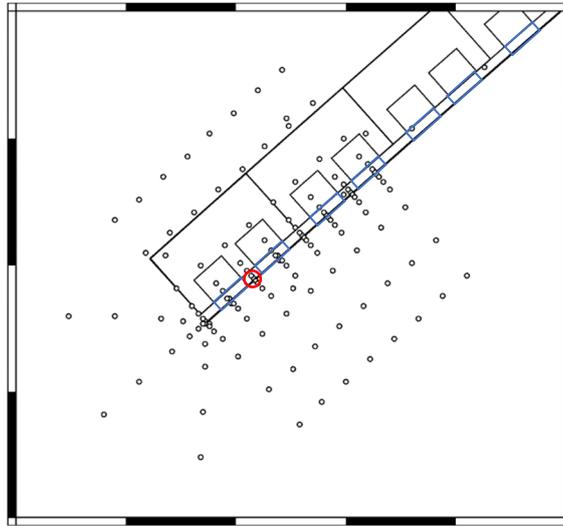


図 6 変位波形 地表断層 10km 下盤側



P1\_14      P1\_14

図 7 変位波形 地表断層 1km 上盤側 LMGA の間

(2) 破壊伝播速度、 $\alpha$  の比較 (Case0\_A、Case4\_A、Case5\_A)

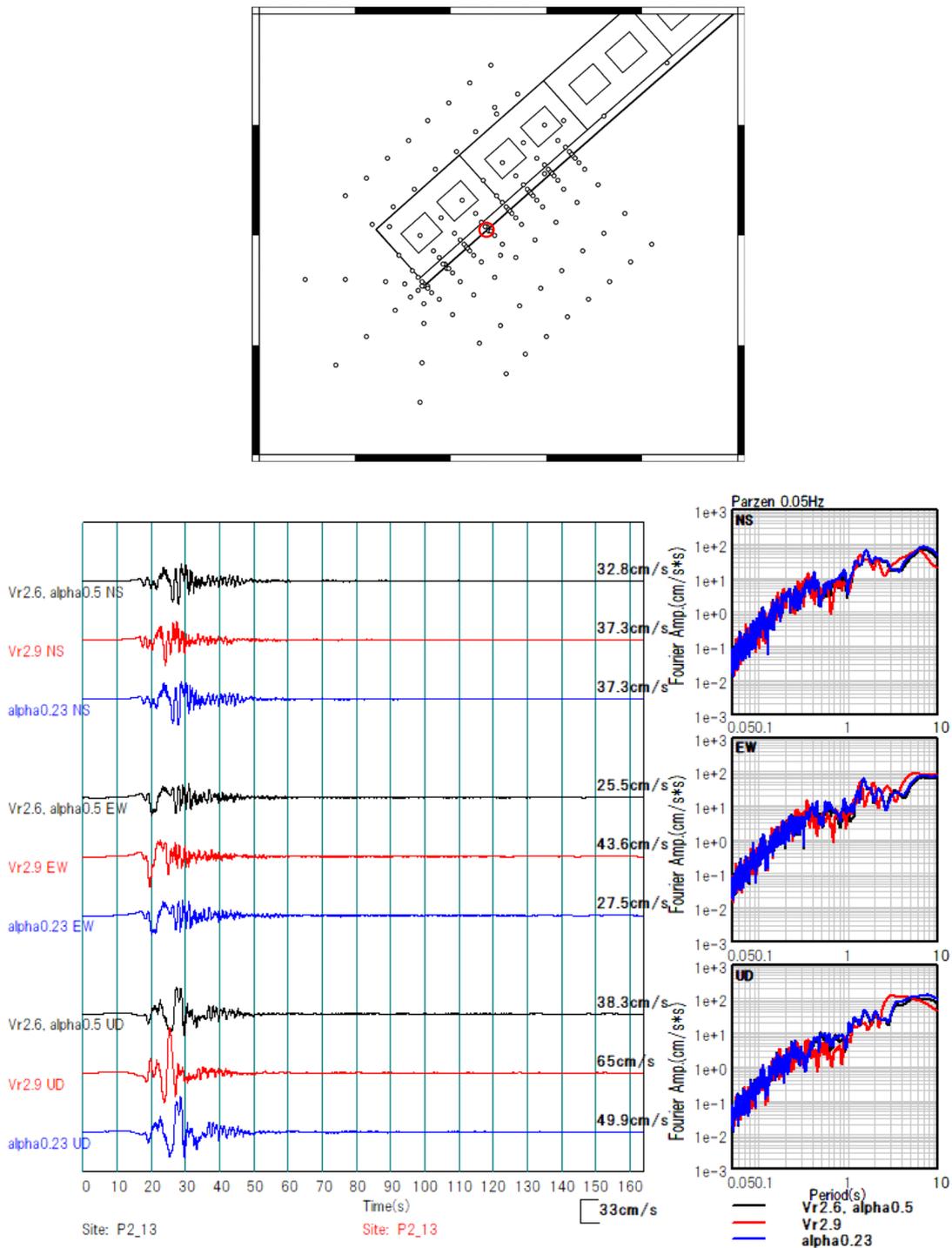


図 8 速度波形 地表断層 2km 上盤側

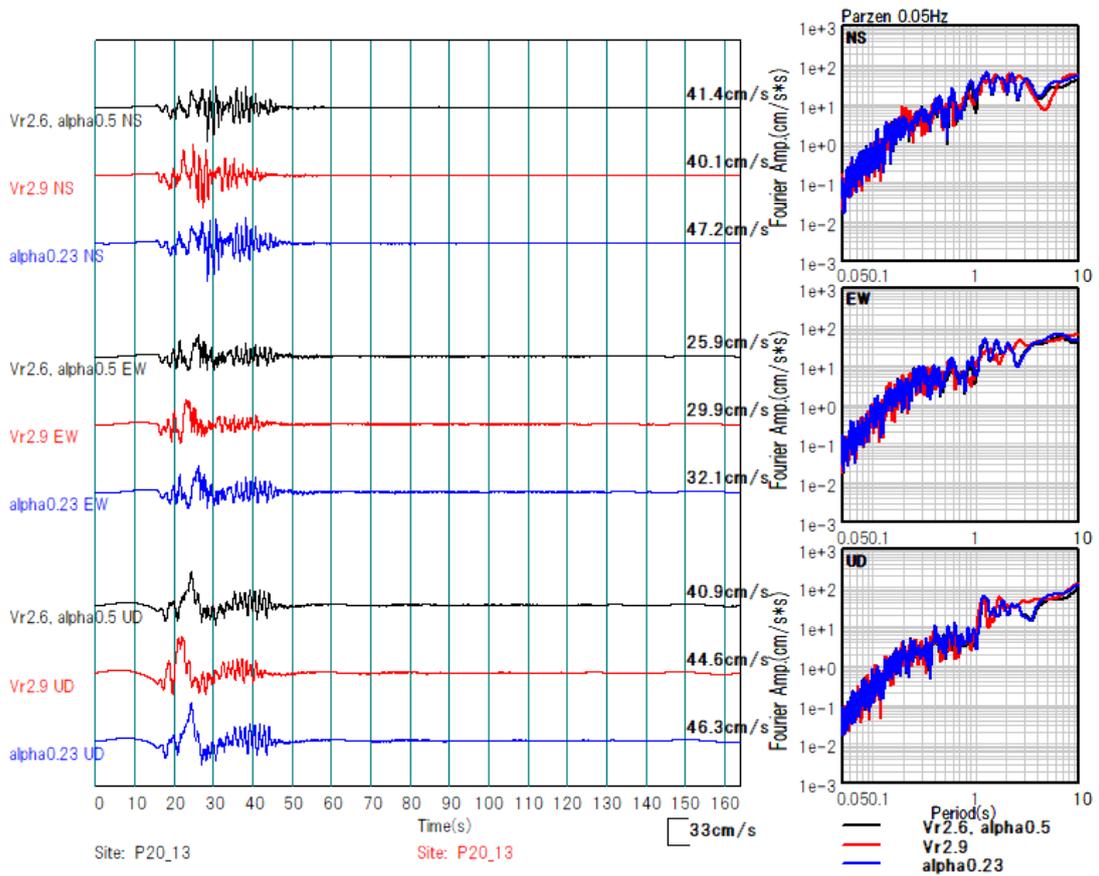
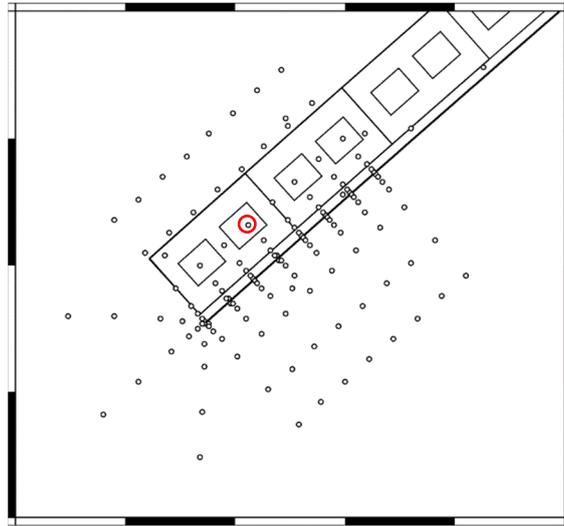


图 9 速度波形 地表断層 20km 上盤側

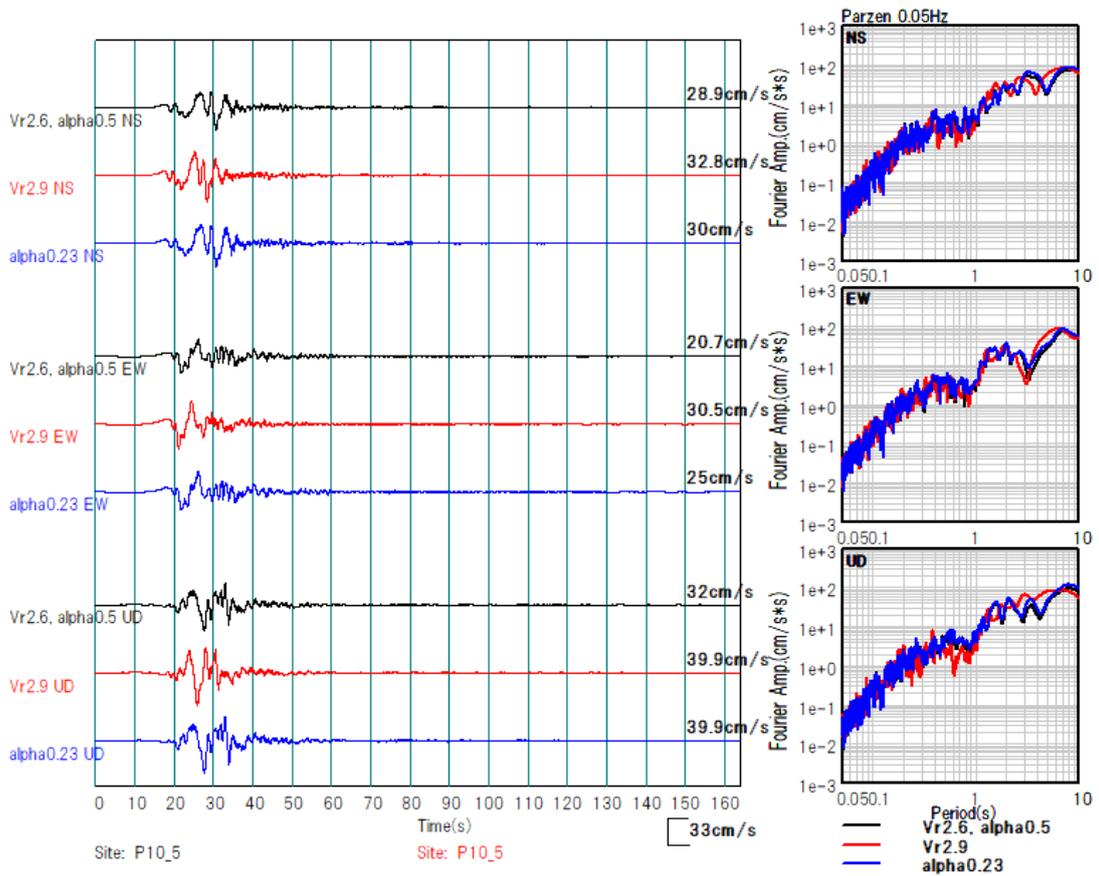
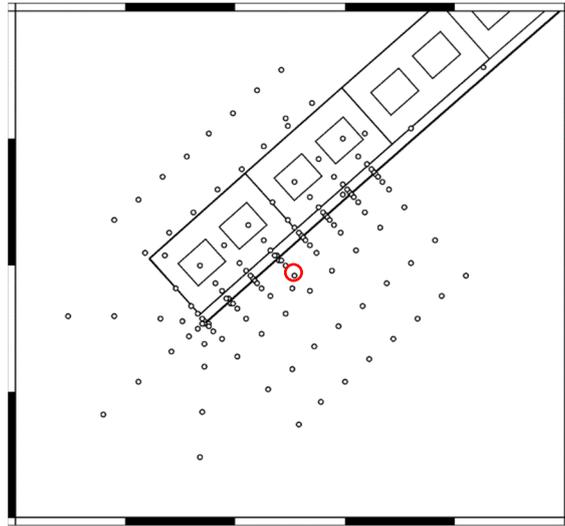


图 10 速度波形 地表断层 10km 下盤側

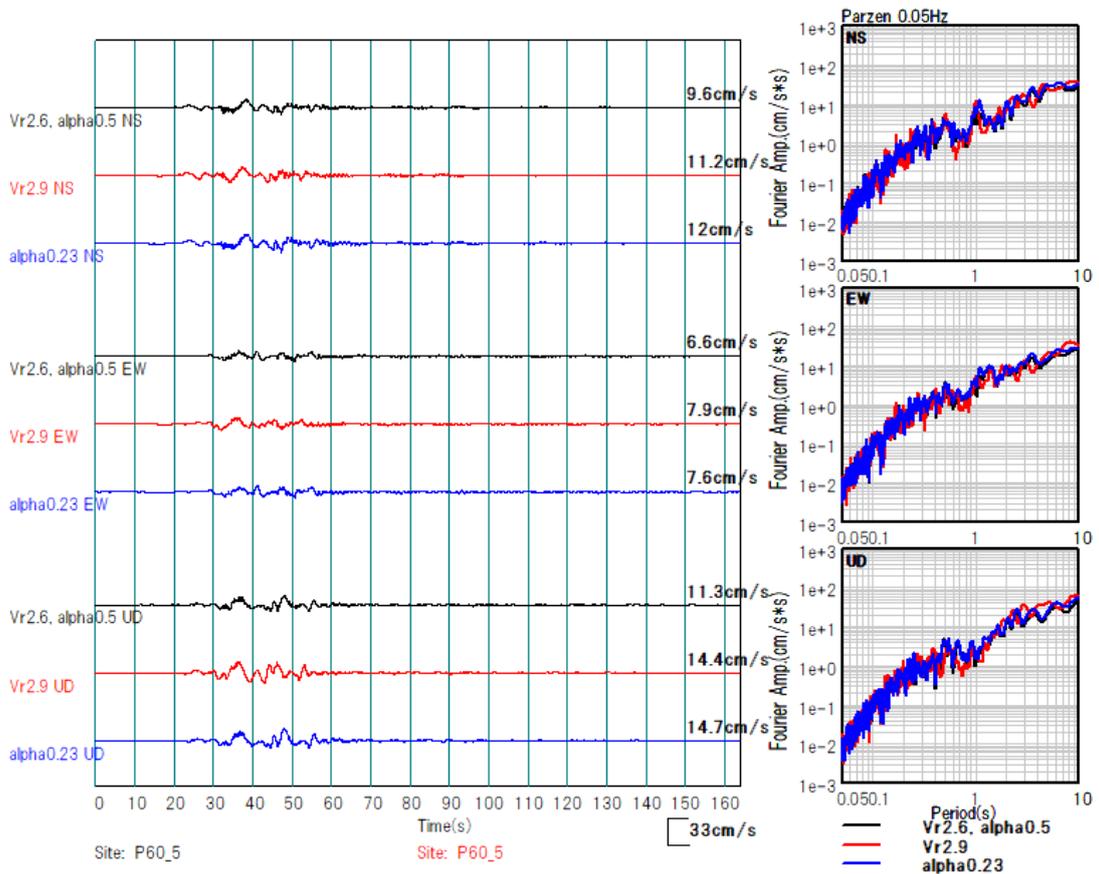
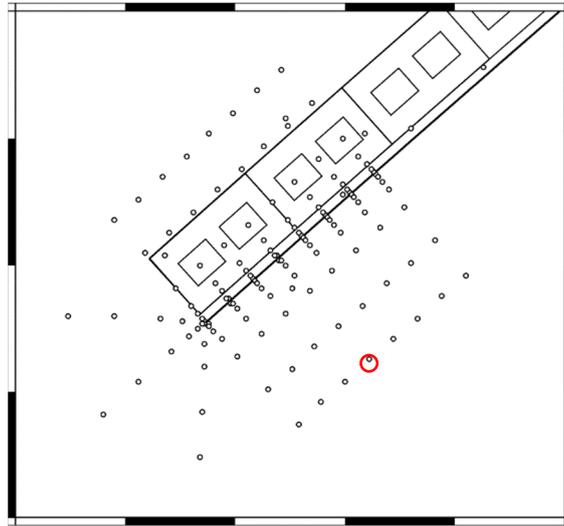


图 11 速度波形 地表断层 60km 下盤側

(3) 破壊伝播速度、 $\alpha$ の比較 (Case1\_A、Case7\_A)

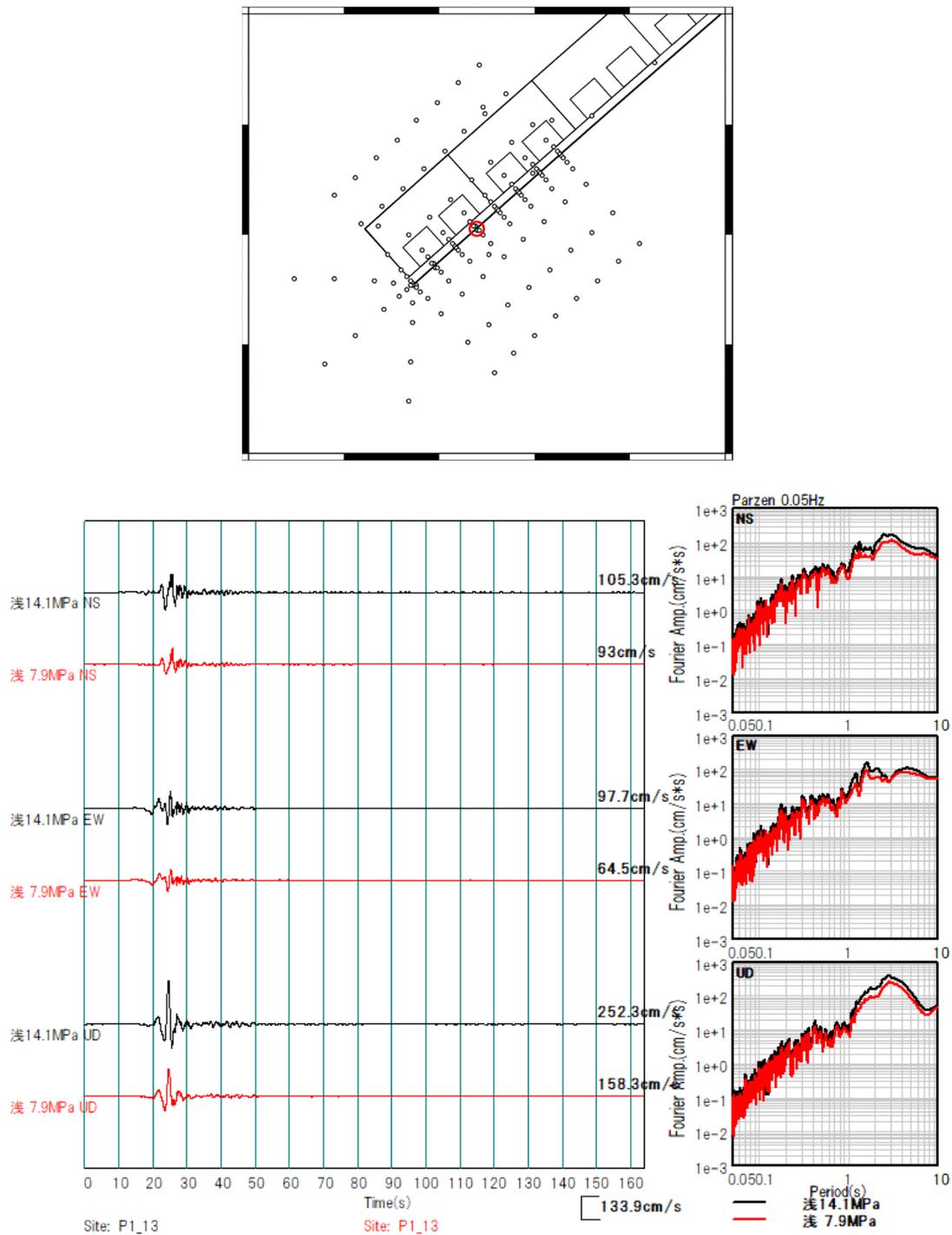


図 12 速度波形 地表断層 1km 上盤側

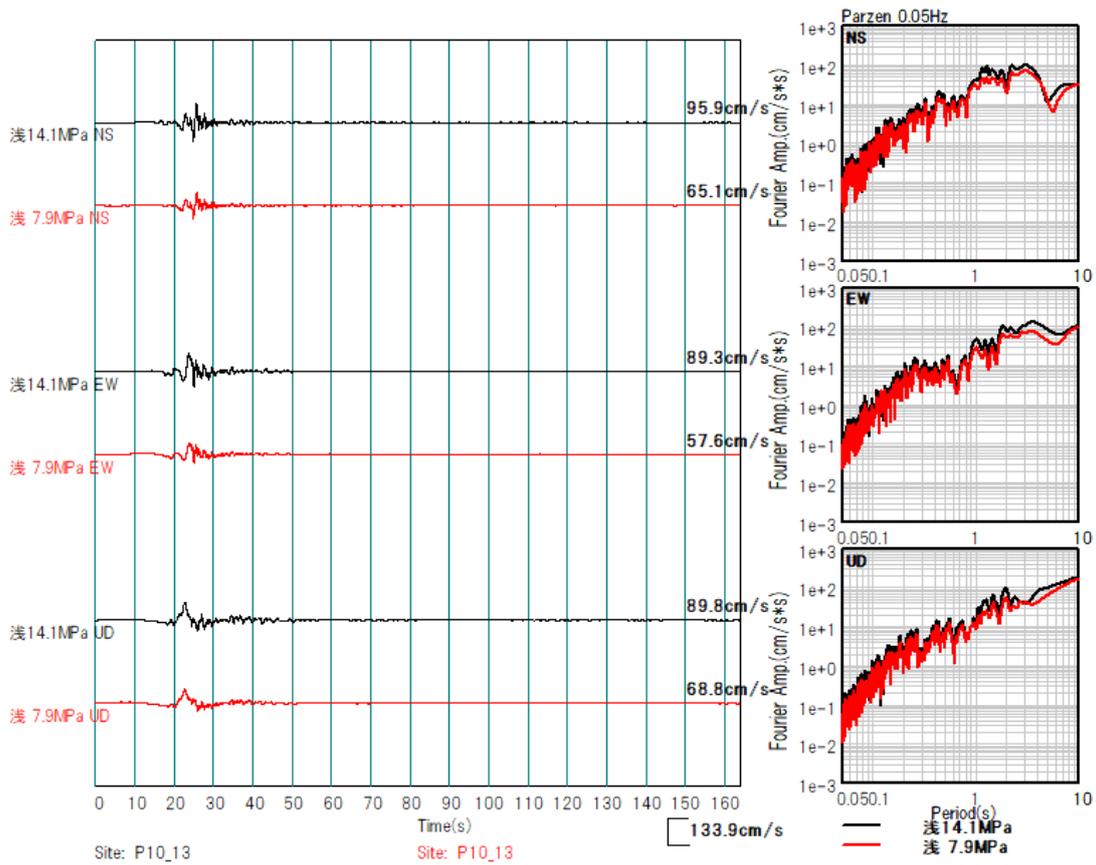
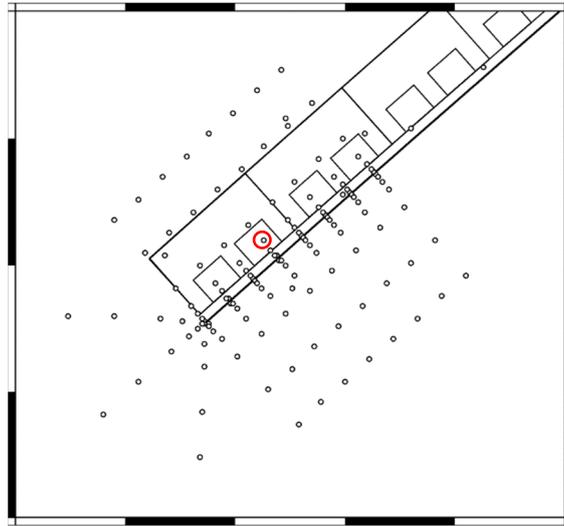


图 13 速度波形 地表断层 10km 上盘侧

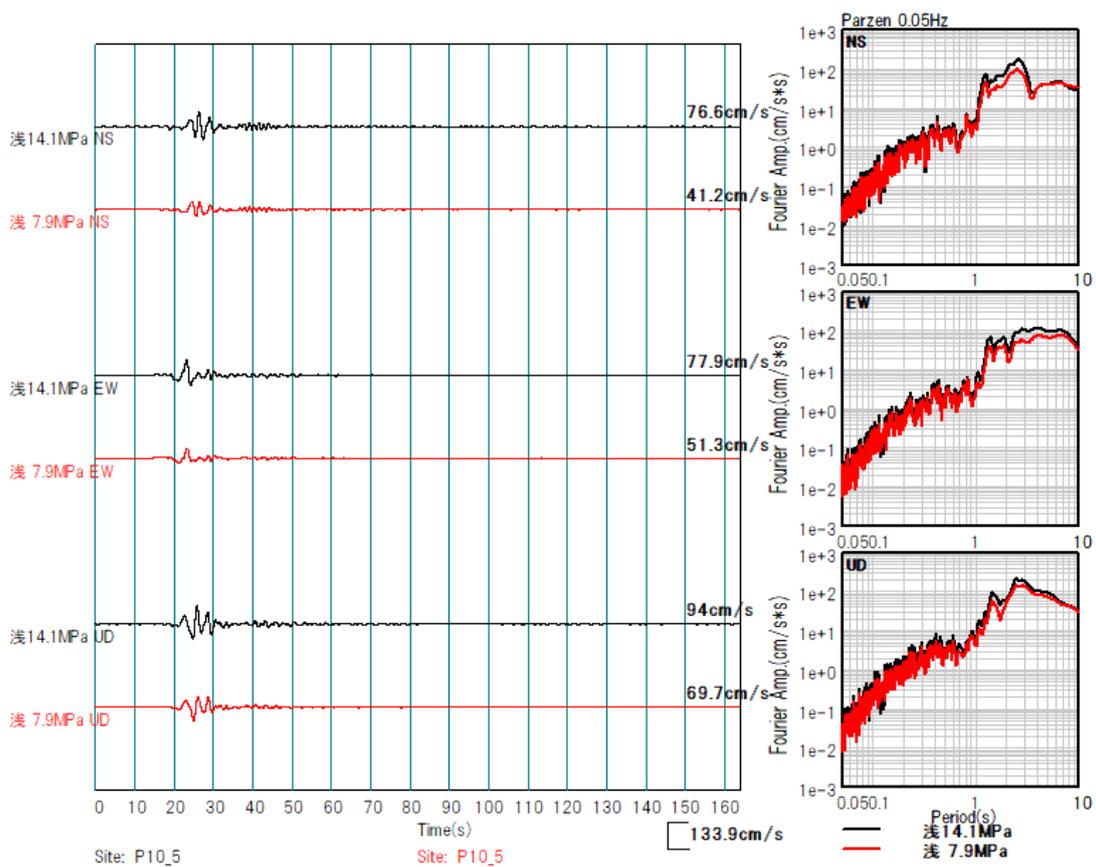
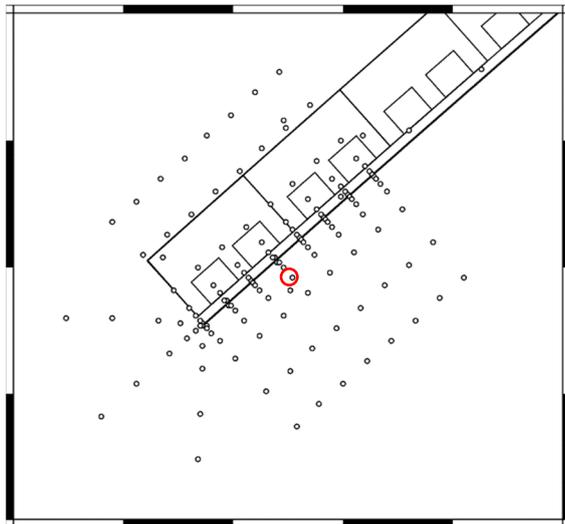


图 14 速度波形 地表断层 10km 下盤側

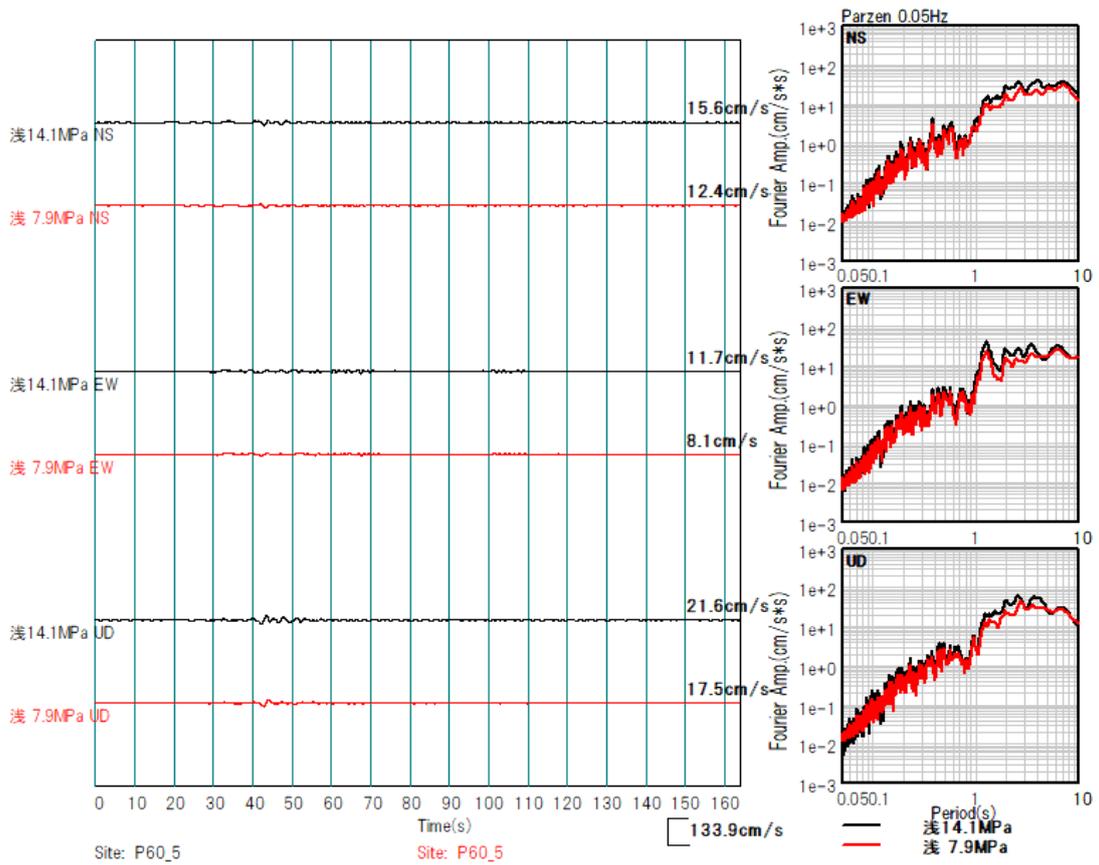
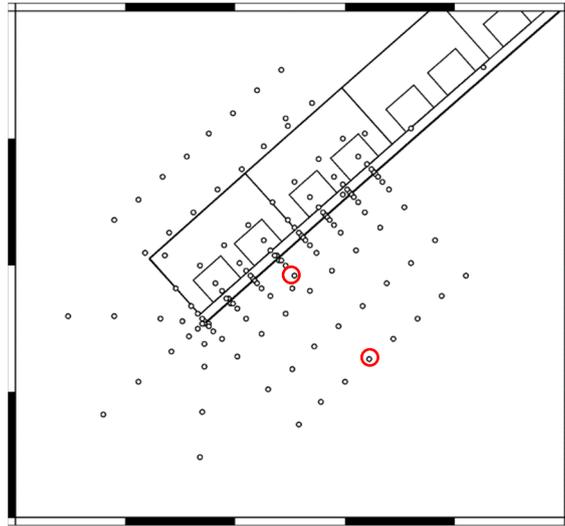


图 15 速度波形 地表断層 60km 下盤側

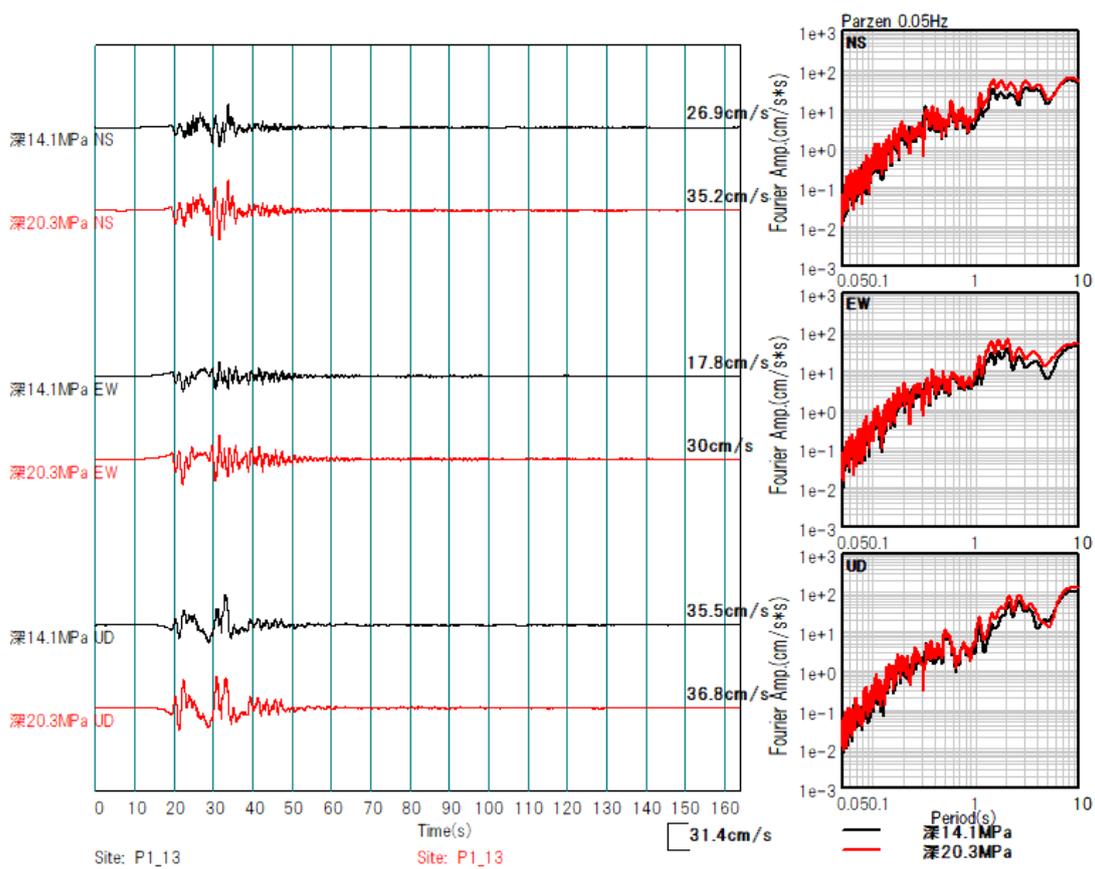
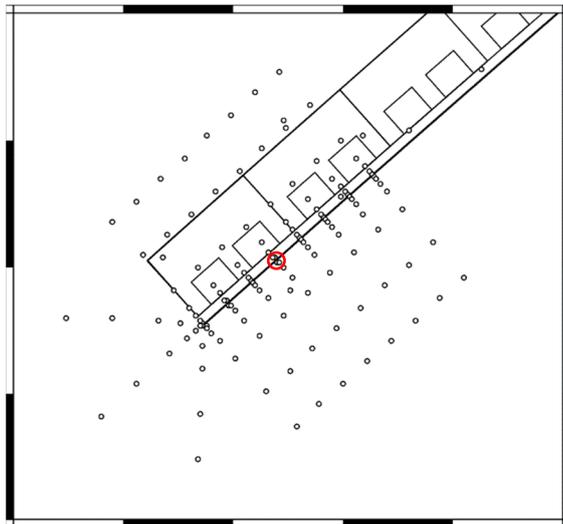


图 16 速度波形 地表断層 1km 上盤側

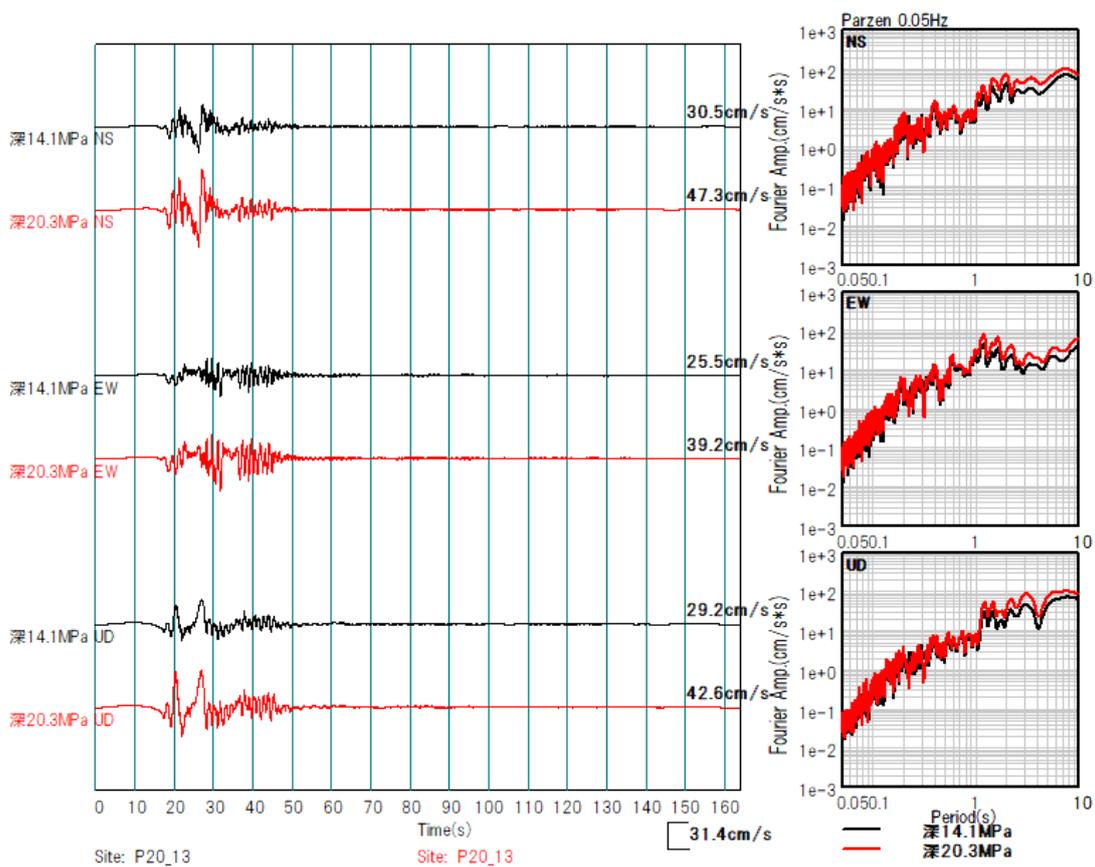
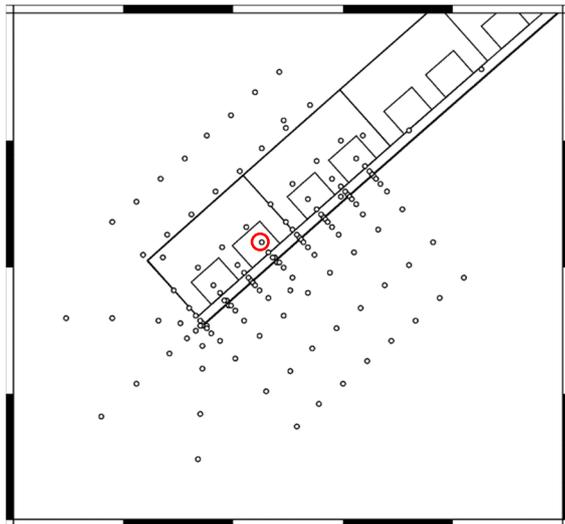


图 17 速度波形 地表断层 20km 上盘侧

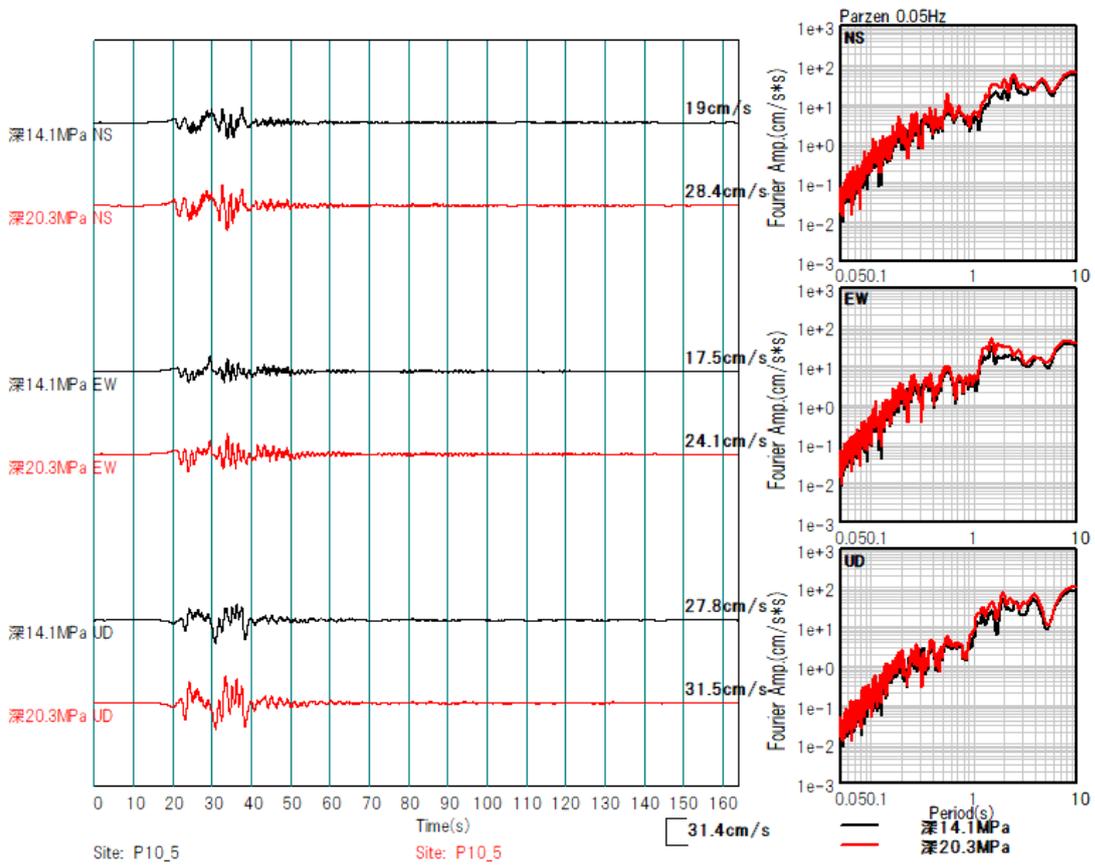
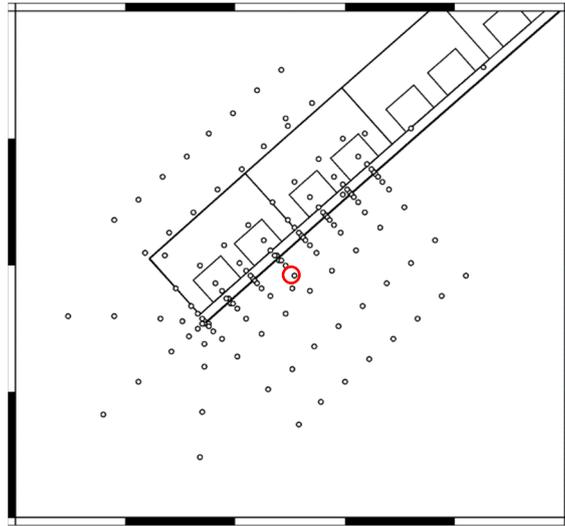


图 18 速度波形 地表断層 10km 下盤側

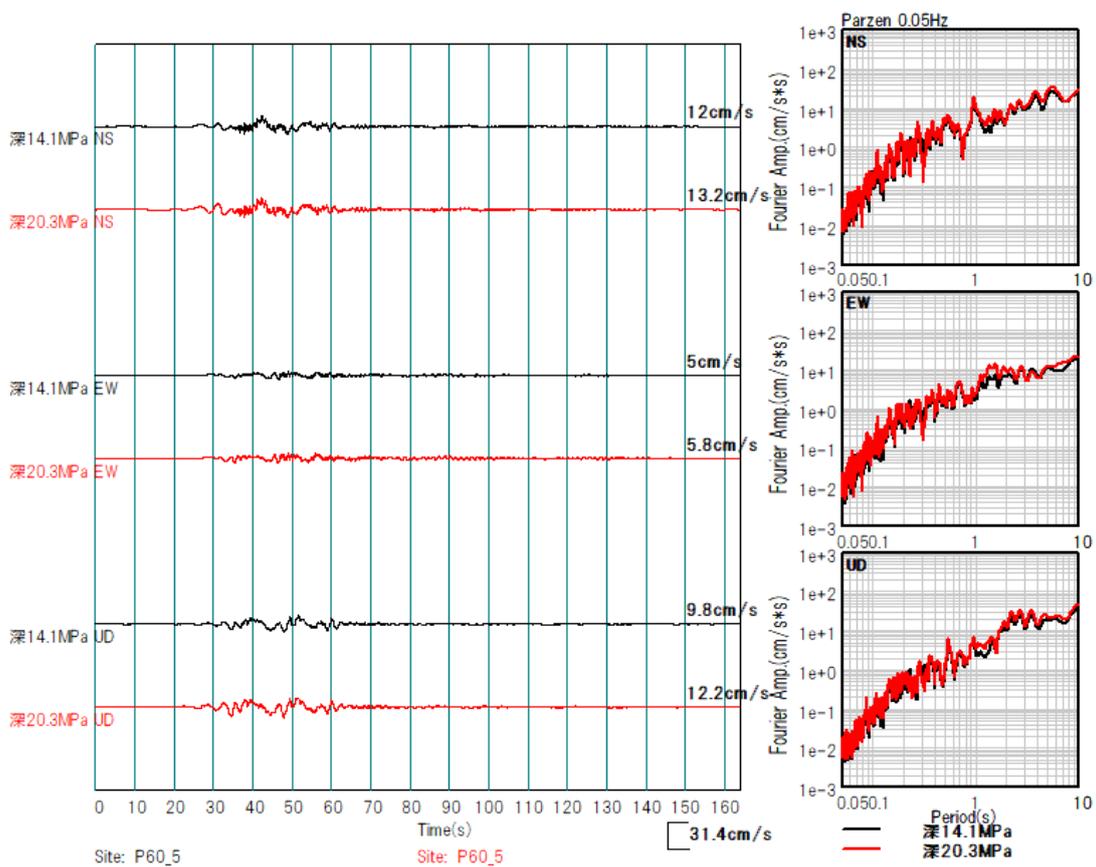
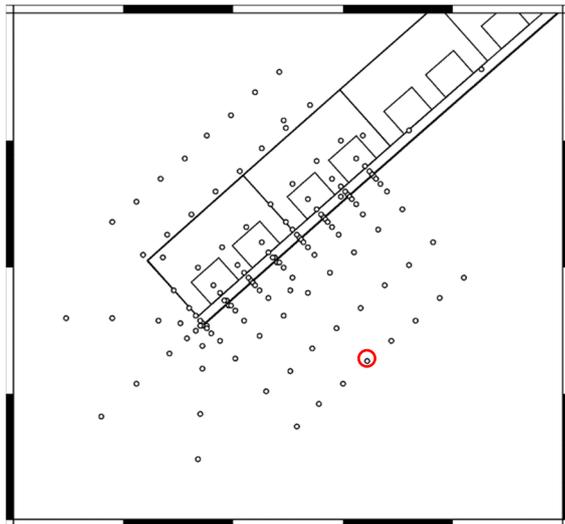


图 19 速度波形 地表断層 60km 下盤側