

遠地実体波と地殻変動データを用いたジョイント・インバージョンによる 2011年東北地方太平洋沖地震の震源過程の解析 Rupture Process of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake Inverted From Telesismic Body Waves and Geodetic Data

○久保久彦 (京都大学防災研究所), 笈楽磨 (神戸大学理学研究科), 干場充之 (気象研究所)

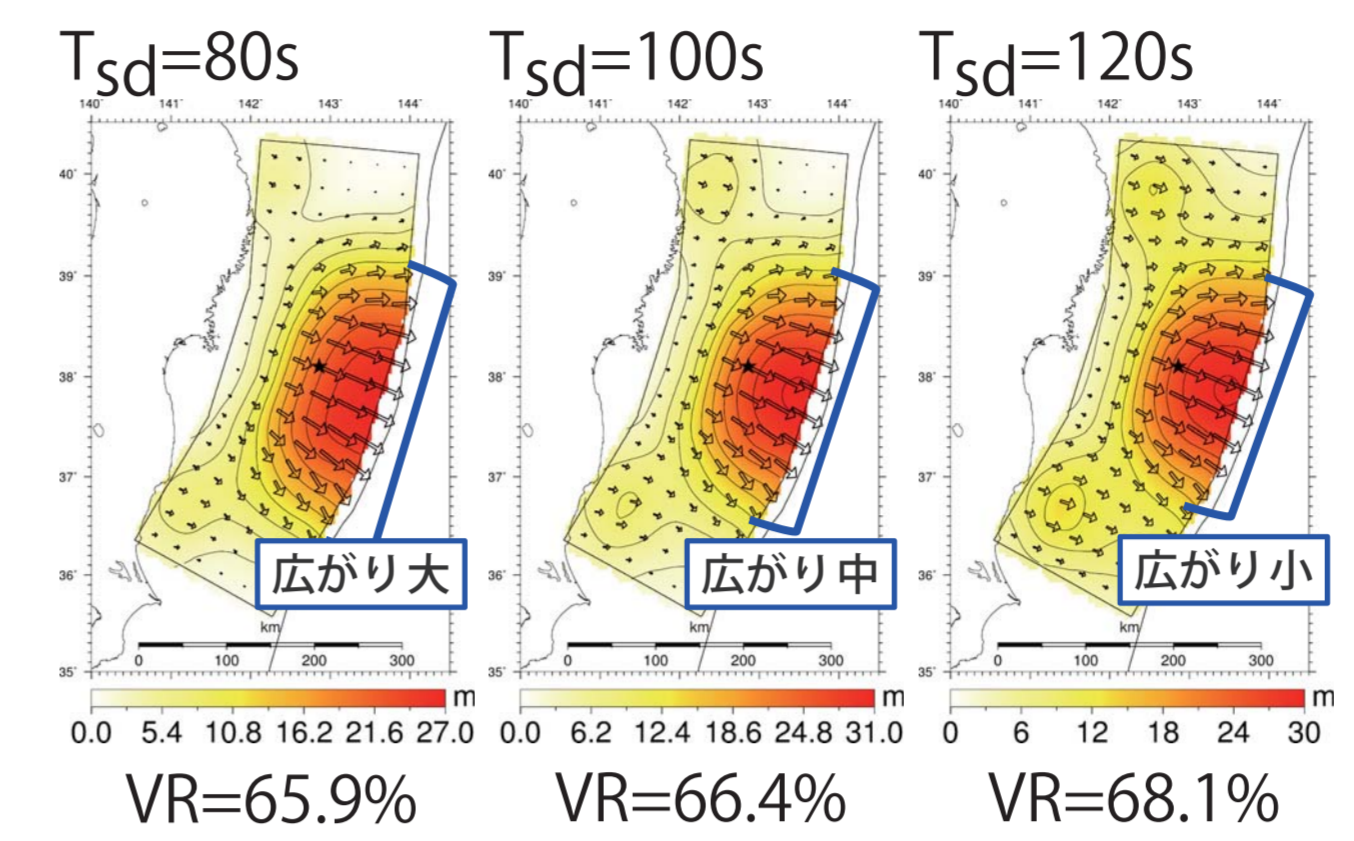
○Hisahiko Kubo (DPRI, Kyoto Univ.), Yasumaro Kakehi (Grad. Sch. of Science, Kobe Univ.), Hoshiba Mitsuyuki (Meteorological Research Inst.)

本研究は、遠地実体波と地殻変動データを用いたジョイント・インバージョンによって、2011年東北地方太平洋沖地震の震源過程の推定を行った。その際に、multiple time window analysis の解析条件である T_{sd} (各サブフォルトの最大すべり継続時間) と V_{ftw} (first time window の伝播時間) に本研究は着目した。

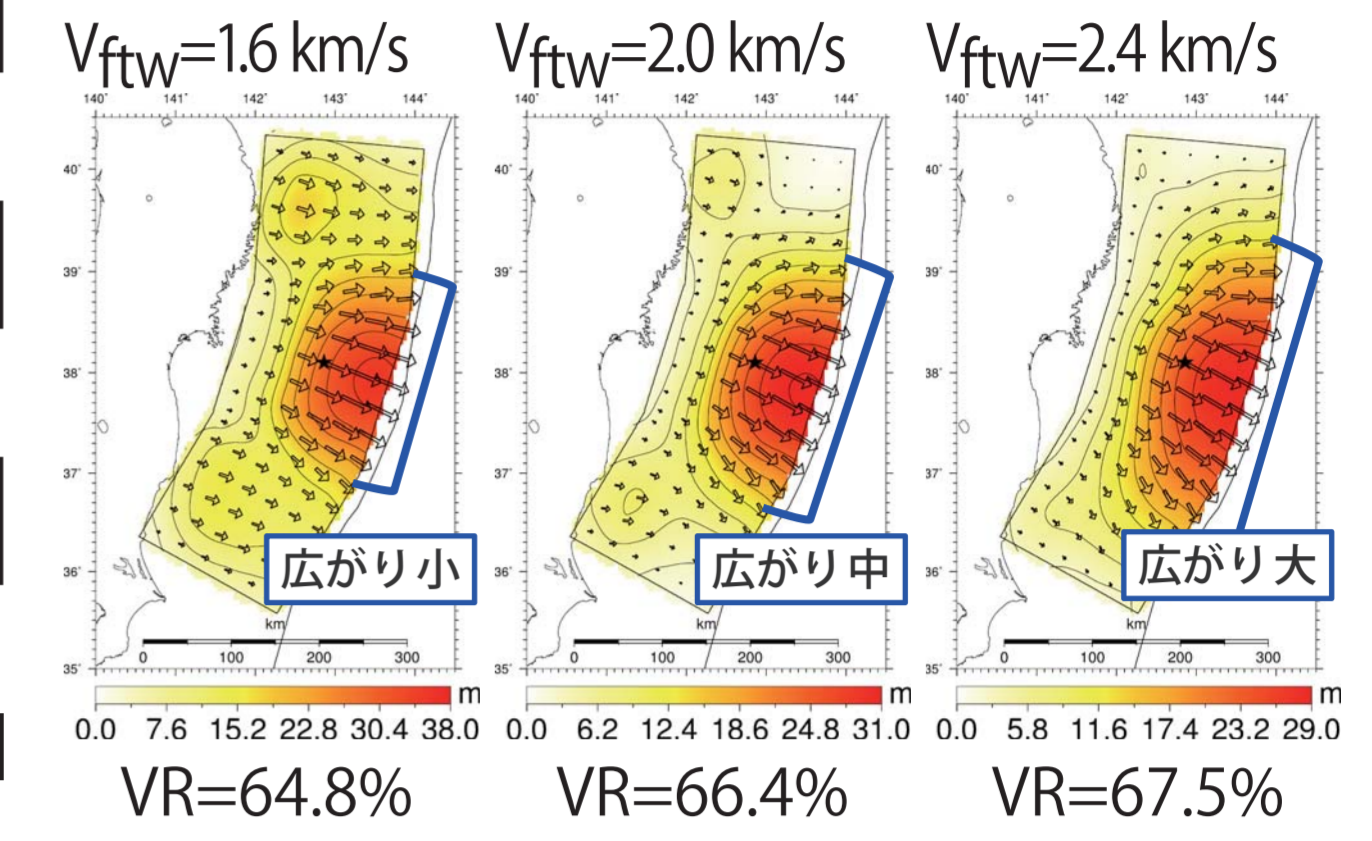
T_{sd} と V_{ftw} は各サブフォルトすべりの時間帯を規定する解析条件であり、下で示しているように推定される震源モデルに大きな影響を与える。そのため、妥当な T_{sd} と V_{ftw} を用いないと、歪められた解が求められる可能性がある。しかし、これまで T_{sd} については解析者が経験的に決めてきた。また、 V_{ftw} については観測波形と理論波形の合い具合が最もよい場合の値を用いることが先行研究では多いが、右に示すように V_{ftw} とすべり分布のトレードオフが非常に強いために遠地実体波波形の合い具合から V_{ftw} を決めることは難しい。これらのために、同じ地震を解析していても解析者によって異なる値の T_{sd} もしくは V_{ftw} を用いるということが引き起こされていると考えられる。

そこで、本研究では、遠地実体波以外のデータを用いて、 T_{sd} と V_{ftw} を可能な限り客観的に決定することを行った。これを行った上で、震源過程の推定をすることで、より信頼性があり、妥当な震源モデルを構築できると考えた。

■異なる T_{sd} を用いて、遠地実体波によって推定されたすべり分布 (V_{ftw} は 2.0 km/s に固定)



■異なる V_{ftw} を用いて、遠地実体波によって推定されたすべり分布 (T_{sd} は 100 秒に固定)

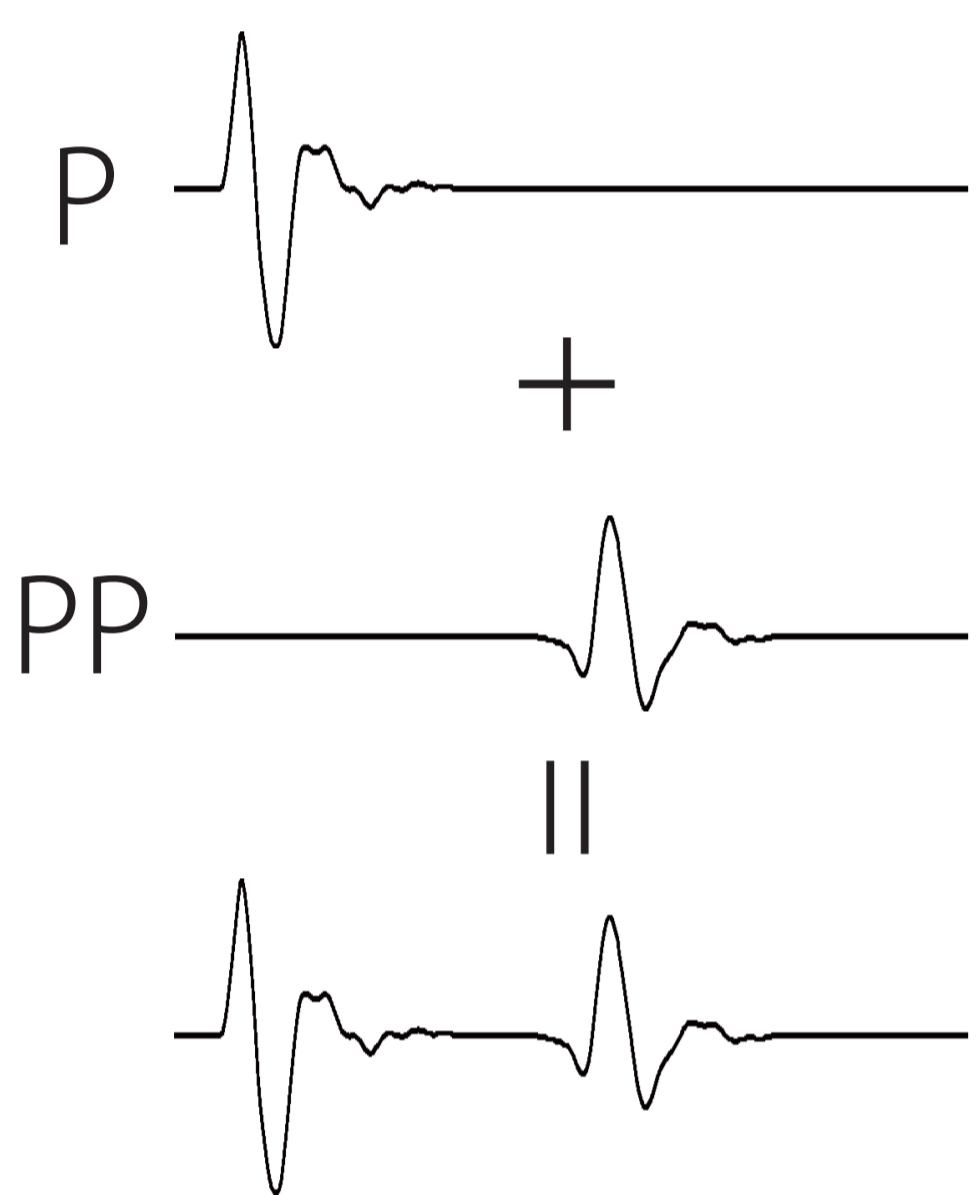


- T_{sd} が大きいほど or V_{ftw} が小さいほど、浅部の大きなすべり領域の走向方向の広がりが大きくなる。
- T_{sd} or V_{ftw} を変えても波形の合い具合 Variance Reduction (VR) はあまり変わらない。

データおよび手法

■遠地実体波

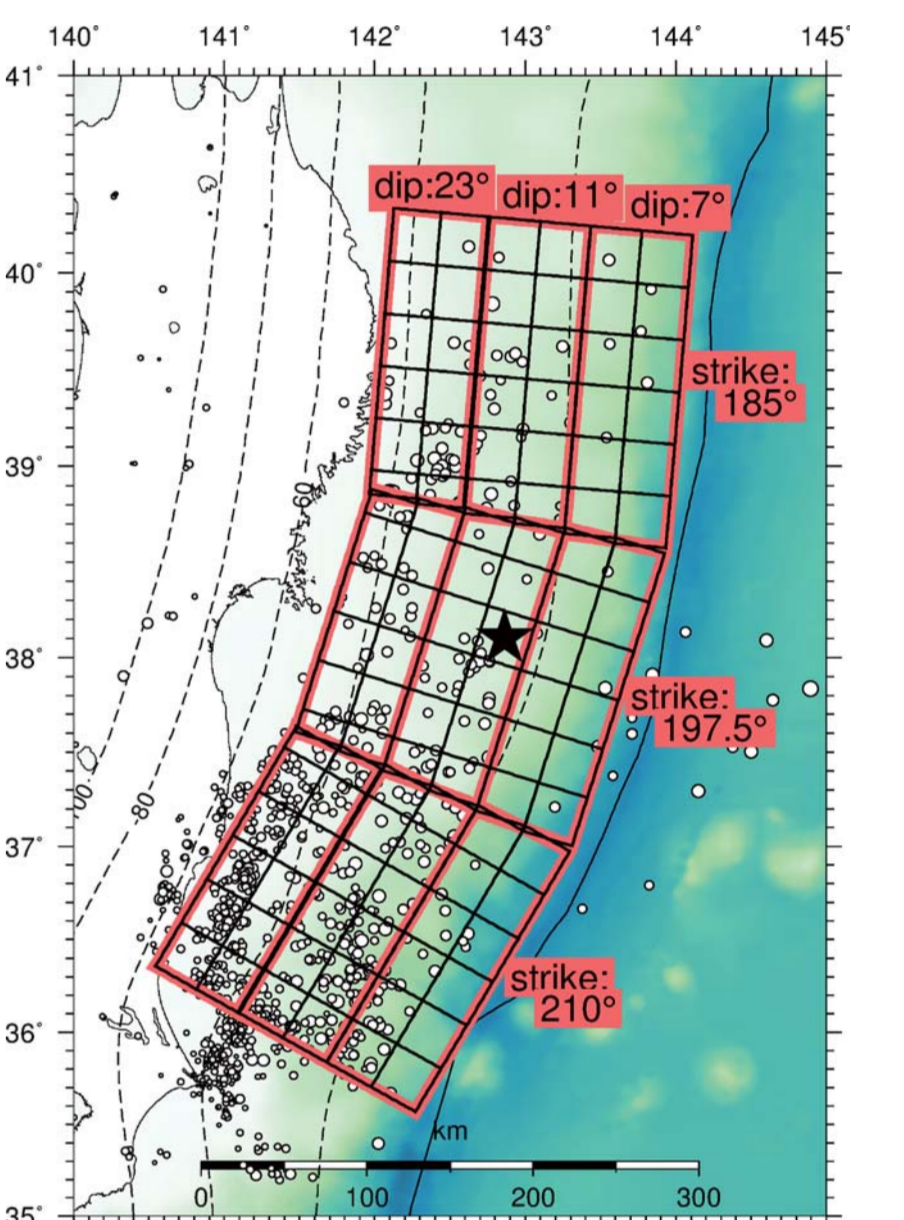
- データ
 - 2011年東北地方太平洋沖地震のような巨大地震を解析するときには、破壊継続時間が非常に長いので、観測波形の解析長を長くする必要がある。その場合、観測波形の解析時間内に P だけでなく PP が含まれる観測点が出てきてしまう。そのため、P だけでなく PP も含んだ遠地実体波を解析対象とした。
 - 震央距離が 40 度から 100 度までの IRIS の 42 観測点で観測された上下動成分を用いた。観測された速度波形記録を数値積分して変位波形にし、10 秒から 100 秒までのバンドパスフィルターをかけ、0.5 秒でサンプリングして、P 波到達 10 秒前から 300 秒間を切り出した。



- Green 関数
 - P と PP の両方を含んだ遠地実体波を解析対象とするので、P と PP のそれぞれの理論波形を計算し、走時差を考慮してそれらを足し合わせたものを Green 関数として用いた。
 - 理論波形は Kikuchi and Kanamori のプログラムの必要な部分を用いて計算した。その際、プレート境界の上盤側の構造が水平方向 (傾斜方向) に不均質であることを考慮して、Miura et al. (2005) を参考にしながら、傾斜方向に位置が異なるサブフォルトごとに一次元地下構造モデルを仮定した。
 - P と PP の理論走時差は、Snoke (2009) のプログラムによって AK135 全地球一次元速度モデル (Kennett et al., 1995) で計算した上で、3月9日2時45分 (UTC) に発生した前震 ($M_w=7.5$, GCMT より) の波形を用いた補正を施した。

■地殻変動

- データ
 - 国土地理院 GEONET の 51 観測点で観測された東西・南北・上下の 3 成分の GPS データを用いた。その際、余震および余効変動による影響をできるだけ取り除くために、電子基準点データに RTKLIB Ver. 2.4.1 を用いた PPP Kinematic 解析を行い、30 秒サンプリングの電子基準点の座標データを得た上で、本震発生前と本震発生後の位置を比較して、本震による地殻変動を得た。
 - 加えて、海溝軸付近の領域の空間分解能を向上させるために、Sato et al. (2011) によって観測された海域地殻変動データも用いた。
- Green 関数
 - Okada (1992) のプログラムを用いて計算した。



■震源断層面

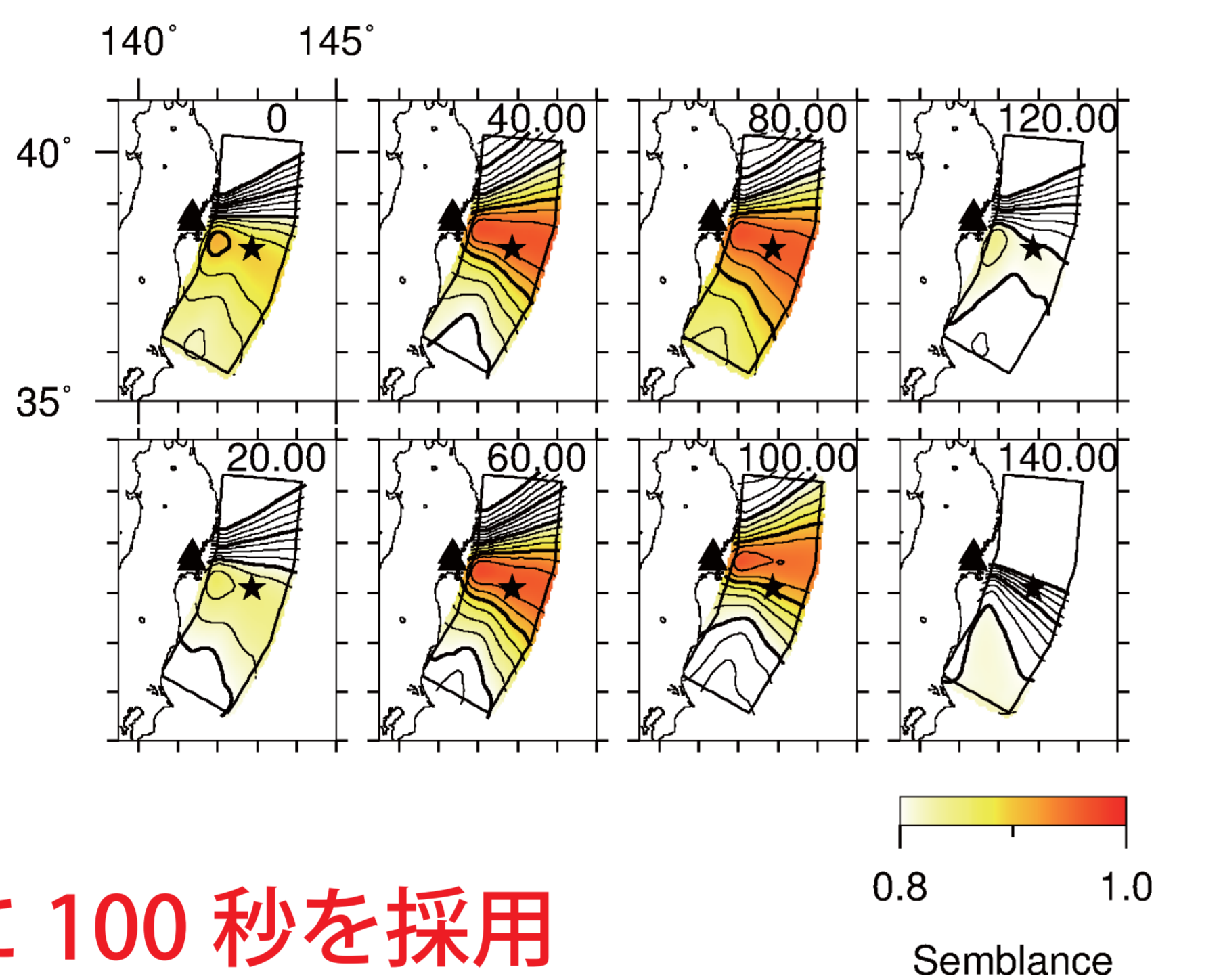
- 実際のプレート境界の三次元形状を考慮して、9 枚の平面で構成した。

■手法

- multiple window analysis (Hartzell and Heaton, 1983) を用いた。すべり角は 90 度を中心角として、 ± 45 度の範囲で可変とした。各 subfault の震源時間関数は 8 秒幅の三角関数を 4 秒ずらして並べることで表現した。また、領域外のすべりがゼロであるという拘束を海溝軸側において課さない smoothing constraint を用いた。異なるデータセット間の重みは理論テストを通して決定した。

Tsd の決定

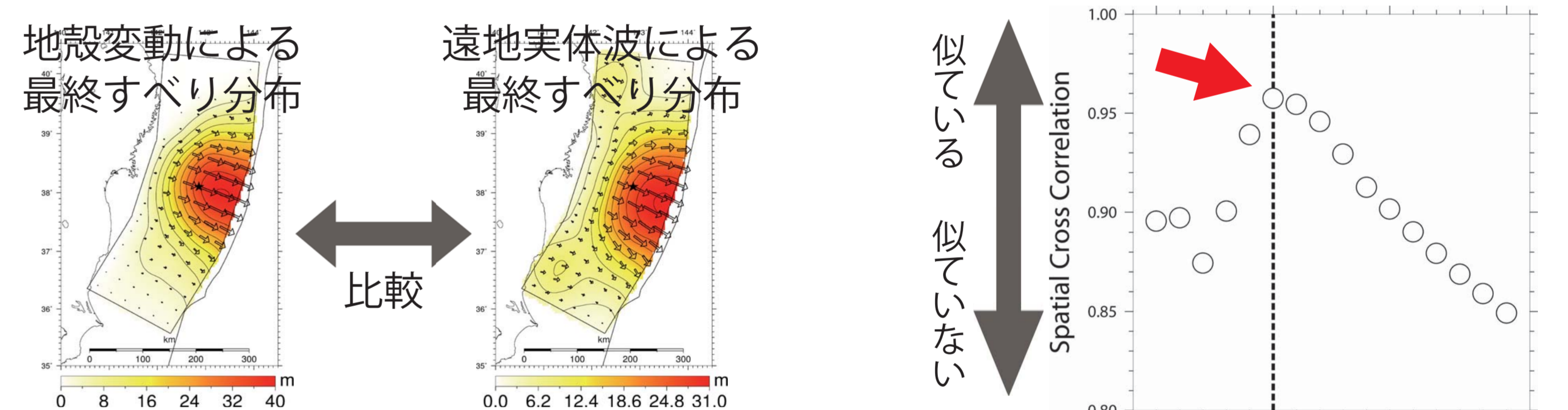
国内の強震観測点の記録を用いたセンブランス・アレイ解析によって、破壊開始点付近の領域からのくらの時間にわたって地震波が放射されていたかを推定することによって、 T_{sd} を決定した。センブランス解析には Honda et al. (2008) の手法を用いた。このとき、近接する強震観測点で構成される三つのアレイで解析することで、信頼性のある地震波の放射時間や伝播方位を求めた。



◎ T_{sd} に 100 秒を採用

Vftw の決定

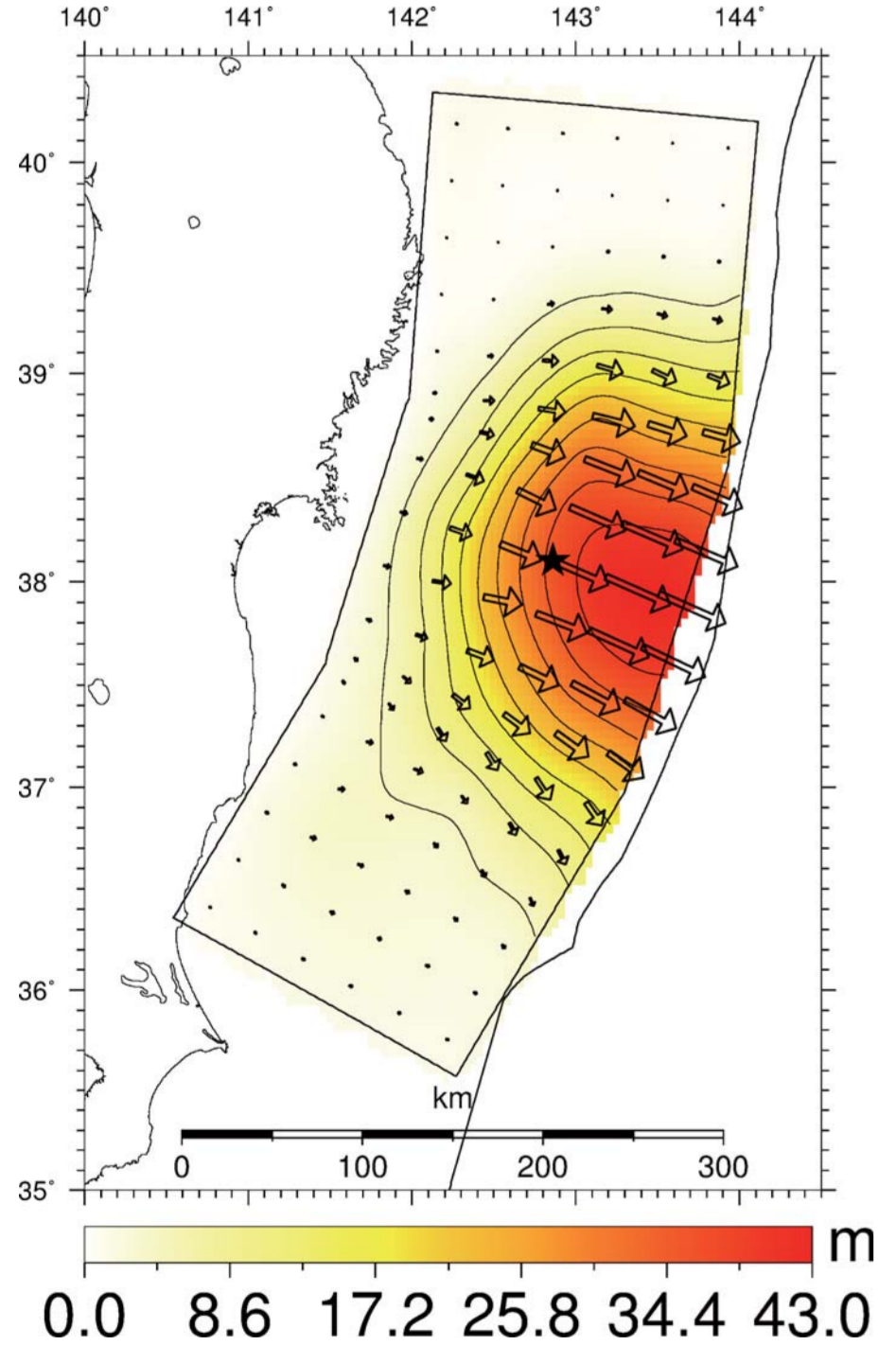
すべりの空間分布情報のみを持つ地殻変動データによる最終すべり分布と遠地実体波による最終すべり分布を比較し、前者が後者に最も近くなる場合の V_{ftw} の値を採用した。二つのすべり分布のフィッティングを表す指標として、Spatial Cross Correlation (Graves and Wald, 2001) を用いた。このとき、地殻変動データとして海域地殻変動データも用いているので、地殻変動データによる解析は分解能の高い解析を行うことができた。



◎ V_{ftw} に 2.0 km/s を採用

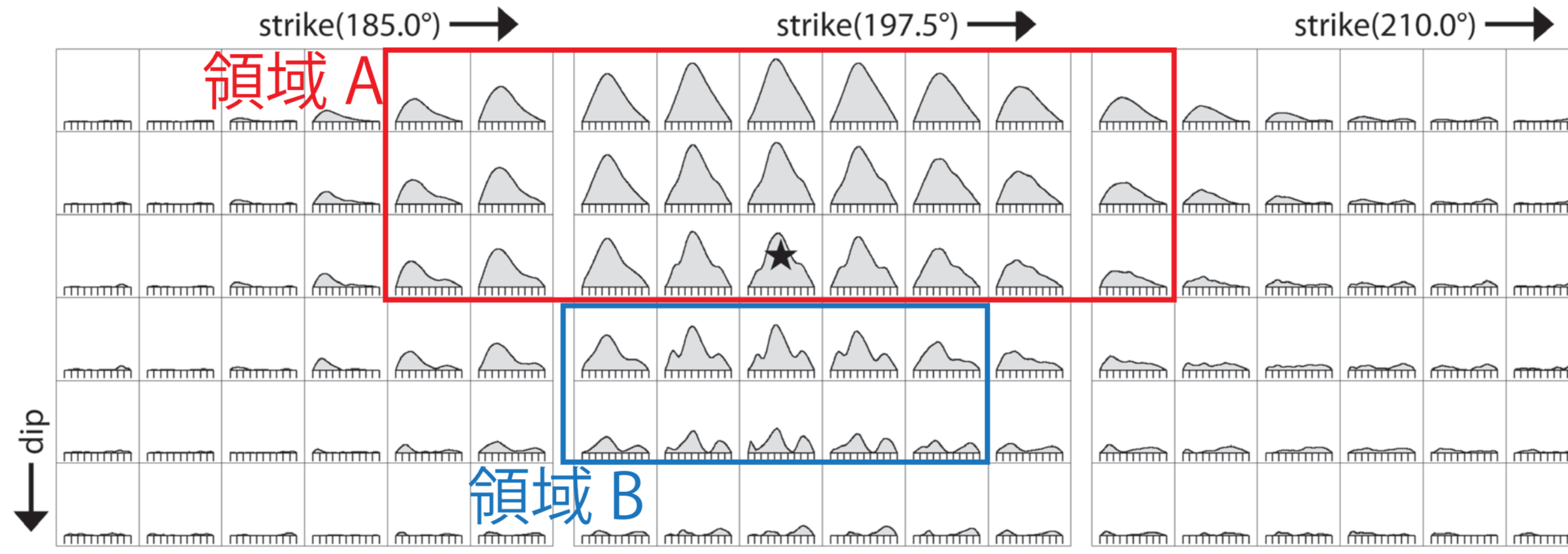
推定された震源モデル

■震源断層面上でのすべり分布



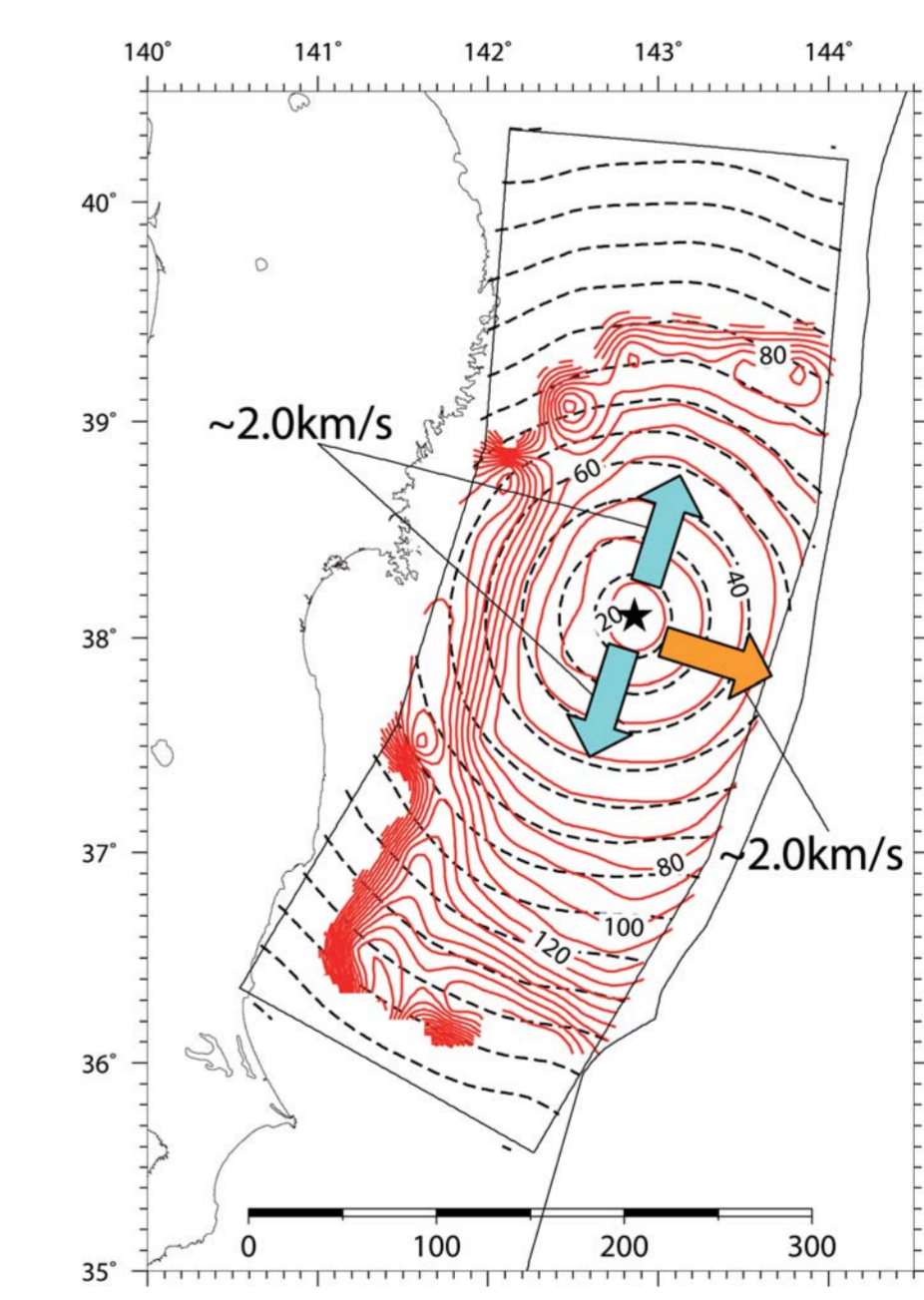
- 震源断層面の浅い領域に、走向方向に岩手県南部沖から福島県沖まで広がる、最大すべり量 43m の大きなすべりの領域
- $M_0=1.4 \times 10^{22}$ Nm ($M_w=9.0$)
- 破壊継続時間: 約 150 秒

■各サブフォルトのすべり速度関数



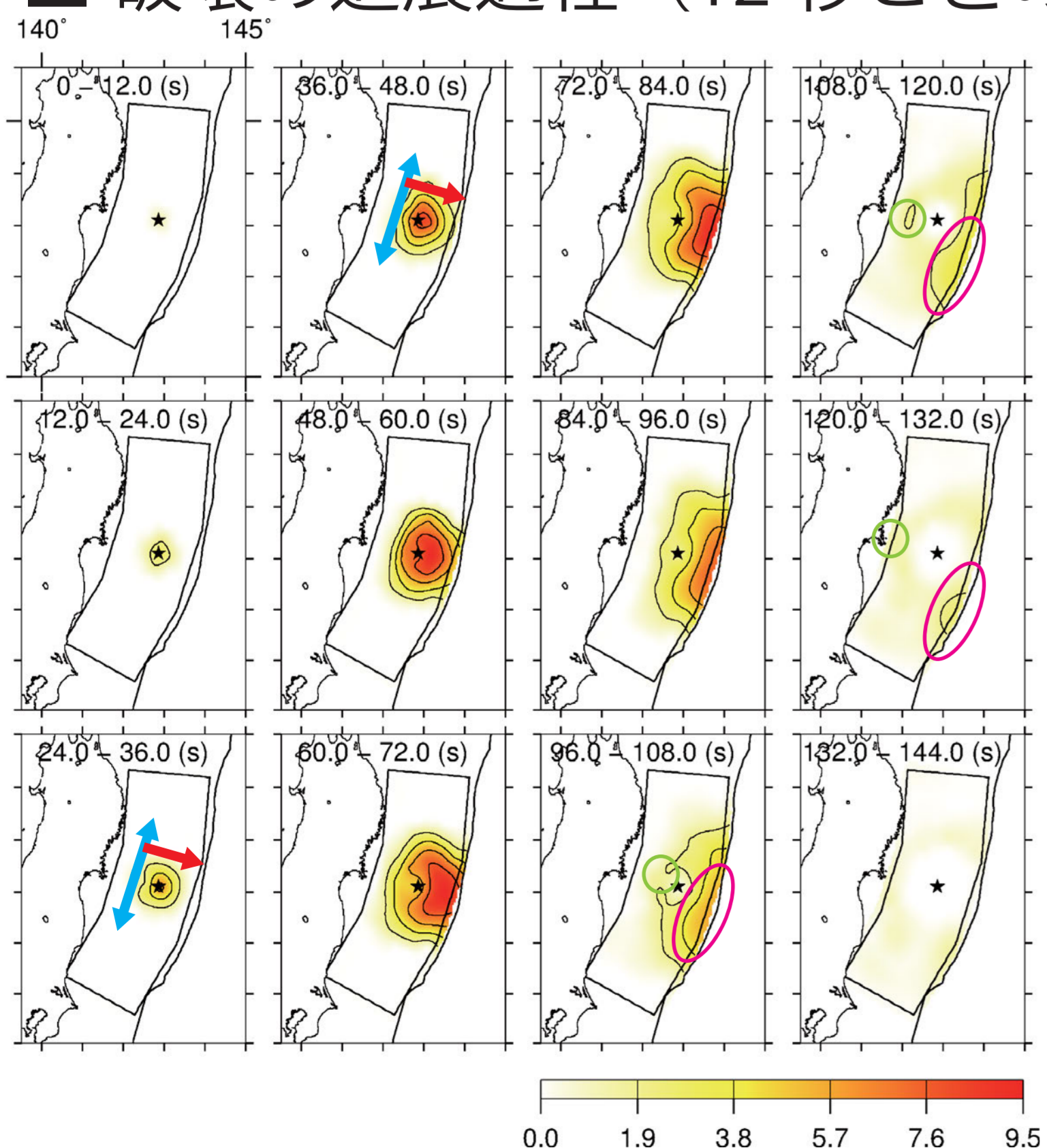
- 浅い領域 A と深い領域 B ではすべりの様相が異なる。領域 A のすべり速度関数は継続時間の長い 1 つのピークで構成されているが、領域 B では複数のピークで構成されている。

■各サブフォルトの破壊開始時刻から推定される破壊フロント



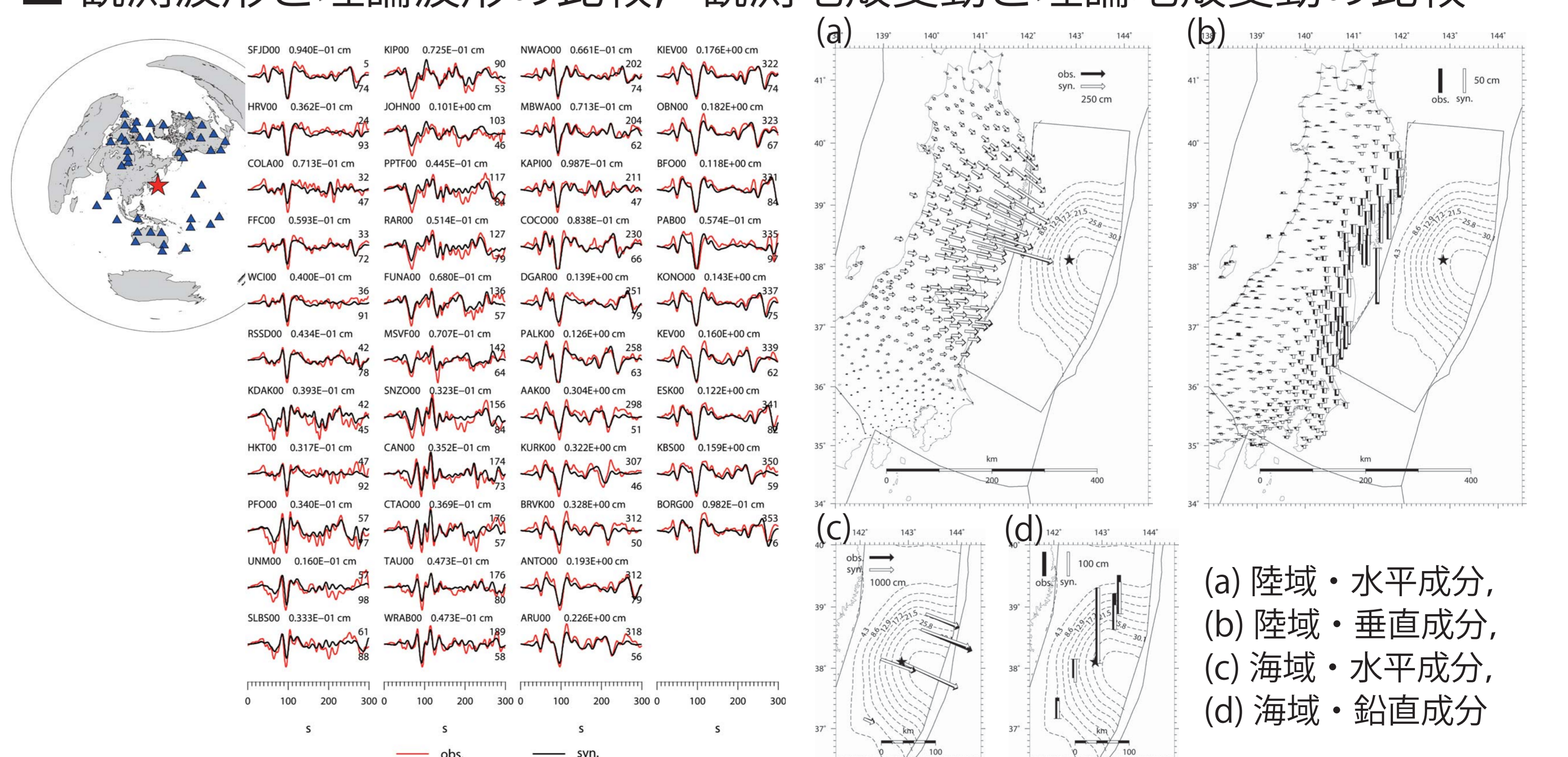
- 赤コンターは破壊開始時刻を表す (コンター幅は 10 秒)。本研究では、各サブフォルトにおける累積すべり量が断層面上での平均すべり量 11m の 20% に到達した時間を破壊開始時刻と定義している。
- 黒破線コンターは破壊開始点からの距離を表す (コンター幅は 20km)。

■破壊の進展過程 (12 秒ごとのすべりのスナップショット)



- 破壊開始 20 秒に破壊開始点付近において小さなすべりが現れる。
- その後、浅い領域に向かって破壊が伝播していく (赤矢印)。走向に沿って南北方向にも、破壊が伝播する (青矢印)。浅い領域におけるすべりは 70 秒にピークに達し、100 秒過ぎまで継続する。
- 100 秒から 150 秒にかけて、浅い領域において破壊が走向に沿って南に伝播する (ピンク丸)。同時帯に、破壊開始点から down-dip 方向に破壊が伝播する (緑丸)。

■観測波形と理論波形の比較、観測地殻変動と理論地殻変動の比較



謝辞 本研究では、IRIS の地震波形記録、国土地理院 GEONET の電子基準点データ、防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net, 気象庁震度計の強震記録を解析に使用しました。記して感謝いたします。