

大規模地震波シミュレーションを用いた2011年東北地方太平洋沖地震の震源域構造モデルの波形トモグラフィー

JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第12回 シンポジウム 2020年7月9日

1 研究目的

地震の震源物理や強震動生成メカニズムを探るためには、計算地震波波形を用いた解析が必須となっている。このとき計算地震波波形の精度が不十分であると、解析結果にバイアスを生じたり、分解能に制約を受ける可能性がある。我々は、プレート沈み込み型の巨大地震である2011年東北地方太平洋沖地震の震源域において、たとえ3次元構造モデルを用いて理論波形を計算しても、周期10秒程度以下の観測地震波波形の再現性が良くないことを見出した(項目5「短周期地震波の再現性の問題」)。これは波形計算に用いた3次元構造モデルが十分ではないことを示唆する。そこで本研究では全波形トモグラフィーによる東北地方太平洋沖地震震源域の3次元速度構造モデルの推定・改良を行う。本研究の特徴は、①初期震源パラメータの不確定さを最小化するために独自のFAMT (First-motion Augmented Moment Tensor) 解析を用いること(項目6「FAMT解析」)、②構造パラメータ摂動に対する波形の感度カーネルを高周波近似の波線理論等によらず波動論に基づいて計算すること(項目7「研究計画」)、である。そして、この改良した3次元構造モデルを用いて短周期の波形再現性を向上させて震源パラメータや破壊過程の解析を高精度化し、地震発生場と地球内部構造との相関関係を探る研究を短波長域に拡張することを目指す。

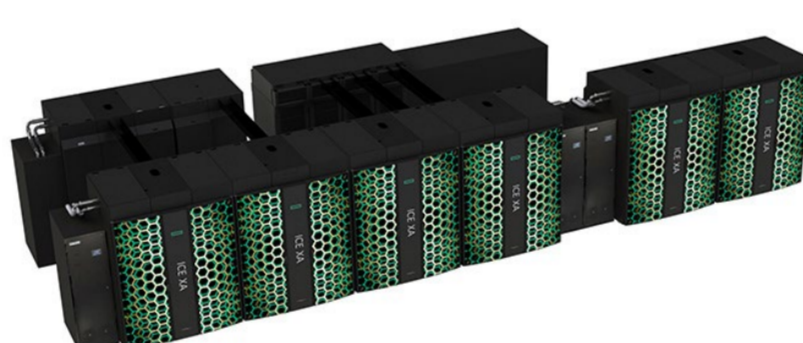
2 当拠点公募型共同研究として実施する必要性

本研究で対象とする沈み込み帯は、海水層・不規則海底地形・厚い堆積物層・沈み込む海洋プレートなどから構成される複雑な地球内部構造になっており不均質性が非常に強い。その結果、地震波動場には周期数秒程度においても地震波経路の屈曲や直線経路に関する波動場の非対称性などの3次元不均質構造による効果が表れる。そのため本研究では3次元構造モデルを用いた地震波動場の計算が必須となる。周期数秒程度の地震波シミュレーションでは格子間隔を100-200 m程度にする必要がある。その一方で対象領域(東北地方太平洋沖地震の震源域)は数百kmスケールのサイズであるため、必然的に大規模計算となる。そのため、本公募の共同研究として実施する必要性がある。

3 大規模地震波シミュレーション

HOT-FDM を利用 (Nakamura et al. 2012)

- Heterogeneity, Ocean layer, Topography (3次元不均質性、海水層、不規則地形、非弾性減衰)
- 東京工業大学【TSUBAME-3.0】HPE SGI 8600
- 名古屋大学【不老】Fujitsu PRIME-HPCI FX-1000



(東京工業大学)



(名古屋大学)

4 研究の意義

沈み込み帯に位置する日本列島では、2011年東北地方太平洋沖地震のようなプレート境界型の巨大地震がしばしば発生する。これらの巨大地震の断層破壊過程や地震の震源分布・発震機構解は、地震発生場の応力状態・物性や大規模構造と関係すると考えられることから、地震パラメータと不均質構造との相関関係を考察することが地震発生場を理解する上で重要な手がかりとなる。

これらの研究では地震波波形が重要なデータとなる。しかしプレート境界型地震が発生する沈み込み帯は前述のように強い3次元不均質性を持っており、地震波は伝播経路が歪められるなどの大きな影響を受ける。この影響を考慮しない場合には地震の解析結果にバイアスが発生する可能性がある(Okamoto EPS 2009, Takemura et al. EPS 2016)。我々は、この計算波形による観測波形の再現性の問題に取り組んできた。その結果、既存の3次元構造モデルと最適震源モデルを用いて計算波形を生成してもS波や表面波を含む波形全体については周期10秒程度以下の短周期帯での再現性は低いことを見出した(項目5「短周期地震波波形の再現性の問題」)。これは現状の3次元構造モデルの精度が数10km程度の波長域で充分ではないことを示唆する。この計算波形の精度限界のために、短波長現象である破壊現象の考察や、地震発生場の短波長構造の考察においても現状では精度に限界があるのではないかと考えられる。

そこで、本研究では波形トモグラフィーによって3次元構造モデルを改良し、周期数秒程度の短周期帯での波形再現性を向上させることを目的とする。本研究の意義は、短波長側が改良された3次元構造モデルを提案できること、さらにその改良したモデルにより震源パラメータや破壊過程の解析において短周期(短波長)側の精度を向上させて、地震発生場と地球内部構造との相関関係を探る研究の短波長域への拡張を目指すことができる、というものである。

5 短周期地震波の再現性の問題

東北沖の地震の解析において、FAMT解析(項目6「FAMT解析」)によって得られた最適震源パラメータを用いてもなお、周期10秒程度よりも短周期の全波動場を再現することは難しいことを、我々は見出した(図1)。これは現状の3次元構造モデルの精度が数十km程度の波長域で充分ではないことを示唆する。

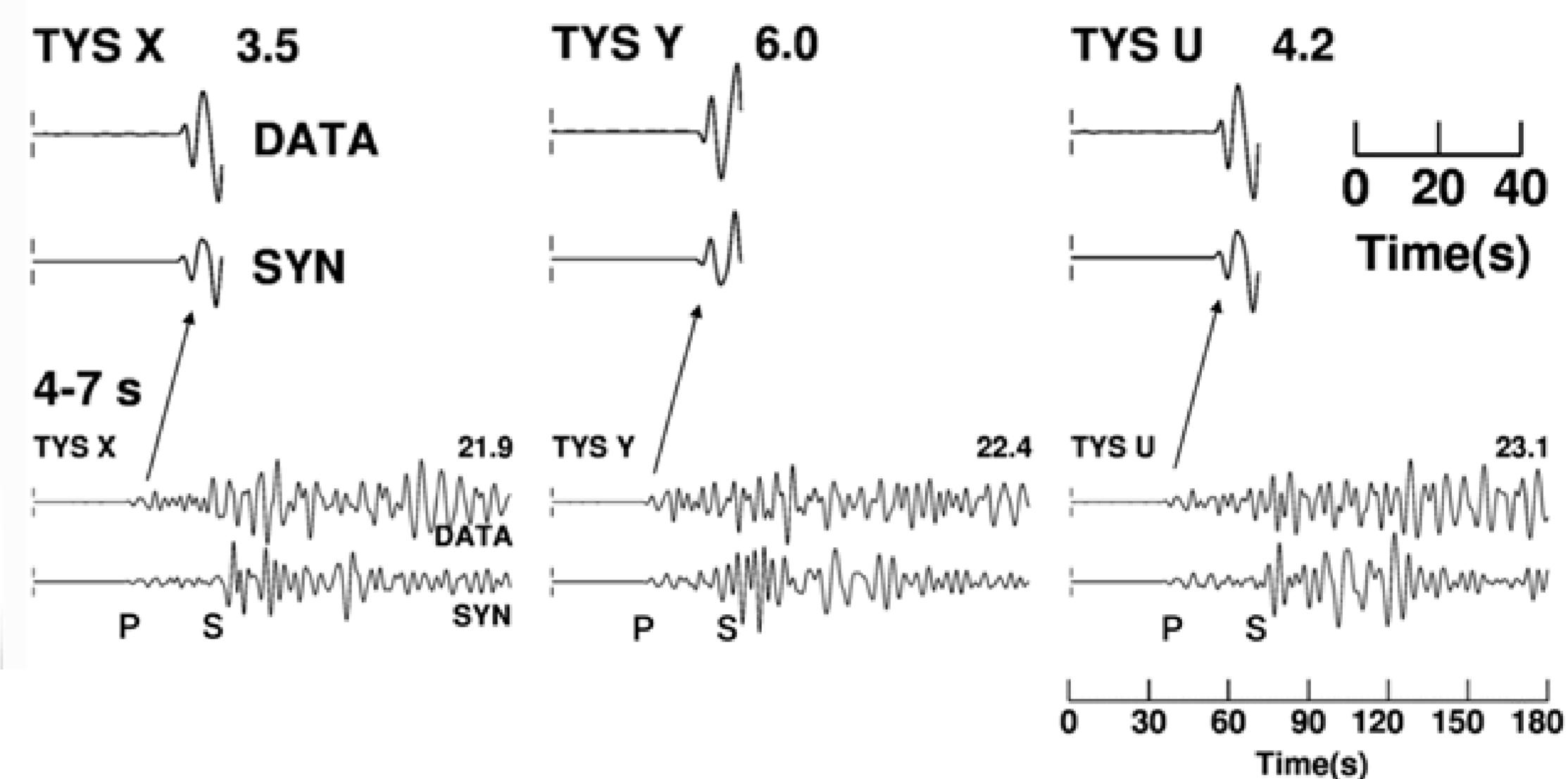


図1 2003年Mw5.8の地震(図2)についての観測波形(TYS)と最適計算波形(DATAとSYN)の比較(周期4-7秒)。P波初動付近(上段の拡大図)は観測波形がよく再現されているが、S波付近を含む波形全体の再現性は低い(下段)。(Okamoto et al. 2018)

6 FAMT解析 (First-motion Augmented Moment Tensor)

海域で発生する地震の解析では、観測点が陸側に偏っているという問題がある。そこで、与えられた3次元構造モデルのもとで最適な震源パラメータを推定する手法として提案したものがFAMT解析である(Okamoto et al. EPS 2017)。この手法は震源パラメータ推定において、表面波まで含む長周期の全波形に加えて、初動走時や震源時間関数などの情報を増強するためにP波初動付近の短周期実体波形をデータとして追加することが大きな特徴である。さらに格子探索と組み合わせると、点震源の震源位置・発震時補正值・モーメントテンソル・震源時間関数からなる最適震源パラメータの推定が可能となる(図2)。

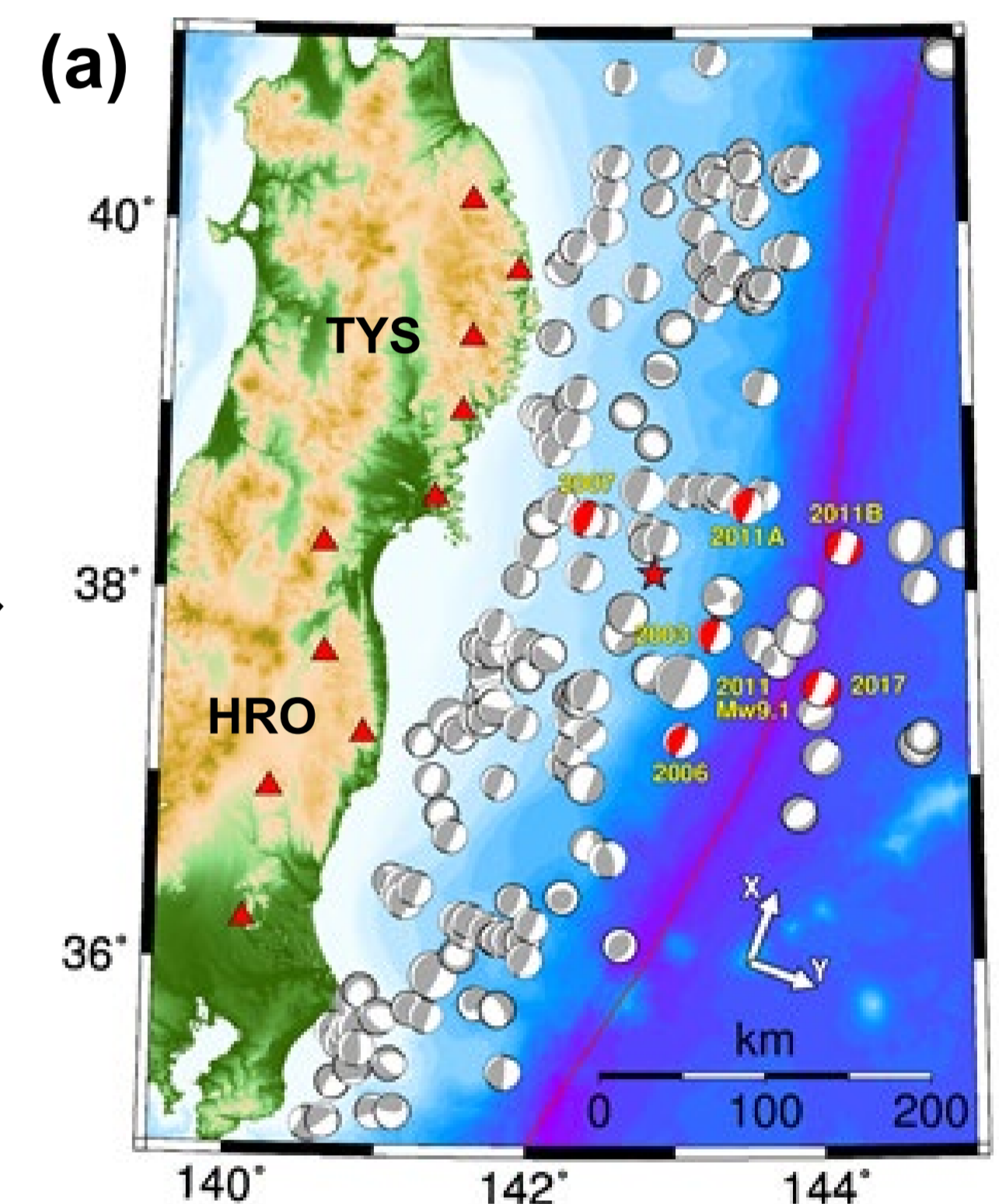
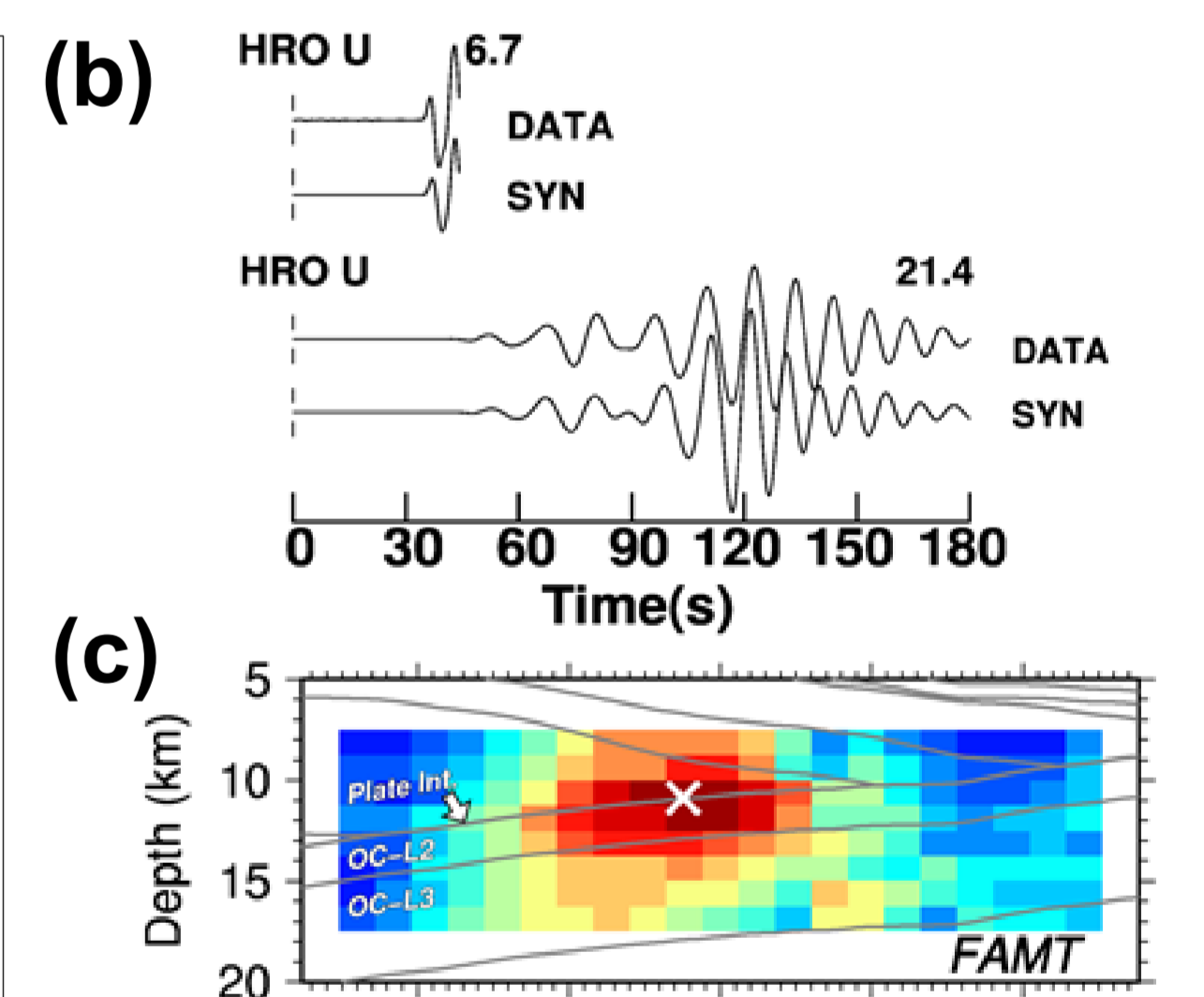


図2 東北沖で発生した2003年Mw5.8のプレート境界型地震に関するFAMT解析の結果。(a)対象領域と地震の分布。2003年の地震は図の中央やや左下に位置する。(b)得られた計算波形(SYN)と観測波形(DATA)との比較例。観測点はHRO。波形は上下動成分。上段は周期4-40秒のP波初動付近の波形、下段は周期10-40秒の全波形を示す。(c)3次元格子探索の結果を構造断面図に投影したもの。最適震源位置(×印)は、プレート境界型メカニズムから期待される通りに、プレート境界付近に推定された。(Okamoto et al. EPS 2018)



7 研究計画:短波長域へ研究領域を拡張する

- 【1】東北沖でのFAMT解析
 - 陸海統合3次元構造モデル
 - HOT-FDM
 大規模地震波シミュレーション
 - グリーンテンソル波形の計算
 - FAMT解析 → 最適震源パラメータ
- 【2】感度カーネルの計算
 - 感度カーネル: 構造モデルパラメータの摂動量($\delta m(x)$)に対する波形の変化量($\delta u(\omega)$)を表す(ω は周波数)
 - 体積積分 $\delta u(\omega) = \int K(x, \omega) \delta m(x) dV$ の積分核 $K(x, \omega)$
 - ボルン近似により、震源からのフォワード波動場と観測点からのアジョイント波動場とを掛け合わせることで得られる(図3)

- 【3】3次元構造モデルの改良
 - 感度カーネル + 短波長観測波形と計算波形との残差 → 逆問題解析

図3 感度カーネルの例。東北沖で発生した2003年Mw5.8の地震と観測点TYSとの間で、深さ6-12kmの層について、周期9.8秒の上下動成分地震波について、緩和剛性率(relaxed rigidity)に関する規格化した感度カーネルの実部を示したものの。3次元構造の効果により、カーネルは直線経路に関して非対称になっている。

