

9. 東北地方太平洋沖地震の震源モデルの構築

倉橋奨・入倉孝次郎

1. はじめに

2012年3月11日東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の超巨大地震が発生した。この地震は、日本付近で発生した地震の中で最も大きな地震であり、その震源メカニズム(断層面のすべり分布)は多くの研究者により研究が進められている。使用されているデータとして、津波、地殻変動、遠地実体波などの長周期のものから、海外で観測されたP波の短周期成分や日本で観測された近地の強震動記録など短周期成分などが使用されている。

このうち、長周期データを用いた解析結果では、震源よりも海溝軸よりで大きなすべりがあることがわかってきた。一方で、強震動を用いた結果では陸側であることが指摘されている。本研究では、近地強震動記録を用いて、強震動生成域を構築した。

2. 使用データ

本震の強震動記録は、(独)防災科学技術研究所のKiK-netやK-NET観測点をはじめ、多くの機関の観測点により記録されている。本研究では、地表の地盤の影響を受けにくい地中記録を用いるため、東北地方の震源に近いKiK-netの20観測点および東北電力の女川原子力発電所の記録を用いた。

3. 強震動生成域の場所の推定

太平洋沖地震の加速度分布を図1(a)に示す。また、北から南におけるオリジンタイムからの強震動記録を図1(b)に示す。本震の強震動は、5つのウェーブパケット(WP)で成り立っており、これは強震動生成域(SMGA)から生成されていると考えられる。観測波形には、地域によって特徴が異なり、例えば、宮城県の記録では波形の前半に2つ明瞭なWPがみられ、一方で茨城県の記録では波形の後半に1つ明瞭なWPが見られる。このことは、SMGAが空間的に広がっていることを示唆している。本研究では、SMGAの場所の推定法として、S波を用いたセンブランス解析を用いた。特に、WPが顕著で、S波が独立していると判断可能なWP1、WP3、WP5に対して実施し、WP2、WP4はKurahashi and Irikura(2011)で用いられたback-propagation法を適用している。また、センブランス解析に利用する波形部分は、WPのオービットから、波形の震動方向を確認し、同じ波群であることを確認している。

センブランス解析は、以下の方法で実施した。まず、想定されるSMGAの場所を小断層に分割する。観測点は、図2(b)に示すように観測点を3~4点のアレーで区切った。アレー内の観測記録と小断層との幾何学的な関係から計算される波形の一致度からセンブランス値が計算される。観測点をアレーで区切ることで、各アレーから推定された入射方位の交点により、SMGAの場所が確定できるためである。図2(a)にセンブランス結果を示す。センブランス値の大きい部分は、波の到来方向を示しており、各アレーから推定された到来方向の交点がSMGAの場所と推定される。図3に各アレーから推定された方位角から推定されたSMGAの点を示す。この結果、WP1を放出したSMGA1は、震源よりも陸側と推定された。またWP3を放出したSMGA3は、震源よりも陸側かつSMGA1よりも沖側と推定された。また、WP5を放出したSMGA5は、茨城県の沖側と推定された。WP2とWP4を放出した場所は、それぞれ岩手県沖と福島県沖に推定した。

4. 経験的グリーン関数法による短周期強震動シミュレーション

S波を用いたセンブルランス解析と back-propagation 法により推定された SMGA の場所を基として、経験的グリーン関数法により強震動シミュレーションを実施し、SMGA の面積と応力パラメータを推定した。

経験的グリーン関数法に必要な経験的グリーン関数は、1. 本震と震源メカニズムが近似していること、2. SMGA に近い場所で発生したもの、3. 波形合成の数が適切になる大きさの地震という条件を満たした小地震を選択する必要がある。そこで本研究では、WP1、WP2、WP3 は、2005 年宮城県沖地震を利用した。ただし、この地震波形は、2つの WP で成り立っている。本研究では、波形の継続性を考え、WP の後半部分を用いた。WP4、WP5 は、南側で発生している 2007 年 11 月 26 日 22 時 51 分の地震を用いた。表 1 に要素地震の緒元を示す。

図 4 (a) に解析した地点の観測記録（黒）と解析波形（赤）の比較図を示す。図面の左は加速度波形を、右側は速度波形を示している。観測記録で見られる WP の到達時間や振幅はよく再現されており、特に、観測地点で異なる特徴（WP の出現時間）はよく合っている。図 5 は、本研究で推定した強震動生成域と浅野・岩田（2011）および佐藤（2012）を示しており、各 SMGA の場所や、破壊する順番概ね整合する結果となっている。

5. SMGA 内の不均質性を考慮した震源のモデル化

震源近傍である女川原子力発電所やその付近の観測記録には、WP1 と WP3 の初めに顕著なパルス波形が見られる。このパルス波形は、図 6 (a) に示す宮城県付近の記録のペーストアップから、伝播していることがわかる。すなわち、これはサイトの影響ではなく震源特性であるといえる。このような記録の観測は、松島・川瀬（2006）でも述べられており、彼らは、この部分をスーパーアスペリティと呼び、非常に大きな応力降下量が解放されたと考えれば、再現可能であることを示した。本研究では、SMGA 内に特に大きな応力降下量が解放される不均質な部分があると考えて震源モデルを構築し、パルス波形の再現を試みた。不均質部分は、観測記録を分析して、図 6(b) の模式図に示すように、SMGA 1 では破壊開始点の場所に、SMGA3 は破壊開始点よりも 1 メッシュ分陸側に設定した。図 7（上図）に uniform モデル、（中図）に不均質部分の応力降下量を 2 倍したモデル、（下図）に不均質部分の応力降下量を 4 倍にしたモデルのシミュレーション波形を示す。観測波形とシミュレーション波形との比較から、WP1 は応力降下量が 2 倍、WP3 は 4 倍程度で再現可能と考えられる。

6. 他研究者の波形インバージョン結果と短周期強震動生成域との比較

東北地方太平洋沖地震では、津波や地殻変動データ、遠地実体波、強震動など様々なデータが観測されており、それらのデータを用いて震源モデルの構築がされている。

図 8 (a) に Ishii（2011）による P 波の遠地実体波記録を用いた短周期（0.8 ～ 2.0Hz）の energy release areas を示す。背景図の赤色が energy release の大きな場所であり、宮城県沖の部分は調和的であるが、SMGA の破壊の順番は異なっている。私たちは、一般的に、近地記録の方が多くの情報を持っていると考えている。

図 8 (b) には Yokota et al（2011）による長周期の強震動（10 秒～ 100 秒）を用いた波形インバージョン結果を示す。これらのモデルと本研究による短周期の SMGA の場所は概ね一致している。

一方で、図 8(c) の地殻変動記録を用いたすべり分布や図 8 (d) の津波データによるすべり分布からみられるすべりの大きい部分は、震源よりも海溝側であり、短周期生成域とは大きく異なることがわかる。

最後に図 9 に地震調査研究推進本部で発表されている海溝型地震の長期評価のセグメントとの比較図を示す。本研究で構築した SMGA は、宮城県沖や福島県沖などの各セグメントの位置と調和的であり、各セグメントに存在する SMGA が破壊されたと考えられる。

7. まとめ

本研究では、震源近傍で観測された強震動記録を用いて、短周期の強震動生成域の構築を、経験的グリーン関数法を用いて実施した。まとめを以下に示す。

- ・観測記録は、5つのウェーブパケット (WP) で構成されており、その発生源は強震動生成域 (SGAM) として、センブルス解析により強震動生成域 (SMGA) の生成場所を推定した。その結果、WP 1 の場所は陸側、WP 3 は WP 1 よりも沖側であった。
- ・推定したモデルで解析された計算波形は、観測記録と整合的であり、モデルの妥当性を示している。
- ・震源近傍で観測された明瞭なパルス波形は、SMGA 内の不均質性を考慮することで再現可能であることを示した。
- ・観測された様々なデータとそれを用いた解析結果から、観測記録が生成された場所は、同じ場所ではないことがわかり、短周期地震動は陸に近い場所で生成されたことがわかった。
- ・推定された SMGA の場所は、長期評価で示されるセグメントの位置と調和的であり、本地震は、各セグメントの SMGA は破壊した地震であることがわかった。

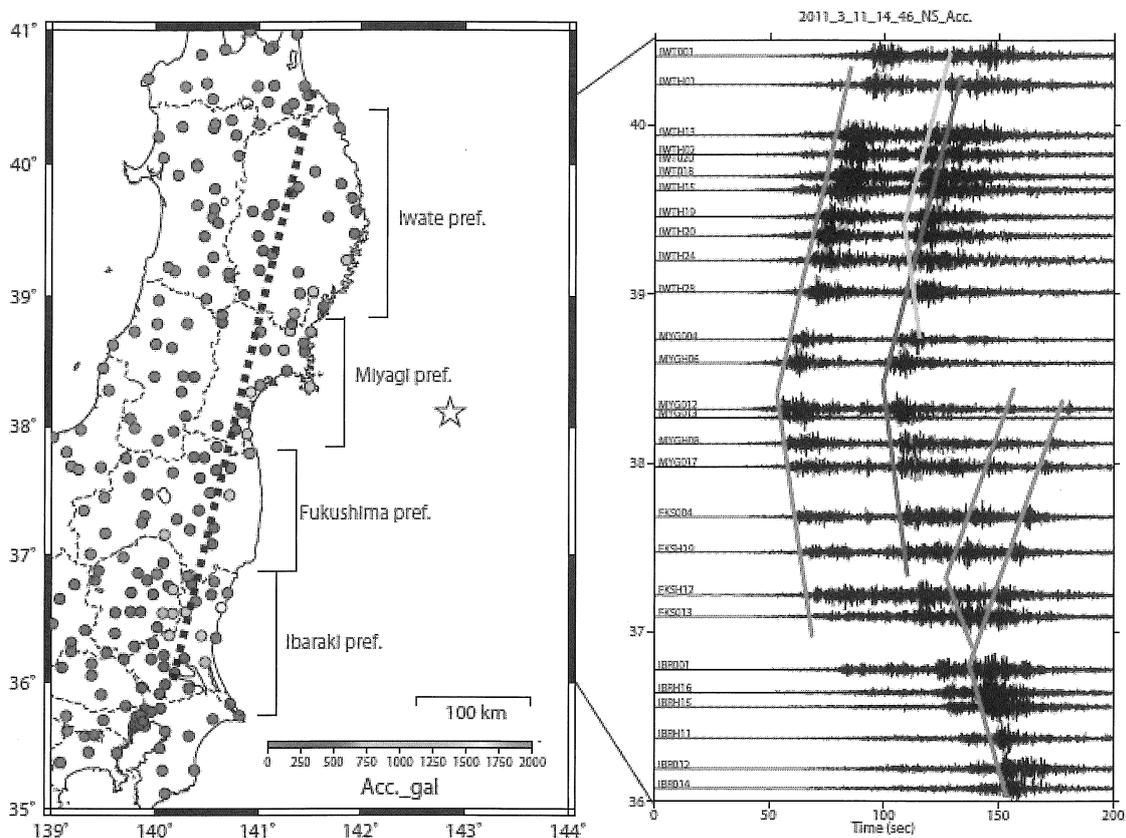


図1 太平洋沖地震の加速度分布 (a) と強震動記録のペーストアップ (b)

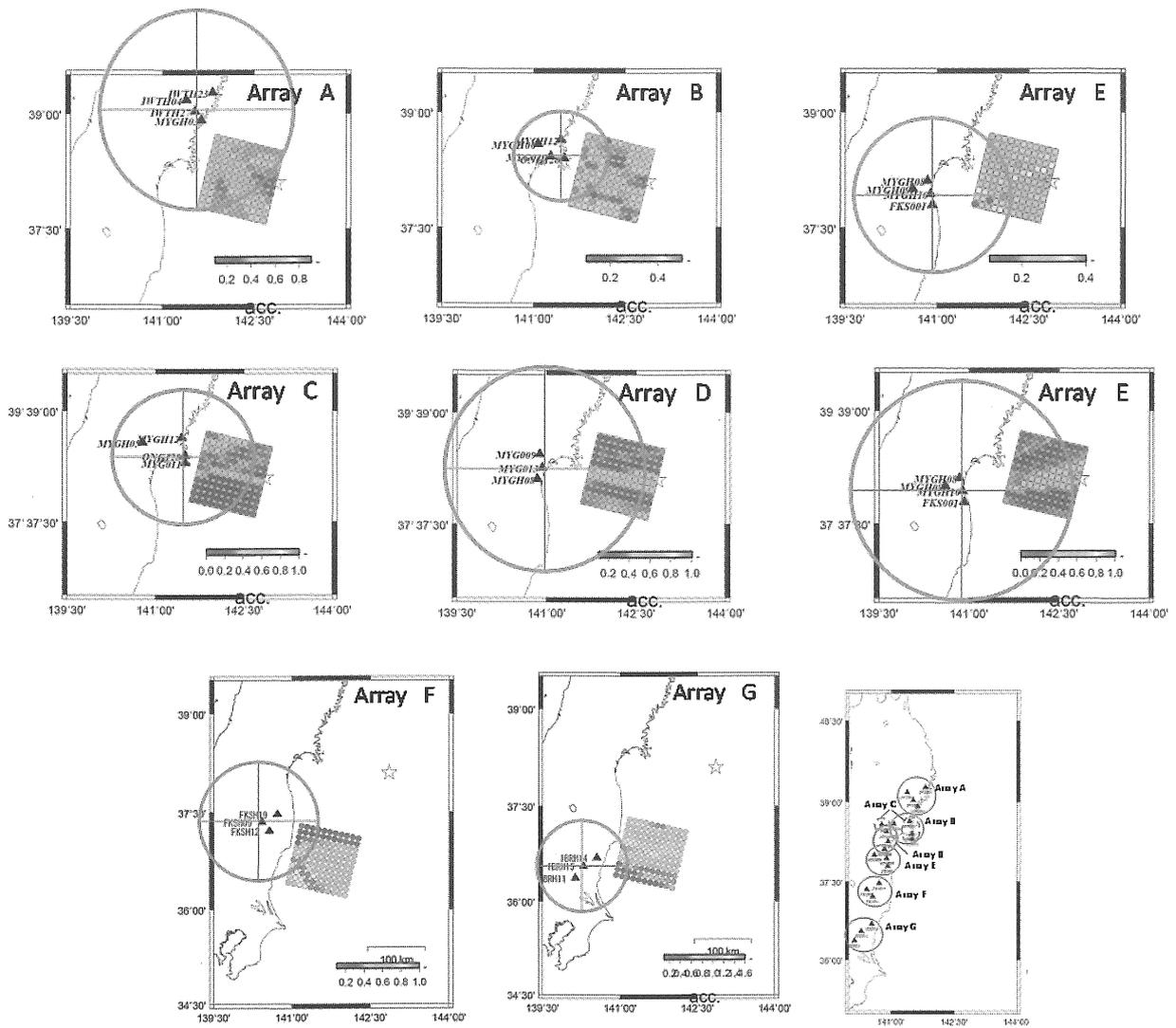


図2 各アレーにおけるセンブランス解析結果 (a) とアレー点 (b)

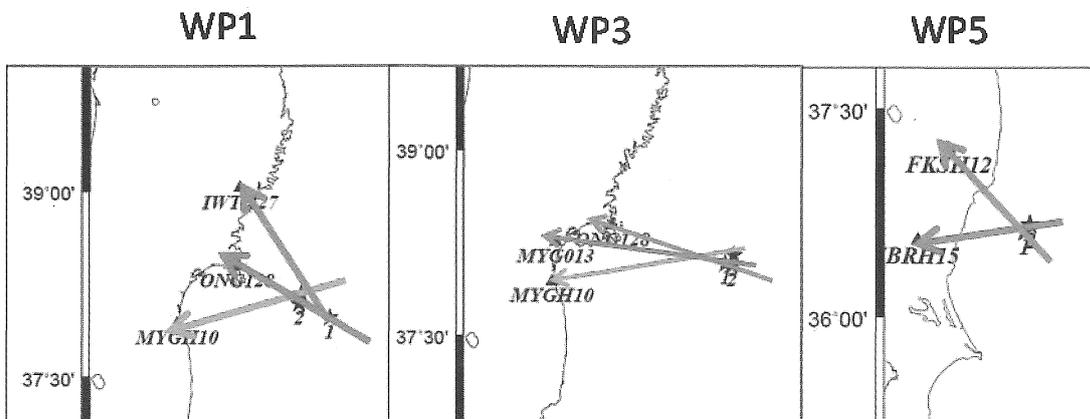


図3 各アレーの記録からセンブランス解析から推定された点の交点

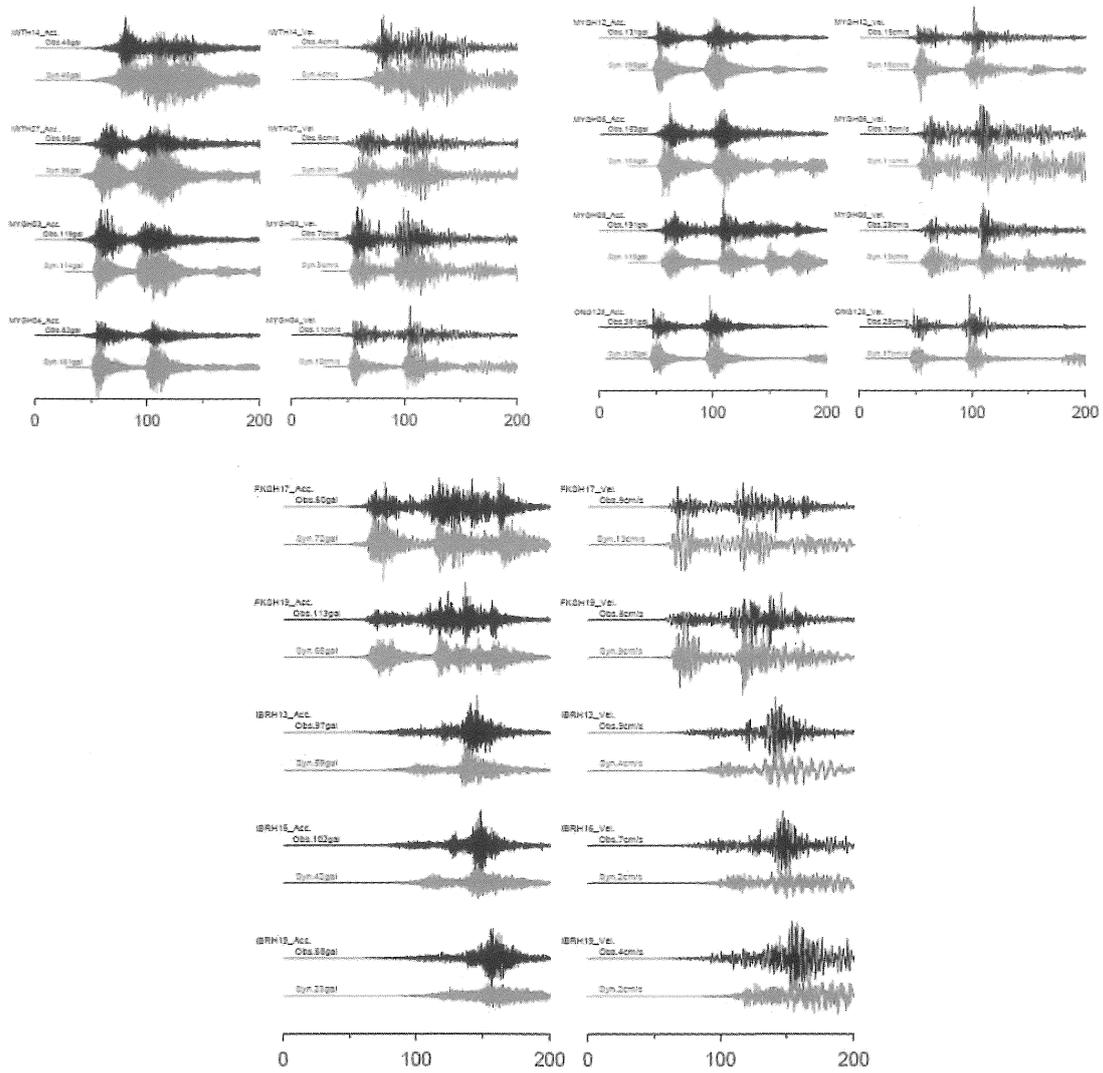


図4 観測記録（黒）と経験的グリーン関数法による合成波形（赤）との比較。

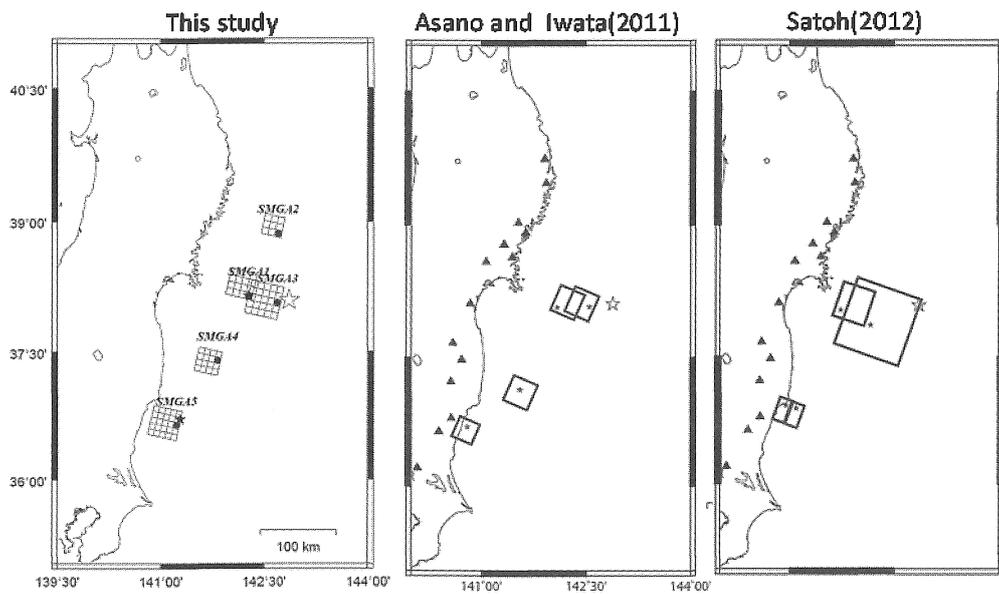


図5 本研究および浅野・岩田（2011）、佐藤（2012）のよる強震動生成域

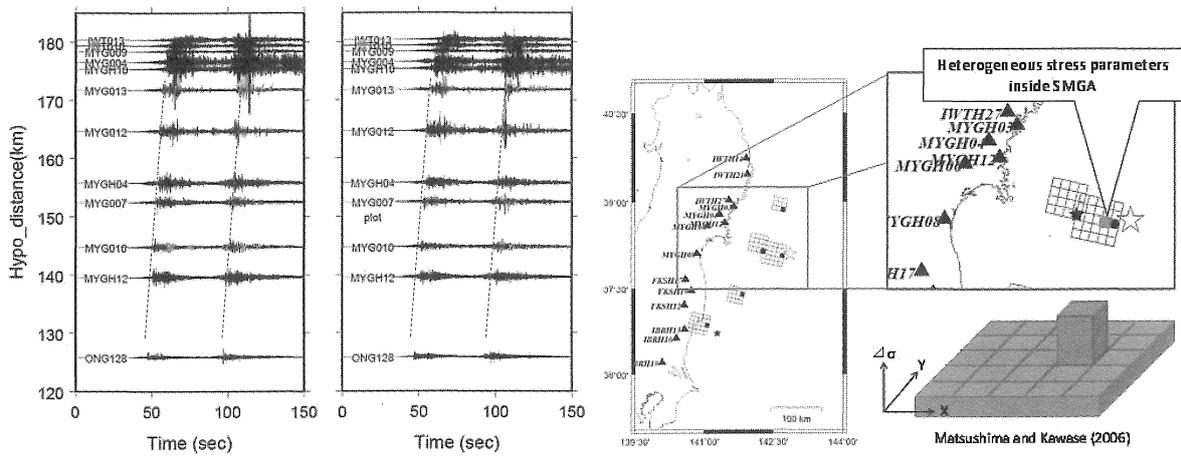


図6 (a) 宮城県付近の観測記録と (b) 不均質モデルの模式図

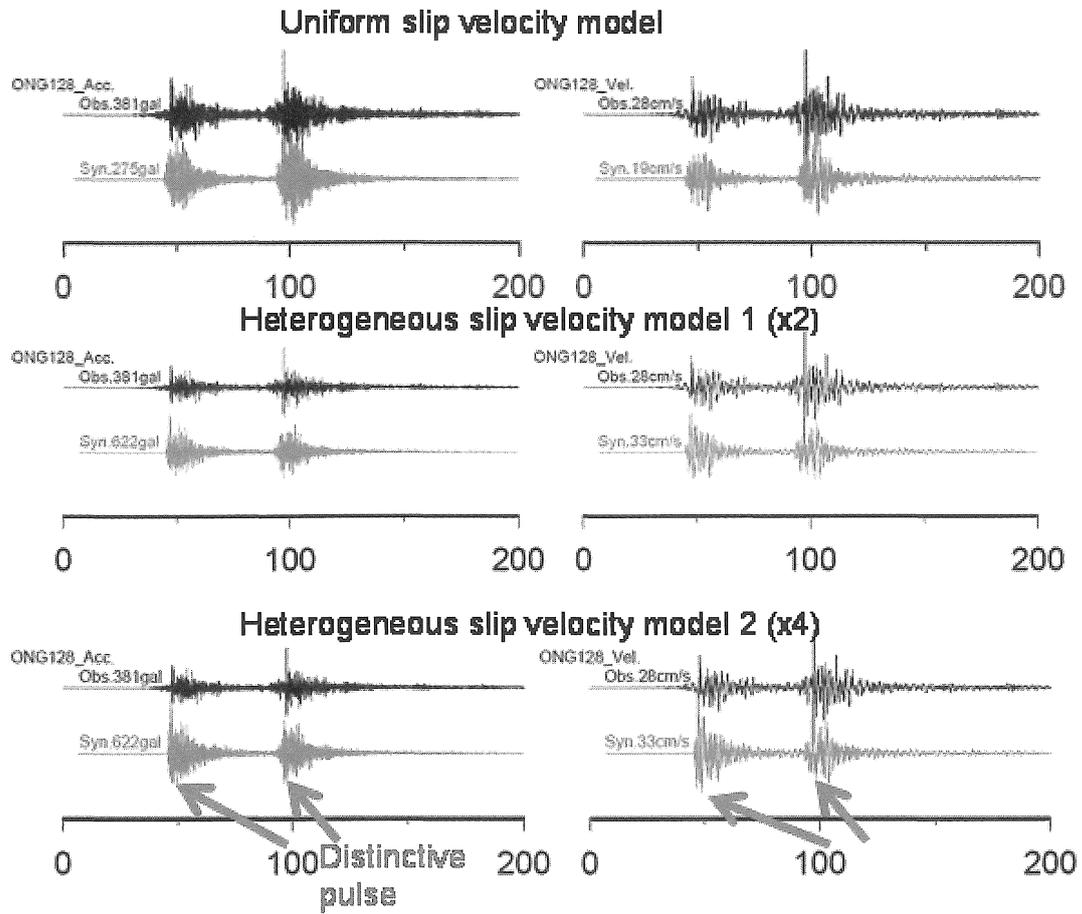


図7 観測記録と不均質を考慮した場合のシミュレーション波形

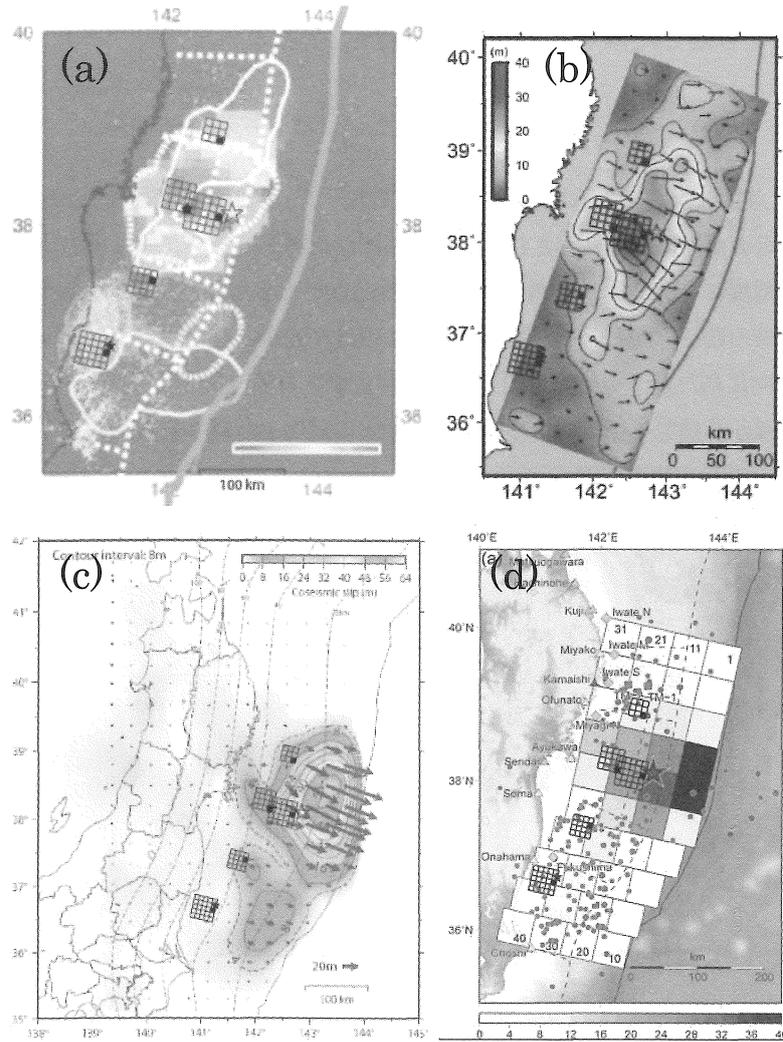


図8 様々な観測記録を用いて推定された震源モデルと短周期強震動生成域の比較 (a) Ishii (2011) によるP波実体波を用いた energy release area、(b)Yokota et al.(2011) による長周期強震動を用いたすべり分布、(c) 国土地理院 (2011) による地殻変動を用いたすべり分布、(d)Fujii et al,(2011) による津波を用いたすべり分布。

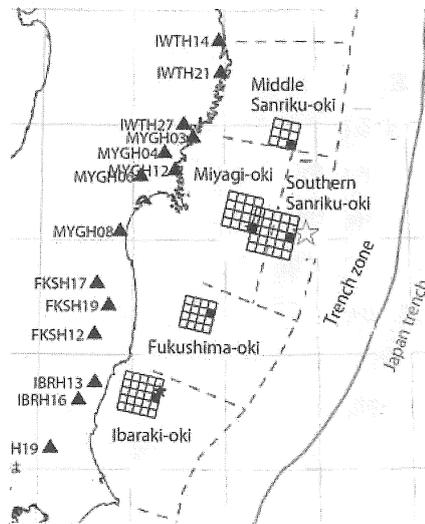


図9 地震調査研究推進本部による海溝型地震の長期評価によるセグメントとSMGAの場所の比較