

日本海溝海底地震津波観測網 S-net を用いた福島県沖と宮城県沖の地震の震源・地震動特性

佐藤 智美

(技術研究所)

Source and ground motion characteristics of off Fukushima and Miyagi earthquakes using Seafloor observation network for earthquakes and tsunamis along the Japan Trench “S-net”

Toshimi Satoh

海域の S-net と陸域の強震記録を用いて、2021 年と 2022 年の福島県沖の地震、2021 年 3 月と 5 月の宮城県沖の地震の広帯域震源モデルと地震動特性について記述した。2022 年の福島県沖地震では、S-net を用いていない既往の震源モデルですべり量が大きくない北部の浅部の 2 つの強震動生成域の寄与により、2021 年の福島県沖の地震に比べ宮城県北部や岩手県南部の地震動が大きくなったことがわかった。両宮城県沖の地震は、破壊開始点から東の up-dip 側に強震動生成域がある点は 1978 年宮城県沖地震・2005 年宮城県沖の地震とは異なるが、短周期レベルが大きい特徴は同じであることがわかった。

The author showed the broadband source models and the ground motion characteristics of the off Fukushima earthquakes in 2021 and 2022, and off Miyagi earthquakes in March and May, 2021. Two strong motion generation areas at the northern shallow region of the 2022 off Fukushima earthquake contribute to large ground motions in northern Miyagi and southern Iwate prefectures. The strong motion generation areas of the both 2021 off Miyagi earthquakes located at up-dip side, which is different from the 1978 and 2005 off Miyagi earthquakes. The short-period spectra were large, which is the same to the 1978 and 2005 off Miyagi earthquakes.

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震($M7.3$)を契機に、防災科学技術研究所の K-NET¹⁾、KiK-net¹⁾、気象庁の震度計をはじめとする陸域での強震観測点が急激に増大した。さらに、2011 年東北地方太平洋沖地震を契機に、防災科学技術研究所により日本海溝海底地震津波観測網 S-net²⁾⁴⁾が整備され、2016 年以降の連続観測記録が入手できるようになった。したがって、現在では、北海道から関東に至る日本海溝沿いの地震の近傍を含む全方位の強震記録を用いることが可能となっている。

筆者⁵⁾⁷⁾は、強震動予測のための震源のモデル化の高度化を目指し、S-net と陸域の強震観測記録を用いて、スラブ内地震である 2021 年福島県沖の地震($M7.3$, 深さ 55.4km)と 2022 年福島県沖の地震($M7.4$, 深さ 56.6km)、プレート境界地震である 2021 年 3 月($M6.9$, 59.5km)と 5 月($M6.8$, 51.4km)の宮城県沖の地震の広帯域震源

モデルを推定している。本研究では、これらの震源モデルの概要を記述する。地震動が大きかった 2 つの福島県沖の地震については既往の地震動予測式や地下構造モデルを用いて、地震動特性を分析する。さらに、推定震源モデルを用いて地震動シミュレーションを行ない、大振幅地震動の要因を明らかにする。また、2 つの宮城県沖の地震の震源域では、2011 年東北地方太平洋沖地震後に地震活動が活発化し、繰返し地震も発生している⁸⁾。したがって、2011 年東北地方太平洋沖地震後に応力場が変化したと考えられる。そこで、1978 年宮城県沖地震($M7.4$)と 2005 年の宮城県沖の($M7.2$)の震源特性との比較検討結果⁶⁾を詳述する。

2. 2021 年と 2022 年の福島県沖の地震

2.1 地下構造と距離減衰特性

2021 年 2 月 13 日(20210213)と 2022 年 3 月 16 日(20220316)に福島県沖で発生した地震は、震源

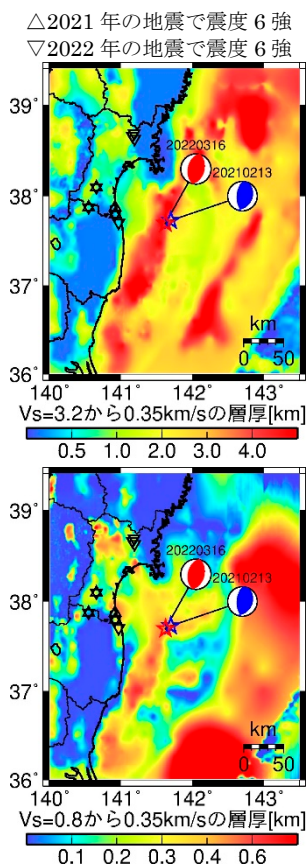
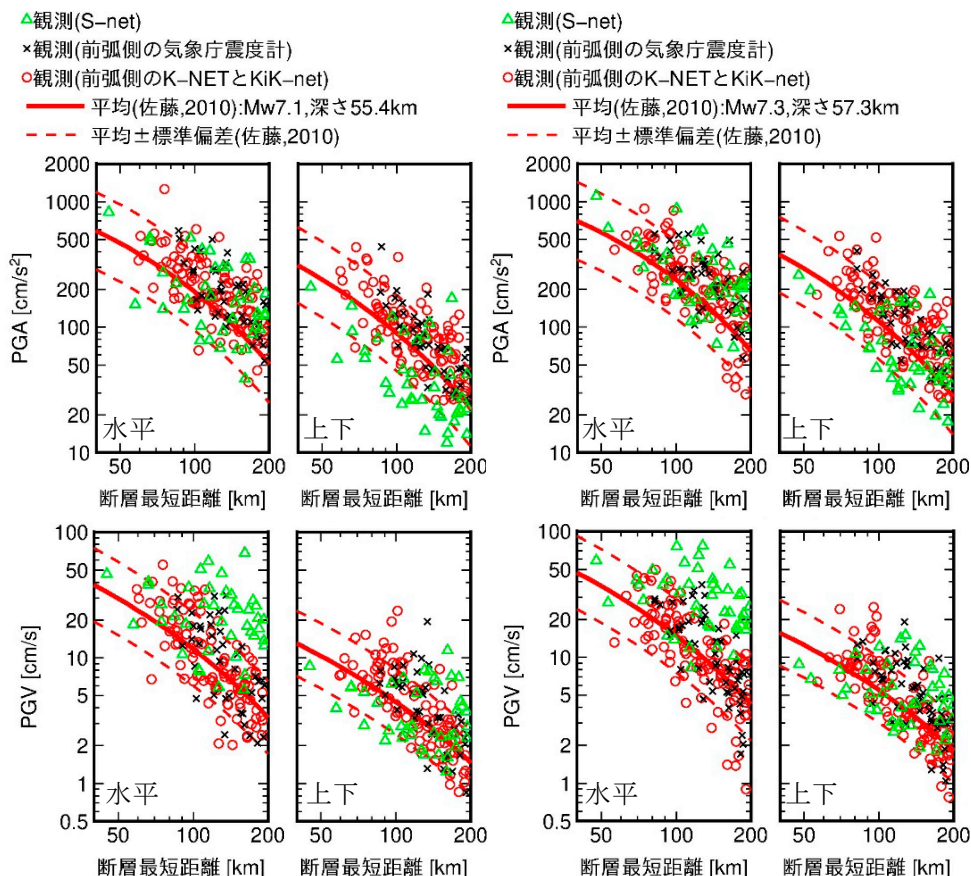


図-1 2021年と2022年の福島県沖の震央・メカニズム解と震度6強の地点¹⁰⁾、堆積層厚^{11),12)}



(a) 2021年福島県沖の地震

(b) 2022年福島県沖の地震

図-2 前弧側の観測PGA・PGVと太平洋プレートのスラブ内地震の地震動予測式¹³⁾の比較

位置に近い逆断層のスラブ内地震であった。図-1に、両地震の震央位置(気象庁)・F-net⁹⁾のメカニズム解と最大震度6強の地点¹⁰⁾を、三次元地下構造モデル^{11),12)}に基づく堆積層厚とともに示す。両地震で共通の震度6強の地点は3地点であり、2022年の地震では宮城県北部の登米市の3観測点でも震度6強を観測している¹⁰⁾。S波速度 $V_s=3.2\text{km/s}$ 層上面から 0.35km/s 層上面までの堆積層厚は、陸域に比べ海域で厚い。 $V_s=0.8\text{km/s}$ 層上面から 0.35km/s 層上面までの層厚も同様の傾向があるが、陸域でも厚い地域がある。震度6強の地点では周囲に比べて堆積層が厚い傾向がある。

図-2には、両地震の地表での観測最大加速度PGA・最大速度PGVと太平洋プレートのスラブ内地震に対する前弧側での地震動予測式¹³⁾との比較を示す。S-netの波形はTakagi et al.¹⁴⁾の推定姿勢角で補正し、DCオフセットがTakagi et al.¹⁴⁾の推定値と異なるデータは除いた。予測式と同様に、観測波に $0.2\sim 15\text{Hz}$ のバンドパスフィルターをかけた波形からPGA・PGVを算出し、水平成分は予測式と観測値とも水平2成分の幾何平

均値を表示した。断層面は、後述の強震動生成域探索面であるが、2021年の地震についてはプレート上面深さ^{11),12)}を考慮して浅部の幅8kmは除いた。断層面の走向、傾斜角、 M_w はF-netの値である。地震動予測式¹³⁾作成に用いられているK-NETとKiK-net地表の観測PGA、PGVは、水平・上下成分とも断層最短距離100km程度以下では、平均と平均+標準偏差の間のレベルにあることがわかる。気象庁震度計の記録¹⁵⁾も同様である。したがって、両地震の地震動は、太平洋プレートのスラブ内地震の平均より大きかったことがわかる。なお、2021年福島県沖地震の水平成分のPGAが特異に大きいのはMYGH10(KiK-net山元)であり、この地震動特性については後述する。

水平成分のPGVは、S-netの方が陸域のK-NET、KiK-net、気象庁震度計より大きい特徴がある。これは、図-1で示したように海域では堆積層が厚いためと考えられる。一方、上下成分のPGAは、S-netの方が陸域の記録より小さい特徴がある。これは、海底ではP波速度が 1.5km/s 以下程度にならないため、陸域で見られる極表層の軟弱

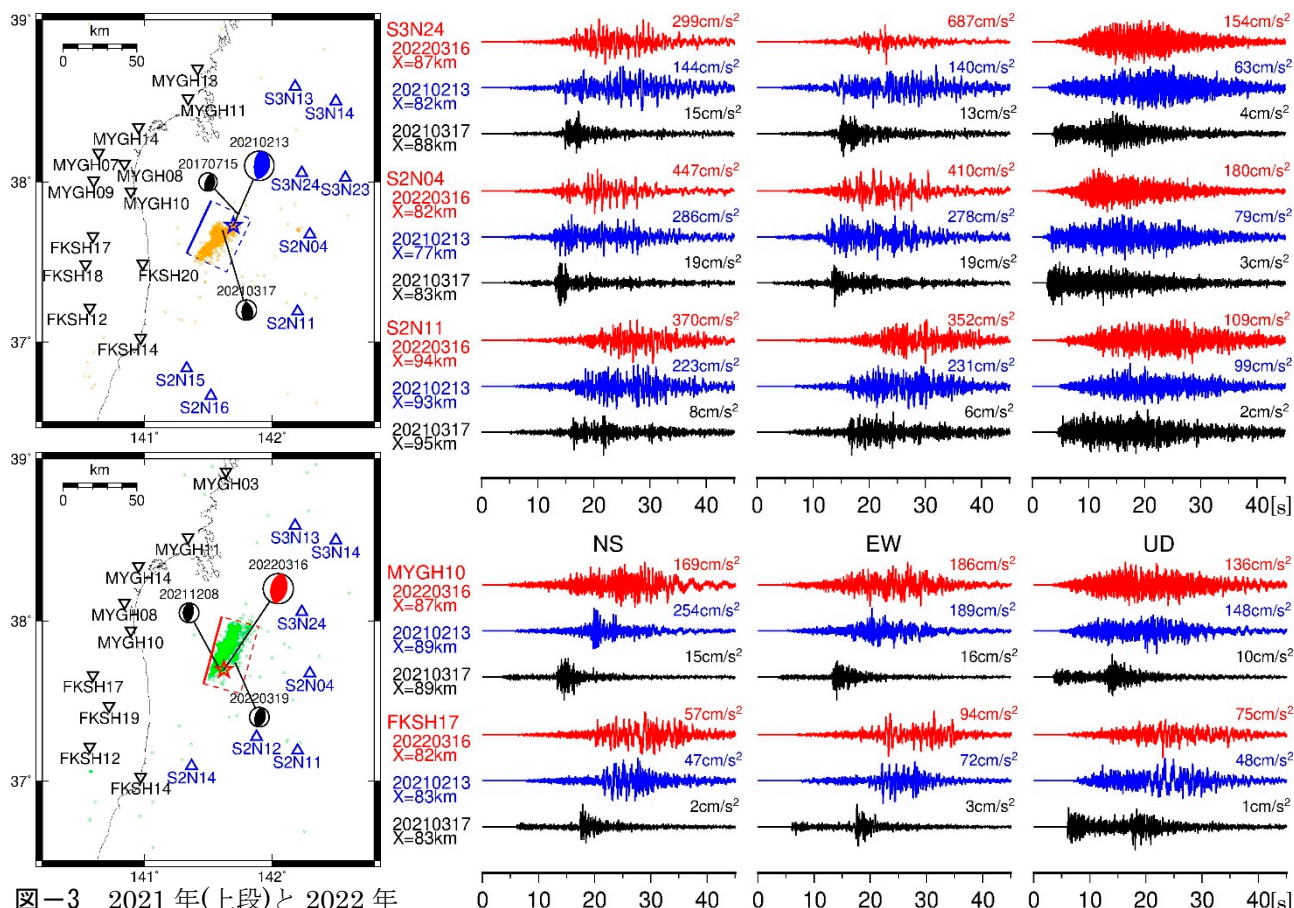


図-3 2021年(上段)と2022年(下段)の福島県沖の地震の強震動生成域探索面・余震分布(橙と緑)・要素地震と観測点位置

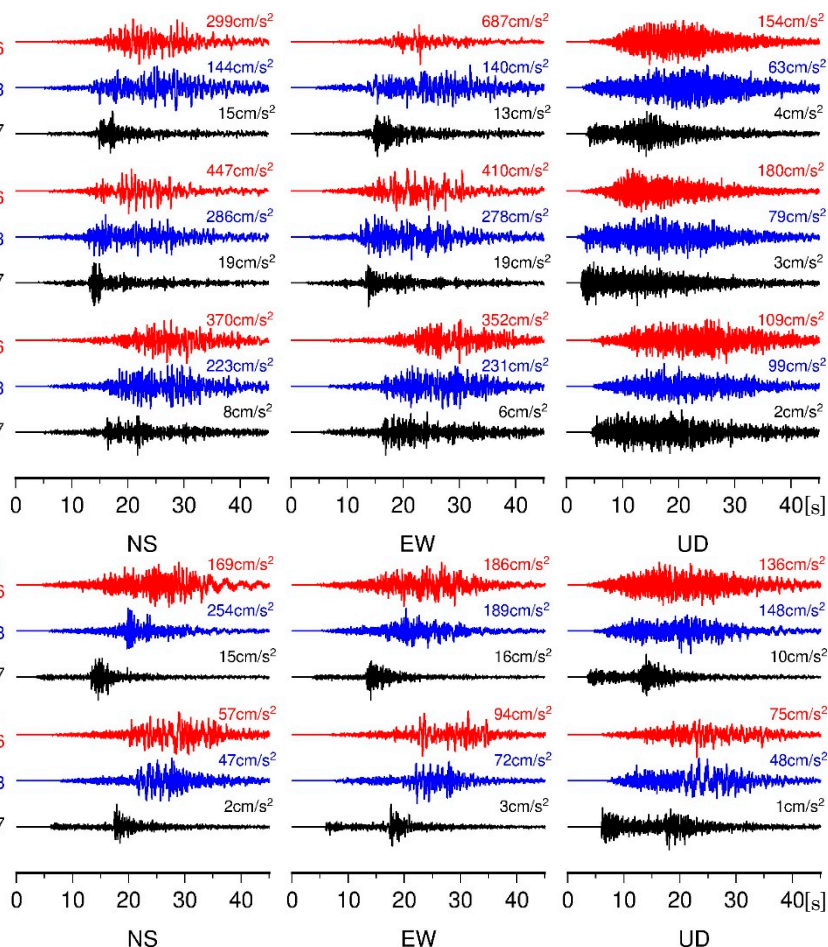


図-4 2021年と2022年の福島県沖の地震と要素地震20210317のS-net(上段)とKiK-net地中(下段)での観測加速度波形(赤=20220316、青=20210213、黒=20210317)

表-1 要素地震の諸元

地震番号	年/月/日*	深さ [km]	M_j^\dagger	M_w^\ddagger	M_0^\ddagger [Nm]	f_0 [Hz]	$\Delta\sigma$ [MPa]
20170715	2017/7/15	57.0	4.6	4.5	6.42×10^{15}	3.16^\ddagger	27^\ddagger
20210317	2021/3/17	57.3	5.2	5.0	3.76×10^{16}	2.66^\ddagger	94^\ddagger
20211208	2021/12/8	53.2	5.0	4.8	1.75×10^{16}	3.53^\S	102^\S
20220319	2022/3/19	57.6	5.0	4.8	2.02×10^{16}	2.84^\S	62^\S

*気象庁 †F-net ‡佐藤⁵⁾ §佐藤⁷⁾

層による高周波数の増幅がないためと考えられる。このように、陸域と海域では地盤増幅特性が異なり、特に海域は堆積層が厚いため、震源モデルの推定にはこの影響を考慮することが重要となる。

2.2 観測波形と広帯域震源モデル

佐藤^{5),7)}では、経験的グリーン関数法¹⁶⁾に基づき両福島県沖の地震の広帯域震源モデルを推定している。2022年福島県沖地震に対しては、改良したバックプロジェクション法により強震動生成域の探索範囲を限定後、経験的グリーン関数法を適

用している⁷⁾。経験的グリーン関数法は、要素地震に地盤増幅特性と伝播特性が含まれているため、堆積層が厚いS-net観測点の記録を用いても精度よく広帯域震源モデルが推定できる。

図-3には、両地震の強震動生成域の探索範囲と両地震・要素地震及び強震観測点の位置を示す。本震後1日以内の余震分布(気象庁)も示している。余震は、2021年の地震では震央の南側に伸びているのに対して、2022年の地震では北側に伸びている。S-netとKiK-net地中観測点は、震源を取り囲むように選択した。本震と要素地震が共通に観測されていることが必要となるため、両地震で用いる観測点は同一ではないものの共通の観測点が多い。表-1には、要素地震の諸元を示す。コーナー周波数 f_0 、応力降下量 $\Delta\sigma$ は、基準となる中規模地震との震源スペクトル比を用いて推定している^{5),7)}。経験的グリーン関数法¹⁶⁾では、要素地震を $2\text{km} \times 2\text{km}$ のサイズに補正して用いている。

図-4には2021年と2022年の福島県沖の地震と、両地震と震源に近い要素地震20210317の発震時

ら 10 秒後以降の観測加速度波形を示す。図中の X は震源距離である。S-net(上段)の水平 2 成分の波形は、2021 年の地震は 20210317 の S 波初動とほぼ同じ時間で振幅が大きくなっていることから、破壊開始点(図-1 の星印)近くに強震動生成域があると考えられる。2022 年の地震は S2N04 では 20210317 の S 波初動とほぼ同じ時間で振幅が大きいが、他の観測点では不明瞭であるため、震源近くに強震動生成域があるがその短周期レベルは相対的に小さいと考えられる。一方、KiK-net 地中の観測点では、両地震とも 20210317 の S 波初動とほぼ同じ時間で振幅は小さく、P コード波も混在している。したがって、KiK-net のみを用いた場合、震源に近い強震動生成域の推定が困難となると考えられる。

推定された強震動生成域を図-5 に示す。水平 2

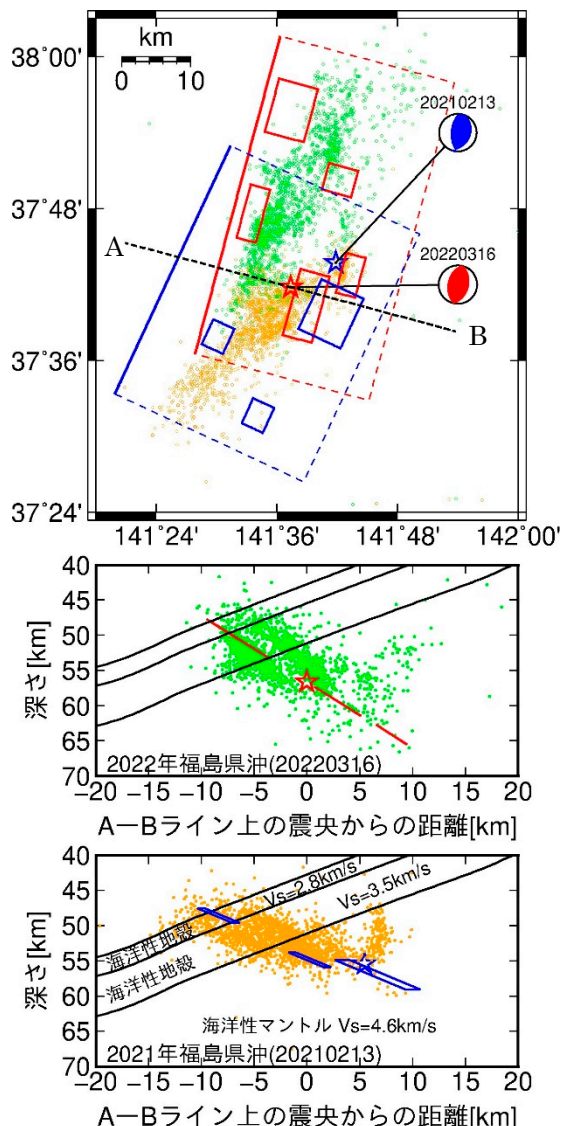
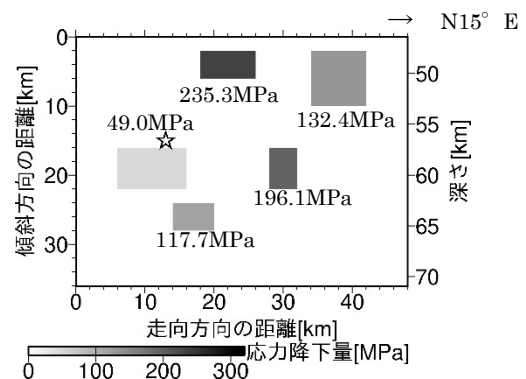


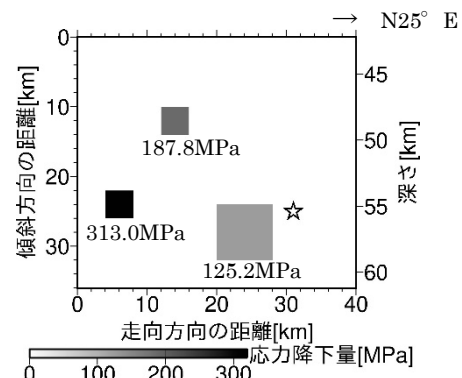
図-5 2021年と2022年の福島県沖の地震の強震動生成域^{5),7)}・余震分布(気象庁)と地下構造^{11),12)}(文献7に加筆)

成分の 0.2~10Hz の加速度波形のエンベロープと 0.2~3Hz の速度波形の計算波が観測波に合うように推定された広帯域震源モデルである。両地震とも、S-net の記録を用いていない既往の震源モデル^{例えは17)-19)}ではすべり量が大きくない破壊開始点(気象庁の震源位置)付近にも強震動生成域があるのが大きな特徴である。2022 年の地震では、既往の震源モデル¹⁹⁾ではすべり量が深部に比べて小さい北部の浅部に 2 つの強震動生成域が推定されている。また、2021 年の地震の南端の強震動生成域を除き、余震発生域の端部に強震動生成域がある。両地震とも、強震動生成域は 1 日以内の余震分布とはほとんど重なっていない。

図-5 の下段は、上段の A-B ラインでの断面図であり、三次元地下構造モデル^{11),12)}に基づく海洋性地殻上部と下部、海洋性マンツルの境界線および S 波速度 V_s も示している。両地震とも 1 日以内の余震分布のほぼ最浅部と最深部の間に強震動生成域がある。両地震とも浅部の強震動生成域は海洋性地殻に、深部の強震動生成域は海洋性マンツルに位置している。破壊開始点(気象庁の震源位置)から同心円状に破壊伝播すると仮定しており、推定された 2021 年と



(a) 2022 年福島県沖の地震



(b) 2021 年福島県沖の地震

図-6 2021年と2022年の福島県沖の地震の強震動生成域の位置と応力降下量^{5),7)}(文献7に加筆)

2022年の地震の破壊伝播速度は、それぞれ、2.4km/s、2.3km/s とほぼ同じであった。なお、2021年の地震では、破壊開始点付近の強震動生成域に 20210317 を、その他は 20170715 を要素地震として用い、2022年の地震では浅部の 2 つの強震動生成域に 20211208、その他は 20220319 を用いている。

図-6には、強震動生成域の位置と応力降下量を示す。破壊開始点に近い強震動生成域は、2021年の地震の方が2022年の地震より面積がやや大きく、応力降下量が倍以上である。この違いは、図-4のS-net観測点のS波初動の振幅の特徴と整合する。

2.3 地震動シミュレーション

2021年と2022年の地震の推定広帯域震源モデルを用いて、経験的グリーン関数法¹⁶⁾により震源距離150km以下のK-NET、KiK-net地表、S-netの水

平・上下成分の地震動シミュレーションを行った。0.2~10Hzのフィルター波から算出した観測波と計算波の計測震度を図-7に示す。計算波の計測震度は、経験式²⁰⁾で地盤の非線形性を考慮した場合としない場合である。2021年と2022年の地震の観測の計測震度分布は類似しているが、宮城県北部や岩手県南部では2022年の方が大きい傾向がある。計測震度分布はこの傾向を再現しており、地盤の非線形性を考慮した場合の方がより観測に合う。2022年の地震の震源に近い陸域では、北側の浅部の2つの強震動生成域の寄与が大きく、これが2つの福島県沖の地震の震度分布の違いの要因であると考えられる。なお、2021年福島県沖の地震の南東側のS-netの計測震度が過小評価の原因は、本震では表面波が卓越しているが、用いた要素地震がやや深いため表面波の卓越が小さかったためと解釈している⁵⁾。

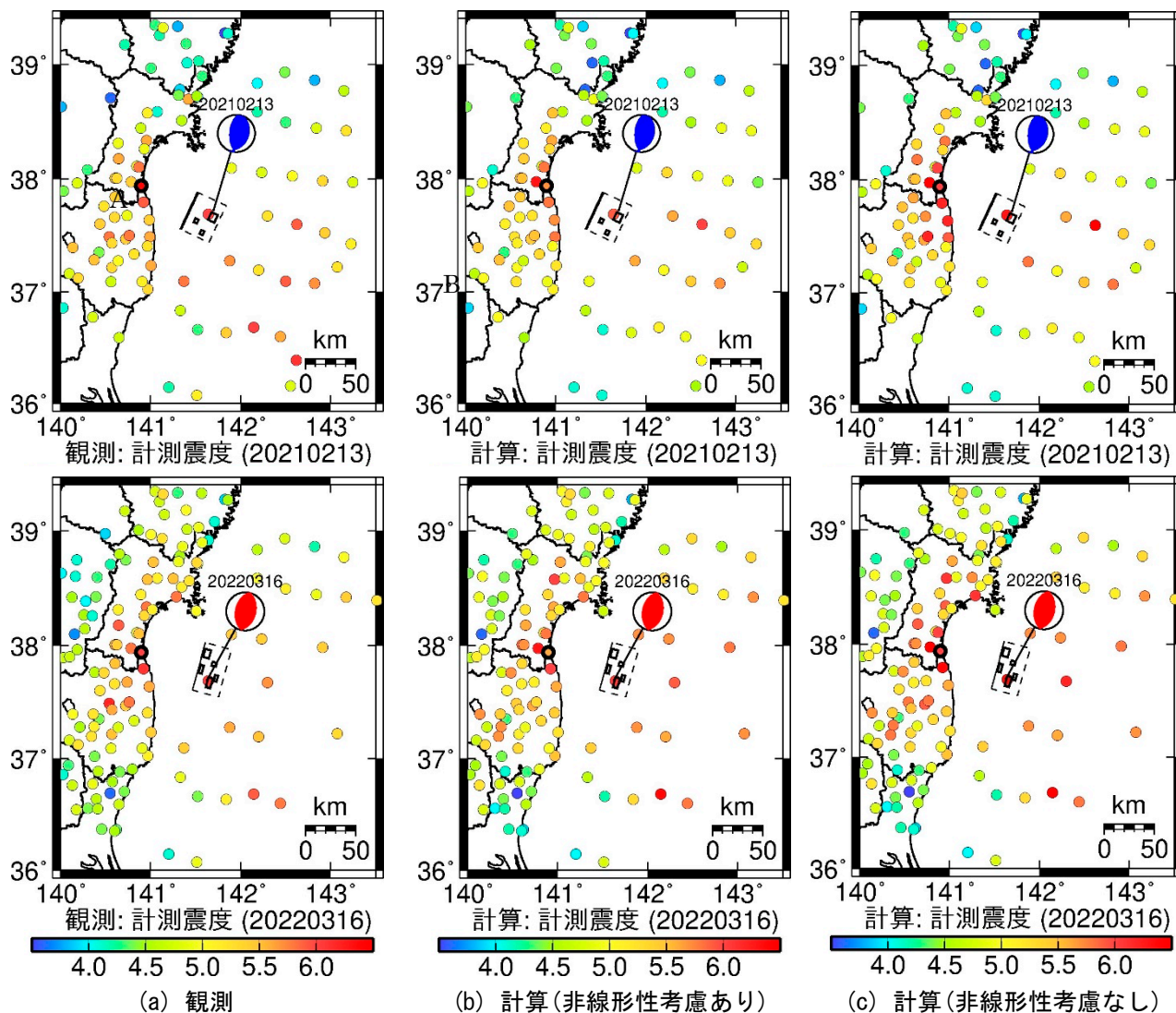


図-7 2021年(上段)と2022年(下段)の福島県沖の地震の観測計測震度と、地盤の非線形性を考慮した場合としない場合の計算計測震度、及び、震源モデル(太枠の丸はMYGH10)

図-7 に太線の丸で示した観測点は MYGH10 (KiK-net 山元)である。KiK-net 観測点は、気象庁が公表する震度観測点には含まれていないが、図-1 に示したように MYGH10 周辺では震度 6 強を観測している。2021 年の地震では、MYGH10 で K-NET と KiK-net 観測点で最大の計測震度 6.4(震度 6 強相当)となった。2022 年の地震でも、K-NET と KiK-net 観測点では計測震度が 3 番目に大きい 6.0 を観測している。MYGH10 の地中の 0.2~10Hz の観測加速度波形は図-4 に示しているが、2021 年の地震の NS 成分が 2022 年の地震に比べ明らかに大きい。

図-8 には、MYGH10 の地中(GL-205m)に対する地表(GL0m)の観測スペクトル比を示す。佐藤²¹⁾で検討されている、逆断層のスラブ内地震である $M7.2$ 、深さ 65.9km の 2011 年 4 月 7 日の宮城県沖地震(20110407)と中規模スラブ内地震の平均値・平均値±標準偏差に、2021 年と 2022 年の福島県沖の地震を加筆したものである。図中の数字は、3 地震の PGA である。PGA が大きい 3 地震の水平成分は、中規模スラブ内地震のスペクトル比に比べ高周波数

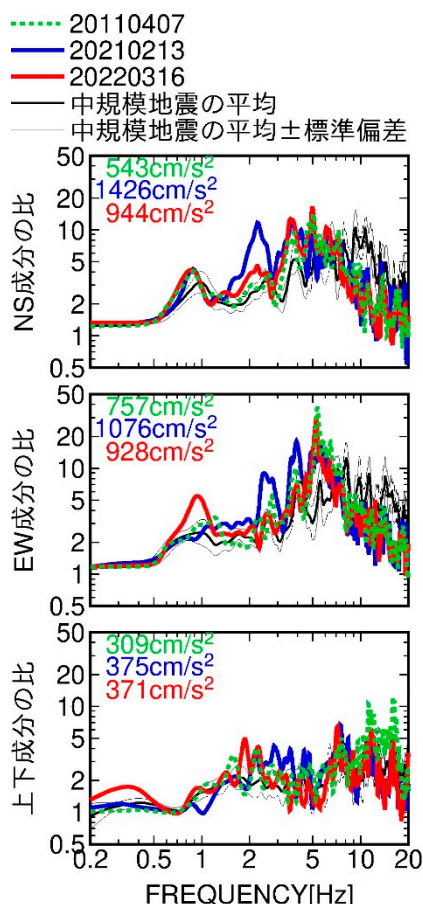


図-8 2021 年と 2022 年の福島県沖の地震と 2011 年宮城県沖の地震及び中規模スラブ内地震の MYGH10 での地中(GL-205m)に対する地表のフーリエスペクトル比

領域で小さくなっており、地盤の非線形性の影響があることがわかる。しかし、5Hz 程度以下では、3 地震のスペクトル比が中規模地震より大きい傾向がある。特に、PGA が 1000cm/s^2 を超える 2021 年の福島県沖の地震では 2~3Hz でこの傾向が強い。図-7 で地盤の非線形性を考慮した場合に MYGH10 で過小評価となるのは、両福島県沖の地震では強震時の方が 5Hz 程度以下での増幅が大きく、地盤の非線形性を補正する経験式作成に用いたデータ²⁰⁾の平均的特徴と異なるためと考えられる。

図-9 には、MYGH10 での 2021 年と 2022 年の福島県沖の地震の減衰定数 5%の観測擬似速度応答スペクトルを告示スペクトル(極くまれ)とともに示す。地中での水平成分は、2021 年の地震では 0.3s 付近で大きく、2022 年の地震では 0.7s と 3s 付近で大きい特徴がある。2021 年の地震では、MYGH10 には南部の 2 つの強震動生成域の寄与が大きい、破壊伝播方向になく面積も小さい。これが 0.3s 程度の短周期の地震動に寄与したと考えられる。一方、2022 年の地震では、MYGH10 が応力降下量の大きな浅部の強震動生成域から破壊進行方向にあり、北部浅部の面積が大きな強震動生成域も近いことから、0.7s と 3s 程度のやや長周期の地震動が卓越したと考えられる。

両地震の地表の水平成分が 0.2s 付近で大きいのは、図-8 で示したように地盤増幅の影響である。両地震とも 3s 付近の地中と地表のスペクトルレベルはほぼ同じであることから、地中(GL-205m)での 3s のピークには GL-205m 以深での地盤増幅と震源特性が寄与していることがわかる。GL-205m での V_s は 0.77km/s であるが、図-1 の V_s $0.35\sim 0.8\text{km/s}$ の層厚が MYGH10 周辺で厚い。

鈴木²²⁾は、微動に基づき MYGH10 での地下構造

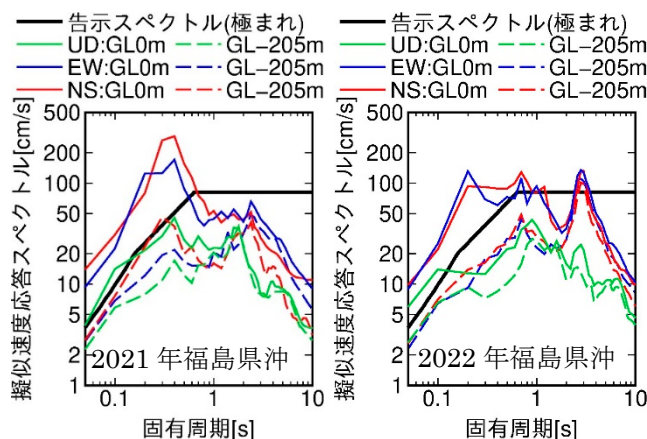


図-9 2021 年と 2022 年の福島県沖の地震の MYGH10 での観測擬似速度応答スペクトル

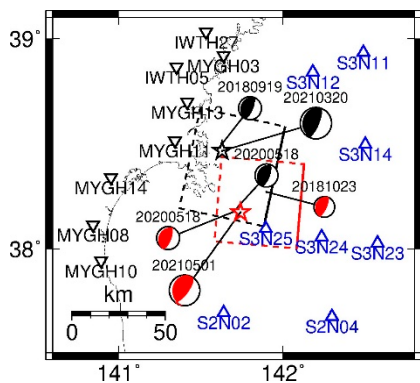


図-10 2021年3月(20210320)と5月(20210501)の宮城県沖の地震の強震動生成域探索面・要素地震と観測点位置(文献6に加筆)

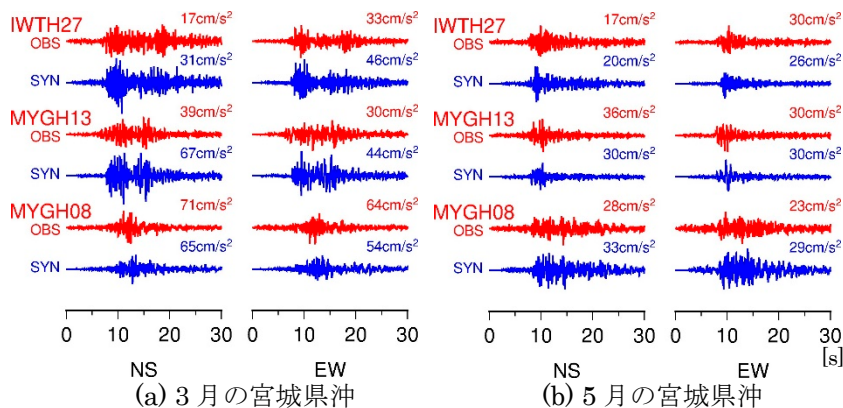


図-11 2021年3月(20210320)と5月(20210501)の宮城県沖の地震の観測(OBS)と計算(SYN)の加速度波形(文献6から抜粋)

表-2 要素地震の諸元

地震番号	年/月/日*	深さ* [km]	M_J^*	M_w^\dagger	M_0^\dagger [Nm]	f_0^\ddagger [Hz]	$\Delta\sigma^\ddagger$ [MPa]
20180919	2018/9/19	57.0	5.0	5.1	5.67×10^{16}	0.96	6.6
20181023	2018/10/23	45.8	4.7	4.6	1.16×10^{16}	1.77	8.6
20200518	2020/5/18	50.9	5.2	5.1	5.11×10^{16}	1.18	11.0

*気象庁 †F-net ‡佐藤⁶⁾

を推定し、3s 付近の増幅は双葉断層などの活動により MYGH10 周辺で地震基盤深さが 600m 程度に落ち込んでいるためとしている。鈴木²²⁾の推定地下構造は、 V_s 3km/s 弱の層の上に V_s 0.8km/s 程度の層が堆積しており、この大きな V_s コントラスト(あるいはインピーダンスコントラスト)が 3s 付近の卓越に寄与していると考えられる。したがって、2022 年福島県沖の地震の MYGH10 での 3s のピークは北部の浅部の 2 つの強震動生成域の寄与と、深部地盤での大きなインピーダンスコントラストによるものと解釈できる。

3. 2021年3月と5月の宮城県沖の地震

2021年3月(20210320)と5月(20210501)の宮城県沖のプレート境界地震では、最大震度5強が観測されている¹⁰⁾。本章では、経験的グリーン関数法¹⁶⁾で推定した両地震の広帯域震源モデルと、1978年宮城県沖の地震や2005年宮城県沖の地震の震源特性との比較検討結果を示す。

図-10には、両地震と要素地震の気象庁による震央位置とF-netのメカニズム解を、解析に用いた観測点とともに示す。震源を取り囲むようにS-netとKiK-net地中観測点を選択した。矩形は

強震動生成域の探索範囲であり、F-netのメカニズム解に基づき、気象庁の震源が載るように設定した。表-2には、要素地震の諸元を示す。経験的グリーン関数法¹⁶⁾では、3月の地震では、破壊開始点に近い強震動生成域の推定に20180919を、その他の強震動生成域の推定に20200518を、5月の地震では破壊開始点に近い強震動生成域の推定に20181023を要素地震として用いた。要素地震は3km×3kmのサイズに補正して用いている。

図-11には、両地震のKiK-net地中観測点での0.2~10Hzの観測加速度波形と計算波形の例を示す。波形右上の数字は最大加速度PGAである。3月の地震では、北側のIWTH27には3つの波群が見られ、継続時間が長いものに対して、南側のMYGH08では継続時間が短くなっている。中間にあるMYGH13ではその中間的特徴がある。一方、5月の地震では、南側のMYGH08で継続時間が長く、MYGH13、IWTH27では継続時間が短くなっていることがわかる。計算波形は、このような観測波形の特徴をほぼ再現している。

図-12には、両地震の強震動生成域の位置と応力降下量を示す。応力降下量は24~43MPaであり、スラブ内地震である2021年と2022年の福島県沖の地震と比べ小さい。図-13には、両宮城県沖の強震動生成域と、長周期波形バージョンによる気象庁²³⁾とYoshida et al.⁹⁾のすべり量分布と1日以内の余震分布(気象庁)の比較を示す。破壊開始点から同心円状の破壊を仮定しているが、両宮城県沖とも破壊開始点より東側に強震動生成域があり、up-dip方向への破壊が主であることがわかる。これは、宮城県沖と福島県沖の中規模のプレート境界地震の破壊伝播方向^{9),24)}と同じ特徴である。3月の地震は破壊開始点付近と南側に強震動生成域があり、5月の地震

は破壊開始点付近と北側に強震動生成域があり、これが図-11に示した波群の生成の原因である。なお、3月と5月の地震の破壊伝播速度は、それぞれ、3.0km/s、3.4km/sと推定され、2021年と2022年の福島県沖の地震と比べ速い。強震動生成域はすべり量の大きい領域にあるものの、すべり量が最大の領域からはややずれている。2011年東北地方太平洋

沖地震や図-14に示す1978年宮城県沖の地震では、強震動生成域とすべり量の大きい領域は明らかに異なっていたが、3月と5月の地震は地震規模が小さいため位置の違いは小さかったと考えられる。

図-14には、両宮城県沖の地震と1978年宮城県沖地震²⁷⁾、2005年宮城県沖の地震²⁷⁾⁻²⁹⁾の強震動生成域、および1978年宮城県沖の地震のすべり量分布^{25),26)}を示す。3月と5月の地震の強震動生成域は1978年宮城県沖地震、2005年宮城県沖の地震の強震動生成域とは重なっていないことがわかる。また、1978年宮城県沖地震、2005年宮城県沖の地震は、破壊開始点(気象庁の震源位置)より西側に強震動生成域があり、down-dip方向への破壊伝播が主であったと考えられる。これは、3月と5月の地震とは異なる特徴である。

図-15には、両宮城県沖の地震の地震モーメント M_0 と短周期レベルAの関係性を既往の地震²⁷⁾⁻³³⁾の M_0 -A関係と比較した結果を示す。両宮城県沖の地震のAは、1978年宮城県沖地震^{27),30)}や2005年宮城県沖の地震²⁷⁾⁻²⁹⁾と同様に、太平洋プレートのプレート境界地震の M_0 -A関係³²⁾より大きいという特徴が維持されていることがわかる。一方、太平洋プレート内の逆断層のスラブ内地震の M_0 -A関係³³⁾より小さい。なお、2021年と2022年の福島県沖の地震のAは太平洋プレートの逆断層型のスラブ内地震の M_0 -A関係³³⁾の外挿より大きいことが指摘されているが^{5),7)}、これは図-2に示した地震動予測式との関係と整合する特徴である。

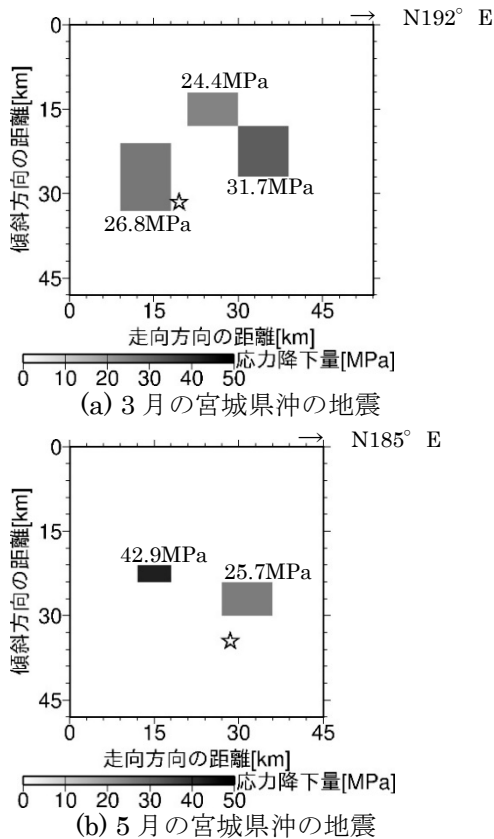


図-12 2021年3月と5月の宮城県沖の地震の強震動生成域の位置と応力降下量

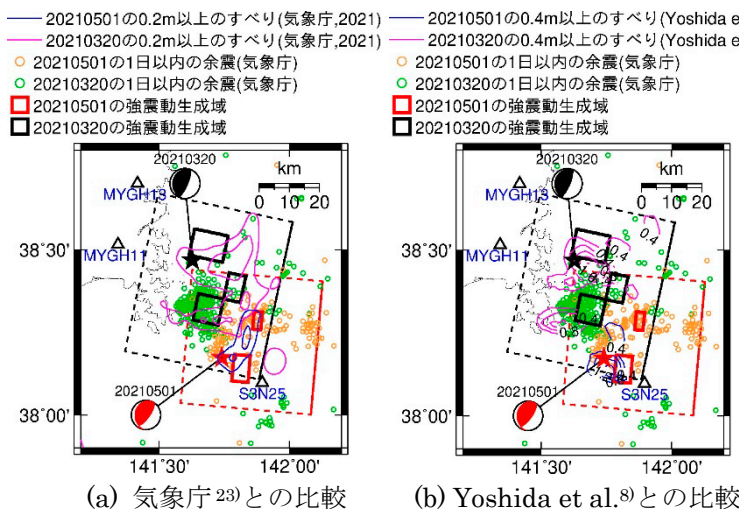


図-13 2021年3月と5月の宮城県沖の地震の広帯域震源モデル⁸⁾と既往の震源モデル^{8),23)}、1日以内の余震分布(文献6に加筆・修正)

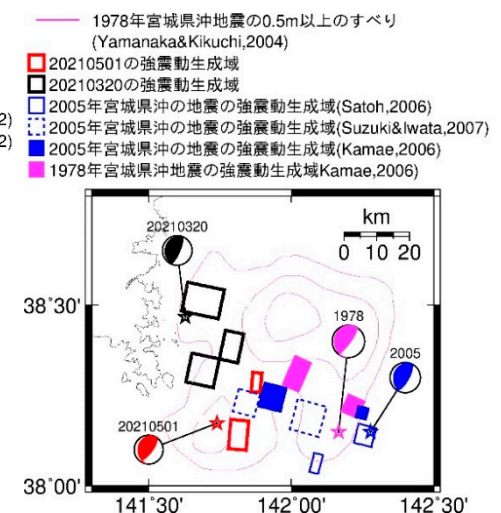


図-14 2021年3月と5月の宮城県沖の地震⁶⁾、1978年宮城県沖地震²⁷⁾、2005年宮城県沖の地震²⁷⁾⁻²⁹⁾の強震動生成域と1978年宮城県沖の地震のすべり量分布^{25),26)}(文献6に加筆)

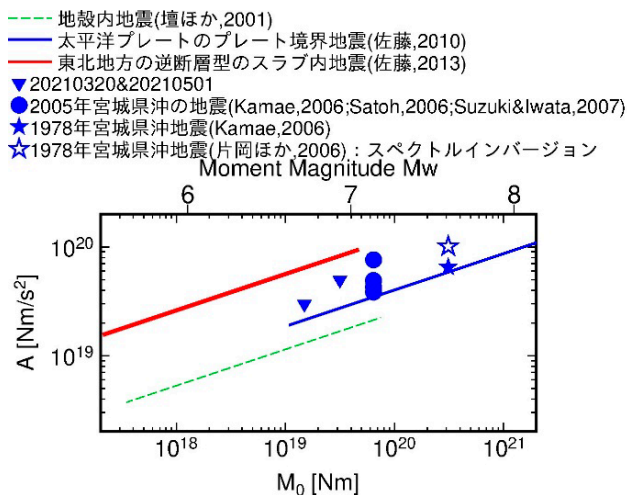


図-15 2021年3月と5月の宮城県沖の地震と過去の地震²⁷⁾⁻³³⁾の M_0 - A 関係

4. まとめ

2016年から観測が開始された日本海溝海底地震津波観測網 S-net と、陸域の強震記録を用いて、2021年と2022年の福島県沖の地震、2021年3月と5月の宮城県沖の地震の震源・地震動特性を分析した。

経験的グリーン関数法に基づく解析では、2021年と2022年の福島県沖の地震は、浅部の海洋性地殻と深部の海洋性マントル内に強震動生成域があることがわかった。2021年福島県沖の地震の破壊開始点付近の深部の強震動生成域は S-net に大きく寄与するが陸域への寄与は小さく、S-net を用いていない既往の震源モデルではこの付近のすべり量が小さいことも指摘した。また、2022年の地震では、S-net を用いていない既往の震源モデルではすべり量が大きくない北部の浅部の2つの強震動生成域が陸域の強震動に大きく寄与し、2021年の地震に比べ宮城県北部や岩手県南部の強震動が大きくなった要因であることを示した。

3月と5月の宮城県沖の地震は、破壊開始点より東側に強震動生成域があり、東向きの上向き(up-dip)方向の破壊が主であると推定された。下向き(down-dip)方向への破壊が主であった1978年宮城県沖の地震と2005年宮城県沖の地震とは異なることが明らかとなった。一方、1978年宮城県沖地震・2005年宮城県沖の地震と同様に、太平洋プレートのプレート境界地震の平均より短周期の励起が大きい特徴を有していた。また、3月と5月の宮城県沖の地震の強震動生成域は1978年宮城県沖地震と2005年宮城県沖の地震の強震動生成域とは重なっていないことがわかった。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所の S-net、K-NET、KiK-net の強震記録、F-net の MT 解、気象庁の震度計の強震記録、一元化震源情報を用いました。一部の図の作成には GMT³⁴⁾を用いました。記して感謝致します。

<参考文献>

- 1) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019 (DOI: 10.17598/NIED.0004)
- 2) Kanazawa, T., Uehira, K., Mochizuki, M., Shinbo, T., Fujimoto, H., Noguchi, S., Kunugi, T., Shiomi, K., Aoi, S., Matsumoto, T., Sekiguchi, S. and Okada, Y. : S-net project, cabled observation network for earthquakes and tsunamis, SubOptic 2016, WE2B-3, 2016
- 3) Aoi, S., Asano, Y., Kunugi, T., Kimura, T., Uehira, K., Takahashi, N., Ueda, H., Shiomi, K., Matsumoto, T. and Fujiwara, H. : MOWLAS: NIED observation network for earthquake, tsunami and volcano, Earth Planets Space, Vol.72: 126, 2020
- 4) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: NIED S-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019 (DOI: 10.17598/nied.0007)
- 5) 佐藤智美: 海域と陸域の強震記録に基づく2021年福島県沖の地震の広帯域震源モデル, 日本建築学会構造系論文集, Vol.87, No.799, pp.878-889, 2022
- 6) 佐藤智美: 2021年3月と5月の宮城県沖の地震の広帯域震源モデルと震源域の中規模地震の破壊伝播方向, 日本建築学会構造系論文集, Vol.87, No.802, pp.1152-1163, 2022
- 7) 佐藤智美: バックプロジェクション法と経験的グリーン関数法に基づく2022年福島県沖の地震の広帯域震源モデル, 日本建築学会構造系論文集, 投稿中
- 8) Yoshida, K., Matsuzawa, T. and Uchida, N. : The 2021 Mw7.0 and Mw6.7 Miyagi-Oki earthquakes nucleated in a deep seismic/aseismic transition zone: Possible effects of transient instability due to the 2011 Tohoku earthquake. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol.127, e2022JB024887, 2022
- 9) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience : NIED F-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019 (DOI: 10.17598/NIED.0003)
- 10) 気象庁: 震度データベース検索, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html> (参照 2022.10.3)

- 11) Koketsu, K., Miyake, H. and Suzuki, H. : Japan integrated velocity structure model, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, WCEE2012_1773.pdf, 2012
- 12) 地震調査研究推進本部 : 「長周期地震動予測地図」2012年試作版, https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/12_choshuki/ (参照 2022.9.6)
- 13) 佐藤智美 : 日本のスラブ内地震とプレート境界地震の水平・上下動の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.647, pp.67-76, 2010
- 14) Takagi, R., Uchida, N., Nakayama, T., Azuma, R., Ishigami, Okada, T., Nakamura, T. and Shiomi, K. : Estimation of the orientations of the S-net cabled ocean-bottom sensors, Seismological Research Letters, Vol.90, No.6, pp.2175-2187, 2019
- 15) 気象庁 : 長周期地震動階級 1 以上を観測した地震, https://www.data.jma.go.jp/eew/data/ltpgm_explain/data/past/past_list.html (参照 2022.10.3)
- 16) Dan, K., Watanabe, T. and Tanaka, T. : A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate far-field shear-wave displacement, 日本建築学会構造系論文報告集, No.396, pp.27-36, 1989
- 17) 久保久彦, 鈴木亘, 青井真, 関口春子 : 近地強震記録を用いた2021年2月13日福島県沖で発生した地震の震源インバージョン解析, https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/FukushimakenOki_20210213/inversion/inv_index.html (参照 2022.10.3)
- 18) Yoshida, S., Tsuda, K., Ji, C., Archuleta, R. and Sato, T. : Estimate of the rupture process of the 2021 off-Fukushima earthquake based on the finite-fault source inversion inferred from strong motion records, 日本地震学会秋季大会, S15-08, 2021
- 19) 防災科学技術研究所 : 2022年3月16日福島県沖の地震の震源過程(暫定), <https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/off-fukushima220316/?LANG=ja&m=source> (参照 2022.10.3)
- 20) 佐藤智美 : KiK-net 観測記録に基づく地盤の伝達関数を用いた線形時と非線形時の計測震度の関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.713, pp.1055-1065, 2015
- 21) 佐藤智美 : 地表の強震記録に基づく上下動の地盤増幅特性の非線形性の識別に関する研究, 日本地震工学会論文集, Vol.20, No.2, pp.17-35, 2020
- 22) 鈴木晴彦 : 微動探査による KiK-net 山元における地盤構造探査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, pp.73-74, 2022
- 23) 気象庁 : 国内で発生した顕著な地震の震源過程解析結果, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/sourceprocess/index.html> (参照 2022.10.3)
- 24) 佐藤智美 : 福島県沖の中規模スラブ内地震とプレート境界地震の破壊伝播効果と短周期レベル, 日本建築学会構造系論文集, Vol.87, No.793, pp.263-273, 2022
- 25) Yamanaka, Y. and Kikuchi, M. : Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, Journal of Geophysical Research, Vol.109, B07307, 2004
- 26) Uchida, N. : The distribution of asperities in NE Japan, https://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/~uchida/page_3_asp-e.html (参照 2022.10.3)
- 27) Kamae, K. : Source modeling of the 2005 off-shore Miyagi prefecture, Japan, earthquake ($M_{JMA}=7.2$) using the empirical Green's function method, Earth Planets Space, Vol.58, No.12, pp.1561-1566, 2006
- 28) Satoh, T. : High-stress drop interplate and intraplate earthquakes occurred off shore of Miyagi prefecture, Japan, Proceedings of the third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, pp.689-698, 2006
- 29) Suzuki, W. and Iwata, T. : Source model of the 2005 Miyagi-Oki, Japan, earthquake estimated from broadband strong motions, Earth Planets Space, Vol.59, pp.1155-1171, 2007
- 30) 片岡正次郎, 佐藤智美, 松本俊輔, 日下部毅明 : 短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, pp.740-757, 2006
- 31) 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 石井透 : 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.66, No.545, pp.51-62, 2001
- 32) 佐藤智美 : 逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケーリング則, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.651, pp.923-932, 2010
- 33) 佐藤智美 : 東北地方のアウトターライズ地震、スラブ内地震、プレート境界地震の短周期レベルと f_{max} 及び距離減衰特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.689, pp.1227-1236, 2013
- 34) Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. F. and Wobbe, F. : Generic Mapping Tools: Improved version released, EOS Trans. AGU, Vol.94, No.45, pp.409-410, 2013