

東北地方太平洋沖地震の余震に見られる 反射波とその解釈

小菅 正裕 (弘前大学理工学研究科)

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震に引き続き、多数の余震が発生した。余震記録の中で、P波とS波の間に顕著な位相（以下、X相と呼ぶ）が広域的に見られることが判明した。その例を図1に示す。この位相は全ての観測点で見られるわけではないので、震源起源ではなく、伝播経路での変換や反射が起源と考えられる。また、この位相の生成には大規模な構造の不均質性が関与していることが考えられる。そのため、この位相を調べることは生成のメカニズムを明らかにするに留まらず、長波長不均質構造の解明と伝播経路での変換・反射及び散乱・減衰特性を知ることにつながると期待される。そこで、このX相の波形記録の解析を行った。

2. 波形の特徴

解析には、東北地方から関東・甲信越地方北部のHi-net観測点で記録された地震波形を用いた。今回は、2011年4月8日から4月11日の期間に発生した10個の地震について解析した。震源の分布範囲は福島県沖から岩手県沖で、プレート境界地震とプレート内地震が含まれる。

図1のX相は上下動に卓越し、その振幅は一般にP波よりも大きく、S波を超える場合もある。振動の継続時間は1～5秒程度である。X相のスペクトルは1～2 Hzに鋭いピークを持つ（図1右下）。P波及びS波のスペクトルはより広帯域であるので、伝播経路の特性で低周波のスペクトルとなったことが考えられる。X相の振動様式は、振動方向は概ね震央方向、傾斜角が大

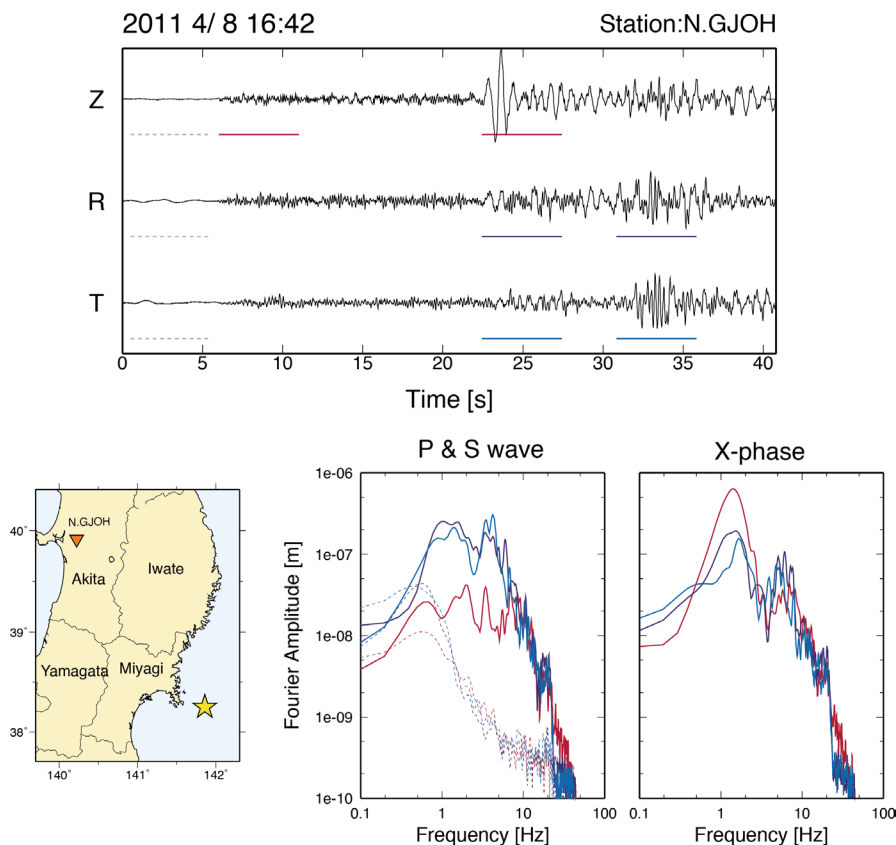


図1 X相の波形とスペクトルの例。N.GJOH観測点の3成分波形を示し、振幅は3成分の最大値で規格化されている。震央と観測点の位置を左下に示す。中央下はP波（上下成分）とS波（R及びT成分）のスペクトル、右下はX相（3成分）のスペクトル。スペクトルウィンドウは波形の下に示されており、色はスペクトルの色に対応する。

きく、線形性が強い。この振動様式は、ほぼ鉛直に入射するP波の特徴を表している。このことから、X相は震源よりも深い場所で変換または反射され、P波として観測点に届いたものと考えられる。

3. X相の検出と測定

X相は、バンドパスフィルターを通したRMSエンベロープを用いて検出した。その例を図2に示す。X相のスペクトルの特徴から、解析は中心周波数1 Hzの帯域で行った。P波の5秒後からS波到達までをX相検索区間と定め(図2の点線部分)、その区間での最大振幅と区間内の平均信号レベル、及びP波到達前のノイズレベルの比較を行ってX相を検出した。また、最大振幅から3 dB下がった位置でX相の開始・終了時刻を定義し、継続時間を求めた。実際には、このような単純な方法ではX相が過剰に検出さ

れてしまうので、目視で最終確認を行った。

X相の最大振幅、到達時刻、継続時間の分布の例を図3に示す。震源は宮城県沖のプレート内である。X相が検出された観測点は主に日本海側に広域的に分布するが、震央から離れた領域では太平洋側にも分布する。到達時刻は震源から離れるに従って系統的に遅くなる。継続時間の分布にはそれほど系統的特徴は見られない。このような特徴は、今回解析した全ての地震について共通して見られる。X相が検出された観測点の分布を見ると、震源からの距離がある範囲内では検出されないように見える。ただし、その範囲は島弧に平行な方向に長い。また、ある範囲を超えると検出されなくなる傾向があるようにも見える。これらのことは、X相の出現がプレート構造と関係していることを示唆する。地震の位置について見ると、プレート内地

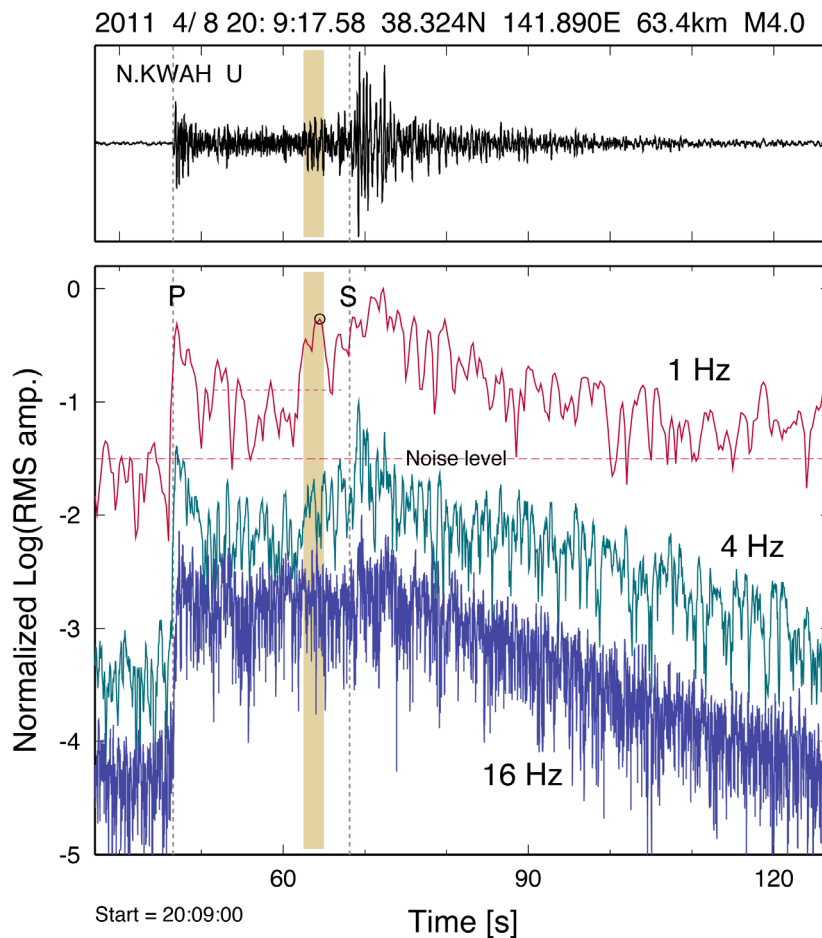


図2 X相の振幅、到達時刻、継続時間の測定例。上下動成分の波形(上段)に中心周波数1 Hz、4 Hz、16 Hzのバンドパスフィルターを作用させたRMSエンベロープを下段に示す。見やすくするためにエンベロープは縦軸方向に移動させている。1 HzのエンベロープでP波到達前のノイズレベル、P波とS波の間のX相検索区間(点線部分)での信号レベルを求め、検索区間内での最大振幅と信号及びノイズレベルの比較でX相を検出した。また、最大振幅から3 dB下がった位置でX相の開始・終了時刻を定義した。うす茶色の時間範囲がX相の継続時間を表す。

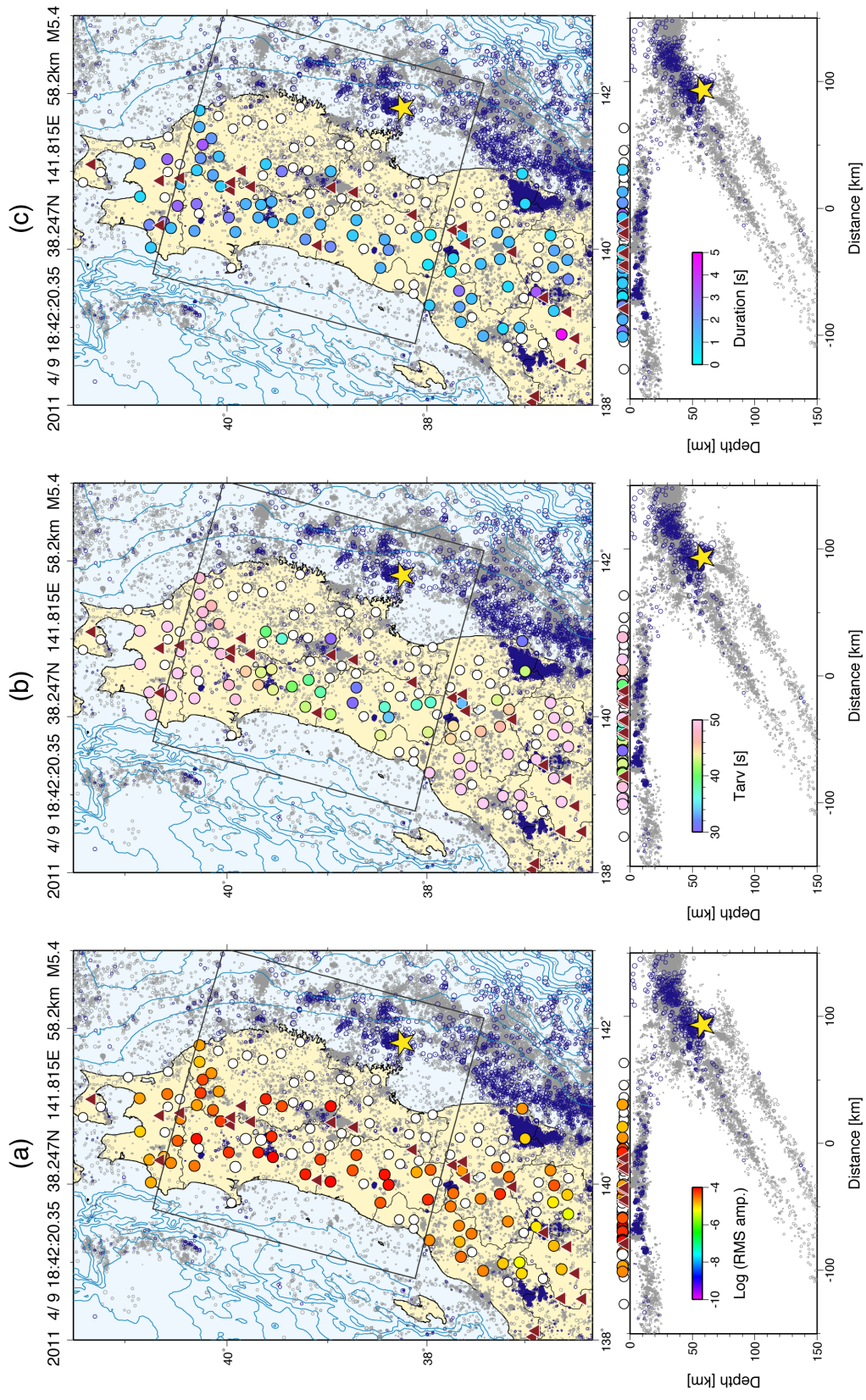


図3 X相の振幅 (a), 到達時刻 (b), 継続時間 (c) の分布の例。○の色は断面図のカラースケールに対応する。星印は対象の地震、灰色の丸は2010年に発生した地震の震源、青い丸は2011年4月に発生した地震の震源を示す。震源要素は気象庁一元化震源カタログによる。三角印は活火山を表す。

震の方がより顕著な X 相を伴うように見える。

4. 議論

X 相の変換／反射位置を、Source-Scanning Algorithm (Kao and Shan, 2004) を変換／反射波用に改良した方法で推定した。改良した方法では、ある点で変換／反射されて観測点に届いたとした時の到達時刻を求め、その時刻での地震波形の 2 乗振幅を全観測点で足し合わせたもの (brightness) を変換／反射点の位置にプロットし、最大 brightness をもつ位置を変換／反射点と見なす。解析は予備的な段階であるが、P-P 反射を仮定すると、反射位置は直達波の経路の下約 150 km 程度と推定される。S-P 反射変換を仮定するとより浅くなるが、後述の解釈のしやすさから、ここでは P-P 反射と解釈した。

P-P を仮定した場合の反射位置は、Kawakatsu et al. (2009) がレシーバ関数から推定したスラブの底面、すなわちリソスフェアとアセノスフェアの境界 (LAB) に近い。また、図 1 に見られるように X 相が単発のパルスではないことは、反射が複数の面において起こったことを示している。このことも Kawakatsu et al. (2009) が推定した LAB の構造、すなわち、アセノスフェア内に平行なメルトの層が多数存在するという構造と調和的である。以上のことから、X 相は LAB からの反射波と解釈した。

X 相の振幅が大きいことには、震源からの放射特性、反射特性、及び伝播経路での減衰等が影響していると考えられる。今回解析した地震では一般に P 波初動の振幅が小さいことから、震源から LAB に向かっては大振幅の波が放射され、それが反射して X 相として観測されると考えた。また、反射面でのインピーダンス・コントラストが大きい必要があることから、流体が存在することが示唆される。これも Kawakatsu et al. (2009) が考えた LAB の構造に近い。それらに加えて、経路での減衰が弱いことも示唆される。震源から見て火山フロントを横切った位置で大振幅の波が観測されることから、少なくとも 1～2 Hz の帯域では、火山フロントの深部 (プレート境界付近) から日本海側の観測点に鉛直に近い角度で入射する経路での減衰は弱いものと考えられる。

X 相は今回解析した全ての地震で見られたこ

とから、これまでも普遍的に見られていた現象と考えられる。プレート下面からの反射波については、溝上・他 (1981) や中村・他 (1992) などの報告があるが、あまり系統的には調べられていないようである。その理由は、P コーダ波のエンベロープ形状が複雑なことに加え、反射波の現れ方が一様ではないことが考えられる。しかし今回の解析において、反射波の出現位置や到達時刻は空間的に極めて安定した分布を示すことが明らかになった (図 3)。今後は、反射波の検出手法や Source-Scanning Algorithm の改良を進め、多数の地震を系統的・効率的に解析することで、LAB の内部構造とその空間的な変化、LAB に存在する流体の情報抽出等が可能になると期待される。

4. まとめ

東北地方太平洋沖地震の余震記録に見られる X 相の波形の特徴を調べ、エンベロープ形状を基に X 相を抽出した。X 相が見られる観測点の分布や Source-Scanning Algorithm を用いた予備的な解析から、X 相はリソスフェアとアセノスフェアの境界 (LAB) からの反射波と解釈した。X 相は LAB の性質についても新たな知見をもたらす可能性がある。

文献

- Kao, H. and Shan, S.-J., The source-scanning algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space, *Geophys. J. Int.*, **157**, 589-594, 2004.
- Kawakatsu, H. et al., Seismic evidence for sharp lithosphere-asthenosphere boundaries of oceanic plates, *Science*, **324**, 499-502, 2009.
- 溝上 恵・他, 関東地方におけるプレート下面での反射波の検出, 地震学会講演予稿集, 1, 89, 1981.
- 中村 衛・他, プレート下面からの反射波について, 地震学会講演予稿集, 1992, 2, 187, 1992.

謝辞

解析には、防災科研 Hi-net で収録された地震波形データと気象庁一元化震源カタログを利用させていただきました。記して謝意を表します。