

3-6 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の短周期エンベロープを用いた振動源イメージング

Imaging of the high-frequency energy radiation sources of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

気象庁気象研究所
Meteorological Research Institute, JMA

1. 手法

本調査では、Source-Scanning Algorithm(SSA法)¹⁾を利用して、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の高周波励起源のイメージングを試みた。SSA法は、震源域に三次元的に配置した格子上で、各観測点の規格化短周期エンベロープの振幅を各S波走時分だけ時刻を戻して足し合わせて震源域での時空間的な強度(Brightness, br)をイメージングする手法であるが、今回、海溝型巨大地震に適用するために、距離と方位角分布に基づいた重み付けを行うなどの改良を行った。

この改良手法では、格子 η における破壊開始からの経過時間 τ の強度は、次式

$$br(\eta, \tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N_\eta} w_{\eta i} A_i(\tau + T(\eta, i))}{\sum_{i=1}^{N_\eta} w_{\eta i}}$$

により算出する。なお、 $T(\eta, i)$ は観測点 i と格子 η 間の上野・他(2002)²⁾によるS波理論走時、 N_η は格子 η を中心とした震央距離150km以内の観測点数。ただし、150km以内に30点以上の観測点がない場合は、10kmずつ半径を広げることとし、300kmまでに観測点が確保できない場合は、その格子は強度を計算しないこととする。また、 $w_{\eta i}$ は格子ごとで方位角方向の観測点数が出来るだけ均等になるような重みとし、 $A_i(t)$ は観測点 i の規格化波形の時刻 t を中心とした探索区間 $2M\delta t$ 内(本調査では3秒間)の最大振幅として、次式

$$A_i(t) = \max\left\{V_i(t + m\delta t)/V_i^{\max}, m = -M, \dots, M\right\}$$

で定義する。ただし、 V_i は観測点 i の速度RMSエンベロープ、 V_i^{\max} はエンベロープの最大振幅、 δt はリサンプリング間隔(0.02秒)。

2. データ

本調査では、第1図(a)に示す防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netの619点の東西成分の加速度記録をデータとして利用した。各データは、積分後、4~8Hzのバンドパスフィルターをかけた上で、速度RMSエンベロープとした。第1図(b)に例示したように、エンベロープの特徴として、宮城県以北では2ピーク、福島・茨城県以南では1ピークが顕著に現れる傾向がある。第1図(a)中の緑枠は、格子を設定した領域を示し、格子間隔は水平方向、鉛直方向(深さ4~80km)ともに4kmとした。

3. 結果

[概観]

第2図に、破壊開始後5~175秒の10秒ごとの強度分布のスナップショットを示す。この図で、

強度が大きいところは、高周波波動の励起源になっている可能性が高い場所を示している。第3図の黒細線は、全格子中の最大強度の時刻歴を示す。これらから、主な高周波励起源は、少なくとも3系列以上あることが示唆される。以下にその特徴を示す。なお、本解析は、下の4項で記すように、観測点分布の影響により、東西方向の分解能が低く、極大値の位置や時刻以外は信頼度が低いと考えられる。

1系列目：第1図(a)の桃点線に従い、15～55秒程度までの間に破壊開始点付近から牡鹿半島に向かうもの。これらの強度の極大値は、38秒付近に第1図(a)の桃星の位置で現れる。

2系列目：第1図(a)の緑点線に従い、35～100秒程度までの間に宮城県沖の海溝軸付近から牡鹿半島に向かうもの。これらの強度の極大値は2か所あり、57秒付近と74秒付近に第1図(a)の緑星の位置で現れる。

3系列目：第1図(a)の青点線に従い、100～140秒程度までの間に福島・茨城沖から県境付近に向かうもの。これらの強度の極大値は2か所あり、105秒付近と130秒付近に第1図(a)の青星の位置で現れる。

[エンベロープに現れるピークの地域性との関連]

第1図(b)のエンベロープ波形例に、これら3系列の励起源のそれぞれの極大域からS波が放射された場合の理論到達時刻を示す。これから、エンベロープ記録にあらわれるピークと、各系列は以下の関係にあることが推測される。なお、すべての波形の特徴はこれらの励起源だけでは説明できていないが、これについては、散乱などによるエンベロープの拡大の効果や構造の影響のほか、より複雑な破壊が影響している可能性もある。

1系列目：宮城県以北の観測点に現れる2ピークの1番目に概ね対応

2系列目：宮城県以北の観測点に現れる2ピークの2番目に概ね対応

3系列目：茨城県以南の1ピークに概ね対応

[モーメント解放量分布との関連]

第2図の緑コンターは、気象庁(2011)³⁾の近地の長周期波形からインバージョンにより求められたモーメント解放量分布のスナップショットを表している。大局的に見ると、各系列の極大値については、その時点の大きなモーメント解放域と比較的接近しており、ある程度の一致が見られる。つまり、最初の100秒間は破壊開始点付近の宮城県沖に主要な破壊があり、100秒前後には福島・茨城県沖に移動するという南北方向の破壊の挙動については、本調査結果とモーメント解放量分布の傾向は概ね一致する。

次に、分解能が低い東西方向の移動について着目すると、1および2系列目の極大値を示す地点から海岸線直下まで強度分布が西側に移動していく点については、モーメント解放量との一致が悪いため、ゴーストを見ている可能性がある。

[解釈の上での注意点]

本調査結果を解釈する場合に、深さの分解能が悪い点や、観測点分布の影響で、東西方向の分解能が低い点に注意する必要がある。例えば、破壊開始点付近に震源をもつM6クラスの地震を同様

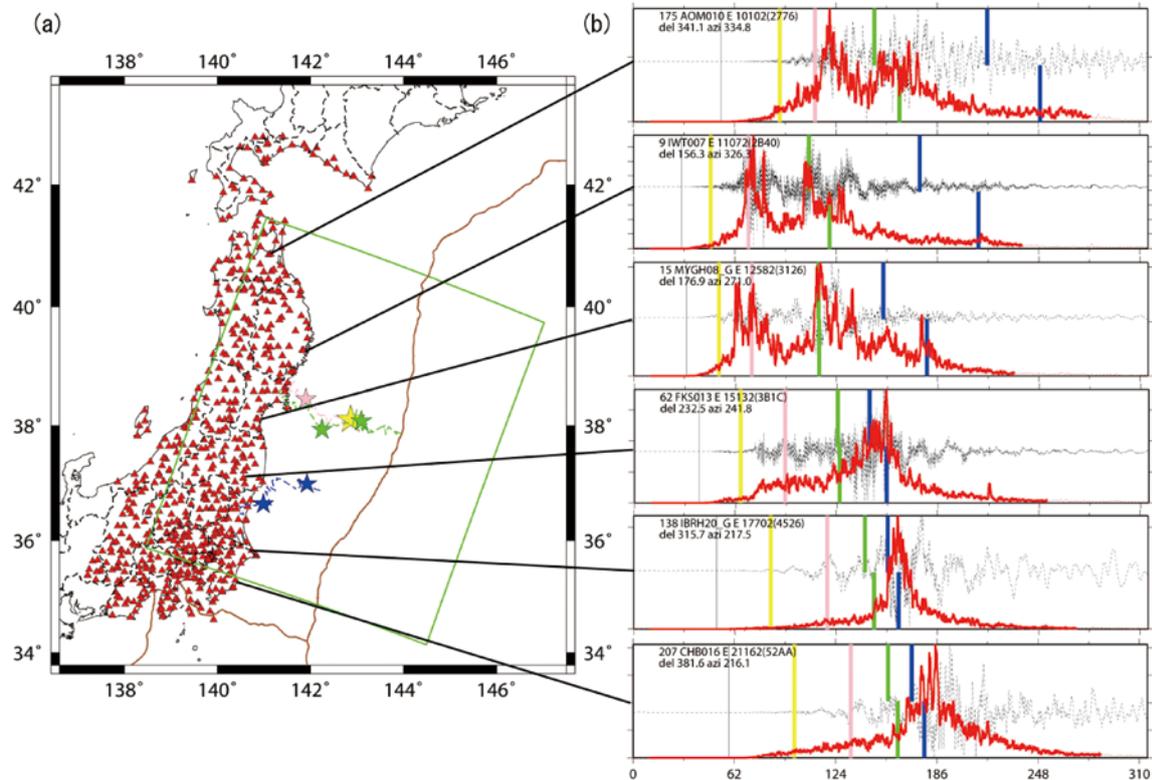
に解析した場合、震央付近で強度は極大を示すものの、その後 30~40 秒程度かけて減少しながら海岸線に近づくというゴーストを含んだイメージが得られる。

また、本手法の強度は、格子点周辺の観測点の規格化振幅を用いてイメージしているため、空間的に離れた格子間の強度の大小と実際の高周波エネルギーの強弱は必ずしも一致しないことも注意する必要がある。

謝辞：本報告では、独立行政法人 防災科学技術研究所の K-NET と KiK-net のデータを利用させていただきました。記して感謝いたします。

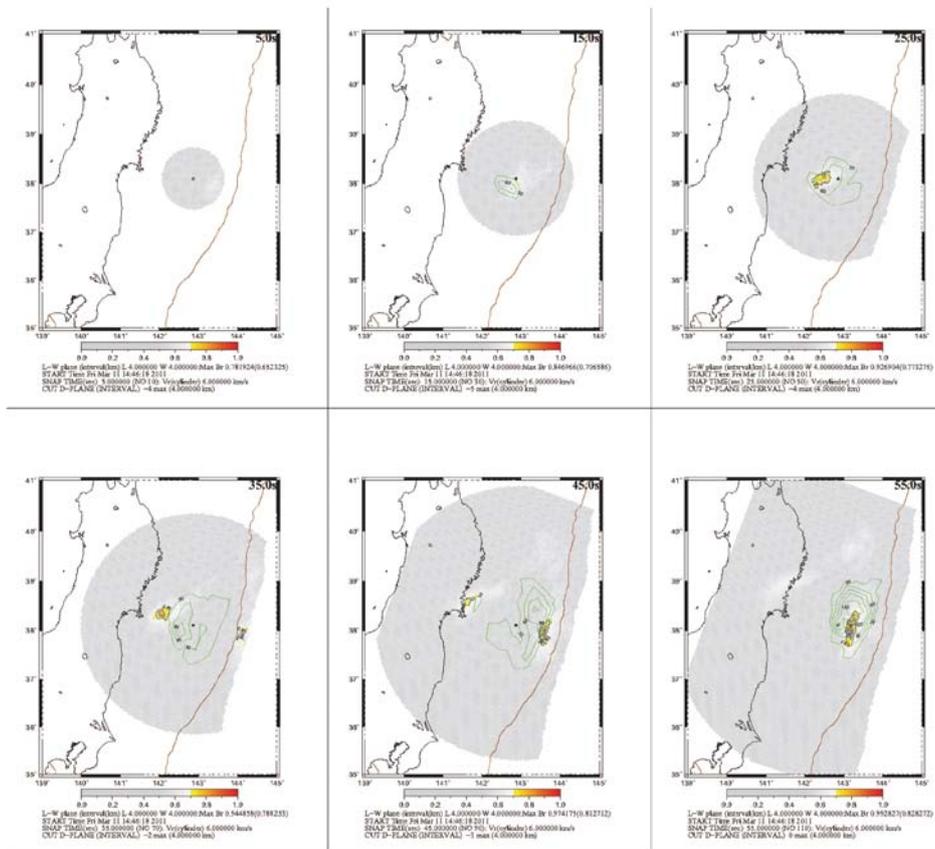
参 考 文 献

- 1) Kao, H. and S. J. Shan, Rapid identification of earthquake rupture plane using Source-Scanning Algorithm, *Geophys. J. Int.*, 168, 1011-1020 (2007).
- 2) 上野寛・畠山信一・明田川保・舟崎淳・浜田信生, 気象庁の震源決定方法の改善－浅部速度構造と重み関数の改良－, *験震時報*, 65, 123-134 (2002).
- 3) 気象庁, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震について, *連絡会報*, 86 (2011).



第1図 (a) 調査に使用した観測点分布図 (赤三角). 黄星は破壊開始点, 桃, 緑, 青の点線と星は高周波励起源と推定される系列1~3の軌跡 (西から東へ) と極大値の位置を示す. 緑枠は解析対象領域を示す. (b) 各観測点の規格化RMSエンベロップ (赤線) と速度波形 (黒線) の例. 黄線は破壊開始点からの理論S波到達時刻を示す. 桃・緑・青の各線は系列1~3の極大の位置からの理論S波到達時刻を示す. 系列2, 3については, 沖合側からのものは上段, 沿岸側からのものは下段に記している. なお, 時刻原点は破壊開始の5秒前 (2011/3/11 14:46:13) としている.

Fig.1 (a) Lines with pink, green and blue show series of estimated excitation sources of high-frequency seismic motion. Star symbols filled with each color show points that "brightness" become local maximum in each series. Star symbol filled with yellow shows the epicenter. Stations used in this study are shown in triangle filled with red. (b) Normalized RMS envelope and velocity waveform from some stations are shown in red and black, respectively. Yellow line shows the theoretical traveltime of S-wave. Lines with pink, green and blue shows the theoretical traveltime of S-wave induced from the local maximum brightness point. The time shown in this figure starts with 14:46:13, 11 Mar, 2011.



第2図 (1/3) 破壊開始から10秒ごとの最大強度を示す格子と同一の深さの強度分布のスナップショット. カラーバーは強度の絶対値を示す. 緑コンターは, 気象庁(2011)によるスナップショット時刻の前後5秒間のモーメント解放量分布を示す.

Fig.2 (1/3) Brightness snapshot of each 10 seconds. Section depth is taken from the depth that maximum brightness exists at that moment. The green contour is the distribution of released moment in 5 seconds before and after the time of each snapshot.

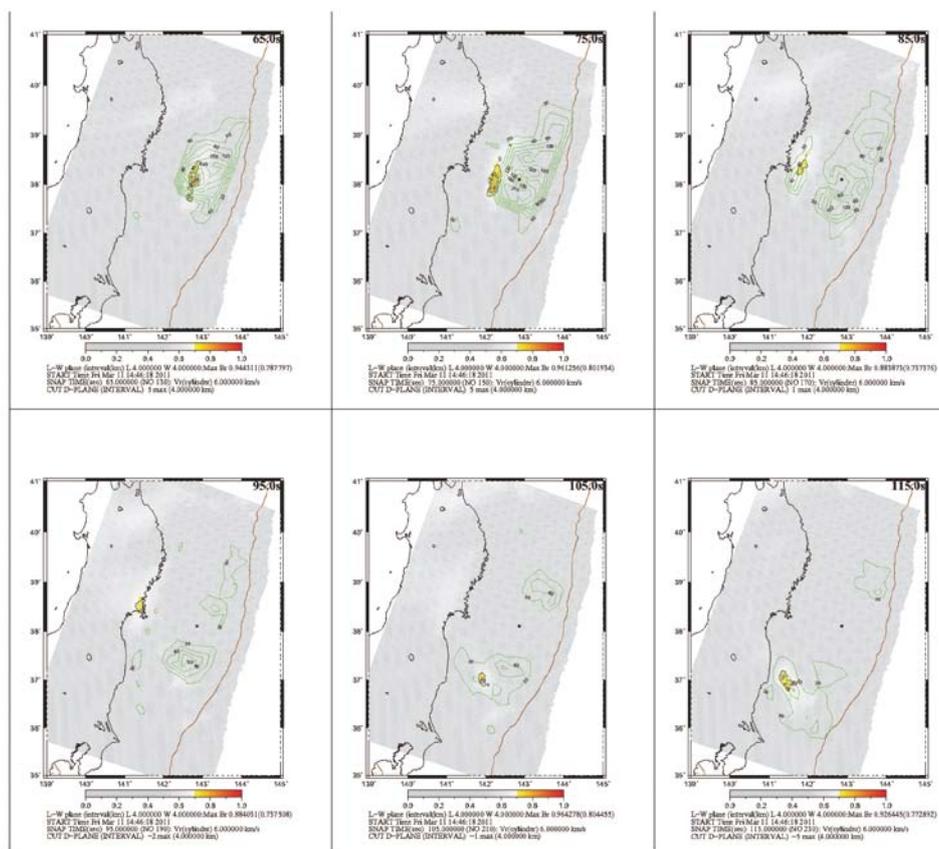
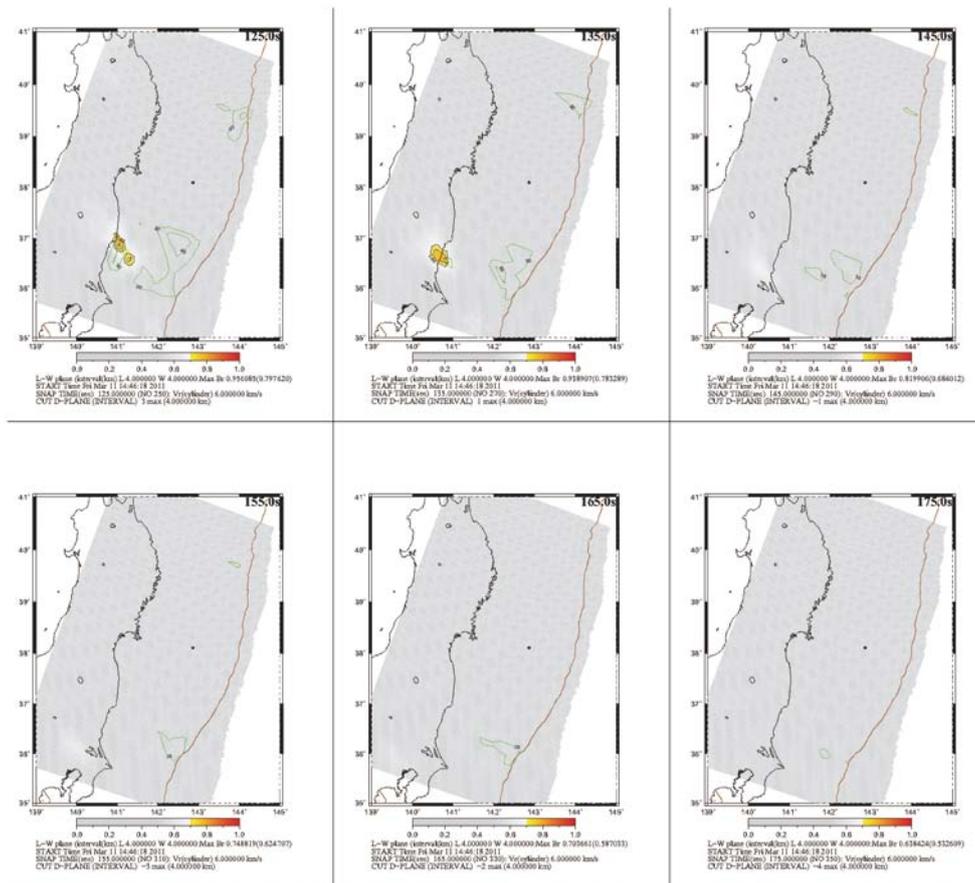


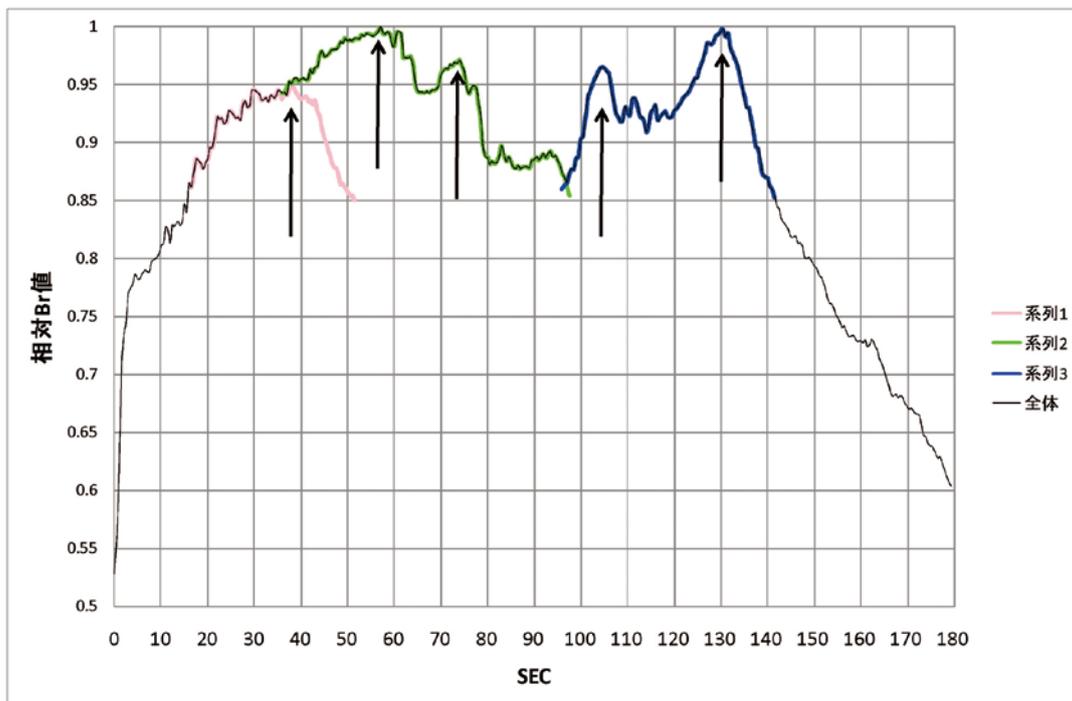
図2. (2/3) 破壊開始から10秒ごとの最大強度を示す格子と同一の深さの強度分布のスナップショット. カラーバーは強度の絶対値を示す. 緑コンターは, 気象研究所(2011)によるスナップショット時刻の前後5秒間のモーメント解放量分布を示す.

Fig.2 (2/3) Brightness snapshot of each 10 seconds. Section depth is taken from the depth that maximum brightness exists at that moment. The green contour is the distribution of released moment in 5 seconds before and after the time of each snapshot.



第2図 (3/3) 破壊開始から10秒ごとの最大強度を示す格子と同一の深さの強度分布のスナップショット。カラーバーは強度の絶対値を示す。緑コンターは、気象庁(2011)によるスナップショット時刻の前後5秒間のモーメント解放量分布を示す。

Fig.2 (3/3) Brightness snapshot of each 10 seconds. Section depth is taken from the depth that maximum brightness exists at that moment. The green contour is the distribution of released moment in 5 seconds before and after the time of each snapshot.



第3図 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の全格子中の最大相対強度値の時刻歴(黒細線)と系列1~3の最大相対強度の時刻歴(1:桃, 2:緑, 3青). 矢印は、各系列の極大の位置を表す。

Fig.3 Time series of the maximum normalized brightness of every lattice points is shown in black. Pink, green and blue lines show the values from the series. Arrows show the local maximum of each series.