

MeSO-netを用いたバックプロジェクション法による 関東地方の中規模地震の破壊過程の解析

村越匠 西澤航 岩瀬康行 江口孝雄

平成29年9月

MeSO-net を用いたバックプロジェクション法による 関東地方の中規模地震の破壊過程の解析

村越 匠* 西澤 航** 岩瀬 康行* 江口 孝雄***

(平成 29 年 3 月 31 日受付：平成 29 年 6 月 9 日受理)

Rupture Process of Moderate-Size Earthquakes in Kanto Region obtained
from a Back-projection Method using the MeSO-net data

By Takumi MURAKOSHI*, Ko NISHIZAWA**, Yasuyuki IWASE* and Takao EGUCHI***

The current study aims to obtain the rupture process of moderate-size earthquakes in space and time by using waveforms in the Metropolitan Seismic Observation Network (MeSO-net). The MeSO-net, in which all stations were established in 2012, is high-density seismograph network in and around the Tokyo metropolitan area, Japan. The average station-to-station distances in MeSO-net are several kilometers. The average intervals are less than a quarter of existing seismic networks in Japan, where the average distances in K-net and KiK-net are about 20 km. Then, we analyze the fault motion of moderate-size earthquakes in and around Kanto area, Japan by applying the back-projection method to seismic waveforms in MeSO-net. We construct detail images of the rupture process of moderate-size earthquakes. As a result, the spatial resolution of the rupture process for M5.1 earthquake is 0.5 km.

Keywords: back-projection method, rupture process, MeSO-net, moderate-size earthquake

1. はじめに

地震は地下の岩石の弱い領域が破壊されて断層面がずれることによって起きる。震源破壊過程の解析とは、地震波形記録を用いてその断層が破壊された過程を時空間的に把握することである。

震源破壊過程の解析手法は、観測波形と地下構造を仮定した理論地震波形(または、経験的グリーン関数)に基づく震源インバージョン法¹⁾が 1980 年代に開発され、それ以降気象庁などで多く利用されている。震源インバージョン法は、観測点近傍や地震波伝搬経路の地震波速度構造が複雑な場合、理論波形の正確な計算は難しく拘束条件として破壊方向・破壊速度などの

仮定が必要となる。この拘束条件は地震の特徴や観測データに合わせて経験的に設定する必要があり、同じ地震の破壊過程の解析結果が研究機関などにより異なることが起きる。破壊方向・破壊速度などのモデルパラメータを人為的に設定することなく、震源断層での破壊エネルギーの時空間分布を求めることができる解析手法としてバックプロジェクション法²⁾があげられる。バックプロジェクション法は、地震波の到来方向を仮定し地震波形データを断層面に逆投影して足し合わせることで、震源断層の主要なエネルギー放出領域を推定する手法である²⁾。Ishii et al. (2005)²⁾ により 2004 年スマトラ島沖地震の破壊過程の解析に適用されて以降、2007 年能登半島地震³⁾、2011 年東北地方太平洋沖地震^{4, 5)}などの破壊過程の解析に利用されている。

破壊過程の解析は、主に被害地震となる M6 以上の規模の地震について行われている。例えば、Pulido et al. (2008)³⁾では、防災科学技術研究所の強震観測網

* 防衛大学校 応用科学群 地球海洋学科 助教

** 航空自衛隊

*** 防衛大学校 応用科学群 地球海洋学科 教授

K-NET, KiK-net の地震波形記録を用いたバックプロジェクション法により M6.7 の地震の破壊過程が解析されている。M5 程度の浅発地震でも震度 5 弱の揺れとなることがあり、この規模の地震の破壊過程についても調べることは地震防災の点でも重要となる。ただし、M6 の地震の震源断層の平均的な面積と長さが 130km² と 16km であるのに対して、M5 ではそれぞれ 13km² と 5km、M4.5 では 4km² と 2.8km となるため⁶⁾、断層を長さ方向に少なくとも 5 分割以上するためには M5 で 1km、M4.5 では 0.56km 程度の空間分解能が必要となる。M5 程度の地震の破壊過程を解析するためには、観測点間隔が数 km 程度の高密度な地震観測網の地震波形データが必要になるが、K-NET, KiK-net などの既存の常設の地震観測網の平均的な観測点間隔は 20km 以上であったため、M5 程度の地震の破壊過程の解析は難しかった。しかし、最近になって関東地方に限定されるが、「首都直下地震防災・減災プロジェクト」による首都圏地震観測網 (MeSO-net)^{7,8)} の稠密な地震観測データを利用できるようになった。図 1 に MeSO-net の地震観測点 (黒丸) を示す。観測点間隔は 3km から 5km で、K-NET などの地震観測網と比べて 4 倍以上の観測点密度となっている。

そこで、本研究では稠密地震観測網である MeSO-net の地震波形データを用いたバックプロジェクション法により、関東地方で起きた M5 程度の中規模地震の破壊過程の解析を試みた。その結果について報告する。

2. 観測データ

MeSO-net では 2012 年から図 1 の全観測点の地震波形データが利用できるようになったため、2012 年以降に関東地方で発生した中規模地震の中から震源破壊過程を解析する地震を選択した。本研究では、地震

表 1 解析に用いた地震の震源情報

Table 1 Information on the earthquake source

発震時刻	2012 年 9 月 14 日 2:22:11 (JST)
震央 (緯度)	北緯 35.9 度
震央 (経度)	東経 140.6 度
深さ	42 km
マグニチュード	M 5.1
断層の走向	26.0 度
断層の傾斜	14.5 度

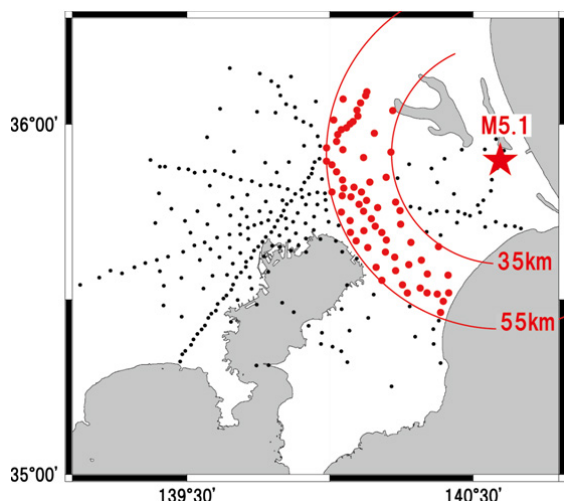


図 1 MeSO-net 地震観測網と解析した地震の震央と観測点

Fig. 1 Location map of seismic stations in MeSO-net and the epicenter in this study

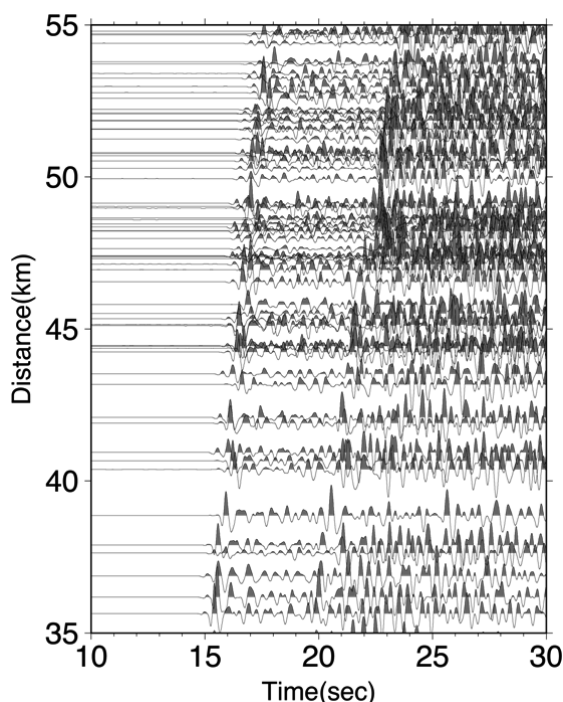


図 2 観測波形 (上下動成分)

Fig. 2 Observed waveforms (vertical component)

観測網の周辺域で発生した地震で、地震波形データの P 波の読み取りがしやすかったものを利用した。図 1 の星が解析に利用した M5.1 の地震の震央である。表 1 がその地震の発震時刻、震央、深さ、断層の走向・傾斜である。

観測データは、Pulido et al. (2008) ³⁾ を参考に震央距離の条件を決め、MeSO-net の 66 地点の上下動成分の地震波形データを用いた (表 2)。図 1 の弧線に囲まれた赤丸が震央距離 35km から 55km にある 66 地点の観測点を表している。上下動成分の 66 地点の地震波形データを震央距離別に縦方向に並べたものを図 2 に示す。横軸は表 1 の発震時刻からの経過時間である。解析に用いる P 波初動部分は、図 2 の震央距離 35km 付近の観測点では約 14 秒から、震央距離 55km 付近の観測点では約 17 秒からの数秒間の波形となる。

表 2 地震観測データの情報

Table 2 Seismic observed data

地震観測網	首都圏地震観測網 (MeSO-net)
震央距離の条件	35km～55km
観測点数	66 地点
波形記録	上下動成分 (P 波初動部分)

3. 解析手法

バックプロジェクション法にはデータの前処理などの違いにより複数の手法があるが、本研究では Wang and Mori (2011) ⁴⁾ の手法を用いた。この手法は、すべての観測点の地震波形データの時間軸の取り扱いにおいて、発震時刻などの絶対時刻を用いるのではなく、観測点ごとの P 波初動の時刻を基準として時間軸上で揃える点で他の手法 ^{2,3,5,7)} と異なり、走時に関する観測点補正が不要でデータセットの作成を容易にできる利点がある。

解析では、まず解析対象となる関東周辺の中規模地震の震源情報 (表 1) から、震源と MeSO-net の各地震観測点との震央距離を計算し、震央距離が 35km～55km の地震観測点の地震波形データだけを選択した (図 2)。次に、上下動成分の P 波初動の到達時刻の読み取りを行い、P 波初動の前後の時系列データを切り出した。切り出した波形データへの前処理として、地震の規模・地震計特性等に応じたバンドパスフィルタの適用 (表 3) および最大振幅による規格化をした。最後に、前処理した全観測点の地震波形データから式

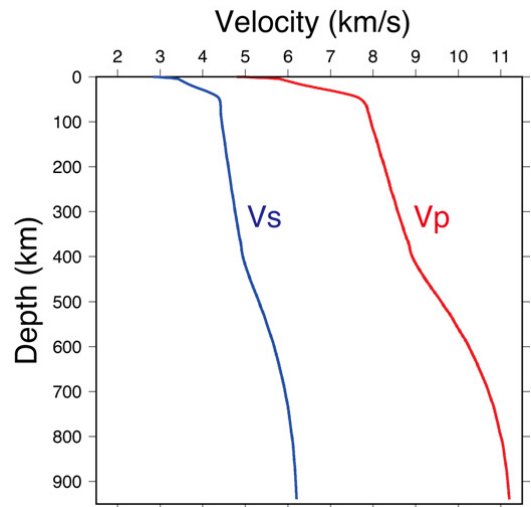


図 3 理論走時計算に利用する地下構造モデル

Fig. 3 Velocity structures used for the calculation of theoretical travel time

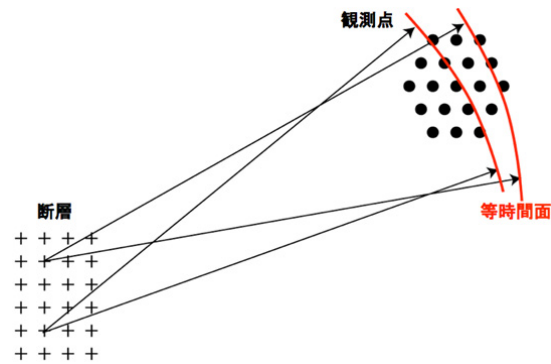


図 4 バックプロジェクション法の概念図

Fig. 4 Key map of the back-projection method

表 3 バックプロジェクション法で用いる波形の前処理および断層の設定

Table 3 Parameters for the back-projection method

フィルタ処理	1.0～3.0Hz のバンドパスフィルタ
平滑化ウインドウ長	0.5 秒
理論走時計算の構造モデル	JMA2001 モデル
断層面の大きさ	20km×20km
断層の分割	0.5km×0.5km

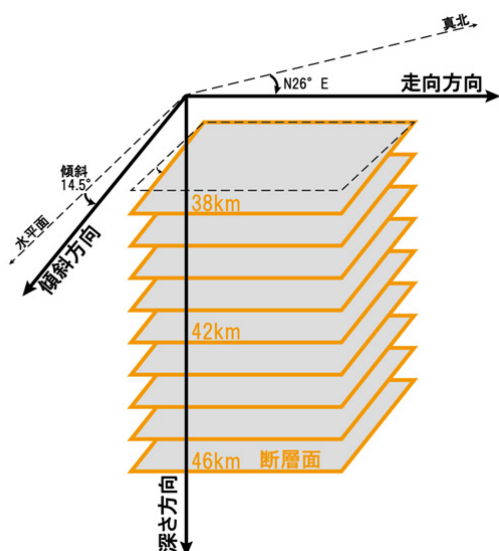


図5 震源断層の形状と深さ

Fig. 5 Shapes and depths of the fault planes

(1) を使って、震源断層における破壊過程を計算した。

$$S(jg, jt) = \sum_{ipt} \left[\sum_{ist} \{u(ist, jt + ipt + to_{ist, jg})\} \right]^2 \quad (1)$$

ここで、 S は断層面で放出されたエネルギーの時空間分布、 jg は断層面を分割した各グリッド、 jt は断層の破壊の経過時間、 u は前処理した地震波形データの上下動成分、 ipt は地震波形データの平滑化ウィンドウ、 ist は観測点番号、 to は理論走時である。平滑化ウィンドウ長は解析する地震の規模に応じて調整する必要がある、本研究では図2の地震波形のパルス幅から0.5秒とした(表3)。理論走時の計算にはThe TauP Toolkit⁹⁾を用いた。その計算の際の地下構造モデルは、気象庁の震源決定にも使用されている一次元速度構造モデルJMA2001¹⁰⁾(図3)とした。断層面の設定では、断層面の大きさは地震の規模M5.1で想定される震源断層より十分大きく設定し、断層の分割はMeSO-netの稠密な観測点間隔を考慮してこれまでの解析事例より細かい分割とした(表3)。

図4にバックプロジェクション法の概念図を示す。図4の十字は断層面を分割した各グリッド jg 、丸は各観測点 ist 、矢印線は断層の各グリッドから観測点への波線(理論走時 to)、弧線がその波線の等時間面である。式(1)では、前処理した地震波形データの上下動成分 u を断層面の各グリッド jg に逆投影して足し

合わせることで震源断層の主要なエネルギー放出領域 $S(jg, jt)$ を推定している。

図5は解析に用いる震源断層の形状と深さである。震源の破壊開始点の深さは表1で42kmとなっているが、震源決定の深さ方向の精度には数km程度の誤差がある。そのため、図5のように深さ42kmを中心として、38kmから46kmまで1kmごとの各深さに震源断層があると仮定して、式(1)により各深さでの震源の断層面で放出されたエネルギーを計算し、その時空間分布を可視化した。

4. 結果および考察

MeSO-netの地震波形データにバックプロジェクション法を適用して2012年9月14日2時22分のM5.1の地震の破壊過程を解析した。図6に断層面の中心の深さが42kmの場合の、地震発生時に放出された破壊エネルギーの時空間変化を示す。断層面は震央(星印)を中心とし、縦軸は断層の走向方向(N26°E)、横軸は傾斜方向としている。図6(a)が破壊開始時点の断層面での破壊エネルギーを表している。図6の右下のカラーバーが式(1)の破壊エネルギー S を規格化したもので、赤色の場所で強い破壊エネルギーが生じていることを表している。図6(b)から図6(i)の各図は、それぞれ破壊開始の0.2秒後から1.6秒後までの0.2秒ごとの断層面での破壊エネルギーの状態である。図6をみると図の中心付近からだんだんと南西方向(図の下側)に破壊が進み、約1.6秒間で破壊が停止したことがわかる。図6(a)から(i)の各図の破壊の中心付近(破壊エネルギーの大きい領域)に注目すると、平均破壊速度は約4.0km/sと推定された。破壊された面積については、破壊開始から終了までに変化のあった領域の合計から約10km²と推定された。これは、通常M5程度の地震により破壊される断層面積と矛盾しない結果となった⁶⁾。また、断層の0.5km x 0.5kmでの分割に対して観測データの空間分解能が十分で無い場合、破壊エネルギーの空間パターンはグリッドサイズより大きくぼんやりとしたものになるが、図6を見るとグリッドサイズに応じた明瞭な空間変化を捉えられていた。このことから、観測点間隔3kmから5kmの稠密な地震観測網を利用することで、M5程度の地震について水平方向の空間分解能0.5km程度で破壊過程の解析が可能であることがわかった。従来の常設の地震観測網であるK-NET、KiK-netを用いた地震の破壊過程の解析では、震源断層の分割は小さくした場

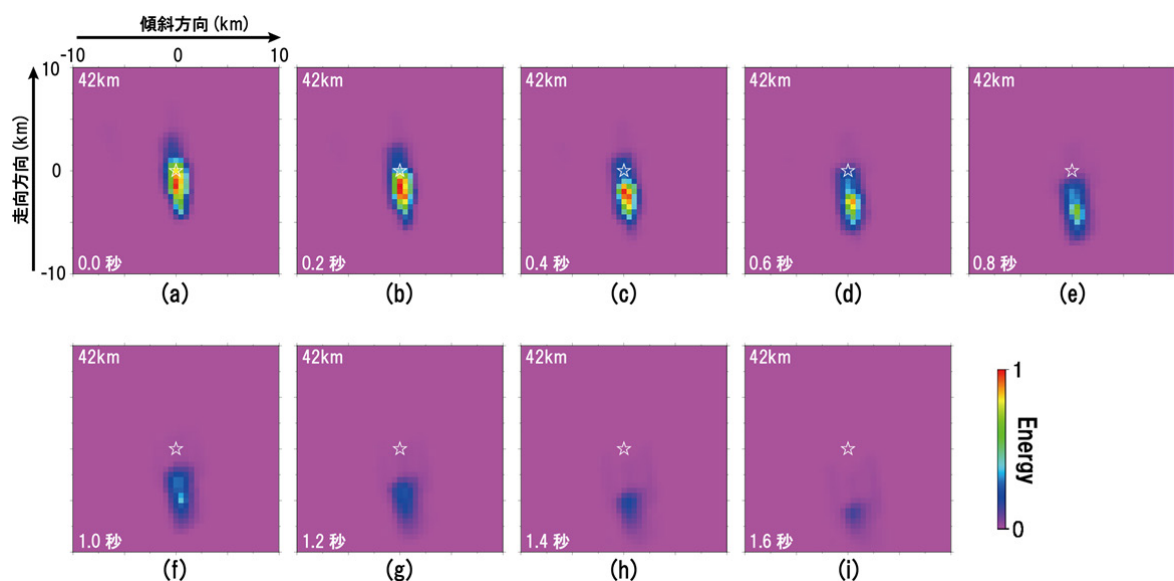


図6 破壊エネルギーの時空間変化（断層面の中心の深さが 42km の場合）

Fig. 6 Snap shots of the rupture propagation at intervals of 0.2 seconds

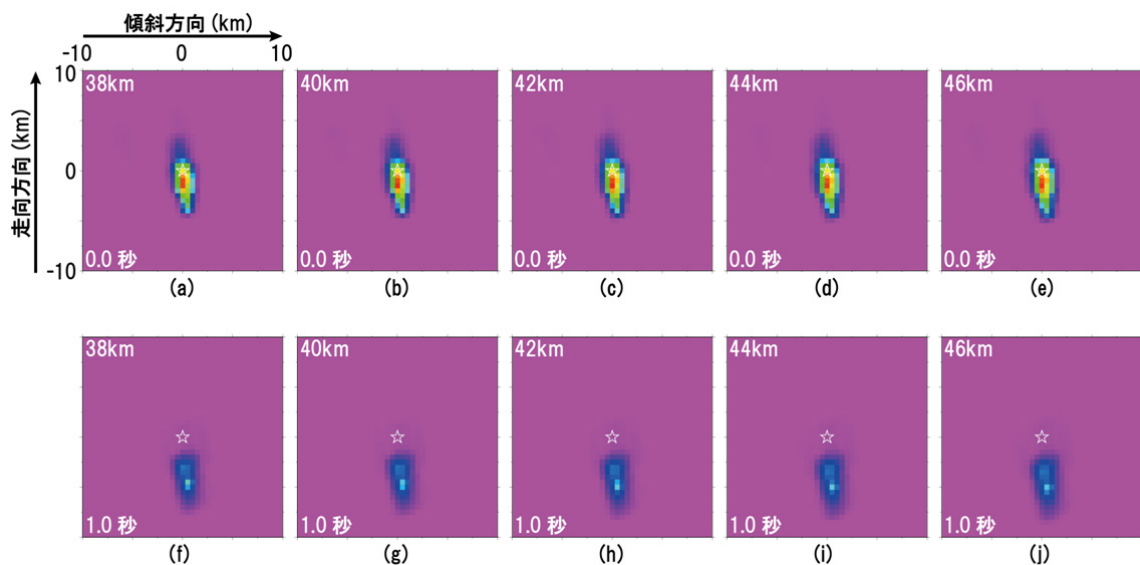


図7 破壊エネルギーの空間分布の断層面の深さ別の変化

Fig. 7 Total released energy distributions for each depth of fault plane

合でも 2km x 2km 程度であったため³⁾, M5 程度の中規模地震を解析する場合, 目安となる震源断層の面積 13km² と断層の長さ 5km⁶⁾ に対して断層面全体を 3

分割しかできず空間分解能が不十分であった。それに対して, 従来の地震観測網より稠密な MeSO-net を用いることで水平方向の空間分解能が 0.5km 程度とな

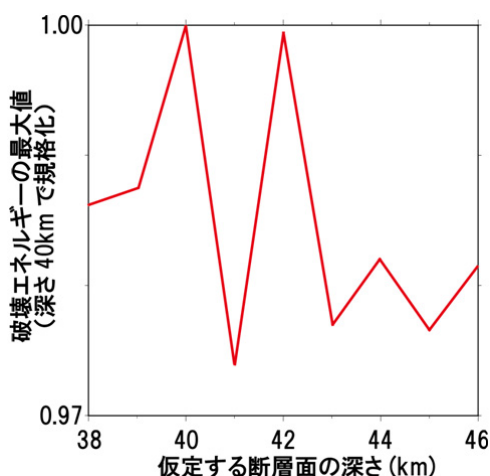


図8 破壊エネルギーの最大値の断層面の深さによる変化

Fig. 8 Variation of maximum value of released energy for each depth of fault plane

るため、M5を解析する場合で断層面全体を50分割、M4.5の場合で15分割できるようになった。

図7は断層面の深さ別の規格化した破壊エネルギーの空間分布の変化である。図の縦軸、横軸、星印、カラーバーについては図6と同様にしている。図7(a)から(e)はそれぞれ断層面の深さが38, 40, 42, 44, 46km(図5)の場合の破壊開始時点(0.0秒)の断層面での破壊エネルギーを表している。図7(f)から(j)は破壊開始時点から1.0秒後の同様の深さでの結果である。震源断層を仮定する深さによる破壊エネルギーの空間パターンの変化を見るため図7(a)から(e), (f)から(j)を比較してみたが、深さによる大きな違いは見られなかった。そのため、震源断層を仮定する深さごとの破壊エネルギーの時空間変化の結果から破壊エネルギーの最大値を取り出し、仮定する断層の深さ別の変化を調べてみた(図8)。図8の縦軸は、深さ40kmでの破壊エネルギーの最大値で規格化している。図8を見ると深さ40kmと42kmの2箇所に破壊エネルギーの最大値のピークがあるが、両者に大きな差は見られなかった。解析するデータに深さ方向の分解能がある場合、最適な震源断層の深さを仮定した場合に破壊エネルギーは最大となり、そこから離れた深さを断層面として仮定した場合は逆投影の足し合わせの効果が減ることにより小さくなっていくことが期待される。しかし、図8では深さ38kmから46kmの範囲でそのような特徴は見られなかった。そのため、

破壊過程の解析における水平方向の空間分解能が0.5km程度であるのに対して、深さ方向の精度については $\pm 4\text{km}$ 程度かそれより低い可能性がある結果となった。

5. 結論

中規模地震の高分解能な時空間分布の破壊過程を得るために、稠密な地震観測網であるMeSO-netのデータを用いたバックプロジェクション法により破壊過程を解析した。従来の常設の地震観測網であるK-NET, KiK-netを用いた破壊過程の解析では、平均的な観測点間隔が20km以上であるためM5程度の中規模地震の解析が空間分解能の点で困難であったが、本研究では観測点間隔が数kmの稠密な地震観測網のデータを利用することで、M5程度の中規模地震の破壊過程を水平方向の空間分解能0.5km程度で断層面全体を50分割して解析できることがわかった。ただし、深さ方向の空間分解能については、 $\pm 4\text{km}$ 程度かそれより低い結果となった。今後は、関東周辺で起きている他の中規模地震の破壊過程の解析への適用と深さ方向の分解能の向上を図ることが課題となる。

謝辞

本研究では東京大学地震研究所共同研究プログラムの首都直下地震防災・減災特別プロジェクトによる首都圏地震観測網(MeSO-net)で記録された地震波形を使用させていただきました。記して感謝致します。

参考文献

- 1) M. Kikuchi and H. Kanamori, "Inversion of complex body waves", *Bull. Seism. Soc. Am.* **72**[2] (1982), pp. 491-506.
- 2) M. Ishii, P. M. Shearer, H. Houston and J. E. Vidale, "Extent, duration and speed of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake imaged by the Hi-Net array", *Nature* **435**[7044] (2005), pp. 933-936.
- 3) N. Pulido, S. Aoi and H. Fujiwara, "Rupture process of the 2007 Notohanto earthquake by using an isochrones back-projection method and K-NET/KiK-net data", *Earth Planets Space* **60**[10] (2008), pp. 1035-1040.
- 4) D. Wang and J. Mori, "Rupture process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) as imaged with back-projection of

- teleseismic P-waves”, *Earth Planets Space* **63**[7] (2011), 603-607.
- 5) R. Honda, Y. Yukutake, H. Ito, M. Harada, T. Aketagawa, A. Yoshida, S. Sakai, S. Nakagawa, N. Hirata, K. Obara, M. Matsubara and H. Kimura, “Rupture process of the largest aftershock of the M9 Tohoku-oki earthquake obtained from a back-projection approach using the MeSO-net data”, *Earth Planets Space* **65**[8] (2013), pp. 917-921.
 - 6) 宇津徳治, 嶋悦三, 吉井敏尅, 山科健一郎: 「地震の事典」, 朝倉書店, 東京(1987).
 - 7) 酒井慎一, 平田直: 首都圏地震観測網の設置計画, 東京大学地震研究所彙報, **84**[2] (2009), pp. 57-69.
 - 8) 笠原敬司, 酒井慎一, 森田裕一, 平田直, 鶴岡弘, 中川茂樹, 楠城一嘉, 小原一成: 首都圏地震観測網 (MeSO-net の展開), 東京大学地震研究所彙報, **84**[2] (2009), pp. 71-88.
 - 9) H. P. Crotwell, T. J. Owens and J. Ritsema, “The TauP Toolkit: Flexible Seismic Travel-time and Ray-path Utilities”, *Seism. Res. Lett.* **70**[2] (1999), pp. 154-160.
 - 10) 上野寛, 畠山信一, 明田川保, 舟崎淳, 浜田信生: 気象庁の震源決定手法の改善ー浅部速度構造と重み関数の改良ー, 験震時報, **65** (2002), 123-134.