

3. 4. 5. 3 非一様な破壊伝播を考慮した震源モデルの構築とリアルタイム強震動予測へ向けた基礎的研究

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

震源モデル構築に必要な、以下の各項目について開発、検討を行う。

- ・P波波形記録から断層面やアスペリティー(強震動発生域)を同定する手法を開発する。
- ・近地P波波形記録からの不均質な破壊伝播過程の抽出する手法を開発する。
- ・破壊伝播や滑り速度の揺らぎを抽出する手法を開発する。
- ・非一様な破壊伝播を考慮した震源モデルを検討する。
- ・(準)リアルタイム強震動予測に適した震源モデルと高速地震動予測手法を検討する。

(b) 平成19年度業務目的

「P波記録を用いた断層面とアスペリティー位置の同定」

実記録に基づく効果的な断層面同定法及びイメージング法の検討を実施する。

解析する実記録の候補は、以下の3地震: 2007年新潟県中越沖地震(逆断層。観測記録やや密)、2007年能登半島地震(逆断層。観測記録疎)、2005年福岡県西方沖地震(横ずれ。観測記録密)。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
九州大学大学院理学研究院	准教授	竹中博士	

(2) 平成19年度の成果

(a) 業務の要約

実記録に基づく効果的な断層面同定法及びイメージング法の検討を実施し、2007年新潟県中越沖地震と2007年能登半島地震に適用して、以下の結果を得た。

新潟県中越沖地震では、近地強震記録のP波の解析から、破壊は北西傾斜の面で発生し(初期破壊)、少なくとも最初のアスペリティーが破壊(主破壊)を開始するまでは北西傾斜面で破壊が進行したことを突き止めた。さらに、この地震では3つのアスペリティーのうち最初のアスペリティーまでは初期破壊と同じ北西傾斜面に位置することを強く示唆する結果も得ている。また、能登半島地震では地震発生0.5秒後に破壊が初期破壊面から主破壊面へと移行し、その2.3秒後にアスペリティーの破壊(主破壊)が開始し、その破壊は震源に対し輪島市側(北東方向)に向けて進展したことが推定された。

(b) 業務の成果

実記録に基づく効果的な断層面同定法及びイメージング法の検討を実施し、2007年新潟県中越沖地震と2007年能登半島地震に適用した。以下得られた結果を記す。新潟県中越沖地震ではL2ノルムに基づく放射強度値を採用し、能登半島地震ではL ∞ (最大値)ノルムに基づく放射強度値を採用している。

1) 新潟県中越沖地震の初期震源過程

2007年7月16日午前10時13分に発生した新潟県中越沖地震 ($M_{\text{JMA}}6.8$) では、震源域近傍で強い揺れが観測された。特に柏崎周辺では、K-net 柏崎 (NIG0018) で最大加速度 813cm/s^2 (3成分合成値) に代表される大震動が観測された。K-net 柏崎では表層地盤が大加速度のため非線形応答をした可能性が高く、基盤においても相当の入力があったものと推測される。この地震のメカニズム解は、南東または北西に傾斜する断層面を持つ逆断層メカニズムと推定されている。余震分布などから大局的には南東傾斜面が主断層面と考えられるが、震源近傍では北西傾斜の傾向もあり断定は難しく、始めの強震動生成領域 (アスペリティー) は両断層に存在する可能性もある。南東断層面だけを選択し、経験的グリーン関数法による強震動シミュレーションで解析を行っている研究もあるが、震源近傍における初期の破壊過程の情報がなければ断定することが難しい。震源過程を調べるためには通常遠地波形または近地主要動 (S波) 波形をデータとする震源インバージョンを用いることが多いが、ここでは震源近傍に着目し、分解能の高い近地P波記録を用いる本研究独自の手法を適用して、発生から約5秒以内の近地P波記録の解析から最初のアスペリティーの同定を行った。

最近起きた同程度の規模の2005年福岡県西方沖地震 ($M_{\text{JMA}}7.0$)、2007年能登半島地震 ($M_{\text{JMA}}6.9$) と同様にこの地震でもP波記録において初期破壊相・主破壊相が明瞭に観測されており (図1)、このデータから主破壊開始点の推定及びアスペリティーのイメージングを行い、この地震の断層面の同定並びに震源過程の推定を試みた。

まず、記録が公開されているK-NET、KiK-net、F-netの観測点や気象庁震度観測点のうち、震央距離65km以内の観測点 (25点) のP波上下動記録から初動 (P) 時刻と主破壊相 (P') の到着時刻の差を読み取り、その値を用いて主破壊開始点の位置と発生時刻を推定した。震源は Sakai et al. (2008)¹⁾ の推定座標、速度構造に JMA2001 (上野・他, 2002)⁴⁾ を使用した。断層面は F-net 初動メカニズム解 (防災科学技術研究所, 2007) による2枚の節面 (南東傾斜面: 走行 $N49^\circ E$ 、傾斜角 42° ; 北西傾斜面: 走行 $N215^\circ E$ 、傾斜角 49°) を仮定し、マスターイベント法に基づく Takenaka et al. (2006)³⁾ の方法を用いてそれぞれの面内で主破壊開始点を探索した。その結果、北西傾斜の面の方が推定誤差が小さく (図2)、2.1秒後に最初のアスペリティーが破壊を開始するまで (初期破壊) は少なくとも北西傾斜面で破壊が進行したことがわかった。主破壊開始点のその位置は、震源に対して走行方向に3.4km、updip方向に1.5kmと求まった。初期破壊における平均の破壊速度 1.8km/s である。なお、推定された初期破壊の継続時間2.1秒は Umeda et al. (1996)⁵⁾ の初期破壊とマグニチュードに関する経験式によく一致している。

次に、先に使用した観測点のうち18点についてP波上下動速度波形記録を使用し、最初のアスペリティーに対応する主破壊部のイメージングを行った。破壊が始まってから主破壊開始まで (初期破壊) は北西傾斜面に沿って進行したことがわかったが、続く主破壊もそのまま北西傾斜面を進行するとは限らないので、二つのモデルを仮定した。一つは、主破壊開始後も北西傾斜面に破壊が進行し最初のアスペリティーが破壊するケース

(Model 1)、もう一つは主破壊開始と同時に、破壊が南東傾斜面に移動し進行するケース (Model 2) である。Model 1では初期破壊と同じ北西傾斜面、Model 2では主破壊開始点を通る南東傾斜面でイメージングを行った (図3)。図3は主破壊開始後3秒間のP波

の発生強度を北西傾斜面 (Model 1、図 3 (a)) と南東傾斜面 (Model 2、図 3 (b)) にマッピングした図である。主破壊開始点の近傍の色が付いた部分が最初のアスペリティーに対応すると考えられる。強度のピーク値は Model 1 も Model 2 もほとんど変わらないため、イメージングの結果だけからどちらかのモデルを選択することはできなかったが、2つのモデルのアスペリティーの位置は地図上に投影するとほぼ重なり、震央と柏崎・刈羽原発との中間に位置する。この結果は、最初のアスペリティーの破壊が柏崎方向に向かって進行し、柏崎・刈羽原発方面では強いディレクティブティの影響で最初の大振幅パルスを受けた可能性を強く示唆している。なお、Model 1 の結果は、本震直後に展開された稠密な陸上アレー観測のデータを解析して Kato et al. (2008) ¹⁾ が求めている地震直後の余震の分布と全体的によく調和しており、アスペリティー内の放射強度分布と余震の配置を仔細に見た場合に両者の間に相補的な関係が認められた。

2) 能登半島地震の震源過程

2005 年福岡県西方沖地震 ($M_{\text{JMA}}7.0$) において、初動メカニズム解と CMT 解の違いから初期破壊面と主破壊面は別の面である可能性が示唆されている。この地震では P 波部分において破壊が初期破壊面から主破壊面へと移行する相 (第 2 震源相) および主破壊相が明瞭に観測されている。2007 年 3 月 25 日に発生した能登半島地震 ($M_{\text{JMA}}6.9$) でも観測波形に第 2 震源相及び主破壊相が明瞭に観測されており (図 4)、本研究では福岡県西方沖地震の場合と同様の手法を適用して第 2 震源、主破壊開始点の推定及びアスペリティーのイメージングを行った。

まず、記録が公開されている K-NET、KiK-net、F-net 観測点や気象庁震度観測点のうち、震央距離 50km 以内に位置する 16 観測点の P 波上下動記録を用い、初動と第 2 震源相の時間差 (図 4 の P2-P1) を用いて第 2 震源の推定を行った。震源は気象庁の一元化震源 (N37.221°、E136.686°、深さ 10.7km)、断層面は Hi-net 初動メカニズム解 (防災科学技術研究所, 2007) にしたがって走行 N63°E、傾斜角 80°を仮定し、速度構造に JMA2001 (上野・他, 2002) ⁴⁾ を使用した。その上で Takenaka et al. (2006) ³⁾ によるマスターイベント法を用いて理論値と観測値の残差が最も小さくなる点を推定した。その結果、第 2 震源は震源に対して、走行方向に 0.9km、updip 方向に 0.2km に位置し、発生時刻は破壊開始の 0.5 秒後であると推定された。この点から破壊が初期破壊面から主破壊面へと移行したものと考えられる。

次に、主破壊相と第 2 震源相との時間差 (図 4 の P3-P2 に相当) を用いて第 2 震源の推定と同様に主破壊始点の推定を行った。推定にあたり主破壊相到達以前に S 波が到達している震源近傍の 3 観測点を除外し、13 観測点を使用した。設定した断層面は F-net 手動メカニズム (CMT) 決定解 (防災科学技術研究所, 2007) にしたがって走行 N58°E、傾斜角 66°の面を仮定した。併せて第 2 震源相以後の P 波上下動速度記録にイメージング法を適用してアスペリティーの高分解能のイメージングを行った。その際、震源に近い観測点では速度波形に Nearfield term が卓越しているため、今回はこれを除去するようにハイパスフィルター (全観測点同じフィルター) を適用した。なお、本研究では震源域に比較的近い観測点のみを使用したため、第 2 震源への破壊の移行後 5 秒間のみのイメージングを行った。その結果、主破壊開始点は第 2 震源に対し、走行方向に 1.3km、updip 方向に 1.4km

に位置し、主破壊面へ破壊が移行して 2.3 秒後に主破壊が開始したことが推定された。また、この結果はイメージングによるアスペリティーの位置とも調和しており（図 5）、推定された主破壊開始点は震源から北東方向の海岸付近に位置する。第 2 震源から主破壊開始点、アスペリティーを通過する線の延長上に位置する観測点では、ディレクティブィティ効果に伴う強いパルスが主要動に顕著に現れており、この地震で大きな被害の出た輪島市門前町や輪島市の中心部などはアスペリティーによるディレクティブィティパルスの直撃を受けたものと考えられる。なお、第 2 震源相から主破壊相までの継続時間を初期破壊継続時間と考えると、今回推定された継続時間 2.3 秒は Umeda et al. (1996) ⁵⁾ の初期破壊とマグニチュードに関する経験式に一致する。

謝辞：防災科学技術研究所（K-NET、KiK-net、F-net）、気象庁（震度観測網）及び東京電力から提供して頂いた強震記録を使用しました。三機関に感謝いたします。

(c) 結論ならびに今後の課題

断層面同定法及びイメージング法の検討を実施し、2007 年新潟県中越沖地震と 2007 年能登半島地震に適用した。その結果、新潟県中越沖地震では、破壊は北西傾斜の面で発生し、少なくとも最初のアスペリティーが破壊（主破壊）を開始するまでは北西傾斜面で破壊が進行したことを明らかにした。能登半島地震は、震源域が半島であったという地理的特性のため、観測点方位のカバレッジや観測点密度が良いとはいえながらも、比較的良好な結果が得られた。イメージング法については、さらに精度を高めるためには時間空間における染み出しやゴースト低減を図る必要がある。2005 年福岡県西方沖地震への適用は、次年度に持ち越し、次に予定している新たな解析法の前段階として実施する予定である。

(d) 引用文献

- 1) Kato, A., S. Sakai, E. Kurashimo, T. Igarashi, T. Iidaka, N. Hirata, T. Iwasaki, T. Kanazawa and Group for the aftershock observations of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake: Imaging heterogeneous velocity structures and complex aftershock distributions in the source region of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake by a dense seismic observation, *Earth Planets Space*, in press, 2008.
- 2) Sakai S., A. Kato, T. Iidaka, E. Kurashimo, T. Igarashi, N. Hirata, T. Iwasaki, T. Kanazawa and the Group for the joint aftershock observation of the 2007 Niigataken: Spatial and temporal variation of an aftershock sequence for the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake based on a dense seismic network, *Earth Planets Space*, in press, 2008.
- 3) Takenaka, H., T. Nakamura, Y. Yamamoto, G. Toyokuni, and H. Kawase: Precise location of the fault plane and the onset of the main rupture of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, *Earth Planets Space*, 58, 75-80, 2006.
- 4) 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.

- 5) Umeda, Y., T. Yamashita, K. Ito and H. Horikawa: The bright spot and growth process of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, J. Phys. Earth, 44, 519-527, 1996.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・外の別
2007年新潟県中越沖地震, 震源過程, 初期破壊, 強震動 (口頭)	竹中博士・山崎寛一・山本容維	日本地震工学会大会	平成19年11月	国内
Rupture Process of the 2007 Noto Hanto Earthquake Inferred From Local P-wave Records: Second hypocenter, Initial Rupture, Main Rupture, Asperity and Killer Pulse (ポスター)	山本容維・竹中博士	AGU Fall Meeting	平成19年12月	国外
High-Resolution Source Imaging of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake From Dense Strong-Motion Networks: Focus on the First 5 Seconds of the Rupture Process (ポスター)	竹中博士・山本容維・山崎寛一	AGU Fall Meeting	平成19年12月	国外

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 20 年度業務計画案

破壊伝播及び滑り速度の非一様性や揺らぎを抽出する手法を開発する。平成 19 年度開発したイメージング解析によって同定されるアスペリティーの情報を事前情報として活用し、震源インバージョンの時間空間精度の向上を図る方向で実現する。解析対象地震として高密度の観測データが存在する 2005 年福岡県西方沖地震を予定している。データは、防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net と気象庁及び福岡県の震度計の波形データを用いる。ほとんどの観測点で、記録した地震計の設置方位の精密測定を独自に行っており、データの質と信頼性を高める努力をしている。イメージングによって初期破壊及び主破壊の断層面と同定とアスペリティーの時空間分布の概要を捉え、その結果を取り込んだインバージョンによって、一様性の仮定なしに破壊伝播や滑り速度の分布を推定する。従来の近地 S 波を用いた震源インバージョン解析で得られる結果を凌駕する信頼性の高い震源過程の描像が得られると期待される。

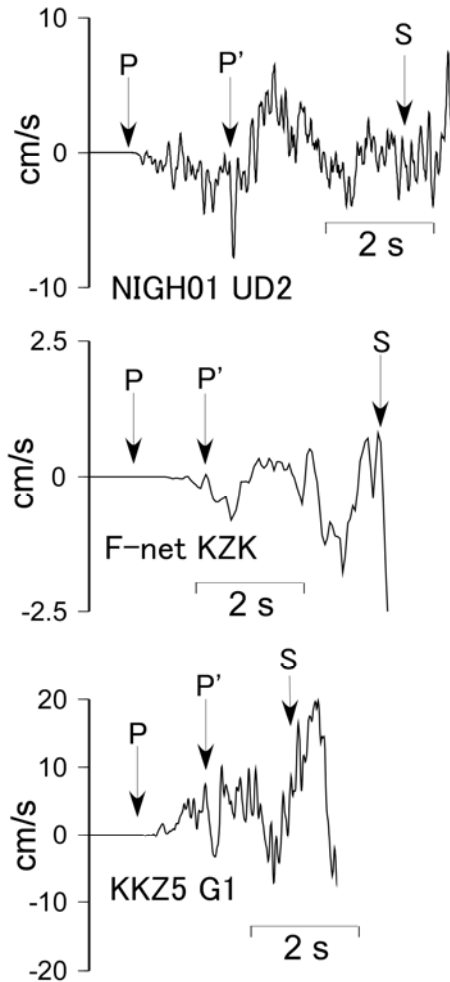


図 1. 新潟県中越沖地震で観測された初期破壊相・主破壊相。観測点は下から、柏崎・刈羽原発 5 号機、F-net 柏崎、KiK-net 長岡（地表）。P が初期破壊相、P' が主破壊相、S が S 波到着時刻。表示波形は全て速度記録。

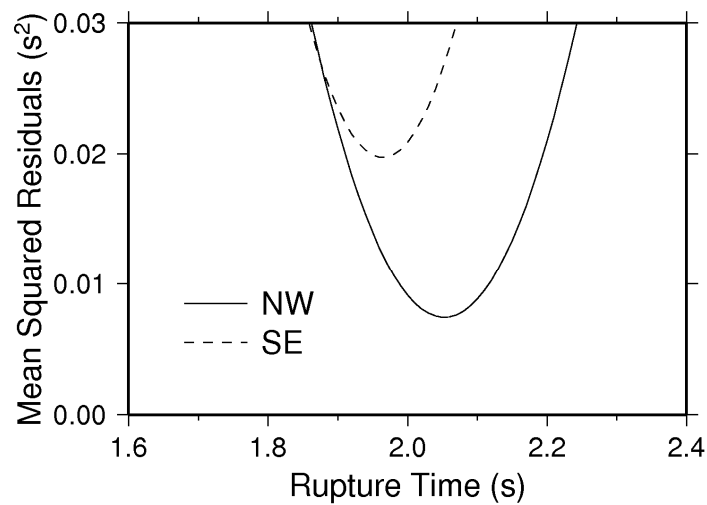
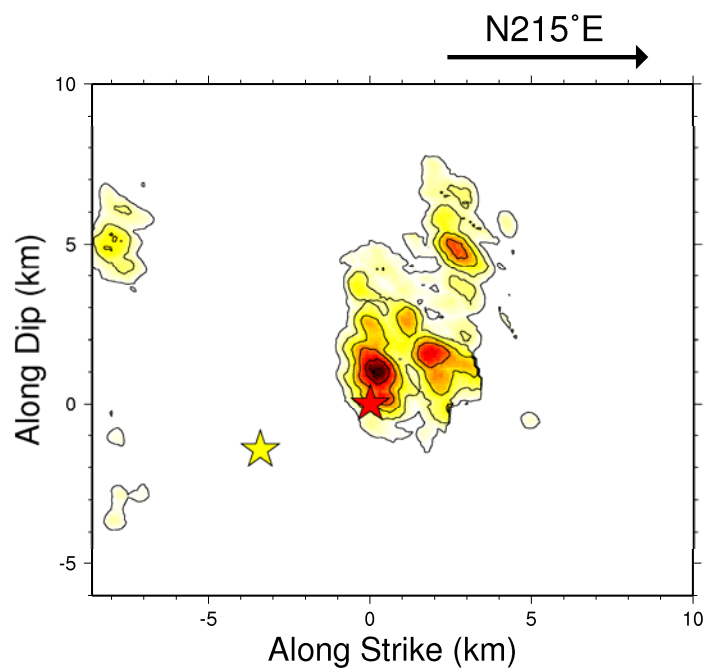


図 2. 主破壊開始点推定の誤差（破壊開始時間に対する二乗残差平均）。実線が初期破壊面を北西傾斜面に仮定した場合、破線が初期破壊面を南東傾斜面に仮定した場合。

(a)



(b)

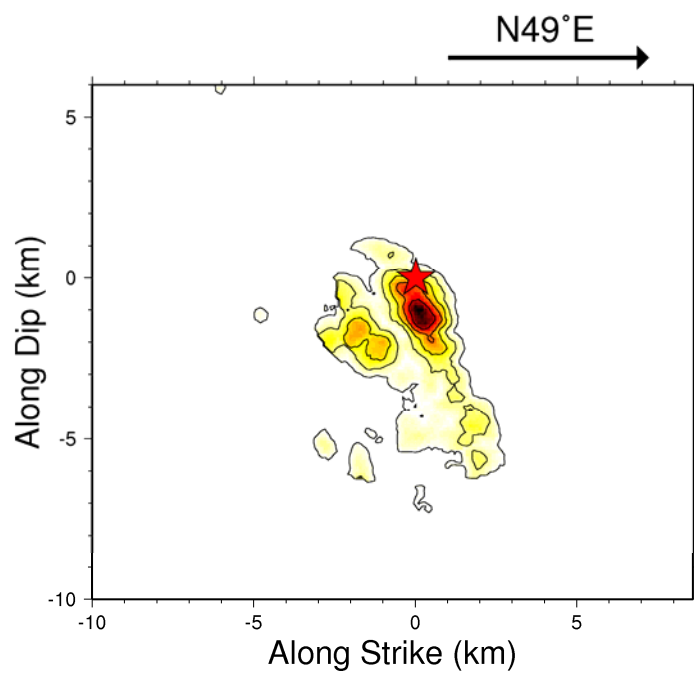


図 3. 主破壊開始後 3 秒間の P 波の放射強度分布。(a) Model 1 (北西傾斜面)、(b) Model 2 (南東傾斜面)。コンターは最大値の 50%から 10%おきに引いている。黄星が震源、赤星が主破壊開始点。

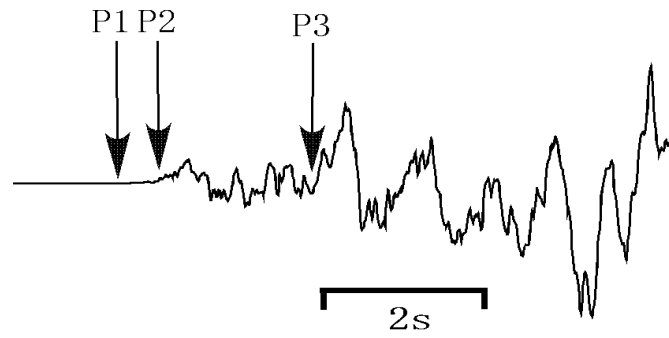


図 4. 能登半島沖地震で観測された上下動速度波形の例 (K-NET 輪島、ISK003)。 P1 が初動、P2 が第 2 震源相、P3 が主破壊相の立ち上がり。

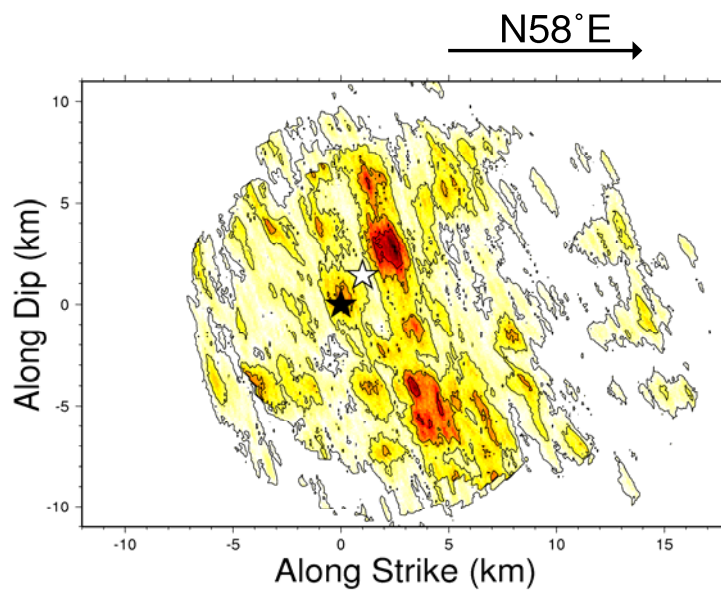


図 5. P1 が初動、P2 が第 2 震源相、P3 が主破壊相の立ち上がり主破壊開始点とイメージングの結果。コンターはピークの 60% から 10% おきに引いている。黒い星が第 2 震源、白い星が推定された主破壊開始点。