

SSS025-01

会場:302

時間:5月27日 14:15-14:30

## 地震の大きさ分布から推定した地震発生場のモデル

### A model of seismogenic layer inferred from the number-magnitude distribution of earthquakes

青木 治三<sup>1\*</sup>

harumi aoki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東濃地震科研

<sup>1</sup> TRIES

#### 目的

地震の大きさが破壊伝播のメカニズムによるのか、場の不均質によるのか、さまざまな研究があるが、前者では  $b$  値一定の説明が困難である。後者では断層面の自己相似な不規則性から  $b = 1$  がでてくるが、観測では 1 以下が多い。もし、1 以下の  $b$  値が広いマグニチュード範囲で成立するような媒質が地学的に説明できれば、地震メカニズムの研究に有用である。

#### 手法

地殻は、地質学的な時間スケールの断層運動によってランダムにブロック化されてきたと考えよう。そのシミュレーションから始める。まずある区域を想定し、それをランダムに 2 分する。それぞれを 2 分して 4 個、 $k$  回目には 2 の  $k$  乗個のブロックに分割される。これを分割次数  $k$  の素過程という。分割された全てのブロックサイズを求めれば累積度数分布ができる。地震の大きさはブロックサイズで決まるとすれば、地震数とマグニチュードの関係が得られるが、素過程では  $b$  値一定にはならない。分割進行中のある時点でみると、ブロックの集まりは、異なった分割次数の混在となっているであろう。各ブロックそれぞれのルーツをたどれば、次数が判る。したがって、ブロック全体を分割次数ごとに組分けすることは、原理的には可能である。それぞれの組には次数固有の統計的性質があるから、現段階の分割状況は重みを付けた素過程の和として表現できる。

#### 計算結果

シミュレーションによれば、重み一定ならば、 $M > 3$  の範囲で  $b = 1$  が得られた。 $M$  が小さい範囲では次数の高い分割が必要である。高次は低次からの推論に頼らざるを得ないが、予測は  $b = 1$  である。分割の次数に反比例する重みを採用すれば  $b = 0.8$  が得られる。

#### 観測との比較

気象庁一元化震源処理要素を整理したところ、本州中央部の広域あるいは岐阜県中心の地殻内地震でも  $P$ ,  $S$  の明瞭な地震では  $M > 0.5$  以上で  $b = 0.8$  である。極微小地震の観測もれを考慮すれば、観測とシミュレーションは一致している。したがって、地震の大きさは、媒質の不均質に大きく左右されるものと考えられる。しかし、各ブロックと地震が一々対応している必要はない。各ブロックには破壊伝播を止める性質がある。あるときは摩擦抵抗、あるときは asperity として働いているものと思われる。

一方、低周波地震の  $b$  値は 2 に近い値、深部低周波微動では 3 に近い値である。マグニチュードの意味が曖昧な微動はともかく、低周波地震の  $b$  値を説明するには、素過程が単独に現れたと考えざるを得ない。火山性低周波地震でも、西南日本の深部低周波地震でも、その発生源は火山やスラブの沈み込み等、局所的一時的であって、広域かつ長期に亘って作り上げた不均質構造の寄与は考えにくい。マグマの動きやスラブの沈み込み運動それぞれが本論の素過程と同類のものではなかるうか。

キーワード:  $b$  値, マグニチュード, シミュレーション, 断層, 地震発生場

Keywords:  $b$  value, magnitude, simulation, fault, seismogenic layer

SSS025-02

会場:302

時間:5月27日 14:30-14:45

## 2007年能登半島地震直後の余震活動

### Early aftershocks following the 2007 Noto Hanto, Japan, earthquake

加藤 愛太郎<sup>1\*</sup>

Aitaro Kato<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>ERI University of Tokyo

A shallow  $M_w = 6.7$  inland earthquake occurred on the west coast of the Noto Peninsula in Japan on March 25, 2007. A fine local tomography and a magnetotelluric (MT) survey conducted after the mainshock [Kato et al., 2008; Yoshimura et al., 2008] found out a low- $V_p$  and high-conductivity anomaly beneath the mainshock hypocenter. In addition, an anomalous depth dependency of the stress field associated with the mainshock was revealed [Kato et al., 2011]. These results suggest a potential involvement of a deep fluid reservoir with the earthquake generation. To access the dynamic interaction of fluids with the aftershock generation, I focus on the early aftershocks just following the mainshock. Recovery of the missing early aftershocks is quite important to state aftershock activity induced by fluid migrations. Thus, I used the waveforms of aftershocks as templates to detect the missing events within one-day after the mainshock, applying the matched filter technique [Shelly et al., 2007, Peng and Zhao, 2009]. We have a total of several hundreds of thousands positive detections.

SSS025-03

会場:302

時間:5月27日 14:45-15:00

## 全国の中規模固有地震活動の検出 Medium-scale characteristic earthquakes around Japan

鎌谷 紀子<sup>1\*</sup>, 岡田 正実<sup>2</sup>, 勝間田 明男<sup>2</sup>  
Noriko Kamaya<sup>1\*</sup>, Masami Okada<sup>2</sup>, Akio Katsumata<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象大学校, <sup>2</sup> 気象研究所

<sup>1</sup>Meteorological College, <sup>2</sup>Meteorological Research Institute, JMA

釜石沖 (Matsuzawa et al., 2002) や宮古島近海 (溜瀨・他, 2010) など、日本各地 (中村・他, 2010) で近年発見されている固有地震は、「ほぼ同じ大きさ、ほぼ同じ繰り返し間隔で、ほぼ同じ領域を破壊する地震」(例えば、溜瀨・他, 2010) であり、発生時期や規模をある程度予測できる地震であると考えられている。大きな規模 (M7 程度以上) の固有地震は、南海地震や東南海地震などが知られている。また、小さな規模 (M4 程度以下) の固有地震は繰り返し頻度が高いため、日本周辺でも多くのものが見つかっている。しかし、M4~M7 程度の中規模の固有地震については繰り返し頻度が低く、検出例が少ない。本研究では、時間的規則性・空間的近接性・規模および地震波形の相似性に着目し、全国を対象とした中規模固有地震活動の検出を試みた。その結果、10カ所中で規模固有地震活動を確認した。

解析は、日本周辺で1923年8月1日~2010年6月30日に発生したM4.5以上の地震について行った。まず、気象庁一元化震源の1つ1つの地震について、緯度経度の差6分以内、深さの差20km以内、マグニチュードの差0.4以内の地震グループを取り出すことにより、空間的および規模的に近接しているものを抽出した。その後、発生時期順に並べて時間的に隣り合う3つのイベントを順次取り出し、1番目と2番目及び2番目と3番目の地震の発生間隔の差が5年以内のものを抽出することにより、時間的規則性を持つ単独クラスターを検出した。群発地震や余震を除くため、地震発生間隔が2年以内のものは除いた。検出された固有地震候補の各領域の地震活動は、気象庁一元化震源に戻って震央分布図およびMT図で活動状況を確認した。検出された固有地震候補グループ内の各地震について、気象庁の87型電磁式強震計および95型計測震度計の地震波形を取得し、相関係数とコヒーレンスを算出した。

時間的規則性・空間的近接性・規模に基づき検出された固有地震候補グループは30個であり、それらのうち、上記地震波形があり、相関係数とコヒーレンスが計算できる地震グループは16個であった。これらの地震グループにおいて、「1観測点以上のどれか1成分以上で、相関係数が0.8以上かつコヒーレンスが0.8以上」もしくは「1観測点以上のどれか1成分以上でコヒーレンスが0.9以上」というものを調べたところ、厚岸沖M4.8・日高沖M4.8・浦河沖M5.4・種市沖M5.9・釜石沖M4.7・いわき沖M5.6・日立M5.2・つくばM5.3・銚子沖M5.0・沖永良部島西方沖AグループM5.1・宮古島南方沖M6.5の11個が該当した(Mは最新活動の気象庁マグニチュード)。厚岸沖M4.8は佐鯉・他(2010)による相関係数の報告があり、種市沖M5.9といわき沖M5.6に関しては長谷川・他(2005)による指摘と気象庁(2009)による解析結果がある。また、釜石沖M4.7はMatsuzawa et al.(2002)による解析結果があり、つくばM5.3は気象庁(2010)、沖永良部島西方沖AグループM5.1は溜瀨・他(2009)、宮古島南方沖M6.5は中村・他(2010)の報告がある。以下では、これらのように詳細な解析がなされていない、日高沖M4.8・浦河沖M5.4・日立M5.2・銚子沖M5.0について述べる。

日高沖M4.8の最新活動は2009/12/30であり、その震源位置は41度50.3分142度12.2分、深さ72kmで最大震度3である。この地震グループ内の、波形が得られなかった地震も固有地震であると仮定すると、平均活動間隔は6.5年となる。また、岡田(2004, 2009)および岡田・他(2007)による小標本論とベイズ統計対数正規分布モデルを使用して、2011/1/1を基準とした今後10年以内の発生確率を算出したところ92~99%となり、次の地震が70%の確率で発生すると予測される期間は2014/9~2018/10となった。同様に、浦河沖M5.4の最新活動は2008/6/26、41度49.5分142度40.4分、深さ55kmで最大震度4、平均活動間隔は7.5年、10年確率84~86%、70%期間は2012/9~2020/10となった。日立M5.2の最新活動は2008/8/22、36度26.5分、140度36.9分、深さ56kmで最大震度4、平均活動間隔は7.9年、10年確率84~87%、70%期間は2013/1~2021/4であり、銚子沖M5.0の最新活動は2001/4/17、35度37.0分141度5.3分、深さは38kmで最大震度3、平均活動間隔は11.2年、10年確率84~94%、70%期間は基準日~2016/12と算出された。

キーワード: 固有地震, 繰り返し地震, 相関係数, コヒーレンス, 日高沖, 日立

Keywords: Characteristic earthquake, Recurrent earthquake, Correlation coefficient, Coherence, Off Hidaka, Hitachi

SSS025-04

会場:302

時間:5月27日 15:00-15:15

## 房総沖スロースリップに伴うM5繰り返し地震 - 将来の震度5弱を予測する - Detection of M5 level recurrent earthquakes associated with the Boso slow slip events

長谷川 嘉臣<sup>1\*</sup>, 勝間田 明男<sup>2</sup>, 岡田 正実<sup>2</sup>, 鎌谷 紀子<sup>1</sup>  
Yoshiomi Hasegawa<sup>1\*</sup>, Akio Katsumata<sup>2</sup>, Masami Okada<sup>2</sup>, Noriko Kamaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象大学校, <sup>2</sup> 気象研究所

<sup>1</sup> Meteorological College, <sup>2</sup> Meteorological Research Institute, JMA

房総沖ではフィリピン海プレート (PHS) の沈み込みに伴い, PHS と陸のプレートの境界において, 約 6 年周期でスロースリップイベント (SSE) とそれに伴った群発地震が発生している (山本・大久保, 2003 など). 房総沖 SSE は国土地理院の GPS 観測や独立行政法人防災科学技術研究所の傾斜計などによって観測され, これまでに, 1983 年・1990 年・1996 年・2002 年・2007 年の計 5 回が報告されている (松村, 2008 など). 房総沖 SSE に伴う群発地震の規模は最大で M4 程度となることが多いが, 数回に 1 回, 最大で M5 程度となる場合がある. この場合, 最大震度が 5 弱となる可能性があるため, その地震を予測することができれば防災上有意義な情報となる. これら M5 クラスの地震は, 同じアスペリティを破壊している繰り返し地震である可能性があるため, 房総沖の M4.5 以上の地震波形を, マイクロフィルムに記録された煤描きまたはインク描き記象紙の時代までさかのぼり, 波形相関を用いて地震波形の相似性を調べた.

まず, 1925 年 1 月以降に房総沖で発生した M4.5 以上・震源の深さ 40km 以浅の地震を選出し, 東京観測点の観測波形 (南北動成分) を網羅的に取得した. ただし, 1983 年以降については, 房総沖 SSE に伴う地殻変動が観測されている時期の群発地震波形を取得した. 1990 年まではマイクロフィルム, それ以降はデジタルデータである. 次に, 年代が新しい波形を基準に, 目視で見た目が似ているものを抽出して繰り返し地震候補とした. そして, マイクロフィルム記録はデジタイズを施し, 全ての波形の周波数特性を 63B 型直視式地震観測装置のものに揃え, ローパスフィルターをかけて相関係数を求めた. 相関係数が相対的に高かった最新 3 イベントについては, 横浜観測点・館山観測点の地震波形についても相似性の確認を行った. なお, 相関係数の高さを評価するために, ほぼ同じ場所・ほぼ同じ規模で発生した地震であるが波形が似ていなかった地震波形についても相関係数を計算して比較した.

取得した地震波形を確認したところ, 1955 年 10 月 20 日 M5.1, 1966 年 7 月 14 日 M4.6, 1983 年 5 月 22 日 M4.5, 1990 年 12 月 30 日 M4.8, 2007 年 8 月 18 日 M4.8 および 2007 年 8 月 18 日 M5.2 の地震波形が酷似していることが分かった. これらのうち最新の 2007 年 8 月 18 日 M5.2 の地震波形を基準波形として相関係数を求めたところ, 0.6~0.73 となった. また, 震源からの方向が異なる横浜観測点・館山観測点における 1990 年 12 月 30 日 M4.8, 2007 年 8 月 18 日 M4.8 および 2007 年 8 月 18 日 M5.2 の地震波形についても目視で相似性が確認された.

これらの地震は波形の相関係数が高いことから一種の相似地震であり, 同じアスペリティを破壊している繰り返し地震であると考えられる. 1966 年 7 月と 2007 年 8 月には同日に 2 つの相似地震が発生していることから, このアスペリティは規模が大きいメインイベントと小さいサブイベントの少なくとも 2 つに分けて破壊される場合もあると考えられる. 1983 年 5 月の地震は M4.5 と小さく, 1990 年 12 月のサブイベントであると考えられる. これら M5 クラスの繰り返し地震のメインイベントが約 17 年周期で発生していると仮定すると, Hanks and Kanamori(1979) と Nadeau and Johnson(1998) から求められるすべり量は約 2.6cm/year となる. Seno *et al.*(1993, 1996) によれば PHS と陸のプレートの相対速度は 2.9cm/year であるから, 繰り返し地震を起こしているアスペリティの固着率は約 90% と推定できる. 1983 年 5 月・1990 年 12 月・2007 年 8 月の地震については, 房総沖 SSE とそれに伴う群発地震が確認されていることから, 1955 年 10 月と 1966 年 7 月にも SSE に伴う群発地震があった可能性があり, 房総沖 SSE に伴う群発地震の 3 回に 1 回程度, M5 クラスの地震が発生する可能性が高いことが推測される. 岡田 (2004, 2009), 岡田・他 (2007) による小標本論とベイズ統計対数正規分布モデルを用いてこの地震の発生確率を計算した結果, 今後 20 年以内の発生確率は 73~77%, 次の地震が 70% の確率で発生すると予測される期間は 2016 年 3 月~2038 年 8 月と見積もられた.

キーワード: 房総スロースリップイベント, 群発地震, 繰り返し地震, 波形相関, アスペリティ, 確率予測

Keywords: Boso slow slip event, Earthquake swarm, Recurrent earthquake, Waveform correlation, Asperity, Probabilistic prediction



## コーダスペクトル比法により推定した東北日本沈み込み帯のプレート境界地震の応力降下量 Stress drops of interplate earthquakes along the Japan trench by coda spectrum ratio analysis

内田 直希<sup>1\*</sup>, 松澤 暢<sup>1</sup>  
Naoki Uchida<sup>1\*</sup>, Toru Matsuzawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・予知セ  
<sup>1</sup> RCPEV, Tohoku Univ.

同一観測点において、経過時間が等しいコーダ波のスペクトル比を用いることで、比較的距離が離れた地震ペアにおいても、伝播経路や震源メカニズムの違いによる影響を軽減してコーナー周波数の見積りを行うことができる(たとえば, Mayeda et al., 2007; 染井, 2010; 和田・他 2010; Moyer et al., 2010, 2010)。本研究では、最初に、2001年と2008年の岩手県釜石沖のM4.9前後の繰り返し地震についてコーダスペクトル比法を用い、コーナー周波数および応力降下量を見積もり、その適用限界について調べた。今回応力降下量を求めるM4.9前後のプレート境界地震に対して、ペアとする地震を震源間距離がおおよそ1km以内の同じ震源メカニズムの地震(スペクトル比をとるにあたってよい条件)とした場合と、震源間距離が40-50kmの、内陸地震とスラブ内地震(スペクトル比をとるにあたって悪い条件、震源メカニズムも異なると考えられる)とした場合でのスペクトル比の形状およびコーナー周波数の推定結果のばらつきを調べた。

その結果、直達波部分とS波コーダ波部分の解析を比べると、イベント間距離が1km以内の同じ震源メカニズムの地震では、コーダ波部分でも直達波部分でもほぼ同じコーナー周波数が得られた。一方、震源間距離が40km以上のメカニズム解が異なると思われる地震に対しては、直達波部分では、観測点によりスペクトル比が安定せず、コーナー周波数の推定結果がばらつくが、コーダ波部分では、ばらつきが小さく、震源間距離が近い場合とほぼ同じ結果が得られることが分かった。ここで、ウィンドウ長は5秒とし、直達波部分はS波到達時を基準とした1秒ごとの2つのウィンドウ、コーダ波部分は、S波到達時から20秒以降50秒前後までの複数のウィンドウによるスペクトル比をスタックした。この結果により、距離が近く、メカニズムが似た地震を選ぶことが難しい場合でも、コーダ波を使うことでスペクトル比解析が適用できることを確認した。

次に、コーダ波のスペクトル比解析を、以下の3つのプレート境界地震に適用した。1) 小繰り返し地震(M3-4.4, Uchida et al, 2006, 2009), 2) 中規模繰り返し地震(M4.5-5.9, Uchida et al., 2010), 3) F-netによるメカニズム解が低角逆断層型である地震(M3.6-5.9, 防災科学技術研究所, 2011)。これらの海域下のプレート境界地震は、震源決定の誤差が時に20km以上となり近接した地震を選ぶことが難しく、さらに小地震では震源メカニズムも知ることが難しいが、コーダ波を用いることで精度良い解析が可能になると考えられる。コーダ波のスペクトル比解析の結果、3つのカテゴリの地震すべてで深さとともに応力降下量が大きくなる傾向が見られた。この結果は3)の地震を解析したMoyer et al., 2010の結果と調和的であり、静岩圧が大きい深い地震ほど、応力降下量が大きくなることを示していると考えられる。

## 断層形状の複雑性と共分散成分を考慮した波形インバージョン法の開発：2010年ハイチ地震への適用

### Complex seismic source inversion method with the data covariance matrix: Application to the 2010 Haiti earthquake

笠原 天人<sup>1\*</sup>, 八木 勇治<sup>1</sup>  
Amato Kasahara<sup>1\*</sup>, Yuji Yagi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 筑波大生命環境

<sup>1</sup>Life and Env. Sci., Univ. Tsukuba

地震の発生源である震源断層は、複雑な形状を有しており、平面で断層面を近似することは困難である。メカニズム解の変化に敏感な観測点が存在する場合は、平面で震源断層を近似することによって解のイメージが歪められることが想定される。断層形状の誤差は、断層面の走向、傾斜の誤差と、断層面の位置の誤差に分けられる。遠地実体波の解析では、位置の変化による走時の変化は大きくないことを考慮すると、走向、傾斜の仮定に起因するモデル誤差が卓越すると考えられる。このモデル誤差は、仮定した震源領域においてメカニズム解の自由度を増やすことで、軽減できる。

本研究では、震源領域で、メカニズム解の空間-時間による変化を許すことで、断層形状の複雑性を反映した解を求める手法を開発した。自由度の大きいモデルを用いた解析で安定な解を求めるために、Yagi and Fukahata (2010) の、グリーン関数の誤差ならびに観測誤差の共分散成分を考慮した定式化を拡張して用いた。

開発した手法を、震源過程が複雑である2010年ハイチ地震に適用した。空間-時間に対するスムージングの拘束条件のみで、広域の応力場と一致するP軸分布が求められた。モーメントテンソル解の分布より、震源付近、震源の西側および東側の、それぞれ異なるメカニズム解の3つの断層が連動したことが示される。各断層の平均的なメカニズム解から推定される東西方向の走向は、3つの断層全てでほぼ一致しており、InSARデータから得られた地表面の東向き変位分布(Hayes et al., 2010)のヒンジ線方向とほぼ一致する。このことから、2010年ハイチ地震は、Enriquillo断層と斜交する、未知の断層が活動した可能性がある。

時間変化に着目すると、異なる断層に乗り移る際に、破壊は、強度の低い地表付近を經由して伝播していることが確認できる。また、中央と断層の形状に近い東側の断層の方が西側の断層よりも早く連動している。このことは、断層の形状の違いが破壊過程を規定していることを示唆する。西側への破壊が停止した先で、西側の断層メカニズムとはメカニズムの異なる余震が誘発されており、弱面の形状が変化する領域で破壊が停止したことが推定される。

キーワード: 遠地実体波, 2010年ハイチ地震, 複雑な断層形状, 震源インバージョン

Keywords: teleseismic body wave, the 2010 Haiti earthquake, complex fault geometry, seismic source inversion

SSS025-07

会場:302

時間:5月27日 15:45-16:00

## 深発地震における破壊伝播速度異常 Anomalies of rupture velocity in deep earthquakes

鈴木 満<sup>1</sup>, 八木 勇治<sup>1\*</sup>

Mitsuru Suzuki<sup>1</sup>, Yuji Yagi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学大学院生命環境科学研究科

<sup>1</sup>Life and Env. Sci., Univ. Tsukuba

深発地震の放射パターンはせん断断層すべりを意味するダブルカップルのパターンを示すが、100-200 km 以深の温度圧力状態では浅い地震と同様なプロセスの脆性破壊が起こるのは難しいと考えられている。また、深発地震の活動は600 km 付近で活発になることが知られているが、この原因は必ずしも明らかになっていない。深発地震の震源特性や発生メカニズムを解明するための一つの鍵は、深発地震における詳細な震源過程を求めることであり、これまでに多くの研究がなされてきた。しかし、震源過程解析によって得られた個々の地震の震源パラメータは、解析者によって大きく異なることが指摘されている (Frohlich, 2006)。その結果、震源特性を知る上で重要な破壊伝播速度はS波速度の30-90%、応力降下量は5-200 MPaと、浅い地震に比べて非常に広い範囲でばらついており、深発地震における震源過程の明確な性質は明らかになっていない。

このような問題を踏まえ、バックプロジェクション法 (Ishii et al., 2005) をグローバル観測網であるGSN, FDSNで観測された遠地実体波 (P波) に適用し、深発地震の安定かつ再現性の高い断層運動のイメージングを行った。この手法では、エネルギーを放出した可能性がある時空間領域を多数のグリッドで表現し、実際の観測波形データを重ね合わせることで地震波エネルギーの時空間分布を求めるため、波形インバージョン法とは異なり様々な未知のモデルパラメータを仮定することなく、観測波形から破壊の伝播過程を直接求めることができる。本研究では波形を重ね合わせる際に4th-root stacking法 (Xu et al., 2009) を適応した。4th-root stacking法は相関の強い位相をより強調して重ね合わせるため、通常のスタッキングよりも明瞭なイメージを得ることができる。

バックプロジェクション法を用いて、1994年以降に300 km以深で発生したMw7.0以上の地震について解析を行った。その結果、破壊伝播速度は全体的にS波速度の60%以下に抑えられるが、深さ約530-610 kmでは約80%の地震がS波速度の60%以上の高速破壊を示すことが明らかになった。570-610 kmでは全ての地震が高速破壊となる一方で、530-570 kmの領域は低速・高速破壊の地震が共存しており、破壊のモードが変化する遷移領域の様にも見える。この結果は地震活動の深さ分布とも調和的であり、高速破壊の地震が見られる530-610 kmでは深発地震の発生頻度はピークを迎える。また、深発地震は一般的に余震が起こりにくいが、深さ530-610 kmでは余震を伴う地震の割合が急激に増加する (たとえば、Persh and Houston, 2004)。これらの結果は、深発地震は全体的に破壊エネルギーが大きいことによる高速破壊への移行が妨げられているが、深さ530-610 kmでは破壊エネルギーが相対的に小さくなるため、高速破壊へと加速しやすいことを示唆する。

キーワード: 深発地震, バックプロジェクション法, 破壊過程, 破壊伝播速度

Keywords: deep earthquake, back projection method, rupture process, rupture velocity

SSS025-08

会場:302

時間:5月27日 16:00-16:15

## スラブ内地震のスケーリングモデル Scaling Model of Intraslab Earthquakes

小山 順二<sup>1\*</sup>, 前田 宜浩<sup>2</sup>

Junji Koyama<sup>1\*</sup>, Takahiro Maeda<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Natural History Sci., Hokkaido Univ., <sup>2</sup>NIED

スラブ内地震はプレート間地震に比べて短周期地震波の励起が強い。近年強震動観測の充実により、より詳細なスラブ内地震の震源パラメータが明らかにされつつある。特に加速度震源スペクトルの短周期レベルAはほぼ平坦であり、自乗震源モデルを支持している。また強震波形のインバージョンなどにより、強震動生成領域（アスペリティーの総面積のほぼ等しい）と地震モーメント $M_0$ の関係は、プレート間地震で知られている、震源の幾何学的相似則を満たしていることも知られている。しかし、スラブ内地震のAと $M_0$ の関係はプレート間地震のそれとは明らかに異なる傾向を示している。ここでは、Koyama(1997)の不均質断層破壊モデルに基づき、プレート間地震と比較しながら、スラブ内地震の震源パラメータのスケーリング則を考える。

Koyama(1997)の不均質断層破壊モデルは、平均場の破壊として、断層の長さ $L$ ・幅 $W$ と平均すべり速度 $a$ 、その上に畳重するランダムな不均質場の小さな破壊がパッチコーナー周波数 $\nu$ とすべり速度のゆらぎ $\sigma$ で表わされる。プレート間地震には、これらのパラメータ間に、(1) Geometrical Similarity, (2) Kinematic Similarity, (3) Dynamical Similarity, (4) Stochastic Similarityの相似則が存在する。それぞれ、 $W/L$ ,  $a$ , 応力降下量,  $\sigma^2$ が地震の大きさに依存しないという関係である。

スラブ内地震でも(1), (2)は満足しているようである。また、 $\nu$ は不均質領域の破壊時間の逆数に比例する量であり、スラブ内地震では、アスペリティーの数 $N$ と $M_0$ の経験則から、Scaling Patch Corner Frequency Model;  $M_0 \propto N^2$ は地震の大きさにより小さくなる、が一定モデルより、観測をよく説明するようだ。さて、(4)はどうだろうか。

不均質断層破壊は、震源スペクトルの低周波数側で当然地震モーメント

$$M_0 = \mu LWT_0 a = \mu c W^3 a / \nu$$

を示す。ただし、 $L=cW$ ,  $T_0=W/\nu$ ,  $\nu$ は平均的破壊伝播速度とした。また短周期加速度スペクトルは

$$|B_c(\omega)| = 2 \mu W^2 [(2\nu^2)/W]^{1/2} (= A)$$

で近似できる。もし、(4) Stochastic Similarityがスラブ内地震でも成立するなら、

$$M_0 \propto A^2 \quad (A)$$

が上の二つの式から導かれるはずである。もし、スラブ内地震が不均質性のない自乗モデルで説明されるなら、それは

$$M_0 \propto A^3 \quad (B)$$

となるはずである。

池田(2010)や笹谷ほか(2006)が調べたスラブ内地震は、(A)の関係を支持しているように見える。つまり、スラブ内地震でもやはり、短周期の地震波は断層破壊の不均質に強く依存し、その不均質性には(4) Stochastic Similarityが成り立ち、不均質な断層破壊に不変量があることを示している。そしてそれはプレート間地震の不均質性よりも強いことが $\sigma^2$ の値からしめされる。

池田 孝(2010), 北海道大学地球物理学研究報告, 73号。

Koyama(1997), Complex Faulting Process of Earthquakes, Kluwer Academic Press.

笹谷ほか(2006), 北海道大学地球物理学研究報告, 69号。

キーワード: スラブ内地震, スケーリング

Keywords: Intraslab earthquakes, scaling law



SSS025-09

会場:302

時間:5月27日 16:30-16:45

## Dynamic Fault Rupture Propagation in Agarose-gel Dynamic Fault Rupture Propagation in Agarose-gel

桑野 修<sup>1\*</sup>, 平野 史朗<sup>1</sup>, 藤田 哲史<sup>1</sup>, 日下部 哲也<sup>1</sup>, 小寺 祐貴<sup>1</sup>, 亀 伸樹<sup>1</sup>, 中谷 正生<sup>1</sup>, 安藤 亮輔<sup>2</sup>

Osamu Kuwano<sup>1\*</sup>, Shiro Hirano<sup>1</sup>, Satoshi Fujita<sup>1</sup>, Tetsuya Kusakabe<sup>1</sup>, Yuuki Kodera<sup>1</sup>, Nobuki Kame<sup>1</sup>, Masao Nakatani<sup>1</sup>, Ryosuke Ando<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Geological Survey of Japan AIST

We report on the experimental observation of mode-II crack propagation along a weak plane in agarose-gel. Agarose gels of three different concentration (1, 2, and 3 wt%) are prepared and their rheological properties are measured. In the experiment, transparent agarose-gel which contains straight weak plane is applied constant load. The position of crack tip is tracked by means of photoelastic visualization. We observed evolution of rupture front from slow nucleation to fast, unstable propagation. Observed terminal velocity of rupture propagation for 1wt%-gel is typically about 4m/s, which is corresponding to shear wave velocity of the gel. Terminal velocity and critical crack size are compared with theoretical expectations.

We also discuss the capability of the experiment to investigate the earthquake rupture process.

Keywords: fracture experiment, fault dynamics, fault nucleation, laboratory experiment, photoelasticity, gel

## 損傷発達によるエネルギー変化に基づく二次的破壊の多様性の理解

### Understanding of diversity of the secondary fracture based on energy change due to damage evolution

鈴木 岳人<sup>1\*</sup>

Takehito Suzuki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東大・理・地惑

<sup>1</sup>EPS, Univ. Tokyo

動的に亀裂が成長した際に二次的破壊がどのように成長するのかを考えるため、損傷の効果を取り入れる。主断層の運動に基づいてその断層面付近に生成される破壊と定義される二次破壊は多くの側面を見せる。主断層の滑った後、その周辺の媒質中に無数の微小亀裂が残るという実験結果がある。加えて、断層面の周囲に破碎された領域が現れることもある。例えば、Dor et al. (2006) は San Andreas 断層帯を調べ、均一に破碎された領域と選択的に破碎された領域を見出した。前者は結晶が簡単に崩れてしまう領域で、後者は部分的にそういったことがみられる領域である。このように二次破壊には多様な振る舞いが知られているが、それらのすべてを説明するような統一的なモデルは構築されてこなかった。我々は Murakami and Kamiya (1997) の枠組みに基づきそのようなモデルを考える。損傷テンソル  $D$  とエネルギー解放テンソル  $Y$  を仮定する。損傷テンソルは媒質の損傷状態を記述し、エネルギー解放テンソルは単位損傷生成によって解放される歪エネルギーを表す。

損傷を生成する媒質中に二次元の亀裂を考える。エネルギー解放テンソルに関して、以下のように破壊基準を導入する。まずテンソル  $Y$  と  $D$  を、 $Y$  の主軸で見たものを書き直す。この時  $Y$  は対角的となる。もし対角化された  $Y$  の 1-1(2-2) 成分が破壊基準  $Y_c$  を超えたら、回転された  $D$  の 1-1(2-2) 成分を機械的に 1 とする。  $D$  のすべての固有値が 1 になったら、その領域は均質に破碎されたとみなされる。一方 1 とならない固有値がある場合は選択的に破碎されたと考える。ここでは  $Y_c$  及び  $\eta_2$  と  $\eta_4$  というパラメータがあり、二次破壊に見られる多様性をこれらのパラメータの観点から理解する。均質な破碎は、 $\eta_2$  が有限で  $\eta_4$  がゼロ、そして  $Y_c$  が破壊基準を満たすほど十分に小さい場合として表現される。この時テンソル  $D$  と  $Y$  は単位テンソルに比例する量であり、破碎は等方的に起こる。一方、選択的破碎は  $\eta_4$  が有限で  $Y_c$  が十分に小さい場合であった。もし  $Y_c$  が十分に大きいと、破碎は起こらず断層面の周囲に微小亀裂が分布した。我々の枠組みでは、最大引張の方向と微小亀裂の面の向きを共に議論できるため、開口と剪断の両方の微小亀裂が理解される。それらの平行成分は開口モードを表し、垂直成分は剪断モードを表す。ここで得られた結果は、損傷をスカラー変数ではなくテンソル量で取り扱うべきであることを示唆する。

キーワード: 損傷テンソル, エネルギー解放テンソル, 二次的破壊, 微小亀裂, 破碎

Keywords: damage tensor, energy release tensor, secondary fracture, microcrack, pulverization

SSS025-11

会場:302

時間:5月27日 17:00-17:15

## 二次元準静的剪断破壊のシミュレーション：すべりと時間に依存する断層構成則とすべり運動の多様性

### 2-D simulation of shear faulting: the slip- and time-dependent fault constitutive law and a diversity of slip behaviour

野村 有紀<sup>1\*</sup>, 橋本 千尋<sup>1</sup>

Yuki Nomura<sup>1\*</sup>, Chihiro Hashimoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院

<sup>1</sup>Graduate School of Nagoya University

The occurrence of interplate earthquakes can be regarded as the process of tectonic stress accumulation and release in source regions, driven by relative plate motion. Stress accumulation between earthquakes results from slip deficit relative to steady plate motion. Recently, on the basis of detailed analysis of geodetic and seismic data, it has been revealed that many slow earthquakes that have extraordinary low slip-velocity occur at plate interfaces. This indicates a diversity of slip behaviour to release the accumulated stress at plate interfaces. The mode of fault slip is prescribed by constitutive properties there. Thus, to understand the process of tectonic stress accumulation and release in plate subduction zones, it is crucial to make clear the dependence of slip behaviour on the constitutive properties.

In the present study, we developed a simple two-dimensional simulation model of shear faulting to examine in detail the dependence of slip behaviour on fault constitutive properties through the entire process of earthquake generation cycles. The coupled non-linear system prescribing the process of stress accumulation and release in a strength asperity consists of the equation of equilibrium for two-dimensional shear faulting, fault constitutive relation, and steady slip motion as a driving force. First, we used a simple slip-weakening fault constitutive law. In this system, slip behaviour in the strength asperity is controlled by a single non-dimensional parameter defined by  $(\text{rigidity} \times \text{critical weakening displacement}) / (\text{peak strength} \times \text{characteristic length indicating the size of the strength asperity})$ . In the case that the non-dimensional parameter is small, accumulated stress is released by unstable slip, while in the case that the non-dimensional parameter is very large, accumulated stress is released by stable slip. Only in the case that the non-dimensional parameter is moderately large, a slow slip event can be realized. Second, we used the slip- and time-dependent constitutive law by Aochi & Matsu'ura (2002), which has been derived from theoretical consideration on the fault-surface abrasion with slip and adhesion with contact. Through numerical simulation, we reproduced recurrent stable/unstable fault slip in the strength asperity. In this case, the dependence of slip behaviour on the constitutive parameters is not so simple. The essential parameters controlling the slip- and time-dependent fault constitutive law are the abrasion rate and the adhesion rate. Given the values of the abrasion rate and the adhesion rate, and the past history of the fault slip, the values of fault constitutive parameters, the breakdown strength drop and the critical weakening displacement, can be defined at each moment. Such a process dependence of the fault constitutive parameters causes complicated fault slip behaviour.

SSS025-12

会場:302

時間:5月27日 17:15-17:30

## 応力降下量の臨界すべり量依存性

## Dependence of earthquake stress drop on critical slip-weakening distance

加藤 尚之<sup>1\*</sup>

Naoyuki Kato<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>ERI, Univ. Tokyo

Earthquake stress drop is one of the most fundamental parameters that characterize earthquake sources. It is known that there is a large variation of estimated stress drop, and its origin is unknown. Numerical simulations are carried out in order to examine factors that control stress drop of earthquakes. A straight fault, on which friction obeys a rate- and state-dependent friction law, is embedded in a 2D uniform elastic medium, and the fault is shear loaded at a constant rate. Velocity-weakening friction is assumed on the central part of the fault, which is sandwiched between regions of velocity-strengthening friction. Stable sliding at the velocity-strengthening regions generates stress concentration at the edges of the velocity-weakening region, which results in earthquake occurrence. Stress drop is measured by the ratio of average slip on the fault to the fault rupture length, using a plane-strain shear crack model. Many simulations are done for various values of applied normal stress to the fault and characteristic slip distance  $L$ . Simulation results indicate that the average stress drop increases with the normal stress and  $L$ . By definition, the stress drop is proportional to the average seismic slip at the velocity-weakening region of the model fault, and therefore to accumulated slip deficit during an interseismic period approximately. Rupture occurs when the stress concentration at an edge of the locked zone becomes large enough to overcome fracture energy  $G_c$ , which is approximately proportional to the normal stress and  $L$ . Critical slip-weakening distance  $D_c$  and  $G_c$  are estimated from relations between shear stress and slip obtained for simulated data, and it is found that stress drop increases with  $G_c$  and  $D_c$ . Stress drop does not linearly increase with normal stress, which may be related to relatively small depth dependence of observed stress drop. Note that the above results hold when seismic coupling is high and rupture starts near an edge of the locked region of the fault. When seismic coupling is low because of low normal stress or large  $L$ , stress drop is simply proportional to the normal stress and is not dependent on  $L$  or  $D_c$ . It is known that stress drop is little dependent on  $L$  and is proportional to normal stress for a single-degree-of-freedom spring-block model. This is because stress concentration at an edge of a locked zone cannot be realized in the spring-block model.

Keywords: earthquake mechanics, earthquake parameters, friction, numerical simulation



## 断層の剪断破壊強度 (V) : 地殻応力の配向と GPS Velocity の方向

## Shear fracture strength of faults (V): The orientation of in-situ stress and the direction of GPS velocity

山本 清彦<sup>1\*</sup>, 矢部 康男<sup>2</sup>, 佐藤凡子<sup>3</sup>

Kiyohiko Yamamoto<sup>1\*</sup>, Yasuo Yabe<sup>2</sup>, Namiko Sato<sup>3</sup>

<sup>1</sup> なし, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> なし

<sup>1</sup>none, <sup>2</sup>Graduate School of Sci., Tohoku Univ., <sup>3</sup>none

1. はじめに: 佐藤・他 (2003) は兵庫県南部地震で運動した野島断層近傍で、山本・他 (2004) は北上山地の4地点で DRA (e.g. Yamamoto, 2009) による測定を行った。また、Tamaki and Yamamoto (1992) は日本海大和海盆の ODP Hole 794C で地殻応力を測定した。これらの測定によって、1) 最小水平応力の方向がほぼ GPS Velocity の方向に一致していること、2) ODP Hole 794C では、最小水平応力の方向が Okada et al. (1978) によって得られている日本海の上層マンテルの P 波最大速度の方向にほぼ一致していること、3) 最大水平応力の方向がほぼ断層の走向に直交していること、が明らかになった。(2) は GPS Velocity が上層マンテルの運動の反映であり、地殻応力が GPS Velocity に平行な変位によって生じている可能性と、(3) は断層の剪断破壊強度が極めて小さいということ、すなわち、weak fault であることを示唆している。

Yamamoto (準備中) は weak faults を説明する断層体模型を提案しているが、weak faults が断層の普遍的な性質であることを示すためには、地殻応力のデータが必要である。しかし、現場で測定されたデータは多くはない。山本・矢部 (2007) は (1) の結果に基づいて、最近発生した比較的大きな地震の発進機構から得られる断層の走向と GPS Velocity の方向を比較して、これらが 15 度以内の差で相互に平行あるいは直交することを指摘した。東北地方では、その後 DRA による測定が6点追加され (矢部, 2005)、10 地点の応力の配向が明らかになった。ここでは、これらの10 地点の測定結果を含めて、地殻応力の配向と GPS Velocity との関係をあらためて検討する。

2. 結果 岩石に記憶される地殻応力は長時間 (数年以上) にわたって印荷され続けた地殻応力の平均的な値である (Yamamoto, 2009)。したがって、DRA で測定された応力の配向は長期間の GPS velocity の平均的な方向と比較するのがよい。ここでは 1997/4 から 2007/5 の GPS velocity のデータを用いて、応力測定点の周囲 20km 以内にある GPS 測定点での GPS Velocity と比較した。最大あるいは最小水平応力の方位と GPS Velocity の方向との差は、脊梁地域の GNB をのぞいて、平均で約 10 度であり、太平洋岸北部 FDI の 22 から 24 度が最大である。

佐藤・他 (2003) のデータを参照すると、DRA による方位の精度は 5 度以内である。一方、同一孔で、深さにより最大約 25 度のばらつきがある。したがって、 $\pm 13$  度程度の差は局所的なゆらぎとして解釈できる。1997 から 2007 の期間を '97 から '02 と '02 から '07 に分けて GPS Velocity の方向をみると、その差は北部の HSK、FDI では約 30 度 ( $\pm 15$  度)、南部の ENS、SND で約 50 度 ( $\pm 25$  度) の違いがあるが、中部の KGJ (Tono)、KMS、SNR ではおよそ 15 度 ( $\pm 8$  度) 以内である。1997 から 2007 の期間には 2003 年十勝沖地震、2003 年宮城県北部地震、2004 年上越地震、2005 年宮城県沖地震、2007 年中越沖地震があり、GPS Velocity の方向が地震に伴って最大 50 度程度の短期的な変動が生じることを示している。しかし、応力の主軸方向が長期の GPS velocity との一致することは、地殻応力が長期的な平均の GPS Velocity に平行な変位によって生じていることを示している。

3. 結論 Yamamoto (準備中) は、破碎帯とアスペリティーからなる断層模型を提案し、剪断強度が地震での平均応力降下量と同程度であると推定した。山本・矢部 (2007) は最近発生した比較的大きな地震の断層の走向が最大約 15 度の差で GPS Velocity の方向に一致していることを示した。ここでは GPS velocity と応力の主軸方向が約 10 度の差で一致していることを示した。ここで、同一地点の応力にも  $\pm 13$  度程度の不確定さがあることを考慮すれば、これらの断層の断面は主応力面とほぼ一致していると考えて良い。以上から、これらの断層は weak faults であるといえる。

キーワード: weak faults, GPS velocity, 地殻応力, 変形率変化法 (DRA), 断層の走向, ODP Hole 794C

Keywords: weak faults, GPS velocity, in-situ stress, deformation rate analysis (DRA), strike of a fault, ODP Hole 794C

SSS025-14

会場:302

時間:5月27日 17:45-18:00

## 間隙流体圧変化にほとんど支配された地震サイクルのプライマリーモデル A primary model of earthquake cycle almost controlled by pore pressure evolution

三井 雄太<sup>1\*</sup>, 平原 和朗<sup>2</sup>, Massimo Cocco<sup>3</sup>  
Yuta Mitsui<sup>1\*</sup>, Kazuro Hirahara<sup>2</sup>, Massimo Cocco<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 北大・理, <sup>2</sup> 京大・理, <sup>3</sup> INGV

<sup>1</sup>Sci., Hokkaido Univ., <sup>2</sup>Sci., Kyoto Univ., <sup>3</sup>INGV

In a recent Ph.D thesis by the first author (and related papers), certain effects of pore pressure evolution are introduced to simple numerical models for earthquake cycles. One is the pore pressure increase by shear heating, and the others are the pore pressure alteration by porosity changes. Since evolution of pore pressure within fault zones directly affect friction as well as frictional coefficient, earth cycles in fluid-saturated fault zones are related to pore pressure evolution by necessity. This introduction of the pore pressure evolution was an essential step toward constructing realistic mechanical models for natural faults.

On that basis, here, we make a model of earthquake cycle, almost controlled by continuous evolution of pore pressure. It would be an alternative model to that just controlled by evolution of frictional coefficient. By unifying our previous models of one-degree-of-freedom (*Mitsui and Hirahara* [2009, JGR], *Mitsui and Hirahara* [2009, GRL], *Mitsui and Cocco* [2010, GRL]), we can implement the continuous effects of pore pressure evolution by shear heating (including heat diffusion), porosity changes (pore dilatancy and compaction) and fluid diffusion in a traditional model for earthquake cycles only controlled by a rate- and state-dependent friction law.

Since the shear heating and porosity changes are assumed to occur homogeneously within a certain thickness in our simplified model, the fault behavior strongly depends on the value of the fault thickness. This fault thickness almost represents the thickness of fault gouge. We show examples that the fault behavior changes from stick-slip behavior, recurrence of moderate (slow) slip and completely aseismic slip, depending on the thickness value. Although the assumptions in our present model are too rough to represent the structures of natural faults, this is another fundamental step for realistic fault models.

Keywords: Earthquake cycle, pore pressure fluctuation, thermal pressurization, porosity change, fluid diffusion, fault thickness

SSS025-15

会場:302

時間:5月27日 18:00-18:15

## 震源域の不均質構造による生じる地震前の応力場 Heterogeneous pre-stress field in source region

宮武 隆<sup>1\*</sup>

Takashi Miyatake<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Res. Inst. Univ. of Tokyo

昨年秋の日本地震学会秋季大会において、中越地震震源域の3D構造にテクトニックな応力を加えた場合に生じる応力場を推定し、絶対値、静摩擦係数、動摩擦係数の範囲を決めると、2004年中越地震の震源過程の大まかな特徴、アスペリティの大きさや位置、破壊開始点などが、再現可能であることがわかった。本稿では、それを解釈するために、どのような基本的構造がどのような応力不均質を生じさせるのか基本的関係を明らかにし、中越地震震源域での結果の解釈を行う。

### 構造モデル

Kato et al.(2006, 2009)によるDDTモグラフィによる3次元構造の研究によると中越地震の本震断層は、新潟平野の厚い堆積層と硬い山地構造の、境界にある位置すること、本震のアスペリティ付近には高速度地塊が存在すること、などがわかっている。これらや、構造モデルを詳細な検討から、堆積層の境界面の基本構造として、

- 1) V字谷、
- 2) 片側が水平な2次元盆地構造(鈍角のくさび構造、ただしくさび先端は滑らか)、
- 3) 2)の盆地斜面に盛り上がりが存在する場合、

などを抽出出来よう。これら単純化した構造モデルに側面から加圧し内部に生じる応力場の性質を詳細に検討する。  
応力計算

計算にあたっては3次元不均質静的弾性方程式を差分法により解いた。格子間隔は水平方向に0.25km、垂直方向に0.4kmである。なお浅部側、深部側の剛性率はそれぞれ30GPa,40GPaとした。なお前述の中越地震への応用研究では、テクトニック応力を加える系と静岩圧の系の2つを考え、応力絶対値などをパラメータとして地震が発生可能なパラメータ範囲での共通の性質として結論を得ていたが、ここでは、単純に側面の一方向を一様に加圧し絶対値は問題としない。

### 結果

上記1)のモデルでは谷底の高剛性側の圧縮応力が応力集中により著しく増加するが圧縮応力には剛性率比程度の増加しか無い、モデル2)では盆地斜面と水平な底面とが接する部分の高剛性側で圧縮応力より剪断応力が応力集中により著しく増加する。モデル3)では盛り上がり部分での剪断応力増加があった。ここで3)はアスペリティ域、2)は震源付近、1)は断層北側に対応する。

以上の結果から前回得た、中越地震の応力場と震源過程の概要の関係が解釈可能である。

キーワード: 震源過程, 静的応力

Keywords: Earthquake source process, stress field

SSS025-16

会場:302

時間:5月27日 18:15-18:30

## 広帯域連続集録から得られた岩石圧縮試験におけるAEの震源特性 Precise estimation of AE behavior prior to rock failure with continuous broadband recording

吉光 奈奈<sup>1\*</sup>, 川方 裕則<sup>1</sup>, 柳谷俊<sup>2</sup>  
Nana Yoshimitsu<sup>1\*</sup>, Hironori Kawakata<sup>1</sup>, Takashi Yanagidani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>立命館大,<sup>2</sup>京大・防災研

<sup>1</sup>Ritsumeikan Univ., <sup>2</sup>DPRI, Kyoto Univ.

岩石破壊実験において、試料の圧縮にしたがって生成される微小クラックや、破壊面の形成時に、AE(Acoustic Emission)と呼ばれる弾性波動が観測される。これまでに、震源核形成に伴う震源の局所化 (e.g., Yanagidani et al., 1985; Lockner et al., 1991) などが報告されており、AEの震源特性を調べることによって、最終的な破壊に至るまでの破壊面形成過程についての知見を得ることができると考えられる。しかし、これまでの実験におけるAE集録はトリガ方式であり、発生が活発になる直前期間において、トリガ後のマスク時間に発生したAEの波形を取りこぼしていた。また、これまでは共振周波数以外にほとんど感度のない狭帯域トランスデューサによる集録が行われることが多かった。実験室でのAE集録から得られた知見を自然地震に生かすためには、破壊の物理過程を自然地震と同じパラメータで評価する必要があるが、狭帯域やトリガ集録で得られた波形からは、破壊継続時間、モーメント、エネルギー等を正しく推定することができなかった。本研究では、AEの物理過程を正しく評価することを目的として、広帯域・連続での集録を伴う岩石破壊実験を行った。まず予備的実験として、直径45mm、高さ110mmの大島花崗岩の側面に広帯域トランスデューサとPZT(狭帯域)を貼付し、一軸圧縮試験を行った。集録は33MS/sで、試料の破壊が起こった後まで継続した。得られた連続記録からAEを抽出し、そのスペクトルを調べた結果、各AEは振幅レベルに対応して異なるコーナー周波数を持っていることがわかった。今後、複数のトランスデューサで連続集録を行いながらの一軸圧縮試験を行い、震源パラメータを求めることによって、AEの震源特性について議論する。

キーワード: アコースティック・エミッション, 室内岩石実験, 広帯域, 連続集録, 震源の特性

Keywords: AE (Acoustic Emission), laboratory experiment, broadband, continuous recording, source process



SSS025-P01

会場:コンベンションホール

時間:5月27日 10:30-13:00

## 2008年岩手・宮城内陸地震の初期余効すべりの検出と解析

### Detection and analysis of early afterslip following the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake

横田 裕輔<sup>1\*</sup>, 纈纈 一起<sup>1</sup>, 加藤 照之<sup>1</sup>

Yusuke Yokota<sup>1\*</sup>, Kazuki Koketsu<sup>1</sup>, Teruyuki Kato<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> ERI, University of Tokyo

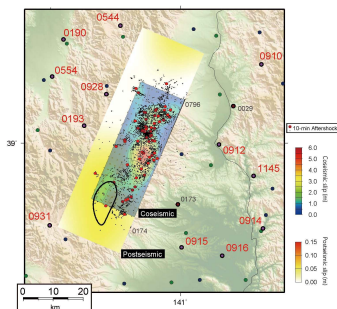
余効すべりは一連のゆっくり地震現象の中では長い時定数を持った現象であるが、その初期発達過程の解析はあまり事例がなく、その進展過程がどのようなメカニズムに支配されるかも明らかになっていない。本発表では、まず 1-Hz GPS 波形データと余効すべりから予想されるトレンドとの相関係数の時系列変化から、このデータに余効すべりが原因と考えられるトレンドが観測されていることを確認した。データには本震と余効すべりの影響が含まれているため、初期余効すべりの正しい描像を得るには、これらの影響を分離する必要がある。本研究ではこのデータを用いて初期余効すべりを本震のすべり分布と同時に解析できるよう、波形インバージョン手法を拡張し、その手法を 2008 年岩手・宮城内陸地震 ( $M_w \sim 6.9$ ) の 10 分後までのデータに適用した結果を報告する。

1-Hz GPS 波形データは、Larson et al. [2003] による手法を用いた解析によって取得した。このデータは既に本震の震源過程推定に応用されている [Yokota et al., 2009]。本研究ではまず、50 km 以内の 12 観測点の地震前後 2 時間の 1-Hz GPS 波形データと本震近傍で直後に余効すべりが発生した場合に予想されるトレンドとの相関係数を連続的に計算した。この結果、本震直後 10 分程度の間余効すべりと相関の高いトレンドが観測されていることがわかった。

次に、このデータを用いて本震の震源過程と初期余効すべりを同時に解析するために、Yoshida et al. [1996] の波形インバージョン手法を本震と余効すべりのモデルを同時に設定できるように拡張した。解析には、1 時間後までの余震分布におおむね沿うように、走向: 228°, 傾斜: 37°, すべり角: 90°, 長さ 42 km, 幅 18 km の本震の断層面の周囲に、より広い余効すべりの断層面を設定した。震央からおよそ 50 km 以内の観測点の地震後 10 分間のデータを使用した (図)。本震に対するグリーン関数は FK 法 [Zhu and Rivera, 2002] によって計算し、余効すべりに対するグリーン関数は、FK 法によって求めた変位に B-spline 関数をかけて表現した。

推定された本震、初期余効すべりのすべり分布を図に示す。10 分後までの余効すべりの総モーメント量は  $3.0 \times 10^{17}$  Nm ( $M_w \sim 5.5$ ) と求めた。本震の大きなアスペリティの南西側の余震活動の少ない領域に初期余効すべりが推定された。このすべり分布を linuma et al. [2009] によって求められた余効すべり分布と比較すると、29 日後までの余効すべり分布に見られるアスペリティの北側や東側の余効すべりは地震発生直後には発生していなかったことが示唆される。Enescu et al. [2010] によって求められた本震直後の余震分布と比較しても、余効すべりは相補的な領域で発生したことが示唆される。また総モーメント量から、初期余効すべりは他のゆっくり地震に対して考えられているスケールング則 [Ide et al., 2007] に沿っては発達しないことも示唆される。今後は、2007 年中越沖地震などに対しても同様の解析を検討する。

謝辞: 解析には国土地理院 GEONET の観測データを使用しました。記して感謝致します。



キーワード: 初期余効すべり, ハイレート GPS, 2008 年岩手・宮城内陸地震  
Keywords: early afterslip, high-rate GPS, the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake

# Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS025-P02

会場:コンベンションホール

時間:5月27日 10:30-13:00

## Slow rupture velocity of two Indonesia earthquakes Slow rupture velocity of two Indonesia earthquakes

王 ?<sup>1\*</sup>, Mori James<sup>1</sup>

Dun Wang<sup>1\*</sup>, James Mori<sup>1</sup>

<sup>1</sup>DPRI, Kyoto University

<sup>1</sup>DPRI, Kyoto University

The 17 July 2006 Mw 7.8 Java earthquake and the 25 October Mw 7.8 Sumatra earthquake are the two typical tsunami earthquakes. We used modified back projection method to trace the rupture velocities of the two earthquakes. Weighting based on smoothed envelopes of a small earthquake recordings, is introduced when the waveforms are summated. The used small earthquakes have the same locations and focal mechanisms with the two tsunami earthquakes.

The result shows a clear and unusual slow rupture velocity (1-1.5 km/s) for these two earthquakes. The reason for this extraordinary slow rupture velocity is not well known now. But the two earthquakes occurred at the shallow portions of the subduction zone, somehow suggesting a very close relation with the unique hydrologic properties.

キーワード: rupture velocity, back projection, tsunami earthquake

Keywords: rupture velocity, back projection, tsunami earthquake

## アウターライズ地震の震源特性 Source Characteristics of Outer Rise Earthquakes

野本 理裕<sup>1\*</sup>, 三宅 弘恵<sup>2</sup>, 瀧 一起<sup>2</sup>

Masahiro Nomoto<sup>1\*</sup>, Hiroe Miyake<sup>2</sup>, Kazuki Koketsu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東大理学部, <sup>2</sup> 東大・地震研

<sup>1</sup>Fac. Sci., Univ. Tokyo, <sup>2</sup>Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo

アウターライズ地震とは、海溝軸よりも沖合の海洋性プレート内で発生する地震である。正断層や逆断層のものが多く、海洋性プレートの曲げ応力や海溝で大陸プレートから受ける応力と関係があると考えられている (Lay et al., 1987)。また、震源は深さ 30km より浅いものが多く、2009 年サモア地震 (Mw 8.1) のようにたびたび津波を引き起こしている。日本付近の顕著な例として、1933 年三陸沖地震 (Mj 8.1) では津波の波高が最大 28.7m に達し、死者行方不明者 3064 人という大きな被害が報告されている。最近では 2010 年父島近海の地震 (Mj 7.4) で最大高さ 0.5m の津波が観測された。

本研究では、1990 年以降に日本付近で起きた Mw 7.0 以上のアウターライズ地震について、遠地実体波の震源インバージョンにより震源過程を求め、そこから抽出される震源特性のうち断層面積や平均すべり量について、他の種類の地震と比較した。アウターライズ地震は沖合で発生するため、震源近傍の観測記録に乏しく、グローバルなデータを用いた解析が有効である。対象とした 7 つの地震は、太平洋プレートで発生したものとフィリピン海プレートで発生したものとに大別される。太平洋プレートでは 2005 年三陸沖の地震 (Mw 7.0, 深さ 18.0km, 正断層)・2007 年千島列島東方の地震 (Mw 8.1, 深さ 12.0km, 正断層)・2009 年千島列島東方の地震 (Mw 7.4, 深さ 45.2km, 逆断層)・2010 年父島近海の地震 (Mw 7.4, 深さ 18.6km, 正断層)、フィリピン海プレートでは 1998 年石垣島南方沖の地震 (Mw 7.4, 深さ 22.9km, 横ずれ断層)・2004 年紀伊半島沖の地震 (Mw 7.2, 深さ 16.0km, 逆断層)・2004 年東海道沖の地震 (Mw 7.4, 深さ 12.0km, 逆断層) を解析した (数値は Global CMT Project による)。

遠地実体波の波形データは IRIS DMC から得られるグローバルな地震観測網によるものを用いた。速度構造モデルは Jeffreys-Bullen モデルを基に、震源付近では最上層の一部を CRUST 2.0 の水の層に置換した。インバージョンは点震源を仮定して得られた断層面に対し、Kikuchi et al. (2003) の手法を適用して面的すべり分布を求めた。断層面の選択には、余震分布の精度が低いこともあり、2 つの共役な断層面に対してインバージョンを行い残差の小さい面を採用した。得られた結果を見ると、震源より浅い領域で大きなすべりをもつものが多かったが、震源メカニズムやプレートによる系統的な違いは見られなかった。

解析結果のすべり分布から Somerville et al. (1999) の方法で断層面積と平均すべり量を抽出し、その結果を内陸地震 (Somerville et al., 1999)・プレート境界地震 (Murotani et al., 2008)・スラブ内地震 (Iwata and Asano, 2011) の既往のスケールリングと比較した。アウターライズ地震は、断層面積に関しては内陸地震とスラブ内地震の間の性質を示しており、平均すべり量に関しては内陸地震に近い性質を示していた。したがって、アウターライズ地震はプレート境界地震に対してのみならず (Ammon et al., 2008)、同じプレート内地震の範疇にあるスラブ内地震ともやや異なる震源特性を持っていると考えられる。さらには、2007 年千島列島東方の地震のように、スラブ内地震と顕著に異なる震源特性を持つケースも見つかった。今後は、より小さな規模のアウターライズ地震についても検討する必要がある。

キーワード: アウターライズ地震, 震源特性, 震源インバージョン, すべり分布

Keywords: outer rise earthquakes, source characteristics, source inversion, slip distributions



SSS025-P04

会場:コンベンションホール

時間:5月27日 10:30-13:00

## 2010年カンタベリー（ニュージーランド）地震の震源過程 The Source Process of the 2010 Canterbury, New Zealand, Earthquake

尹 淳恵<sup>1\*</sup>, 青木陽介<sup>1</sup>, 横田裕輔<sup>1</sup>, 川添安之<sup>1</sup>, 大木聖子<sup>1</sup>, 纈纈一起<sup>1</sup>  
Sunhe Yun<sup>1\*</sup>, Yosuke Aoki<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>1</sup>, Yasuyuki Kawazoe<sup>1</sup>, Satoko Oki<sup>1</sup>, Kazuki Koketsu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo

2010年9月6日4時35分（現地時間）、ニュージーランド南島のカンタベリー地域で Mw7.1 の地震が起こった。現地研究機関 GNS によれば、震源は 43.55S, 172.18E, 深さ 10km に位置する。震央の 40km 西には、人口約 40 万人のクライストチャーチがあるが、今回の地震による被害は死者 0 名・負傷者 2 名と、地震の規模の割には少なく、幸いであった。また震源の数 km 南で、ほぼ東西方向に 20km を越す地表地震断層が見つかり、現地の機関等により詳細な調査がされた。ずれは最大 4m 以上に達した。

我々はまず Kanamori and Rivera[2008] と Kikuchi and Kanamori[1991] の手法で、W-phase と P 波を使って点震源を仮定した震源メカニズムを求めた。得られた断層パラメータ（走向、傾斜、すべり角）はそれぞれ (85,68,169), (268,70,-175) と、どちらも右横ずれ断層だったが、傾斜方向が、W-phase による解では南、P 波による解では北と異なった。他機関が求めたメカニズム解においても、南北両方の傾斜が推定されている。また、本震発生後 24 時間の余震分布からも、傾斜の方向に関して明瞭な違いが得られなかった。そこで両断層面について、走向に垂直な面を取り、観測されている地表断層と断層面の最浅部との位置関係を見たところ、P 波から求められたメカニズム解を用いた断層面が整合的であることがわかった。そこで、本研究では北傾斜を示した P 波震源メカニズムを解とする。

一方、地震による地殻変動が InSAR から求められる。それによると、震源の南側ではほぼ東西方向に右横ずれの変位が見られ、震源の約 10km 西ではこの変位の方向が北西-南東方向に変化している。変位方向の変化する領域においては、約 3km<sup>2</sup> 区画にわたって変位がほとんどみられない。さらに、逆断層成分を示す南方向の変位は、震源の西側のみで卓越している。

以上を踏まえ、2 面ある断層モデルを設定し震源過程インバージョンを実行した。遠地波形のみのインバージョン、遠地波形・近地波形両方を使ったインバージョンを、Yoshida et al.[1996] の手法で行った。余震分布と地表断層、InSAR の結果をもとに、断層面は震源を含む地域（断層面 1）と、その西部に位置する大きな地殻変動を示した地域（断層面 2）との 2 枚設定した。走向および傾斜は、断層面 1 に関しては P 波のインバージョンによって求められたもの、断層面 2 に関しては地震発生から一週間の余震分布により得られたものを用いた。速度構造は CRUST2.0 モデルを採用し、このモデルに基づく剛性率を適用した。解を安定させるために時空間的に離散的な Laplacian を用いて、すべり分布の滑らかさの拘束条件を導入した。拘束条件の重みは、赤池の Bayesian 情報量基準 (ABIC) を最小にすることによって、決定した (Akaike [1980])。

得られたすべり分布は、地表断層・InSAR の結果とよく一致したものとなった。断層面 1 および 2 の最浅部はちょうど地表断層の直下に位置するが、この領域はすべりが大きくなっており、地表断層の出現と整合的である。これは表層破壊が見えた領域に一致する。さらに断層面 1 の西側および断層面 2 の南東側では、すべり分布は南方向の成分を含むこと、断層面 1 の東側ではすべりはほぼ東方向であることは、InSAR による観測と一致する。

今回我々は、まず地震波形から震源メカニズムを求めた。その結果と、地表断層・InSAR の結果をもとに、断層面を 2 枚設定した断層モデルを用いて、地震波形からすべり分布をもとめた。得られたすべり分布では、大きなすべりが地表まで達していて、その範囲とすべり方向は地表断層・InSAR の結果と整合的であった。今回の解析により、地震波形だけでは決定の難しかった断層面の形状等を、地表断層・InSAR と合わせ、精度よく決定することができた。

キーワード: 震源過程, インバージョン, InSAR, 震源メカニズム, すべり分布, 地表断層

Keywords: source process, inversion, InSAR, focal mechanism, slip distribution, surface fault traces

## 遠地実体波を用いた波形インヴァージョンで推定される震源過程に影響する要因の評価

### Effect of various factors on the estimation of source process by the waveform inversion of teleseismic body waves

久保 久彦<sup>1\*</sup>, 笈 楽磨<sup>1</sup>

Hisahiko Kubo<sup>1\*</sup>, Yasumaro Kakehi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学

<sup>1</sup> Kobe University

本研究では、遠地実体波を用いた波形インヴァージョンによる震源過程の推定に関して、得られる解に影響する要因を調べるために次のようなテストを行った。まず真の解として、あるすべり分布を考え、それに基づいて仮想観測点での理論波形を計算する。計算された理論波形をその観測点での観測波形として、各観測点での観測波形を用いた波形インヴァージョンを行う。解析の条件を様々に変え、そこで得られたすべり量の分布と真のすべり量の分布を比較することで、どのような要因が結果にどのように影響を与えるかを評価する。

仮想観測点は、各観測点の azimuth 間隔が 15 度になるようにして、震央距離 90 度の位置に計 24 点の観測点を想定した。観測波形には P 波到着の 10 秒前から 85 秒間の上下成分の変位波形を用いた。

震源断層面は 36km × 24km の大きさと仮定し、それを 4km × 4km のセグメントに分割した。すべり分布は 2 つの large slip area で構成した。1 つ目の large slip area はすべり量が 2.5m で、震源付近に 12km × 8km の大きさで分布させ、2 つ目の large slip area はすべり量が 2.5m で、震源から南西に約 20km の場所を中心として 12km × 12km の大きさで分布させた。この 2 つの領域以外のバックグラウンド領域のすべり量はゼロとしている。

メカニズム解は、東北日本弧の二重深発地震面の上面の down-dip compression 型のスラブ内地震を想定し、低角逆断層型と高角逆断層型の 2 つのタイプを考えた。前者のメカニズム解は走向 0 度・傾斜 20 度・すべり角 90 度とし、後者は走向 180 度・傾斜 70 度・すべり角 90 度とした。震源の深さは両方とも 70km とした。

波形インヴァージョンには multiple time window analysis を用いた。その際、非負の拘束条件を用いてすべり角を ±45 度の範囲で可変とした。また、すべりの時空間分布を滑らかにするために smoothing constraint を与えた。smoothing constraint の重みはそれぞれの場合で同じ値を与えた。first time window velocity など震源パラメータは理論波形を計算する際に用いた値と同じものを用いた。

まず、depth phase を使わずに直達波のみを用いた場合と、depth phase と直達波を両方とも用いた場合を比較することによって、depth phase が波形インヴァージョンによるすべり分布推定にどのような影響を与えるかを調べた。

その結果、depth phase を用いた場合、得られたすべり分布と真のすべり分布の差が、depth phase を用いなかった場合に比べ、小さくなった。この傾向は両方のメカニズム解のタイプの場合で見られた。このことから、波形インヴァージョンでのすべり分布推定における depth phase の寄与は大きいことが推測される。これは観測点での depth phase の到着時刻が各 subfault の深さによって異なることから、depth phase を用いることで深さ方向の分解能が上がるためであると考えられる。また、傾斜方向に隣り合う subfault 間の深さの差が小さくなり、depth phase による空間分解能が悪くなると考えられる低角逆断層の場合、高角逆断層の場合と比べて、得られたすべり分布と真のすべり分布の差が大きくなった。

次に、観測点分布が波形インヴァージョンの結果に与える影響を、破壊の directivity 効果との関係に基づいて調べた。観測点を北の方角から時計回りに azimuth で 45-135 度・135-225 度・225-315 度・315-45 度の範囲ごとに 4 つのグループに分け、グループごとに波形インヴァージョンを行い、求められたすべり分布と真のすべり分布を比較した。このとき、135-225 度の範囲が forward directivity 側に、315-45 度の範囲が backward directivity 側にあたる。

その結果、forward directivity 側の観測点グループのみを用いた結果は真のすべり分布をうまく再現できなかったのに対し、他のグループは真のすべり分布を比較的よく再現できた。この傾向は両方のメカニズム解のタイプの場合で見られた。forward directivity 側では隣り合う subfault の走時差が小さくなり、隣り合う subfault からの波を区別することが難しくなり、空間分解能が悪くなるためであると考えられる。

謝辞 遠地実体波の Green 関数の計算には Kikuchi and Kanamori (1982) のプログラムを使用しました。記してお礼申し上げます。

キーワード: 波形インヴァージョン, 遠地実体波, depth phase, directivity

Keywords: waveform inversion, teleseismic body wave, depth phase, directivity

SSS025-P06

会場:コンベンションホール

時間:5月27日 10:30-13:00

## 3次元地球モデルに対して計算したグリーン関数を用いた多重CMT解析 Multiple centroid moment tensor analyses using Green's functions computed for a 3-D earth model

原辰彦<sup>1\*</sup>

Tatsuhiko Hara<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 建築研究所 国際地震工学センター

<sup>1</sup> IISEE, BRI

We performed multiple centroid moment tensor (CMT) inversion for 25 large earthquakes that occurred since 1995. Following the algorithm of Hara (2002, A42, 2002 Fall Meeting, SSJ), the inversion was carried out by two steps. In the first step, we performed ordinary CMT inversion. In the second step, we divided an event into two subevents and performed simultaneous inversion for CMTs of two subevents. In each step, we used the iterative linearized inversion technique of Hara (1997, GJI, 130, 251-256). In this technique, Green's functions are calculated using the Direct Solution Method (Hara et al., 1991, GJI, 104, 523-540), in which effects of three dimensional earth structure can be accurately considered. For a three dimensional earth model, we construct our model based on SAW24B16 (Megnin and Romanowicz, 2000, GJI, 143,709-728) in this study. The data for inversion were spectra in the frequency band 2 and 4 mHz, which we calculated from VHZ channel waveform data retrieved from the IRIS DMC. As initial guesses for the first step, we used solutions of the Global CMT catalog (<http://www.globalcmt.org/>).

For 12 events, CMTs of two subevents were determined stably, and the results are consistent with previous studies in terms of direction of rupture propagation and source duration. This result suggests that it is possible to construct a set of multiple CMT solutions by the data analysis procedure of the present study. We plan to investigate whether modification of the way to set initial guesses for the second step may improve results for the other events.

キーワード: 多重 CMT, 3次元地球モデル

Keywords: multiple CMT, 3-D earth model

SSS025-P07

会場:コンベンションホール

時間:5月27日 10:30-13:00

## 2.5次元差分法を用いた震源過程解析の数値実験

## Numerical experiments of rupture process inversion using the 2.5 dimension finite difference method

原辰彦<sup>1\*</sup>, 西村直樹<sup>2</sup>, 岡元太郎<sup>3</sup>, 八木勇治<sup>2</sup>, 竹中博士<sup>4</sup>

Tatsuhiko Hara<sup>1\*</sup>, Naoki Nishimura<sup>2</sup>, Taro Okamoto<sup>3</sup>, Yuji Yagi<sup>2</sup>, Hiroshi Takenaka<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 建築研究所 国際地震工学センター, <sup>2</sup> 筑波大学大学院生命環境科学研究科, <sup>3</sup> 東京工業大学, <sup>4</sup> 九州大学

<sup>1</sup> IISSE, BRI, <sup>2</sup> Life & Env. Sci., Univ. Tsukuba, <sup>3</sup> Tokyo Institute of Technology, <sup>4</sup> Kyushu University

We performed a numerical experiment to investigate accuracy and reliability of rupture process inversion using synthetic seismograms computed for a realistic structure model by the 2.5-D finite difference method (Takenaka and Okamoto, Proc. Int. Workshop on Scientific Use of Submarine Cables, 23-26, 1997; Okamoto and Takenaka, Advances in Geosciences, Vol.13, 215-229, 2009). The target event of this experiment is the 1994 far east off Sanriku earthquake (Mw 7.7 after Global CMT Catalog). Okamoto et al. (2010, P3-29, 2010 Fall Meeting, SSJ) constructed a structure model of crust and mantle surrounding the source region of this event, and showed that the observed waveforms of middle size (Mw 5.9-6.4) events that occurred near the source region were well reproduced by using the model. We constructed an earthquake source process model in this numerical experiment, which we call "input source process model", as follows. We placed three, localized asperities (small areas with large slips) in the shallow, middle and deep parts of the assumed fault plane, respectively. The rupture velocity was set to 2.5 km/s. The rupture starts from the shallowest asperity and propagates toward the deeper part of the fault. For this input source process model, we computed synthetic seismograms for teleseismic P waves using the 2.5-D finite difference method (Takenaka and Okamoto, 1997; Okamoto and Takenaka, 2009). Then, we performed rupture process inversion of these synthetic seismograms using inversion algorithm by Yagi and Fukahata (2008, Geophys. J. Int., 175, 215-221). Green's functions were computed using the method of Kikuchi and Kanamori (1991, BSSA, 81, 2335-2350).

The obtained rupture process model showed three areas with large slips corresponding to three small asperities in the input source process model. This result suggests that it is possible to obtain overall feature of rupture process by applying inversion algorithm of Yagi and Fukahata (2008) to teleseismic P waves. We also note that the areas of asperities in the inversion result are much larger than those in the input source process model. Such "smearing" effect has also been pointed out by Okamoto and Takenaka (EPS, 61, e17-e20, 2009) in the results of the synthetic experiments of the inversion for the slip distribution of tsunami earthquake. Because of the smearing effect, it might be difficult to reveal fine features in the "true" slip distribution.

キーワード: 震源過程, 数値実験, 2.5次元差分法

Keywords: Rupture process inversion, Numerical experiment, 2.5 dimension finite difference method



## 2.5次元差分法を用いた1994年三陸はるか沖地震の震源過程解析 Rupture process analysis of the 1994 far east off Sanriku earthquake using the 2.5 dimension finite difference method

岡元 太郎<sup>1\*</sup>, 原 辰彦<sup>2</sup>, 竹中 博士<sup>3</sup>  
Taro Okamoto<sup>1\*</sup>, Tatsuhiko Hara<sup>2</sup>, Hiroshi Takenaka<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学, <sup>2</sup> 建築研究所 国際地震工学センター, <sup>3</sup> 九州大学

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>IISEE, BRI, <sup>3</sup>Kyushu University

The effect of the near-source heterogeneous structure on the teleseismic body waveforms can become large for shallow subduction zone earthquakes: large amplitude later phases are generated as a result of the distortions in the ray paths due to the heterogeneous structure. Such structural effect must be carefully considered in evaluating the results of the source process inversion.

As an example of the source process analysis by considering the effect of the near-source structure, we perform inversion of teleseismic P waveforms for space-time slip distribution of the 1994 far east off Sanriku earthquake (the origin time: 12:19:23.60 UTC, December, 28; location: 40.45 degree N, 143.49 degree E; depth 33.0 km after USGS. Mw: 7.7 after Global CMT Catalog). The broadband waveform data were retrieved from the IRIS DMC. We integrate the velocity records to obtain displacement records, and applied band-pass filter with the pass-band between 0.007 Hz and 0.2 Hz to obtain displacement record for inversion. In order to consider the effects of crust and mantle structure around the source region, we constructed the structure model referring to the studies by Ito et al. (2004, EPSL, 223, 163-175), Ito et al. (2002, Zisin2, 54, 507-520), Amante and Eakins (2009, NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp.), Bassin et al. (2000, EOS Trans AGU, 81, F897). We presented the results of comparison between observed waveforms of middle size (Mw: 5.9-6.4) earthquakes that occurred in the source region and synthetic waveforms computed for this model using the 2.5 dimension finite difference method (REF) and showed that this model well explained the observed waveform data (Okamoto et al., 2010, P3-29, 2010 Fall Meeting, SSJ).

Using the Green's functions computed for the model, we invert the data for the slip distribution following the inversion procedure developed by Okamoto and Takenaka (EPS, 61, e17-e20, 2009). The preliminary inversion resulted in a small (weak) moment release near the rupture starting point, and a large (strong) moment release around the middle of the fault after about 30 s from the onset. In the companion paper (Hara et al., this meeting), we will present results of the synthetic experiments of this inversion.

キーワード: 震源過程解析, 2.5次元差分法, 1994年三陸はるか沖地震

Keywords: Rupture process analysis, 2.5 dimension finite difference method, 1994 far east off Sanriku earthquake

SSS025-P09

会場:コンベンションホール

時間:5月27日 10:30-13:00

## 中規模繰り返し地震の破壊の再現性について On the repeatability of the rupturing processes of the moderate-sized repeating earthquakes

島村 浩平<sup>1\*</sup>, 松澤 暢<sup>1</sup>, 岡田 知己<sup>1</sup>, 内田 直希<sup>1</sup>

Kouhei Shimamura<sup>1\*</sup>, Toru Matsuzawa<sup>1</sup>, Tomomi Okada<sup>1</sup>, Naoki Uchida<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・予知セ

<sup>1</sup> RCPEV, Science, Tohoku University

釜石沖の繰り返し地震のように規則的な地震でも、震源過程が地震毎にわずかに異なり、それによって高周波成分の波形に違いが生じることを我々は示してきた (Shimamura et al., 2011)。今回、中規模繰り返し地震として同定されている、いわき沖の二つの地震 (1997年5月12日 M5.7 と 2005年10月22日の M5.6; 長谷川・他, 2005; 山田・他, 2009) の震源過程について詳細に調べた。予備的な解析によれば、二つの地震の震源過程はかなり異なっており、1997年の地震のほうが複数の小さなパッチの複合破壊となっているのに対して、2005年の地震は大きなパッチの単独破壊となっている。スペクトル比法によって両者の振幅スペクトルを詳細に調べた結果、1 Hz より低周波側では両者のスペクトルは振幅・形状ともによく似ているのに対して、1997年の地震は高周波側の 3 Hz 付近でもう一つのピークを示すことが分かった。これは 1997年の地震が小規模のパッチの複合破壊で生じたと考えれば説明ができるため、予備的な解析の結果とは整合する。今回の結果は、同じ地震性領域 (アスペリティ) が破壊する場合でも、時期によって震源過程が大きく異なる場合があることを示しており、Seno (2003) が提案したような、間隙圧の時間変化にともなう破壊過程の変化が実際に生じていることを示唆している。

SSS025-P10

会場:コンベンションホール

時間:5月27日 10:30-13:00

## 寒天断層の動的破壊に伴う副断層生成

## Subsidiary multiple crack generation during unstable fast rupture in Agarose-gel fault

藤田 哲史<sup>1\*</sup>, 桑野 修<sup>1</sup>, 日下部哲也<sup>1</sup>, 小寺 祐貴<sup>1</sup>, 亀 伸樹<sup>1</sup>, 中谷正生<sup>1</sup>

Satoshi Fujita<sup>1\*</sup>, Osamu Kuwano<sup>1</sup>, Tetsuya Kusakabe<sup>1</sup>, Yuuki Kodera<sup>1</sup>, Nobuki Kame<sup>1</sup>, Masao Nakatani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>ERI, The University of Tokyo.

It is well known that earthquake faulting is followed by shear rupture propagation. It is very hard to see dynamic faulting under the ground. In order to observe such a shear rupture many attempts are done in experiments that samples with photo-elasticity are broken under a uni-axial loading and dynamic rupture nucleation is triggered by a explosion. It is, however, far from the actual earthquake nucleation that starts spontaneously. Here we try to nucleate dynamic rupture spontaneously.

We made gel plates (250 × 400 × 10mm) including a weak plane, and set it under an uni-axial compression. The gel has two advantages over rock samples. One is that the stress field of sample can be observed by photoelasticity. Another is that dynamic rupture is easy to be observed because of the significant low s-wave velocity, 7m/s. We change strength of the weak-plane so that we can control generation of subsidiary cracking off the main rupture.

We successfully generated subsidiary off-fault cracks when the weak-plane strength is relatively high. We observe significant deceleration of rupture velocity of the main fault during growth of subsidiary cracks. This can be attributed to the energy consumption due to increase of surface energy.

We also discuss geometry of off-fault comparing to theoretical prediction.

キーワード: 動的破壊

SSS025-P11

会場:コンベンションホール

時間:5月27日 10:30-13:00

## 分岐断層の周辺のダメージ集中と動的破壊伝播への影響 Effects of off-fault damage on the tendency of fault branching

田村 慎太郎<sup>1\*</sup>, 井出 哲<sup>1</sup>  
Shintaro Tamura<sup>1\*</sup>, Satoshi Ide<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大・理・地惑

<sup>1</sup>EPS, Univ. of Tokyo

多くの地震断層において断層コアの周囲にダメージゾーンと呼ばれるマイクロクラックの発達した領域が観察されている。地震の断層面の周囲は完全な弾性体ではなく面外にある程度のダメージが分布した媒質の中で起こると考えられる。媒質の非弾的な効果が破壊進展に与える影響を考えることは巨視的破壊過程の物理を理解する上で重要である。本研究の目的は面外ダメージの成長が媒質境界上の主断層と分岐断層上のモードIIの破壊伝播に対して及ぼす影響を調べることである。

我々は三角形有限要素を用いた有限要素法陽解法の計算コードを用いて分岐断層をモデル化し、主断層上から自発的に進展する動的破壊問題を解く。同時に、Lyakhovsky et al., 1997 で示された式を用いてダメージ変数の時間発展を解く。断層上のすべりはすべり弱体化に従うものとし、スプリットノード法で表現する。媒質の端は吸収境界とし、初期応力として一様応力場を仮定する。

一様応力場中における分岐断層の破壊伝播問題は破壊伝播速度、分岐角度、媒質コントラスト、ダメージの成長係数をパラメータとして変化させながら解き、ダメージの発達と破壊挙動との関係について調べる。破壊伝播速度が速い場合には断層端周辺にダメージが発達しやすい。分岐点の周辺でダメージが集中することによって主断層を伝播する破壊の分岐しやすさにも影響を与える。

キーワード: 動的破壊問題, 分岐断層, 面外ダメージ

Keywords: dynamic rupture propagation, branching fault, off-fault damage

## 三軸伸張試験時における AE の発生様式 AE characteristics in a triaxial extension test

川方 裕則<sup>1\*</sup>, 高橋 直樹<sup>2</sup>, 高橋 学<sup>3</sup>, 吉光 奈奈<sup>1</sup>

Hironori Kawakata<sup>1\*</sup>, Naoki Takahashi<sup>2</sup>, Manabu Takahashi<sup>3</sup>, Nana Yoshimitsu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>立命館大学理工学部, <sup>2</sup>三井住友建設株式会社, <sup>3</sup>産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Ritsumeikan University, <sup>2</sup>Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd., <sup>3</sup>AIST

岩石は互いに凝着した粒状体の集合であるため、大きな偏差応力が加えられた場合、凝着のはがれや粒子の破碎といった微小破壊が発生し、これに伴ったアコースティック・エミッション (AE) とよばれる超音波が観測される。これは地震発生に伴う地震波と同じように、破壊時の変形過程で生じた弾性波である。AE には開口モードの破壊とせん断モードの破壊に対応するものがあり、岩石試料内部で発生する鉱物粒子レベルにおける変形過程をモニターする手法として圧縮破壊試験時に盛んに計測が行われてきた (例えば、Scholz, 1968 ; Lockner et al., 1992)。三軸伸張破壊試験においても最終破断面形成に先行して応力除荷に伴って AE が発生することが期待されるが、その活動様式や頻度についてはよく分かっていない。AE の波形を集録して解析し、その震源分布とその破壊モードを求めることで、三軸伸張破壊時の試料の変形過程が明らかになる。そこで、来待砂岩を用いておこなった三軸伸張試験時に弾性波速度計測と AE 計測を実施し、その変形過程を調べることを本研究の目的とした。ただし、来待砂岩のような空隙率が高い堆積岩の場合、短周期の弾性波が通りづらく、ノイズも高くなることが予想される。そのため、計測システムと解析には後述のような工夫を凝らした。

AE 計測は、圧電素子による電圧信号が設定した閾値を超えたときに記録が保存されるトリガー集録がもたら行われてきた。ノイズが高く生波形で AE の同定が困難な場合、この方法では集録に失敗する。トリガーレベルをノイズレベルよりも高く設定すると、ほとんどトリガーがかからず、イベント波形が集録されない。逆にノイズレベルよりも低く設定すると、トリガーが常時かかりっぱなしになり、システムが適正に作動しなくなる。そこで、本システムでは、100MSPS という高速サンプリングを維持しつつ、6チャンネル同時、1時間程度の連続集録を実現した。

試料は、直径約 50mm、高さ約 100mm の来待砂岩である。圧力容器の蓋を閉じて封圧流体を注入し、封圧を 80 MPa まで昇圧した。静岩圧状態にした後、軸圧が封圧よりも小さくなるよう、0.05 kN/sec の載荷速度で除荷した。除荷時を通じて AE の連続計測を実施した。供試体には伸張による破壊面とともにせん断面も形成されていた。計測された波形記録には大きなノイズが存在し、生波形の状態ではそれほど多くの AE を同定することはできなかったが、フィルターを施すことにより、より多くの AE 波形を同定することができた。連続集録をおこなったことにより、このように事後に適切なフィルターを選択して施し、イベント波形を同定することが可能となる。計測システムの不具合により、2チャンネル分ずつで時計が異なってしまった。共通に含まれているノイズ成分を用いて 4チャンネルまでの同期には成功した。これにより、これら 4チャンネルに含まれる AE については、同一イベントか否かの判別が可能となり、同一イベントの波形については、初動付近は極性を除いて形状は互いに似ていた。また、有意に早く到達した波形は、遅れて到達したもののより振幅が大きく、AE の波形の特徴を満たしている。

さらに、AE の初動の極性を利用することにより、破壊モードについての知見を得ることができる。引っ張りによる開口型破壊に伴う AE の場合、すべての素子において初動の極性は押しになるが、せん断破壊に伴う AE では、初動の極性は押しと引きが 4象限に分かれて現れる。今回、すべて押しの AE と押しと引きが混在する AE の 3種類を検出することに成功した。このことは、三軸伸張破壊においてもその破断面から推定されるとおり、開口型の破壊とせん断型の破壊の両者が発生していることを示している。

キーワード: 三軸伸張試験, 来待砂岩, アコースティック・エミッション, 震源メカニズム

Keywords: Triaxial extension test, Kimachi sandstone, Acoustic emission, Focal mechanism



## 応力依存項を含むRSF則による地震破壊核形成シミュレーション The simulation of seismic nucleation by modified RSF law added stress dependent term.

藤田 哲史<sup>1\*</sup>, 亀 伸樹<sup>1</sup>  
Satoshi Fujita<sup>1\*</sup>, Nobuki Kame<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>ERI, The University of Tokyo.

これまで実験室から経験的に得られたRSF則は、実験から得られる摩擦の挙動の精確な記述を理由にさまざまなかたちで数値計算に適用されてきた。しかし従来のRSF則は、その発展則において未解決の部分を残していた。たとえば代表的なRSF則の一つであるDieterich則では滑り弱化的記述が不完全であり、Ruina則では時間回復を再現できなかった。そして、それらの発展則における実験の再現性のわずかな欠陥が従来の地震破壊核シミュレーションにおいては、大きな違いをもたらしてきたことはよく知られている。Ampuero&Rubin(2008)では、Dieterich則とRuina則で地震破壊核成長のシミュレーションを行い比較検討がなされているが、特に摩擦パラメータ $a/b \sim 1$ の場合で定性的に異なる地震破壊核形成が導かれた。

そこで本研究では、Nagata(PhD thesis, 2008)で提唱された新しい修正RSF則(Nagata則)を用いて、地震破壊核形成シミュレーションを行った。このNagata則は室内実験の全ての局面を精確に記述するものであるが、Nagata(PhD thesis, 2008)では、従来のRSF則に大きな訂正点を2つ与えている。すなわち、(1)RSF則のパラメータ $a$ ,  $b$ 値が従来用いられてきたものの約3倍あること(Dieterich則:  $a=0.017$ ,  $b=0.0255$ ,  $L=0.63 \mu\text{m}$ , Nagata則:  $a=0.05$ ,  $b=0.56$ ,  $L=0.33 \mu\text{m}$ )と(2)状態発展則が新たなものでslowness則(Dieterich則)に剪断応力依存項( $-c \dot{\gamma}/t$ )を加えたことである。

われわれはこの摩擦則をシミュレーションにおいて無限等方等質媒質中の平面断層内での摩擦滑りに適用した。ここでは簡単に、奥行きが一様な滑りを行う二次元弾性体の平面断層を与えている。また本研究では比較のため、Dieterich則とNagata則をそれぞれ用いてシミュレーションを行っている。

まず、我々は室内実験レベルの载荷レート( $1 \mu\text{m/s}$ )を与え数値計算を行った。その結果、Dieterich則とNagata則でほぼ同じように全体に一様な滑りの分布から局所的な滑りへの移行が起こった。そして応力、滑り速度ともにほぼ同じ空間分布をもつことが示された。この結果はFujita et al. (JpGU 2010)の一自由度系での地震サイクルシミュレーションで示されたように、両則の違いが特に状態変化に現れ、滑り速度、応力変化においては違いが認められないことと調和的である。

次に我々はプレート運動速度レベルの低い载荷レート( $0.001 \mu\text{m/s}$ )を与え数値計算を試みた。この条件下では、状態の時間回復の効果が有意に働くことが予想される。目下の結果、Dieterich則とNagata則で滑りに関して異なる傾向が示されている。当日の発表では、この条件下での解析結果と、その原因について議論を行う。

キーワード: 地震, 震源過程

Keywords: earthquake, nucleation, RSF

SSS025-P14

会場:コンベンションホール

時間:5月27日 10:30-13:00

## XFEMを用いた非平面断層の動弾性解析 Elasto-dynamic analysis of non-planar fault based on XFEM

安藤 亮輔<sup>1\*</sup>, 中住昭吾<sup>2</sup>

Ryosuke Ando<sup>1\*</sup>, Shogo Nakasumi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>産総研 活断層・地震研究センター, <sup>2</sup>産総研 先進製造プロセス研究部門

<sup>1</sup>AIST/GSJ, <sup>2</sup>AIST/AMRI

XFEM (拡張有限要素法) は、メッシュフリー解析手法の一つであり、解析領域を空間的に離散化するメッシュの設定に依存せずに、任意形状の亀裂を配置できるという長所がある。したがって、例えば、従来の有限要素法が不得意とする、亀裂進展解析において亀裂形状をあらかじめ設定できないような、自発的破壊経路選択の問題にも、リメッシング (メッシュの切り直し) 等の、複雑なアルゴリズムが必要で計算負荷も大きいプロセス無しで対応できる。このような特徴は、BIEM (境界積分方程式法) が有しているものであり、様々な応用がなされてきて (例えば、Kame and Yamashita, 1999; Ando and Yamashita, 2007)、大きな成果を上げてきた。しかし、BIEM は線形弾性の場合に解析的・数値的に得られる積分カーネル (グリーン関数) を用いる方法であるため、不均質媒質は不可能ではないが得意でなく、塑性変形等の非線形な媒質変形を扱うことができないという制限がある。その点において、XFEM は、その不均質、非線形の問題を取り扱うことができるため、地表付近のような非弾性が強く作用し、不均質の存在が大きく影響するような場での、自発的亀裂進展解析において有力な手法である。定式化上の特徴として、FEM では、要素内の変位を接点のみに自由度を持つ連続関数で補完し、弱形式により定式化するが、XFEM では補完関数を、その連続関数に、エンリッチ関数と呼ばれる適当な自由度を追加した関数を加え定義している。亀裂問題では、エンリッチ関数に、亀裂上での変位の食い違いを表現するステップ関数を用い、メッシュ内の任意の位置で食い違いを導入する。本発表では、手始めに XFEM に基づく、弾性媒質中での動的亀裂進展を扱う計算手法を開発したので、その結果ならびに BIEM を用いた解析結果との比較等を示す。

キーワード: 拡張有限要素法, XFEM, 非平面断層, 動弾性, 破壊, 数値計算

Keywords: Extended finite element method, XFEM, non-planar fault, elasto-dynamic, fracture, numerical analysis