

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^{1*}

harumi aoki^{1*}

¹ 東濃地震科研

¹ 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ろうか。

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

Japan Geoscience Union Meeting 2011

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

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



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^{1*}

Aitaro Kato^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹ERI 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^{1*}, 岡田 正実², 勝間田 明男²
Noriko Kamaya^{1*}, Masami Okada², Akio Katsumata²

¹ 気象大学校, ² 気象研究所

¹Meteorological College, ²Meteorological 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^{1*}, 勝間田 明男², 岡田 正実², 鎌谷 紀子¹
Yoshiomi Hasegawa^{1*}, Akio Katsumata², Masami Okada², Noriko Kamaya¹

¹ 気象大学校, ² 気象研究所

¹ Meteorological College, ² 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^{1*}, 松澤 暢¹
Naoki Uchida^{1*}, Toru Matsuzawa¹

¹ 東北大・理・予知セ
¹ 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^{1*}, 八木 勇治¹
Amato Kasahara^{1*}, Yuji Yagi¹

¹ 筑波大生命環境

¹Life 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

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¹, 八木 勇治^{1*}

Mitsuru Suzuki¹, Yuji Yagi^{1*}

¹ 筑波大学大学院生命環境科学研究科

¹Life 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ることによって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ですが、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^{1*}, 前田 宜浩²

Junji Koyama^{1*}, Takahiro Maeda²

¹ 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻, ² 防災科学技術研究所

¹Natural History Sci., Hokkaido Univ., ²NIED

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 ν とすべり速度のゆらぎ σ 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, σ^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、 ν 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、 $L=cW$, $T_0=W/\nu$, ν 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 σ^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^{1*}, 平野 史朗¹, 藤田 哲史¹, 日下部 哲也¹, 小寺 祐貴¹, 亀 伸樹¹, 中谷 正生¹, 安藤 亮輔²

Osamu Kuwano^{1*}, Shiro Hirano¹, Satoshi Fujita¹, Tetsuya Kusakabe¹, Yuuki Kodera¹, Nobuki Kame¹, Masao Nakatani¹, Ryosuke Ando²

¹ 東京大学地震研究所, ² 産業技術総合研究所

¹ERI, Univ. of Tokyo, ²Geological 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^{1*}

Takehito Suzuki^{1*}

¹ 東大・理・地惑

¹EPS, 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 η_2 と η_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、 η_2 が有限で η_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 η_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^{1*}, 橋本 千尋¹

Yuki Nomura^{1*}, Chihiro Hashimoto¹

¹ 名古屋大学大学院

¹Graduate 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^{1*}

Naoyuki Kato^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹ERI, 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^{1*}, 矢部 康男², 佐藤凡子³

Kiyohiko Yamamoto^{1*}, Yasuo Yabe², Namiko Sato³

¹ なし, ² 東北大学大学院理学研究科, ³ なし

¹none, ²Graduate School of Sci., Tohoku Univ., ³none

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トルの 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 が上層マント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、 ± 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 (± 15 度)、南部の ENS、SND で約 50 度 (± 25 度) の違いがあるが、中部の KGJ (Tono)、KMS、SNR ではおよそ 15 度 (± 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 ± 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^{1*}, 平原 和朗², Massimo Cocco³
Yuta Mitsui^{1*}, Kazuro Hirahara², Massimo Cocco³

¹ 北大・理, ² 京大・理, ³ INGV

¹Sci., Hokkaido Univ., ²Sci., Kyoto Univ., ³INGV

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^{1*}

Takashi Miyatake^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹ 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^{1*}, 川方 裕則¹, 柳谷俊²
Nana Yoshimitsu^{1*}, Hironori Kawakata¹, Takashi Yanagidani²

¹立命館大,²京大・防災研

¹Ritsumeikan Univ., ²DPRI, 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低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