

ETASパラメータの推定アルゴリズムによるバラつき

Variability in ETAS parameters depending on estimation algorithms

*三井 雄太¹、片岡 純²*Yuta Mitsui¹, Jun Kataoka²

1.静岡大学理学部地球科学科、2.元・静岡大学理学部地球科学科

1.Department of Geosciences, Shizuoka University, 2.Faculty of Science, Shizuoka University

ETASモデル(Ogata, 1988)により、ある領域における地震の発生系列から余震の影響を取り除いた定常地震活動度 μ を推定することができる。例として、Llenos et al. (2009)は、ゆっくり変形による応力率の増大が μ におよぼす影響を与え、余震の発生を特徴づけるETASモデルの他のパラメータ(K, α, c, p)には無関係であることを示した。Ide et al. (2013)など、いくつかの研究がこの考えを応用した。Kataoka and Mitsui (2015, JpGU)は、日本周辺の複数の領域でこの方法をテストし、2011年東北地震直後の富士山周辺でのマグマの貫入や、いくつかの沈み込み帯でのスロースリップイベント、あるいは大地震後のアフタースリップの減衰を示唆する結果を得た。

我々は、上記のパラメータ推定ではOgata(2006)によるSASeis2006を用いた。SASeis2006では、DFP法と呼ばれる準ニュートン法の一つを用いたパラメータ推定が行われている。しかし、Kasahara and Yagi (2015, SSJ)は、ニュートン法に基づく新たな推定アルゴリズムを構築し、特に初期値依存性の面でSASeis2006に改善の余地があることを示した。

これを踏まえ、本研究では、パラメータ推定に複数の手法を導入し、パラメータ推定結果がどの程度バラつきについて検討を行った。具体的には、SASeis2006に加えて以下の4つの推定手法を用い、同じ初期値を与えて結果を比較した：(1)滑降シンプレックス法 (2)共役勾配法 (3)拘束条件付き準ニュートン法(全てのパラメータが0.01~10の範囲内) (4)ニュートン法。地震活動のデータセットとして、気象庁震源カタログにおけるマグニチュード2以上の地震を用いた。時間範囲は1998~2014年の期間で1年ごとに取り、空間範囲は1993年北海道南西沖地震および2003年十勝沖地震の震源域周辺とした。

結果として、まず、場合によっては解が収束しないことがわかった。このようなケースは、上記のうちSASeis2006および(4)のニュートン法でよく見られた。その他、以下の3つのことがわかった。[1]手法による μ の推定値のバラつきは小さく、最大値/最小値で大きくても1.8倍程度であった。[2] μ 以外のパラメータの推定値のバラつきは大きく、最大値/最小値で10倍以上というケースが頻繁に生じた。[3]各手法で推定されたパラメータの対数尤度を比較すると、最大尤度を示したのはニュートン法が約65%と圧倒的に多く、次いで共役勾配法、滑降シンプレックス法となった。

キーワード：地震活動、ETASモデル、パラメータ推定

Keywords: Seismicity, ETAS model, Parameter estimation

紀伊半島南東沖の地震の余震活動の異変(2008/10,2014/10)で分かったトラフ周辺の応力構造とその推移

Mutation('08/10,'14/10) of aftershock activity of the 2004 off Kii Peninsula E.q., and Stress structure around the Trough

*間瀬 博文¹

*Hirofumi Mase¹

1.なし

1.none

(図面を参照のこと、海底地形名等は便宜上命名した)東進する中国地方下のマントルが近畿地方下の沈み込みスラブの縁を押すので横ずれ右回転で這い上がろうとする(1)。この力はトラフ南側の杭の如き二つの海山に集中するが2004年の地震で「杭」の北側が破壊したため「杭」への伝達ルートが「北から」が「北西から」に転換した(2)。現在も続く余震は本震の割れ残りの消化から北西からの力によるものへと変化しているはずである。(3)の成果を尊重し気象庁一元化震源(4)を予め全体的に南東方向に10kmシフトさせてしまい(深度はそのまま)その経時変化を研究した。

図1に断面の切断位置と記入地震の存在範囲を示す。図2は図1の要部を1.5倍拡大(45度右回転)し'08~'09年の震源を記入した平面図でそのY-Y'断面が図3である。同様に'14~'15年の震源を記入した平断面が図4と図5で図6(y-y'断面)を添えている。図7はx-x'断面に関し'06~'15年の震源の分布の概略を示す。海底地形の情報は全て(5)より得た。海山EMから北西に延びる谷地形(valley)は余震を堰き止める縁切り構造のようだ。この走向は余震分布がなす面の傾斜方向に調和的でもありY-Y'断面の切断方向に採用した。余震分布がなす面は応力伝達面と考える。

変動は'08年10月の初めに発生した(図2,3参照)。平面では海山の前方での発生が主だったが海山間の空間も含めて南方へ突進した印象である。この空間は圧力が増大したであろう。10月最初の6個を発生順に結んだが海山EMの前方に直線を得た。Y-Y'断面切断方向は妥当である。北西-南東方向で両海山に集中している力を北西圧縮力NWF(W),NWF(E)と名付ける(本震前は北圧縮力NF(W),NF(E))。断面では('07年のtrendも記入したが)屈曲形成で耐えそして限界に達した様子が伺える。応力伝達面が挫屈した領域は平面では膨らんだ地形(両者黒色破線、scr)故常習なのであろう。挫屈後スラリと下方へ伸びた新たな面に変わりNWF(W),NWF(E)は新伝達面を生んだ。海山にとり応力集中する位置が突然20km以上落下した。以上を'08/10短絡と呼ぶ。

2回目の変動('14/10短絡)は'14年10月の初めである(図4,5,6参照)。前月までに両海山の前で浅い位置のもの(scwとsceで示す)が生じ応力伝達面が波打った(比較用に図6に'09年の分布を記入)のは前触れであろう。10月のものに発生日を添付(図4)し隣り合うものを線で結んだ。重要なものには発生順に番号を付けた(マル6の3個は翌月発生)。すると海山EMの前に伸びる線(マル3-1-5-6)と海山WMから発し立体交差で上側を直交しようとする線(マル2-4)が現れた。前者はNWF(E)の新た伝達面で明らかにscrを避け浅部を通過後急降下してEMに達する。それでもNWF(W)と共に'08/10短絡とは逆の上昇である。後者(マル2-4)に関する圧縮力を合成圧縮力SWF(W),SWF(E)と呼ぶ。

北圧縮力NFは0でその反作用SFは現在減少中、北西圧縮力NWFは最大でその反作用SEFは現在増加中と考えられ両海山に働く力はSF,NWF,SEFの合力でSWFである(図8参照)。杭は結局周囲の地面が支える。海山は変位により海底から反作用を獲得するので作用力の急な変化には追従が遅れる。両海山は独立性に大差がありSWF(W)とSWF(E)の方向大きさにも差があろう。(以下図7参照)'08/10短絡後(2期,3期)両海山の間は圧力が増加しているのでSWF(W)がWMを押す方向はさらに圧力が高まり効果的に破壊を誘発する。これが応力伝達面(線)(マル2-4)が出現した背景でSWF(W)とNWF(E)は立体交差した(3期)。「08/10短絡~'14/10短絡(2期)では出現を確認してないがSWF(W)とNWF(E)は深度50km付近での平面交差である。震源域内のプレート内の応力場は収束(北西)方向にほぼ直交するとの指摘(6)はSWF(W)が原因の起震応力をとらえたものと解釈できる。但し北西圧縮力NWF(W),NWF(E)があればこそその北東-南西方向応力場である。

(1)間瀬/JpGU2014/SSS29-P10 (2)間瀬/JpGU2015/SSS30-P01 (3)気象庁/山崎他/海底地震計を用いた2004年紀伊半島南東沖の地震の余震観測/気象研究所報告第59巻65-82頁平成20年10月 (4)AIST/地下構造可視化システム

/気象庁震源カタログ/≧M1 (5)海保海洋情報部/プレート境界域の精密海底地形図 (6)JAMSTEC/中野他 /SSJ2014秋/A22-07/2004年紀伊半島沖地震のメカニズム

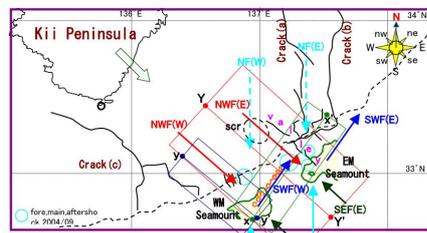


Fig.1 Plane chart

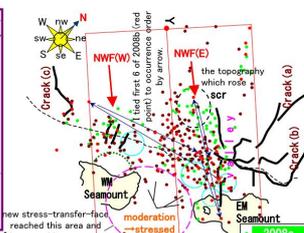


Fig.2 Plane chart (08-09)

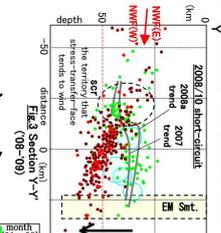


Fig.3 Section x-x'

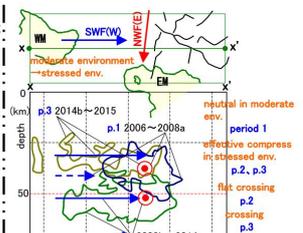
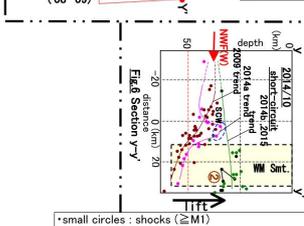
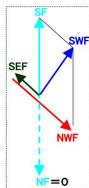


Fig.7 Section x-x'

Stress which operates on Seamount

name	direction	size until 2004/09	size after 2004/09	cause of appearance
NF	from the north	biggest	0	edge of slave is repelled
SF	from the south	biggest	It decreases	reaction of NF
NWF	from the northwest	0	biggest	edge of slave is repelled
SEF	from the southeast	0	It increases	reaction of NWF
SWF	It's changing	-	It's changing	resultant of SF,NWF,SEF

Fig.8



*small circles : shocks (≧M1)
 referable to (4)/shifted 10km to the southeast
 *about sea bottom (shape line) extracted from (5)

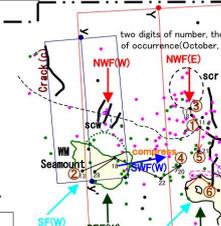


Fig.4 Plane chart (14-15)

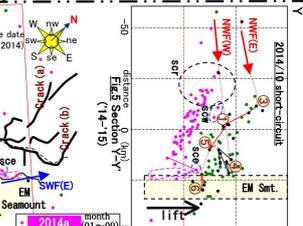


Fig.5 Section y-y'

変位空間勾配解析に基づく東北日本沈み込み帯におけるプレート間カップリングの周期的変化および変動周期の深さ依存性の検出

Depth-dependent periodic change in the interplate coupling at NE Japan inferred from spatial gradient of velocity field

*飯沼 卓史¹

*Takeshi Iinuma¹

1. 海洋研究開発機構

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

島弧における陸上GNSS観測に基づいて推定される地表での変位速度場には、海溝またはトラフから沈み込む海側のプレートと島弧の位置する陸側のプレートとの境界における、プレート間の固着によってもたらされる変形が含まれている。日本列島においては、国土地理院の展開するGEONETに属するものをはじめとする、諸大学・諸機関の設置したGNSS観測点が列島規模の稠密GNSS連続観測網をなしており、取得されたデータから求められる地殻変動場を用いて、プレート境界面のどこがどれくらいの強さで固着しているのかを推定する試みがこれまで数多くなされてきた [例えば, Ito et al., 1999, 2000; Mazzoti et al., 2000; Nishimura et al., 2004; Suwa et al., 2006; Hashimoto et al., 2009; Loveless and Meade, 2010など]。しかしながら、特に東北日本においては、太平洋プレートの沈み込みが始まる日本海溝は陸域から遠く (200 km以上) 離れているため、陸上に設置された観測点で取得される測地学的データに基づいて、海底下に位置するプレート境界面上でのプレート間固着域および固着強度の分布を、海溝軸に直交する方向に解像することは必ずしも簡単ではない。

Uchida et al. [2016, Science] は、陸上GNSS観測から得られる地表変位速度場の時空間変化を、小繰り返し地震の解析から推定されるプレート境界でのすべり速度の時空間変化と併せて用いることで、東北日本下に沈み込んでいる太平洋プレートと陸側のプレートとの境界において、1~6年程度の周期でスロースリップイベントが発生していることを明らかにした。同研究においては、1年の時間窓を1週間ずつずらして地表変位速度場を推定することで時間方向の変化を、また、海溝軸にほぼ直交する方向に設定された幅60 kmの帯状領域内に含まれる観測点における、水平変位の海溝軸からの距離に対する変化を変位の空間勾配として表現し、これを海溝軸に平行な方向に緯度にして0.1度ずつずらして求めることで空間方向の変化を検出している。水平変位の空間勾配が急であるほど、その帯状領域下でのプレート間の固着が強いことを利用して、固着強度の時間変化をモニタリングし、周期的なスロースリップの発生、すなわち固着強度の周期的変化を捉えたが、この手法では、その変化の生じている領域の位置を、海溝軸に直交する深さ方向に分解することはできず、また、固着強度が定量的にどの程度の大きさで変化しているのかを見積もることも困難であった。

一方で、Uchida et al. [2016] の小繰り返し地震の解析結果では、プレート境界面上で発生するスロースリップはその位置に応じた発生周期を持っていて、海溝軸に平行な方向に非一様であると同時に深さ方向にも変化しており、深部になるほど浅部に比して短い周期を持つ傾向を示している。そこで、本研究では、上下変位の変位勾配が、海岸線よりも深部に固着域が及んでいるか否かに応じてその符号が変化すること [飯沼・他, 2010, 日本測地学会第114回講演会] から、水平成分の変位勾配よりも上下変位の変位勾配がプレート境界の深い部分に対する感度を持つと考えて、各帯状領域における水平及び上下成分の変位勾配の時間変化の卓越周期を求めたところ、ほとんどの領域において、上下成分の変位勾配が短い卓越周期で変化していることが分かった。また、プレート境界での固着強度分布と、変位勾配を計算する際に使用する観測点の範囲とを変化させた数値計算テストを行ったところ、ある領域の固着強度の変化に対して、それ以外の領域の固着強度分布によらず、変位勾配の値が線形に変化することが確認できたので、これらについて報告する。また、今後、数値計算テストをより網羅的に行い、水平及び上下の変位勾配がプレート境界の現象について持つ感度を検定したうえで実データに適用し、固着強度の変化周期のプレート境界深度依存性並びに変化の大きさについての定量的評価を行う予定であり、本大会においてその結果の報告を行う。

キーワード：プレート間カップリング、GPS、東北日本、周期的変化、スロースリップイベント、2011年東北地方太平洋沖地震

Keywords: Interplate coupling, GPS, Northeast Japan, Slow slip event, mega-thrust earthquake, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

中央構造線の活動のモデル化に向けた西南日本の応力方向の詳細な空間分布の推定

Spatial distribution of stress orientations in Southwestern Japan and its implication for the strength of the median tectonic line

*吉田 圭佑¹、福山 英一¹*Keisuke Yoshida¹, Eiichi Fukuyama¹

1.独立行政法人 防災科学技術研究所 観測・予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット

1.National research institute for earth science and disaster prevention

日本列島では、歴史的に多数の被害地震が発生し、甚大な被害を及ぼしてきた。西南日本には、M₇規模以上の地震を発生させ得る活断層が多く分布していることが知られているが、その中でも活動した際に想定される被害の取り分け大きなものに、中央構造線がある。中央構造線に沿っては、GPSデータの解析により深部 ($z > 15$ km)での非地震性のすべりが検出されており、浅部において地震発生に向けた応力集中が進行している可能性が指摘されている [Tabei et al., 2002]。歴史上、中央構造線沿いでは、M7を超えるような地震がセグメントに分かれて発生してきたことが知られているが、2011年 M9東北沖地震に見られたように、それらが連結して超大規模の地震を発生させ得る可能性は否定できない。

本研究では、中央構造線上を含めた西南日本に分布する活断層における地震発生のモデル化を目指して、まず、応力・摩擦パラメータを拘束する目的で、震源メカニズム解析を行った。

最初に、Hi-netにより読み取られた初動極性のデータを用いて、メカニズム解の推定を行った。2001-2015年の間に初動極性が15個以上読み取られた地震を対象にして、接面のグリッド・サーチにより、初動極性の9割が説明可能な接面のRMSが30°以下である25,882個のメカニズム解を求めた。多くはマグニチュード範囲0.5-3.0に含まれる。この数は、気象庁により求められている同じ期間のメカニズム解の数の10倍の量である。それらのメカニズム解のうち、深さ30 km以浅かつプレート境界よりも浅部で発生している地震14,460個を取り出し、応力場を求めるためのデータ・セットとした。

次に、それらのメカニズム解に対して応力テンソル・インバージョン法を適用し、応力方向の詳細な空間分布を調べた。まず、発生した全てのメカニズム解に対して、応力テンソル・インバージョン法 [Michael, 1987]を適用して、平均的な応力方向を求めた。その結果は、 σ_1 軸が西北西-東南東を向く横ずれ断層型であった。従来から知られているように、フィリピン海プレートの沈み込みの方向およびGPSから求めた歪レートの最大短縮方向とは大きく異なる [e.g. Wang, 2000]。一つの可能性は、Townend & Zoback [2006]により提案されたような東日本と西日本の衝突による効果である。この応力の方向は、西南西-東北東走向を持つ中央構造線に対し、unfavorably-oriented [Sibson, 1985]である。

更に、応力方向の詳細な空間変化を調べる目的で次の3種類の計算を行った。(a)メカニズム解データをK-means法により300個のクラスターに分割、(b)領域を1°おきのメッシュで分割、(c)0.25°おきのグリッドに、近い10-30個のイベントを割り当て、応力テンソル・インバージョン法 [Gephart & Forsyth, 1984]を適用した。いずれの場合も、求まった σ_1 軸が東西方向を向く領域がほとんどであった。ただし、山陰地方において、 σ_1 軸は東西よりも、北西-南東方向を向く。その傾向は、Kawanishi et al. [2009]による臨時観測データを用いた推定結果と同様である。この領域は歪速度が局所的に高い領域に位置し (西村, 2014)、応力方向が歪速度の方向に近い。また、四国北部においても σ_1 軸が北西-南東を向く。この領域は、中央構造線に沿って北側に傾斜した地震活動が見られる領域 [Sato et al. [2015]であるが、発生している地震のメカニズム解は多様性を持つようである。広島県中央部においては、 σ_1 軸が南北に近く、周囲と顕著に異なる。ここでは地震の深さ下限も局所的に深い。紀伊半島においては、逆断層場も分布するが、その分布は、東北日本に見られるように [Yoshida et al., 2015]、標高と対応しているようにも見える。

中央構造線に沿って推定された σ_1 軸の方向は、前述した四国中央北部を除いて東西方向であり、unfavorably-orientedである。Favorably-orientedなIntact rock ($T=10$ MPa; $\mu=0.75$)での破壊よりも優先的に中央構造線がすべるために必要な見かけの摩擦係数の上限値を計算した。ほとんどのセグメントにおいて、その見かけの摩擦係数の上限値でさえ0.4を下回る。このことと観測されている微小地震・定常すべりを考え合わせると、中央構造線において、摩擦強度が弱まっている可能性が示唆される。

キーワード：中央構造線、応力、強度、地震活動

Keywords: The Median Tectonic line, stress, frictional strength, seismicity

コア変形法による南アフリカ大深度金鉱山誘発地震震源域の応力状態の推定

Estimate of the stress state in earthquake source region in South African deep gold mine by DCDA

*阿部 周平¹、矢部 康男¹、伊藤 高敏²、中谷 正生³、Gerhard Hofmann⁴、小笠原 宏⁵

*Shuhei Abe¹, Yasuo Yabe¹, Takatoshi Ito², Masao Nakatani³, Gerhard Hofmann⁴, Hiroshi Ogasawara⁵

1.東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター、2.東北大学流体科学研究所、3.東京大学地震研究所、4.Senior Mine Seismologist Rock Engineering、5.立命館大学理工学部

1.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Institute of Fluid Science, Tohoku University, 3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4.Senior Mine Seismologist Rock Engineering, 5.Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University

はじめに：

地震の準備過程は、断層の強度と断層運動を駆動する応力場が、断層すべりを介して相互作用をしつつ時空間発展していく過程である。そのため、震源域の応力場とその時間発展の把握は、地震の準備過程を理解する上で極めて重要である。断層近傍の応力を直接測定することを目的として、これまでに多くの掘削研究が行われてきた。掘削による応力測定には、水圧破砕法や応力解放法といったその場測定法やAE法やDRAといったコア法が用いられてきた。いずれの測定法も、ある条件のもとでは有効であるが、どのような場合にも使える万能な技術は存在しない。特に、大深度掘削に適用可能な技術は限られている。

南アフリカ大深度金鉱山のひとつであるムポネン金鉱山の深さ3.3kmでは、厚さ約30mの斑禰岩ダイクを斜めに断ち切るようにMw 2.2の地震（以下、本震）が発生した。Yabe et al. (2013) では、本震発生の約1.5年後に震源断層を貫通する掘削を行い、孔壁のブレイクアウトと掘削コアのディスクングから、震源域の応力状態を推定した。しかし、この方法は震源域の応力状態がブレイクアウトやディスクングの発生条件（破壊基準）を満たすかどうかの判定に基づいて、応力値の上限や下限を与える、非常に粗い推定法である。

本研究では掘削コア試料にコア変形法（船戸・伊藤、2013）を適用しより高い分解能で差応力の推定を試みる。本震震源域では、母岩（珪岩）とダイクの物性調査のために本震発生の約7ヶ月前にも掘削が行われている。そこで、本震発生前に採取されたコア試料にもコア変形法を適用し、地震前後の応力場についても議論する。これらの結果から、大深度応力測定へのコア変形法の適用可能性についても検討する。

手法：

コア変形法とは、掘削で周りの岩盤から切り離された採掘コアが応力解放によって非等方的に膨張することを利用して、コア試料の断面形状から推定される差ひずみに弾性定数を乗じて、孔井直交面内の差応力を求める方法である。本研究では、本震前後の掘削孔から採取した、それぞれ7個のコア試料（いずれも長さは約30cm）の軸方向に約2cm間隔で設定した測線に沿って、2度刻みで直径を測定し、その方位依存性を求めた。

結果：

本震前のコア試料では7個中3個で、本震後では7個中5個で位相のそろった直径の方位依存性を検出した。直径の方位依存性の位相が測線ごと異なるコア試料は、掘削時にドリルビットのブレ等によって削られたと考えられるので、以下の議論から除外する。弾性定数は一軸圧縮試験で測定した。本震前の差応力はコア試料を採取した位置に依らず100MPa程度と見積もられた。本震後の推定値は母岩内および母岩とダイクの境界付近では約20MPa、境界から離れたダイク内では70MPa程度であった。本震後の差応力推定値は、Yabe et al. (2013) による推定範囲に含まれるが、最尤値よりは2倍以上大きい。

議論：

コア変形法では、掘削時の応力解放に伴うコアの膨張は弾性変形のみであると仮定している。しかし、本研究で用いたコア試料を採取した、地表から約3.3kmという大深度では被り圧だけでも約80MPaと大きなものであるため、応力解放に伴って非弾性変形が生じる可能性がある。そこで、差応力の推定値に非弾性変形が及ぼす影響を見積もるため、ダイクから採取した岩石試料の一軸クリープ試験を行った。さらに、一軸圧縮破壊試験および一軸引張破壊試験（ブラジリアンテスト）も行って、降伏直前の非弾性変形の程度を計測した。これらの

試験では、弾性変形に対する非弾性変形の割合は最大でも30%であった。このことから、Yabe et al. (2013)の最尤値に比べて2倍以上大きな差応力の推定値は、非弾性変形の影響ではなく、実際に差応力が大きいことを示していると言える。本震前の掘削で得られたコア試料から推定された差応力は、本震後のコア試料から推定した差応力よりも有意に大きい。しかし、二つの掘削孔は互いに傾斜が異なるため、差応力推定値を直接比較できない。そこで、グリッドサーチにより二つの推定結果を再現できる単一の応力状態が存在するかどうか検討した。主応力の方向はYabe et al. (2013)で推定されたものを仮定し、最大300MPaの主応力の範囲でグリッドサーチを行った。その結果、両者を同時に満足する主応力値は存在しなかった。ただし、本震前の掘削から地震発生までに約7ヶ月、本震から本震後の掘削までは約1.5年の時間があるので、本研究で検出した応力状態の変化は、本震の発生だけでなく採掘域の変化にも起因していることには注意が必要である。

結論：

本研究により、Yabe et al. (2013)で大まかな範囲が拘束されるだけであったMw2.2の地震の震源域の応力状態に対して、新たな制約を与えることができた。また、本震の前後に採取されたコア試料の解析から、コア変形法は応力の時間変化の検出にも有効であることを示した。

キーワード：南アフリカ大深度金鉱山、コア変形法

Keywords: South African deep gold mine, Diametrical Core Deformation Analysis

南アフリカ鉱山地域最大のM5.5地震断層の科学掘削に向けた、歪データと境界要素法による最大すべり域の推定

Searching largest displacement zone of the 2014 Orkney earthquake fault with strain data and using Map3Di for scientific drilling.

*石田 亮壮¹、小笠原 宏¹、小笠原 宏幸¹、内浦 大海¹、Durrheim Raymond^{2,3}、Milev Alex³、大久保 慎人⁴、山口 照寛⁵

*Akimasa Ishida¹, Hiroshi Ogasawara¹, Hiroyuki Ogasawara¹, Taka Uchiura¹, Raymond Durrheim^{2,3}, Alex Milev³, Makoto OKUBO⁴, Teruhiro Yamaguchi⁵

1.立命館大学、2.Univ. Witwatersrand, South Africa、3.CSIR, South Africa、4.高知大学、5.北海道大学
1.Ritsumeikan University , 2.Univ. Witwatersrand, South Africa, 3.CSIR, South Africa,, 4.Kouchi University, 5.Hokkaidou University

The largest event recorded in a South African gold mining region, a M5.5 earthquake took place near Orkney on 5 August 2014. This is one of the rare events as the main- and after-shocks were recorded by 46 geophones at 2-3 km depths, 3 Ishii borehole strain meters at 2.9km depth, and 17 surface strong motion meters at close distances. The upper edge of the planar distribution of aftershock activity dipping almost vertically was only some hundred meters below the sites where the strainmeters were installed at distances larger than a few tens of meters from tunnel. A scientific project is planned to drill into the 2014 Orkney earthquake fault from the localities near the strain meter sites. It is a rare opportunity to recover fault material and fractures, to measure stress, to monitor after drilling at the M5.5 seismic zone. The final purpose of our research is to understand how main rupture stopped and why aftershock have occurred in sequence as observed. For this purpose, we attempted to constrain the largest displacement zone of the 2014 Orkney earthquake fault that account for the observed co-seismic strain with Map3Di to suggest where to drill. We checked polarities of each component of the strainmeters by comparing the observed tidal change with theoretically calculated tide Gotic2 [Sato and Honda (1984)], modifying the polarities of a few components with problems. Identical responses were recorded with the three strainmeters to a M4 earthquake at a few km distance, whereas .much larger (up to 1e-5) and different responses were recorded to the M5.5 earthquake. We calculated strain change of each component of the three strain meters by assuming uniform fault slip over a rectangle area with a same aspect ratio of aftershock area with various areas using map3Di. We found the rectangular area with a uniform fault slip of 0.5 m can explain the observed magnitudes of strain changes. However, we haven't yet evaluated local effects that might cause discrepancies in each component of the three strainmeters. At Japan Geoscience Union Meeting 2016, we are going to make a follow-up report.

キーワード：南アフリカ、境界要素法、掘削計画、歪データ、地震発生場

Keywords: South Africa, Boundary element method, Drilling project, Strain data, Seismogenic zones

2009年箱根群発地震における応力降下量の時空間分布と地震発生メカニズム

Spatio-temporal variation of the stress drop revealed the generation and migration process of the 2009 swarm activity at Hakone volcano

*藤岡 実悠¹、行竹 洋平²、金 亜伊¹

*Miyu Fujioka¹, Yohei Yukutake², Ahyi KIM¹

1.横浜市立大学、2.温泉地学研究所

1.yokohama city university, 2.Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

箱根火山は約40万年前から活動を始めた活火山である。現在でも火山活動が活発であり、しばしば有感地震を伴う活発な群発地震が観測される。こうした背景から、群発地震の発生メカニズムを明らかにすることは、火山防災の観点からも重要な意義がある。2009年8月4日から12日にかけて箱根で発生した群発地震は、高圧な流体が断層破砕帯内で拡散することによって誘発されたことが、高精度に求められた震源の時空間分布から定性的に示された[Yukutake *et al.*, 2011]。

そこで本研究では、この群発地震の応力降下量を求めることで、群発地震発生プロセスと流体との関連性について議論する。対象領域は火山地帯のため地殻構造が複雑であり、かつ地形の効果を考慮に入れる必要があるため理論的なグリーン関数の計算が困難である。そのため、応力降下量の推定には経験的グリーン関数法を用いて震源時間関数を見積もり、断層半径に換算する手法を用いた。本研究では、経験的グリーン関数の選出条件をマグニチュードの差が1以上、波形の相互相関係数が0.6以上、モーメントマグニチュードが1.5未満とした。モーメントマグニチュードの条件は立ち上がり時間とマグニチュードの依存性と計器特性から導いたものである。見積もられた応力降下量は一般的な地殻内地震と比べ低い値を示したことから、流体の陥入による有効法線応力の低下による群発地震発生プロセスが示唆された。さらに、応力降下量の値に時空間変化が見られ、震源の拡散とともに応力降下量の値が徐々に大きくなっていることがわかった。このことから2009年箱根群発地震の発生について、活動の初期は断層帯内への流体の貫入に伴う間隙水圧の上昇が主要因となり、その後は流体の拡散に伴い間隙水圧は低下する一方で初期に発生した群発地震による応力変化が関係している可能性が示唆された。本発表では上記の解析結果について報告し、2009年箱根群発地震の発生メカニズムについて考察する。

キーワード：箱根火山、群発地震、経験的グリーン関数法、応力降下量、流体陥入

Keywords: Hakone volcano, swarm earthquakes, empirical Green's function method, stress drop, invaginated the fluid

3次元及び2次元震源イメージングから推定した2014年伊予灘稍深発地震の初期段階の破壊過程
Early rupture process of 14 March 2014 Iyo-Nada intermediate-depth earthquake inferred
from 3D and 2D source imagings

*宇佐美 貴政¹、小松 正直¹、竹中 博士¹

*Takamasa Usami¹, Masanao Komatsu¹, Hiroshi Takenaka¹

1.岡山大学大学院自然科学研究科

1.Graduate School of Natural and Technology, Okayama University

2014年3月14日に伊予灘で M_{JMA} 6.2の稍深発地震が発生した。震源の深さは78 kmで、この深さはフィリピン海プレートのスラブ内にあたる。本研究の目的は3次元及び2次元イメージング(back-projection)法を用いて発震後3秒間の地震開始初期の破壊過程を推定することである。解析には震央距離105 km以内にある気象庁、防災科学技術研究所、産業技術総合研究所の高感度地震観測網観測点50点で記録された波形の上下動成分を使用した。3次元でのイメージングの結果、発震直後の震源位置(S)の他に、発震時から約0.7 s後の震源直近北上方(S1)、約2.2 s後の震源南方約9 km下方約6 km付近(S2)、約2.7 s後の震源東方約8 km下方約7 km付近(S3)の3箇所それぞれ地震波放射の大きな領域が見つかった。これらを説明するために、震源を通り気象庁初動発震機構解の走向22°E、傾斜角69°の節面を断層とする初期破壊断層面と、S2、S3を通り気象庁CMT解の走向244°E、傾斜角26°の節面を断層とする主破壊断層面の2つの断層面を有する断層モデルを提案する。また、それらの断層面を推定した2次元でのイメージングの結果から、主破壊断層面は震源の直下約7 kmの点を通ることがわかった。破壊過程としては次のように考えられる。まず震源で発生した破壊が四方に伝わり、発震時から約0.7 s後にS1の位置で大きなすべりを引き起こした。それとは別に、震源から南下方に進んだ破壊が主破壊断層面に乗り移った直後にS2の位置で、また下方に進んだ破壊が主破壊断層面に乗り移りそこからさらに東方に進んでS3の位置でそれぞれ大きな破壊を引き起こしたと考えられる。

謝辞：本研究には気象庁、防災科学技術研究所、産業技術総合研究所の高感度地震観測網の観測記録を使用させていただきました。記して感謝いたします。

キーワード：初期破壊、主破壊、震源イメージング、2014年伊予灘稍深発地震

Keywords: Initial rupture, Main rupture, Source imaging, 2014 Iyo-Nada intermediate-depth earthquake

2012年1月28日に丹沢山地下において発生したM5.5の地震に見られたNon-DC成分の成因について
What caused the unusual Non-DC component observed in the Jan. 28th 2012 Tanzawa
earthquake?

*佐藤 慎司¹、金 亜伊¹

*Shinji Sato¹, Ahyi KIM¹

1.横浜市立大学

1.Yokohama City University

丹沢山地は常時地震活動が活発な地域として知られており、その東西で発生メカニズムが異なると考えられている。西丹沢においては伊豆の衝突の影響による地震が発生し、東丹沢においてはフィリピン海プレートの沈み込みに伴う影響により地震が発生している[Yukutake et al. 2012]。特に西丹沢ではこれまでにマグニチュード(M) 5以上の地震が幾度となく発生していて、その多くは前震を伴い、発震機構解は本震のそれとは異なっているという特徴がある。前震が発生する理由については様々な議論がなされており、まだ決定的な結論には至っていない。2012年1月に西丹沢において活発化した地震活動ではその本震、及び前震においてNon-DC成分であるCLVD成分が卓越していることが確認され、同程度のマグニチュードの余震においてはそれらの成分はほとんど見られなかった。これらの発震機構を理解することは、前震を伴う地震の発生場を明らかにする上で非常に重要であると考えられる。

本研究ではそれらの発震機構を明らかにしCLVD成分の成因について考えていくことを目的として、モーメントテンソル解析と震源時間関数解析を行った。本研究における主な結論について以下に、まとめる。震源位置の誤推定、観測点依存などの様々な角度から検証したが、それらのいずれも見せかけのCLVDを表す原因とは考えられなかった。震源時間関数解析においてはパルス状のものではない複雑な形状が得られ、丹沢山地下における複雑な断層帯の存在が示唆された。上述のような結果からCLVD成分の成因としては複雑な断層帯の存在による複数の断層破壊が関連している可能性が高いことが示された。本発表ではさらにモーメントテンソル解の時空間変化を明らかにし、丹沢山地下における複雑な断層帯と地震活動について議論したいと考える。

キーワード：丹沢山地、発震機構解、CLVD成分、モーメントテンソルインバージョン、震源時間関数

Keywords: Tanzawa mountain, mechanism, CLVD component, moment tensor inversion, moment rate
function

2004年に釧路沖で発生した2つのM7クラス地震の破壊伝播の特徴

Characteristics of the rupture processes of two large earthquakes off the south-east Kushiro area in Hokkaido in 2004

*佐川 朋之¹、谷岡 勇市郎¹、山田 卓司²

*Tomoyuki Sagawa¹, Yuichiro Tanioka¹, Takuji Yamada²

1.北海道大学大学院理学院自然史科学専攻地震学火山学講座地震火山研究観測センター、2.茨城大学理学部
1.Institute of Seismology and Volcanology, Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Ibaragi University

本研究では、2004年11月と12月に発生した2つの釧路沖地震(Mw7.1とMw6.9)について、震源過程を解析した。この2つの地震は、太平洋プレート面上の互いに隣接する領域で起きたほぼ同じ規模の地震であり、8日間の時間差で発生した。この領域は、1961年にもM7規模の2つの地震が3ヶ月の時間差で起きた領域であり、1973年根室沖地震や2003年十勝沖地震に代表されるような、太平洋プレート面上で繰り返し発生するM8級の大地震の震源域に囲まれた領域である。よって、この2つの地震の特徴について調べることは、太平洋プレート面上の強度や応力などの複雑性を考える上でも重要である。

2つの釧路沖地震の特徴を調べるために、強震動波形(K-net)に経験則的グリーン関数法を用いて震源時間関数を取り出し、方位角に依存した破壊継続時間の変化、つまりディレクティビティ効果について検証を行った。その結果、11月の地震は同心円状に破壊が伝搬し、12月の地震は約8km北方に向けて破壊が伝搬した可能性が示唆された。また、余震の時空間的な分布から12月の地震は均一に応力が低下した可能性が示唆された。このことは、十勝沖地震(Mw8.0)の余効変動が起こった後11月の地震(Mw7.1)が発生し、それによって12月の地震(Mw6.9)が発生したが、1973年の根室沖地震(Mw7.4)の震源域を破壊するだけの応力増加は無かったため北向きに破壊が伝搬したことを示唆している。

キーワード：2004年釧路沖地震、震源過程

Keywords: 2004 Kushiro-oki earthquake, source process

2014年長野県北部の地震の動力的震源モデル（その3）

Dynamic rupture model of the 2014 northern Nagano, central Japan, earthquake (Part 3)

*加瀬 祐子¹*Yuko Kase¹

1.産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

1.Geological Survey of Japan, AIST

2014年長野県北部の地震 ($M_{JMA}6.7$) の動力的震源モデルについて、前回（加瀬，日本地震学会2015年秋期大会）に引き続いて検討した。この地震では、震源断層の南側半分では、神城断層に沿って地表地震断層が断続的に認められたが、震源断層の北側半分では観察されていない（勝部ほか，2015）。一方、強震波形を用いた震源インバージョンでは、すべりの大きい領域は、主に震源の北東側に求められている（浅野ほか，2015；小林ほか，2015；芝，2015；堀川，2015）。1枚もしくは平行な2枚の断層面を仮定する比較的単純な断層モデルでは、地表地震断層とすべり分布の特徴を共に説明することはできなかった（加瀬，2015）。そこで、発震機構解（気象庁，2014）とCMT解（防災科学技術研究所，2014）の違いに注目し、初期破壊面となる鉛直なセグメントが2つのセグメントの間にある断層モデルを検討した結果、本地震の震源過程を説明できる可能性があることが示された。

主破壊面の断層モデルと広域応力場は、加瀬（2015）と同じものを用いた。今西・内出（2015）が再決定した本震及び余震の分布と地殻変動データの解析結果（矢来ほか，2015）を参考に、走向 $N20^{\circ}E$ 、2 kmより浅い部分では東傾斜 45° 、深い部分では東傾斜 60° 、断層下端の深さ12 kmとした。震源インバージョンですべりの大きい領域に対応する震源北東側10.1 kmと、地表地震断層が認められる震源南西側13 kmの2つのセグメントから成るとし、断層全長は21.1 kmとした。震源は南西側セグメントにあり、2つのセグメントは2 kmオーバーラップして、2 km左ステップする。この断層モデルは、神城断層の地表トレースやCMT解（気象庁，2014；防災科学技術研究所，2014）とも調和的である。更に、2つのセグメントの間に、初期破壊面となる鉛直なセグメントを設定した。また、震源の北東側では顕著な地表地震断層が観察されていないことから、北側11.1 kmの範囲では、断層上端の深さを2 kmとした。

広域応力場は、テクトニックな応力場を考慮し、主応力は深さに比例、最大主応力の向きは $N60^{\circ}W$ （文部科学省ほか，2004）、応力比は0.42（文部科学省ほか，2004）、最小主応力の向きは鉛直方向で、大きさはかぶり圧に等しいとし、静水圧条件下にあるとした。また、断層周辺の地下構造モデル（防災科学技術研究所，2003）を参考に、深さ2 kmを境界とする2層構造を仮定した。

上記のモデルに対し、鉛直セグメント上に破壊開始点を置き、すべりに依存する摩擦構成則を仮定して、差分法（Kase，2010）により動的破壊過程を計算した。予察的な計算の結果からは、北東側セグメントの深部と南西側セグメントの浅部に破壊が進展しやすく、本地震の震源過程を説明できる可能性が示された。

キーワード：動力的震源モデル、2014年長野県北部の地震、数値シミュレーション

Keywords: dynamic rupture, 2014 northern Nagano earthquake, numerical simulation

遠地実体波震源過程解析によるすべり分布と震源の様々な特徴との関係性

Relationship between various Source Characteristics and Slip Distribution determined by Source Process Analysis with Teleseismic Body-Wave

*藤田 健一¹、勝間田 明男¹、迫田 浩司²

*Kenichi Fujita¹, Akio Katsumata¹, Koji Sakoda²

1.気象庁気象研究所、2.気象庁

1.Meteorological Research Institute, 2.Japan Meteorological Agency

1. はじめに

これまで、気象庁がホームページ上で解析結果を公表している遠地実体波震源過程解析の迅速化及び自動化を目指し、解析に用いる最適パラメータを決めるために必要となるプロセスについて考察を行ってきた。その結果、小断層や基底関数などのパラメータをスケーリング則に基づきイベントの規模に応じて設定することで、解析者によるパラメータの試行錯誤なしに遠地実体波震源過程解析を行うことができるようになった。そこで、解析に使用する観測点の選別及びP波初動の読み取りは手動で行いそれ以外のパラメータ設定などを自動的に行う準自動的な遠地実体波震源過程解析（準自動解析）について手動解析との解析結果の比較を行ったところ、イベントの規模によらず多くのイベントで手動解析と概ね同じような解析結果を得ることができた。しかし、一部のイベントでは準自動解析と手動解析のすべり分布に大きな違いが見られた。

このことから、何が原因で準自動解析及び手動解析によるすべり分布に違いが見られるのかを調べるため、すべり分布と余震分布や津波の波源域等との比較を行った。

また、すべり分布を最大余震の位置等と比較することでそこに何か関係性が見られるかどうかについても調べた。

今回の発表では、遠地実体波震源過程解析によるすべり分布と震源の様々な特徴の関係性について取りまとめたのでその結果を報告する。

2. 解析方法

計算プログラムは岩切 他 (2014) を使用した。観測波形はIRISの広帯域地震波形を使用し、イベントの規模に応じてサンプリング間隔とカットオフ周波数を設定した。破壊開始点は国内のイベントについては気象庁一元化震源の値を使用し、海外のイベントについては米国地質調査所 (USGS) の震源の値を使用した。断層面の走向、傾斜、すべり角は国内のイベントについては気象庁CMTの値を使用し、海外のイベントについてはGlobal CMT解 (GCMT) 等の値を使用した。断層面は破壊開始点を中央に設定し、イベントの規模に応じて小断層のサイズと数を設定した。震源時間関数は二等辺三角形の基底関数の立ち上がり時間及び数をイベントの規模に応じて設定した。解析時間は破壊開始点から破壊フロントが最も端の小断層に到達するのに要する時間と小断層における破壊許容時間の和として設定した。各小断層のグリーン関数の計算に用いる地下速度構造にはIASP91のモデルを与え、震源付近ではCRUST2.0のモデルを与えた。時空間的なめらかさを与える拘束条件についてはABIC (Akaike (1980)) が最小となるパラメータを設定した。最大破壊伝播速度は経験的關係 (Geller (1976)) からS波速度の0.72倍として設定した。

3. 比較方法

(1) 解析で設定した各小断層における余震数を調べ、各小断層におけるすべり量との比較を行った。

(2) すべり分布から地表面や海底面における地殻変動量等を計算し、津波の波源域等との比較を行った。

(3) 最大余震の位置や、最大余震のすべり分布等を調べ、各小断層におけるすべり量との比較を行った。

謝辞：IRISの広帯域地震波形、IASP91及びCRUST2.0の地下速度構造モデルを用いました。記して感謝致します。

キーワード：震源過程解析、すべり分布

Keywords: Source Process Analysis, Slip Distribution

三陸沖から房総沖にかけての準動的地震発生サイクルシミュレーション Simulation of Recurring Earthquakes along the Japan Trench

*藤田 健一¹、弘瀬 冬樹¹、前田 憲二¹
*Kenichi Fujita¹, Fuyuki Hirose¹, Kenji Maeda¹

1. 気象庁気象研究所
1. Meteorological Research Institute

1. はじめに

三陸沖から房総沖にかけては規模 (M) 7-8クラスの地震が各領域で繰り返し発生していることが知られており、さらに2011年に東北地方太平洋沖地震が発生したことでM9クラスの地震も同様に繰り返し発生している可能性があることも分かった。

そこで、これらM7-9クラスの繰り返し発生する地震の規模及び発生周期 (T) を再現する地震発生シミュレーションモデルの作成を試みたのでその結果を報告する。

2. 解析方法

再現の対象とした繰り返し発生するプレート間地震は、地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2011) の「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価 (第二版) について」を参考に、三陸北部の地震 (M^{8.0}、T¹⁰⁰年)、宮城県沖の地震 (M^{7.5}、T⁴⁰年)、三陸沖南部海溝寄りの地震 (M^{8.0}、T¹¹⁰年)、茨城県沖の地震 (M^{7.0}、T²⁰年)、東北地方太平洋沖型の地震 (M^{9.0}、T⁶⁰⁰年) とした。このほか、繰り返し性は明確ではないが特徴的な地震として、1896年に三陸沖の海溝寄りで発生した津波地震 (明治三陸地震)、1938年に福島県沖で続発した地震活動があり、これらについても再現を試みる。

地震発生サイクルをシミュレートするモデルには、地震波放射を考慮した弾性論 (Rice (1993)) から導かれる運動方程式及びすべり速度・状態依存摩擦構成則 (Dieterich (1979)) とその発展則 composite-law (Kato and Tullis (2001)) を用いた。解析領域はアスペリティが十分に含まれるように三陸沖から房総沖にかけての領域を設定した。三次元プレート境界の形状は Nakajima and Hasegawa (2006) に従い、1辺が約5 kmの三角形セル17,507個で表現した。陸に対する太平洋プレートの沈み込み速度は Wei and Seno (1998) 等を参考に、北 (8.2 cm/year) から南 (8.0 cm/year) へ徐々に小さくなるよう設定した。アスペリティの領域は中央防災会議 (2005) で設定された断層モデル等を参考に設定した。摩擦パラメータ (A, B, L) は各地震の規模及び周期を再現できるよう試行錯誤的に設定した。このとき、アスペリティの周囲の領域 (背景領域) が速度強化 (A - B > 0) であるモデル (背景安定すべり型モデル) と、背景領域が速度弱体化 (A - B < 0) であるモデル (階層型モデル) の2ケースをエンドメンバーとした。

3. 解析結果

現時点で、三陸沖から房総沖にかけてのM7-9クラスの繰り返し発生する地震について最も良く再現できたモデルでの規模や周期は、背景安定すべり型モデルで三陸北部の地震 (M^{8.0}、T⁶¹⁻¹⁰³年)、宮城県沖の地震 (M^{7.4}、T³⁰⁻⁷⁴年)、三陸沖南部海溝寄りの地震 (M^{7.9}、T¹⁰⁴⁻¹³⁰年)、茨城県沖の地震 (M^{6.8}、T¹⁴⁻⁵²年)、東北地方太平洋沖型の地震 (M^{8.3}、T²⁰³⁻²³²年 (そのうちの数回に1回M8後半の地震)) であった。なお、三陸北部の地震の数年後に三陸沖の海溝寄りで地震が発生するケースが見られた。また、福島沖では複数のアスペリティが連続して地震となるケースが見られた。

一方の階層型モデルでは、三陸北部の地震 (M^{7.9}、T⁶⁶⁻¹⁴⁰年)、宮城県沖の地震 (M^{7.3}、T³¹⁻¹⁴⁹年)、三陸沖南部海溝寄りの地震 (M^{7.8}、T¹²⁰⁻²¹⁶年)、茨城県沖の地震 (M^{6.8}、T⁹⁻⁵¹年)、東北地方太平洋沖型の地震 (M^{8.5}、T²⁹⁴⁻⁵²⁶年 (そのうちの数回に1回M9の地震)) であった。なお、三陸沖の海溝寄りでは地震とならなかったが、福島沖では複数のアスペリティが連続して地震となるケースが見られた。

このとき、両モデルにおける各アスペリティは同じ領域を設定し同じ摩擦パラメータを与えていたが、地震の発生周期は階層型モデルの方が長くなった (ただし、東北地方太平洋沖型の地震直前における各アスペリティの周期は両モデルで概ね同じ)。これは、背景安定すべり型モデルに比べ階層型モデルの方が背景領域にお

ける地震間の定常的なすべり量が小さく、アスペリティへのローディングレートが小さいためと考えられる。
 今後は、シミュレートされた東北地方太平洋沖型の地震をより実際の地震に近づけるために、海溝沿いのアスペリティを中心に摩擦パラメータなどのさらなる検討を行いたい。

キーワード：地震発生サイクルシミュレーション、東北地方太平洋沖地震

Keywords: Simulation of Recurring Earthquakes, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

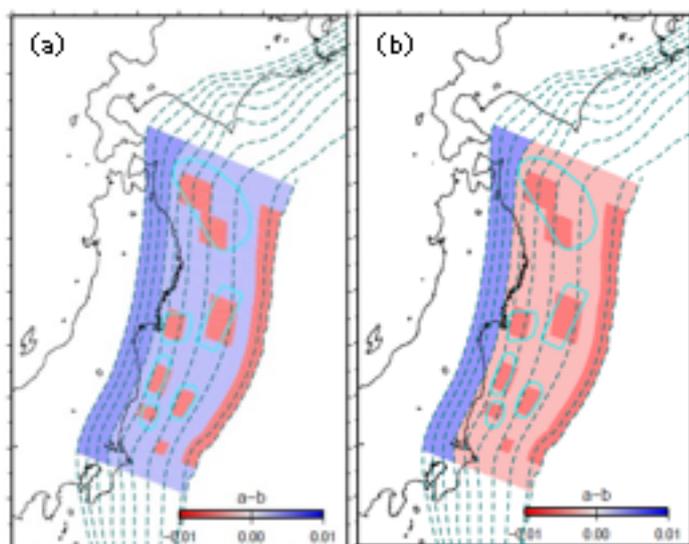


Figure 1. Friction parameter (a - b) (a) background stable slip model (b) hierarchical model

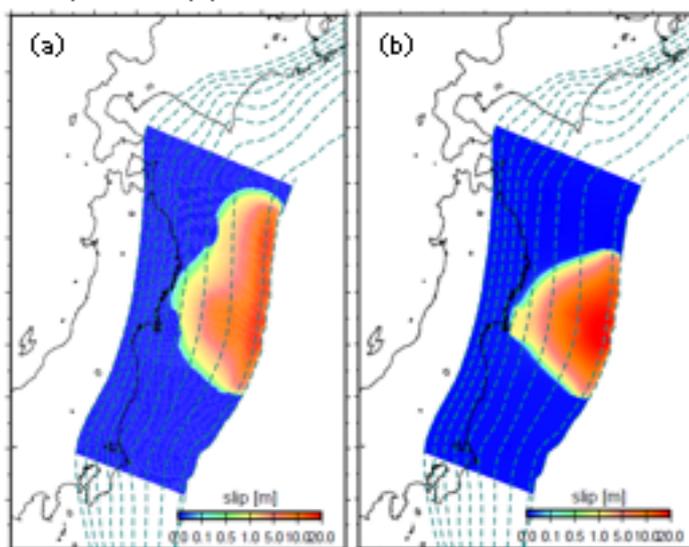


Figure 2. Slip distribution (a) background stable slip model (b) hierarchical model

南海トラフ巨大地震サイクルシミュレーション —熱的加圧による速度弱化を考慮した離散セルモデルの準動的数値計算—

Simulation of the Nankai earthquake cycle -Quasi-dynamic discrete-cell model incorporating rate-weakening due to thermal pressurization-

*尾崎 勇吾¹、平原 和朗¹

*Yugo Ozaki¹, Kazuro Hirahara¹

1.京都大学大学院理学研究課

1.Graduate School of Science, Kyoto University

フィリピン海プレートが沈み込む南海トラフでは繰り返し大規模な地震が発生しており、今世紀前半に西南日本に大きな被害をもたらす巨大地震の発生が危惧されている。繰り返し間隔は90年から250年と大きく変化する。四国沖から東海沖までのびる震源域は5つのセグメントに分けられ、5つのセグメント全てが連動破壊する場合、或いはあるセグメントが遅れて破壊したり、また破壊しない場合がある、といった非常に多様な地震発生を繰り返す (Ishibashi, 2004)。また瀬野 [2012]は地震歴を見直して、震源域では主に地震波、津波および地殻変動を生じさせる領域が階層的に存在しており、また南海トラフ巨大地震は地震領域が安政地震の特徴を持つかまたは宝永地震の特徴を持つかで安政型および宝永型に分類されると提唱している。提唱されたモデルは複雑な南海トラフ地震発生履歴を理解する一つの見方といえるが、更なる検証が必要であろう。このように複雑な南海トラフ地震の発生様式を解明するための一つの手法として、地震サイクルシミュレーションが考えられる。

本研究では、断層面上のみを離散化する境界要素法的解法を用い、速度状態依存摩擦則に従いプレート運動を原動力とする地震サイクルシミュレーションを行なう。摩擦パラメータの空間不均質性を考慮するだけでは上記の複雑な南海トラフの地震歴を再現することは難しく、別の新しい影響を考慮することが求められる。Noda and Lapusta [2010]では地震時の摩擦発熱により断層帯中の流体、間隙流体の圧力が増加する熱的加圧という現象に焦点を当て、熱的加圧に関わるパラメータの空間非一様性を断層面上で考慮することで2つのパッチの相互作用を表現している。本研究ではこの性質を南海トラフの設定に適用し、その複雑な地震歴を再現することを最終目的とする。彼らは動的破壊過程まで含めているが、本研究では計算コストの関係で慣性項を近似した準動的計算スキームを用いる。この点で以下に述べる熱的加圧の効果は過小評価になっている可能性があるが、今後の問題としたい。

熱的加圧による間隙流体圧の時間変化を考慮した場合、地震時の法線応力が増大し摩擦力が減少する。これにより未考慮時と比べて一度のイベントで地震性すべりする量が増加し地震再来周期が長くなる。この熱的加圧の計算にはBizzari and Cocco [2012]で提唱された畳み込み積分の形式を採用することで拡散方程式をそのまま解く場合に比べて時間刻み幅を比較的大きく取ることができる。しかし、履歴積分による計算コストは依然として大きく、断層セル間の相互作用の計算量と相まって、南海トラフのような広域断層を連続体としてそのまま計算することは現状では難しい。そこで、今回はMitsui and Hirahara [2004]で計算された南海トラフをバネ-ブロックモデルによって表現した手法を参考に、計算負担の比較的軽微なモデル計算を行い上述の熱的加圧を考慮した概念モデルにより、地震歴の再現性の評価を行った。このモデルではブロックを南海トラフの5つのセグメントに見立て、dip角などのそれぞれのセグメントに固有の性質をブロックごとに適用する。今回の研究では要素同士の弾性相互作用をバネではなくOkada [1992]による半無限均質弾性媒質中でのすべり応答関数によって表現する離散セルモデルとして計算する。合計セル数5では相互作用をほぼ表現できないため、走行方向のセル分割数ある程度増やして計算を行う。特定のセルにのみ熱的加圧を考慮し、摩擦パラメータの設定と合わせて様々なサイクルパターンを作り出し、南海トラフの地震歴に合致するようなイベントの再現を目指す。この際重要になるのは、熱的加圧を考慮するセル数を減らすことで計算負担を可能な限り削減することである。連続体モデルで計算する場合に今回の概念モデルと得られた結果を参考にすることで南海トラフの地震歴を実用的に、精度よく再現できることが期待される。

キーワード：南海トラフ、地震サイクルシミュレーション、境界要素法、間隙流体圧、熱的加圧

Keywords: Nankai Trough, simulation of earthquake cycle, a boundary elementary method, pore fluid pressure, thermal pressurization

南海トラフ巨大地震発生域深部で発生する大きな前兆すべりのモデル化

Simulated precursory large aseismic slip at the deeper extension of the seismic region along the Nankai Trough, SW Japan

*大谷 真紀子¹、亀 伸樹¹、中谷 正生¹

*Makiko Ohtani¹, Nobuki Kame¹, Masao Nakatani¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

At the subduction zone along the Nankai Trough, SW Japan, large earthquakes around M8 had occurred repeatedly. Their intervals (around 100–200 years) have been identified precisely from old historical documents combined with geological surveys (*Sangawa, 2011*). The most recent events occurred in 1944 (the Showa To-Nankai EQ.) and 1946 (the Showa Nankai EQ.) when modern satellite geodetic networks had not been developed yet.

The existence of short-term aseismic processes before the 1944 and 1946 events has been inferred from the leveling or interview records. Two-times level difference measurements showed the displacement of north down before the 1944 event (*Mogi, 1986*), and the water level of some wells were reported to have dropped before the 1946 event (*Sato, 1982*). These phenomena were observed within several days before the earthquakes, and each could have been caused by 2 m slip on the plate interface at the deeper extension of the seismic region before each event (*Linde and Sacks, 2002*).

In this study, we simulate the cycle of large earthquakes in a quasi-dynamic 2D model to investigate aseismic slip acceleration in the deeper extension of seismic fault. We consider a flat plate interface with a shallow dipping angle of 15° for the depth 0–60 km mimicking the Nankai Trough. Following *Nakatani and Scholz (2006)* and *Yoshida et al. (2013)*, we introduce an intrinsic cut-off time for healing into the state evolution law of the rate-and-state friction. The intrinsic time leads to a corresponding cut-off velocity (V_{cx}) beyond which velocity strengthening occurs. We assume that V_{cx} is depth dependent ($1-10^{-9}$ m/s). We show that this depth variation in V_{cx} can possibly produce large aseismic slip.

In our simulation, the bottom part of the fault below the deeper extension exhibits a constant slip rate loaded by a subducting plate velocity (4.5 cm/year). This bottom slip drives the adjacent deeper locked part and aseismic slip starts to accelerate. Because of the introduction of low V_{cx} there, the slip cannot monotonously accelerate to seismic slip at the same depth. Instead, the aseismic slip propagates to the shallower part where the slip accelerates following the increasingly higher V_{cx} at the depth, and finally reaches to seismic slip at the shallow part with the large V_{cx} . The seismic slip starting at shallow part then propagates bilaterally to the shallower and deeper parts, and develops into a large earthquake. For example, the point at 20 km depth starts to slip aseismically 5.4 days before the earthquake and 54% of the slip occurs as the precursory aseismic slip. The deeper part produces the longer-lasting aseismic slip with the smaller velocity.

This simulated aseismic slip may correspond to the several-days precursors of the 1944/1946 events. Our results also suggest that the observed short-term aseismic slip acceleration is a part of the longer-term aseismic slip that has started at deeper parts, which may be detected at the next To-nankai/Nankai earthquakes with the help of recently installed modern observation networks (Do-Net, Hi-Net, and GEONET) around the Nankai region.

This study was supported by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan, under its Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program.

キーワード：南海トラフ、前兆すべり、サイクルシミュレーション

Keywords: Nankai Trough, precursory slip, cycle simulation

潮汐の影響を考慮したスロースリップイベントの数値シミュレーション

Numerical simulation of slow slip events, considering the effect of earth tide

*松澤 孝紀¹、田中 愛幸²、芝崎 文一郎³*Takanori Matsuzawa¹, Yoshiyuki Tanaka², Bunichiro Shibazaki³

1.国立研究開発法人 防災科学技術研究所、2.東京大学 地震研究所、3.国立研究開発法人 建築研究所
1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.Building Reserach Institute

南海トラフにおける短期的スロースリップイベント(SSE)の発生は、地球潮汐の応力変化に影響されていることが指摘されている(例えば、Nakata et al., 2008; Tanaka and Ide, 2014)。また、数値シミュレーションにおいては、SSE発生時の潮汐による影響について、研究が行なわれている(Hawthorne and Rubin, 2013)。我々は、これまで地震サイクルにおけるSSE発生挙動についての数値シミュレーションを行ってきており(例えば、Matsuzawa et al., 2010)、発生間隔がプレート間地震サイクルの後半において短くなる可能性を指摘している。本研究では、潮汐による応力擾乱が加わった場合について、地震サイクルにおける短期的SSEの発生挙動の数値シミュレーションによる評価を試みた。

数値モデルとしては、Matsuzawa et al. (2010)と同様に40,000個の矩形要素で表される平板の沈み込みプレート形状を仮定し、摩擦則としてはカットオフ速度をもったすべり速度・状態依存則を用いた。短期的SSE領域以深では、カットオフ速度が遅く($10^{-6.5}$ m/s)、有効法線応力が低くなるパラメータ分布を仮定した。以下では、潮汐の応力変化について、剪断・法線応力ともピーク間で2kPaの振幅で、剪断応力最大と法線応力最小の時間が同期する位相をもつ、M2分潮の周期(約12.42時間)の正弦波の応力擾乱を全域に与えた場合の結果を紹介する。

この潮汐を入れた場合の数値シミュレーション結果においては、プレート間地震の発生間隔が、例えば最初の地震と2番目の地震間について、潮汐を入れない場合の106.5年から106.2年に、2番目の地震と3番目の地震間については、106.5年から105.9年に、それぞれ若干の短縮がみられた。これは、潮汐による応力擾乱の影響が地震発生サイクルにも及ぶ可能性を示唆する。

短期的SSEの発生間隔については、潮汐の有無にかかわらず地震サイクル間で減少を示し、顕著な差異はみられなかった。なお、ここでのSSEは、各要素上ですべり速度が沈み込み速度の2倍を超えた期間に5mm以上のすべり量があった場合とし、その開始時間を各要素上でのSSEの発生時として検出した。SSEと潮汐の位相の関係については、その発生時が、剪断応力が最大かつ法線応力が最小となる潮汐の位相を中心に分布する結果が得られた。剪断応力最大から-30度から30度の位相の範囲内に発生時が入る割合は、地震後5~35年目、35~65年目、65~95年目について、それぞれ22.7%、22.7%、22.2%となった。いずれも一様な発生から期待される16.7%よりは、やや高い値となっており、潮汐による応力変化がSSEの発生に一定の寄与をもつことは言える。しかしながら、発生サイクルにおける変化は明瞭ではない。

キーワード：スロースリップイベント、数値シミュレーション、地球潮汐

Keywords: Slow slip event, Numerical simulation, Earth tide

岩石の弾性波速度に対する間隙圧および亀裂分布の影響：スロースリップ発生領域で見られる高Vp/Vs比の解釈

Dependencies of pore pressure and fracture distribution on elastic wave velocities for thermally cracked rocks : Implications for high Vp/Vs zone related to slow slip events along plate boundary

西村 佳也¹、*上原 真一²、溝口 一生³、瀬戸 滉平²、河島 憲司²

Kaya Nishimura¹, *Shinichi Uehara², Kazuo Mizoguchi³, Kohei Seto², Kenji Kawashima²

1.東邦大学大学院理学研究科、2.東邦大学理学部、3.電力中央研究所

1.Graduate School of Science, Toho University, 2.Faculty of Science, Toho University, 3.Central Research Institute of Electric Power Industry

Seismic studies have found that there are high Vp/Vs ratio regions in oceanic crusts at subducting oceanic plates (e.g., Cascadia (2.0-2.8) (Audet et al., 2009), Nankai trough (> 2.03) (Kodaira et al., 2004)), and the correlations between the location of high Vp/Vs and slow slip zone have been pointed out by several studies. Christensen (1984) indicated that high pore pressure may cause high Vp/Vs. It is also known that Vp/Vs also depends on porosity or pore structures (fracture distributions). However, the relationships between Vp/Vs, pore pressure, porosity and fracture distribution have not been investigated in detail for rocks composing oceanic crusts.

This study reports the results of measurements of Vp and Vs (transmission method) at controlled confining and pore pressure and estimation of Vp/Vs ratio for thermally cracked dolerite and relation between Vp/Vs, pore pressure and fracture distributions. Confining pressure was constant (50 MPa) and pore pressure was decreased from 49 to 0.1 MPa and then increased to 49 MPa. We did measurement with an intact rock specimen (0.5% in porosity) and the rock specimens heated under 300, 500 and 700°C for 24 hours (2.1%, 3.4% and 3.5% in porosity, respectively). Rock specimens heated under 500 and 700°C were reddish in color, which suggested a possibility that not only cracking but also oxidizations of rock forming minerals might affect elastic velocities. Therefore, we operated elastic velocity measurements under atmospheric pressure with rock specimens heated under 500 and 700°C at air (an oxygen concentration is around 21%) and at nitrogen conditions (an oxygen concentration is less than 0.5%), and revealed that the effect of oxidization on Vp/Vs is several times less than the effect of heating-temperature conditions.

In this experiments, for the intact rock specimen and specimen heated under 300°C, Vp and Vs was almost constant at any pore pressure, and for specimen heated under 300°C, Vp/Vs was 1.7 to 1.8, which is less than the high Vp/Vs ratio observed at oceanic crusts of subducting plates. On the other hand, for specimens thermally cracked under 500 and 700°C, Vp/Vs increased as pore pressure was increased (effective pressure was decreased), and was more than 2 when pore pressure was over 40 MPa and 30 MPa, respectively. This results indicate that Vp/Vs is not over 2 unless porosity is larger enough (approximately 3% for the results in this study), even if pore pressure is higher. We also observed fractures in the specimens by using a microscope, and measured fracture densities. The fracture densities for the specimens heated under 500 and 700°C were larger than that of the intact rock specimen. There was no clear difference on the fracture density between the specimens heated under 500 and 700°C, but microscope observations revealed that there was differences on fracture distributions such that fine net-like fracture distributions or networks of intra-mineral fractures were observed more for the specimen heated under 700°C than that under 500°C. These features on fracture distributions might affect elastic velocities. In general, high Vp/Vs near slow slip zones tends to be simply interpreted as high pore pressure, but it may also be influenced by porosity and features of fracture distributions.

This work was supported by JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research (Grant Number 26400492) .

キーワード：高Vp/Vs、室内実験、亀裂密度、高間隙圧

Keywords: high Vp/Vs, laboratory experiment, fracture density, high pore pressure

大型二軸摩擦実験において示された断層面の成熟度がスロースリップの活動に与える影響
Effect of fault surface evolution on slow slip behaviors in large-scale biaxial experiments

*山下 太¹、福山 英一¹、Xu Shiqing¹、溝口 一生²、滝沢 茂¹、川方 裕則³

*Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama¹, Shiqing Xu¹, Kazuo Mizoguchi², Shigeru Takizawa¹, Hironori Kawakata³

1.国立研究開発法人防災科学技術研究所、2.一般財団法人電力中央研究所、3.立命館大学

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2.Central Research Institute of Electric Power Industry, 3.Ritsumeikan University

より現実に近い条件下において主破壊に先行する準備過程を調べるため、防災科学技術研究所が所有する大型二軸摩擦試験機を用いたスティックスリップ実験をおこなった。岩石試料として接触面が長さ1.5 m、幅0.1 mとなる二つの直方形の変はんれい岩を用いた。複数の実験を同じ岩石試料を用いて繰り返しおこなったため、断層面の粗さは摩擦すべりによって発達していった。垂直応力6.7 MPa、载荷速度0.01 mm/sの条件下において3回1組で連続した実験をおこなったが、それぞれの実験ごとに全ての摩耗物を取り除いた。断層面の成熟度を加速させるため、各組の実験の間に高速の载荷速度かつ長距離のすべり距離の実験をおこなった。その結果、異なる3つ成熟度ステージI, II, IIIにおける実験結果を得た。全ての実験において多数のスティックスリップイベントが観測され、その数は断層の成熟度とともに増加する傾向にあった。断層沿いに設置したひずみゲージアレイの記録から、せん断応力降下のゆっくりとした伝播が確認された。これは主破壊の前のスロースリップに起因するものと考えられる。スロースリップが始まった場所と主破壊に対する相対的な時刻を調べたところ、その時空間分布が断層面の成熟度に依存して変化していることが明らかとなった。ステージIではその分布は時間的にも空間的にも単調であったが、ステージIIおよびIIIでは相対的なすべり開始時刻にばらつきが生じていた。また、ステージIおよびIIでは、すべり開始場所が初期垂直圧力の分布と調和的であることが分かった。この初期圧力分布は感圧紙 (Fujifilm PRESCALE LW) を用いて各実験の直前に測定されたもので、スロースリップは初期圧力が極小値を示す場所からすべり始めていた。一方、ステージIIIにおいてはすべり開始場所と初期圧力との間にそのような関係は確認できなかったが、一部の開始場所は摩擦すべり中に生成された摩耗物の分布と調和的であった。これらの結果は断層面が成熟するにつれてスロースリップの振る舞いが複雑になることを示唆している。

キーワード：スロースリップ、断層成熟度、摩擦実験

Keywords: Slow slip, Fault evolution, Friction experiment

斑レイ岩の中-高速度域速度急変実験において観察された過渡的摩擦挙動

Transient Frictional Behavior Observed in the Velocity-Stepping Test of Gabbro Conducted at Intermediate to High Slip Velocities

*中野 龍二¹、堤 昭人¹*Ryuji Nakano¹, Akito Tsutsumi¹

1.京都大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Kyoto University

Since Brace and Byerlee [1966] suggested that frictional stick-slip sliding plays an important role in seismic faulting, a number of friction experiments have been carried out. One of the greatest achievements is a proposal of rate- and state-dependent friction constitutive law by Dieterich [1978]. This law has been widely used for simulating earthquake cycles, but the law was originally proposed at low slip velocities of the order of sub-mms^{-1} , and it has not been clarified whether rate- and state-dependent friction constitutive law can be applied to frictional phenomena at seismic faulting slip velocities (the order of ms^{-1}).

In this study, we modified a rotary-shear friction apparatus at Kyoto University and performed a series of intermediate to high slip velocity friction experiment with velocity stepping by using this apparatus. In this experiment, we used a pair of hollow cylindrical gabbro blocks with an inner-diameter of 26 mm and an outer-diameter of 40 mm, and changed the rotation rate of the servomotor in this apparatus from one value to another; hereinafter we call the former value *IRPM* and the difference value between the former and the latter *ΔRPM*, respectively. We selected all the combinations of *IRPM* and *ΔRPM* throughout this experiment: a value of *IRPM* of either 10, 20, 50 or 100 RPM, and a value of *ΔRPM* of either 30, 80, 150, 200, 300 or 400 RPM. This experiment was carried out under a constant normal stress of 1.5 MPa.

The friction response to the imposed slip velocity steps is characterized by two strength peaks and slip-weakening phases that follow each of the peaks. Typical behavior of the transient was observed in the tests conducted at an *IRPM* value of 20 RPM and a *ΔRPM* value of 200 RPM. Rotation rate overshoots the target value once and is converged to the value while oscillating because of high value of the speed loop gain integration time constant of the servomotor in this apparatus during this experiment. Considering this servomotor behavior, the first strength peak is reached while the rotation rate is accelerating, and the second peak is reached when the rotation rate reaches its peak value. Interestingly to note, the transient behavior of friction response recorded in this study is similar to those observed in friction melting experiments [e.g., Hirose and Shimamoto, 2005]. There are many kinds of friction constitutive law, but existing friction constitutive laws may not describe this behavior. A constitutive model for frictional sliding that is capable of describing the transient behavior observed at intermediate to high slip velocity tests in this study is required to be developed.

キーワード：摩擦実験、摩擦構成則、中-高すべり速度

Keywords: Friction experiment, Friction constitutive law, Intermediate to high slip velocity

沈み込み前後の海洋地殻物質の摩擦特性

Frictional properties of pre- and post-subducting oceanic basement rocks

小濱 賢¹、*北村 有迅²、堤 昭人³Ken Kohama¹, *Yujin Kitamura², Akito Tsutsumi³

1.鹿児島大学理学部地球環境科学科、2.鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻、3.京都大学大学院理学研究科

1.Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University,

2.Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering,

Kagoshima University, 3.Graduate School of Science, Kyoto University

On the faults in the subduction plate boundary, fault slips when the shear stress exceeds the strength of the rock interface between the hanging and footwall. Seismic slip is associated when the frictional strength decreases with the slip. The up-dip limit of the seismogenic zone coincides with the stepping down of the décollement to the oceanic basement. Seismogenic process is thought to undergo in the upper part of the oceanic crust (Kimura and Ludden, 1995; Bangs et al., 2009). Tectonic mélanges of the Shimanto belt which is formed along the plate boundary fault zone (Kitamura et al., 2005) contains basalts with cataclastic shear zones. To understand the seismogenic process, therefore, basalts are key material and it is essential to know their frictional properties. Here we performed frictional experiment on the basalts from pre-subduction drilled core in the Nankai trough and post-subduction outcrop in the Shimanto belt.

We performed friction experiments using the rotary shear, an intermediate to high velocity frictional testing apparatus in Kyoto University. Basalt samples were taken from IODP Expedition 333 Site C0012 as pre-subduction materials (C12G8R, C12G10R) and from the Mugi tectonic mélange as postsubduction material (MBN-3). We performed constant low velocity test with normal stress of 2 MPa and rotational speed of 0.012 r.p.m with all three samples, and velocity stepping test to evaluate the velocity dependence with two samples (C12G8R, MBN-3) with normal stresses of 2 MPa and 5 MPa.

Results of the constant low velocity test showed the steady frictional coefficient of C12G8R, C12G10R and MBN-3 ranging from 0.70 to 0.84 (average 0.76), from 0.60 to 0.79 (ave. 0.67) and from 0.50 to 0.63 (ave. 0.57), respectively. On the velocity stepping tests, C12G8R and MBN-3 with normal stress of 2 MPa showed neutral dependence of the friction coefficient to the velocity. But, C12G8R with normal stress of 5 MPa showed velocity strengthening behavior and MBN-3 with normal stress of 5 MPa showed velocity weakening behavior.

The constant low velocity tests revealed that the frictional coefficient of MBN-3 is lower than those of C12G8R/C12G10R. This implies that the post-subduction basalt is essentially weaker. From the results of velocity stepping tests, pre-subducting basalt (C12G8R) without preexisting gouge on the interface (5 MPa, menu 1) showed notable velocity strengthening. Other runs at 5 MPa are velocity neutral or strengthening. On the other hand, post subducting basalt (MBN-3) showed velocity weakening at 5 MPa, menu 1 and 2. These results suggest that the subducting oceanic crust progressively changes its frictional property that enables the rocks to be potent in seismogenesis may leading to the stepping down of the décollement to the oceanic basement at the up-dip limit of seismogenic zone.

Reference

BANGS, N. L. B., et al. Broad, weak regions of the Nankai Megathrust and implications for shallow coseismic slip. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284.1: 44-49.

KIMURA, Gaku; LUDDEN, John. Peeling oceanic crust in subduction zones. *Geology*, 1995, 23.3: 217-220.

KITAMURA, Yujin, et al. Mélange and its seismogenic roof décollement: a plate boundary fault rock in the subduction zone—an example from the Shimanto Belt, Japan. *Tectonics*, 2005, 24.5.

キーワード：南海トラフ、四万十帯、摩擦実験、玄武岩、速度弱化

Keywords: Nankai Trough, Shimanto Belt, Frictional experiment, basalt, velocity weakening

石英質岩の摩擦弱化過程における断層表面の状態変化

Evolution of fault surface state during frictional weakening of quartz rocks

*飯田 大貴¹、堤 昭人¹*Hirotaka Iida¹, Akito Tsutsumi¹

1. 京都大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Kyoto University

中-高速のすべり速度域において、摩擦溶融、thermal pressurization、flash heating等、高い摩擦熱を要因とするさまざまな摩擦強度弱化の機構が提唱されている。近年、ノヴァキュライトやクォーツアイトなどの石英質岩が、1 mm/s >という比較的低いすべり速度域において摩擦弱化を起こすことがGoldsby and Tullis [2002]、Di Toro et al. [2004]等によって報告され、摩擦発熱を必要としない弱化現象として注目を集めている。Goldsby and Tullis [2002]等は摩擦表面に形成される水和化非晶質シリカのガウジがこの弱化の原因であると説明したが、弱化開始時においてガウジが水和化、非晶質化を起こしていることは確認されていない。本研究では、弱化の進行に伴い摩擦表面でどのようなプロセスが進行するかを調べることを目的とし、摩擦表面の状態変化、表面に形成されるガウジの非晶質化の二点についてそれぞれ観察、分析を行った。実験は京都大学の回転式中-高速摩擦試験機を使用し行った。実験試料には人工水晶とチャートの二種類の試料を用いた。実験の垂直応力、すべり速度条件は、先行研究と摩擦データの比較を行うことを目的とし、Hayashi and Tsutsumi [2010]と同じ条件である、垂直応力1.5 MPa、すべり速度105 mm/s、10.5 mm/s、1.05 mm/sという値に設定した。実験の結果、人工水晶、チャートの両試料について、105 mm/s、10.5 mm/s、1.05 mm/sの速度条件で、実験開始直後にすべり距離に依存する摩擦のすべり弱化が確認された。また、両試料について、10.5 mm/s、1.05 mm/sの速度条件で、すべり弱化終了後に断層部の厚さ変化を伴う摩擦係数の変動が起こることが確認された。本研究での実験結果から得られたすべり弱化距離とHayashi and Tsutsumi [2010]で報告されたすべり弱化距離の比較を行ったところ、本研究でのすべり弱化距離の方が一桁以上小さいという結果が得られた。この差の原因は、本研究においてのみ実験準備の段階で行われた摩擦表面の片当たりの解消作業であると推定される。各速度において摩擦データを測定した他、105 mm/sの実験開始時のすべり弱化に注目し、弱化過程におけるいくつかのすべり距離で実験を終了し、実体顕微鏡、SEMによる摩擦表面の観察を行った。観察の結果、ほぼすべての試料の摩擦表面において、試料のせん断方向側がめくれ上がった100~300 μmほどの特徴的な非対称構造が形成されていることが確認された。XRD分析の結果、弱化後大変位せん断を経験したチャートにおいてのみ非晶質化を示す $2\theta=20\sim30^\circ$ に現れる幅広いピークが確認された。Hayashi and Tsutsumi [2010]のXRD分析では、弱化後に大変位せん断を経験したのものについて、人工水晶、チャートともに非晶質化が確認されている。本研究での結果はこれと異なる。Goldsby and Tullis [2002]は石英質岩の弱化の原因は摩擦表面に形成される水和化非晶質シリカのガウジであると説明している。本研究におけるXRD分析の結果から、すべり弱化中、弱化終了直後のすべり距離においてはガウジの非晶質化は起こっていない可能性が示された。

大型岩石試料のスティックスリップ試験中に発生した前震活動

Foreshock activity during stick-slip experiments of large rock samples

*辻村 優志¹、川方 裕則¹、福山 英一²、山下 太²、徐 世慶²、溝口 一生^{2,3}、滝沢 茂²、平野 史朗¹

*Yushi Tsujimura¹, Hironori Kawakata¹, Eiichi Fukuyama², Futoshi Yamashita², Shiqing Xu², Kazuo Mizoguchi^{2,3}, Shigeru Takizawa², Shiro Hirano¹

1.立命館大学、2.防災科学技術研究所、3.電力中央研究所

1.Ritsumeikan University, 2.NIED, 3.CRIEPI

For inland earthquakes such as the 2007 Noto Hanto earthquake (Doi and Kawakata, 2013) and the 2008 Iwate-Miyagi earthquake (Doi and Kawakata, 2012), foreshocks were reported to occur in the vicinity of main shock hypocenter. Moreover, for interplate earthquakes such as the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Kato, et al., 2012) and 2014 Iquique earthquake in Chile (Yagi et al., 2014), migration of foreshocks toward the main shock hypocenter was detected in one month before the main shock. In order to understand the generation mechanism of foreshocks, it is important to investigate under what environments foreshocks occur.

Since 2012, stick-slip experiments have been carried out using a large-scale biaxial friction apparatus at NIED (e.g., Fukuyama et al., 2014). Based on the experimental result that foreshocks were detected only in the later period of each run, Kawakata et al. (2014) suggested that the foreshocks occur only after the generation of gouge. In this study, we carried out a series of stick-slip experiments with and without pre-existing gouge along a fault plane to confirm if fault gouge affects the foreshock activity. When foreshocks are detected, we estimate the hypocenter locations of foreshocks.

We used two rectangular metagabbro blocks to make the simulated fault plane, whose dimension was 1500 mm long and 500 mm wide. The experiments were conducted under normal stress of 1.33 MPa and loading speed of 0.01 mm/s up to approximate slip amount of 8 mm. During each experiment, we continuously measured elastic waves to detect foreshocks. The sensor distribution is shown in the figure below. Gouge materials were prepared naturally during preceding experiments whose sliding speed was as high as 1 mm/s.

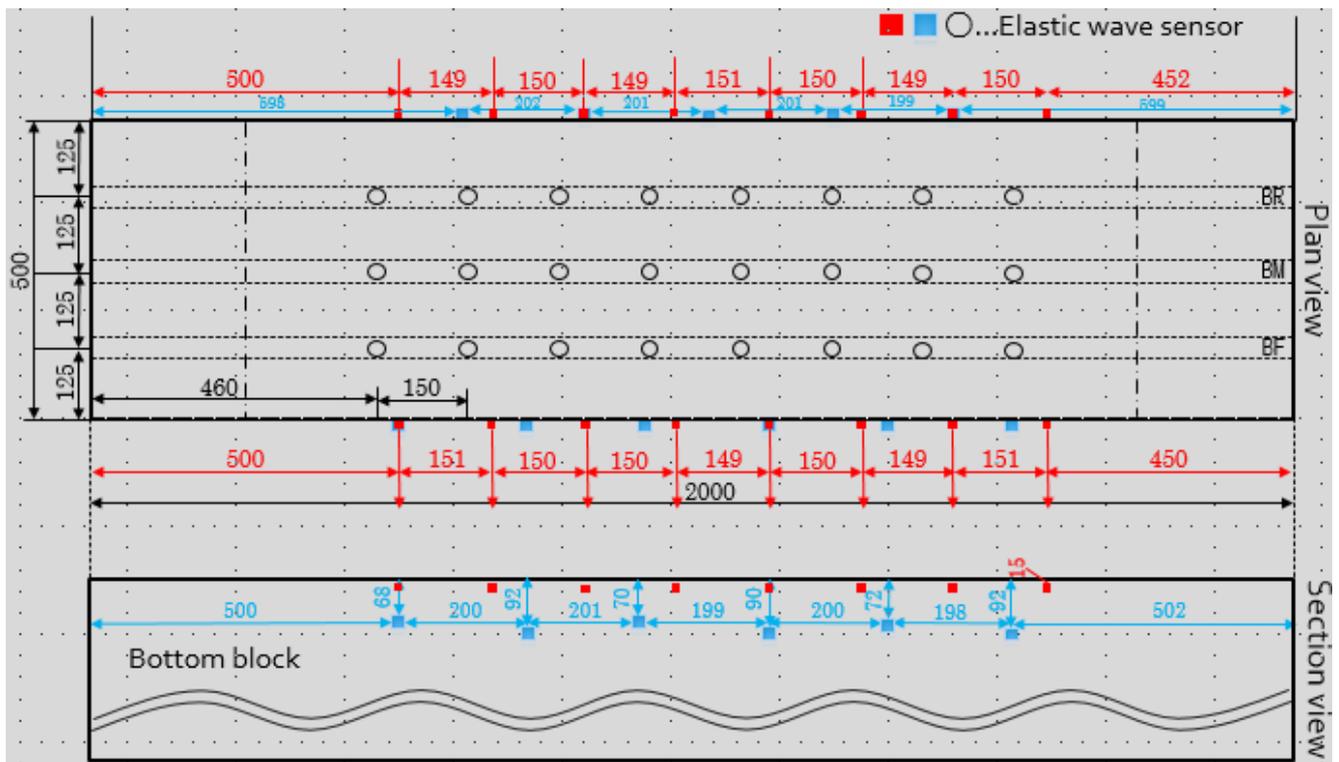
To roughly detect foreshock activity, we calculated cumulative amplitude of continuous waveform data every 0.01 seconds. During an experiment without pre-existing gouge materials (LB13-004), a few foreshocks were detected. On the other hand, during an experiment with pre-existing gouge materials (LB13-007), much more foreshocks were detected. Then we estimated hypocenters of foreshocks for a stick-slip event (event 44) in LB13-007. Although the initial phases of the main shock were contaminated due to the coda wave signals of preceding foreshocks, the hypocenter of the main shock was roughly estimated near the right end of the fault plane. Foreshocks began to occur in the left half of the fault plane, but most of later foreshocks occurred near the right end. Therefore, we confirmed that foreshock activity was high when gouge materials were present along a fault plane, and found a similar hypocenter migration of foreshocks toward the main shock hypocenter, which was reported for interplate earthquakes.

In the future, we shall examine the data obtained from other experiments to confirm if the aforementioned features are common.

Acknowledgments: This work was supported by NIED research project "Development of monitoring and forecasting technology for crustal activity" and JSPS KAKENHI Grant Number 23340131.

キーワード：大型二軸せん断実験、前震活動、断層ガウジ

Keywords: large-scale biaxial experiments, foreshock activity, fault gouge



間隙水圧一定条件下の大変位剪断摩擦実験におけるスメクタイトを含むガウジの摩擦性質
Frictional behavior of smectite-bearing fault gouges in large displacement frictional experiments under constant pore pressure

河合 智章¹、*堤 昭人¹

Tomoaki Kawai¹, *Akito Tsutsumi¹

1.Graduate School of Science, Kyoto University

1.Graduate School of Science, Kyoto University

Frictional properties of smectite-bearing material at large displacements should provide valuable information for the stability of slip in the shallow parts of subduction zone faults. However, most of the previous experiments are limited by the amount of displacement that can be achieved and the frictional behavior at large displacements remains poorly understood. In this study, we have conducted large displacement friction experiments on mixtures of montmorillonite and quartz at constant pore pressure. Our purpose of this study is to investigate the correlations between gouge textures and frictional velocity dependence of smectite-bearing faults.

We examined frictional behavior and internal textures of simulated gouge samples composed of montmorillonite/quartz mixtures. Two different compositions of the gouges were tested: mixtures of montmorillonite/quartz = 20/80 (abbreviated as Mnt20/Qtz80) and 40/60 wt% (Mnt40/Qtz60), respectively. We sheared the gouges in rotary shear to displacements of more than 1 m at a normal stress of 10 MPa and at a constant pore pressure of 5 MPa. During the shearing, these gouges were subjected to velocity step changes to examine the velocity dependence of friction for a range of slip velocities v from 0.003 to 0.3 mm/s.

Results of the experiments reveal influences of the composition, displacements and slip velocities on the frictional behavior. Both Mnt20/Qtz80 and Mnt40/Qtz60 gouges show slip-hardening behavior. Positive friction velocity dependence was observed in both gouges at short displacement for all the tested slip velocities. At large displacement ($v > 30$ mm), Mnt20/Qtz80 gouge shows negative friction velocity dependence for all the tested slip velocities. On the contrary, friction of Mnt40/Qtz60 gouge exhibits negative velocity dependence for lower velocities (0.003 mm/s to 0.03 mm/s) and positive velocity dependence for higher velocity stepping (0.03 mm/s to 0.3 mm/s). The SEM observation of the Mnt20/Qtz80 gouge reveals that montmorillonite particles are agglomerated initially to form montmorillonite-filled matrix domains. With continued displacement, the agglomerated distribution of montmorillonite becomes to be disaggregated; eventually the montmorillonite particles are incorporated into the fine-grained matrix of the gouge. Grain size of quartz decreases with displacement, during which change the grain shape of the quartz becomes to be more rounded. It appears that increasing degree of size reduction of quartz grains and a more scatter distribution of montmorillonite particles correlate with a more negative velocity dependence of friction.

キーワード：摩擦速度依存性、モンモリロナイト、大変位

Keywords: velocity dependence of friction, montmorillonite, large displacements

シュードタキライト黒色化の実験的検証

Experimental demonstration for blackening of pseudotachylyte

*中野 友貴¹、金木 俊也¹、廣野 哲朗¹

*Yuki Nakano¹, Shunya Kaneki¹, Tetsuro Hirono¹

1.大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science Osaka University

地震時の摩擦溶融によって形成されると考えられるシュードタキライトは、黒色だけでなく緑黒色および灰黒色を呈することもある。その色の原因は、鉱物組成や断層の滑りパラメータ（温度など）および環境条件に関係すると考えられるが、それらの関連性はほとんど研究されていない。そこで、本研究では、石英・アルバイト・黒雲母・緑泥石を用いた人工試料を準備し、高温加熱炉にて、シュードタキライト生成の模擬実験を実施した。その結果、1300°C加熱させた石英とアルバイトの混合試料では有意な黒色化を示さなかったのに対し、黒雲母10 wt.%および（もしくは）緑泥石10 wt.%を混合させた試料では、顕著な黒色化を呈した。実験試料のSEM-EDS観察の結果、鉄を含む鉱物の存在が黒色化に大きく寄与していると推定される。

キーワード：シュードタキライト、黒色化

Keywords: pseudotachylyte, blackening

下部地殻の塑性領域におけるシュードタキライトの形成：中央オーストラリアWoodroffe衝上断層からの証拠

Formation of pseudotachylyte in the lower crust plastic regimes: Evidence from the Woodroffe thrust, central Australia

*佐津川 貴子¹、林 愛明¹

*Takako Satsukawa¹, Aiming Lin¹

1.京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物理学教室

1.Department of Geophysics, Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University

Most reported fault-related pseudotachylytes are cataclasite-related, which have formed at shallow depths in brittle dominated seismogenic fault zones by both frictional melting and crushing mechanisms. Pseudotachylyte has also been described in association with mylonitic rocks having formed in deep-level fault shear zones within the semi-brittle to crystal-plastic regimes. However, the mechanism of coseismic shear zone formation in the lower crust is still poorly understood. A >3.0 km-wide pseudotachylyte generation zone including a 1.5 km-wide mylonitized shear zone marked by large volumes of sub-mm- to cm-scale pseudotachylyte veins is developed along the Woodroffe thrust (central Australia) (Lin et al., 2005; Lin, 2008). The pseudotachylytes display typical melt-origin features, including rounded and embayed clasts, spherulitic and dendritic microlites, and flow structures within a fine-grained matrix. Three types of pseudotachylyte are identified on the basis of deformation texture, vein morphology, and host rock lithology: cataclasite-related (C-Pt), mylonite-related (M-Pt), and ultramylonite-related (Um-Pt). The textural and structural relationships between these pseudotachylyte veins and wall rocks indicate multiple stages of pseudotachylyte veins that formed at different times and depths.

Preliminary works have been performed by Lin et al. (2005) and Lin (2008), which have reported large volumes of coexisting C-Pt, M-Pt, and Um-Pt in cataclastic and mylonitic rocks within individual shear zones along the Woodroffe thrust. The M-Pt and Um-Pt veins contain distinct evidence of ductile deformation, including flattened and aligned fragments of host rocks that were re-oriented parallel to the foliation within the mylonite and ultramylonite, as evidenced from the continuity of the foliation between the host rock and vein fragments. These M-Pt and Um-Pt veins generally cut across the mylonitic foliation, and can locally be traced back to parent veins oriented parallel to the mylonitic foliation. These overprinting structural relationships indicate that repeated pseudotachylyte-generating events occurred within the crystal-plastic dominated shear zone and that the pseudotachylyte veins themselves were mylonitized during ongoing plastic deformation. Here, we describe the microstructural and chemical characteristics of pseudotachylytes and discuss the processes leading to coseismic shear zone formation in the lower crust.

References:

Lin, A. et al., 2005, Propagation of seismic slip from brittle to ductile crust: Evidence from pseudotachylyte of the Woodroffe thrust, central Australia. *Tectonophysics* 402, 21-35.

Lin, A., 2008. Seismic slip in the lower crust, inferred from granulite-related pseudotachylyte in the Woodroffe thrust, central Australia. *Pure and Applied Geophysics*, 165, 215-233.

キーワード：シュードタキライト、マイロナイト、ウルトラマイロナイト

Keywords: pseudotachylyte, mylonite, ultramylonite

和歌山県日高川層群に発達する過去のプレート境界断層の構造地質学的・鉱物学的特徴
Structural and mineralogical characteristics of an ancient plate boundary fault in the
Hidakagawa Formation, Kii Peninsula, Japan

*小川 文彰¹、加藤 尚希¹、土野池 直哉¹、朝山 暁¹、金木 俊也¹、中野 友貴¹、廣野 哲朗¹

*Takeaki Ogawa¹, Naoki Kato¹, Naoya Tonoike¹, Satoru Asayama¹, Shunya Kaneki¹, Yuki Nakano¹, Tetsuro Hirono¹

1.大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

プレート沈み込み巨大地震の滑り挙動を解明するために、四国四万十帯を初め、多くの付加体にて、そこに発達する過去のプレート境界断層の様々な調査が実施されている。しかし、紀伊半島西岸では、層序学的・変形構造区分などの調査は実施されているが、断層岩の分析は未だ実施されていない。そこで、本研究では和歌山県四万十帯日高川層群三尾地域に分布するメランジユニットに着目し、フィールド現地での地質図と変形構造区分図の作成、断層試料の微小構造観察と鉱物組成定量分析を実施した。

その結果、露頭にて高い直線性を持つ断層の滑り面において、鉱物粒子の細粒化、葉状構造、溶融の痕跡、鉱物組成の有意な変化が確認された。これらより、この滑り面は非常に強い剪断と高温を経験していると考えられる。周囲の母岩の最高履歴温度の情報についてはまだ分析中であるため、断層の温度上昇量を見積もることは出来ないが、今後は、分析を進め、地震時の滑りパラメータの定量的推定を目指したい。

キーワード：プレート境界断層、付加体、南海トラフ

Keywords: plate boundary fault, accretionary prism, Nankai trough

島根県中部群発微小地震分布域に見られる断層系の分布とその特徴

Distribution and characters of fault system in micro earthquake swarm area in central part of the Shimane Prefecture, southwest Japan

*向吉 秀樹¹、武島 正幸

*Hideki Mukoyoshi¹, Masayuki Takeshima

1. 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域

1. Department of Geoscience Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University

島根県中部三瓶山周辺から広島県三次市にかけて、1950年頃から現在にかけてマグニチュード(M) 5クラスの地震が6回発生している。この地域では近年においても、地震活動に伴うとされる無感地震が数多く観測されている。この群発微小地震は、2000年鳥取県西部地震(M 7.3)の余震分布とほぼ平行に北西方向に帯状に分布する。この帯状に分布する群発微小地震は、伏在する活断層の存在を示している可能性が高いと考えられる。しかし、この地域においてこれまでに活断層の報告はなされておらず、また、微小地震の分布と地質学的背景との関係についても明らかにはされていない。そこで本研究では、島根県中部群発微小地震分布域の1地域である、島根県飯南町獅子周辺において地表地質踏査を行い、微小地震分布域周辺における地質構造および断層系の分布の把握、それらの断層岩の特徴を明らかにすることを目的として調査を行った。

本調査地域には古第三紀の赤名花崗閃緑岩および石見花崗岩、八神火山岩類(服部ほか, 1983)が分布する。赤名花崗閃緑岩および石見花崗岩中には、これらを貫く玄武岩~安山岩質岩脈、流紋岩質~アプライト質の岩脈がよく発達する。

調査の結果、100本を超える断層が調査範囲において確認された。断層の姿勢は大きく北東走向高角北傾斜と西北西走向高角南傾斜の2方向に分けられる。北東走向高角北傾斜の断層は、赤名花崗閃緑岩と石見花崗岩を境する断層をはじめ、花崗岩類と岩脈との境界部など岩相境界に発達するものが多い。断層には厚さ数 mm~数10 cmの白色、淡緑色、褐色の断層ガウジを挟む。一部の断層においては、厚さ数10 cm~数 mのカタクレサイトを伴うものも見られる。特に赤名花崗閃緑岩と石見花崗岩を境する断層は、厚さ約10 cmの淡緑色の断層ガウジ、厚さ数約1mのカタクレサイト、赤名花崗閃緑岩および石見花崗岩の数10 cm~1 m程度の岩片を含む幅約20 mの変形・変質帯からなる。変質帯中には部分的に酸性岩の岩脈が見られる箇所があるが、岩脈には破砕や変形などの構造は見られない。一方、西北西走向高角南傾斜の断層は、花崗岩類と岩脈姿勢に関係なく、岩脈を切って発達するものが多い。また、断層中にカタクレサイトは含まれておらず、厚さ数 mm~数 cmの白色、淡緑色、褐色の断層ガウジを挟むという特徴を持つ。

本調査で確認された断層のうち、北東走向の断層は厚い断層ガウジやカタクレサイトを伴い、全般的に規模が大きい。しかし、その姿勢は群発地震の分布の方向とは異なっている。また、変形・変質帯内に貫入する貫入岩に破砕や変形も見られない。このことから、これらの断層は花崗岩類貫入後の古い地質時代に形成されたものであり、現在の応力場で形成されたものではないと考えられる。一方、西北西走向の断層については、岩相境界や貫入岩の姿勢と無関係に発達している。また、ほとんどの断層が厚さ数 mm~数 cm程度の薄い断層ガウジを伴っている。この断層の姿勢および断層ガウジの産状は、2000年鳥取県西部地震の余震域に見られる西北西走向の断層の特徴と非常に類似している(小林ほか, 2003; 相澤ほか, 2006)。この西北西走向の断層の分布については、2000年鳥取県西部地震の断層においては、断層が未発達の段階にあり、北西走向の深部断層の左横ずれの断層活動に伴い、右雁行する小規模なリーデル剪断面(R1面)が地表に現れたものと解釈されている。(井上ほか, 2002; 小林ほか, 2003など)。本調査地域に見られる西北西走向の断層も、断層ガウジの規模、地震分布と断層の走向の関係から、現在の応力場において、地表付近で形成された小規模なR1面に該当する可能性がある。

島根県中部の群発地震発生域における地質踏査および断層岩の記載より、群発地震発生域に北東走向と西南西走向の2種類の断層系が発達することが明らかとなった。このうち北東走向の断層は古い地質時代に形成されたものであると考えられる。また、西北西走向の断層は、現在の応力場に近い場所で形成された発達段階初期の小規模な断層群を見ている可能性がある。今後、より広範囲な地質踏査による断層分布の解明と、断層の構造

解析により、本調査地域周辺で観測される群発微小地震と地表で見られる断層の関係について明らかになると考えられる。