

繰り返し地震群に対する時空間更新過程モデルとプレート境界における準静的すべりの時空間解析 Spatio-temporal renewal model for repeating earthquakes and analysis of slip rate on plate boundaries

野村 俊一^{1*}, 尾形 良彦¹, Robert M Nadeau², 内田 直希³
Shunichi Nomura^{1*}, Yoshihiko Ogata¹, NADEAU, Robert M.², Naoki Uchida³

¹ 統計数理研究所, ²University of California, Berkeley, ³ 東北大学大学院理学研究科

¹The Institute of Statistical Mathematics, ²University of California, Berkeley, ³Graduate School of Science, Tohoku University

本研究では、プレート境界に点在する繰り返し地震データから準静的すべりの加速・減速の時空間変動を推定するための、BPT 分布更新過程をベースとした時空間確率モデルを提案する。

BPT 分布更新過程は地震の弾性反撥説から繰り返し地震の発生間隔が独立に同一分布に従うと仮定する確率モデルであり、プレート境界や内陸活断層で発生する大地震の長期確率予測に用いられている。このモデルは大地震に限らず、プレート境界面の同じアスペリティで繰り返される小規模地震にも当てはまると考えられるが、小規模の繰り返し地震の場合、その発生間隔はアスペリティ周辺のすべりの加速・減速に強く影響を受けるため、更新過程の定常性が崩れてしまう。

そこで、繰り返し地震の発生間隔を震源近傍のすべり速度に連動（反比例）させる非定常な更新過程を考え、尤度最大化によりすべり速度の時空間的变化を推定する。空間位置と時間によるすべり速度の連続的な変化を3次元B - スプライン関数で表現し、過剰適合を避けるために時間変動や空間変動の平滑性について制約を設定し、赤池ベイズ情報量規準 (ABIC) 最小化を用いて最良モデルの選択を行う。すべり速度の導出には、Nadeau and Johnson (1998) のマグニチュードとすべり量との関係式を利用して、繰り返し地震のマグニチュードと発生間隔から推定する。

発表では提案モデルをカリフォルニア州 San Andreas 断層の Parkfield セグメントの小繰り返し地震群データに適用した解析結果を紹介する。1993 年頃からのすべり加速の時間推移、M4 台の地震による余効すべりなどを繰り返し地震の解析結果から読み取ることができる。また、2004 年 9 月 28 日の地震 (M6.0) 後に余震活動が現れているが、大森宇津公式に当てはめて時間変換を行うと地震の発生間隔に強い周期性が現れ、余震減衰の様子の時空間的变化を確認することができる。

提案モデルは、GPS で直接観測できない断層深部のすべり推定において特に有用と考えられる。繰り返し地震を観測できない大地震時のコサイスマックなすべりは把握できないものの、スロースリップや地震活動静穏化、大地震後の余効すべりなど地震前後の特徴的な変化を可視化し、モニタリングすることができる。

キーワード: 繰り返し地震, 滑り速度, 時空間解析, 更新過程

Keywords: repeating earthquake, slip rate, spatio-temporal analysis, renewal process

深発地震に伴う太平洋プレート沈み込みの一時的な加速 Temporal acceleration of the Pacific Plate subduction by a deep earthquake

日置 幸介^{1*}, 三井 雄太¹
Kosuke Heki^{1*}, Yuta Mitsui¹

¹ 北海道大学 理学研究院 自然史科学

¹Dept. Natural History Sci., Hokkaido University

2003年十勝沖地震(Mw8.0)と2011年東北沖地震(Mw9.0)に同期して、破壊したセグメントの隣接セグメント上にあるGPS点の陸向き速度が増加することが見いだされた。また海上保安庁の海底測地観測から、東北沖地震後の宮城沖海底GPS点が年間30cmに及ぶ高速で陸向きに動いていることがわかった。これらの観測事実から我々は、プレート間地震の発生に伴ってスラブの沈み込みが加速されるという仮説を提唱した(Heki and Mitsui, EPSL 2013)。なお加速された結果、スラブの沈み込み速度はそれぞれの地震後で地質学的な平均速度の約1.5倍と約3倍程度に達したと思われる。

通常はスラブに働く上向きの力(側面での粘性抵抗とプレート間の固着)と下向きの力(スラブに働く重力と海嶺の押し)が均衡を保ちながらほぼ一定速度の沈み込みが実現している(瀬野, 2001)。プレート間地震の発生に伴う固着の局所的な減少は、スラブに働く力の均衡を崩して一時的に下向きの力が強い状態を実現する。その結果スラブが下方に加速すると同時に、加速による粘性抵抗の増加で新たな力の均衡に遷移するのだろう。なお沈み込みの加速は一時的なものであり、固着の回復とともに再び地質学的な平均速度に戻ると考えられる。

沈み込むスラブの深部では、プレート間巨大地震後にDown-dip方向に圧縮軸を持つ地震活動が活発化するらしい(Lay et al., PEPI 1989)。これはスラブの加速に伴う先端抵抗の増大を反映しているのだろう。東北沖地震から一年半ほど経過した2012年8月14日に、サハリンの下にある太平洋プレートスラブの先端近くでMw7.7の深発地震が発生した。このような大きな深発地震も、プレート間地震のように、スラブの沈み込み速度に影響を与えるのだろうか。Heki and Mitsui (2013)のFig.5で示されるように、東北沖地震後の北海道東部のGPS局は、スラブ加速を反映していずれも陸向き速度の増大が見られる。今回、それらが2012年8月の深発地震に同期してさらに加速されたことを見出したので報告する。

添付の図は、GPS連続観測網GEONETのF3解に基づく、北海道根室、浜中、斜里、別海、釧路市のGPS点の海溝向き(N150E)の2007年から2013までの動きである。2011年以降のトレンドの変化を見やすくするため、2008.0から東北沖地震までの期間の時系列から推定された直線成分を除去した。地震に伴う数cmのステップとともに、負のトレンド変化(陸向きの加速)が顕著である。そこにはアフタースリップに見られるような短い時定数でのdecayはわずかしか見られず、トレンドの変化は太平洋プレート沈み込みの加速を反映したものだ。陸向きの動きは2012年半ばにはやや減速したかに見えるが、縦線で示した2012年8/14の地震の発生に伴って、陸向きの動きがさらに加速されている(負の傾きが強くなっている)ことがわかる。

スラブ先端部で発生したDown-dip compressionの地震は、スラブ加速によって増加した先端抵抗を幾分緩和するだろう。これはプレート間地震の発生と同様に上向きの力の減少をもたらす、一時的に上回った下向きの力はスラブ沈み込みを加速するだろう。それが地上GPS局の動きに、見かけ上の固着増加として現れたのだろう。ここでは以下のシナリオを考えた。(1)2011年東北沖地震で太平洋プレートのスラブ上面がdown-dip方向に数十メートル動いたが、それに伴って断層のdown-dip側にあるスラブ内に生じた圧縮応力が、スラブ表面の薄層の粘性抵抗を受けながら深さ500kmの深部までゆっくりと拡散した、(2)スラブ先端部で増加したdown-dip圧縮応力はスラブ加速にブレーキをかけるとともに深発地震を発生させた、(3)深発地震に伴うdown-dip応力の緩和が浅部まで再び拡散して滞り始めていたスラブの高速運動を再開させた。講演ではこれらの過程をある程度定量的に議論する。

図の説明:2007年以降の斜里、別海、根室、浜中、釧路市(北海道)GPS局の、海溝向き(N150E)の動き。2008/1/1から2011/3/11までの部分から推定した直線成分を差し引いてある。2011年地震に同期した陸向き(右下がり)の動きの増大は2012年に入ってやや収まりかけたが、2012/8/14の深発地震を機に再び加速したことがわかる。それぞれの地震後の時系列は対数関数を用いてモデル化し、時定数は0.4年と1.0年にとっている。

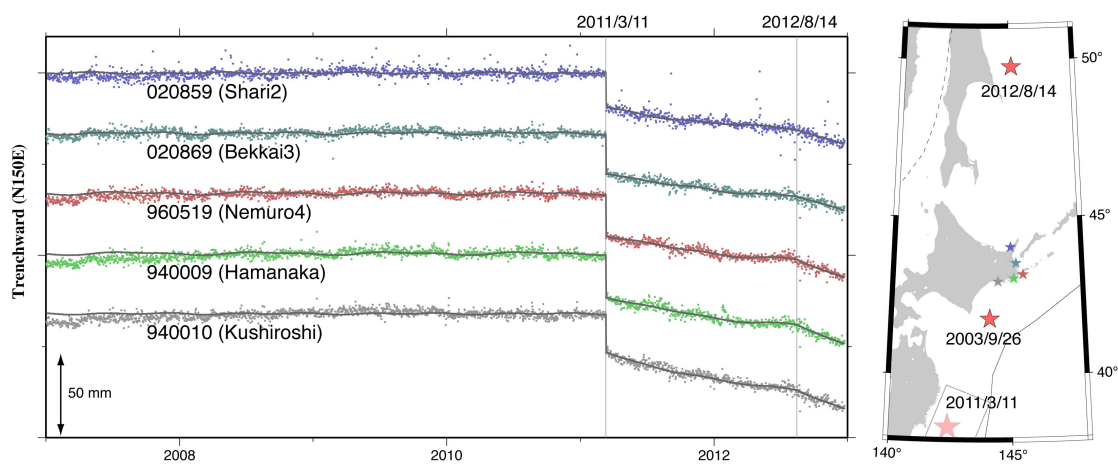
キーワード:太平洋プレート, 加速, 深発地震, GPS, 地殻変動, 北海道

Keywords: Pacific Plate, acceleration, deep earthquake, GPS, crustal deformation, Hokkaido

SCG66-02

会場:201A

時間:5月24日 09:15-09:30



南海道地震に伴う地盤変動：太平洋及び瀬戸内海沿岸の隆起・沈降 Crustal movement associated with Nankaido earthquakes

中西 一郎^{1*}

Ichiro Nakanishi^{1*}

¹ 京都大学 理学部 地球物理学教室

¹Dept. Geophysics Kyoto University

地震発生に伴う地盤変動（隆起・沈降）は日常生活への影響が大きく、目視できることから、歴史史料に記録されることが予想される。海岸線の変化とそれによる村落の移転が絵図に描かれることもある。沈降域では、台風による高潮被害が地震後に大きくなることが考えられる。隆起・沈降が弾性論に従って発生する場合、津波の海岸への来襲時にはすでに隆起・沈降が発生しており、見掛け（実質的）津波高にも影響を与える。隆起・沈降はその後回復することもあり、復興計画に影響を与える。

鷺坂（1949）は、武者金吉による文献調査の援助を得て、「歴史時代における四国地方の地殻変動について（第一報）」と題する報告を書いた。河角（1956）は、昭和、安政、宝永の地震に伴う四国・紀伊・東海地域の隆起・沈降について報告した。河角の図は多くの文献に引用されている。しかし、安政・宝永に関しては、いくつか問題がある（1）武者史料が使われたと思われるが、用いた史料名は記されていない（2）解析手法について説明がされていない（3）隆起・沈降量は1951年（昭和26年）以前に求められたと思われる記述がある。60年以上経過しており、新たな史料を解析して隆起・沈降量を推定することが可能である（4）昭和南海地震に対しては隆起・沈降の回復の測定結果を示しているが、安政・宝永地震に対しては回復の推定が行われていない。

都司（1988）は、安政南海地震に伴う高知県全域と徳島県北部域の太平洋沿岸の地盤変動を調査した。宇佐美・上田（1990）は、安政南海地震後2年間にわたる高知市浦戸湾岸の水面変動を調査した。中西・露木（2012）は、安政南海地震後3年間にわたる高知市・南国市の地盤変動を調査した。宇佐美・上田及び中西・露木の結果は、高知市の地盤沈下は短期間で回復することを示した。

昭和南海地震では、太平洋沿岸だけではなく瀬戸内海沿岸でも1m近い沈降が生じた。今回の調査でも瀬戸内海沿岸も調査対象地域にしている。

高知市・南国市に関しては、中西・露木が用いた史料及び宇佐美・上田が用いた史料を再度調査した。地盤変動の時間変化まで調べるには長期間にわたる史料を調査する必要があり、地震史料集中で「中略」と書かれ解読文の無いところも解読する必要があり、全文を解読した。また浸水域を精度良く推定するには史料中の地点（特に、小字、堤）の位置を現在の地形図上にプロットすることが必要である。津波も高潮と書かれる可能性があり、大きな余震及び広域的高潮（大きな台風）に注意することが重要になる。

高知市・南国市に加えて、次の地域（地震）に関する南海道地震による地盤変動の時間変化を調査している（1）高知市（宝永）（2）高松市（安政）（3）西条市（安政）。

鷺坂（1949）、河角（1956）の所在をお教え下さった津村建四朗氏、松尾裕治氏に感謝いたします。

キーワード: 南海道地震, 地殻変動, 四国地方

Keywords: Nankaido earthquakes, crustal movement, Shikoku region

徳之島の琉球層群からなる段丘群から示唆される海溝型超巨大地震 Marine terraces composed of the Ryukyu Group, Tokuno-shima island, induced mega earthquakes

遅沢 壮一^{1*}, 田中浩紀²

Soichi Osozawa^{1*}, Hiroki Tanaka²

¹ 東北大学理学研究科地学専攻, ² 千葉県立東金高等学校

¹Department of Earth Sciences, Graduate School of Science, Tohoku University, ²Togane High School

2014年の地質学会鹿児島大会で、徳之島の巡検案内を希望している。

徳之島の地質は、喜界島などと併せて、昆虫DNAニュースレター No.17 に、カラー地質図付きで報告してある。

沖縄トラフの本格的な拡大前に、リフティングが起き、正断層が生じる。琉球弧には、北東?南西の正断層が発達している。琉球の正断層はリストラックで、シーソーに例えれば、支点を境に、沈む場合と、浮かぶ場合が起き、シーソー自体は沈む方向に傾く。海面下に沈んだ場合、その凹みには海成層が堆積する。陸上に浮かんだ場合、海食崖が出来る。拡大時にはプレート沈み込みの支えが少なくなるので、シーソー自体も沈降し、それまでの陸地も標高のある山地を除いて、海面下になり、島となる。島となった時期=沖縄トラフのリフティングの開始時期であるが、それは凹みを埋めた海成層の年代である。この年代は含まれる石灰質ナンノ化石から推定できる。また、貝殻化石のSr同位体年代も、直接得ることができる。この年代は、吐?喇列島を除いて、 $1.55 \pm 0.15\text{Ma}$ であった。ところが、段丘の形成、つまり全体としての隆起は、これら正断層活動では説明できず、逆断層形成を考慮したシーソーモデルの構築、改良が必要である。

徳之島の第四系地質は、段丘と層序区分を対応させた中川(1967)が基本的に正しい。山田ほか(2003)は、珊瑚礁堆積モデルを適用して新たな層序を提唱したが、段丘を無視している。

高位段丘構成層である糸木名層は基盤からなる山地を取り巻いて分布していて、浸食された基盤平坦面と山腹にアバットしている。基底は海成シルト岩と砂礫岩で、上位に結晶質の珊瑚石灰岩、ボーリング資料では、さらに上位に砂礫岩、珊瑚石灰岩が乗っている(沈降)。これらの層序は沖縄本島的那覇層の層序(遅沢・渡邊2011)に一致している。海成シルト岩の堆積時期に、海は島を取り巻くように入っており、この時、徳之島は、現在の山地のみを海面上に出した島となった。海成シルト岩の年代は含まれる石灰質ナンノ化石から推定でき、*Gephyrocapsa caribbeanica*, *G. oceanica*に加えて、この時代に特徴的な *Calcidiscus macintyreii* (これもインデックス)を含むことから(再検討した結果である)、年代も他の島と共通して、 $1.55 \pm 0.15\text{Ma}$ である。上位の珊瑚石灰岩の堆積面である糸木名段丘は、徳之島の南東と北西側に想定される、それぞれ南東側落ちの正断層によって、北西に傾いている。

北西に傾いた徳之島は、その後、隆起して、周囲を浸食されて、基盤と糸木名層からなる海食崖(直ちに、段丘崖に進化)と、より低所の基盤からなる海食台を形成し、これにアバットして、次の木之香層が堆積した。島の北西側で、沈下した古い糸木名段丘は、ほぼ水平に、新たに堆積した木之香段丘構成層に覆われている。木之香層は下位の厚い海成砂礫岩と、上位の石灰藻球石灰岩からなっている。砂礫岩は現在の海岸近くでは、珊瑚石灰岩を挟んでいる。木之香層の石灰岩で、石灰岩基質の円礫岩は良好な鍵層となっている。木之香層の年代は不明であるが、喜界島の湾層との対比から、 $0.92 \pm 0.07\text{Ma}$ 程度と考えられる。より正確な年代を知るため、軟体動物化石殻のSr同位体年代を測定中である。木之香層の石灰岩は徳之島空港付近では、沖積層下に没し、砂礫岩も島の北部では分布が少ない。木之香段丘も、ごく緩く北西に傾いていて、かつ、島の北部では浸食されている。沖縄本島では、木之香段丘相当の段丘は欠落している。

徳之島はさらに隆起して、木之香層は木之香段丘となった(糸木名段丘も一緒に隆起)。海岸付近には、新たに、亀津層が堆積し、標高20m以下の亀津段丘を成した。亀津層は、徳之島南端にのみ小分布し、古土壌化した木之香層を不整合に覆っており、腕足類化石で特徴付けられる石灰質砂岩からなる。亀津層は沖縄本島の港川層(遅沢・渡邊2011)に対比できる。亀津層についても、Sr年代を測定中である。

海成段丘は3段有るが、正断層は全体としては沈降を伴うので、系全体の大規模隆起が必要な、段丘を形成することはできない。3度の、それぞれが数10m以上の隆起のためには、3度の大規模な逆断層形成が必要であった。また、断層が逆断層である場合のシーソーの支点は、徳之島より北西側にある必要がある。南西側だと、東北大地震のように、沈降してしまう。逆断層運動は巨大な海溝型地震と津波を伴ったはずである。この巨大地震は、数10万年毎に、少なくとも3度起こった。沖縄トラフの拡大フェイズの正断層形成と沈降は、このような逆断層形成と、交互に起こっている。つまり、琉球では、引張と圧縮テクトニクスが交互に起こっている。

キーワード: 徳之島、琉球層群・石灰岩、1.5Ma 糸木名層と高位段丘、木之香層と中位段丘、亀津層と低位段丘、正断層による沈降、逆断層による隆起、超巨大地震

Keywords: Tokuno-shima island, Ryukyu Group, 1.5 Ma Itokina Formation and higher terrace, Kinoko Formation and middle terrace, Kanetsu Formation and lower terrace, subsidence by normal faulting, uplift by reverse faulting, associated mega earthquake

Stress states and physical properties along the Nankai Trough plate boundary Stress states and physical properties along the Nankai Trough plate boundary

北島 弘子^{1*}, Demian Saffer²

Hiroko Kitajima^{1*}, Demian Saffer²

¹ 独立行政法人産業技術総合研究所, ²The Pennsylvania State University

¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ²The Pennsylvania State University

Recent seismic reflection and ocean bottom seismometer (OBS) studies reveal broad regions of low seismic velocity along the megathrust plate boundary of the Nankai subduction zone offshore SW Japan. These low velocity zones (LVZs) extend to ~55 km from the trench, corresponding to depths of >~10 km below sea floor. Elevated pore pressure has been invoked as one potential cause of both the LVZs and very low frequency earthquakes (VLFE) in the outer forearc. Here, we estimate the in-situ pore fluid pressure and stress state within these LVZs by combining P-wave velocities (V_p) obtained from seismic reflection and OBS data with well-constrained empirical relations between (1) P-wave velocity and porosity; and (2) porosity and effective mean and differential stresses, defined by triaxial deformation tests on drill core samples of the incoming oceanic sediment. We used cores of Lower Shikoku Basin (LSB) hemipelagic mudstone (322-C0011B-19R-5, initial porosity of 43%), and Middle Shikoku Basin (MSB) tuffaceous sandstone (333-C0011D-51X-2, initial porosity of 46%) that have been recovered from IODP Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment (NanTroSEIZE) Site C0011 (~20 km seaward from the deformation front). Samples were loaded under a range of different stress paths including isotropic loading, triaxial compression, and triaxial extension. During the tests, all pressures, axial displacement, and pore volume change were continuously monitored; and ultrasonic velocity and permeability were measured at regular intervals.

The relationship between P-wave velocity and porosity for both LSB mudstone and MSB sandstone is independent of stress path, and is well fit by an empirical function derived by Hoffman and Tobin [2004] for LSB sediments sampled by drilling along Muroto transect, located ~150 km southwest of the NanTroSEIZE study area. The MSB sandstone exhibits slightly higher P-wave velocity and higher permeability than LSB mudstone at a given porosity.

Based on our experimental results, and assuming that the sediments in the LVZs are at shear failure defined by a critical state stress condition, we estimate that effective vertical stress in the LVZ ranges from 15 MPa at 13 km landward of the trench, to 41 MPa at a distance of 55 km. The maximum horizontal effective stress ranges from 41-124 MPa over this region. Excess pore fluid pressure ranges from 15-81 MPa, corresponding to modified pore pressure ratios, λ^* of 0.44-0.73. If LVZ is composed dominantly of sandstones, both the effective vertical and horizontal stresses would be lower, and the excess pore pressure would be higher, with pore pressure ratios $\lambda^* = 0.31-0.90$. Our results suggest that the sediments have been loaded under poorly drained conditions, and that pore fluids support ~53-91 % of the overburden stress along the base of the accretionary wedge across the outer forearc. The low effective stress should lead to a mechanically weak plate boundary, and is spatially correlated with well-located low-frequency earthquakes in the outer accretionary wedge. The heterogeneous distribution of inferred pore pressure also suggests that fluid sources and drainage are localized and possibly transient.

キーワード: subduction zone, IODP, NanTroSEIZE, pore pressure, low frequency earthquake

Keywords: subduction zone, IODP, NanTroSEIZE, pore pressure, low frequency earthquake

南海トラフ近傍の地震活動から推定されるフィリピン海プレートの圧縮変形 Compressional deformation of the Philippine Sea plate estimated from the seismic activity below the Nankai trough

中野 優^{1*}, 神谷 眞一郎¹, 中村 武史¹, 金田 義行¹

Masaru Nakano^{1*}, Shin'ichiro Kamiya¹, Takeshi Nakamura¹, Yoshiyuki Kaneda¹

¹ 海洋研究開発機構

¹JAMSTEC

海洋研究開発機構では、熊野灘における地震・津波検知能力の向上および早期検知を目的として、地震・津波観測監視システム (DONET) の構築を行なった。本研究では、DONET によって得られた地震観測データを用いて紀伊半島沖、熊野灘における震源決定を行い、地震の発生要因について考察する。

震源決定において、速度構造は東海・東南海・南海地震の連動性評価研究プロジェクト (中村ほか, 2011) を参考に一次元構造を作成した。P, S 読み取り走時に対し Hirata and Matsuura (1987) の方法 (hypomh) を用いて初期震源決定を行い、さらに Double-difference 法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) を用いて震源座標の精度を向上させた。解析期間は 2011 年 1 月から 2012 年 10 月末までとした。

得られた震源は南海トラフ軸に沿って長さ約 100km、幅約 50km の領域に集中し、2004 年紀伊半島沖地震の余震分布とほぼ重なる。また、地震活動は地殻内と上部マントルで明瞭に分けられる。付加体内の堆積層には顕著な活動は見られなかった。地殻の活動はいくつかのクラスターに分けられる。北東部の活動 (クラスター A) における震源は南海トラフ軸とほぼ平行である ENE-WSW 方向に分布するが、南北方向にも数十 km 程度の広がりを示す。クラスター A の南に位置する活動 (クラスター B) は NNE-SSW 方向に分布し、若干斜交するものの南海トラフとほぼ平行である。一方、これらの南西に位置する活動 (クラスター C) の震源はほぼ NS 方向に配置し、トラフ軸とは直交する方向に分布する。上部マントル内の活動は、これらのクラスターの下部に位置し、トラフ軸にほぼ平行な走向、南東に傾斜する面上に分布する。一部、北西に傾斜する面上に分布する活動も見られる。

南海トラフより海側には、トラフ軸にほぼ平行に走向する銭洲海嶺が知られている。銭洲海嶺はフィリピン海プレートのリソスフェアが圧縮変形したことによって形成したと考えられており、その下にはモホ面のオフセットと北西に傾斜するスラストの存在が推定されている (例えば Nakanishi et al., 1998; Mazzotti et al., 2002)。Mazzotti et al. (2002) は上部マントルのスラストのすべりによる地殻内のクーロン応力変化から、銭洲海嶺近傍の地殻内の地震分布の説明を試みている。銭洲海嶺の北西、天竜海底谷付近の付加体の下には、古銭洲海嶺が沈み込んでいると考えられている (例えば Le Pichon et al., 1995)。古銭洲海嶺の成因は明らかではないが、銭洲海嶺と同様にフィリピン海プレートの圧縮変形によると考えられる (例えば Park et al., 2003)。Park et al. (2003) の推定によると、古銭洲海嶺は熊野灘下まで伸びており、その西端は現在の地震活動 (クラスター A と B) の位置に対応する。古銭洲海嶺下にスラストが存在するかについては明らかにされていないが、現在の上部マントルの地震活動域にスラストを仮定すると、地殻における地震のクラスター (A, B) は Mazzotti et al. (2002) によるクーロン応力増加の領域とよく対応する。

DONET データによる熊野灘下の地震活動解析によって、フィリピン海プレートのリソスフェアにスラストが存在することが示唆された。これは古銭洲海嶺の形成に関連したものである可能性があるが、銭洲海嶺下に推定されているスラストとは傾斜が逆である。スラストによる隆起域と古銭洲海嶺の位置関係も必ずしも対応しない。したがって、今回推定されたスラストは古銭洲海嶺の形成とは異なる成因であると考えたほうが良いかもしれない。しかし、2004 年紀伊半島沖地震はフィリピン海プレート内で起こり、その後現在の地殻および上部マントルにおける地震活動が励起された。前震、本震の断層モデルは圧縮応力場を反映しており、したがってこれら一連の地震活動はフィリピン海プレートの圧縮変形に伴うものであると考えられる。

キーワード: 南海トラフ, 海底地震観測, 古銭洲海嶺

Keywords: Nankai trough, Ocean-bottom seismic observations, Paleo-Zenisu ridge

スラスト帯での表層削剥による断層活動への影響 Effects of surface erosion on fault activity in thrust-belts

山田 泰広^{1*}, 中務真志¹, 松岡俊文¹
Yasuhiro Yamada^{1*}, Masashi Nakatsukasa¹, Toshifumi Matsuoka¹

¹ 京都大学大学院工学研究科

¹ Graduate School of Engineering, Kyoto University

付加体などのスラスト帯はその内部に形成される多数の低角逆断層の変位によって隆起するが、特に陸上スラスト帯で顕著なように、隆起部はふつう削剥される。この隆起部の削剥が構造形態とその形成過程に与える影響について、モデル実験と個別要素法シミュレーションで検討した。今回は特に、表面傾斜角度に対応して削剥量を決定するパラメータと表面傾斜角の変換点に対応して削剥量を決定するパラメータの効果について検討したので、結果を報告する。

地震の発生における応力と流体の役割：2011年東北地方太平洋沖地震による誘発地震の発生を例に Roles of Stress and Pore Fluid Pressure in Triggering Aftershocks Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake

寺川 寿子^{1*}

Toshiko Terakawa^{1*}

¹ 名古屋大学・大学院環境学研究科・附属地震火山研究センター

¹ Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

The earthquake is a physical process releasing tectonically accumulated stress by shear faulting, controlled by Coulomb failure criterion. In order to understand earthquake generation, we need to know the fault strength as well as the tectonic stress state in the Earth's crust. In the present study we examined the roles of tectonic stress and pore fluid pressure in seismicity changes following the 2011 off the Pacific coast of Tohoku (Tohoku-oki) earthquake through the analysis of aftershocks based on the Coulomb failure criterion. Background tectonic stress fields in Northeast Japan are generally characterized by E-W compression. After the Tohoku-oki earthquake, as expected from decrease in the Coulomb failure function, seismicity in the upper crust of Northeast Japan decreased except some restricted regions, where we observed many aftershocks with unfavourable focal mechanisms to the background stress fields. Most aftershocks can be regarded as reactivation of pre-existing faults under the background tectonic stress field, because misfit angles between observed and expected slip vectors are within estimation errors. By mapping the focal mechanisms of aftershocks on the 3-D Mohr diagram region by region, we confirmed that the aftershocks occurred on optimally oriented faults in some regions but on misoriented faults in other regions. The aftershocks on optimally oriented faults indicate the increase in regional ambient fluid pressure caused by the flow of over-pressurized fluid from a deep reservoir. On the other hand, the aftershocks on misoriented faults, which cannot be attributed to coseismic stress rotation, indicate the increase in fault-confined fluid pressure relative to the ambient fluid pressure. The decrease in fault strength due to increase in pore fluid pressure is one of the physical mechanisms triggering aftershocks.

キーワード: 応力, 間隙流体, 余震, 地震のメカニズム解, クーロン破壊規準

Keywords: stress, pore fluid pressure, aftershock, focal mechanism of a seismic event, Coulomb failure criterion

2011年東北地方太平洋沖地震に伴う火山性地殻変動と地殻内高温物体 Volcanic subsidence triggered by the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake, Japan

高田 陽一郎^{1*}, 福島洋¹

Youichiro Takada^{1*}, FUKUSHIMA, Yo¹

¹ 京都大学防災研究所

¹ DPRI, Kyoto University

2011年東北地方太平洋沖地震の発生に伴い、国内の幾つかの活火山で地殻変動を含む活動の変化が生じたことが気象庁等により報告されている。我々は人工衛星搭載の合成開口レーダー (ALOS/PALSAR) が撮像した SAR データを差分干渉 (InSAR) 処理することにより、東北地方の幾つかの火山で局所的な沈降が誘発されていたことを明らかにした。具体的に沈降を検出した地域は、秋田駒ヶ岳周辺、蔵王、栗駒山周辺、吾妻山、那須岳の5つで、沈降領域の広がりには 15 ~ 20 x 10 ~ 15 km の楕円形を示し、沈降量は 5 ~ 15cm に及ぶ。同様な沈降は 2010年にチリで発生した Maule 地震 (M8.8) でも観測されており (Pritchard et al. 2011)、巨大地震による火山地域の沈降現象は普遍的な現象かもしれない。吾妻山と蔵王については、沈降域内に GEONET の観測点があり、その GPS 時系列データから計算した地表沈降量は InSAR データと調和的である。

我々が検出した沈降域は、新生代後期に形成されたカルデラ群の分布 (Yoshida, 2001)、温泉の高温度領域 (GSJ, 2005)、高熱流量域 (Tanaka et al., 2004)、および非常に若い花崗岩体が掘削された地域 (Doi et al., 1998) のいずれとも良い一致を示す。このことから、地表沈降は、その地下にある高温で強度の低い深成岩体が地震時の応力変化に伴い変形した結果であると考えられる。この高温岩体を流体で満たされた楕円体で近似し、境界要素法とマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いたインバージョンによってその位置・形状などを InSAR データから推定した結果、最適モデルは InSAR データを大変良く説明することができた。この結果は、沈降域の地下には高温により剪断強度が極めて低下した領域が広く分布することを示す。

さらに GPS 時系列を地震後の長期にわたって観察した結果、沈降域内に存在した GEONET 観測点は、周囲に対して、まず地震時にステップ関数的に沈降した後、数か月かけて速度を減じながらも継続的に沈降していたことが分かった。このことから、地下の高温領域の構造とその応答について、以下の更に詳細なシナリオを考えた。

高温の深成岩体の中心には未だに高温のマグマがあり、その周囲を固結した高温の深成岩が覆い、さらにその外周をこの岩体の陥入によって熱的な変性や破碎を受けた母岩が広く取り巻いている。実際に、このような構造は鬼首カルデラにおいて特に詳細に報告されている (Yamada, 1988)。地震時の応力変化に伴う沈降は主に中心部のマグマと高温の深成岩体が極めて急速に変形・粘性緩和することで引き起こされる。一方で、地震後も続く沈降はこれら深成岩体の周囲をとりまく熱変性を受けた領域での粘性緩和が進行することにより引き起こされるのであろう。今後、この仮説を様々な観測量と比べ、改良を続けたい。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 合成開口レーダー, GPS, 火山, 沈降

Keywords: 2011 Tohoku Earthquake, InSAR, GPS, volcano, induced subsidence

北海道下の3次元地震波減衰構造：島弧 - 島弧衝突とM7クラス内陸大地震（その2）

Seismic attenuation structures beneath the Hokkaido corner: Arc-arc collision and its relation to M⁷ inland earthquakes

北佐枝子^{1*}, 中島淳一², 岡田知己², 長谷川昭², 勝俣啓³, 浅野陽一¹

Saeko Kita^{1*}, Junichi Nakajima², Tomomi Okada², Akira Hasegawa², Kei Katsumata³, Youichi Asano¹

¹ 防災科学技術研究所, ² 東北大学 地震・噴火予知研究観測センター, ³ 北海道大学 地震火山研究観測センター

¹NIED, ²RCPEV, Tohoku University, ³ISV, Hokkaido University

1. Introduction

In the Hokkaido corner, the Kuril forearc sliver collides with the northeastern Japan arc. Using data from the nationwide Kiban-network and a temporary seismic network, Kita et al. [2012, JGR] determined high resolution 3D seismic velocity structure beneath this area for deeper understanding the collision process between the Kuril and NE Japan forearcs. The results show that a broad low-V zone (crust material) with a total volume of $80 \times 100 \times 50 \text{ km}^3$ anomalously descends into the mantle wedge area at depths of 30-90 km west of the Hidaka main thrust. On the other hand, several high-velocity zones having velocity of mantle materials are distributed at depths of 10-35 km, being in contact with the eastern edge of this low-V zone. Two of boundaries of the high-V zones with the broad low-V zone correspond to the fault planes of the 1970 Mj 6.7 Hidaka and the 1982 Mj 7.1 Urakawa-oki earthquakes, respectively. Inland micro-earthquakes also occur in the low-V zone at depths of ~80 km. Kita et al. [2012, AGU fall meeting] estimated 3D seismic attenuation structure beneath the Hokkaido corner, but data used in that study are only from the Kiban-network. In this study, we estimated a detailed seismic attenuation structure by integrating data from the Kiban-network and those from the temporary seismic network operated by Katsumata et al. [2002], and compared it with the seismic velocity image previously obtained by Kita et al. [2012, JGR].

2. Data and method

We applied the method of Hada et al. [2011] to waveform data obtained from the Kiban network and the dense temporary seismic network. We estimated corner frequency for each earthquake by applying the spectral ratio method to the coda wave part [e.g. Somei, 2010; Wada, 2010; Mayeda et al., 2007]. We simultaneously determined values of t^* of earthquakes and amplitude level for the calculated spectra after determining a value of corner frequency. Then, seismic attenuation structure (Q structure) was imaged using t^* values and tomographic code of Zhao et al. [1992]. Ray paths were calculated by adopting the detailed 3-D seismic velocity structure by Kita et al. [2012]. In the calculation, we also used the geometry of the Pacific plate precisely estimated by Kita et al. [2010, EPSL]. The study region is 41-45N, 140.5-146E, and a depth range of 0-200 km. We obtained 57,132 P-wave and 41,251 S-wave spectra from 4,952 events ($M > 2.5$) that occurred in the period from Oct. 2006 to Dec. 2011 (JMA catalog) and Aug. 1999 to Apr. 2001 (Katsumata et al., 2002). The number of stations is 353. Horizontal and vertical grid nodes were set with a spacing of 0.10-0.3 degree and 10-30 km, respectively.

3. Result

Estimated corner frequencies for earthquakes roughly obey cube-root scaling with seismic moment, stress drop being 0.1-10 MPa. In the Hokkaido corner, obtained image of seismic attenuation structure generally has the same anomalous structure as the detailed seismic velocity structure by Kita et al. [2012]; A broad low-Qp zone are located at depths of 0-60 km beneath the western area of the Hidaka main thrust, whereas the eastern area of it (Kuril forearc) has very high-Qp values. The low-Q zone almost coincides to the low-V zone in the collision zone found by Kita et al. [2012]. The fault planes of the 1970 M7.1 and the 1982 M6.7 earthquakes are respectively located at the eastern edge of the low-Qp zone. Those tendencies in the image of Qp are also confirmed in the image of Qs. Western portion of the low-Qp zone has relatively lower Qp values, where inland type deep micro-seismicity is active. These results suggest that the occurrence of anomalous deep inland earthquakes in this region is related with spatial distribution of hydrous minerals or fluids.

キーワード: 地震波減衰構造, 北海道島弧会合部, 1970年 M7.1 日高山脈南部地震, 1982年 M6.7 浦河沖地震

Keywords: Seismic attenuation structure, Arc-arc junction, the 1970 M7.1 Hidaka earthquake, the 1982 M6.7 Urakawa-oki earthquake

余効変動及び地震間変動から推定される北アナトリア断層帯下の地殻内粘性構造 The crustal viscosity structure beneath the North Anatolian Fault Zone deduced from post- and inter-seismic deformation

山崎 雅^{1*}, ティム ライト¹, グレグ ハウスマン¹

Tadashi Yamasaki^{1*}, WRIGHT, Tim J.¹, HOUSEMAN, Gregory A.¹

¹ リーズ大学

¹University of Leeds, United Kingdom

地殻内の粘弾性緩和は、地震サイクルにおける地殻内応力の推移に重要な役割を果たしているが、その緩和過程は、それを支配する粘性構造の見積りに強く依存する。これまでの研究においては、余効変動あるいは地震間変動のどちらか一方のみを満足する地殻内粘性構造が主に求められてきたが、それらの変動の両方を同時に説明することができる粘性構造により地震発生帯下の力学的特性がより尤もらしく特徴づけられ、応力蓄積過程に対する粘弾性緩和の効果をより正しく評価することができるはずである。

3次元の有限要素モデルを用いた本研究においては、広域的な荷重過程が存在する状況下で、線形マックスウェル粘弾性体モデルが、横滑り断層の繰り返しに対してどのような応答を見せるのかを考察するが、一様粘性モデル、粘性率の深さ依存性を持つモデル、断層下に局所的低粘性領域を持つモデル、というそれぞれ異なる3つの粘性構造モデルの場合で、地震発生前後の地表面速度を地震サイクル期間に対するマックスウェル緩和時間の比に基づいて記述し、地表面速度に関する次のような特徴的観測量からどのように粘性構造が制約されるかを説明することを試みる:(1)地震発生前において速度勾配が断層付近でその周囲よりも有意に大きいかどうか(2)地震発生後において断層付近の速度が見積もられた長期的すべり速度よりも有意に大きいかどうか。

本研究においてはまた、これらの特徴的観測量に基づき、1999年にトルコで起こったイズミット(8月17日, Mw = 7.5)・デュズジェ(12月12日, Mw = 7.2)地震前後の地殻変動を記述する衛星測地観測の解析を行った結果、北アナトリア断層帯下の地殻内粘性構造に次のような制約を与えることができた:(1)一様粘性モデルでは観測量は説明できない(2)粘性率の深さ依存性のみを持つモデルでは地表面速度分布の波長が合わない(3)断層下に局所的低粘性領域を持つモデルが最も良く観測を説明できるが、それにおいては、低粘性領域が持つマックスウェル緩和時間が地震サイクル期間よりも有意に短く、それ以外の領域が持つ緩和時間が地震サイクル期間よりも有意に長くなければならない、というさらなる制約条件が付される。また低粘性領域の範囲は観測された地表面速度の空間分布により制約される。

北アナトリア断層帯のような地震発生帯下に弱領域が見出されるであろう理由を説明するいくつかの物理過程が考えられる:(1)非ニュートン粘性(2)熱散逸(3)結晶粒径の減少(4)間隙流体圧、など。今後の研究においては、弱領域を形成する自己無撞着な説明を、北アナトリア断層系の変動史を考慮しながら、決定していくことを目指して行かねばならない。

キーワード: 地震サイクル, 粘弾性緩和, 地殻内粘性構造, 北アナトリア断層帯

Keywords: Earthquake cycle, Visco-elastic relaxation, Crustal viscosity structure, North Anatolian Fault Zone

GPS 歪みデータインバージョンに於ける残差速度場の地質学的意味 Geological meaning of residual velocity fields in GPS strain data inversion

松浦 充宏^{1*}, 野田 朱美²

Mitsuhiro Matsu'ura^{1*}, Akemi Noda²

¹ 統計数理研究所, ² 構造計画研究所

¹Institute of Statistical Mathematics, ²Kozo Keikaku Engineering Inc.

Recently, we developed an inversion method to estimate unbiased interseismic slip-deficit rates at plate interfaces from observed GPS velocity data with an elastic dislocation model [1]. Observed GPS data always include rigid block translation and rotations, which cannot be explained by the elastic dislocation model. So, in this method, first we remove the rigid block translation and rotations by transforming the velocity data into the average strain rates of triangle elements composed of adjacent GPS stations, and then invert the strain rates with a unified Bayesian inversion formula [2]. We applied the method of GPS strain-rate data inversion to interseismic GPS velocity data (1996-2000) in the Kanto region, central Japan, and obtained unbiased slip-deficit rate distribution on the North American-Philippine Sea and Philippine Sea-Pacific plate interfaces. In the inversion of strain-rate data, unlike in the direct inversion of velocity data, the obtained slip-deficit rate distribution does not always explain the observed GPS velocity data well, because they will include some rigid block translation and rotations. In the present analysis, we found significant residual velocities, which should not be explained by interseismic slip deficit at plate interfaces. From theoretical consideration to rotation tensor [1], we may ascribe the residual velocities mainly to rigid body translation and rotation of tectonic blocks; that is, the south-southeastward translation of the Izu microplate, which suggests plate convergence at the incipient subduction boundaries southeast off the Izu peninsula [3], the anticlockwise rotation of the south Kanto block, and the clockwise rotation of the Tokai block.

References

[1] Noda, A., C. Hashimoto, Y. Fukahata & M. Matsu'ura (2013), Interseismic GPS strain data inversion to estimate slip-deficit rates at plate interfaces: application to the Kanto region, central Japan, *Geophys. J. Int.*, doi:10.1093/gji/ggs129.

[2] Matsu'ura, M., A. Noda & Y. Fukahata (2007), Geodetic data inversion based on Bayesian formulation with direct and indirect prior information, *Geophys. J. Int.*, 171, 1342-1351.

[3] Taira, A., K.T. Pickering, B.F. Windley & W. Soh (1992), Accretion of Japanese Island arcs and implications for the origin of Archean greenstone belts, *Tectonics*, 11, 1224-1244.

キーワード: GPS データ, 歪みデータインバージョン, 残差速度場, 剛体ブロック運動, 伊豆マイクロプレート

Keywords: GPS data, strain data inversion, residual velocity fields, rigid block motion, Izu microplate