

東北地方の地殻水平歪みの再検討ー基線測量に起因するスケール誤差の可能性ー Reevaluation of horizontal crustal strain in the Tohoku District: a possible scale error in the baseline survey

鷺谷 威^{1*}

SAGIYA, Takeshi^{1*}

¹ 名古屋大学減災連携研究センター

¹Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)の発生ポテンシャルを正當に評価し損ねた原因の一つに、東北地方では明治以降約100年間の地殻水平歪みで東西短縮歪みが明瞭に見られなかったことがある。この地殻歪み分布では、明治時代に行われた三角測量成果が基準として用いられているが、三角測量は基本的に角度の測定で座標値を決定するため、スケール誤差の懸念が付きまとう。三角測量のスケールを規定は、全国15箇所に設けられた基線場における基線測量で規定されている。基線測量では、三角測量の実施に先立ち、鋼鉄製の基線尺を用いて長さ3?10km程度の基線長を直接測定していた。東北地方には塩野原(山形県新庄市)、鶴児平(青森県七戸町)の2箇所の基線場がある。このうち、国土地理院に保管されている塩野原基線(5127m)の測量結果を調べたところ、4回の測定のばらつきは最大14mm程度であり、測定に起因するスケール誤差は高々2ppm程度に過ぎない。しかし、塩野原基線の測量は1894年の5-6月頃に実施されていたことが判明した。1894年10月22日には、基線から約30km西方で庄内地震(M7.0)が発生している。M7.0に相当する東傾斜の断層を仮定し、基線長の変化を計算すると、断層の傾斜に応じて基線長が50mm程度伸びることが予想され、10ppm程度の測量網のスケールを過小評価していたと思われる。この補正を行うことにより、100年間の地殻歪みにおいて、東北地方に明瞭な東西短縮歪みが現れる可能性がある。

キーワード: 地殻水平歪み, 三角測量, 基線測量, スケール誤差, 庄内地震, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: horizontal crustal strain, triangulation, baseline survey, scale error, Shonai earthquake, Tohoku-oki earthquake

GPS 変位データに含まれる系統誤差の除去：プレート境界のすべり / すべり遅れ分布の推定

Systematic Errors in the Inversion Analysis of GPS Data to Estimate Interseismic Slip-deficit Rates at Plate Interfaces

野田 朱美^{1*}, 松浦 充宏²

NODA, Akemi^{1*}, MATSU'URA, Mitsuhiro²

¹ 構造計画研究所, ² 統計数理研究所

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

Through GPS measurements we can determine the current coordinates of observation points in a geodetic reference frame. To estimate interseismic slip-deficits at plate interfaces, we usually analyze GPS displacement data, that is to say the difference between the current and previous coordinates of observation points. However, the GPS displacement data contain not only intrinsic deformation but also the rigid body translation and block rotation due to intraplate inelastic deformation, which cannot be explained by interplate slip-deficit models based on elastic dislocation theory. In the inversion analysis of interseismic GPS data, unlike coseismic GPS data, we cannot ignore the theoretically unexplainable coherent noise (systematic errors), because they will seriously bias the inversion results. If the intraplate inelastic deformation is caused by fault slip at well-defined block boundaries as in the case of southwest Japan, we can apply the method of simultaneous GPS velocity data inversion for block rotations and block-boundary slip rates, proposed by McCaffrey (2002). In the case of central Japan, however, the cause of intraplate inelastic deformation is the brittle fracture and/or plastic flow at a number of defects spreading over indefinite tectonic zones (Sagiya et al. 2000, Noda & Matsu'ura 2010). So, we cannot apply the method of simultaneous GPS velocity data inversion. Another and more effective way to remove the rigid body translation and block rotation from GPS array data is to transform observed horizontal displacement vectors into average strain tensors for individual triangles composed of adjacent GPS stations. Applying an inversion formula based on Bayesian statistical inference theory (Matsu'ura et al., 2007) to the GPS strain data, we can obtain unbiased slip-deficit rate distribution. In this talk, we show the theoretical basis for the use of the average strains instead of horizontal displacement data, and demonstrate the applicability of the method of GPS strain data inversion through the analysis of interseismic GPS velocity data (1996-2000) in the Japan region (Hashimoto et al. 2009, Hashimoto et al. 2012, Noda et al. 2012), where the North American, Pacific, Philippine Sea, and Eurasian plates are interacting with each other in a complicated way.

キーワード: 系統誤差, インバース問題, GPS データ, 地震間のすべり遅れ

Keywords: Systematic errors, Inverse problem, GPS data, Interseismic slip deficit

岩手宮城内陸地震 (Mw6.9) における非平面形状断層モデル Non-planar Fault Source Modeling of the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake (Mw6.9)

阿部 隆博^{1*}, 古屋 正人¹, 高田 陽一郎²
ABE, Takahiro^{1*}, FURUYA, Masato¹, TAKADA, Youichiro²

¹ 北海道大学大学院理学院, ² 京都大学防災研究所
¹Dept. Natural History Sci., Hokkaido Univ., ²DPRI, Kyoto Univ.

2008年6月14日、東北地方で Mw6.9 の岩手宮城内陸地震が発生した。震源は岩手県南部の山岳地帯で、ほぼ逆断層型の地震であり、その地殻変動の大きさは最大で 2m を超え、また複雑な変動分布であることが測地学的観測 (GPS, SAR) からわかっている。特に GEONET 観測点の 1 つである栗駒 2 は、非常に大きな変動 (南東に約 1.5m、約 2m の隆起) を示しており、断層モデルの推定において 1 つの難点でもあった。これまでに GPS あるいは SAR データに基づく断層モデルはいくつか発表されているが (Ohta et al., 2008, Takada et al., 2009)、未だにこれらの地殻変動データを全て説明できた論文は発表されていない。そこで、我々は SAR データと GPS を両方説明できるような非平面形状の断層モデルを推定しようと試みた。昨年 の 連 合 大 会 や 地 震 学 会、測 地 学 会 で こ の 研 究 に つ い て 報 告 し た が、栗 駒 2 の 局 所 的 な 変 動 を 思 う よ う に 上 手 く 説 明 で き な か っ た。様 々 な 試 行 錯 誤 を 繰 り 返 し た 末、よ う や く 完 成 版 と 言 え る 断 層 モ デ ル を 完 成 さ せ た。

我々はまず GPS データに基づく 1 つの西落ち断層を仮定した。推定した滑り分布は栗駒 2 を中心とし、縦ずれ成分が ~5m、左横ずれ成分が ~0.5m であった。これらは、逆断層の動きや GCMT の解と一致する。この断層モデルから推定された Mw は ~6.9 である。このように、GPS による地殻変動を説明するモデルは西落ち断層だけで十分であり、東落ち断層は必要ないように思われた。

次に、この断層モデルと滑りパラメータを用いて、SAR データを説明できるかどうかを調べた。その結果、衛星の視線方向に 50cm 以上の誤差があり、またレンジオフセットの計算値には観測値と比べ明らかに説明できていない部分があった。これらは、SAR は GPS では測定しきれない地殻変動を捉えていることを強く示している。さらに、震央周辺のピクセルオフセットや余震分布からも、東落ち断層の存在を示唆するデータが得られた。

我々は、新たに東落ち断層を仮定し、GPS と SAR データを両方説明する非平面断層モデルを推定した。GPS データに基づく断層モデルと異なる点は、滑りの分布と大きさである。縦ずれ成分は、西落ち断層は全体に広がっているのに対し、東落ち断層は栗駒 2 を中心とする局所的な分布である。滑り量は、縦ずれ成分は東落ち断層が ~3.5m、西落ち断層が ~2.5m、左横ずれ成分は、どちらとも ~1.5m である。この東落ち断層は余震分布から推定される断層面と一致し、2 つの断層を合わせた Mw は ~6.9 である。さらに、この東落ち断層の位置がブーゲー異常の急勾配の場所と整合することが判明した。

測地データに基づく豊後水道スロースリップ発生域の摩擦特性 Frictional properties of the Bungo Channel slow slip region deduced from geodetic data

若杉 貴浩^{1*}, 鷺谷 威¹

WAKASUGI, Takahiro^{1*}, SAGIYA, Takeshi¹

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹ Nagoya University Graduate School of Environmental Sciences

スロースリップは多くの沈み込み帯で確認されているが、そのすべり量やすべり速度、規模、継続期間、発生間隔などは発生域により様々であり、その違いは、すべり面の摩擦特性で支配されていると考えられる。これまで、スロースリップ発生時のすべりの時空間分布からすべり量やすべり速度と応力変化の関係を推定した研究はあったが、単独のイベント解析だけでは、解析そのものの信頼性に乏しく、摩擦特性としての解釈には問題があった。そこで、本研究では豊後水道において約6年周期で繰り返し発生するイベントに対して同一の手法を用いて解析することで再現性を確認することで、スロースリップ発生域の摩擦特性を推定することを目的とした。これまでに発生した1996~1998、2003~2004、2010年と3回のスロースリップイベントについて、GEONETのF3解の日座標値を用い、大きな変動のない期間(2007~2008年)から推定した定常速度成分と季節変動成分を除去した残差をデータとして使用した。時間依存逆解析手法(Segall and Matthews, 1997)を適用し、各イベントについてすべりの時空間分布を推定した。得られた結果に基づいて、弾性転位理論(Okada, 1992)によってプレート境界面上の剪断応力変化の計算を行った。剪断応力変化とすべり量の関係、すべり速度との関係が摩擦特性を表していると考え、それらの結果を相互に比較した。その結果、スロースリップの継続期間やすべり速度などはイベント毎に違いが見られたが、最終的なすべりの空間分布はほぼ同じで、最大すべり量は深さ40km付近で約20cmであった。3回のイベントのうち、最初のイベントではすべりが深さ25km付近で発生し、すべりの拡大とともに深い領域へ移動してゆく現象が見られたが、他のイベントではそのような現象は見られなかった。剪断応力の降下はすべり量が大きい領域と一致し、最大応力降下量は0.1-0.12MPaである。そして、この応力降下域の周囲には応力が変化しない、または増加する領域が分布する。すべり量と剪断応力の変化量は3回のイベントでほぼ共通して線形の関係にあり、イベントの進行中にも変化しておらず、場の性質を反映していると考えられる。すべり量の大きい領域はすべり-応力関係が負の勾配を持ち、弱い弱化的性質を持つ。一方、周囲には傾きは0または正で、剪断応力が変化しないか増加する領域が広がり、すべり強化の性質を持つ。このような摩擦特性の空間変化がスロースリップ発生域の広がりを規定し、エピソード的なスロースリップ発生を引き起こしていると考えられる。

東北沖超巨大地震とプレート沈み込み帯のマルチ地震サイクル The 2011 Megathrust Earthquake off Northeast Japan and Multiple Earthquake Cycles in Subduction Zones

松浦 充宏^{1*}

MATSU'URA, Mitsuhiro^{1*}

¹ 統計数理研究所

¹Institute of Statistical Mathematics

プレート境界地震を引き起こす応力は震源域でのすべり遅れの増大に伴って蓄積される。地震間のすべり遅れに起因する地殻変動を GPS 観測網で捉えて逆解析することで、南千島?日本海溝沿いのプレート境界には五つの顕著なすべり遅れ領域が存在することが確認されていた。一方、東北沖超巨大地震に伴う GPS 変位データの逆解析から、この地震の断層すべりは宮城沖と福島沖の二つのすべり遅れ領域に及んでおり、最大すべり量は宮城沖で 25 m、福島沖で 6 m に達すると推定された。宮城沖のすべり遅れ領域では、過去 200 年間以上に亘り、M7.5 クラスの地震が 40 年間隔で繰り返してきた。その同じ領域で Mw9.0 の超巨大地震が発生したことは、スケールに依存するマルチ地震サイクルの可能性を示唆すると同時に、これまで物理的実体とされてきたアスペリティが断層摩擦特性の空間的不均一を表す概念に過ぎないことを意味する。

キーワード: 沈み込み帯, 巨大地震, 応力蓄積, すべり遅れ, マルチ地震サイクル, スケール依存性

Keywords: subduction zone, megathrust earthquake, stress accumulation, slip deficit, multiple earthquake cycle, scale dependence

東北沖大地震による絶対応力の解放と巨大地震の擬周期性 Absolute stress release in the 2011 Tohoku-oki earthquake and pseudo-cyclic behavior of gigantic interplate earthquakes

深畑 幸俊^{1*}, 八木 勇治², 三井 雄太³
FUKAHATA, Yukitoshi^{1*}, YAGI, Yuji², MITSUI, Yuta³

¹ 京都大学防災研究所, ² 筑波大学大学院 生命環境系, ³ 北海道大学大学院理学研究院
¹DPRI, Kyoto Univ., ²Life Environ. Sci., Univ. Tsukuba, ³Sci., Hokkaido Univ.

東北沖大地震(2011年東北地方太平洋沖地震)の主破壊は、長大な滑り(50 m)・長いすべり時間(90秒)・大きな応力降下(20 MPa)で特徴付けられ、断層面に蓄積されていた応力をほとんど全て解放する特異な地震であったと考えられる(Yagi and Fukahata, 2011)。応力がほとんど全て解放されたことは、正断層型余震の頻発など東北沖大地震の前後における地震メカニズム解の劇的な変化からも裏付けられる(Hasegawa et al., 2011)。応力をほぼ全て解放するには何らかのメカニズム、例えば摩擦発熱による間隙流体圧の上昇(thermal pressurization, TP)などにより断層面の摩擦強度が地震時に極端に低下することが必要である。そのような極端な摩擦強度低下メカニズムは、強い非線形性、即ち鋭敏な初期値依存性を持つことが期待される。東北沖大地震の発生後、巨大地震のスーパーサイクルの存在がにわかにクローズアップされてきた(Hori and Miyazaki, 2011; 池田・岡田, 2011)。確かに、巨大地震は、繰り返し発生してきたであろう。しかし、断層面の破壊時における非線形的性質を考えると、地震が「周期的」に発生することには、疑問を持たざるを得ない。例えば、TPに影響を与える水理学的性質も、比較的容易に時間変化することが想像される。そして実際に、これまでの発生履歴からしても、周期的と呼ぶのは難しく、せいぜいが擬周期的と呼ぶべきものである。最も良く知られている南海トラフ沿いの海溝型大地震について言えば、最短の繰り返し間隔は90年で、最長では264年である(Ando, 1975)。北海道の太平洋沿岸における津波堆積物の調査によれば、その再来間隔は平均450年であるものの、短い時には100年、長い時には800年と大きくばらつく(Sawai et al., 2009)。東北日本の太平洋沿岸でも同様で、再来間隔は450年から800年となっている(宍倉他, 2010)。地震は、蓄積された応力を短時間で解放する過程である。プレート境界では応力の蓄積はプレート運動に伴い極めて定期的に起こる。一方、応力の解放過程はちょっとした状況の違いにより大きく変化するのだろう。そのように考えると、海溝型巨大地震が擬周期的に発生してきたことが無理なく理解できる。そして、もしそうであるとすると、M9クラスの巨大地震の発生を予測することは、極めて難しい。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 破壊過程, 絶対応力, 巨大地震, スーパーサイクル
Keywords: 2011 Tohoku-oki earthquake, rupture process, absolute stress, megaquake, super-cycle

The October 23, 2011 Van-Ercis Earthquake (Eastern Turkey, Mw=7.2) and Characteristics of its Aftershocks The October 23, 2011 Van-Ercis Earthquake (Eastern Turkey, Mw=7.2) and Characteristics of its Aftershocks

Ali Pinar^{1*}, Timur Ustaomer², Keiko Kuge³
PINAR, Ali^{1*}, Timur Ustaomer², KUGE, Keiko³

¹Istanbul University, Department of Geophysics, ²Istanbul University, Department of Geology, ³Kyoto University, Department of Geophysics

¹Istanbul University, Department of Geophysics, ²Istanbul University, Department of Geology, ³Kyoto University, Department of Geophysics

The intraplate Van-Ercis earthquake took place about 100 km to the north of a suture zone undergoing N-S shortening resulting from the ongoing convergence of Arabian and Eurasian plates. The earthquake caused significant damage and loss of life in the cities of Ercis located on the hanging wall, 20 km to the north of the rupture zone, and Van, lying on the foot wall. No significant surface rupture was observed associated with the earthquake except some discontinuous displacements along a 20-25 km long trace extending N250E, between the Lakes Van and Ercek, where the northern block is uplifted a few centimeters.

Despite the large magnitude and the complex source region the teleseismic body waves are rather simple. The aftershock distributions and the finite source modeling depict a 60 km long rupture zone with average strike, dip and rake of 248, 36 and 56 degrees, respectively. The location of the epicenter and the extent of the aftershock area suggest that the rupture propagated bilaterally for about 30 km eastward and westward, mostly confined between the depth range of 20 km and just below the surface. The western part of the finite fault model zone show predominantly pure thrusting while the rest shows oblique reverse faulting that is approved by the mechanisms of the major aftershocks.

We retrieved 350 moment tensors for the aftershocks in the magnitude range $3.5 < M_w < 5.9$. We investigate the source characteristics of the aftershocks and their kinematic and dynamic relation with the mainshock. The spatial distribution of the aftershocks and their focal mechanism portrays distinct features. In total, about 45% of the CMT solutions of the aftershocks show predominantly reverse faulting or transpression; 40% of them show predominantly strike-slip faulting; and, 15% show normal faulting or transtension. The aftershocks in the NE corner of the rupture zone experienced mostly strike slip faulting pointing out conjugate strike-slip fault system at the lower crust reaching 30-35 km depth range. We determined tens of aftershocks showing normal faulting mechanism or transtension. Most of them are to the west and to the south of the epicenter. The southern aftershocks reflect transtension within the foot wall. The largest aftershock in the transtensional region took place on November 9, 2011 with magnitude $M_w=5.7$ just a few km away from the city Van. It generated rather complex waveforms which we modeled with two subevents one of them showing normal faulting.

キーワード: Arabia-Eurasia Convergence, Eastern Turkey, 2011 Van earthquake, mainshock, aftershocks
Keywords: Arabia-Eurasia Convergence, Eastern Turkey, 2011 Van earthquake, mainshock, aftershocks

砂箱実験による沈み込みと付加に伴う3次元的不安定性問題の抽出 Three dimensional deformation of accretionary wedge: insights from wide sandbox experiments

堀 高峰^{1*}, 宮川 歩夢¹, 阪口 秀¹, 山田 泰広²

HORI, Takane^{1*}, MIYAKAWA, Ayumu¹, SAKAGUCHI, Hide¹, YAMADA, Yasuhiro²

¹IFREE, 海洋研究開発機構, ²京大工・都市社会工

¹IFREE, JAMSTEC, ²Kyoto Univ.

付加体の形成プロセスを調べるための手法として、一定速度で移動するシート上に堆積させた乾燥砂が固定壁（バックストップに相当）に衝突する際の変形を調べるアナログモデル実験（通称：砂箱実験）が従来から数多く行われてきた。それらの多くでは、沈み込み帯における構造探査で観測されるように、深さと沈み込み方向の2次元断面における観察に主眼が置かれてきた。そこでは、付加体の形成プロセスに影響する要因を、その2次元断面上における物性や付加物質の供給量、沈み込むプレートの形状などから議論されてきた。一方、この実験方法ではシートの幅方向に対する付加体形状は一般に一様ではなく、それが時間的にも変化することが知られている。この事実は、実際に付加体が発達している地域の海底地形にもトラフ軸が様々な波長で湾曲していることから、付加体の形成プロセスを鉛直2次元断面だけで議論することが本質的に不十分である可能性を示唆している。そこで本研究では、非常に幅の広い砂箱実験装置を用いることで、付加体形状の3次元的な時間発展を観測し、湾曲形状を呈する付加過程を不安定性問題として捉え、その要因の抽出を試みた。

今回使用した実験装置では、実験の境界条件に内在する不安定性要因をできるだけ排除するために、剛体壁でできた砂箱装置全体を一定速度で変位させ、箱から独立して固定されたバックストップを用いて砂材料を変形させた。まず装置の底面にゴム板を敷き、砂材料との間の不要なすべりが起きにくいようにしたうえで、一定重量の豊浦砂を堆積させ、表面をほぼ水平にならした。砂材料の初期サイズは、移動方向92cmに対して幅方向100cmとし、十分に幅の広い条件を実現した。本報告では、砂の層厚と箱の移動速度を変えた実験結果から、付加体形状の3次元的な変化の時空間スケールの違いを調べることで、不安定性を支配する要因について述べる。

余効変動から地殻内粘性勾配をとらえる：1997年マンニイ（チベット）地震での事例

The crustal viscosity gradient measured from post-seismic deformation: a case study of the 1997 Manyi (Tibet) earthquake

山崎 雅^{1*}, Gregory A. Houseman¹

YAMASAKI, Tadashi^{1*}, Gregory A. Houseman¹

¹COMET+, リーズ大学

¹COMET+, University of Leeds

リソスフェア内の粘性率が深さとともに有意に変化しているであろうことは今では広く受け入れられたことであり、余効変動における粘性緩和成分を定量的に評価する際にも、そのことを考慮すべきである。我々の以前の研究においては、3次元の線形 Maxwell 粘弾性体有限要素モデルを用いて、粘性率の深さ依存性を持つ (Depth-Dependent Viscosity, DDV) モデルが横ずれ断層の動きに対してどのような応答を見せるのかを、一様な粘性率 (Uniform Viscosity, UNV) を持つモデルとの比較を通して検証した。それにおいては、各地点での DDV モデルの振る舞いを最も良く再現する UNV モデルの粘性率が、断層からの距離とともに低くなっていくという特徴を使えば、地殻内粘性率の深さ依存性を系統的にとらえられることを提案した。

本研究では、その方法を、1997年マンニイ（チベット）地震発生後約3年間にわたり InSAR で捉えられた地殻変動 [Ryder et al., GJI, 169, 1009 - 10027, 2007] に適用し、同地域下の粘性構造を見積もることを試みた。本震発生後165日以降に変動速度が明らかに減少することから、その時点以降の変動が主に粘性緩和成分のみを反映しているであろうと考え、その時点以降の変動のみに UNV モデルを適用した。それにより、粘性率の深さ依存性の兆候、つまり、各地点で UNV モデルと観測量との違いを最小にする UNV モデルの粘性率が断層からの距離とともに系統的に減少していくということがとらえられた。そして、その UNV モデルの粘性率が断層からの距離とともに減少していく勾配を使って導き出された地殻内粘性構造は、断層が有意にすべった深さの範囲が地震サイクル期間、~420 - 850年 [van der Woerd et al., GRL, 27, 2353-2356, 2000]、における有効弾性層内に限られていたこと、そしてその粘性勾配は上部地殻物質の定常べき乗則クリープの実験結果と調和的であることを推測させるものであった。

このように導き出された地殻内粘性構造は、チベット地域の地殻の特性をより良く明らかにしてくれ、地震サイクルにおける地殻内の応力再分配、延いては地震発生メカニズムを理解する手助けともなる。これまで、観測された余効変動を用いて様々な地域における地殻（・マントル）内粘性構造が見積もられてきたが、その多くにおいては、見積もられた粘性構造はすでに観測されて周知の通りである地殻変動を再現する以上のものではなかった。しかし、得られた粘性構造は、地殻の特性（熱的構造・物性構造）と地震発生メカニズムとを議論する機会を与えてくれるはずのものである。

キーワード: 余効変動, 粘性緩和, 線形マックスウェル粘弾性, 粘性率の深さ依存性, 有効弾性厚

Keywords: Post-seismic deformation, Viscous relaxation, Linear Maxwell visco-elasticity, Depth-dependent viscosity, Effective elastic thickness

ナムツォ湖の湖岸線とチベットの中部地殻のレオロジー

Paleo shoreline profiles of lake Nam Co and the rheology of the Tibetan mid crust

Wallis Simon^{1*}, 森 宏¹, 鷲谷 威², 小澤 和浩¹, 中村 俊夫³

WALLIS, Simon^{1*}, MORI, Hiroshi¹, SAGIYA, Takeshi², OZAWA, Kazuhiro¹, NAKAMURA, Toshio³

¹ 名古屋大学環境学研究科地球環境科学専攻, ² 名古屋大学減災連携研究センター, ³ 名古屋大学年代測定総合研究センター

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Environmental Studies, Nagoya University, ²Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, ³Center for Chronological Research, Nagoya University

A major point of dispute in the tectonics of the Tibetan Plateau is whether the mid crust is weak enough to flow decoupled from the upper crust. Flow of the mid crust over distances of 100s or 1000s kilometers has been proposed and inflow of relatively low viscosity (no more than 10^{19} Pa s) rock from beneath the high plateau into the mid crust of the surrounding lower-lying regions has been proposed as a key process in the lateral growth of the plateau. However, different assumptions about the properties of the crust lead to the opposite conclusion: active deformation of the Plateau is better explained if the mid and upper crust of the plateau deform together and are not decoupled. Paleo lake shorelines offer a way to test these contrasting models and to contribute to our understanding of crustal rheology. Prominent shorelines developed around Lake Nam Co in central Tibet are excellent markers of the paleo horizontal in this region. Real time kinematic GPS surveys of these markers show there is no significant uplift despite a water level drop of several 10s meters. ¹⁴C dating of lake tufa deposits shows the the age of a prominent shoreline at 20m above the present lake level to be between 10 and 20 ka. The lack of any isostatic response to water level drop over a time scale of more than 10,000 years implies either a high viscosity mid crust ($>10^{20}$ Pa s) or a large elastic thickness to the crust. In either case these results imply that there is no continuous low viscosity mid crustal layer beneath Tibet in this area. We suggest that evidence for partially molten-and hence low viscosity-mid crust only reflects conditions of localized patches of crust. The lack of a continuous weak mid crustal layer argues against large-scale decoupling of the mid and upper crust. This implies that large-scale inflow of mid crustal rocks is unlikely to play a significant role in the expansion of the Tibetan plateau and that the mid crust can sustain significant stresses even on geological time scales.

キーワード: チベット, 湖, 中部地殻, レオロジー, 年代

Keywords: Tibet, Lakes, Mid crust, Rheology, Age

低温領域の熱年代学に基づいた若い造山帯の山地地域の隆起・削剥史に関する研究：
日本列島の六甲山地・木曾山脈・赤石山脈を例に
Uplift and denudation histories of mountainous areas of the Japanese Islands based on
low-temperature thermochronology

末岡 茂^{1*}

SUEOKA, Shigeru^{1*}

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

¹ Earth & Planetary Sci., Sci., Kyoto Univ.

本研究では、低温領域の熱年代学的手法を用いて、日本列島のいくつかの山地の隆起・削剥史の解明を試みた。山地の隆起・削剥史の定量的解明には、 10^6 年以上の長期間における削剥量（速度）の推定が必要であるが、それが可能な手法は限られる。ヒマラヤやアルプス等の大規模な造山帯では、過去40年間にわたって、熱年代学的手法により隆起・削剥史が解明されてきたが、手法の精度や適用年代の範囲の制約により、日本列島のような比較的若く小規模な造山帯への適用は従来困難であった。しかし、近年の低温領域の熱年代学の発達により、日本列島のような若い変動帯でも熱年代学的手法を用いて山地の隆起・削剥史を推定できる可能性が高まった。本研究では、規模や成熟度の異なる3つの山地（六甲山地、木曾山脈、赤石山脈）に、フィッション・トラック法や(U-Th)/He法など現在利用可能な低温領域の熱年代学的手法を総合的に適用し、各地域の隆起・削剥史の解明と、若い造山帯への熱年代学的手法の有用性の検討を試みた。

本研究の結果、六甲山地では、第三紀初頭以降の平均削剥速度が約0.1 mm/yrと求められ、六甲山地の隆起開始以前の準平原化時代の削剥史を定量的に解明することができた（末岡ほか、2010）。木曾山脈では、中期更新世の木曾山脈の隆起開始以降の削剥速度（1.3~4.0 mm/yr）と最大基盤隆起速度（3.3~6.1 mm/yr）を求め、これらの空間分布を基に、木曾山脈の隆起モデルを新たに提唱することができた（Sueoka et al., in press）。また、木曾山脈隆起開始以前の第三紀のほぼ全期間を通じた削剥速度を0.1 mm/yr以下と推定した（Sueoka et al., in press）。赤石山脈では、山地北部の中央構造線から糸魚川-静岡構造線における領域で、山地が西へ傾動しながら隆起していることや、後期鮮新世の山地の隆起開始以降、数kmに達する削剥が起こっていることを示すことができた（末岡ほか、2011）。また、既報年代を交えた考察により、山地の南北で隆起開始時期や隆起要因が異なる可能性を示した。このように、本研究では各地域の 10^6 ~ 10^7 年オーダーの隆起・削剥史の定量的解明に成功し、特に木曾山脈と赤石山脈では、これらの定量的データを基に山地の隆起の様式や要因などを検討することができた。

以上の事例研究を通じて、日本列島の若く小規模な山地に対して、熱年代学的手法によって最近数百万年間の隆起・削剥史の定量的解明が可能であることが確認できた。さらに、山地の隆起開始以前における準平原時代の削剥史についても、やや精度は低いものの定量的な制約を与えられることが確かめられた。すなわち、低温領域の熱年代学的手法は、日本列島のような若い造山帯においても、地球年代学的・地質学的な応用に留まらず、変動地形学的にも有用なデータを提供可能であることが示された。また、3つの事例研究を通じて、熱年代学的手法によって最近数百万年間の隆起・削剥史の解明が可能な日本の山地の条件（基盤隆起速度が0.5~1.0 mm/yr以上である、明瞭な隆起準平原が保存されていない、最大標高が約1000 m以上である）を制約することができた。さらに、海外の大規模造山帯における熱年代学データ解釈の基本である年代-標高プロファイルに代わり、地点ごとの熱履歴解析を基にした新たなデータ解釈方法を導入することができた。すなわち、若い造山帯に熱年代学的手法を適用する上での対象地域の選定方法およびデータ解釈方法を改善することができた。以上の成果により、低温領域の熱年代学的手法に基づく、日本列島をはじめとする若く小規模な造山帯における長期間の地殻変動量の定量的解明への可能性を示すことができた。

キーワード: 低温領域の熱年代学, フィッション・トラック法, (U-Th)/He法, 六甲山地, 木曾山脈, 赤石山脈

Keywords: low-temperature thermochronology, fission-track method, (U-Th)/He method, Rokko Mountains, Kiso Range, Akaishi Range