

平成 21 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18401003

研究課題名（和文） モンゴルのプレート内最大級地震断層と活断層に関する  
変動地形学的研究研究課題名（英文） Geomorphological study on the greatest intraplate surface  
ruptures and their causative active faults in Mongolia

研究代表者

鈴木 康弘 (SUZUKI YASUHIRO)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号：70222065

研究成果の概要:モンゴルにおいて1905年Bulnay地震と1957年Gobi-Altay地震で出現した、プレート内活断層として最大級の地震断層、および関連する断層変位地形を対象として、①航空写真と衛星画像の実体視判読、②地形地質現地調査、③写真測量を実施した。その結果、広域活断層分布図が作成されるとともに地震時変位量や累積変位量、平均変位速度、地形面の年代、古地震活動時期等のデータが得られ、地震がどのように繰り返すのか等の議論が実現した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2007年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：人文学 A

科研費の分科・細目：地理学・地理学

キーワード：活断層，地震断層，写真判読，リモートセンシング，変動地形

## 1. 研究開始当初の背景

モンゴルでは、1905年と1957年に相次いだBulnay地震(M8.4)とGobi-Altay地震(M8.3)に伴って、長さそれぞれ320km、250kmの地表地震断層が出現し、左横ずれ量は最大14mに達した(例えば、Baljinnyam et al., 1993)。これらはプレート内の活断層として世界最大級である。地表地震断層は、50～100年経った現在でも明瞭な地形として地表に残されており、累積的な変位を示す断層変位地形もよく発達している。したがって、活断層が繰り返し活動する様子を地形学的な調査を通して明らかにする絶好のフィールドといえる。にもかかわらず、詳細な空中写真判読や現地調査によって変位の累積性や地形発達史を解明した、いわゆる変動地形学的な研究はほとんど行われていなかった。

明瞭な地表地震断層の事例から活断層と地震発生との関係を明らかにすることは、活断層の地震発生予測のためにも重要な課題である。とくに、(a)累積的な変位量(正確には平均変位速度)が大きい箇所地震時変

位量は毎回大きくなるか？ [平均変位速度と地震時変位量の関係], (b) 断層線のスプレー形態が破壊伝播方向を示しているか？ [断層線形態と断層破壊伝播の関係], (c) 1回に活動する範囲は、断層線のどのような形態によって決まるか？ [断層線形態と活動セグメントの関係] 等を解決することは重要で、地震調査推進本部の活断層評価においても注目が集まっている。これらは通常、事例から議論されるが、それらはサンアンドレアス断層のようなプレート境界断層がほとんどであり、日本列島の活断層のような、プレート内断層の事例は極めて少なかった。

## 2. 研究の目的

(1) モンゴルにおいて 1905 年 Bulnay 地震と 1957 年 Gobi-Altay 地震で出現した長大な地震断層、およびそれらと関連する断層変位地形を対象として、航空写真や衛星画像の判読および現地調査によって精査する。これにより、(a) 平均変位速度と地震時変位量の関係、(b) 断層線形態と断層破壊伝播の関係、(c) 断層線形態と活動セグメントの関係等を検討し、プレート内断層の地震時挙動を解明するとともに日本の変動地形を理解するための基礎資料を得る。同時にモンゴルの活断層の全体像を明らかにすることを目指す。

(2) 写真測量の技術を用いて ALOS/PRISM から 1 回の地震に伴う地表変形を定量的に解析する可能性を探る。

## 3. 研究の方法

(1) 航空写真の実体視判読  
(2) CORONA 画像の実体視判読  
(3) (1) (2) に基づく活断層分布図の作成  
(4) 現地における断層変位地形の記載、計測、および編年のための年代測定試料採取  
(5) 年代測定  
(6) ALOS/PRISM 画像の実体視判読と写真測量  
(7) (6) の写真測量の精度検証のための GCP (Ground Control Point) 取得  
(8) 総合的な取り纏めと検討

なお、航空写真や CORONA 画像、地形図等の資料は精力的に収集し、対象断層およびその近隣地域を含む広大なエリアをカバーするようにした。なお、研究は、モンゴル国立科学アカデミー地理学研究所の D. Enkhtaivan 氏、O. Batkhishig 氏らと共同で実施した。平成 18 年 3 月には正式な研究協定書も締結している。

## 4. 研究成果

(1) 1905 年 Bulnay 地震の地表地震断層と累積変位の研究

この地震断層については地震直後にロシア人・モンゴル人研究者により調査が実施され (Baljinnyam et al., 1993), 冷戦後の 1990

年代後半にはアメリカ地質調査所の研究者が数年間調査を行っている。これらの調査では、地震断層の分布とその地表形態の概要が整理されるとともに、1905 年の地震や古地震に伴う変位量などが一部の地点で検討されている。

本研究では、総延長 400 km 以上にわたる範囲の CORONA 画像を実体視判読して活断層分布図を作成した。その上で、地形面や段丘崖等に累積的な変位が認められる地点や地震時変位量を計測できる地点を選定し、航空写真の実体視判読と現地調査を実施して、変位の累積性や平均変位速度、地形発達史を解明した。

断層変位地形 (地表地震断層を含む) はおおむね東西走向に連続して認定された。トレースは非常に直線的であり、尾根・谷や段丘崖、現河床などに系統的な左横ずれが認められる。数 100 m スケールのステップが数多く認められ、プリアパート・ベーズンやプレッシャー・リッジとみられる凹地や高まりがよく発達する。1905 年に破壊したとみられる区間より東には変位地形はあまり続かないが、西方には少なくとも数 10 km 連続している。地形の起伏と断層トレースの平面形状から、断層面はほぼ垂直と推定される。

各地点で得られた成果を以下に述べる。

### ① Bust 湖の東

最終氷期に形成されたと考えられる比較的広い堆積段丘面 (L1 面) が広がり、この段丘の段丘崖が左横ずれしているのが 3ヶ所で確認でき、60~75 m の変位量が計測される。その一方で、段丘開析谷の現河床には 1905 年の地震時の変位と思われる小規模なずれが残されており、8~9 m の変位量を示す。現河床の周りには小規模な離水地形がみられる。地形発達から 1905 年と同程度の変位が繰り返されてきた様子が読み解ける。L1 面を約 2 万年前の形成とすれば、この付近の変位速度は 3 mm/yr より大きく、活動間隔は 2600 年よりも長いことになる。

### ② Bust 湖北東 (①の地点の約 10 km 西)

北側の山地から南方へと流下する現河床等に  $13 \pm 1$  m,  $12 \pm 1$  m,  $14 \pm 1$  m の変位がみられ、横ずれにより放棄された最近の河床には  $26 \pm 2$  m の変位が認められた (図 1)。したがってこの地点では 11~15 m の地震時変位が繰り返したと考えることができる。

### ③ Bust 湖北西 (②の地点の約 10 km 西)

Bust 湖の周辺では、最終氷期以降と考えられる複数の地形面が分布し、それらの段丘崖が断層によって変位を受けているのが観察できる。最も広い堆積段丘 (L1 面) 形成時の段丘崖には 105 m の左横ずれ変位が認められ、その下位の L2 面形成時の段丘崖は 36~44 m の左横ずれ変位が計測される。L2 面の堆積物から得られた試料からは 4970-5290 cal yr BP

の年代が得られた。したがって、変位速度は 5~7 mm/yr となる。また、L1 面を 2 万年前とすれば 5 mm/yr となり、ほぼ同程度の値となる。また、この周辺の小規模な河谷には、 $19 \pm 2$  m および  $11.5 \pm 0.5$  m の変位が観察できる。1905 年に 9~12 m 程度の変位があり、それらが繰り返されてきた可能性が高い。平均変位速度とこれらの変位量から活動間隔は 1600~2400 年程度となる。

#### ④Oygon 湖北西 (③の地点の約 60 km 西)

完新世に形成されたと考えられる段丘面の段丘開析谷 2 つに微小な横ずれ変位が観察でき、 $8 \pm 1$  m および  $16 \pm 1$  m の変位量が計測できる。また、段丘面に認められる開口割れ目の充填堆積物中の試料から 1390~1570 cal yrBP の年代値が得られた。したがって、活動間隔は 1340~1520 年よりも長く、変位速度は 7 mm/yr より小さいと考えられる。

#### ⑤Oygon 湖の西 (④の地点の約 10 km 西)

ここでは現河床に  $13 \pm 1$  m の変位が認められ、1905 年の地震変位量を示していると考えられる。この河床の西側には 2 段の段丘面が認められ、そのうち低位の地形面 (L2 面) 形成時の段丘崖を基準にすると  $24 \pm 1$  m の変位量が計測できる。したがって、1905 年の活動の前にも 1905 年と同程度の変位があったと考えられる。L2 面から得られた試料からは 3220~3400 cal yrBP の年代が得られた。したがって、活動間隔は 3170~3350 年より短く、変位速度は 3.5 mm/yr より大きいと考えられる。

このように、今回の調査により、Bulnay 断層の平均変位速度が初めて見積もられた。また、変位量データから、1905 年の地震時変位量は 7~15 m 程度で場所によりかなりの違いがある一方、地点毎にみると 1905 年とそれ以前の地震時変位量はそれほど違っておらず、変位量に関しては地震どうして再現性があるといえる。プレート内断層の活動の繰り返し方を解明した貴重な事例といえる。地震

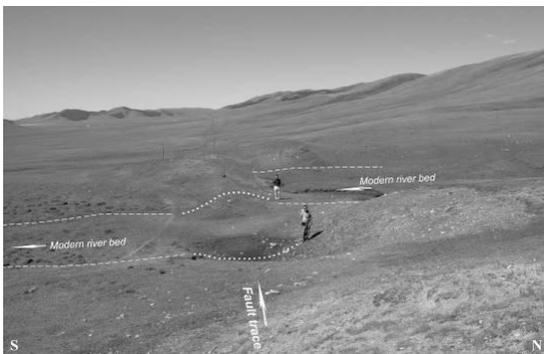


図1 Bust 湖北東における断層変位地形。

西方を望む。北から南 (右から左) へ流下する現河床が左横ずれ変位を受けている。手前の人物左のサグ・ポンドおよび奥の人物左

手前の低いバルジは 1905 年に形成されたと考えられる。変位量は  $13 \pm 1$  m。

時変位量分布と平均変位速度分布は、予察的に考えた場合、相似形になると解釈して矛盾はないが、今後、平均変位速度の見積もりがさらに正確になればより厳密に議論できる。

また今回得られた平均変位速度の値は、従来の測地学的な歪速度と比べて有意に大きい。これは、インドプレートの衝突によるユーラシア大陸の変形様式を明らかにする上で貴重な知見といえる。学会発表はすでに済ませており (杉戸ほか, 2008; 後藤ほか, 2009)、現在、以上の内容を整理し、英文誌への投稿を準備している。

#### (2) 1957 年 Gobi-Altay 地震の地表地震断層と断層線形態の研究、および広域的な活断層分布図作成の開始

この地震断層の分布や地震時の変位量、変位様式は地震直後から詳しく調査されている (例えば, Florensov and Solonenko, 1963; Baljinyam et al., 1993; Kurushin et al., 1997)。一方、この断層帯に沿っては、これ以外にも歴史時代や完新世の活動が知られている。1957 年の地震断層の西端にある Bayan Tsagaan 山脈の南にごく新期の変位地形があり、Khil' ko et al. (1985) は 1958 年の地震に伴う地震断層として記載している。また 1957 年の地震断層の西方では、Chandman や Myangayn 付近に完新世に活動した断層が知られている (Khil' ko et al., 1985)。しかし、Gobi-Altay 断層帯全体を対象として地震断層と活断層の関係や完新世に活動した断層の範囲は検討されていない。

本研究では、CORONA 衛星画像を用いた地形判読と現地調査によって、Gobi-Altay 断層帯の詳細な活断層分布を明らかにした。CORONA 衛星画像は冷戦下の 1959~1972 年に撮影された高解像度で実体視可能な衛星画像である。今回、4 万分の 1 航空写真と同程度の品質で適度な大きさの画像を作成することができ、これを判読に使用した。

判読で作成した活断層分布図をもとに現地調査を実施し、変位地形の観察と記載を行いつつ断面測量を実施した。これらの結果、ごく最近に活動した断層と活断層であるが最近の活動が認められない断層とが区別できた。すなわち、1957 年の Gobi-Altay 地震断層や Chandman, Myangayn 付近の断層では現河床をも断ち切る新鮮な断層崖や撓曲崖が認められるものの (図 2)、1957 年地震断層と Chandman 地震断層との間の約 100 km の区間では後期更新世の活動は認められるものの完新世と思われる地形面に変位が認められないことが明らかとなった。今後、最近に活動した断層の分布形態や変位様式の違いなどから、断層破壊の伝播方向や断層のセグメント区分を厳密に検討し、断層破壊の停

止の要因についても本格的に考察する予定である。学会発表はすでに済ませており（廣

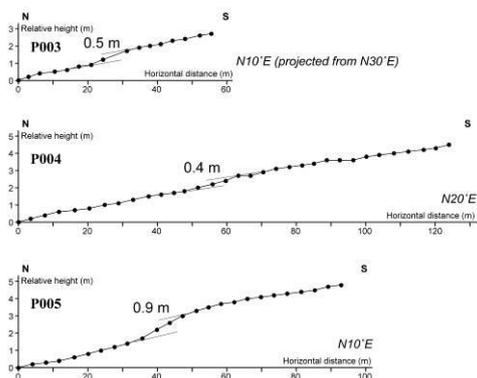
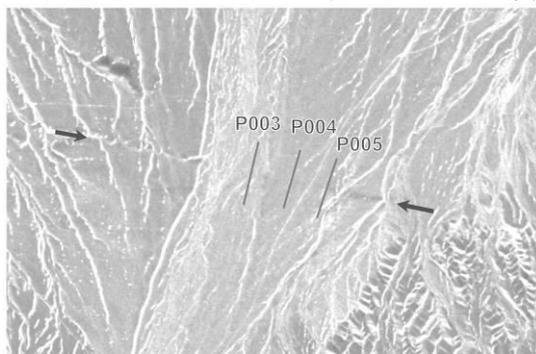


図2 Myangayn 付近の新鮮な断層変位地形。CORONA 衛星画像は上方がおおよそ北。地形断面図は簡易測量により現場で作成。

内ほか、2007 ; Goto et al., 2007 ; 後藤ほか、2007 ; Sugito et al., 2007), 英文誌への投稿を予定している。

このように Gobi-Altay 断層帯を対象として行った CORONA 衛星画像実体視判読に基づく活断層マッピングによって、広域活断層図の作成や、最近の破壊領域マップの作成が可能であることがわかった。

### (3) 写真測量の技術を用いた1回の地震に伴う地表変形の解析

陸域観測技術衛星「だいち」による高分解能ステレオ画像（前視・後視ペア、分解能 2.5 m）を用いた地震断層・断層変位地形のステレオ計測が実現すれば、地震時変位量や累積変位量を面的に多くの地点で計測できるため、地震時変位量分布と平均変位速度分布を飛躍的に高解像度に把握できる。

本研究では、Chandman 付近を例としてステレオ計測を実施し地形断面図を作成して、現地測量により作成した地形断面図と比較してその精度を検証した。その結果、0.5 m 程度の比高の地震断層を計測できることがわかった（図3）。なお、ステレオ画像の標定の際に必要な地上基準点は、現地において GPS により計測した。

また、ALOS/PRISM は UTM 座標をもつ衛星画

像であるため、測地座標をもった活断層マッピングが可能である。さらに、標高データを用いて画像をオルソ化することができれば、変位量・変位速度分布図の基図として有用である。また今回は、写真測量によって大縮尺（1/25,000 以上）の地形図を作成できる可能性が示された。したがって、断層全体の詳細かつ正確な分布図や変位量・変位速度分布図を作成できると考えられる。ただし、変位量計測の精度や地形図作成の精度については、今後さらに詳細に検討する必要がある。

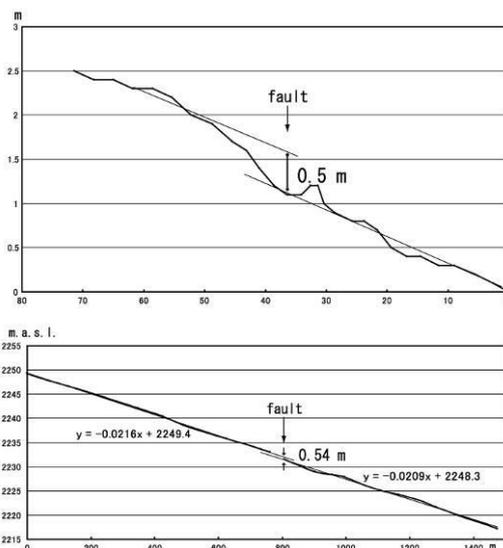


図3 上：実測断面図，下：写真測量結果。

### (引用文献)

Baljinnyam, I. and others, 1993, Ruptures of major earthquakes and active deformation in Mongolia and its surroundings, GSA Memoir 181, 65pp.  
 Florensov, N.A. and Solonenko, V.P., eds, 1963, The Gobi-Altai earthquake, Translated from Russian in 1965, Academy of Sciences of the USSR, 431pp.  
 Khil' lko, S.D. and others, 1985, Strong earthquakes, paleoseismological and macroseismic data, in "Earthquakes and the bases for seismic zoning of Mongolia", Transactions, 41, The Joint Soviet-Mongolian Scientific Geological Research Expedition, Moscow, Nauka, 19-83.  
 Kurushin, R.A., and others, 1997, The surface rupture of the 1957 Gobi-Altay, Mongolia, earthquake, GSA Special paper 320, 150pp.

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計8件）

- ① 鈴木康弘・渡辺満久・中田 高・小岩直人・杉戸信彦・ほか5名, 2008, 2008年

- 岩手・宮城内陸地震に関わる活断層とその意義——関市巖美町付近の調査速報——、活断層研究, 29, 25-34, 査読有.
- ② Kaneda, H., T. Nakata, H. Tsutsumi, H. Kondo, N. Sugito, Y. Awata, S. Akhtar, and the other 8 coauthors, 2008, Surface rupture of the 2005 Kashmir, Pakistan, earthquake, and its active tectonic implications, Bulletin of the Seismological Society of America, 98, 521-557, with an electronic supplement. doi: 10.1785/0120070073, refereed.
- ③ 石黒聡士, 2008, 2004年スマトラ沖地震に伴うアンダマン諸島北西端の地震時隆起量—IKONOSとQuickBird画像の組み合わせによるステレオ計測—, 地理学評論, 81, 535-550, 査読有.
- ④ 堤 浩之・後藤秀昭, 2007, 四国の中央構造線断層帯の最新活動に伴う横ずれ変位量分布, 地震, 2, 59, 117-132, 査読有.
- ⑤ Ota, Y., M. Watanabe, Y. Suzuki, and 3 coauthors, 2007, Style of the surface deformation by the 1999 Chichi earthquake at the central segment of Chelungpu fault, Taiwan, with special reference to the presence of the main and subsidiary faults and their progressive deformation in the Tsauton area, Journal of Asian Earth Sciences, 31, 214-225, refereed.
- ⑥ 杉戸信彦・中田 高・隈元 崇・渡辺満久・堤 浩之・石黒聡士・近藤久雄・鈴木康弘, 2007, 携帯型簡易地形計測装置「Handy Station」の開発と活断層地形調査への活用, 活断層研究, 27, 17-25, 査読有.
- ⑦ 鈴木康弘・渡辺満久, 2006, 新潟県中越地震の地表地震断層 - 地震断層認定の論理と回避すべき誤解 -, 月刊地球, 号外, 53, 90-96, 査読有.
- ⑧ 鈴木康弘・渡辺満久, 2006, 新潟県中越地震に見る変動地形学の地震解明・地震防災への貢献 - 地表地震断層認定の本質的意義 -, e-journal GEO, 1, 30-41, 査読有.
- [学会発表] (計6件)
- ① 後藤秀昭・杉戸信彦・廣内大助・鈴木康弘・D. Enkhtaivan ほか, モンゴル・ブルナイ断層中央部の平均変位速度と活動間隔, 日本地理学会 2009年春季学術大会, 2009年3月28日, 東京.
- ② 杉戸信彦・後藤秀昭・廣内大助・鈴木康弘・D. Enkhtaivan ほか, モンゴル, Bulnay断層中東部の左横ずれ変位地形の予察的検討, 日本活断層学会 2008年度秋季学術大会, 2008年11月8日, 東京.
- ③ Sugito, N., H. Goto, Y. Suzuki, S. Ishiguro, D. Hirouchi, H. Tsutsumi, D. Enkhtaivan, and the other 4 authors, 2007, Distribution of active faults and recent earthquake ruptures along the Gobi-Altai active fault zone, southern Mongolia, AGU Fall Meeting, December 13th, 2007, California USA.
- ④ 後藤秀昭・杉戸信彦・鈴木康弘・石黒聡士・廣内大助・堤 浩之・D. Enkhtaivan ほか, モンゴル・ゴビアルタイ断層帯の活断層と地震断層の分布, 東北地理学会 2007年度秋季学術大会, 2007年10月20日, 福島大学.
- ⑤ Goto, H., Y. Suzuki, S. Ishiguro, N. Sugito, D. Hirouchi, H. Tsutsumi, D. Enkhtaivan, and the other 4 authors, Distribution of active faults in the eastern part of the Gobi-Altay Mountains, based on interpretation of CORONA satellite photographs, Conference Commemorating the 50th Anniversary of the 1957 Gobi-Altay Earthquake, July 25<sup>th</sup>. 2007, Ulaanbaatar MONGOLIA.
- ⑥ 廣内大助・鈴木康弘・石黒聡士・杉戸信彦・後藤秀昭・堤 浩之・D. Enkhtaivan・O. Batkhishig・N. Purevsuren・S. Narangerel・O. Sukhbaatar, 1957年 Gobi-Altay地震の地震断層と周辺活断層分布の予察的検討, 日本地理学会 2007年春季学術大会, 2007年3月20日, 東京.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
鈴木 康弘 (SUZUKI YASUHIRO)  
名古屋大学・大学院環境学研究科・教授  
研究者番号: 70222065
- (2) 研究分担者  
後藤 秀昭 (GOTO HIDEAKI)  
広島大学・文学研究科・准教授  
研究者番号: 40323183  
堤 浩之 (TSUTSUMI HIROYUKI)  
京都大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 60284428  
(平成20年度は連携研究者)  
渡辺 満久 (WATANABE MITSUHISA)  
東洋大学・社会学部・教授  
研究者番号: 30222409  
(平成20年度は連携研究者)  
杉戸 信彦 (SUGITO NOBUHIKO)  
名古屋大学・環境学研究科・研究員  
研究者番号: 50437076  
(平成18-19年度は研究協力者)
- (3) 連携研究者  
廣内 大助 (HIROUCHI DAISUKE)  
信州大学・教育学部・准教授  
研究者番号: 50424916

(平成 18-19 年度は研究協力者)  
(4) 研究協力者

石黒 聡士 (ISHIGURO SATOSHI)  
名古屋大学・環境学研究科・大学院生