

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22300314

研究課題名(和文)チベット高原の拡大過程に関する研究

研究課題名(英文)A study on the lateral growth of the Tibetan Plateau

研究代表者

池田 安隆 (IKEDA, Yasutaka)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70134442

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円、(間接経費) 4,140,000円

研究成果の概要(和文)：ヒマラヤチベット山塊の側方拡大過程を解明するために、衛星画像を用いてチベット高原北東縁の変動地形を探索した。その結果、東部崑崙山脈北麓のクムコル盆地に波長が40 kmに及ぶ大規模な活褶曲(複背斜構造)が存在することを発見した。この構造を横切って数段の段丘が発達し、それらは過去十数万年間の変形を記録していることが分かった。現地調査によって、これらの段丘面から年代測定試料を採取し、宇宙線生成核種(10Beと26Al)を用いた表面照射年代測定を行った。こうして得た地形面の年代に基づいて推定した複背斜の成長速度は1 mm/年のオーダーとなり、チベット高原の側方成長が起こっていることを証拠付けた。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the process of the Tibetan Plateau's lateral growth, we first analyzed satellite imagery over the northeastern margin of the plateau and found a large-scale active anticlinorium (~40 km wide) in the Kumkol Basin north of the eastern Kunlun Mountains. Several steps of fluvio-glacial terraces are developed over the anticlinorium, and are folded and faulted due to activity of the anticlinorium. Quartz-grain samples were collected from these terraces, and were dated by the surface exposure dating method using cosmogenic radionuclides (10Be and 26Al). The growth rate of the anticlinorium thus determined is as high as ~1 mm/yr, indicating that the Kumkol Basin is now being incorporated into the Tibetan plateau.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：地理学, 地理学

キーワード：地形 山脈形成 地殻厚化 アイソスタシー 活断層 表面照射年代

## 1. 研究開始当初の背景

約 50 Ma に始まったインドとユーラシアの衝突以降、ヒマラヤ-チベット山塊はその堆積を増やしてきた。衝突開始後約 30 Myr の間は、主として南北方向の地殻水平短縮とそれに伴う地殻厚化が起こったらしい。約 20 Ma 頃、ヒマラヤ-チベット山塊は、その南縁が Indus-Tsampo Suture Zone から Main Central Thrust へと約 200 km 以上ジャンプし、その結果南へと拡大した。これ以降、ヒマラヤ-チベット山塊の地殻厚化とそれに伴う高度の増加は頭打ちとなり、かわって大規模横ずれ断層群の活動を伴う山塊の側方移動 (lateral escape) が活発になったらしい。この Lateral escape と連動してヒマラヤ-チベット山塊の東方への拡大が始まり、その結果 (地殻厚化にかわって) 面積の拡大による山塊の体積増加が卓越するようになったらしい (たとえば、池田, 1997; Yin & Harrison, 2000)。

ヒマラヤ-チベット造山帯の進化過程において著しい特徴として挙げられるのは、長期間にわたって無変形であった大陸リソスフェアを巻き込んで変動帯が拡大していることにある。中新世後期に始まったヒマラヤ-チベット山塊の側方拡大が最も顕著にあらわれているのは、ツァイダム盆地と雲南である。しかし両地域に挟まれた四川盆地西縁部では側方拡大が生じておらず、造山帯 (チベット高原) とクラトン (四川盆地) との境界の位置は不変であった (Burchfiel et al., 1995)。ちなみに 2008 年の四川省大地震 (Mw 7.9) を発生した龍門山断層は、三畳紀後期から現在までずっと造山帯とクラトンとを境する境界断層であった (たとえば、Burchfiel et al., 1995)。山体拡大の様式にも地域的な差異が認められる。ツァイダム盆地では、foreland 側への断層フロントのジャンプが何度か起こり、それに伴って大陸地殻の造山帯への付加が不連続的に生じたらしい。一方、雲南における造山帯の拡大は連続的に起こっているらしい。

ヒマラヤ-チベット造山帯の地殻ダイナミクスを説明するモデルの中で重要なものは、Tapponier et al. (1982) に代表されるブロックモデルと England and McKenzie (1982) に代表される連続体 (粘性流体近似) モデルである。前者はこの地域の現在のテクトニクスを現象論的にはよく説明するが、造山帯が何故拡大するかを説明しない。後者は、拡大メカニズムを一次近似的にはよく説明するが、ツァイダム盆地-四川盆地西縁-雲南にいたる地域における拡大様式の著しい地域性を説明できない; また、チベット高原内部において著しい定高性があることも、このモデルでは説明できない。近年 Royden (1996) によって提唱された下部地殻流動モデルは、チベット高原の定高性と拡大様式の地域差とを説明しようという点で魅力的で

ある。しかし、このモデルは、拡大様式の地域差をすべてクラトンの力学的性質の差異に帰してしまうので、観測事実に基づいて十分実証されていると言い難い。

## 2. 研究の目的

以上のようにヒマラヤ-チベット造山帯の拡大メカニズムに関して定説はなく、その主たる理由はモデルを拘束する観測事実が不足している事にある。本研究の目的は、ヒマラヤ-チベット造山帯東縁部における地表変形過程を地形・地質学的方法で明らかにすることにより、この巨大な山体の進化のメカニズムに拘束を与えることである。

## 3. 研究の方法

チベット高原東縁部における地表変形を明らかにするために、まず、高解像度で立体視可能な衛星写真と数値地形データの解析とを行い、それに基づいて変動地形 (活断層及び様々なスケールの活褶曲) と地質構造のマッピングを行う。さらにこのマッピング結果に基づいて調査地点を選定し、現地調査を実施する。現地調査では、地質構造、変形した地形面の測量、年代測定試料の採取を行う。年代測定は、宇宙線生成核種 ( $^{10}\text{Be}$  と  $^{26}\text{Al}$ ) を用いた表面照射年代測定法によって行う。

## 4. 研究成果

### (1) 調査地域の選定

チベット高原北東部に位置する Qaidam Basin 周辺域は、チベット高原の側方成長に伴って高原化しつつある領域であり、多くの変動地形を見ることができる。活動的な断層や褶曲は、第四紀に形成された堆積面や氷河地形を変形させ、チベット高原のテクトニクスに関する様々な情報を与えてくれる。そのため、Qilian Shan や Altyn Tagh Fault (ATF), Kunlun Fault (KF) 等を対象として変動地形に関する多くの研究が行われてきた。とくに近年では定量的な議論を行うために宇宙線生成核種 (Cosmogenic Radionuclide; CRN) を利用した研究が増加している。

ALOS 衛星の立体視画像を用いてチベット高原北東縁の変動地形を探索した結果、クムコル盆地 (東部崑崙山脈とツァイダム盆地との境界部に位置する) に大規模な活褶曲 (複背斜構造) が存在することが分かった。本地域の活褶曲は波長が 40 km に及ぶ大規模な構造であるから、その成因は地殻深部まで及ぶ断層運動ないし地殻深部における流動変形によると考えられる。その発達過程の解明はチベット高原の拡大メカニズムに対して重要な拘束を与えるだろう。そこで我々は手始めとして、クムコル盆地内の段丘のうち最

も東に位置する Sijiquan 川流域を対象に地形分類と段丘堆積物のサンプリングを行い、CRN を用いた年代測定を行った。さらに、CNR 年代と地形学的に推定した相対年代との比較を行った。以下では地形分類結果と各サンプルの CRN 濃集量を示し、Sijiquan 川流域における、ひとつ前の氷期から現在までの浸食・堆積プロセスの変化とそれに伴う地形発達について議論していく。

### (2) サンプル採取・測定方法

段丘面と現河床の 6 地点から表層の礫を採取した。主に礫径 2-3 cm の脈石英を一地点ごとに約 1 kg 採取した。各地点のサンプルは、まず 20-25 個の礫をまとめて破碎・混合し、CRN 濃集量を測定した。現河床のサンプルについては 15 個の礫を個別に測定した。採取したサンプルの処理は東京大学大気海洋研究所の横山研究室において、Kohl and Nishiizumi (1992) の手法に従って進めた。まず、サンプルを破碎したのち、250-1000  $\mu\text{m}$  のサイズに分粒した。次に、6M HCl により表面の有機物などと長石などの鉱物を取り除いた。そして表面に蓄積した meteoric な宇宙線生成核種を取り除くため、1%  $\text{HNO}_3$ 、1% HF による繰り返し酸処理によって表面をエッチングした。エッチングした石英粒は HF によって溶解させ、イオン交換によって Be を分離した。Be は BeO の形にして、東京大学原子力研究施設のタンデム加速器研究施設 (MALT) にあるタンデム加速器によって  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  比を測定した。この測定値から CRN 濃集量を求め、最小年代と最大表面浸食速度をもとめた。

### (3) 結果

組むこる盆地東部の Sijiquan 川流域は主に Sijiquan 川の堆積、運搬作用によって形成されている。Sijiquan 川の上流域は、氷期の山麓扇状地によって広く覆われている。最上流域の山地斜面から発する流水はこれら山麓扇状地堆積物の下を伏流するので、現在山地斜面で生産されている碎屑物は氷期に形成された山麓扇状地を越えて下流には達していない。現生の Sijiquan 川が運搬している碎屑物は主として、山麓扇状地扇端部の湧水帯に谷頭を発するガリー状の一次谷からもたらされている。この湧水帯は、4090 m ~ 4100 m の等高線に沿って発達する。

Sijiquan 川と複背斜構造 (クムコル複背斜) とが直交する  $37.1^\circ\text{N}$  から  $37.2^\circ\text{N}$  の間には、段丘 (Sijiquan 段丘群) が発達している。これらの段丘は大きく分けて高位から順に H 面群と L 面群とに分類される。H 面群 (Ha, Hb, Hc) は Sijiquan 川の両岸にパッチ状に分布している。河川に沿って投影した地形断面からは、H 面群が北へ傾動し、北縁部で撓曲して沖積面下へと没している様子が分かる。L 面群は 2 段、高位から順に L1, L2) に分けることができる。L2 面は、

Sijiquan 川に沿って断続的に続く幅の狭い段丘 (L2a, L2b, L2c, L2d) である。低位面も高位面と同様に北縁で撓曲し、沖積面下へ没する。L1 面の河床からの高度は約 20 m、L2 面は 10~15 m であった。

こうした地形の特徴から、それぞれの地形面が氷期・間氷期の気候変動に対応して形成された過程を推定することができる。高位面群と L1 面との間にある段丘崖は、ソリフラクションの作用を受けた緩やかなスロープを形成していることから、この段丘崖は河川の下刻によって形成された後、少なくとも一回の氷期を経験していることが推定される。調査地域周辺の段丘面形成年代に関する研究は、氷期と間氷期の気候変動にしたがって段丘面の堆積と下刻が進行したことを示しており (Hetzel et al., 2012; Mériaux et al., 2004 など)、本地域においても同様のプロセスを考えることができるだろう。したがって、H 面群はひとつ前の氷期に堆積段丘として形成され、L1 面は最終氷期に堆積段丘として形成されたと推定される。そして、河床の下刻や上流部におけるガリー浸食は、後氷期以降に進行していったと考えられる。

2011 年に行った Sijiquan 川流域での現地調査では、現河床上の 1 点、H 面群上の 3 点、L 面群上の 2 点から表面照射年代測定を行うためのサンプルを採取した。SP001, SP006 の採取地点は右岸の高位面 (Ha) で、段丘崖から十分に離れた場所のほぼ水平な地点から SP001 を採取し、段丘崖付近から SP006 を、低位扇状地 F2 上の残丘 (Hc) から SP003 を採取した。現河床でサンプル (SP005) を採取する際には、採取地点近傍の段丘崖からの影響を受けないよう、段丘崖からは十分離れた地点から河床礫を採取した。

各サンプルについての  $^{10}\text{Be}$  の生成速度は Stone (2000) に基づき、緯度と標高から求められている。この時、壊変定数として  $4.56 \times 10^{-7} \text{ yr}^{-1}$ 、石英礫の密度として  $2.62 \text{ g/cm}^3$ 、中性子の平均減衰長として  $160 \text{ g/cm}^2$  を与えた。その結果、H 面の最小年代は 75~128 ka、L2 面は 24~43 ka、現河床は 77 ka となった。

### (4) 考察

SP005 の礫が示す最小年代のなかで最も古い年代は 148 ka、最も新しい年代は 20ka であった。サンプル SP005 の礫の年代は高位面の地形学的に推定した時期 (約 140 ka) とおおよそ一致し、平均値付近の値を示す CRN 濃集量は SP003 や SP006 の示す年代とほぼ一致している。これらのことは現河床の堆積物が周囲の扇状地面や段丘面からの二次堆積物であることを示唆している。現河床の礫が周囲からの二次堆積物であるという推定は地形分類結果からも示されており、扇状地の堆積した時期と現在とでは、河川が運搬する碎屑物の供給域が劇的に変化していることを示唆している。

段丘面の形成年代を厳密に推定するためには、堆積前の濃集量 (inheritance) を考慮する必要がある。現河床の礫がすべて再移動の礫で、濃集量のばらつきがすべて埋没深度の違いによってもたらされたと考え、最小の値は inheritance の最大値とみなせる。つまり、この地域の inheritance は、 $0 \sim 1.45 \times 10^6$  atoms/g の間の値となる。

Inheritance を踏まえての H 面の最小年代は 108~129 ka となる。この値は Penultimate Glacial より新しいが、表面浸食の速度を考慮すれば地形学的な推定と矛盾しない。仮に形成年代が 140 ka であった場合の浸食速度は 0.7~2.2 mm/kyr であり、これはチベット高原内部の基盤岩の浸食速度とほぼ一致する。また、礫毎の測定結果のうち最も濃集量の大きかったものの最小年代は 120~140 ka であった。もしこの礫が集水域である Penultimate Glacial に堆積した扇状地面の表層から埋没することなく運搬され、河床に再堆積した礫であるとしたら、この値も地形学的な推定を支持する結果である。ただし、あくまで礫一つの値であるため、個々の inheritance のばらつきを反映している可能性も否定できない。

#### (5) 結論

Sijiquan 川流域の後期更新世以降の地形発達過程を推定すると、以下ようになる。

Penultimate Glacial: H 面とそれに連続する扇状地が堆積する。

Last Interglacial: 河川の運搬と下刻作用が卓越し、その結果 H 面が離水し Sijiquan 川の峡谷帯が形成される。

Early last glacial: 間氷期から氷期へと漸移するとともに、堆積作用が次第に卓越しはじめ、Sijiquan 川の峡谷帯が埋積されて L1 面が形成される。

MIS 3 の亜間氷期ないし完新世になると、再び下刻が進行し、L2 面が形成される。上流域の河川は、氷期に広く形成された山麓扇状地堆積物下へ伏流するために、上流山地斜面からの碎屑物は下流に運搬されなくなり、代わって山麓扇状地末端からの湧水によるガリー浸食で生産された二次堆積物が下流部に運搬されるようになった。

地形学的に推定された上記のサイクルは、各段丘面の核種濃集量や表面照射年代によって支持され、クムコル盆地内の段丘地形が氷期・間氷期変動に伴う堆積・プロセスの変化によって形成されたことが定量的に示された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

Goldfinger, Chris, Y. Ikeda, R. S. Yeats, and J. Ren: Superquakes and supercycles, *Seism. Res. Lett.*, 査読あり, Vol. 84, 2013, pp. 24-32, doi:

<http://dx.doi.org/10.1785/0220110135>

池田安隆, 岡田真介, 田力正好: 東北日本島弧-海溝系における長期的歪み蓄積過程と超巨大歪み解放イベント, *地質学雑誌*, 査読あり, 118 巻, 2012, 294-312, doi:

[10.5575/geosoc.2012.0018](http://dx.doi.org/10.5575/geosoc.2012.0018)

Okada, S., and Y. Ikeda: Quantifying crustal extension and shortening in the back-arc region of Northeast Japan, *J. Geophys. Res.*, 査読あり, Vol. 117, 2012, B01404, doi:10.1029/2011JB008355

[学会発表](計 7 件)

Ikeda, Y.: Strain buildup and release in the Northeast Japan orogen over geologic and geodetic time scales with implications for gigantic subduction earthquakes, The Second G-EVER International Symposium and the First IUGS & SCJ International Workshop on Natural Hazards, 2013 年 10 月 20 日, 仙台市産業情報プラザ(宮城県). Shirahama, Y., Y. Miyairi, H. He, B. Fu, K. Kano, T. Echigo, Y. Yokoyama, and Y. Ikeda: Remote sensing analysis of tectonic geomorphology in the Kumkol Basin at the northeastern margin of the Tibetan Plateau, AOGS 2013, 2013 年 6 月 25 日, プリスペン(オーストラリア).

白濱吉起, 宮入陽介, 何宏林, 傅碧宏, 狩野謙一, 越後智雄, 横山祐典, 池田安隆: 宇宙線生成核種が示すチベット高原北東縁 Kumkol 盆地の第四紀後期における段丘発達過程, 日本地球惑星科学連合大会, 2013, HGM22-05, 2013 年 5 月 21 日, 幕張メッセ(千葉県).

Ikeda, Y.: Tectonic geomorphology on regional and global scales: an old methodology upon new technologies, International Symposium on Earth Observation for Arid and Semi-Arid Environments, 2012 年 9 月 21 日, カシユガル(中国).

Shirahama, Y., Y. Ikeda, H. He, B. Fu, K. Kano, T. Echigo, Y. Miyairi, Y. Yokoyama: Tectonic geomorphology and surface exposure dating of the Kumkol basin at the northern margin of the Tibetan Plateau, AOGS 2012, 2012 年 8 月 15 日, シンガポール(シンガポール).

池田安隆: 超巨大地震の地学, 東京地学

協会春季公開特別講演会「超巨大地震の真相に迫る」, 2012年6月9日, 弘済会館(東京都).

白濱吉起, 池田安隆, 何宏林, 傅碧宏, 狩野謙一, 越後智雄, 宮入陽介, 横山祐典: チベット高原北縁 Kumkol Basin の変動地形と表面照射年代, 地球惑星科学連合大会, 2012年5月25日, 幕張メッセ(千葉県).

〔図書〕(計2件)

池田安隆: プレート沈み込み帯の変動と地形の進化, 松本良・浦辺徹郎・田近英一(編)「改訂版・惑星地球の進化」, NHK出版, 2013, 65-87.

箕浦幸治, 池田安隆: 地球のテクトニクス 1: 堆積学・変動地形学, 現代地球科学入門シリーズ9, 共立出版, 2011, 202頁.

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

池田 安隆 (IKEDA, Yasutaka)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号: 70134442

(2)研究分担者

狩野 謙一 (KANO, Ken'ichi)  
静岡大学・学内共同利用施設等・教授  
研究者番号: 30090517

石山 達也 (ISHIYAMA, Tatsuya)  
東京大学・地震研究所・助教  
研究者番号: 90356452

宮入 陽介 (MIYAIRI, Yosuke)  
東京大学・大気海洋研究所・研究員  
研究者番号: 30451800

(3)連携研究者

岡田 真介 (OKADA, Shinsuke)  
東北大学災害科学国際研究所・助教  
研究者番号: 50626182

越後 智雄 (ECHIGO, Tomoo)  
地域地盤環境研究所・研究員  
研究者番号: 60450904

(4)研究協力者

何 宏林 (HE, Honglin)

中国地震局・地質研究所・教授

傅 碧宏 (FU, Bihong)

中国科学院・地質地球物理研究所・教授

白濱 吉起 (SHIRAHAMA, Yoshiki)

東京大学・大学院理学系研究科・博士課程  
大学院生