

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05211

研究課題名(和文) Lake shoreline deformation and crustal magmatic flow in the Andes

研究課題名(英文) Lake shoreline deformation and crustal magmatic flow in the Andes

研究代表者

WALLIS R・Simon (WALLIS, SIMON)

東京大学・理学系研究科・教授

研究者番号：30263065

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,710,000円

研究成果の概要(和文)：アンデス高地中に約1万年前に複数の広大な湖が広がっていた。気候変動により湖が蒸発し、ウユニ塩湖が代表する巨大な塩湖に変身した。塩湖の盆地周辺の斜面には段丘が波の作用によって刻まれている。段丘は過去の優れた水平マーカである。段丘の標高・形成時期を決定するために計27箇所におけるGPS測量及び、段丘と同時に形成した炭酸塩岩の年代測定を行った。その結果、同じ段丘群が場所によって、約20mの高低差があることが明らかになり、約1万年間における地殻隆起を示すと考える。隆起量が湖の中心ほど大きいので、隆起の原因は湖の水位低下と中部地殻における柔らかい岩石の流入によるものであると考える。

研究成果の概要(英文)：Until about 10,000 years ago there were multiple large lakes in the Andean plateau region. As a result of climate change these lakes dried up resulting in the formation of salt flats such as the famous Uyuni area. There are numerous shorelines cut into the slopes surrounding the basin. These shorelines are excellent paleo horizontal markers. The elevations of these shorelines were measured using GPS surveying in 27 localities and the ages estimated by dating carbonate sediments associated with the shorelines. The results show that the same group of shorelines locally shows uplift of about 20 m that occurred over about 10,000 yrs. The main uplift is found in the center of the basin suggesting it was caused by a reduction in water level and load on the crust resulting in inflow of weak mid crustal rocks.

研究分野：構造地質学、テクトニクス

キーワード：湖 段丘 年代 測量 トウファ 隆起

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

1. 研究開始当初の背景

アンデス造山域の中央部に位置するアルティプレーノ高地には複数の大規模なカルデラが分布する。この火山活動集中域は Altiplano-Puna volcanic domain (APVD) という。中新世以来、計 $>12000 \text{ km}^3$ 珪長質の噴火物が放出された(De Silva & Gosnold 2007)。最新の大規模な噴火が約 250 ka (Sparks et al 2007)であった。一方、近年 InSAR 衛星データ解析により APVD 域において複数の火山が急速的に膨張していることが明らかになった。最大年間数センチである。膨張・隆起する火山の周辺に同心円状に沈降する領域がある(Pritchard & Simons 2002)ことから、地殻におけるマグマの流動が膨張の原因であると推定される。新しい大規模なカルデラ噴火につながるかが注目されている (del Potro et al. 2013)。

地球物理学的探査により、APVD の下方に部分溶融した 200 km 以上の幅を持つ中部地殻領域(Altiplano-Puna magmatic body = APMB)の存在が明らかになった (e.g. del Potro et al. 2013)。重力、電気伝導、地震波速度構造などの調査で APMB の現在の状態について情報を入手することが可能であるが、地質学的タイムスケールにおける存在とその安定性について地質学的なアプローチが必要である。アルティプレーノに分布するカルデラの安定性を評価する上で APMB におけるマグマの滞留時間に関する情報が必要である。

Altiplano-Puna volcanic domain の存在に加えて同地域の大きな地質学的特徴は複数の大規模な湖盆地の存在にある。約 10-15 ka の間、APMB の存在領域を含むアルティプレーノにおける降水量は現在よりはるかに多かった。また同地域の北部(ボリビア南部)にはかつて広大な湖が存在していた。10 ka 以降、降水量が減少し、湖水が縮小した。その結果、広大な湖系が干上がり、複

数の盆地が露わとなった。観光地として有名なウユニ塩湖とその北方に分布する同規模なコイバサ塩湖が一つの大きな盆地をなしている。これらの盆地斜面には、かつて湖が存在したことを示す段丘地形が認められる。これらの段丘は湖の水面で発生する波の作用のよって形成したと考えるので、同時にできた段丘を特定できれば、優れた水平マーカーとして使える可能性がある。ボリビア南部の湖段丘が 100km スケールの水準器として利用できるところに着目したのが本研究の最大の特徴である。もともと水平だった段丘が現在場所によって高低差が生じている場合、形成後の地殻変動があったと言える。

湖の水がなくなると横方向に中部地殻が流入し、盆地が隆起するように力が働く。中部地殻が弾性的に強いのであれば、水位が下がっても殆ど隆起が起きない。一方、中部地殻が部分溶融した岩石やマグマが存在するのであれば、弾性的強度はほとんどなく、中部地殻における流入と大きな隆起が期待される。その最大値は水と流入する岩石・マグマと水密度比と消滅した水の深さで決まる。一般的な値を使うと最大 possible の隆起が約 $0.4 \times$ 水の深さである。15-10 ka の間、ウユニ・コイバサ湖の最深時期では盆地の底より約 120 m 高かったと言われている(Placzek et al. 2006)ので、段丘の隆起が最大 50m に達することが可能である。段丘の隆起を推定するために、段丘の標高に加えて段丘の年代も必要である。何故なら、段丘は複数形成しており、部分的にしか分布していないので、対比できる基準が必要からである。

ウユニ塩湖などの地域は地球科学的に注目を浴びる地域であり、すでに詳細な研究が行われてきた(e.g. Placzek et al. 2006)。トゥファの年代測定と標高に関するデータが公表されている。ただし、年代測定を中心

とする研究は標高決定の精度が ± 20 m 程度であり、隆起量と同程度のものであるために、隆起分布から地殻の物性に関する定量的な議論を行うために必要な精度は持っていない。また、隆起の定量的に議論するために段丘の精密な標高決定が行われた先駆的な研究もある(Bills et al. 1994)。ただし、段丘決定に関しては地形を頼りにして、同一段丘かどうかを検討するために必要な情報が不足している。

2. 研究の目的

本プロジェクトは17–10 ka ポリビア南部に分布した湖の水位低下による隆起に着目した。段丘の隆起量は水位変化に起因する荷重低下、上部地殻の弾性層の厚さ、そして中部地殻の粘性と経過時間で決まる。中部地殻が部分溶融しているならば、弾性的に振る舞う上部地殻の層厚がせいぜい数キロであり、中部地殻の粘性が低いと予想されるので、湖が消滅した後、数千年で盆地が大きく隆起するはずである。本研究では、盆地の隆起量を推定して、中部地殻の流動の定量化を行い、APMB の滞留時間を制約することが目的である。

3. 研究の方法

現地調査に出かける前に衛星画像観察により、ウユニ・コイバサ盆地に明瞭な段丘地形を観察できる地域を特定した。そして、計4回ポリビアに入り、選別された地域を中心に調査を行った。調査においては、キネマティックGPSを用いて複数の斜面プロフィールの測量を行い、また同プロフィールに露出したトゥファ岩石試料を採取した。トゥファは多孔質炭酸塩岩であり、 ^{14}C 法およびU-Th法によって年代測定が可能であり、段丘の形成年代と対比に用いられる。

計27箇所では盆地の底から斜面に登り、1秒単位でデータを取得した。出発点・終了点と途中数カ所で約5分の測定により精密

位置決定を行った。水平誤差が数mmであり、標高誤差は数センチと推定した。

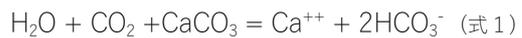
盆地底に近いところにはトゥファが幅広く分布し、場所によって10mほどの厚さにもなる。一方、斜面に上がるにつれて、トゥファの量が減少する。一般的にプロフィールはトゥファがなくなる高さまで行ったが、それより標高が高いところに明瞭な段丘地形があった場合、その段丘地形を含めるようにプロフィール測量範囲を広げた。隆起量は盆地の中心が最大になると予想される。段丘の相対的な隆起、つまり傾斜を明らかにするために同時に形成した段丘を複数箇所での標高を決定しなければならない。また隆起量が異なる地域で測量しないと段丘の傾斜を認識できない。そのために隆起量が大きいと考える盆地の中心に近いところと隆起量が小さいと考える中心から遠いところでの測量が必要である。最初の調査は盆地の中心に近い元島や半島のところでの測定を意識して、調査を行なった。

一方、後半の現地調査では、中心から離れた地域での測量を意識した。すべての測量プロフィールにおけるトゥファを採取した。

補助的な測量法としてドローン撮影も行った。プロフィール測量の際、やや重い機材を持って歩かないと行けないので、急な斜面など徒歩で立ち入り困難な地域は測量に不向きである。そのために、段丘の高さを決定するために最適な地域の測量ができない場合もある。また、プロフィールは二次元的であり、段丘の横方向の繋がりに関する情報が不足している。そこで、現地ドローンを利用して、Digital Elevation Modelを作成し、段丘の広がりについても確認した。

段丘の対比と形成年代を決定するためにトゥファを採取した。ウユニ・コイバサ塩湖や周辺域の段丘と付随するトゥファが3つの段丘群(S1, S2, S3)を大別でき、塩湖底

面から高さ別に S1 ≈ 5 m、S2 ≈ 60 m、S3 ≈ 100 m に分布する。S1 ~ S3 のトゥファサンプリの薄片のポイントカウンティングを行った結果、S1 において生物由来組織、特にシアノバクテリアの痕跡であるフィラメントが平均して 13% 存在しているが、S2・S3 領域では 4-5% しかない。S3 の中でも最も標高が高い場所で採取したトゥファは一般に基盤岩の割れ目及び空洞を埋める様に形成した「割れ目トゥファ」のフィラメントの割合が 1.7% と非常に低い。トゥファ沈殿には水中の CO₂ 濃度減少が必要(式 1)であり、シアノバクテリアなどの光合成、すなわち生物学的起源のものが多いが、波作用による水の攪拌による物理的な脱ガスによるものもある。



割れ目トゥファの特徴から水面付近で形成したと解釈でき、形成した当時の水位を推定するのに適していると言える。また、ポイントカウンティングから割れ目トゥファには二次的に成長した若いスパーライトが少ないことが明らかになり、形成した当時の同位体組成を保持している可能性が高い。したがって、割れ目トゥファの放射年代と高度はかつて存在した湖水位とその年代を推定するのに最適である。

本研究では、¹⁴C 年代測定法および U-Th 法によりトゥファの年代測定を行った。主として割れ目トゥファ試料の測定を行ったが、先行研究と比較するためにより低い位置で採取したトゥファ試料も測定した。

トゥファ試料は細粒なミクライトや二次的に成長したスパーライトに加えて、火山灰や化石などからなっており、かなり不均質である。年代測定に最適な試料は直接湖水から沈殿したものであり、火山灰や生物起源のものを避けたい。¹⁴C 年代測定には名古屋大学宇宙地球環境研究所の AMS を利用した(Nakamura et al. 2000)。この測定

法にはわずか 2-4 mg の試料で十分である。そのために小さい領域を選別し、マイクロドリルで必要な量を削り取った。選んだ領域は白あるいはクリーミー色かつ均質な特徴があり、生物起源の黒っぽいところや透明感のある二次的に成長したと思われるスパーライト領域を避けた。面汚染を下げるために試料は表面から数 mm-数 cm のところから採取した。採取する前に岩石試料をダイヤのカッターで切断し、その後蒸留水で 20 分間超音波洗浄した。また、一週間乾燥させてから直径約 5 mm の穴をドリルであけた。得られた年代は IntCal13 補正を利用した(Reimer et al., 2013)。また、手法の恒例に従って 1950 年を基準として表示されている。合計で 38 試料を測定した。

計 12 個の試料を選んで U-Th 年代測定も実施した。多くの試料はプロフィールの終了地点にある割れ目トゥファであったが、先行研究と比較するために一部はそれより標高が低いところから採取したものも測定した。U-Th 年代測定には ¹⁴C 年代測定試料より大きい試料が必要である。¹⁴C 年代測定試料と同様に、岩石試料をダイヤのカッターで切断し、約 2 cm³ の立方体を切り出し、蒸留水中で超音波洗浄を行い、そして一週間乾燥させた。年代測定は台湾国立大学において Thermo-Electron MC-ICP-MS を使って測定した(Shen et al. 2012)。正確な年代測定には ²³⁰Th/²³²Th 比の初生地に関する情報が必要である。ここでは、原子比が 2.6 ± 1.6 と仮定した。この値は同地域における先行研究を参考にした(Placzek et al. 2006b)。結果が分析日から遡る形で表示されているので、¹⁴C 年代と異なる表示である。

両年代測定法の結果が数百から千年程度ずれており、U-Th 年代が系統的に古い結果を示す。¹⁴C 年代法で炭酸塩岩の年代測定を行うと古い炭素の存在がしばしば問題にな

る。ただし、その場合、 ^{14}C の年代がU-Th年代より古くなるはずである。今回の逆なので、古い炭素の存在がその問題の原因ではない。

U-Th法による正確な年代を推定するために、 ^{230}Th の初期値を正確に見積もらないと行けない。観察された系統的な年代のずれがその見積もりの不確定さに原因がある可能性がある。ただし、先行研究はアイスクロン法で今回と同じ調査地域においてその初期値をすでに推定している。その推定はある程度誤差があり、その誤差に起因する年代の誤差を考慮しても実際に見られる年代のずれを説明できない。

^{14}C 法測定には数mgの試料で測定十分可能であるが、U-Th法測定に用いる試料は数センチ立方体である。さらに、 ^{14}C の試料はできるだけ表面に近く、表面の汚染が問題にならない程度の距離で採取している。一方、U-Th法年代測定用の試料はある程度緻密なところでないバラバラになるということもあり、採取された岩石試料は岩石試料の内部から切り取った。岩石試料の内部は表面より先に成長したところであり、より古いところでもあるはずである。先行研究および今回の研究の結果、数センチのトゥファは成長するのに数100年–1,000年かかることが明らかになった。すると、両測定は正しい値を示しており、年代のズレは同一岩石試料中の形成年代の違いを示していると考えられる。

先行研究は年代測定・標高・堆積構造観察の組み合わせによってウユニ・コイパサ湖が17–11 ka大きく広がり、最大120mの水深に達したと推定している。また、約14–13 ka水位が数百年のタイムスケールで大きく下がり、その後より小さい湖が形成されたと提案されてきた(Placzek et al. 2006)。今回の新しいデータを加味すると2回目の

水位上昇は一回目とほぼ同じであったことが明らかになった。

水位変化に関する先行研究では、段丘の高さに関する情報の誤差は大きくて、隆起も十分考慮されていないので、その修正も必要である。

本研究と関連して、マグマ流動と珪長質メルトが結晶から分離するプロセスなどに関する研究も行なった。世界で一番若い露出した花崗岩体である滝谷岩体での調査を行い、結晶の多いマグマからメルトが分離するプロセスに着目した。また、同時に噴火した可能性のある火山層の地球化学的特徴を明らかにして、マグマ溜まりと火山噴火物との関連性を明らかにした。また、南米のチリでは、銅鉱床を伴った火成活動の継続時間を調べて、同地域におけるマグマ流入の継続時間スケールが数百万年であったことを明らかにした。

4. 研究成果

年代測定の結果、ウユニ・コイパサ塩湖域におけるトゥファが主に17–10 kaに形成したことが明らかになり、先行研究と調和的な結果が得られた。U-Th測定結果に関しては極端に年代測定誤差の大きい(数千年を超える)試料は碎屑性火山灰が多く含まれることが判り、解析から除外した。

同時期に形成した段丘とトゥファの標高と位置関係をみるとウユニ・コイパサ盆地の中心ほど隆起量が大きいことが明らかになった。盆地中心から離れていくと標高が下がり、最大の差が約25mである。また、隆起の分布が盆地の輪郭と類似しており、隆起の原因が広域的なテクトニクスであると考えにくい。ウユニ・コイパサ湖の湖水消滅とそれに伴う地殻への負荷の減少による隆起であると考えられる。

隆起量から地殻の力学的な特徴を調べるのに、ウユニ・コイパサ盆地における水位

の変化情報も必要である。今回の研究では、従来の研究より高い水位が約11,000年前まで維持されていたことが明らかになった。また、従来の最高水深推定が120 mであったが、その推定には隆起が考慮されておらず、約25 mを過剰見積もりになっていることが明らかになった。

中部地殻におけるマグマの貯蔵庫があるならば、推定粘性は $<10^{10}$ Pa s であるはずである (Takeuchi 2011)。同様な低粘性を持つ流体が中部に分布すると流動緩和時間スケールが盆地形成の約1万年より遙かに短くて、隆起が最大値の40 mに達すると予想される。但し、実際にその半分くらいしか認められなく、マグマの長期的に存在を否定する結果となった。

参考論文 De Silva, S. L. & Gosnold, W. D. 2007. *Journal of Volcanological Research* 167, 320–335. / Takeuchi S. 2011. *Journal of Geophysical Research* 116, B10201/Sparks R. S. J. et al. 2008. *American Journal of Science* 308, 727–769. / Pritchard, M. E. & Simons, M. 2002. *Nature* 418, 167–171. / Del Potro, R. et al. 2013. *Geophysical Research Letters* 40, 2044–2048. / Placzek, C. et al. 2006. *Geological Society of America Bulletin* 118, 515–532. / Bills, B. G. et al. 1994. *Geophysical Research Letters* 21, 293–296.

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)(すべて査読有り)

- 1) Debbie P.W. Tsang, Simon R. Wallis, Koshi Yamamoto, Makoto Takeuchi, Hiroshi Hidaka, Kenji Horie, Brian C. Tattitch. 2018. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Cerro Colorado porphyry copper deposit, northern Chile. *Ore Geology Reviews* 93, 114–140. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.019
- 2) Nicola Clark, Simon Wallis. 2017. Flamingos, salt lakes and volcanoes: hunting for evidence of past climate change on the high Altiplano of Bolivia. *Geology Today* 33, 101–107. doi.org/10.1111/gto.12186
- 3) Eva Hartung, Luca Caricchi, David Floess, Simon Wallis, Satoru Harayama,

Kalin Kouzmanov, Massimo Chiaradia. 2017. Evidence for Residual Melt Extraction in the Takidani Pluton, Central Japan. *Journal of Petrology* 58, 763–788. doi.org/10.1093/petrology/egx033

[学会発表](計5件)

- 1) ウォリス サイモン, 花本夏輝, 南雅代, 中村俊夫, 鷺谷威, C.-C. Shen, C.-Y. Huang. ボリビア国南部のウユニ塩湖周辺における湖トウファ形成と年代測定. 2017年度名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究シンポジウム. 2018年.
- 2) 花本 夏輝, ウォリス サイモン, 鷺谷 威, 南 雅代, Shen Chuan-chou, Huang Chun-yuan. ボリビア国のウユニ塩湖周辺に分布する湖トウファの年代と構成. 日本地質学会代124年学術大会, 2017年.
- 3) Tsang, DPW, Wallis, S. & Tattitch, B. Age and Duration of Igneous Activities in the Cerro Colorado Cu Mine, N. Chile, Constrained by Zircon Geochronology, *Goldschmidt* 2016. 2016年
- 4) Eva Hartung, Luca Caricchi, David Floess, Simon Wallis, Satoru Harayama. Takidani Granodiorite: Insights into a young magma chamber. Swiss Geoscience Conference (国際学会) 2015年
- 5) Simon Wallis, Takeshi Sagiya. Paleoshoreline profiles of Lake Nam Co indicate strong Tibetan mid crust. 2nd Japan-Taiwan Workshop on Crustal Dynamics (国際学会) 2015年.

[図書](計1件)

- 図説 地球科学の事典, 朝倉書店, 1.9章「高地の形成と拡大」2018年 ウォリス サイモン pp. 18–19. ISBN978-4-254-16072-7 C3544

6. 研究組織

(1)研究代表者

ウォリス サイモン (WALLIS, Simon R.)
東京大学・理学系研究科・教授
研究者番号: 30263065

(2)研究分担者

鷺谷 威 (SAGIYA, Takeshi)
名古屋大学・減災連携研究センター・
教授
研究者番号: 50362299