

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24710022

研究課題名(和文) アルタイ山脈氷河群の質量収支が温暖化に対して示す応答性の評価

研究課題名(英文) Evaluation of glaciers response to warming in the Altai Mountain Range

研究代表者

紺屋 恵子 (Konya, Keiko)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球表層物質循環研究分野・技術研究員

研究者番号：70506419

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：モンゴル～ロシアにわたるアルタイ山脈の氷河について、南北比較を行った。1. ロシア・アルタイのマリーアクトゥル氷河、2. モンゴルのポタニン氷河および 3. ムンクハイルハン山塊のドゥールー氷河の3つ氷河を比較した。1はELAも氷河の存在標高が低く、2と3は同程度で、1よりやや高い標高に位置していた。気象条件では、1で気温が低く降水量が多い。一方2と3では気温が高く降水量が少ない。地理的には1と2が近いが、氷河の特徴は2と3で近いことがわかった。世界的には1での観測値がアルタイ山脈の代表値として使われているが、全域平均では1よりも小さい値となる。

研究成果の概要(英文)：We have compared mass balance of glaciers in Altai mountain area. From North to South, we have studied three glaciers: (1) Aktru glacier in Russian Altai, (2) Potanin Glacier and (3) Munkhairkhan in Mongolian Altai. The glacier 1 is situated in higher altitude and its ELA is higher. On the other hand, glacier 2 and 3 are situated in lower altitude. Although the glacier 1 and 2 is situated closer, the mass balance feature of glacier 2 and 3 are similar. The glacier 1 is monitored for a long time and regarded as representative glacier. However, mean mass balance value for Altai mountain range is lower than the glacier 1.

研究分野：氷河学

キーワード：アルタイ 氷河 質量収支

1. 研究開始当初の背景

近年の地球温暖化による地球上の雪氷域の減少が危惧されている。雪氷域の減少により、海水準変動、水資源の枯渇、水循環の変化、地球のアルベドの低下、などの影響が懸念されているためである。その中で、氷河の融解による影響として、海水準上昇 (IPCC, 2007 など)、水資源の減少が挙げられる。内陸の氷河の融解水が、世界の多くの場所で水資源として利用されている。季節積雪が多くなる地域もあると予測されているが、観測によれば世界のほとんどの場所で氷河は減少する一方である (IPCC, 2007 など)。また、小さな山岳氷河ほど温暖化に対して敏感に応答するため、小さな氷河の消失が懸念される。

ユーラシア大陸中央に位置するアルタイ山脈では、高山地域に 2102 の氷河が存在する。乾燥域であるために蒸発量が多く、多くの氷河の流出河川は海へ流出していない。河川中流の水は住民に生活用水として利用されているため、今後利用できる水の総量、季節変動はこの地域にとって重要なテーマである。しかし、この地域での氷河の研究は少なく、氷河研究にとってデータの空白域となっている。

氷河の質量収支に近年大きな後退、縮小がみられることが分かった (Konya et al. 2010)。その理由は主に夏季の気温上昇である (紺屋他, 2009)。この地域では夏に降水量が多く、標高の高いところでは雪となる。夏の降雪が氷河の主な涵養源となっている。しかし温暖化により降雪高度が上昇し、氷河全域に対する氷河涵養域が減少している。

一般に、氷河下流域では融解等による消耗量が多い。上流域で降雪を蓄え、氷河が存在するためのバランスをとっている。多くの氷河では、氷河の中流域に年間の収支が 0 (平衡) となる高度がある。その標高は平衡線高度 (ELA) と呼ばれ、気候変化の氷河への影響を見る際の指標として使われる。質量収支と高度の関係と、平衡線高度から、個々の氷河の質量収支が計算できる (図 1)。質量収支と高度の関係は、同じ地域の氷河に関しては近い値をとることが知られている。氷河の変動に関しては、質量収支や ELA よりも氷河の末端位置の方が簡単に判別できるが、末端位置は流動速度の影響が大きく、質量収支変動は異なる変動を示す。そのため、ELA の変動と氷河の分布する標高帯が、質量収支を知る上で重要となる。

2. 研究の目的

本研究では、限られた現地観測データを増やし、山域スケールで内挿することで、アルタイ山脈全域について扱う。山域スケールではわずかな気候の違いが氷河の応答の違いとなって現れる。本研究では、これまでの観測から明らかになった当地域での氷河の特徴と、その他の氷河での ELA の観測から、

山域全体の氷河の質量収支を計算する。これまで研究を行ってきた氷河はアルタイ山脈中央であるため、全域の平均的な値をとっていると予想できる。また、その氷河は近年の変動が激しいため、アルタイ山脈全域において地球温暖化の影響による質量収支変化が激しく進んでいると予想できる。しかし 1 点での観測による外挿では誤差が大きすぎる。本研究で、他の氷河のデータを合わせてアルタイ山脈全域について実際に計算してみることで正確な定量的予測値を得る。

アルタイ山脈氷河域の質量収支変動を定量化したのち、観測した気温、降水量変動の大きさと氷河質量収支変動の大きさの関係を構築する。今後数十年の氷河の動態変化予測のため、今後ますます縮小すると予想される氷河質量収支の年々変動を予測し、今後の水資源の予測に役立てる。また、アルタイ地域と世界の他の氷河地域とで、温暖化の強さと氷河への影響の大きさを比較し、アルタイの氷河の地域的な応答性を調べる。

GCM など全球気候モデルでは、氷河の変動が考慮されているものもあるが、大スケールの現象を低解像度で計算するため、小さな氷河は考慮出来ない。また高解像度の気候モデルでも、氷河を考慮したものは研究途上であり、モデル計算だけでは精度が不十分であるのが現状である。また、一般にこのような広い地域を扱う研究では、衛星データが利用されることが多いが、アルタイ地域では衛星データが少なく、取得が困難である。

一方、一般的な観測的手法では個々の氷河を扱うため、膨大な氷河域をもつ山域スケールでの計算は難しい。氷河の質量収支測定には氷河全域での 1 年ごとの観測が必要である。そのため多くの氷河の研究は、限られた氷河のみでの観測研究である。しかし、一地点の観測データのみを使って広範囲を計算することは誤差が大きいという問題がある。

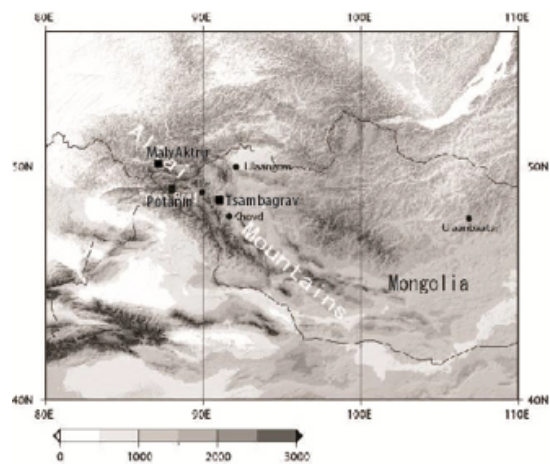


図 1. アルタイ山脈と本研究対象地点

3. 研究の方法

(1) 研究対象地域

アルタイ山脈は、ロシア、中国、モンゴル

の国境に沿って位置し、その全域の標高の高い部分に氷河が存在する。全域で氷河が後退していることが報告されている (e. g. Kadota and Davaa, 2007; Kamp et al., 2013)。とくに Tsambagarav 山塊、Kharhiraa 山塊などに氷帽が存在し、減少が著しい。本研究では、アルタイ山脈に沿った以下の3地点を主な対象地域とする (図2)。

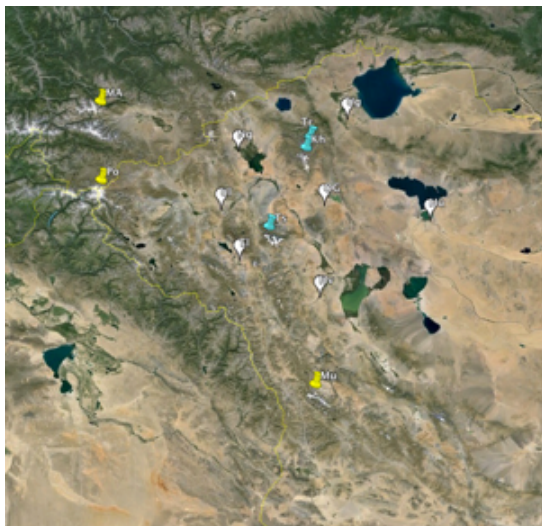


図2. 対象氷河と近隣気象官署の位置. 黄色が氷河位置 (MA: Maliy Aktru, Po: Potanin, Mu: Munkhairkhan)、水色が今回対象としていない氷河 (Ts: Tsambagara, Kh: Kharhiraa, Tr: Turgen)、白が気象官署.

地点1. ロシア・アルタイ、Maliy Aktru 氷河:

アルタイ山脈の北西部のロシア・アルタイでは過去約50年にわたって氷河の質量収支が観測されている氷河である。質量収支のみならず、涵養・消耗の特徴、ELA 変動などのデータが公開されている。近年は断続的にそのデータが更新されている。この氷河は、北緯 $50^{\circ} 08'$, 東経 $87^{\circ} 75'$ に位置し、標高 2200–3700m に約 3km にわたって存在し、北向きに流下している (図3)。隣の Leviiy Aktru 氷河もモニタリングされており、同様の変動を示すことがわかっている。



図3. 地点3 Maliy Aktru 氷河の地図 (WGMS, 2009)

地点2. アルタイ山脈中部、Potanin

氷河:

これまで筆者らが観測をしていた氷河であるため、この地域での観測実績を活用する (Konya et al., 2013; Konya et al., 2015)。この氷河は、北緯 $49^{\circ} 09'$, 東経 $87^{\circ} 55'$ に位置し、標高 2900–4000m に約 10km にわたって分布し、東方向に流下している。

地点3. アルタイ山脈南部、Munkhairkhan 山塊、Doloo Nuur 氷河:

研究協力者らが観測を開始し、本研究と連携して進めた。この氷河は北緯 $46^{\circ} 56'$, 東経 $91^{\circ} 30'$ に位置し、標高 3200m から 4000m まで、約 3.5km にわたって存在し、北向きに流下している。この地域では、1991年から2000年に氷河域は30%消失した (Kamp and Pan, 2014)。

(2) データの種類

① 現地ステーク観測

地点1においては、ステークを使用した現地観測が実施されており、そのデータを用いて氷河の質量収支が計算されている。また、地点2においては、これまでの観測網を利用し、氷河上に設置したステークを使った質量収支観測を継続した。

② 現地気象観測

地点1については過去の観測データのみが得られている。関連の高い近隣の気象官署データから現在の気象状況を推定した。同様に、地点2、3についても、データの無い期間については関連の高い近隣気象官署のデータより推定した。

各年の質量収支の気象学的解釈のため、ならびに各サイトの気候環境把握のため、気象観測を実施した。これまで設置していた地点2の氷河周辺標高 3000m での観測を継続した。地点3においても氷河の存在する山塊の標高 3600m の地点に簡易気象ステーションを設置し気温、放射等の観測を行った (図4)。

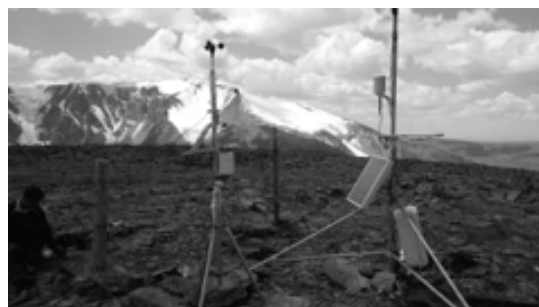


図4. 地点3に設置した気象観測装置

③ インターバルカメラによる ELA 観測

氷河融解期末期に氷河にて ELA の直接観測を行うため、インターバルカメラを設置した。カメラは3台設置したが不具合が多く、期待した期間のデータが取得できなかった。

④ 衛星データ

衛星データ (Landsat および ALOS) を ELA の判定のために使用した (図5)。

⑤ 質量収支データ

地点1については、文献および現地研究者提供のデータを取得した。World Glacier Monitoring Service等のデータベースで公開されているデータを取得、またはデータ公開元のトムスク大学およびモスクワ大学に直接コンタクトをとり取得した。地点2における質量収支データはKonya et al., (2015) および、研究協力者のデータを使用した。地点3については、衛星データおよび現地の気象データから推定した。

(3) 解析方法

気温変動に対する変化量の推定を行った。対象とする氷河（地点1～3）について、質量収支変動と付近の気象（気温・降水量）観測データを比較し、関係を導いた。気温・降水量の変動に対する氷河の変化量推定を行った。アルタイ地域と地球上の他の雪氷域で報告されている値とを比較した。

4. 研究成果

(1) 各氷河の特徴

地点1 Maliy Aktru 氷河：2013年のELAは3200m程度であった。2012年はELAが2889mであり、質量収支が-1.1mであったことが報告されている。これは近隣のLeviy Aktru 氷河などと近い値である。

地点2 Potanin 氷河：2006年のELAは3400m付近だったが、その後徐々に上昇した。夏季気温と降水量との相関が高く、近年の気温上昇の影響をうけて縮小傾向にある（Konya et al., 2015）。また同地域の近隣氷河でも同様に縮小傾向にあることがわかっている（Syromyatina et al., 2015）。

地点3 Doloo Nuur 氷河：2006年のELAは3700mであった（Kamp et al., 2013）。Landsat画像により2013年には3800m程度まで上昇していることがわかる。2013年には裸氷域が拡大していた。これは質量収支が負の方向へ傾いていることを示している。夏季気温との関係から再現した2012 - 2015年のELAは図6の通りである。

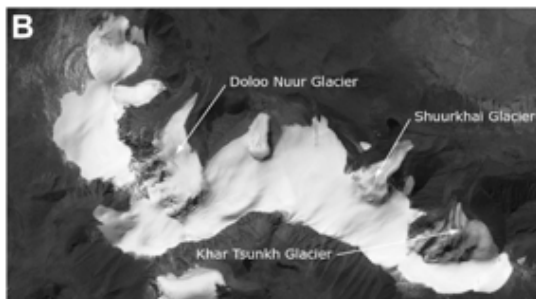


図5. Doloo Nuur 氷河の衛星画像 (Kamp et al., 2013)

(2) 気象条件

①地点ごとの特徴

地点1では、1990年代までのデータが取得できており、近隣のAkkem 気象官署と近い気温であることがわかっている。

地点2では、氷河上、稜線上、末端近くなどで気象観測が実施された。氷河上では特に夏季で周囲よりやや気温が低くなり、標高400m程度高い地点の夏季気温と同様である。

地点3での気象データは2013年から取得できた。近隣のHovd 気象官署で観測されたデータとの相関が高いことから、過去の気温を推定した（図7）。

地点2と3の平均的な通減率は $-5.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ と平均的な値をとっている。このことから、地点2と3の気温条件は標高による違いのほかはほぼ同じであると推定した。地点1は標高の違いを考慮しても、他地点よりも低い値を示している。

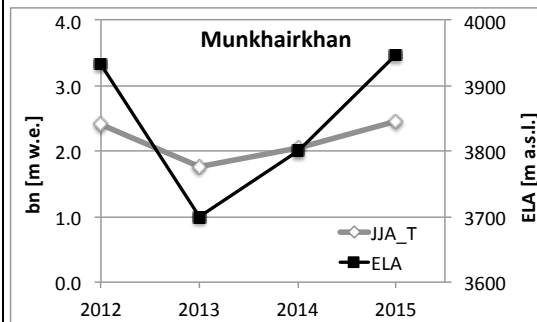


図6. Munkhairkhanの夏季気温と氷河ELA

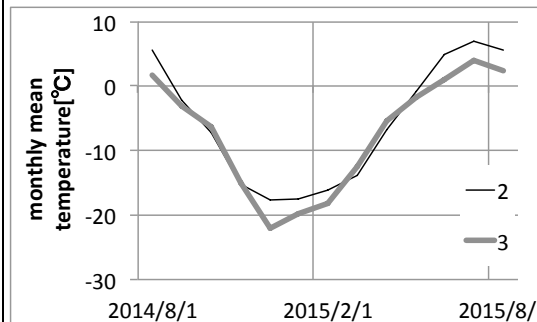


図7. 地点2と3の月平均気温

②地点間の比較

本研究では、地点1と3で氷河上の気象データが得られていないため、地点1～3について氷河近隣での観測値で比較した。気温は通減率を考慮すれば、地点2と違いはほとんどなく、気温も低く降水量も多いことが気象学的な違いである。この地域では卓越風向が北西であり、湿った空気がアルタイ山脈北部または西部に入り込む。その西側では降水が多いが、山脈を超えるのは主に乾いた気体であるため、地点1、2では降水量が少なくなる。

(3) ELAと質量収支の氷河間比較

推定したELAを図8に、ELAから推定した質量収支を図9に示す。質量収支の指標となるELA変動は3つの地点で同様の傾向を示したが、値としては、ロシア側・モンゴル側での違いがでている。これは、アルタイ山脈の中でも、北西部に位置する1と、東側に位置する2、3による違いであると考えられる。

氷河の存在する標高にも同様の傾向がでている。地点3は南部に位置するが、存在する標高帯の違いも小さい。一方、地点1は存在する標高帯が低いことが地形的な違いである。Ganiushkin et al., (2015) は、過去のELAを推定し、また現在はロシア側よりもモンゴル側でELAが高いことを示している。ロシア・アルタイの氷河の質量収支は、世界の他の氷河と比較すれば、マイナス変動の小さな方に分類できるが、モンゴル・アルタイの氷河に関してはマイナスへの偏りがやや大きい。したがって、アルタイ山脈全域では、地点1のロシア・アルタイの氷河よりも負に傾いた質量収支である。

地点2は東向きであるが、1と3は北向きであるため、日射の影響が少ない(Konya et al. 2010)。そのため融解が少ないと考えられる。それぞれの山塊に存在する傾斜方向については、今後の課題である。

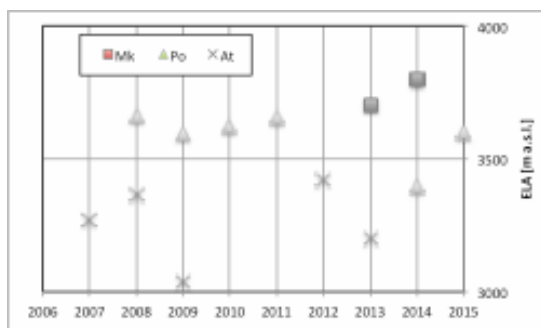


図 8. 各氷河の ELA (At は地点 1、Po は地点 2、Mk は地点 3 を示す)

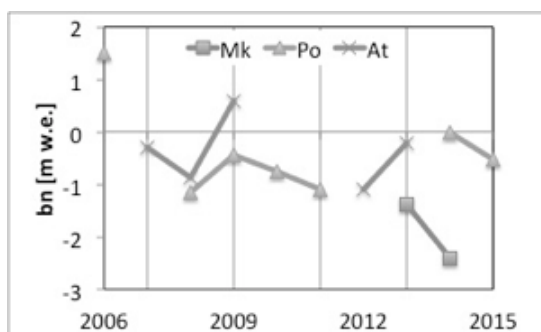


図 9. 各氷河の質量収支 (地点名は図 8 と同様)

(4) 今後予想される氷河の変動

モンゴル国内の他の山塊でも、氷河の縮小が著しいことがわかっており、面積の縮小は、1990 年代に加速したと報告されている。(Kadota and Davaa, 2007; Kamp et al., 2013)。Lehmkuhl (1998) では、過去にアルタイ山脈に多くの氷河が広がっていたこと、モンゴル国内アルタイ山脈では Kharhiraa, Sutai 等のほかの山塊に比べ存在する標高が高かったことが示されている。このことから、温暖化に対して敏感に反応していると考えられ、今後さらに氷河が縮小・後退し、消失の方向へ向かうと考えられる。

(5) まとめ

本研究では、アルタイ山脈の広範囲について氷河の変動と気象条件を解析した。その結果、ロシア・アルタイとモンゴル・アルタイでは異なる値を示すことがわかった。また、モンゴル・アルタイでは、長期にモニタリングされているロシア・アルタイよりも質量収支が負に傾いるため、アルタイ山脈全域では、ロシア・アルタイの値から推定されている WGM (2015) 等の値よりも小さい値であると言える。

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 4 件)

① Nakazawa, F., Konya, K., Kadota, T., & Ohata, T. 2015. Depositional and summer snow melting features in 2007–2011 on the upstream side of Potanin Glacier, Mongolian Altai, reconstructed by pollen and oxygen isotope analysis. *Environmental Earth Sciences*, 74(3), 1851-1859. Doi 10.1007/s12665-015-4436-1. 査読有。

② 紺屋恵子, 2014. モンゴル・アルタイの氷河変動, 平成 25 年度北海道大学低温科学研究共同利用研究集会『氷河変動の地域性に関する地理的検討』報告書. 査読なし。

③ Konya, K., Kadota, T., Nakazawa, F., Davaa, G., Purvdagva, A, K., Yabuki, H., and Ohata, T. 2013. Surface mass balance of the Potanin Glacier in the Mongolian Altai Mountains and comparison with Russian Altai glaciers in 2005, 2008, and 2009. *Bull. Glaciol. Res*, 31, 9-18. DOI 10.5331/bgr.31.9. 査読有。

④ Nakazawa, F., Konya, K., Kadota, T., & Ohata, T. 2012. Reconstruction of the depositional environment upstream of Potanin Glacier, Mongolian Altai, from pollen analysis. *Environmental Research Letters*, 7(3), 035402. DOI 10.1088/1748-9326/7/3/035402. 査読有。

[学会発表] (計 2 件)

① Konya, K., Kadota, T., Davaa, G., Purvdagva, K., Yabuki, H. and Ohata, T. 2015. Mass balance of Potanin glacier, Mongolian Altai since 1970s. International Glaciological Society, Kathmandu, Nepal, March 2, 2015.

② Konya, K., Kadota, T., Davaa, G., Purvdagva, K., Yabuki, H., and Ohata, T., 2014. Fifty years

climate and mass balance change of Potanin glacier in Mongolian Altai. 2013. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Chiyoda-ku, Tokyo, December20, 2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

紺屋 恵子 (Konya, Keiko)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球表層物質循環研究分野・技術研究員

研究者番号：70506419