

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 8 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24651001

研究課題名(和文)衛星リモートセンシングによる氷河サージの時空間変化の検出

研究課題名(英文) Detecting spatial-temporal changes of glacier surge by satellite remote sensing

研究代表者

古屋 正人 (Furuya, Masato)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60313045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：「氷河サージ」とは氷河の流速が平時に比べ数10倍以上も上昇して末端が前進する現象である。しかし数10年以上の静穏期を経て発生する稀な現象でデータが乏しく、発生機構は氷河学上の未解決問題の一つである。ここでは人工衛星搭載の合成開口レーダー(SAR)データを利用し、氷河の表面流動速度の時空間的变化を調べ、発生機構の解明を目指した。成果の一つは、西クンルン山脈での氷河サージの発見で、5年以上継続しつつも秋から冬にかけての加速する季節的変動を初めて検出した。またカナダユーコン域の静穏期のサージ型氷河でも冬期加速を発見した。表面融解しない時期でも加速する事実は、氷体内部での融解水の滞留と移動を示唆する。

研究成果の概要(英文)：Glacier surge exhibits order(s)-of-magnitude faster surface velocities during the short active phase, accompanying terminus advances and ice-thickness changes. However, the generation mechanisms remain uncertain because of the limited observations of surging glaciers that repeat the active phase after the decades-long quiescent phase. Here we use satellite synthetic aperture radar (SAR) images to examine the spatial-temporal changes in surface velocities, aiming to understand the mechanisms. We first identified surging glaciers at the West Kunlun Shan, NW Tibet. During the more-than-5-years-long active phase, we could detect clear seasonal modulations in their speeds that accelerated from fall to winter. In addition, we have discovered winter speed-up signals at the quiescent surge-type glaciers in Yukon, Canada. Namely, surge-type glaciers can accelerate even in the absence of surface meltwater input, suggesting the presence of englacial water and its rerouting toward the base.

研究分野：測地学, 地球惑星物理学

キーワード：glacier surge SAR West Kunlun Shan Yukon winter speed-up glacier hydrology remote sensing

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化に伴う氷河水床の融解や後退の進行とともに、グリーンランド等では氷河流動速度に季節変化のような短期的変動も報告されるようになった。表面流動速度は、氷体の「塑性(粘性)変形」と「(底面堆積物の変形流動も含む)底面すべり」の重ね合わせである。氷体の変形そのものが急加速するとは考えにくく、短期的変動は何らかの原因で「底面すべり」が活発化することと考えられている。その要因は、表面融解水の底面への到達による潤滑効果と考えられている。そのため、温暖化による氷体そのものの融解や後退だけでなく、流速も増大することで氷体の消失が加速するのではという懸念もある。

一方、氷河の流動速度が平時に比べて数倍から数 10 倍も上昇する現象として「氷河サージ」が従来から知られている。しかし数 10 年以上の静穏期を経て起きる稀な現象で、現場観測の困難さもあって氷河サージの時間発展データは非常に乏しく、その発生メカニズムは氷河学上の未解決問題の一つである。その実態解明は、氷河流動の「底面すべり」の理解とって不可欠である。

上述の氷河流動速度の短期的変動は近年の衛星 SAR(合成開口レーダ)リモートセンシングの進展によって分かってきた事実である。しかし分解能等の問題もあって、サージ氷河が多く分布する規模の小さな山岳氷河での SAR を用いた流動速度測定はごく一部に限られている。

2. 研究の目的

氷河サージの発生メカニズムとして、これまでに(1)水理学的効果(表面融解水の氷河底面への流入や底面水文環境の変化 .Kamb et al., 1985; Schoof, 2010 ), (2)熱的トリガー効果(氷河底面の圧力融解および地殻熱流量による氷体の融解に伴う水の生成と維持 .Fowler et al., 2001; Murray et al., 2003 ) の 2 つの考えが提唱されてきた。

これらのメカニズムを検証検討するために、サージ型氷河の流動速度の時空間分布を衛星 SAR リモートセンシングで明らかにして、新たな氷河サージモデルを提案する。

3. 研究の方法

チベット高原の西クンルン山脈、アメリカカナダ国境のユーコン域などに分布する山岳氷河の流動速度の時空間変化を求めするために、SAR 画像にピクセルオフセット法を適用する。

SAR 画像データには、主に JAXA によって 2006 年 1 月に打ち上げられた「だいち」に搭載された SAR センサー PALSAR によって得られたデータを用いた。それ以前の期間の一部については欧州宇宙機構 ESA の Envisat を、また「だいち」が運用を終了した 2011 年 4 月以降には、ドイツの DLR がによる TerraSAR-X のデータを用いている。SAR データ処理には

Gamma 社のソフトウェアを用いている。

4. 研究成果

(1)西クンルン山脈の氷河サージ

西クンルン山脈はチベット高原北西部に位置する最低部でも標高 4500m を超える高地であり、年間平均気温は -10 以下(推定)、降水量も年間 500mm に満たない寒冷乾燥した地域である。数多くの山岳氷河が発達しているが、このような環境であるため地上観測データは非常に少なく、流動速度の観測は皆無であった。Yasuda and Furuya(2013)は、この地域の氷河流動速度を初めて検出するとともに、36 個の主要な氷河流動速度の時空間変化を調べて、少なくとも 4 つのサージ型氷河を初めて捉えた。また、流動速度の空間パターンのなかには末端部が停滞し、上流部だけ流動しているような氷河も幾つか見出したが、これはサージサイクルの静穏期にあたる可能性が高い。

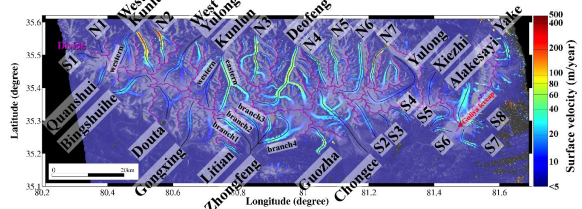


図 1 : Yasuda and Furuya(2013)による西クンルン山脈の流動速度分布の例。

氷河サージが進行中の West Kunlun 氷河と N2 氷河の流動速度をさらに詳しく調べるために、ドイツの SAR 衛星 TerraSAR-X のデータも用いて解析期間を延長した:「だいち」が 2011 年 5 月に運用停止したためでもある。その結果、二つの氷河とも依然としてサージが進行中であるとともに、図 2 に示すように秋から冬にかけて 2 倍程度速くなる顕著な季節変化を見出すことができた(Yasuda and Furuya, 投稿中)。

Murray et al(2003)は、Svalbard の氷河サージの流速観測データに基づき、Svalbard のような寒冷な環境では表面融解水が少ないことから、熱的な効果が重要である可能性を示唆した。本研究対象の西クンルン山脈も前述のように寒冷乾燥で、サージ活動が 5 年以上も続いている点で“Svalbard 型”の熱的なメカニズムかと考えていた。しかしこの季節変動は表面融解水の寄与を明確に示す。また、冬季にかけての加速はアラスカやユーコンでのサージが冬に開始することが多い事実とも調和することから、水理学的効果の多様性を示唆しているものと考えられる。

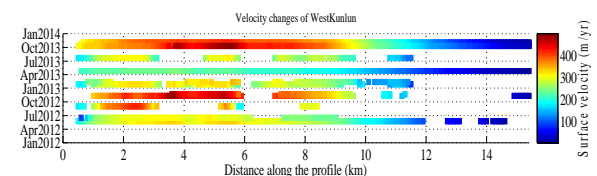


図 2 : West Kunlun 氷河の 2012 年以降の流動速度の時空間変化 (Yasuda and Furuya, 投稿中)。

## (2)南パタゴニア氷原

南パタゴニア氷原は、南半球では南極を除けば最大の氷河群であるが、一部の氷河を除けば現地観測データは乏しく、流動速度もよくわかっていない。Muto and Furuya(2013)は、Envisat と ALOS/PALSAR のデータを用いて2003年から2011年の期間における主要8氷河の時空間変化を求めた。この地域には「サージ型」と確定している氷河は知られていないが、PioXI 氷河だけは他の氷河と違って末端部の前進や速い流動速度が知られていた。Muto and Furuya(2013)においても、末端部の位置変動や非定常的な流動速度変化が確認され、氷河サージの一形態かもしれないとする Rivera et al.(1997)の研究と整合している。ただし、衛星データの制約から時間分解能が不足して、季節変化は調べられていない。

## (3)ユーコン地域の氷河流動

アメリカとカナダ国境付近には多くのサージ型氷河が多く分布し、Variegated 氷河の1982-83年のサージは大規模な地上観測も行われ(Kamb et al.,1985), Kamb(1987)によるLinked cavity model の動機付けとなった。しかし Variegated 氷河以外での流動速度の観測データは極めて乏しかった。

Abe and Furuya(2014)はユーコン域 St Elias Mountains の氷河流動速度の時空間変化を調べた(図3)。

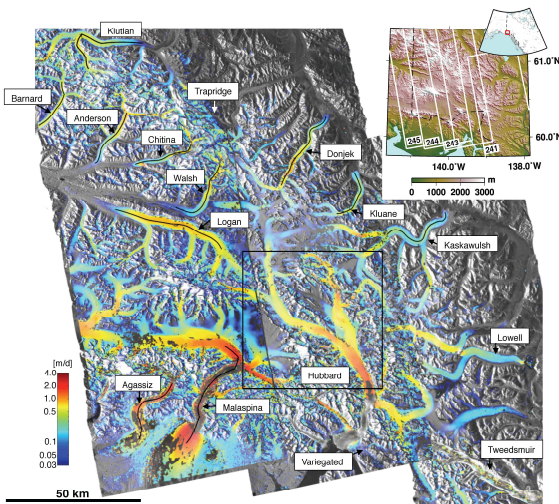


図3: ユーコン地域に分布する氷河流動速度の概要(Abe and Furuya, 2014)。

山岳氷河では通常は春から夏にかけて最大速度を示すことが知られているが、同時にアラスカやユーコンのサージ活動はしばしば冬に開始することが経験的に知られていた。Abe and Furuya (2014)は Lowell 氷河や Tweedsmuir 氷河で進行中の氷河サージの他に、サージサイクルの静穏期にあるにもかかわらず、冬季に加速している氷河を複数見出した(図4)。また、上流の高速領域が上流から下流に向けて拡大するように(Anderson 氷河では特に顕著に)見えている。秋から冬に

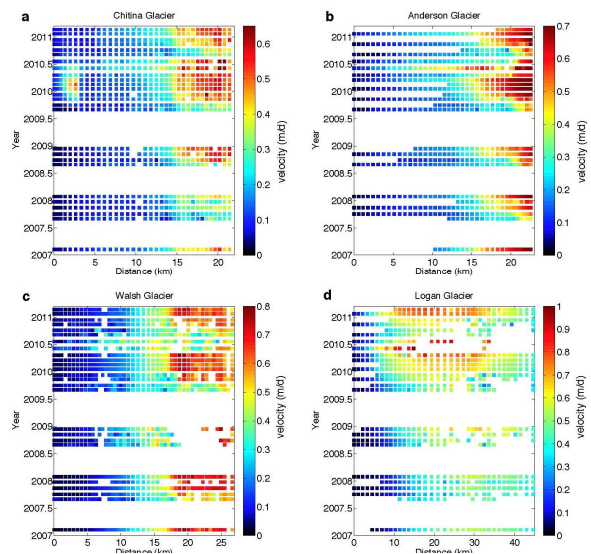


図4: 図3中の4つの氷河における表面流動速度の時空間変化。横軸は末端からの距離を示し、縦軸は2007年から2011年までを示す。(Abe and Furuya, 2014から)

かけては表面融解水が無くなるので通常の氷河で知られている春夏の加速とは異なるメカニズムが示唆される。

Abe and Furuya(2014)では、表面からの融解水が全くないにもかかわらず底面水圧を上昇させるメカニズムとして Lingle and Fatland(2003)が提唱していた Englacial Water Storage 仮説を支持すると議論した。つまり表面からの水の供給が無くても氷体の内部に存在する融解水が氷体の流動(クリープ)に伴って底面に向けて“絞り出される”ことによって、高压水が底面に供給されると推測した。Englacial Water Storage の具体的な形状や形態は不明であるが、底面クレバス(Basal crevasse)は一つの可能性である。

## 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3件)

1 Yasuda, T. and M. Furuya, Short-term glacier velocity changes at West Kunlun Shan, Northwest Tibet, detected by Synthetic Aperture Radar data, *Remote Sens. Environ.*, 査読有, 128, 87-106. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.021>

2 Muto, M. and M. Furuya, Surface velocities and ice-front positions of eight major glaciers in the Southern Patagonian Ice Field, South America, from 2002 to 2011, *Remote Sens. Environ.*, 査読有, 139, 50-59. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.034>

3 Abe, T. and M. Furuya, Winter speed-up of quiescent surge-type glaciers in Yukon, Canada, *The Cryosphere Discuss.*, 査読有,

8. 2611-2635, 2014.

<http://www.the-cryosphere-discuss.net/8/2611/2014/>

〔学会発表〕(計 34 件)

1 安田貴俊, 古屋正人, 合成開口レーダーで捉えた西クンルン山脈の山岳氷河表面速度場の多様性, 日本地球惑星科学連合 2012 年度連合大会, 2012 年 5 月 20 日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県).

2 安田貴俊, 古屋正人, 合成開口レーダーによる北西チベット高原西クンルン山脈における氷河サージの観測, 雪氷研究大会, 2012 年 09 月 23 日, 福山市立大学(広島県).

3 安田貴俊, 古屋正人, SAR ならび光学センサーによる西クンルン山脈における氷河サージの観測, 日本測地学会第 118 回講演会, 2012 年 10 月 31 日, 仙台市福祉プラザ(宮城県).

4 阿部隆博, 古屋正人, ALOS/PALSAR で捉えたユーコン地域におけるサージ氷河の動態流動速度の時空間変化, 雪氷研究大会, 2012 年 09 月 23 日, 福山市立大学(広島県).

5 阿部隆博, 古屋正人, 合成開口レーダーで捉えたユーコン地域の氷河サージの動態, 日本測地学会第 118 回講演会, 2012 年 10 月 31 日, 仙台市福祉プラザ(宮城県).

6 武藤みなみ, 古屋正人, 合成開口レーダーでとらえた南パタゴニアの氷河における流動速度の時空間変化, 雪氷研究大会, 2012 年 09 月 23 日, 福山市立大学(広島県).

7 武藤みなみ, 古屋正人, 合成開口レーダーでとらえた南パタゴニアの氷河における流動速度の時空間変化, 日本測地学会第 118 回講演会, 2012 年 10 月 31 日, 仙台市福祉プラザ(宮城県).

8 武藤みなみ, 古屋正人, ALOS/PALSAR と Envisat/ASAR に基づくパタゴニア氷河の流動速度の時空間変化, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 20 日, 幕張メッセ国際会議場(千葉).

9 Yasuda, T. and M. Furuya, Surge-type Glaciers in the West Kunlun Shan, NW Tibet, 2012 Fall AGU Meeting, 2012 年 12 月 05 日, モスコニセンター(サンフランシスコ, アメリカ合衆国).

10 Abe, T. and M. Furuya, Glacier Surge Dynamics in Yukon Territory observed by Synthetic Aperture Radar, 2012 Fall AGU Meeting, 2012 年 12 月 05 日, モスコニセンター(サンフランシスコ, アメリカ合衆国).

11 Muto, M. and M. Furuya, Spatial and Temporal Glacier Flow Velocity Changes in Southern Patagonia Icefield: 2002-2011, 2012 Fall AGU Meeting, 2012 年 12 月 05 日, モスコニセンター(サンフランシスコ, アメリカ合衆国).

12 Yasuda, T. and M. Furuya, Glacier Surge in West Kunlun Shan, NW Tibet Detected by

Synthetic Aperture Radar, ESA Living Planet Symposium 2013, 2013 年 9 月 10 日, エジンバラ国際会議センター(イギリス).

13 Yasuda, T. and M. Furuya, Glacier Surge in West Kunlun Shan, NW Tibet Detected by Synthetic Aperture Radar, APSAR2013, 2013 年 09 月 24 日, つくば国際会議場(茨城県).

14 Furuya, M. and T. Abe, Winter speed-up of ice flow at quiescent surge-type glaciers in Yukon, Canada, 2013 Fall AGU Meeting, 2013 年 12 月 10 日, モスコニセンター(アメリカ合衆国).

15 阿部隆博, 古屋正人, ユーコン地域の氷河流動速度の冬期における加速: 検出とその解釈, 日本地球惑星科学連合 2013 年度連合大会, 2013 年 5 月 19 日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県).

16 古屋正人, ユーコン地域の氷河流動の冬期加速について, 日本測地学会第 120 回講演会, 2013 年 10 月 29 日, 極地研究所(東京都立川市).

17 Abe, T. and M. Furuya, Winter speed-up of ice flow at quiescent surge-type glaciers in Yukon, International Glaciological Society Symposium on Observations, Modelling and Prediction of the Cryospheric Contribution to Sea Level Change, 2014 年 5 月 27 日, Chamonix (France).

18 Furuya, M. and T. Abe, Winter speed-up of Matanuska Glacier, Alaska, International Glaciological Society Symposium on Observations, Modelling and Prediction of the Cryospheric Contribution to Sea Level Change, 2014 年 5 月 27 日, Chamonix (France).

19 Yasuda, T. and M. Furuya, Surging Glacier in West Kunlun Shan, Asia-Oceania Geoscience Society 2014, 2014 年 7 月 29 日, ロイトン札幌(北海道札幌市).

20 Abe, T. and M. Furuya, Winter speed-up of ice flow at quiescent surge-type glaciers in Yukon, 2014 Fall AGU Meeting, 2014 年 12 月 17 日, モスコニセンター(アメリカ合衆国).

21 M. Furuya, T. Abe, Surge-like behavior at the non-surge type Matanuska Glacier, Alaska, 2014 Fall AGU Meeting, 2014 年 12 月 17 日, モスコニセンター(アメリカ合衆国).

22 Yasuda, T. and M. Furuya, Distribution and Characteristics of Surge-type Glacier in West Kunlun Shan, northwestern Tibetan Plateau, China, Int. Glaciol. Soc. Sympo. on Glaciology in High Mountain Asia, 2015 年 3 月 3 日, Kathmandu (Nepal).

23 阿部隆博, 古屋正人, ALOS/PALSARで捉えたアラスカ/ユーコン山岳氷河の時空間変動-サージ型氷河の静穏期における冬期加速, 第5回極域科学シンポジウム, 2014年12月4日, 国立極地研究所 (東京都立川市).

24 阿部隆博, 古屋正人, 衛星データで見るサージ型氷河の時空間変動, 北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会「氷河の流動および変動に関する研究集会」, 2014年11月19日, 北海道大学低温科学研究所 (北海道札幌市).

25 阿部隆博, 古屋正人, サージ型氷河の静穏期における冬期加速:観測と解釈, 日本測地学会第122回講演会, 2014年11月6日, つくばサイエンス・インフォメーションセンター (茨城県つくば市).

26 阿部隆博, 古屋正人, 航空機高度計によるアラスカ/ユーコンにおける氷河表面標高変化の測定 (2009-2012) -氷河サージに伴う末端の氷厚変化-, 雪氷研究大会2014, 2014年9月21日, 八戸工業大学 (青森県八戸市).

27 阿部隆博, 古屋正人, サージ型氷河の静穏期における冬期加速, 東京大学地震研究所特定共同研究B 平成26年度成果報告会, 2014年9月18日, 東京大学地震研究所 (東京都文京区).

28 阿部隆博, 古屋正人, ユーコン周辺におけるサージ型氷河の季節変化:静穏期の冬期加速とそのメカニズムについて, 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年4月29日, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市).

29 安田貴俊, 古屋正人, 衛星データに基づく西クンルンにおける氷河サージの観測, 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年4月29日, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市).

30 Furuya, M., T. Yasuda, T. Abe, Winter speed-up signals detected at surge-type glaciers of two distinct settings: implications for the glacier surge

mechanisms, IUGG2015, 2015年6月24日, Prague (Czech Republic).

31 安田貴俊, 古屋正人, 西クンルン山脈における多温型サージ氷河の冬期加速, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 2015年5月27日, 幕張メッセ (千葉県千葉市).

32 阿部隆博, 古屋正人, アラスカ・レンゲル山脈における山岳氷河の季節的・経年的変化, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 2015年5月27日, 幕張メッセ (千葉県千葉市).

33 古屋正人, ウェルダーマウロ, 阿部隆博, 安田貴俊, 数値氷河水文学モデルによる底面水圧の季節変化, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 2015年5月27日, 幕張メッセ (千葉県千葉市).

34 Abe, T. and M. Furuya, Detection of the ~12-year cyclic surge-like event at Donjek Glacier in Yukon, Canada, INT. SYMPO. on HYDROLOGY of GLACIERS and ICE SHEETS, 2015年6月23日, Hofn (Iceland).

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.sci.hokudai.ac.jp/~furuya>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古屋正人 (FURUYA, Masato)  
北海道大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号: 60313045