

機関番号: 10101

研究種目: 基盤研究(C)

研究期間: 2008~2010

課題番号: 20540418

研究課題名(和文) 氷河湖の形成に起因した氷河後退メカニズムの解明

研究課題名(英文) Mechanism of glacier retreat triggered by glacial lake formation

研究代表者

杉山 慎 (SUGIYAMA SHIN)

北海道大学・低温科学研究所・講師

研究者番号: 20421951

研究成果の概要(和文): 氷河湖の形成が氷河変動に及ぼす影響を明らかにするため、近年その末端部に湖が形成されたスイス・ローヌ氷河において、野外観測を中心とした研究を行った。その結果、湖形成により氷の流動速度が約3倍に増加し、この流動変化によって氷河末端の氷厚減少が加速したことが明らかになった。その後、薄くなった氷河末端部は湖水の圧力によって浮上、崩壊し、著しい氷河後退が観測された。以上の結果は、湖形成に起因した氷河後退メカニズムを観測によって初めて明らかにし、今後の氷河変動予測に貢献する成果である。

研究成果の概要(英文): To investigate the role of glacial lake formation in glacier retreat, we performed field study at Rhonegletscher, where a pro-glacial lake has been recently formed. Our data showed three-fold ice flow speed-up after the lake formation, resulting in significant increase in the ice thinning rate. When the ice became thinner than a threshold, glacier front got afloat and disintegrated in the lake. These observations revealed the mechanisms of glacier retreat triggered by lake formation. The research results contribute to the prediction of glacier evolution under the influence of a glacial lake.

交付決定額

(金額単位: 円)

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 2,000,000 | 600,000   | 2,600,000 |
| 2009年度 | 1,000,000 | 300,000   | 1,300,000 |
| 2010年度 | 500,000   | 150,000   | 650,000   |
| 年度     |           |           |           |
| 年度     |           |           |           |
| 総計     | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野: 数物系科学 A

科研費の分科・細目: 気象・海洋物理・陸水学

キーワード: 氷河、氷河湖、温暖化、数値モデル、気候変動、国際研究者交流、スイス

## 1. 研究開始当初の背景

近年の気候温暖化の影響を受けて、世界各地で氷河せき止め湖(氷河湖)の増加が報告されている。たとえばスイス・ローヌ氷河の場合、末端が基盤の突起を越えて後退したため、2005年に末端氷河湖が形成された(図1、2; Sugiyama and others, 2008)。このような氷河湖の形成は、その決壊による災害の観点だけでなく、氷河変動を考える上で重要である。

氷河末端に湖が形成された場合、(1)カービングによる氷の消耗、(2)湖水の浮力に起因する末端崩壊、(3)底面環境の変化による氷河の加速、などのプロセスが氷河の後退を促進すると考えられている。しかしながら、氷河湖の形成と成長に合わせて氷河が観測された例はほとんどないため、湖の形成が氷河変動に与える影響とそのメカニズムは明らかになっていない。



図 1. ローヌ氷河末端の氷河湖  
(写真は 2006 年 9 月 M. Funk 撮影)

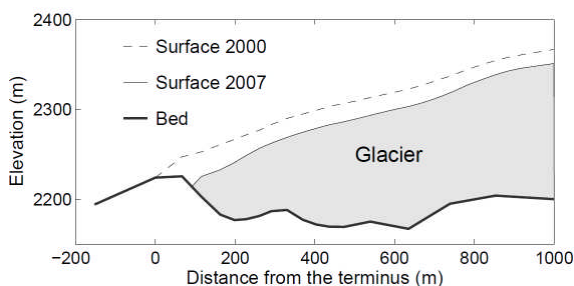


図 2. ローヌ氷河の縦断面。点線と実線は 2000、2007 年の表面高度。

## 2. 研究の目的

本研究は、近年末端に氷河湖が形成されたローヌ氷河の観測により、氷河湖形成に起因した氷河後退メカニズムを明らかにすることを目的とする。この目的を達成することで、湖が形成された氷河の将来変動予測に貢献することを目指す。また研究の成果は、氷河底面水理状態と氷河流動の関係や、カービング氷河の変動メカニズムに関しても、重要な知見をもたらすものである。

## 3. 研究の方法

2008 年 7-9 月および 2009 年 6-9 月に、ローヌ氷河の末端から約 1km の範囲で野外観測を実施した。氷河表面においては、GPS を使って流動速度と表面標高を測定した他、多数の雪尺を設置して融解量の空間分布を測定した。また、研究代表者が近年開発した熱水ドリル(Tsutaki and Sugiyama, 2009)によって全層掘削を行い、得られた掘削孔を用いて氷河内部と底面での観測を実施した。掘削孔内では、氷厚、底面水圧、氷の歪速度、底面すべり、氷底堆積物層厚を測定したほか、堆積物のサンプリングを行った。

湖形成前の氷河流動状態を明らかにするため、航空写真を使って氷河上の目標物を追跡し、1999-2000 年および 2005-2006 年の年間流動速度を解析した(西村ら, 2008b)。

本研究によって得られた氷厚データを用いて、有限要素法を用いた 3 次元氷河流動数値モデルを構築した。境界条件を変化させて数値実験を行うことにより、湖の形成が流動に与える影響を明らかにすることが目的である。

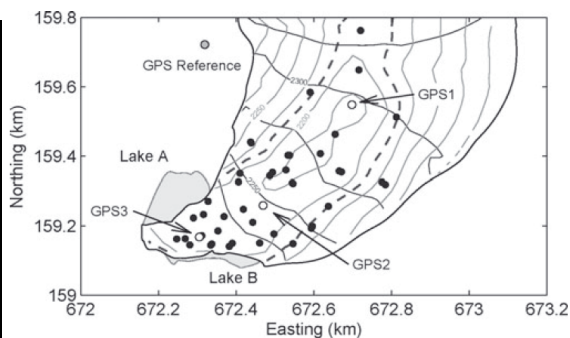


図 3. ローヌ氷河における掘削地点 (●) と GPS 連続測定地点 (○)。等高線は表面(黒)と岩盤(灰)の標高、点線は氷河後退後に予想される湖の最大拡大範囲を示された。

## 4. 研究成果

### (1) 岩盤地形

2008 および 2009 年に計 41 本の全層掘削に成功し、観測地域の正確な氷厚分布が明らかになった(図 3; Tsutaki and others, 2011)。その結果、氷河が後退した場合に予想される湖の最大拡大範囲が、長さ約 1000m であることが示された。

### (2) 流動速度の変化

GPS3 における流動速度は 2007 年の夏期間に  $22.0 \text{ m a}^{-1}$  であり、湖の形成前(1999-2000 および 2005-06)と比較して約 200% の増加が確認された(Tsutaki and others, 2011)。また観測域における流動速度は一様に  $20 \text{ m a}^{-1}$  以上の値を示し、山岳氷河の末端域としては非常に速く流動している。これらの結果は、湖の形成に伴う底面流動速度の増加を示唆するものである。

掘削孔の傾斜測定の結果は、氷河末端部の流動がほぼ 100% 底面流動によることを示し、上記の仮説を裏付けるものであった。表面流動速度に対する底面流動の大きな寄与率は、本研究で構築した 3 次元氷河流動モデルによっても確認された。また、観測地の氷河底面からは様々な粒径の堆積物がサンプリングされ、その層厚が空間的に不均一に分布している事が確認された(西村ら, 2010)。このような底面堆積物の分布が、底面流動の加速に影響を与えている可能性がある。

### (3) 歪速度場と氷厚の変化

湖の形成に伴い GPS3 地点が加速する一方、観測域の上流側 GPS1 地点の速度は逆に減少した。この変化は、氷河末端部における圧縮流が弱くなり、融解域の消耗を補う伸長鉛直歪速度が減少したことを意味する。観測域の氷厚減少速度は湖の形成前(2000-2007 年:  $-2.75 \text{ m a}^{-1}$ )と比較して顕著に増加しており(2007-2008:  $3.04 \text{ m a}^{-1}$ , 2008-2009:  $3.44 \text{ m a}^{-1}$ )、流動場の変化が氷厚減少を加速させていることが明らかになった(Tsutaki and others, 2011)。また観測地域の夏季融解量は

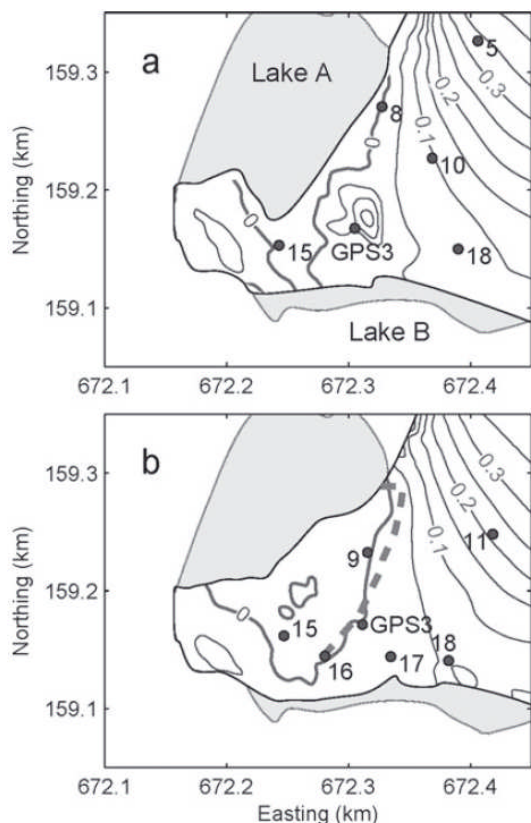


図4. 有効圧力（氷の上載荷重－底面水圧）の分布。点線に沿ってクレバスが形成され、LakeA側の氷が浮上した。

表面状態（汚れ、デブリ、クレバスなど）に起因したアルベドの変化に対応して複雑な空間分布を示し、氷厚変化に影響を与えていることが判明した(Sugiyama and others, 2011)。

#### (4) 氷河末端の浮上現象

氷厚が湖の水深に対して十分薄くなると、浮力によって氷河が湖に浮かびあがるのが予想される。このような現象が観測期間中に確認された。GPS3における鉛直速度は2008年9月に著しく上昇し $20\text{ m a}^{-1}$ 以上の上向き速度を示した。この異常に大きい上昇速度は2009年6月には一度失われたが、8月に入って再び同程度の値が観測された。また同時期に湖近くに形成されたクレバスに沿って、氷が数m持ち上がる現象が目視およびGPS測量によって確認された。この時期の氷厚分布を湖の水位と比較すると、氷が持ち上がった領域で底面水圧が氷の上載荷重を上回っていることが判明した(図4; Tsutaki and others, 2011)。このようにして浮上した氷はその後2010年に氷河から切り離されて湖に流出し、大規模な末端後退を招いた(図5)。

#### (5) まとめ

本研究の観測結果は、湖の形成が以下のようなメカニズムで氷河の後退を促すことを明らかにした。まず、湖の形成に伴う氷河底面の水理環境変化により、末端部の流動速度が増加する。末端部の加速は氷河に沿った圧

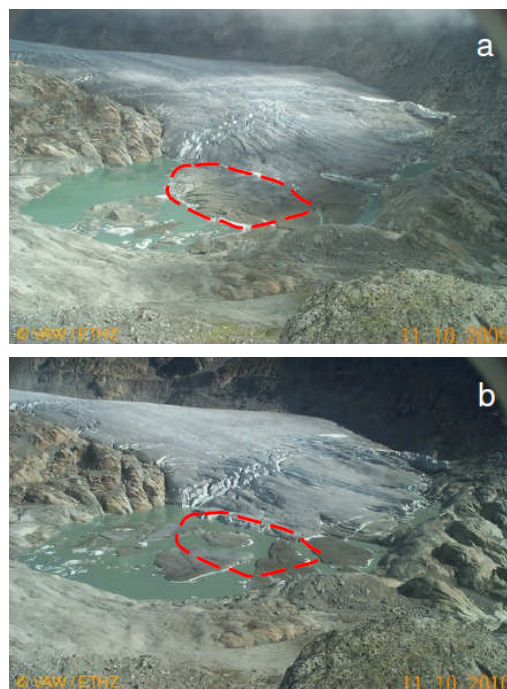


図5. ローヌ氷河末端部の(a)2010年10月11日および(b)2011年10月11日の写真。点線で囲った部分が2009年に浮上し、2010年には氷河から切り離された。写真はスイス連邦工科大学による。

縮流を伸長流側に変化させるため、鉛直歪の減少に伴って氷厚減少が加速する。氷が薄くなり、底面水圧が上載荷重を上回ると、氷河の一部が水圧で浮上する。浮上した氷はやがて氷河本体から切り離されて、急激な氷河後退とさらなる流動変化の原因となる。以上の成果は、氷河湖形成に起因する氷河後退プロセスをその場観測によって詳細に捉えた初めての例であり、今後の氷河変動予測に貢献するものである。

#### (6) その他の成果

本研究では熱水ドリルによる掘削と、掘削孔内での測定、サンプリングを行った。これらは海外の限られた機関が保有する技術であり、国内では本研究で初めて確立されたものである。特に、堆積物コアのサンプリング(西村ら、2008a)や掘削孔カメラを用いた観測など(杉山ら、2009)、世界的にも例の少ない技術が開発運用された。この成果は、今後の氷河研究に新しいツールをもたらすものである。

また観測の一部は、北海道大学環境科学院が主催する大学院実習「南極学特別実習I(スイス氷河実習)」の一部として行われた。その結果3年間で延べ28名の若手研究者が、氷河上での観測を経験した。

研究活動は北海道大学環境科学院大学院生の協力を得て行われ、その成果は博士論文と修士論文各1報にまとめられ、さらに1報の博士論文が執筆中である。



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 12 件)

- ① Sugiyama, S., T. Yoshizawa, M. Huss, S. Tsutaki and D. Nishimura. 2011. Spatial distribution of surface ablation in the terminus of Rhonegletscher, Switzerland. *Annals of Glaciology*, **52**(58), 1-8. (査読有)
- ② Tsutaki, S., D. Nishimura, T. Yoshizawa and S. Sugiyama. 2011. Changes in glacier dynamics under the influence of proglacial lake formation in Rhonegletscher, Switzerland. *Annals of Glaciology*, **52**(58), 31-36 (査読有)
- ③ Tsutaki, S. 2011. Changes in ice flow regime due to proglacial lake formation in an alpine glacier, PhD thesis, Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University. (査読無)
- ④ Sugiyama, S., P. Skvarca, N. Naito, K. Tone, H. Enomoto, K. Shinbori, S. Marinsek and M. Aniya. 2010. Hot-water drilling at Glaciar Perito Moreno, Southern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glaciological Research*, **29**, 27-32. (査読有)
- ⑤ Sugiyama, S., A. Bauder, P. Riesen and M. Funk. 2010. Surface ice motion deviating toward the margins during speed-up events at Gornergletscher, Switzerland. *Journal of Geophysical Research*, **115**, F03010, doi:10.1029/2009JF001509. (査読有)
- ⑥ Roux, P.-F., F. Walter, P. Riesen, S. Sugiyama and M. Funk. 2010. Observation of Surface Seismic Activity Changes of an Alpine Glacier During a Glacier-Dammed Lake Outburst. *Journal of Geophysical Research*, **115**, F03014, doi:10.1029/2009JF001535. (査読有)
- ⑦ Riesen, P. D., S. Sugiyama and M. Funk. 2010. The influence of the presence and drainage of an ice-marginal lake on the ice flow of Gornergletscher, Switzerland. *Journal of Glaciology*, **56**(196), 278-286. (査読有)
- ⑧ Tsutaki, S. and S. Sugiyama. 2009. Development of a hot water drilling system for subglacial and englacial measurements. *Bulletin of Glaciological Research*, **27**, 7-14. (査読有)
- ⑨ Sugiyama, S., A. Bauder, M. Huss, P. Riesen and M. Funk. 2008. Triggering and drainage mechanisms of the 2004 glacier-dammed lake outburst in Gornergletscher, Switzerland. *Journal of Geophysical Research*, **113**, F4019, doi:10.1029/2007JF000920. (査読有)
- ⑩ Sugiyama, S., S. Tsutaki, D. Nishimura, H. Blatter, A. Bauder and M. Funk. 2008. Hot water drilling and glaciological observations at the terminal part of Rhonegletscher, Switzerland in 2007. *Bulletin of Glaciological Research*, **26**, 41-47. (査読有)
- ⑪ 津滝俊, 杉山慎. 2008. 熱水ドリル掘削システムの構築, 北海道の雪氷, **27**, 41-44. (査読無)
- ⑫ 西村大輔, 杉山慎, A. Buder, M. Funk. 2008b. スイスアルプス・ローヌ氷河における過去 100 年の流動速度変化、北海道の雪氷, **27**, 41-44. (査読無)

[学会発表] (計 15 件)

- ① Nishimura, D., S. Tsutaki and S. Sugiyama. Basal ice flow regime influenced by glacial lake formation in Rhonegletscher, Switzerland. AGU Fall Meeting, December 14, 2010, San Francisco, USA
- ② Sugiyama, S., P. Skvarca, N. Naito, H. Enomoto, S. Tsutaki, K. Tone, S. Marinsek and M. Aniya. Calving Glacier Dynamics Controlled by Small Fluctuations in Subglacial Water Pressure Revealed by Hot Water Drilling in Glaciar Perito Moreno, Patagonia. AGU Fall Meeting, December 13, 2010, San Francisco, USA
- ③ 津滝俊, 西村大輔, 吉澤猛, 杉山慎. スイスアルプスローヌ氷河における氷河前縁湖形成後の流動変化、日本雪氷学会全国大会, 2010 年 9 月 29 日, 東京エレクトロンホール宮城, 仙台
- ④ Yoshizawa, T., S. Sugiyama and M. Huss. Spatial distribution of surface ablation in the terminus part of Rhonegletscher, Switzerland. IGS Symposium on Snow, Ice and Humanity in a Changing Climate, June 22, 2010, Hokkaido University, Sapporo, Japan
- ⑤ Tsutaki, S., D. Nishimura and S. Sugiyama. Changes in glacier dynamics under the influence of proglacial lake formation in Rhonegletscher, Switzerland. IGS Symposium on Snow, Ice and

Humanity in a Changing Climate, June 22, 2010, Hokkaido University, Sapporo, Japan

⑥Nishimura, D., S. Tsutaki and S. Sugiyama. Mechanisms and spatial variety of basal flow in Rhonegletscher, Swiss Alps. IGS Symposium on Snow, Ice and Humanity in a Changing Climate, June 22, 2010, Hokkaido University, Sapporo, Japan

⑦Tsutaki S. and S. Sugiyama. Impact of glacier-dammed lake formation on the ice motion in Rhonegletscher, Switzerland. AGU Fall Meeting, December 14, 2009, San Francisco, USA

⑧Tsutaki S., D. Nishimura, T. Yoshizawa and S. Sugiyama. Impact of proglacial lake formation on the retreat of Rhonegletscher, Switzerland, Institute of Low Temperature Science International Symposium "Frontier of Low Temperature Science", November 9, 2009, Hokkaido University, Sapporo, Japan

⑨吉澤猛, 杉山慎, Huss M. スイス・ローヌ氷河末端部における表面融解量の空間分布、日本雪氷学会全国大会, 2009年10月1日, 北海道大学, 札幌

⑩西村大輔, 津滝 俊, 杉山慎. 傾斜計によるスイスアルプス・ローヌ氷河末端部の掘削孔変形観測、日本雪氷学会全国大会, 2009年10月1日, 北海道大学, 札幌

⑪津滝俊, 杉山慎. スイス・ローヌ氷河における氷河湖成長と氷河後退への影響、日本雪氷学会全国大会, 2009年9月30日, 北海道大学, 札幌

⑫津滝俊, 西村大輔, 杉山慎. スイス・ローヌ氷河における氷河流動と底面の水理状態に関する調査、日本雪氷学会全国大会, 2008年9月26日, 東京大学, 東京

⑬西村大輔, 新堀邦夫, 杉山慎. 氷河底堆積物コアサンプラーの開発、日本雪氷学会全国大会, 2008年9月26日, 東京大学, 東京

⑭Nishimura, D., S. Sugiyama, A. Bauder, M. Funk. Changes in surface flow speed over the last 100 years, Rhonegletscher, Swiss Alps. IGS Symposium on Dynamics in Glaciology, August 19, 2008, Limerick, Ireland

⑮Sugiyama, S., A. Bauder, M. Funk. Sideways ice motion during speed-up events in

Gornergletscher, Switzerland. IGS Symposium on Dynamics in Glaciology, August 18, 2008, Limerick, Ireland

〔その他〕

①吉澤猛. 2010. スイス・ローヌ氷河末端部における表面融解量の空間分布. 北海道大学環境科学院、修士論文

②西村大輔, 津滝俊, 吉澤猛, 杉山慎, 新堀邦夫. 2010. 氷河底面堆積物貫入深度計による堆積物分布調査、北海道大学低温科学研究所 技術部技術報告, 16, 6-9.

③杉山慎, 西村大輔, 福士博樹, 千貝健. 2009. 掘削孔ビデオカメラによる氷河底面の観測、北海道大学低温科学研究所 技術部技術報告, 15, 23-26.

④西村大輔, 津滝俊, 吉澤猛, 杉山慎, 新堀邦夫. 2008a. 氷河底面堆積物コアサンプラーの開発、北海道大学低温科学研究所 技術部技術報告, 14, 15-18.

ホームページ等

<http://www.ice.lowtem.hokudai.ac.jp/~sugishin/research/hokudai2/rhone/rhone.html>

<http://www.earth.ees.hokudai.ac.jp/IAI/swiss08/diary.html>

<http://www.earth.ees.hokudai.ac.jp/IAI/swiss09/diary.html>

<http://www.earth.ees.hokudai.ac.jp/IAI/swiss10/diary.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

杉山 慎 (SUGIYAMA SHIN)

北海道大学・低温科学研究所・講師

研究者番号：20421951

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

津滝 俊 (TSUTAKI SHUN)

北海道大学・環境科学院・大学院生

西村 大輔 (NISHIMURA DAISUKE)

北海道大学・環境科学院・大学院生

吉澤 猛 (YOSHIZAWA TAKESHI)

北海道大学・環境科学院・大学院生

Martin Funk

スイス連邦工科大学・教授

Heinz Blatter

スイス連邦工科大学・教授