# 南パタゴニア氷原ペリートモレノ氷河とアメギノ氷河における

# 近年の末端変動と氷厚変化

# Changes in terminus positions and surface elevation of Glaciar Perito Moreno and Glaciar Ameghino, Southern Patagonia Icefield

箕輪 昌紘(北海道大学 大学院環境科学院・低温科学研究所)
榊原 大貴(北海道大学 大学院環境科学院・低温科学研究所)
杉山 慎(北海道大学 低温科学研究所)
澤柿 教伸(北海道大学 地球環境科学研究院)
Pedro Skvarca (Instituto Antártico Argentino)
Masahiro Minowa, Daiki Sakakibara, Shin Sugiyama, Takanobu Sawagaki,
Pedro Skvarca

# 1. はじめに

南パタゴニア氷原(総面積 12,550 km<sup>2</sup>)<sup>1)</sup>に 位置するペリートモレノ氷河とアメギノ氷河 は、湖に流入するカービング氷河である(図 1). ふたつの氷河は氷河末端がわずか 8 km の距離で隣接するが、異なる末端変動を示す 事が知られている<sup>2)</sup>. 例えば,アメギノ氷河 では 1967 年頃, カービングによる質量損失 が増加して大きな後退が観測されたのに対し. ペリートモレノ氷河の末端変動は 20 世紀前 半から現在にかけて非常に小さい. これまで の研究により, 末端部の基盤地形や谷形状が 変動の異なる原因として推測されてきた 2)が, 当時の変動解析にとどまっており,詳細は明 らかになっていない. そこで本研究では最新 の人工衛星データを使用して,ふたつの氷河 の近年の末端位置と氷厚変化を測定し、その 変動の原因を明らかにすることを目的とする.



図 1. (a)南米, ペリートモレノ氷河とア ギノ氷河の位置を星印で示す. (b)ペリー モレノ氷河とアメギノ氷河の ALOS/PRISM 像(2008 年 3 月 29 日).

# 2. 使用データと解析手法

## 2.1. 末端位置

ペリートモレノ氷河とアメギノ氷河の末端位置変動を解析する為に 1999-2012 年の Landsat 7 ETM+ band 8, Landsat 5 TM band 3 の可視画像を使用した. これらの画像は U. S. Geological Survey (USGS)のダウンロードサイトより取得した. ESRI 社の ArcGIS を使用し,目視で末端位置をマッピングした. その精度は衛星画像の解像度と等しく, Landsat 7 が 15 m, Landsat 5 が 30 m である. 末端位置の移動量は末端部の面積減少量 を氷河幅で除して求めた<sup>3)</sup>.

## 2. 2. 表面標高

氷河表面標高の変化を解析する為に、2 時期の数値標高モデル(DEM) を比較した. 一つ は Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) で, 2000 年 2 月の観測によって得られた DEM であり、今回は SRTM v2.1 データを使用した. このデータは分解能 90 m で水平絶対 精度 20 m で鉛直絶対精度 16 m となっている<sup>4)</sup>. もう一つは 2008 年 3 月 29 日に撮影され た Advanced Land Observing Satellite (ALOS) PRISM 画像を用いたステレオ視解析によ り、本研究によって得られた DEM である. この解析には、デジタル図化機(LPS; ERDAS Inc.)とステレオモニタ(SD2020; Planar Systems, Inc.)を使用し、SRTM のデータが存在 する位置で表面標高を測定した。同様の手法で得られた DEM の鉛直誤差は最大で± 4 m と報告されている<sup>5)</sup>. 2 時期の DEM の標高差が、氷河外でゼロに近づくよう、標高値のず れを補正した.2時期のDEMを氷河外で比較した時の標準偏差は2.3mであった.

Ê

#### 3. 結果

#### 3.1. 末端位置変動

ペリートモレノ氷河とアメギノ氷河の 末端位置変動を図2に示す.ペリートモ レノ氷河は 100 m 程度の前進と後退を繰 り返した結果, 1999-2012 年の間に 26 m 前進した. 長期的に末端位置はほぼ一 定であったといえる. 最大変化幅は 272 m であった. 短期的な変動に注目すると、 末端位置は12月(南半球の夏)まで前進 し、その後7月(南半球の冬)まで後退 するという季節的な末端変動が明らかと なった. アメギノ氷河では同期間に 723 m 後退し, 平均の後退速度は 51 m a<sup>-1</sup> であった.



離. 青色の十字はペリートモレノ氷河(GPM), 黄色の丸はアメギノ氷河(GA)を示す.

### 3. 2. 表面標高変化

2000-2008 年の 8 年間に、ペリート モレノ氷河は末端から約 5 km の範囲で 表面標高が 10-30 m 上昇した. アメギ ノ氷河は、末端より約 1 km 上流を極大 とした表面標高の低下を示しており最大 の低下量は 60 m であった(図 3). 氷厚増 加速度はペリートモレノ氷河で 0.4 m a<sup>-1</sup>, アメギノ氷河で -12.3 m a<sup>-1</sup> であっ た.



図 3. 2000 - 2008 年における中央流線上での 表面標高変化

## 4. 考察

1999 - 2012 年までの末端位置変動と 2000 - 2008 年の氷厚変化は、いずれの結果も、ペ

リートモレノ氷河は比較的安定していた一方で,アメ ギノ氷河は後退が進んでいることが示された.パタゴ ニア氷原では,多くの氷河がアメギノ氷河同様に後退 しており,ペリートモレノ氷河と同様に安定している 氷河は例外である.以下では先行研究や本研究の結果 に基づき,全質量収支の内訳を詳細に考察することに よって,これらの氷河の異なる変動の原因を議論する.

カービング氷河の年間質量変化量 *Δ M* は, 次式で示される.

 $\Delta M = A - B - C = \int A(z)S(z)dz - \int B(z)S(z)dz - cWH_i$ A(z) と B(z) は各標高 z における年間の正味の涵養およ び消耗量を示す. S(z) は標高 z に位置する氷河表面積 を示す(図 4). c, W, H<sub>i</sub> はそれぞれカービング速度, 末端部の氷河幅と氷厚を示す.また,単位面積当たり の年間氷厚変化量 dh は

 $dh = \Delta M / S$ 



**図 4**. 氷河表面積の標高分布. 黒線がペリートモレノ氷河,太 いグレー線がアメギノ氷河を示 す. 点線は同地域において推定 された平衡線高度<sup>6)</sup>.

となる. Stuefer et al.<sup>6)</sup>によって報告されたペリートモレノ氷河の 1999 - 2000 年の表 面質量収支と SRTM による表面標高(図 4)を用いて,氷河全体の涵養量(A)と消耗量(Bを 計算した.カービングフラックス(C)に関しては,ペリートモレノ氷河では Stuefer らに よる推定値を用いた.アメギノ氷河では過去に示された末端部の氷厚<sup>7)</sup>と流動速度<sup>8)</sup>,お よび本研究で得られた末端移動量を用いて求めた.上記の数値から得られた質量変化量を 氷河表面積で割って平均の氷厚変化速度を求め,DEM によって得られた標高変化速度と比 較した(表 1).氷河の表面積は,Landsat 7 可視画像と SRTM の DEM を使用して目視により 測定した.全質量収支の計算によって得られた氷厚変化速度は,ペリートモレノ氷河にお いて 0.30 m a<sup>-1</sup>,アメギノ氷河において-2.54 m a<sup>-1</sup>となり,DEM の比較によって得られた 氷厚変化速度と概ね整合する結果である.質量損に対する氷河表面の消耗量とカービング フラックスの比は,ペリートモレノ氷河では 62:38,アメギノ氷河では 80:20 となり,質 量損に氷河表面消耗が占める割合が大きいことが示された.さらに,アメギノ氷河では, 消耗量が涵養量の 2 倍に相当することが明らかになった.以上の結果から,アメギノ氷河では, る.また,アメギノ氷河で表面消耗量が涵養量を大幅に上回っている理由は,涵養域面積

比 (AAR) によって説明できる. 氷河表面積 と過去に報告された平衡線高度 <sup>6)</sup>を使用し て涵養域と消耗域の面積を求めたところ, ペリートモレノ氷河で 191.8 km<sup>2</sup>, 67.3 km<sup>2</sup> であり, アメギノ氷河で 34.9 km<sup>2</sup>, 25.8 km<sup>2</sup> となった. AAR は,山岳氷河の一 般的な値が 0.5 - 0.8<sup>9)</sup>であるのに対し, ア メギノ氷河では 0.43 と小さい. また, ペ リートモレノ氷河で 0.74 とおおむねその

表 1. 全質量収支の各要素の計算結果と DEM から得られた氷河の氷厚変化量.

	А	В	С	dh (Model)	dh (DEM)
	$\mathrm{km}^3 \mathrm{a}^{-1}$	$\mathrm{km}^3 \mathrm{a}^{-1}$	$\mathrm{km}^3 \mathrm{a}^{-1}$	m $a^{-1}$	m $a^{-1}$
GPM	1.022	0.581	0.361	0.30	0.05
GA	0.098	0.202	0.050	-2.54	-1.56

範囲に入る. すなわちアメギノ氷河の AAR は通常の値よりも小さいため, 今後も氷河が後 退していくことが予測される.

### 5. 結論

南パタゴニア氷原ペリートモレノ氷河とアメギノ氷河において末端位置変動と氷厚変化 を人工衛星データによって解析した.その結果,ペリートモレノ氷河では,末端位置・氷 厚ともに長期的な変動はなかったが,季節的な末端位置の変動が明らかになった.アメギ ノ氷河では,末端が 1999 - 2012 年に 51 m a<sup>-1</sup>の速度で後退し,氷厚は 2000 - 2008 年に 12 m a<sup>-1</sup>の速度で減少した.全質量収支を計算してその内訳を考察したところ,アメギノ 氷河では質量損に対する表面消耗量の割合が大きく,カービングと比較して氷河後退に果 たす役割がより大きいと推測される.また,アメギノ氷河の AAR は,0.43 と一般の氷河 よりも小さく,今後も縮小傾向にあることが示唆された.以上の結果から,ペリートモレ ノ氷河とアメギノ氷河の異なった変動に AAR の違いが重要な役割を果たしていることが示 された.

#### 謝辞

本研究は科研費(基盤研究 B 23403006)の助成を受けて実施したものである.

#### 参考文献

- Skvarca, P. and 2 others. (2010): Documenting 23 years of areal loss Hielo Patagónico Sur, recent climate data and potential impact on Río Santa Cruz water discharge. *Abstract Book of International Glaciological Conference Ice and Climate Change: A View from the South*, Valdivia, Chile, Centro de Estudios Científicos, 82
- 2) Aniya, M. and 4 others. (1997): Recent Glacier Variations in the Southern Patagonia Icefield, South America, *Arctic and Alpine Research*, **29**, No. 1, 1–12
- T. Moon and I. Joughin (2008): Change in ice front position on Greenland's outlet glaciers from 1992 to 2007, *Journal of Geophysical Research*, 113, F02022
- 4) Farr, T. G. and 17 others. (2007): The Shuttle Radar Topography Mission, *Reviews of Geophysics*, 45, RG2004
- 5) Lamsal, D. and 2 others. (2011): Digital terrain modelling using Corona and ALOS PRISM data to investigate the distal part of Imja Glacier, Khumbu Himal, Nepal. *Journal of Mountain Science*, **8**(3), 390–402.
- 6) Stuefer, M. and 2 others. (2007): Glaciar Perito Moreno, Patagonia: climate sensitivities and glacier characteristics preceding the 2003/04 and 2005/06 damming events. *Journal of Glaciology*, **53**(180), 3–16.
- 7) Warren, C. and Aniya, M. (1999): The calving glaciers of southern South America. *Global and Planetary Change*, **22**(1–4), 59–77.
- 8) Floricioiu, D. and 4 others. (2008): Velocities of major outlet glaciers of the Patagonia Icefield observed by TERRASAR-X. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008. IGARSS 2008. IEEE International. 4(IV-347), IEEE, 2008
- 9) Hawkins, F. (1985): Equilibrium-line altitudes paleoenvironment in the Merchants Bay area, Baffin Island, NWT, Canada. *Journal of Glaciology*, **31**(109), 205–213