

# 人工衛星画像を用いた南パタゴニア氷原カービング氷河の

## 流動速度測定

### Velocity fields of calving glaciers in the Southern Patagonia Icefield measured using satellite images

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)

Daiki Sakakibara, Shin Sugiyama

#### 1. はじめに

南米南部に位置する南パタゴニア氷原 (12,550 km<sup>2</sup>)<sup>1)</sup> は南半球最大の温暖氷塊である (図-1). 氷原西側では主に海洋に, 東側では湖に, 多数のカービング氷河が流れ出しており, 氷原の質量収支に大きな影響を与えている. しかしながら, 同様にカービング氷河が多いアラスカやグリーンランドと比較して, パタゴニアでは氷河の流動速度の観測は非常に少ない. 本研究では, 南パタゴニア氷原全域でカービング氷河の流動速度を明らかにすることを目的として, 人工衛星データを用いて流動速度測定を行った.

#### 2. データと手法

##### 2.1. 人工衛星画像

本研究ではアメリカ地質調査所 (USGS) が配布している Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) Band 8 のパンクロマティック画像を使用した (図-1). 地上分解能は 15 m である. この画像は人工衛星の位置や姿勢情報, 地上基準局, 数値標高モデル (DEM) を用いてラジオメトリック補正と幾何補正がなされている. 南パタゴニア氷原全域で測定を行うため, 2000 年から 2001 年に撮影された, ローパスが 231-094, 232-094, 231-095, 232-095, 231-096 の画像 10 枚を用いた. 流動測定を行った画像 2 枚の撮影間隔は 32-64 日であった.

##### 2.2. 画像相関法による流動速度測定

本研究では, 2 時期の可視画像を比較して, 氷河表面特徴の変位から流動速度を測定する画像相関法を用いた<sup>2)</sup>. 先に撮影された画像中に

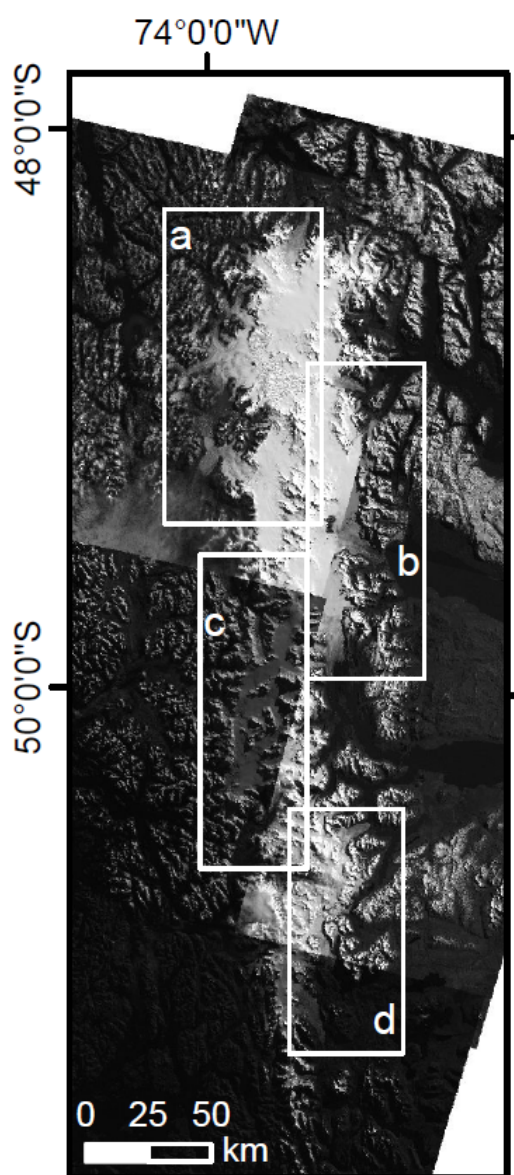


図-1 南パタゴニア氷原の Landsat 7 ETM+ パンクロマティック画像. 図中の白枠と記号は図-2 の表示範囲を示す.

参照領域を設定し、他方の画像中に参照領域より大きな検索領域を設定する。検索領域内で参照領域との相互相関係数分布を計算し、その極大値の座標と参照領域の元の座標から、その地点の変位を測定した。パタゴニアの氷河では、流動速度が速く、大きな変位が予測されるため、比較的大きな検索領域 (128×128 pixel, 1920×1920 m)を設定した。一方、参照領域は、小規模な氷河での測定を可能にするため、比較的小さな範囲 (16×16 pixel, 240×240 m)を設定した。8 ピクセル毎に参照領域を設定し、流動速度の空間分布を得た。画像相関法による主な誤差要因は、(1)2枚の画像の位置合せ誤差、及び(2)誤相関による誤差である。(1)の誤差を減少させるため、氷河外の不動点(岩盤)の平均変位を画像のずれとみなして、解析結果より差し引いた。また(2)の誤差を減少させるため、流動速度の空間分布の中で上下及び左右との差が大きい値 ( $\pm 200 \text{ m a}^{-1}$ 以上)を除外した。

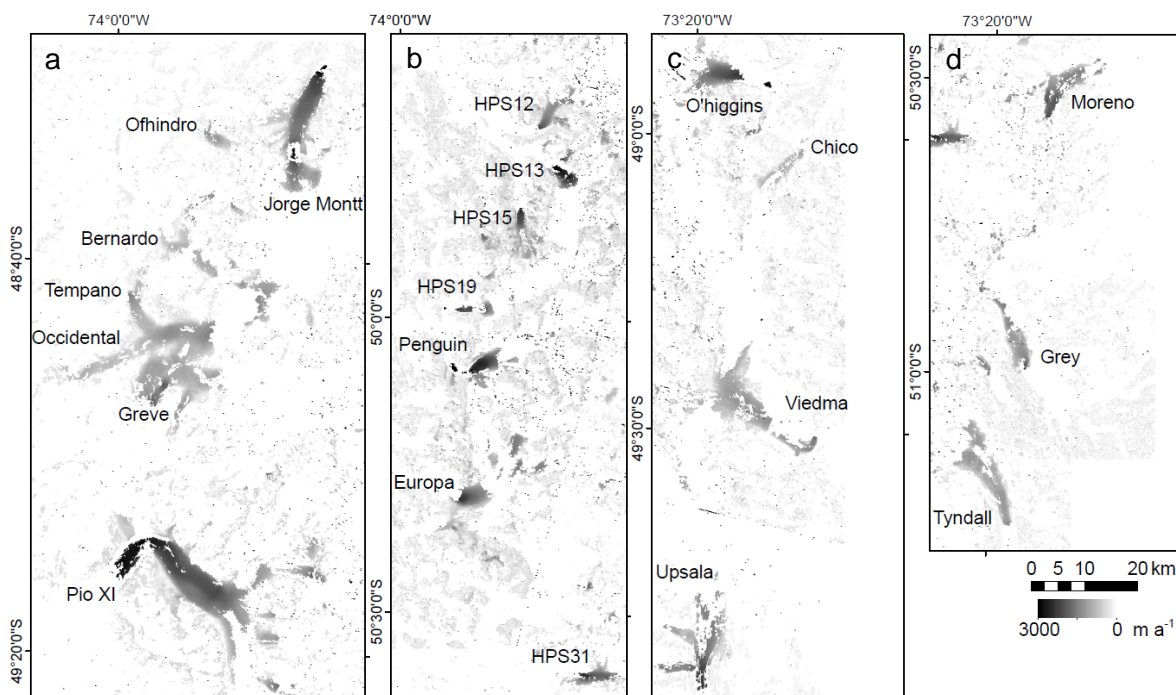


図-2 2000年から2001年の南パタゴニア氷原におけるカービング氷河の流動速度。(a)北西部。(b)南西部。(c)北東部。(d)南東部。

### 3. 結果

#### 3.1. 北西部(図-2(a))

海洋に流入する Jorge Montt 氷河では、最大  $5000 \text{ m a}^{-1}$  の速度が末端から 3 km 上流で観測され、下流方向に大きな流動増加が見られた。また中流部の急傾斜地域では、流動速度が  $3000 \text{ m a}^{-1}$  に達し、末端から 20 km 付近まで  $1000 \text{ m a}^{-1}$  を超える速度が観測された。なお末端付近では、表面の著しい変形により測定値が得られなかった。湖に流入する Ofhindro, Bernardo, Occidental 氷河では、流動速度は最大  $700 \text{ m a}^{-1}$  であり、その空間変化は Jorge Montt 氷河と比較すると小さい。その南方で同様に湖に流入する Greve 氷河では、下流方向に流動増加が見られ、末端から 3 km 上流の地点で速度は  $1400 \text{ m a}^{-1}$  に達する。南パタゴニア氷原で最大の面積を持ち、海洋に流入する Pio XI 氷河では、南側の末端から上流 30 km まで  $1000 \text{ m a}^{-1}$  を超える速度が見られたが、北側の末端では最大  $300 \text{ m a}^{-1}$  であった。

### 3.2. 南西部(図-2(b))

海洋に流入する HPS12, HPS13, HPS15, HPS19, Penguin, Europa, HPS31 氷河の末端では、画像の影の影響や、表面特徴の著しい変形により測定値が得られなかった。末端から 2-5 km 上流で流動速度は  $1700 \text{ m a}^{-1}$  に達しており、特に Penguin 氷河では、末端から 4 km 上流で  $5700 \text{ m a}^{-1}$  であった。いずれの氷河でも、末端に向けた大きな流動増加が見られた。

### 3.3. 北東部(図-2(c))

湖に流入する O'higgins 氷河では測定値を得ることができなかったが、最大  $2600 \text{ m a}^{-1}$  の速度が末端から 2 km 上流で観測され、末端に向かって流動増加が見られた。南パタゴニア氷原で 2 番目の面積を持ち湖に流入する Viedma 氷河では、末端で流動速度が  $1000 \text{ m a}^{-1}$  に達しているほかは、最大で  $600 \text{ m a}^{-1}$  の速度であり、空間変化も O'higgins 氷河と比較すると小さい。Viedma 氷河の南に位置し、湖に流入する Upsala 氷河では、末端の流動速度は  $1700 \text{ m a}^{-1}$  に達しており、末端から 4 km 上流まで  $1500 \text{ m a}^{-1}$  を超える速度が見られた。

### 3.4. 南東部(図-2(d))

Upsala 氷河と同じ湖に流入する Moreno 氷河末端での流動速度は最大  $800 \text{ m a}^{-1}$  であるが、中流部の急傾斜地では  $1300 \text{ m a}^{-1}$  に達する。湖に流入する Grey 氷河では、末端付近で  $1800 \text{ m a}^{-1}$  に達する速度が見られた。それ以外の地点では流動速度とその空間変化は末端と比較して小さなものである。南パタゴニア氷原最南部に位置し湖に流入する Tyndall 氷河では、流動速度は最大  $600 \text{ m a}^{-1}$  であった。

## 4. 考察

本研究の結果から、同じ南パタゴニア氷原に位置するカービング氷河が、多様な流動速度と、その空間分布を持つことが明らかとなった。その原因をここで考察する。パタゴニア氷原では東西に顕著な気候条件の違いがあり、その影響が考えられる。氷原西側の Guarello ( $50^{\circ}21'S, 75^{\circ}21'W$ ) では年平均降水量は  $7330 \text{ mm}$  であるが<sup>3)</sup>、東側の El Calafate ( $50^{\circ}20'S, 72^{\circ}15'W$ ) では  $200 \text{ mm}$  程度である<sup>4)</sup>。したがって氷河の涵養量と質量交換速度の観点から考えると、西側でより速い流動が予想される。しかしながら、北西部の解析結果(図-2(a))に注目すると、Jorge Montt 氷河と Pio XI 氷河では、末端付近で  $2500 \text{ m a}^{-1}$  を超える流動速度が観測されたが、Ofhindo 氷河や Bernardo 氷河、Occidental 氷河では、流動速度は最大  $700 \text{ m a}^{-1}$  であった。加えて、東側の O'higgins 氷河では、 $2600 \text{ m a}^{-1}$  に達する速度が観測され、Upsala 氷河においても  $1700 \text{ m a}^{-1}$  に達する速度が観測された。したがって気候条件の東西分布で流動の多様性を説明するのは難しい。

次に海洋に流入する氷河(例えば Jorge Montt 氷河, Penguin 氷河)と湖に流入する氷河(例えば Bernardo 氷河, Moreno 氷河)を比較すると、全般に前者の方が流動は大きく、上流から末端に向けての流動加速も顕著である。そこで、今回流動速度を測定した氷河の Accumulation Area Ratio (AAR)<sup>5)</sup>を、海洋に流入するものと、湖に流入するものに分けて平均値を比較した。その結果、湖に流入する氷河 ( $0.68 \pm 0.17$ ) に対して、海洋に流入する氷河 ( $0.85 \pm 0.08$ ) が高い値を示した。つまり、全体的な傾向として、海洋に流入する氷河は比較的広い涵養域を持ち、涵養量も大きいと推定される。また、海洋に流入する氷河と、湖に流入する氷河で形状に違いがあることも考えられる。そこで、Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) によって作成された 2000 年の DEM を使用して、末端から 5 km 上流ま

での表面傾斜角を求めた。その結果、海洋に流入する氷河の平均値 ( $6.9\pm 3.2^\circ$ ) は、湖に流入する氷河の平均値 ( $3.4\pm 1.8^\circ$ ) の2倍であった。氷河の流動速度は表面傾斜角と氷厚に依存するため、氷厚を一定とすると表面傾斜角が大きな氷河ほど大きな流動速度を持つと考えられる。以上の解析から、海洋に流入する氷河は、湖に流入する氷河と比較して、大きな涵養量があり、末端付近の表面傾斜角が大きい事が流動速度に影響していると考えられる。

## 5. まとめ

人工衛星画像を用いた画像相関法によって、南パタゴニア氷原におけるカービング氷河の流動速度を測定した。その結果、湖に流入する氷河と比べて、海洋に流入する氷河の流動速度がより大きい傾向がみられた。湖に流入する氷河と比較して、海洋に流入する氷河は、比較的広い涵養域を持ち、末端付近の表面傾斜角が大きい事が流動状態の違いに影響していると考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、古屋正人氏(北海道大学大学院理学院)および澤柿教伸氏(北海道大学地球環境科学院)には、解析手法についてご助言をいただいた。本文を取りまとめるにあたり、ここに深く謝意を表します。本研究は科研費(基盤B 23403006)の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) Skvarca, P., S. Marinsek and M. Aniya, 2010: Documenting 23 years of areal loss of 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) Scambos, T.A., M.J. Dutkiewicz, J.C. Wilson and R.A. Bindshadler, 1992: Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data. *Remote Sensing of Environment*, **42**(3), 177–186.
- 3) Heusser, C.J., 1984: Late-Quaternary climates of Chile. *Late Cainozoic Palaeoclimates of the Southern Hemisphere*, Rotterdam, Balkema, 59–83.
- 4) Warren, C.R. and D.E. Sugden, 1993: The Patagonian Icefields: A glaciological review. *Arctic and Alpine Research*, **25**(4), 316–331.
- 5) Aniya, M., H. Sato, R. Naruse, P. Skvarca and G. Casassa, 1996: The use of satellite and airborne imagery to inventory outlet glaciers of the Southern Patagonia Ice field. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **62**, 1361–1369.