

# ロシア・カムチャッカ半島・クロノツキー半島の氷河群における 表面高度変化

## Surface elevation change of glaciers in Kronotsuky Peninsula, Kamchatka Peninsula, Russia

福本 峻吾<sup>1,2</sup>, 波多 俊太郎<sup>1,2</sup>, 斉藤 潤<sup>1</sup>, 杉山 慎<sup>1</sup>  
Shungo Fukumoto<sup>1,2</sup>, Shuntaro Hata<sup>1,2</sup>, Jun Saito<sup>1</sup>, Shin Sugiyama<sup>1</sup>  
Corresponding author: fukumoto@pop.lowtem.hokudai.ac.jp (S Fukumoto)

Relatively few research has been reported on the mass budget of glaciers in Kamchatka Peninsula, far eastern Russia. To quantify recent glacier change in the region, we utilized ALOS-PRISM and SRTM data to analyze the surface elevation change of glaciers in Kronotsky Peninsula situated on central eastern part of Kamchatka Peninsula. We processed stereo pair satellite images with a digital map plotting instrument (EARDAS IMAGINE) to generate digital elevation maps (DEMs). Generated DEMs were compared to measure surface elevation changes during periods of 2000–2006 and 2006–2010. The mean rate of annual surface elevation changes over 5 glaciers was  $-1.87 \text{ m a}^{-1}$  in 2006–2010, which was more than double compared with the rate in 2000–2006.

### 1. はじめに

ロシア・カムチャッカ半島内には大小 405 個の氷河が存在し、1940–1970 年には 49 Gt の淡水が氷として蓄えられていたと推定されている<sup>1)</sup>、近年の研究によって、カムチャッカ半島から周辺海域へもたらされる淡水量の変動が、北太平洋における海水循環に深く関わっている可能性が指摘された<sup>2)</sup>。したがって、同半島内の氷河とその淡水供給量の変動を定量化することが必要とされている。

Khromova ら<sup>1)</sup>は衛星画像解析によって、氷河面積が同半島内の 139 の氷河の面積が 1950–2002 年までに平均 16.6%減少したことを明らかにした。また、Ananicheva ら<sup>3)</sup>は数値モデルを用いて同半島内の氷河の質量変動を地域ごとに推定し、2010 年から 2040–2061 年までに最大で  $170 \text{ cm a}^{-1}$  の質量減少を引き起こすことを予測した。しかしながら、近年の氷河質量変動を定量化した研究事例は少ない。そこで本研究は人工衛星データを用いて、カムチャッカ半島中東部・クロノツキー半島内に分布する氷河群 (図 1 赤線内)において、2000 年以降の質量変動に関する解析を行った。

### 2. 調査地域

本研究では、カムチャッカ半島中東部・Kronotsky 半島に位置する 5 つの氷河(Koryto, Bunina, Brovko, Left Tyushevsky, Right Tyushevsky)を対象とした (図 1)。中でも Koryto 氷河は 1997 年に小林ら<sup>4)</sup>、2000 年に山口ら<sup>5)</sup>によって現地調査が行われている。Kronotsky 半島は太平洋に面しており、海洋から豊富に水蒸気が供給されるため降雪が多く、同半島内の氷河群はカムチャッカ半島内で最も平衡線高度(ELA)が低い<sup>6)</sup>。なお、Kronotsky 半島内の氷河の面積は、カムチャッカ

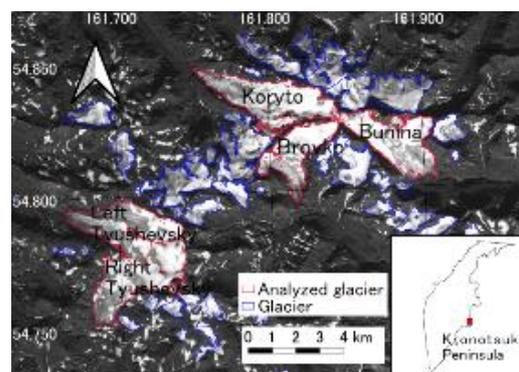


図 1 研究対象の氷河群を示す衛星画像 (2006 年 9 月 28 日の ALOS PRISM 画像) と、カムチャッカ半島におけるクロノツキー半島の位置。

<sup>1</sup>北海道大学 低温科学研究所  
Hokkaido University, Institute of Low Temperature Science  
<sup>2</sup>北海道大学 大学院環境科学院  
Hokkaido University, Graduate School of Environmental Science

半島内全域での氷河面積の 8.9% <sup>7)</sup>を占める。

### 3. 手法

#### (1) 人工衛星データ

陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)の PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) センサによって、2006 年および 2010 年に取得された前方視および直下視画像からなるステレオペア画像を標高解析に用いた。地表分解能は 2.5 m である。また、2000 年に取得された 1 arc-second Shuttle Radar Topography Mission (SRTM-1) DEM を使用した。撮影時期の異なるデータセットを比較することで標高変化を測定した。

#### (2) 氷域マッピング

2006 年に取得された PRISM 画像を基に、氷域と基盤部分を目視で区別して GIS ソフトウェア (QGIS) 上で氷河のマッピングを行った。

#### (3) ALOS 画像を用いた DEM の作成

PRISM ステレオペア画像に、RPC (Rational Polynomial Coefficients) ファイルで位置情報を付

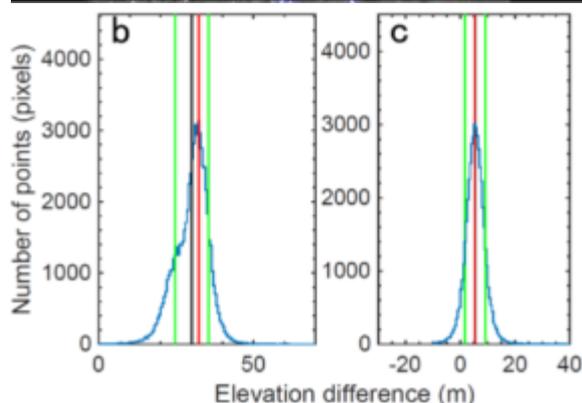
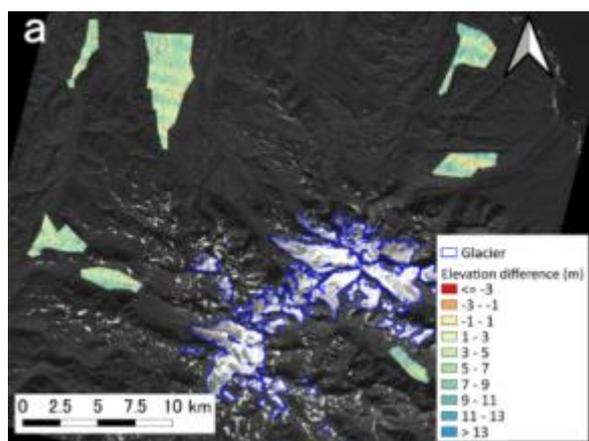


図 2 (a)氷河周辺の基盤岩域における表面高度変化の空間分布と (b, c) ヒストグラム。黒線は標高差平均、赤線は最頻値、緑線は標準偏差の幅を示す

与し、デジタルフォトグラメトリソフトウェア (ERDAS IMAGINE) の自動生成機能を用いて DEM を作成した。生成した DEM は、解像度 30 m に統一し、表面標高解析に用いた。なお、ALOS 画像から DEM を自動生成する際に、コントラストの少ない雪に覆われた領域等で正確な標高値が得られないことがある。ALOS-PRISM 画像を使って過去に行われた同様の研究によれば、標高測定誤差は  $\pm 4$  m 程度である <sup>8)</sup>。

表 1 基盤部分の標高差の平均、標準偏差、最頻値 (m)。

	2000–2006	2006–2010
平均	30.1	5.4
標準偏差	5.4	3.8
最頻値	32.1	5.1

#### (4) 氷河表面高度変化

解析に用いた DEM の間では、本来変化がないと考えられる基盤岩域の標高値にずれを含む。そこで基盤岩域における 2 時期の標高差がゼロに近づくよう、以下のように基準となる標高値を調整した (図 2)。

基盤岩域内の 2 時期の標高差とピクセル数の関係を階級幅 0.5 m のヒストグラムにし、最頻値を DEM に含まれる基盤部分の鉛直方向の変化量として求めた (図 2 (b), (c), 表 1)。この値を片方の DEM の標高値に一律に加えることで基盤岩域内の標高差を小さくした。

### 4. 結果と考察

年間質量収支がゼロとなる標高を平衡線高度 (ELA, equilibrium line altitude) と呼ぶ。この ELA を

表 2 解析範囲内における各氷河の最大標高値、最小標高値および標高中央値 (m)。

	最大標高	最小標高	標高中央値
Koryto	1159	323	829
Bunina	1181	481	845
Brovko	1149	518	955
Left Tyushevsky	1260	738	1001
Right Tyushevsky	1177	669	975

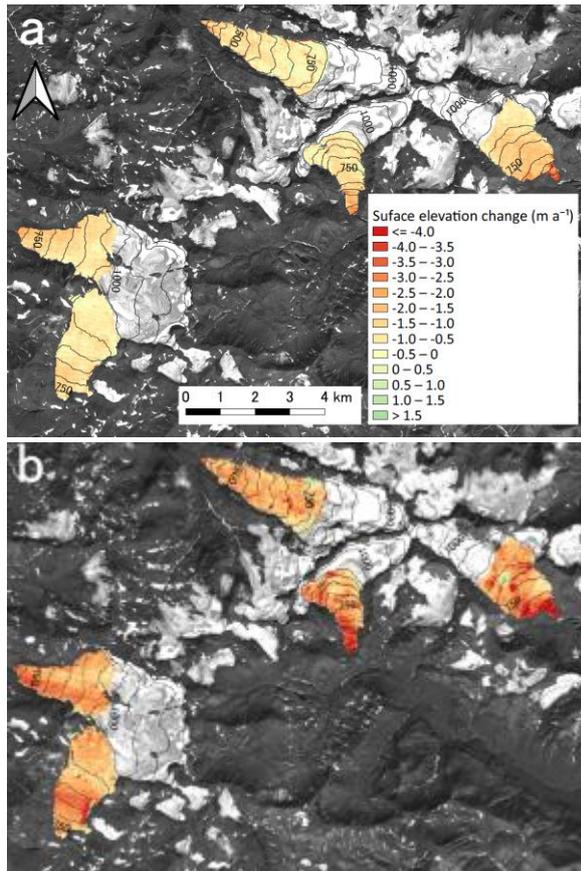


図3 氷河消耗域における2000–2006年(a), 2006–2010年(b)表面高度変化の分布図。

各氷河における標高の中央値に等しいと仮定した<sup>9)</sup>標高が ELA 以下である領域を消耗域, ELA 以上である領域を涵養域として区別した(表 2)。涵養域では, 画像の視認性の良し悪しによる DEM の誤差が大きいため, 本稿では消耗域のみを解析の対象とした。2000–2006, 2006–2010 年の各期間の消耗域における氷河表面高度変化の空間分布を図 3 に示す。いずれの期間・各氷河域においても負の値を示し, 2006–2010 年の Bunina 氷河および Brovko 氷河末端部での表面高度低下速度が特に大きく, それぞれ  $5.8 \text{ m a}^{-1}$ ,  $4.9 \text{ m a}^{-1}$  であった(図 4(b))。また, 5 つの氷河消耗域における表面低下速度は, 2000–2006 年から 2006–2010 年にかけて 2 倍以上に増加した(表 3)。

さらに各氷河の表面高度変化速度を 50 m 毎の標高域で比較すると, Koryto 氷河は他の氷河と比べ同標高域における表面高度低下速度が小さい(図 4)。Koryto 氷河の標高 550–600 m における平均表面高度変化は 2000–2006, 2006–2010 年の各期間でそれぞれ  $-0.74 \text{ m a}^{-1}$ ,  $-1.78 \text{ m a}^{-1}$  であり, 1995–1996 年(標高 580 m において  $+3.03 \text{ m a}^{-1}$ <sup>10)</sup>)

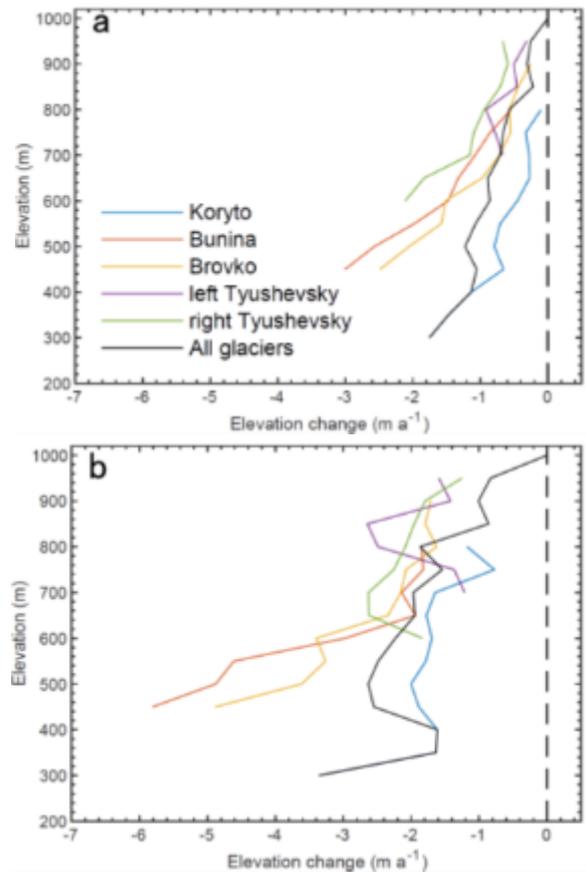


図4 2000–2006年(a), 2006–2010年(b)の各氷河消耗域における平均表面高度変化の標高分布。

表 3 各氷河消耗域の平均表面高度変化( $\text{m a}^{-1}$ )。

	2000–2006	2006–2010年
Koryto	$-0.47 \pm 0.9$	$-1.57 \pm 1.0$
Bunina	$-1.04 \pm 0.9$	$-2.19 \pm 1.0$
Brovko	$-0.67 \pm 0.9$	$-2.07 \pm 1.0$
Left Tyushevsky	$-0.50 \pm 0.9$	$-1.76 \pm 1.0$
Right Tyushevsky	$-0.80 \pm 0.9$	$-1.90 \pm 1.0$
全体平均	$-0.68 \pm 0.9$	$-1.87 \pm 1.0$

から, 氷河質量減少傾向へと大きく転換していることが明らかになった。先行研究の結果<sup>5,10)</sup>から, これは冬季の降雪量の減少によるものである可能性が示唆されている。

図 5 は Semyachik (北緯 54.1 度, 東経 159.9 度) において観測された夏季(7–9 月)平均気温経年変化を示したものである。夏季の気温は 2000 年と 2010 年の間に  $1.3 \text{ }^\circ\text{C}$  増加し, 特に 2006–2010 年の期間は  $12.1\text{--}12.8\text{ }^\circ\text{C}$  と比較的高い気温を示した。また, 2000–2006 年, 2006–2010 年の各期間の夏季平均気温はそれぞれ  $11.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $12.5 \text{ }^\circ\text{C}$  であり,

1°Cの上昇が見られた。従って、夏期の気温上昇により表面融解が増加し、表面高度低下に寄与したと推定される。その他の要因としては、降雪量変化に伴う涵養量の減少等も考えられるため今後検討する必要がある。

## 5. まとめと今後の展望

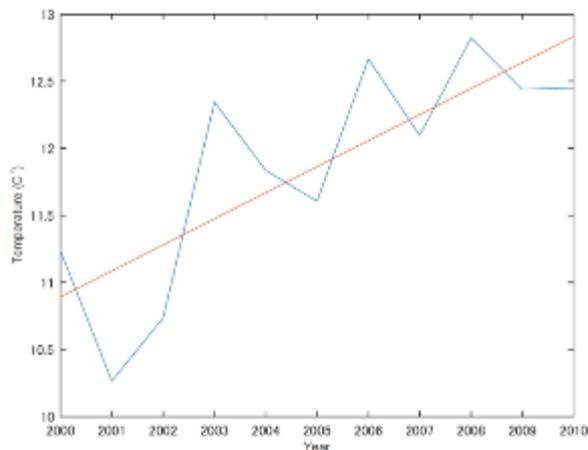


図5 Semyachikの夏季(7-9月)平均気温変化.赤線は全データの線形近似直線.気温データはNOAA(National Climatic Data Center)より取得した。

カムチャッカ半島中東部 Kronotsky 半島内の氷河群では、2000-2006年から2006-2010年にかけて、消耗域における表面高度低下率速度が約3倍に増加した。表面高度変化速度と気温の間には相関が見られたため、この変化は気温上昇による融解量の増加によって引き起こされた可能性がある。一方で降雪量の変化等の要因についても考える必要がある。

今後は Tera 衛星 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) センサにより取得されたデータセット等も併用することで、2010年以降の氷河表面高度変化についても解析を行っていく。

### 【参考文献】

- 1) Tatiana Khromova, Gennady Nosenko, Stanislav Kutuzov, Anton Muraviev and Ludmila Chernova, 2014 : Glacier area changes in Northern Eurasia, *Environmental Research Letters*, **9**, 015003 (1-11).
- 2) Hiroki Uehara, Andrey A. Kruts, Humio Mitsudera, Tomohiro Nakamura, Yuri N. Volkov,

Masaaki Wakatsuchi, 2014 : Remotely propagating salinity anomaly varies the source of North Pacific ventilation, *Progress in Oceanography*, **126**, 80-97.

- 3) M. D. Ananicheva, A. N. Krenke and R. G. Barry, 2010 : The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios, *The Cryosphere*, **4**, 435-445.
- 4) Daiji Kobayashi, Yaroslav D. Muravyev, Yuji Kodama and Takayuki Shiraiwa, 1997 : An outline of Russo-Japanese joint glacier research in Kamchatka, 1996, *Bulletin of Glacier Research*, **15**, 19-26.
- 5) Satoru Yamaguchi, Renji Naruse, Takayuki Shiraiwa, 2008:  
Climate reconstruction since the Little Ice Age by modelling Koryto glacier, Kamchatka Peninsula, Russia, *Journal of Glaciology*, **54**, 125-130.
- 6) Russian Academy of Sciences, 1997: World Atlas of Snow and Ice Resources .
- 7) Global Land Ice Measurement from Space (GLIMS) : www.glims.org (2019年4月15日閲覧)
- 8) D. Lamsal, T. Sawagaki, T. Watanabe, 2011: Digital terrain modeling using Corona and ALOS PRISM data to investigate the distal part of Imja Glacier, Khumbu Himal, Nepal, *Journal of Mountain Science*, **8**, 390-402.
- 9) Braithwaite, R. J. and Raper, S. C. B., 2007: Glaciological conditions in seven contrasting regions estimated with the degree-day model, *Annals of Glaciology*, **46**, 297-302.
- 10) Shiraiwa Takayuki, Muravyev Yaroslav D., Yamaguchi Satoru, Glazirin Gleb E., Kodama Yuji, Matsumoto Takane, 1997: Glaciological features of Koryto Glacier in the Kronotsky Peninsula, Kamchatka, Russia, *Bulletin of Glacier Research*, **15**, 27-36.