

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：62611
研究種目：若手研究
研究期間：2018～2020
課題番号：18K18176
研究課題名（和文）現地観測と衛星観測の統合解析による東南極氷床の動態把握と変動メカニズムの解明

研究課題名（英文）Integrated analysis of field and satellite observations to understand the dynamics of the East Antarctic Ice Sheet and elucidate the mechanism of its change

研究代表者
津滝 俊（Tsutaki, Shun）

国立極地研究所・研究教育系・特任研究員

研究者番号：40706371
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：南極氷床の沿岸部からドームふじまでの約1,000kmのルート上にある約500点で、1991-2019年の表面質量収支を解析した。その結果、涵養量は氷床表面が比較的なだらかな場所で大きく、急傾斜の場所で小さいことがわかった。また、2009年と2011年は他の年に比べて涵養量大きい。観測領域では兩年ともに総観規模擾乱による低緯度からの水蒸気輸送イベントが5回発生し、多量の降雪があった。本研究では、現地観測データから有意な積雪イベントを確認し、この地域の最近のマスバランス変化のメカニズムに関する新たな知見を得た。以上の成果をまとめ、査読付国際学術誌に投稿準備中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究でまとめた雪尺観測による表面質量収支は、沿岸部から内陸ドームを網羅し、比較的高い空間分解能で30年程度の長期間に及ぶ。このため観測データが比較的乏しい東南極DML地域においては重要なデータセットである。領域気候モデルや人工衛星観測による表面質量収支の検証を通して、現在気候下における南極氷床の表面質量収支の定量的評価に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：We analyzed the surface mass balance for 1991-2019 at about 500 points along the 1,000-km route from the coast of the Antarctic ice sheet to the Dome Fuji. The results show that the spatial distribution of the accumulation rate is high in the area where the ice sheet surface is relatively gentle and low in the steep slope. In 2009 and 2011, the accumulation rate was higher than that in other years. In our measurement area, water vapor transport events from the north caused by the synoptic-scale disturbance occurred five times in both years, and there was a large amount of snowfall. In this study, we confirmed the significant accumulation event from the field observation data and obtained new knowledge of recent mass balance change mechanisms in the region. I have been compiled the above results and prepared them for submission to a peer-reviewed international journal.

研究分野：雪氷学

キーワード：表面質量収支 東南極ドローニングモードランド地域 南極氷床

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

南極氷床は地球上の氷の約 90% を占めており、海水準にして約 60 m に相当する。1990 年代以降、衛星観測技術の飛躍的な進歩によって、氷床質量の時空間変動が明らかにされてきた。近年、西南極では氷床沿岸の棚氷の融解、氷厚の減少が相次いで報告されている¹⁾。この結果は科学的・社会的に大きな注目を集め、沿岸部を中心に、各国で大規模な現地観測、衛星観測と気候モデルの融合的な研究が進められている。

一方、西南極の 10 倍以上の氷床量を有する東南極では、地域間で異なる変動を示している。例えば日本南極地域観測隊の基地がある Dronning Maud Land (DML) では、近年氷床質量の増加が報告されている²⁾。この複雑な氷床変動の影響により、衛星観測の誤差は西南極の約 1.5 倍である。この結果、氷床全体の質量変化は先行研究間で大きなばらつきと誤差を示しており³⁾、現在の海水準変動や将来予測の研究に大きな不確定性をもたらしている。

氷床上のある地点での表面質量収支の収入(涵養)要素は、降雪、昇華凝結、地吹雪の堆積、氷床流動による流入である。支出(消耗)要素は風による削剥、昇華蒸発、積雪の融解、氷床流動による損失である。例えば降雪も地吹雪によって削剥・再堆積するため、表面質量収支は単純ではない。地域間で異なる東南極の表面質量収支を高精度で解明することが、南極氷床の質量変化、海水準変動の現状把握や将来予測に不可欠である。しかし、現地データの圧倒的不足により、衛星観測を用いた先行研究の多くは現地観測による検証を実施せず、誤差の増加に繋がっている。

南極地域観測隊では、沿岸の昭和基地から内陸のドームふじ基地に至る約 1000 km の輸送ルートに沿って、1971 年から断続的に表面質量収支を観測している。2 km 毎に竹竿を雪面に挿入し、ほぼ毎年夏期に、雪面から竹竿の上端までの長さを測定し、年間の雪面高さの変化を求める。同時に表層積雪密度を測定し、表面質量収支に換算する。また氷床流動によって竹竿の位置、標高が変化するため、流動速度も測定する。各観測点間では、雪上車に設置した GNSS によって雪面高度が連続的に測定されている。その結果、輸送ルート全域において 2000 年頃以降は涵養傾向であること、表面質量収支と氷床表面地形との相関性があることが指摘されている。

2. 研究の目的

本研究では東南極に集中し、過去 30 年間の表面質量収支の時空間変化、質量変化の空間的ばらつきに対する氷床地形の影響、および近年の質量増加メカニズムの解明を目的とする。

具体的には以下の 3 点を進める。(1) 南極地域観測隊の輸送ルートに沿って取得された雪面高度変化、表層積雪密度、氷床流動速度データを解析し、表面質量収支と誤差の解析を詳細に行う。GNSS で測定された雪面高度データを解析し、表面地形データを整備する。(2) 衛星高度計で観測された、東南極全域に及ぶ近年の氷床表面高度データを整備する。表面地形と雪尺観測による表面質量収支との相関性を解析し、表面質量収支に対する氷床地形の影響を解明する。(3) 表面質量収支データと既存の再解析データ、領域気候モデルによる表面質量収支とを比較し、東南極 DML 地域における近年の質量増加メカニズムを考察する。

3. 研究の方法

南極地域観測隊で 1991 年以降に測定された雪面高度変化、表層積雪密度データを精査し、表面質量収支をまとめたデータセットを構築する。また GNSS で測量された輸送ルート上の表面高度データを整備する。南極地域観測隊に参加して、最新の表面質量収支を測定し、上述の表面質量収支データセットと結合する。同時に高精度 GNSS を用いて、ルート上の氷床表面地形を測定する。衛星高度計(CryoSat-2: 2010 年以降)で観測された東南極における氷床表面高度、及び表面傾斜データを整備する。東南極全域における 1990 年代以降の表面質量収支の時空間変化を明らかにする。また、氷床表面高度から求めた表面傾斜角、傾斜方向と表面質量収支の間で相関解析を行い、表面質量収支と表面地形との関係を明らかにする。

4. 研究成果

(1) JARE60 での雪尺観測及び GNSS 測量の実施

2018 年 11 月から 2019 年 2 月に第 60 次日本南極地域観測隊(JARE60)に参加し、輸送ルート上 504 点において雪面上に露出する雪尺の長さを測定した。また雪上車のルーフに設置した高精度 GNSS を用いて、精密な氷床表面高度測量を実施した。輸送ルートの往復路、およびドームふじ基地南方領域(総面積約 1500 平方 km)において測量を行い、総距離 3200 km に及ぶ氷床表面高度データを得た。

(2) 表面質量収支の空間変動

輸送ルート上 504 点において取得された過去のデータ(1991-2017 年)と上記 4.1 で取得した雪尺長データをまとめ、各観測間での雪面高さ変化を求めた。各観測の間隔は不均一であるた

め、9-15ヶ月の観測間隔を持つ雪面高さ変化を1年間あたりの値に変換した。降雪パターンの変化による涵養量の年々変動は、表面地形による再分配の影響よりも十分に小さいため⁴⁾、雪面高さ変化の季節依存性は無視できると仮定した。輸送ルート上での標高と積雪表層密度の経験式⁵⁾を用いて雪面高さ変化量を水当量に変換し、年間あたりの表面質量収支を求めた。

1991-2018年における輸送ルート上504点の表面質量収支は540-852 mm water equivalent (w.e.) a⁻¹の範囲で、平均値は77 mm w.e. a⁻¹、標準偏差は96 mm w.e. a⁻¹であった。南極氷床上の標高約600-3800 mに位置する輸送ルートは全域において表面質量収支が正の値である涵養域に含まれるが、その時空間変動は2 kmの距離で隣り合う雪尺間でも非常に大きい。ECMWF ERA5などの再解析データによる観測領域の降水量は、沿岸から内陸に向かって次第に減少する空間分布を示している。氷床表面では、低温で高密度の空気が高高度(内陸)から低高度(沿岸)へ向かって移動する斜面下降風(カタバ風)が断続的に発生し、氷床表面の積雪が風によって削剥し、他地点へ輸送されて再堆積する。これらの結果から、風による積雪の再堆積が表面質量収支の時空間変動を大きくしていることが示唆された。

次に、輸送ルートにおける表面質量収支の空間分布を評価した。はじめに504点の各雪尺における観測期間の平均表面質量収支を求めた。この状態では依然として空間的ばらつきが大きいため、各観測点の平均表面質量収支を10点(水平距離20 kmに相当)で移動平均した。Figure 1aは沿岸(S16)から内陸(ドームふじ)に至る輸送ルート上の表面質量収支分布と氷床表面高度を示す。表面質量収支の空間分布においては、以下3点の特徴を得た。(1) 沿岸(S16)から南緯約70.8°に位置するみずほ基地付近までは、氷床表面高度の増加とともに涵養量は減少した。特に表面傾斜が比較的急である南緯69-69.5°、70°付近では、涵養量は内陸に向かって急激に減少している。(2) みずほ基地より内陸では、涵養量は一度増加し、大きな年々変動を伴いながら減少した。また南緯70.8-74°の領域では、涵養量が大きい場所、小さい場所が周期的に分布している。(3) 南緯74°以南の領域では涵養量は内陸に向かって次第に減少し、年々変動のばらつき(標準偏差)も比較的小さくなっている。次に各雪尺における表面質量収支の年々変動の強度を空間的に評価するために、変動係数(標準偏差/平均値)を求めた(Fig. 1b)。変動係数は南緯70-74°で1を超えるような大きな値を示し、この区間で表面質量収支の年々変動のばらつきが比較的大きいことを示唆する。この領域は沿岸から内陸まで平均値約50-100 mm w.e. a⁻¹の範囲であり、内陸に向かって明らかな増減の傾向は見えず、周期数十 km程度の表面質量収支の増減が見られた。本研究では変動係数の違いによって観測領域を3区分した。沿岸から内陸に向かって、変動係数<1の範囲を沿岸域(coastal)、変動係数>1の範囲をカタバ領域(katabatic)、再び変動係数<1の範囲を内陸域(inland)とした。coastal、inlandの表面質量収支分布は上記(1)、(3)で解釈される。次にkatabatic領域の空間分布を議論する。

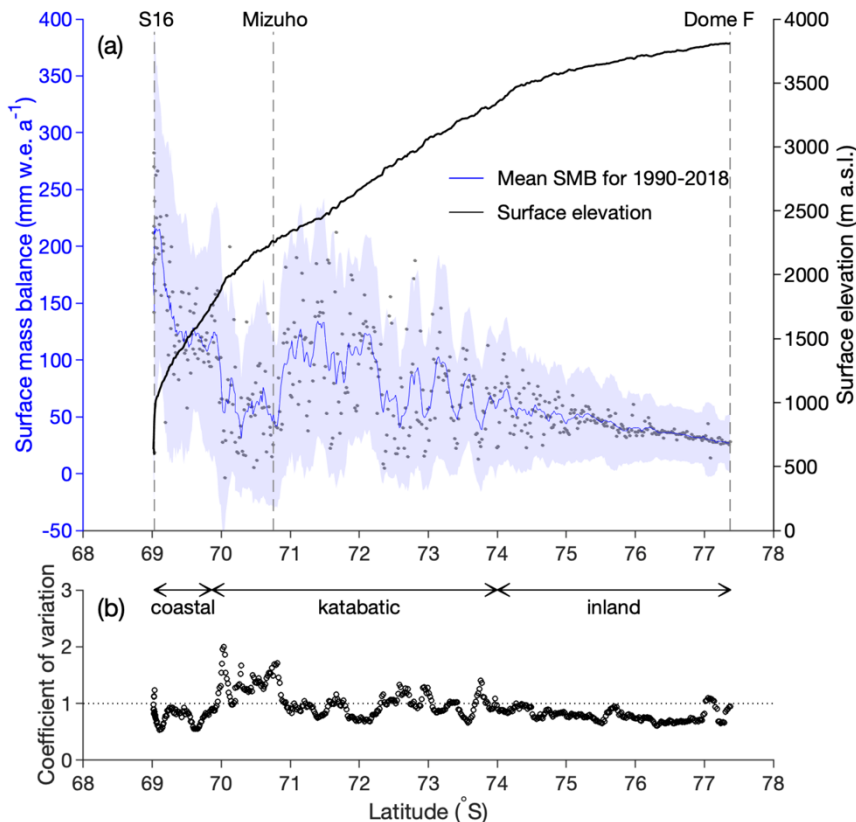


Fig. 1 : (a) 南極氷床上輸送ルートにおける、沿岸(S16)から内陸(ドームふじ)に至る雪尺観測による表面質量収支平均値(1991-2018年)。灰色点は各雪尺における全期間の平均値、青曲線は水平20 kmの移動平均値、青色ハッチ領域は移動平均に伴う標準偏差を示す。黒曲線は氷床表面高度を示す。(b) 表面質量収支の移動平均値とその標準偏差から得た変動係数。

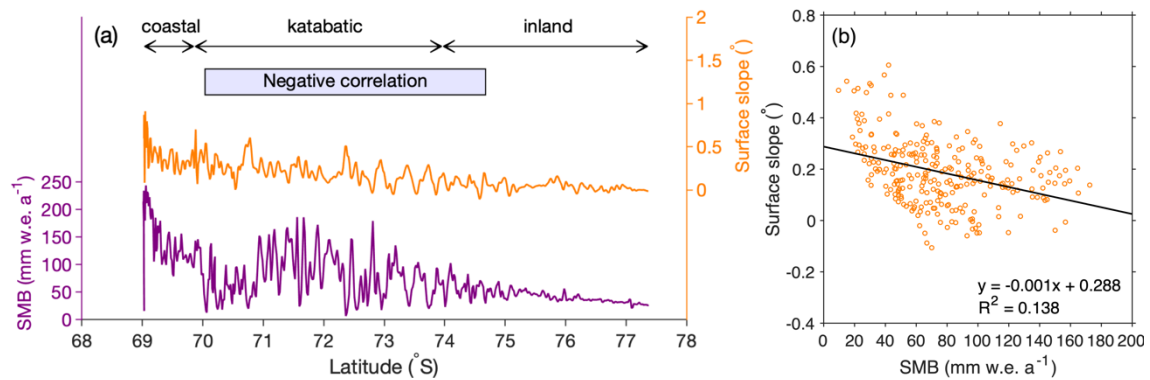


Fig. 2 : (a) 南極氷床上輸送ルートにおける、沿岸 (S16) から内陸 (ドームふじ) に至る表面質量収支 (紫曲線) と氷床表面傾斜角 (橙曲線) (ともに 4 km 移動平均)。変動係数による 3 区分領域を両矢印でしめす。 (b) 表面質量収支と表面傾斜角 (ともに 4 km 移動平均) の散点図。

Figure 2a に沿岸 (S16) から内陸 (ドームふじ) に至る輸送ルート上の表面質量収支と氷床表面傾斜角を示す。表面傾斜は衛星高度計 CryoSat-2 による数値標高モデル (1 km 解像度: 引用文献 6) より最大傾斜角と傾斜方向を計算し、雪尺設置点において内挿した後に表面質量収支と合わせて水平距離 4 km (2 点) で移動平均した。表面傾斜角は氷床縁部で大きく、変動を伴いながら内陸に向かって次第に減少している。南緯約 70.5° 以北までは傾斜角の変化は細かく、以南ではより大きな波長に変わっている。南緯 75° 以南では傾斜角、振幅ともに小さくなる。次に傾斜角の変動が特徴的な南緯 70–74.8° に着目し、同区間の表面質量収支との関係を議論する。表面傾斜角が大きい (急傾斜の) 場所では表面質量収支 (涵養量) は小さく、傾斜角が小さい (平坦な) 場所では表面質量収支が大きい関係が見られた (Fig. 2b)。特に表面傾斜角が 0.4° を超えると、表面質量収支は指数関数的に減少している。当該領域は南極氷床の中腹にあたり、カタバ風が卓越している。そのため風による積雪の再堆積による影響が顕著である。カタバ風は氷床表面地形に沿った重力流であるため、内陸 (高高度) から沿岸 (低高度) へ向かって表面傾斜が急になる地点では流れが加速し、急傾斜から平坦に転じる場所では減速する。そのため、カタバ風が強く吹く急傾斜地の下流側では積雪の削剥が強く、傾斜から平坦に転じる場所では吹き溜まりによる再堆積が起こりやすい。実際に両地点間では雪面形状も異なっており、急傾斜地では風によって磨かれたような光沢雪面が、平坦地では積雪の吹き溜まりが確認されている。南極氷床における積雪の堆積は表面地形に強い影響を受け、さらに氷床表面地形の変化は、氷床下の基盤地形の凹凸が伝播して形成されることが明らかにされている⁴⁾。本研究では表面質量収支と氷床表面地形の関係性に関してルート沿いの 2 次元的な解析に留まった。表面質量収支と氷床表面地形の相関関係を 3 次元 (面) 的に解明することが今後の重要な課題である。

(3) 表面質量収支の時系列変動

雪尺観測による表面質量収支の時系列変化 (1991–2018 年) を解析した。時系列解析では降水量の年々変動の解明を主目的としたため、氷床表面地形の影響を受けない空間スケールを採用した。上記 (2) で区別した coastal、katabatic、inland と観測領域全域 (S16–DF) それぞれに含まれる雪尺観測データを年ごとにまとめ、平均値と標準偏差を求めた。全域では 47–142 mm w.e. a⁻¹ の範囲で、平均値と標準偏差はそれぞれ 78、25 mm w.e. a⁻¹ であった。観測期間における表面質量収支の傾向を見てみると、全区域において涵養量は微増傾向ではあるが、年々変動が大きいため有意な関係は見られなかった。表面質量収支の年々変動は特に coastal で大きく、平均値 115 mm w.e. a⁻¹ に対し 59–270 mm w.e. a⁻¹ の範囲で変動した。観測期間の中で 2008–2009 年 (みずほ基地以南は 2009 年に観測を行っていないため、2008、2009 年の平均値とした) と 2011 年に顕著な多涵養が明らかになった。このうち 2008–2009 年は coastal から inland までの全領域で多涵養量が観測されたのに対し、2011 年は coastal 領域のみ観測された。当該観測領域を含む東南極の DML 地域では、重力衛星観測によって 2003–2012 年に氷床質量の増加が報告されている²⁾。現地観測と再解析データの解析から、質量増加の主な要因は 350 Gt にも及ぶ多量の降雪であり、そのほとんどが 2009 年 5 月、2011 年 6 月に発生した計 5 回の降雪イベントに起因することが明らかになっている⁷⁾。この多量の降雪は、Atmospheric River と呼ばれる低気圧性の大気循環場に伴う低緯度地域から氷床内陸への湿潤空気の流入が原因とされ、年間降水量が約 30 mm 以下のドームふじ基地では、湿潤空気の流入を起源とする降水は、年間降水量の約 60% を占めると報告されている⁸⁾。本研究では、雪尺観測の結果から両年の多降雪イベントの痕跡を捉えることができたが、これらのイベントは数日～数週間の時間スケールで起こるため、雪尺観測のみではイベントの全容とそのメカニズムを捉えることは難しい。今後の課題として、より高い時間分解能を持つ現地観測や、再解析データ等を利用した複合的な研究が必要である。

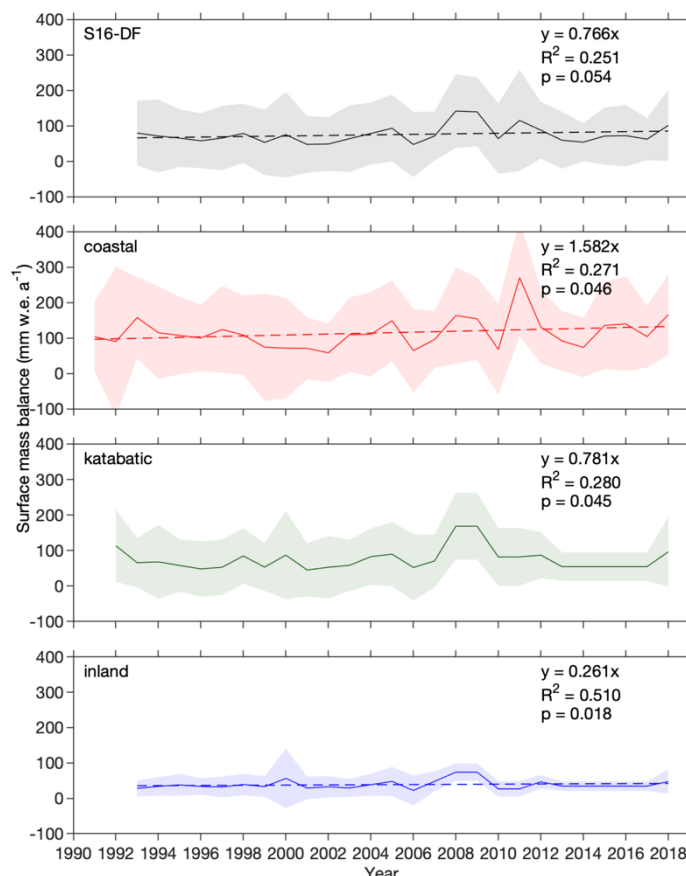


Fig. 3 : 観測領域全域、coastal、katabatic、inland 領域における 1991–2018 年の表面質量収支の平均値 (実線) と標準偏差。破線は平均値の線形回帰。

(4) 高精度 GNSS 測量による氷床広域表面高度観測

高精度 GNSS を用いて、輸送ルート往復路及びドームふじ基地南方域において氷床表面高度測量を実施した。GPS、GLONASS、Galileo 衛星電波を受信可能な二周波アンテナを雪上車上に設置し毎秒記録した。高精度単独測位 (PPP) によって 3 次元座標を解析し、精度検証を行い、氷床表面高度データセットを構築した。測位衛星の捕捉数等の影響により所々でデータの欠測があるが、観測領域全域において概ね表面高度データを取得した。氷床表面高度データは、独立したデータ論文として今後出版する予定である。

<引用文献>

- 1) Paolo, F. S., H. A. Fricker, and L. Padman, Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating, *Science*, 348, 327–331 (2015).
- 2) Williams, S.D.P., P. Moore, M.A. King, and P.L. Whitehouse, Revisiting GRACE Antarctic ice mass trends and accelerations considering autocorrelation, *Earth and Planetary Science Letters*, 385, 12–21 (2014)
- 3) Scambos, T., and C. Shuman, Comment on ‘Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses’ by HJ Zwally and others, *Journal of Glaciology*, 62(233), 599–603 (2016)
- 4) 本山秀明, 雪尺観測から見える氷床表面質量収支の変動, *気象研究ノート*, 233, 193–204 (2017)
- 5) Satow, K., O. Watanabe, H. Shoji and H. Motoyama, The relationship among accumulation rate, stable isotope ratio and surface temperature on the plateau of east Dronning Maud land, Antarctica, *Polar Meteorology and Glaciology*, 13, 43–52 (1999)
- 6) Helm, V., A. Humbert and H. Miller, Elevation and elevation change of Greenland and Antarctica derived from CryoSat-2, *The Cryosphere*, 8, 1539–1559 (2014)
- 7) Gorodetskaya, I. V., M. Tsukernik, K. Claes, M. F. Ralph, W. D. Neff, and N. P. M. Van Lipzig, The role of atmospheric rivers in anomalous snow accumulation in East Antarctica, *Geophysical Research Letters*, 41, 6199–6206 (2014)
- 8) Dittmann, A., Schlosser, E., Masson-Delmotte, V., Powers, J. G., Manning, K. W., Werner, M., and K. Fujita, Precipitation regime and stable isotopes at Dome Fuji, East Antarctica, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 6883–6900 (2016)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tsutaki, S., K. Fujita, T. Nuimura, A. Sakai, S. Sugiyama, J. Komori and P. Tshering	4. 巻 13
2. 論文標題 Contrasting thinning patterns between lake- and land-terminating glaciers in the Bhutan Himalaya	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Cryosphere	6. 最初と最後の頁 2733-2750
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/tc-13-2733-2019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Rodriguez-Morales Fernando, Braaten David, Trong Mai Hoang, Paden John, Gogineni Prasad, Yan Jie-Bang, Abe-Ouchi Ayako, Fujita Shuji, Kawamura Kenji, Tsutaki Shun, Van Liefferinge Brice, Matsuoka Kenichi, Steinhage Daniel	4. 巻 13
2. 論文標題 A Mobile, Multichannel, UWB Radar for Potential Ice Core Drill Site Identification in East Antarctica: Development and First Results	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 4836-4847
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSTARS.2020.3016287	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 庭野匡思、青木輝夫、橋本明弘、大島長、梶野瑞王、大沼友貴彦、藤田耕史、山口悟、島田利元、竹内望、津滝俊、本山秀明、石井正好、杉山慎、平沢尚彦、阿部彩子	4. 巻 83
2. 論文標題 氷床表面質量収支の実態とそのモデリングの試み：2020年夏最新版	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 雪氷	6. 最初と最後の頁 27-50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 津滝俊、本山秀明、阿部彩子、藤田秀二、川村賢二
2. 発表標題 Spatiotemporal variability of surface mass balance along the JARE traverse route for 1991 - 2019
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津滝俊、本山秀明、阿部彩子、藤田秀二、川村賢二
2. 発表標題 JARE内陸ルートにおける1992 - 2018年の表面質量収支の時空間変動
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2019・山形)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津滝俊、本山秀明、藤田秀二、川村賢二、阿部彩子
2. 発表標題 Spatiotemporal variability of surface mass balance along the JARE traverse route for 1992-2018
3. 学会等名 第10回極域科学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津滝俊、阿部彩子、本山秀明、川村賢二、シェリフ多田野サム
2. 発表標題 南極氷床JAREトラバースルートにおける1992 - 2013年の涵養量の時空間変動
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 庭野匡思、橋本明弘、津滝俊、本山秀明、平沢尚彦、阿部彩子
2. 発表標題 Estimation of the Antarctic ice sheet surface mass balance using the polar regional climate model NHM-SMAP
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------