HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	グリーンランド氷床北西部沿岸部における表面質量収支の変動
Author(s)	的場, 澄人; 山口, 悟; 對馬, あかね 他
Citation	低温科学, 75, 37-44
Issue Date	2017-03-31
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.75.37
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65081
Type	departmental bulletin paper
File Information	5_37-44.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 75 （2017） 37–44
doi: 10.14943/lowtemsci. 75. 37

グリーンランド氷床北西部沿岸部における表面質量収支の変動

的場　澄人[1)]，山口　悟[2)]，對馬　あかね[3)]，青木　輝夫[4)]，杉山　慎[1)]

2017 年 1 月 23 日受付，2017 年 2 月 13 日受理

グリーンランド氷床北西部における数十年間の表面質量収支を明らかにすることを目的に標高 1490 m 地点と 1750 m 地点においてそれぞれ 19 m と 6.5 m 長のアイスコアを採取した．1750 m で採取されたアイスコアは全層乾雪で構成されていた．一方，1490 m 地点で採取されたアイスコアは，浅部は表面融解の影響を受けた氷板やザラメ雪層で構成されているのに対し，深部は乾雪で構成されていた．1490 m 地点の年間の表面質量収支は，融解の影響が大きくなる 2001 年以降に減少していた．この地域では，近年降水量の増加が観測されていることから，1490 m 地点では表面融解水の流出が生じている可能性が示された．

Surface mass balance variations in a maritime area of the northwestern Greenland Ice Sheet

Sumito Matoba[1*], Satoru Yamaguchi[2], Akane Tsushima[3], Teruo Aoki[4], Shin Sugiyama[1]

We conducted shallow ice core drillings at two sites (SIGMA-A: 1490 m a.s.l., SIGMA-A2: 1750 m a.s.l.) on the Greenland Ice Sheet to estimate the past surface mass balance for several decades. The ice cores obtained from the site SIGMA-A2 were composed of dry snow layers. In contrast, the shallower parts of the ice cores obtained from the site SIGMA-A were composed of ice layers and wet snow layers influenced by surface melt water, and the deeper parts were composed of dry snow layers. The reconstructed surface mass balance at the site SIGMA-A decreased since 2001 when melt water influence increased. Because the amount of precipitation in this region has increased recently, we suggest that the low surface mass balance since 2001 indicates that run-off of melt water from the ice sheet has occurred.

キーワード：グリーンランド氷床，表面質量収支，アイスコア，SIGMA，GRENE–北極事業
Greenland Ice Sheet, surface mass balance, ice core, SIGMA, GRENE-Arctic

1．はじめに

グリーンランド氷床の質量は，近年の温暖化の影響で減少していることが指摘されている（e.g. Rignot et al., 2011）．氷床の質量は，涵養と消耗の収支によって変化する．涵養の主要素は降水（雪）である．グリーンランド氷床の積雪および表面質量収支の観測は，1930 年代のアルフレッド・ヴェゲナーによるトラバース観測の頃から行われ，第二次世界大戦後の 1950 年代には雪上車を使用した広域な観測が行われるようになった．例えば，Benson（1960）は，氷床北西部から中部にかけて広域の観測を行い，積雪中の密度や水の安定同位体比の季節変

連絡先
的場　澄人
e-mail：matoba@pop.lowtem.hokudai.ac.jp
１）北海道大学低温科学研究所
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan
２）防災科学技術研究所雪氷防災研究センター
Snow and Ice Research Center, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Nagaoka, Japan
３）総合地球環境学研究所
Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto, Japan
４）岡山大学理学部
Faculty of Science, Okayama University, Okayama, Japan

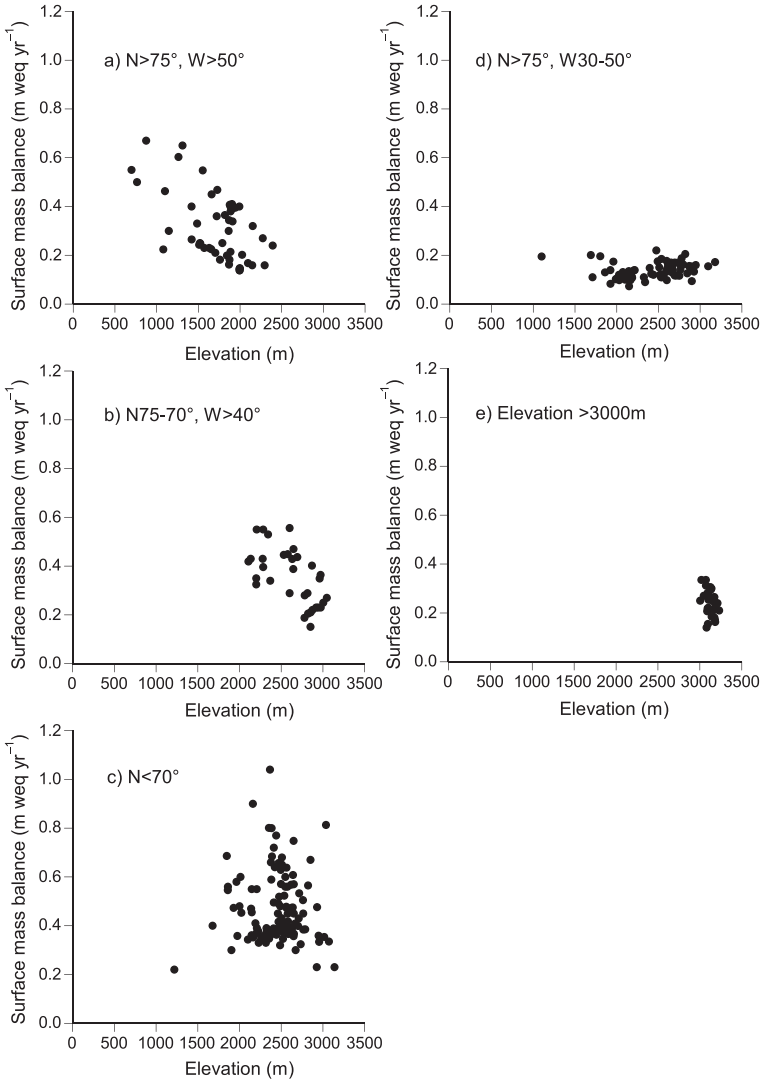


図 1：グリーンランド氷床上の標高と年間表面質量収支の関係．(a)北西部（北緯 75 度以北，西経 50 度以西），(b)中西部（北緯 70～75 度，西経 40 度以西），(c)南部（北緯 70 度以下），(d)北東部（北緯 75 度以北，西経 30～50 度），(e)高標高部（標高 3000 m 以上）．データは Bales et al.（2001）から引用した．

Figure 1：Relationship between elevation and annual surface mass balance of the sites in the (a) northwestern region (latitude＞75°N, longitude ＞50°W), (b) central western region (latitude 70–75°N, longitude＞40°W), (c) south region (latitude＜70°N), (d) northeastern region (latitude＞75°N, longitude 30–50°W) and (e) high-elevation region (elevation＞3000 m) on the Greenland Ice Sheet. Data by Bales et al. (2001).

動からその地点の年間表面質量収支を求め，その空間分布を示した．Ohmura and Reeh（1991）は，これらの積雪観測やアイスコア解析のデータを集積し，グリーンランド氷床上の表面質量収支の空間分布を示し，気象場の季節変動との関係を議論した．1990 年代後半には，グリーンランド氷床の表面質量収支の詳細な把握を目的とした PARCA プロジェクトが実施され（e.g. Mothly-Thompson et al., 2001），アイスコアの掘削と積雪観測が新たに実施され，グリーンランド氷床の表面質量収支の新たな空間分布が示された（Bales et al., 2001）．

図 1 に，Bales et al.（2001）によって整えられたデータを用い，標高と年間表面質量収支の関係の地域的な特性を示す．北西部（北緯 75 度以北，西経 50 度以西）および西部（北緯 70～75 度，西経 40 度以西）では標高が高くなるにつれて年間表面質量収支が減少する傾向がみられた．北東部（北緯 75 度以北，西経 30～50 度）は標高に無関係に年間表面質量収支は低かった．南部（北緯 70 度以南）は，標高に無関係に年間表面質量収支は大きく変化した．図 2 に，Bales et al.（2001）によって報告されたグリーンランド北西部（カナック地域）の年間表面質

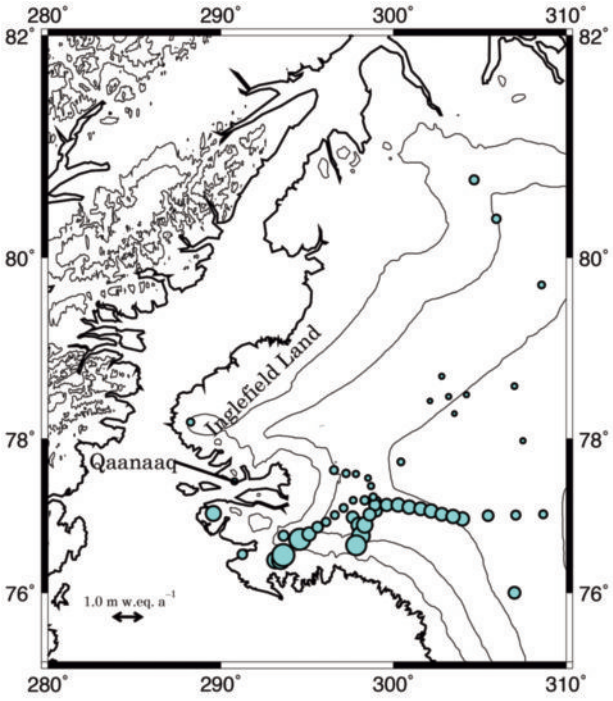


図 2：グリーンランド氷床北西部の年間表面質量収支の空間分布．図中の円の大きさはその地点の年間質量収支を示す．データは Bales et al.（2001）から引用した．
Figure 2：Spatial distribution of the annual surface mass balance of the northwestern Greenland Ice Sheet. The annual surface mass balance is indicated by the size of the circles. Data by Bales et al. (2001).

量収支の観測値の空間分布を示す．年間表面質量収支は南側の半島（Hays 半島）において高く，緯度が上がるにつれて減少する傾向を示した．これは，Ohmura and Reeh（1991）で示された，メルビル湾に発達する低気圧によって南から水蒸気が輸送されて降水が生じる大気循環場と整合的である．また，この地域の表面積雪中の水同位体比と化学成分濃度の広域分布から水と物質の循環を議論した Matoba et al.（2014）の結果とも整合的である．

この地域では，2011 年から，氷床の質量収支とそれに関連する氷床表面融解プロセスや氷山分離に着目した研究プロジェクト，SIGMA（Snow impurity and glacial microbe effect on abrupt warming in the Arctic）プロジェクトと GRENE 北極事業（Green network of excellence Arctic climate change research project）が開始された（Aoki et al., 2014; Sugimaya et al., 2014, 2015）．図 2 に示された年間表面質量収支の観測データは，チューレ米空軍基地から南へ進んだトラバースルート上に集中しており，これらのプロジェクトが対象としているカナック村やシオラパルク村がある北側の Inglefield Land を含む半島では観測データが殆どない．これらのプロジェクトの元では，2012 年から 2013 年にかけてグリーンランド氷床北西部において積雪・気象観測が行われ，この地域における過去数十年間の環境変動復元を目的に，ハンドオーガーを用いて 2 カ所でアイスコアが掘削された（Aoki et al., 2014; Yamaguchi et al., 2014）．本研究は，これらのアイスコアの解析結果から復元されたこの地域の過去数十年間の表面質量収支の変化について議論する．

2．試料採取と化学分析

図 3 に観測サイトを示す．2012 年 6，7 月に，グリーンランド氷床北西部 SIGMA-A サイト（北緯 78 度 3 分 6 秒，西経 67 度 37 分 42 秒，標高 1490 m）において実施された積雪・気象観測において（e.g. Aoki et al., 2014），この地点における過去数十年間の環境復元を目的に，ハンド-オーガーを用いて 19 m 長の表層アイスコアが採取された（Yamaguchi et al., 2014）．掘削後，アイスコアの密度を測定し，氷板の分布を記載した後，清浄なナイフで試料を 5 から 10 cm 長に分割し，作業中に試料の表面に付着した汚染を除去した後，清浄なポリエチレン袋（Whirl-pak）内で融解させ，清浄なポリプロピレン瓶に保存した．アイスコアは，2 日間に分けて採取され，測定と融解処理は掘削後直ちに行われた．

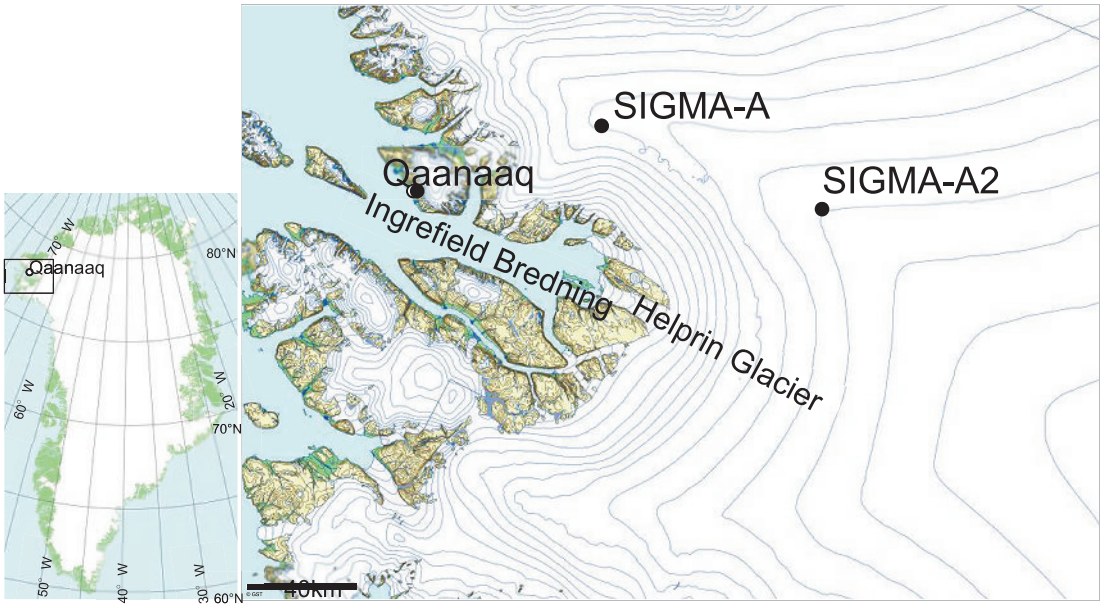


図 3：観測サイトの位置.
Figure 3：Location of the study area.

2013 年 7 月には，SIGMA-A2 サイト（北緯 78 度 6 分 13 秒，西経 64 度 4 分 59 秒，標高 1750 m）において，ハンドオーガーを用いて 6.5 m 長のアイスコアが採取された（Aoki et al., 2014）．掘削後，密度を測定し，氷板の分布を記載した後，ステンレス製のナイフで試料を 5 から 10 cm 長に分割し，作業中に試料の表面に付着した汚染を除去した後，清浄なポリエチレン袋（Whirl-pak）に密封した．掘削及び処理はヘリコプターを氷床上に待機させ，2 時間あまりの間に行った．試料はカナック村に持ち帰り，室内で融解させ，清浄なポリプロピレン瓶に保存した．

試料は常温でグリーンランドから日本まで輸送し，日本に到着後直ちに凍らせ，化学分析まで冷凍で保存された．

試料中の溶存イオン種濃度は，イオンクロマトグラフィー（ICS-2100，Thermo Scientific 社）によって測定した．陽イオンの測定には，分離カラムに CS-12A（Thermo Scientific 社）を用い，溶離液には 20 mM のメタンスルホン酸を用いた．試料はオートサンプラーで 1 mL 注入した．これらの条件において検出限界は約 5 μg L^{-1} である．陰イオンの測定には，分離カラムに AS-14A（Thermo Scientific 社）を用い，溶離液には 23 mM 水酸化ナトリウム溶液を用いた．試料はオートサンプラーで 500 μL 注入した．これらの条件おいて検出限界は約 10 μg L^{-1} である．

試料中の水の安定同位体比は，レーザーキャビティーリングダウン分光法を用いた同位体比分析装置（Picarro 社，L-2120i）に高速蒸気化装置（Picarro 社，A0212）にて蒸気化させた試料を導入して測定した．分析精度は δD が ±0.6〜1.0‰，δ^{18}O が ±0.08〜0.1‰であった．

3．結果と考察

図 4 に SIMGA-A サイトで採取されたアイスコアの約 5 m 深（水当量深度 2.4 m）と約 15 m 深（水当量深度 8.0 m）で採取されたアイスコアの写真を示す．また，図 5 にアイスコア 10 cm 中に含まれる氷板の厚さの割合の鉛直プロファイルを示す．5 m 深のアイスコアの写真が示すように，アイスコアの浅層部は融解水の影響で氷板が形成され，フィルンの部分も粒径の大きいザラメ雪で構成されていた．一方，深部のアイスコアには氷板は殆ど観察されず，フィルンを形成する積雪の粒径も小さい「乾いた」雪で構成されていた．

図 6 に SIGMA-A サイトで採取されたアイスコア中の δD の深さプロファイルを示す．一般的に極域の降雪中の水同位体比は気温によって変動し，夏に高い値を示すことが知られている．このサイトにおいても，同様な変動を示すことが考えられ，δD は明瞭な季節変動を示していると考えることができる．水素同位体比の負のピークを一年の始まりとしてアイスコアの年代を推定した．その結果，19 m 深までのアイスコアは 1974 年から 2011 年までの期間に堆積した積雪であると推定された．負のピークと負のピークの距離を，アイスコアの密度を用いて水当量に換算した値を年間の質量収支とした．

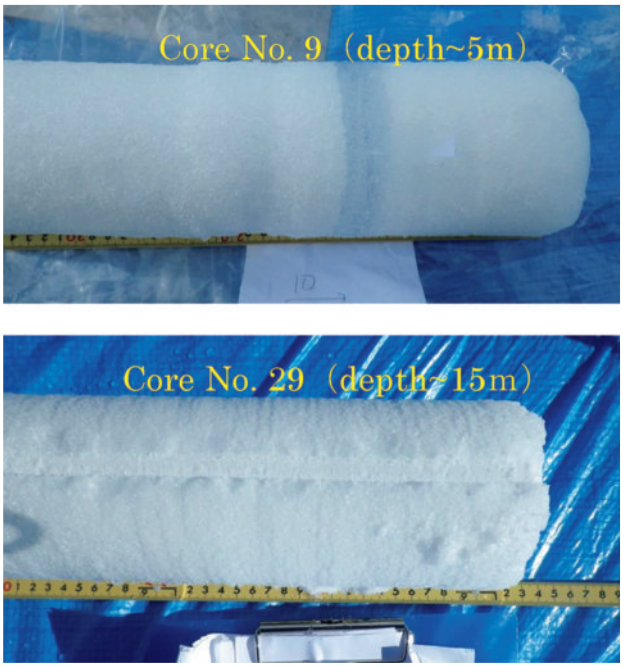


図 4：SIGMA-A サイトで採取されたアイスコアの約 5 m 深（上）と約 15 m 深（下）の接写写真.
Figure 4：Photographs of ice cores at 5 m depth (top) and 15 m depth (bottom) obtained from the SIGMA-A site.

図 7 に SIGMA-A2 サイトで採取されたアイスコア中の δD のプロファイルを示す．SIGMA-A コアに比べ，試料の採取間隔が広いために季節変動は明瞭ではないが確認することができ，2011 年から 2002 年に堆積した積雪であると推定された.

図 8a，b に SIGMA-A コアの各年層中に含まれる氷板の厚さの総量と年層厚の経年変化を示す．融解再凍結が生じたことを示す氷板は，1985 年以前には殆ど観察されず，1990 年代以降，氷板の厚さの総量が増加する傾向が現れた．また氷床の表面融解を生じた面積が大きかったと報告されている 2007 年に最大値を示した．表面質量収支に相当する年層厚は 1975 年から 2010 年までの平均値が 0.27 m w.eq. yr^{-1} であり，1975 年から現在にかけて減少する傾向を示し，特に 2001 年以降は低い値を示した．氷板が観察されなかった 1985 年以前の平均年層厚は 0.36 m w.eq. yr^{-1}，2001 年以降は 0.18 m w.eq. yr^{-1} だった．図 8c に SIGMA-A2 サイトで採取されたアイスコアから復元した年層厚の経年変化を示す．2002 年から 2011 年までの平均表面質量収支は 0.24 w.eq. yr^{-1} だった．SIMGA-A コアと復元される期間が異なるため，単純に比較はできないが，SIMGA-A コアで見られた 2001 年以降の年層厚の急激な減少に対応する変化は

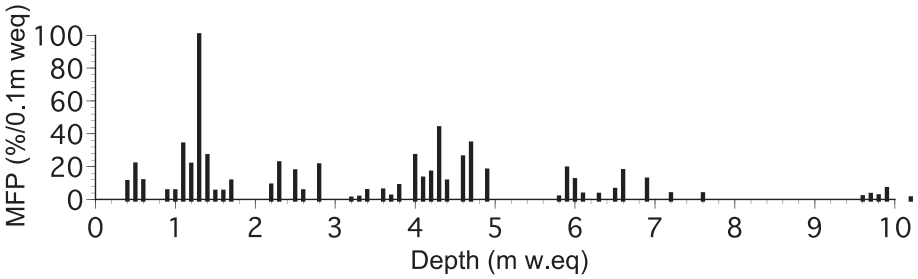


図 5：SIGMA-A で採取されたアイスコアの MFP（Melt Feature Percentage）のプロファイル．MFP は，アイスコア 0.1 m 水当量深度あたりの氷板の厚さを示す.
Figure 5：Vertical profile of MFP (Melt Feature Percentage) of the ice core obtained from the SIGMA-A site. MFP is shown by percentage of ice layer thickness in 0.1 m weq. of the ice core.

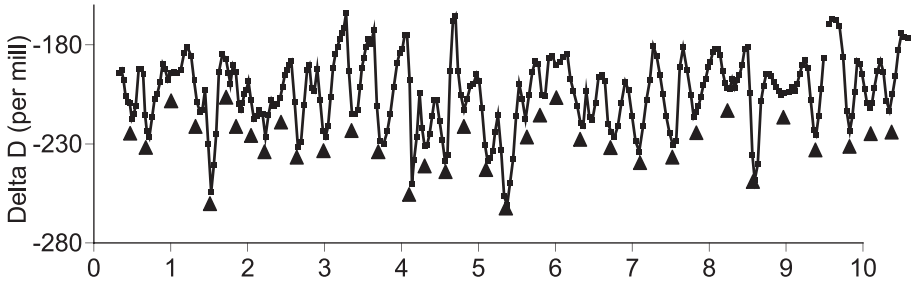


図 6：SIGMA-A サイトで採取されたアイスコア中の δD のプロファイル．図中の三角形（▲）は年層の境界として同定された δD の負のピークを表す.
Figure 6：δD profile of the ice core obtained from the SIGMA-A site. Solid triangles indicate minimum δD peaks identified as annual boundary layers.

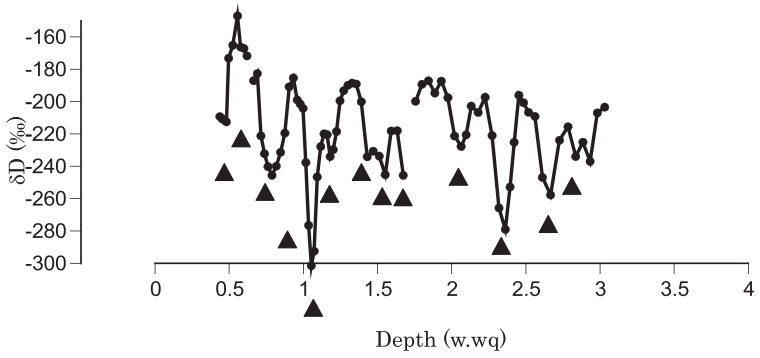


図 7：SIMGA-A2 サイトで採取されたアイスコア中の δD のプロファイル．図中の三角形（▲）は年層の境界として同定された δD の負のピークを表す．
Figure 7：δD profile of the ice core obtained from the SIGMA-A2 site. Solid triangles indicate minimum δD peaks identified as annual boundary layers.

見られず，2006～2009 年の期間に年層厚が減少する傾向が見られた．両サイトで復元された年間表面質量収支の値は，図 1 に示した先行研究で報告された値の範囲内にある（e.g. Bales et al., 2001）．

図 8d にグリーンランドチューレ空軍基地（サイト名 Pituffik，北緯 76 度 31 分 59 分，西経 68 度 45 分 00 秒，標高 77 m）で観測された年間降水量の経年変化を示す．この年間降水量は，米国海洋大気庁の National Center for Environmental Information のウェブサイトで公開されている降水量の月平均値のデータから算出した．取得されているデータは 1982 年から 2006 年まであるが，SIGMA-A コアの年層厚に見られたような減少傾向はなく，むしろ増加している傾向が現れた．

チューレ空軍基地で観測された降水量の増加傾向が北西グリーンランド全域で見られるトレンドだとすると，SIGMA-A サイトのアイスコアで見られた年層厚の減少傾向は，SIGMA-A サイトで消耗量が増加していることを示している．SIGMA-A サイトにおいて消耗に関与する現象は，融解水の流出，昇華，削剥が考えられる．昇華と削剥については，詳細な気象データを用いた解析が必要であり，現時点ではそのような解析に足るデータがないため，ここでは融解水の流出についてのみ考察をする．SIGMA-A サイトは，20 m 深の雪温は－20℃と充分に低く（Yamaguchi et al., 2014），夏季に表面で生じた融解水が積雪内に浸透して再凍結して氷板を形成する，いわゆる浸透帯に属する（Benson, 1960; Müller, 1962）．氷体温度が充分低いため，融解水が積雪カラムから流出することは通常は考えづらい．しかし，2012 年 7 月に行われた観測では，前年に形成された氷板の上の 2011 年冬期から 2012 年春期に堆積した積雪層が，激しい表面融解のために融解水が浸透し，全層がザラメ雪層になり全層にわたり雪温が 0 度になることが観測された（Yamaguchi et al., 2014）．そのとき，2011 年に形成された氷板は浸透した融解水によって融解することはなく，融解水が氷板上に帯水していた．つまり，表面融解水の一部はその年の積雪層内で再凍結せず，前年に形成された氷板上を移動し，積雪カラムから流出していた可能性がある．従って，SIGMA-A アイスコアから復元された年層厚の近年の減少は，この地域では表面融解量が増加し，融解水の一部が積雪層内から流失したことが要因であると推測できる．

謝辞

SIGMA-A，SIGMA-A2 での観測に参加された皆様に感謝いたします．この研究は，SIGMA プロジェクト（代表：青木輝夫，JSPS 科研費 JP23221004）及び GRENE 事業北極気候変動分野の共同研究にて行われた．また，JSPS 科研費 JP26400460 及び北海道大学低温科学研究所共同研究の助成をうけた．

References

Aoki, T., S. Matoba, J. Uetake, N. Takeuchi, and H. Motoyama (2014) Field activities of the “Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic” (SIGMA) project in Greenland in 2011–2013. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 3–20.

Bales, R. C., J. R. McConnell, E. Mosley-Thompson, and B. Csatho (2001) Accumulation over the Greenland ice sheet from historical and recent records. *J. Geophys. Res.*, **106** (D24), 33813–33825.

Benson, C. S. (1960) Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland Ice Sheet. Ph. D. thesis, California Institute of Technology.

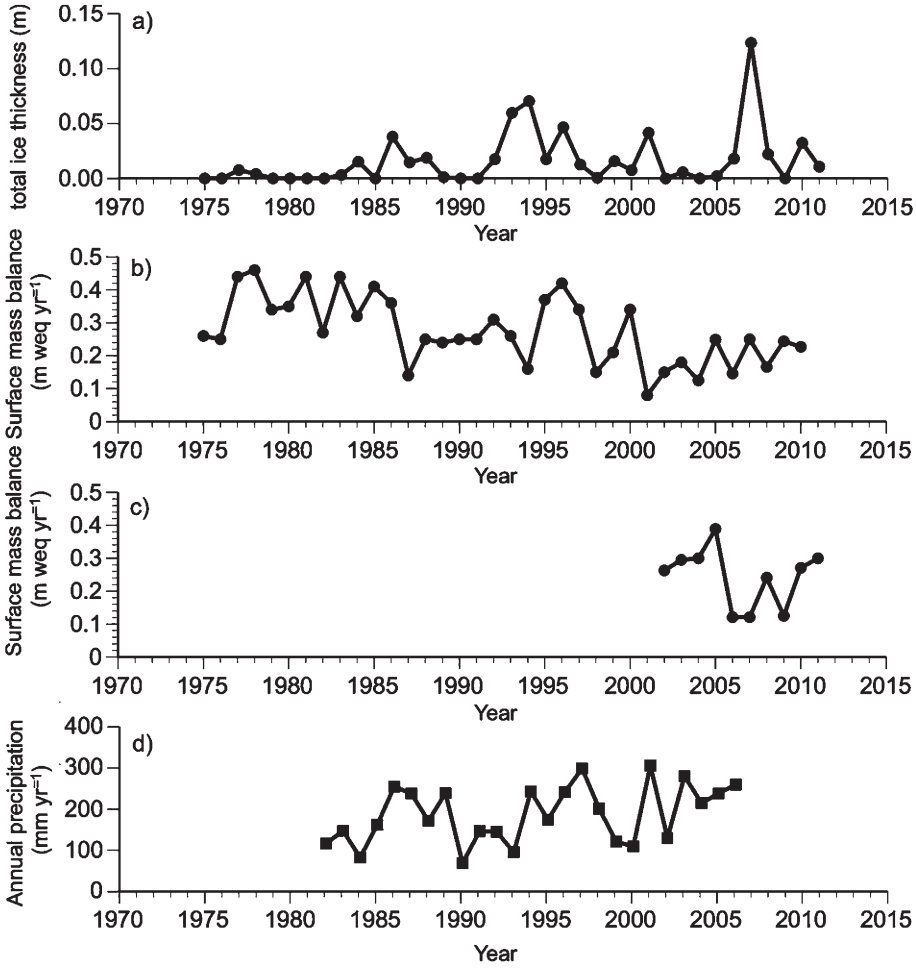


図 8：SIGMA-A サイトで採取されたアイスコアから復元された，(a)年層に含まれる総氷板厚さ，(b)年間表面質量収支，(c)SIGMA-A2 サイトで採取されたアイスコアから復元された年間表面質量収支，(d)チューレ空軍基地（北緯 76 度 31 分 59 秒，西経 68 度 45 分 00 秒，標高 77 m）で観測された年間降水量の時系列変化．チューレ空軍基地の降水量データは，アメリカ合衆国のアメリカ海洋大気庁 National Center for Environmental Information が提供しているデータ（観測サイト名 Pituffik，サイト番号 GHCND：GLE00146841）を使用した．

Figure 8：Temporal variations of (a) total ice layer thickness in annual layers, (b) reconstructed annual surface mass balance at the SIGMA-A site by the ice core, (c) reconstructed annual surface mass balance at the SIGMA-A2 site by the ice core, and (d) annual precipitation at Thule Air Base (76°31′59″N, 68°45′00″W, elevation 77 m, station name: Pituffik, station number: GHCND: GLE00146841 of the National Center for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration, United States of America).

Matoba S., T. Yamasaki, and H. Motoyama (2014) Spatial variations of $\delta^{18}O$ and ion species in the snowpack of the northwestern Greenland ice sheet. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 79–84.

Mosley-Thompson, E., J. R. McConnell, R. C. Bales, Z. Li, P.-N. Lin, K. Steffen, L. G. Thompson, R. Edward, and D. Bathke (2001) Local to regional-scale variability of annual net accumulation on the Greenland ice sheet from PARCA cores. *J. Geophys. Res.*, **106** (D24), 33839–33851.

Müller, F. (1962) Zonation in the accumulation area of the glaciers of Axel Heiberg Island, N. W. T., Canada. *J. Glaciol.*, **4**, 301–313.

Ohmura, A. and N. Reeh (1991) New precipitation and accumulation maps for Greenland. *J. Glaciol.*, **37**(125), 140–148.

Rignot, E., I. Velicogna, M. R. van den Broeke, A. Monaghan, and J. T. M. Lenaerts (2011) Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L05503.

Sugiyama, S., D. Sakakibara, S. Matsuno, S. Yamaguchi, S. Matoba, and T. Aoki (2014) Initial field observations on Qaanaaq Ice Cap in northwestern Greenland. *Ann.*

Glaciol., **55**(66), 25–33.

Sugiyama, S., D. Sakakibara, S. Tsutaki, M. Maruyama, and T. Sawagaki (2015) Glacier dynamics near the calving front of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland. *J. Glaciol.*, **61** (226), 223–232.

Yamaguchi, S., S. Matoba, T. Yamasaki, A. Tsushima, M. Niwano, T. Tanikawa, and T. Aoki (2014) Glaciological observation in 2012 and 2013 at SIMGA-A site, Northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 95–105.