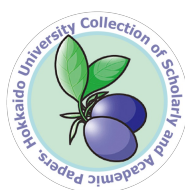




HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	バフィン湾周辺の環境がグリーンランド北西部の降雪中のd-excessと化学成分に与える影響
Author(s)	黒崎, 豊; 的場, 澄人; 飯塚, 芳徳 他
Citation	雪氷, 80(6), 515-529
Issue Date	2018-11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/75369
Rights	© 公益社団法人 日本雪氷学会
Type	journal article
File Information	kurosaki_seppyo.pdf



論文

バフィン湾周辺の環境がグリーンランド北西部の 降雪中の d-excess と化学成分に与える影響

黒崎 豊^{1,2*}, 的場澄人², 飯塚芳徳², 庭野匡思³,
谷川朋範³, 青木輝夫⁴

要 旨

グリーンランド氷床北西部における降雪中の d-excess と化学成分と、降雪をもたらす水蒸気の起源域周辺の環境との関係を明らかにすることを目的として、2017年5月25日から6月6日にかけてグリーンランド氷床北西部のSIGMA-A観測サイトにおいて降雪直後の表面雪を採取した。表面雪中の水素と酸素の安定同位体比から算出することが出来る d-excess は観測期間中に2度の極大値を示した。d-excess が極大値を示した日は陸域起源物質、人為起源物質ともに減少し、 Cl^-/Na^+ 比が海水比に近い値を示した。海塩の変質が他の日に比べて生じていなかったことから、それらの日はSIGMA-Aに近い海域から海塩粒子が輸送されたと推定された。更に、後方流跡線解析と気象解析により d-excess が極大値を示した原因は、低温、乾燥した空気が比較的海面温度が高い開水面上を通過したからであると推定された。また、d-excess が極大値を示した日にSIGMA-Aに到達した空気塊が輸送中にバフィン湾上空で比較的時間滞留し、開水面から大気中に拡散された高い d-excess を持つ水蒸気を多量に取り込んだ可能性が示唆された。更に、バフィン湾北部海上で発達した低気圧性循環の風が開水面で高い d-excess を持つ水蒸気の拡散とバフィン湾上での空気塊の滞留を促したと推定された。

キーワード：d-excess, 化学成分, 大気循環, SIGMA-A, グリーンランド

Key words: d-excess, chemical substances, atmospheric circulation, SIGMA-A, Greenland

1. はじめに

グリーンランド氷床には、起源が異なる水蒸気が大気中で様々な過程を経て運ばれて凝結し、降雪として降り積もり保存されている (Benson, 1960; Ohmura and Reeh, 1991; Furukawa *et al.*, 2017 など)。降雪をなす水分子の酸素と水素の安

定同位体組成 (以下、それぞれ $\delta^{18}\text{O}$ と δD) は、海面から大気へ水蒸気が蒸発するときの気温や海水温などの環境、輸送中および水蒸気から降雪粒子が形成されるとき凝結過程、気温などの環境を反映する (Gat, 1996 など)。また、Dansgaard (1964) は、 $\delta^{18}\text{O}$, δD の測定値から算出することが出来る deuterium excess (以下、d-excess) の概念を導入した (式1)。

$$\text{d-excess} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O} \quad (1)$$

d-excess は海面から大気へ水蒸気が蒸発する時の相対湿度、水温、風速によって決定付けられ、大気中での水蒸気輸送過程では保存される (Merlivat and Jouzel, 1979)。そのため、d-excess

1 北海道大学大学院環境科学院
〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西5丁目

2 北海道大学低温科学研究所
〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目

3 気象庁気象研究所
〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1

4 岡山大学大学院自然科学研究科
〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1

* 問合せ先: kurosaki_96@pop.lowtem.hokudai.ac.jp

は水蒸気の起源を推定するための有用な指標であると考えられている (Yamanaka *et al.*, 2002). 近年では, d-excess は水蒸気の起源での相対湿度, 海面水温の指標としても解釈されている. Uemura *et al.* (2008) は, 南緯 33 度~南緯 67 度にかけて行われた海洋観測から, 海面上の水蒸気の d-excess と相対湿度には有意な負の相関があり, 水蒸気の d-excess と海面水温 (以下, SST: Sea Surface Temperature) には有意な正の相関があることを示した. また, 大西洋のパミューダ諸島沿岸においても同様の結果が得られている (Steen-Larsen *et al.*, 2014). グリーンランド氷床南部の Ivittuut (北緯 61.12 度, 西経 48.17 度, 30 m above sea level (以下, a.s.l.)) では, 水蒸気の安定同位体観測が行われ, d-excess と水蒸気の起源であるアイスランド南部の海域の相対湿度には有意な負の相関があることが報告された (Bonne *et al.*, 2014).

グリーンランド氷床北西部の西側は, ノースウォーター域 (以下, NOW: North Water (北緯 75 度~北緯 78.5 度, グリーンランドとエルズミア島の間に位置する海域)) と呼ばれ, 冬季に海水が生成されることによって局所的に海面が露出するポリニヤ域である (Smith *et al.*, 1990). NOW で生成された海水は, 南方へ輸送され, バフィン湾に広がる (Dunbar, 1969). 海水の変動は, 海洋から大気中に拡散される水蒸気の d-excess に間接的に影響を与えることが知られている. 海水が開くことによって海水面が露出し, 海水上からの比較的冷たい空気が比較的暖かい開水面上を通過する時, 大気と海面の温度差によって高い d-excess を持つ水蒸気が大気中に拡散される (Kurita, 2011). グリーンランド氷床 NEEM (北緯 77.45 度, 西経 51.05 度, 2484 m a.s.l.) では水蒸気の安定同位体観測が行われ, 開水面を通過して輸送されてきた水蒸気は高い d-excess を持つことが報告された (Steen-Larsen *et al.*, 2013).

グリーンランド氷床北西部ではアイスコアの掘削も行われている (Osterberg *et al.*, 2015; Matoba *et al.*, 2015, 2018). 氷床を連続的にくり抜いて得られるアイスコアは過去の気温, 降水量, 大気循環場, エアロゾル堆積環境などを復元するための有用なアーカイブである (EPICA Community Members, 2004; Furukawa *et al.*, 2017; Iizuka *et*

al., 2018). グリーンランド氷床北西部の 2Barrel (北緯 76.935 度, 西経 63.153 度, 1685 m a.s.l.) では, 21.3 m のアイスコアの掘削が行われ, 1990 年から 2010 年にかけて, アイスコア中の d-excess の年平均値とバフィン湾の海水密接度の年平均値に, 有意な正の相関があることが報告された (Osterberg *et al.*, 2015). しかし, 海水密接度の変化がアイスコア掘削地点の降雪中の d-excess の変化に与える具体的な過程は示されていない. アイスコア中の d-excess から, 過去に降雪をもたらした水蒸気の起源周辺の環境の変化を推測するためには, 気象データが存在する期間における積雪やアイスコア中の d-excess と降雪をもたらす水蒸気の起源と輸送経路などの気象・環境との関係を明らかにする必要がある.

グリーンランド氷床北西部の Inglefield Land を含む半島では, 積雪中の $\delta^{18}\text{O}$ と溶存イオン種濃度の空間分布の調査が行われ, それらの変動には, バフィン湾に発達する低気圧による南からの水蒸気の輸送が影響している可能性があると考えられている (Matoba *et al.*, 2014). そのため, この地域に降雪をもたらす水蒸気の d-excess はバフィン湾周辺の環境と海水の影響を受けていることが推察される. 本研究では, グリーンランド氷床北西部の Inglefield Land を含む半島に位置する SIGMA-A サイト (北緯 78.05 度, 西経 67.63 度, 1490 m a.s.l.) に降雪をもたらした水蒸気の起源を後方流跡線解析によって推定し, 起源域の環境の変化が降雪の d-excess と化学成分に与える影響を推定することを目的とした.

2. 研究手法

2.1 試料採取と化学分析

グリーンランド氷床北西部 SIGMA-A において 2017 年 5 月 25 日から 6 月 6 日に気象・雪氷観測が行われた (Matoba *et al.*, 2018). その観測において, 降雪直後の表面雪 (以下, 表面雪と記述する) の観測と試料採取を行った (図 1). 表面雪は, 観測キャンプからの汚染を防ぐため, 観測キャンプから風上方向に約 500 m 離れた地点で, 観測者が風上を向いて, 毎朝現地時間 6 時半から 7 時半の間に清浄なポリエチレン袋 (Whirl-pak) に採取した. 採取された表面雪は, 室温で融解させ, 清

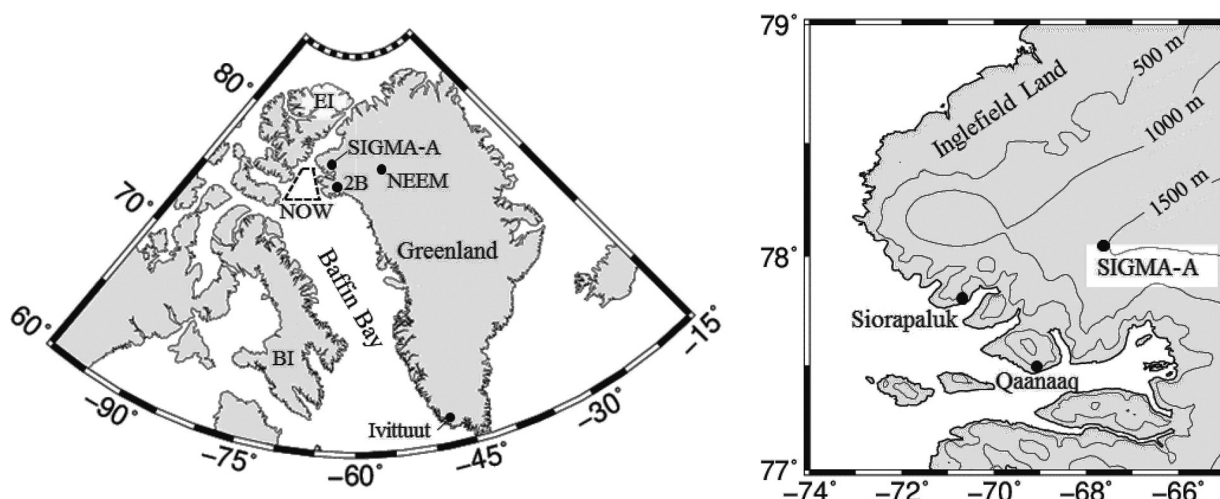


図 1 左：グリーンランド北西部 SIGMA-A サイト。右：SIGMA-A サイト近傍。NOW：North Water, EI：Ellesmere Island, BI：Baffin Island, 2B：2Barrel を示す。

浄なポリプロピレン瓶に移して冷凍で保管した。観測終了後、試料は常温でグリーンランドから日本まで輸送し（約 10 日間）、日本に到着後直ちに凍らせ、分析直前まで冷凍で保存した。

試料中の $\delta^{18}\text{O}$ と δD は、波長スキャン・キャビティリングダウン分光方式を用いた安定同位体比分析計（Picarro 社；L2130-i）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。融解させた表面雪のサンプル数は 13、同位体比測定の標準試料は、超純水（ $\delta^{18}\text{O} = -11.6\text{‰}$, $\delta\text{D} = -77.2\text{‰}$ ）、南極の氷山（ $\delta^{18}\text{O} = -20.4\text{‰}$, $\delta\text{D} = -158.7\text{‰}$ ）、南極内陸部の表面雪（ $\delta^{18}\text{O} = -46.7\text{‰}$, $\delta\text{D} = -370.7\text{‰}$ ）を用いた。分析精度は $\delta^{18}\text{O}$ が $\pm 0.08\text{‰}$, δD が $\pm 0.8\text{‰}$ であった。

試料中の溶存イオン種濃度は、イオンクロマトグラフ（Thermo Scientific 社；ICS-2100）を用いて測定した。陽イオン（ Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} ）の測定には、分離カラムに CS-12 A（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。これらの条件における検出限界は約 $5\mu\text{g L}^{-1}$ である。陰イオン（ NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} ）の測定には、分離カラムに AS-14 A（Thermo Scientific 社）を用い、溶離液には 23 mM 水酸化カリウム溶液を用いた。試料はオートサンプラーで $500\mu\text{L}$ 注入した。これらの条件において検出限界は約 $10\mu\text{g L}^{-1}$ である。溶存イオン種濃度の分析精度は 10 ng g^{-1} の測定時に 10% 以下であ

る。非海塩性（以下、nss：non-sea salt） Ca^{2+} , nss-SO_4^{2-} は、 Na^+ が全て海塩由来であると仮定し、海水の濃度比（ $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+ = 0.251$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+ = 0.038$ ）（Wilson, 1975）を用いて算出した。

2.2 後方流跡線解析と気象解析

2017 年 5 月 25 日から 6 月 6 日にかけて SIGMA-A に降雪をもたらした水蒸気の起源と輸送経路を推定するため、NOAA（National Oceanographic and Atmospheric Administration）が提供している HYSPLIT model（Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory）（Stein *et al.*, 2015）を用いて後方流跡線解析を行った。モデル内では、SIGMA-A の対地高度（以下、a.g.l.: above ground level）1000 m, 1500 m a.g.l., 2000 m a.g.l. を起点とした。モデル内での標高はそれぞれ、2490 m a.s.l., 2990 m a.s.l., 3490 m a.s.l. である。これらの対地高度は表面雪採取時に降雪をもたらした雲の目視観測から設定した。解析を行った期間は 2017 年 5 月 25 日から 6 月 6 日である。各日の午前 9 時 UTC（Universal time coordinated）（現地時間午前 7 時）から、120 時間（5 日間）の後方流跡線解析を行った。

気象解析に使用した比湿、風向・風速（10 m a.g.l.）、気温（2 m a.g.l.）、地表面付近の相対湿度の日平均値は、NCEP/NCAR（National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research）再解析データ（Kalnay *et al.*, 1996）から取得した。

3. 結 果

3.1 $\delta^{18}\text{O}$ と d-excess の日変化

図 2-a に SIGMA-A で採取した表面雪の d-excess の日変化を示す. 前日の降雪が積もった表面雪を採取した日数は 7 日 (図中 S: 2017 年 5 月 25 日, 5 月 26 日, 5 月 30 日, 6 月 1 日, 6 月 2 日, 6 月 4 日, 6 月 5 日), 前日に生じた降雪が地吹雪によって吹きだまりになった表面雪を採取した日数は 5 日 (図中 D: 5 月 27 日, 5 月 28 日, 5 月 29 日, 5 月 31 日, 6 月 6 日), 積雪表面に形成された霜を採取した日数は 1 日 (図中 F: 6 月 3 日) であった. 観測期間中, 降雪は毎日観測され, 降雪が吹きだまりになった表面雪は, 毎日の目視観測によって直前の降雪によって吹きだまりになったと確認できたものから採取した. したがって, 吹きだまりになった表面雪は, 堆積後の化学変化は小さいと考え, 本研究では降雪が降り積もった積雪と同様に取り扱う.

d-excess は 5 月 25 日から 5 月 29 日にかけて 11‰ から 16‰ の間を変動していたが, 5 月 29 日から 5 月 30 日にかけて 12.1‰ から 24.4‰ まで増加し, 5 月 30 日に極大値が見られた. その後, d-excess は 5 月 30 日から 6 月 4 日にかけて 15.7‰ まで減少したが, 6 月 4 日から 6 月 5 日にかけて 23.3‰ まで増加し, 6 月 5 日に 2 度目の極大値が見られた.

3.2 表面雪中の化学成分の日変化

図 2-b, c, d, e に表面雪中の溶存イオン種濃度を示す. 海塩の主成分である Na^+ は 6 月 2 日まで 9 ng g^{-1} と 20 ng g^{-1} の間の値を示し, 6 月 3 日に最大値 (43.3 ng g^{-1}) を示した. 6 月 4 日は 11.0 ng g^{-1} に下がり, 6 月 6 日に最小値 (3.3 ng g^{-1}) を示した. また, d-excess が極大値を示した 5 月 30 日と 6 月 5 日には Na^+ の濃度は大きく変化しなかった. 陸域起源物質の指標となる nss-Ca^{2+} (Legrand and Mayewski, 1997) は, 5 月 25 日に最大値 (39.7 ng g^{-1}) を示し, 5 月 30 日まで値が減少した. その後, 6 月 3 日に極大値 (19.1 ng g^{-1}) を示した. 比較的濃度が低い 5 月 30 日と 6 月 5 日, 6 月 6 日の値は, それぞれ 4.0 ng g^{-1} , 1.4 ng g^{-1} , 0.9 ng g^{-1} であった. また人為起源の物質である NO_3^- や石炭燃焼, 火山ガス, 海洋植物プランクトンが生産するジメチル硫酸 (DMS:

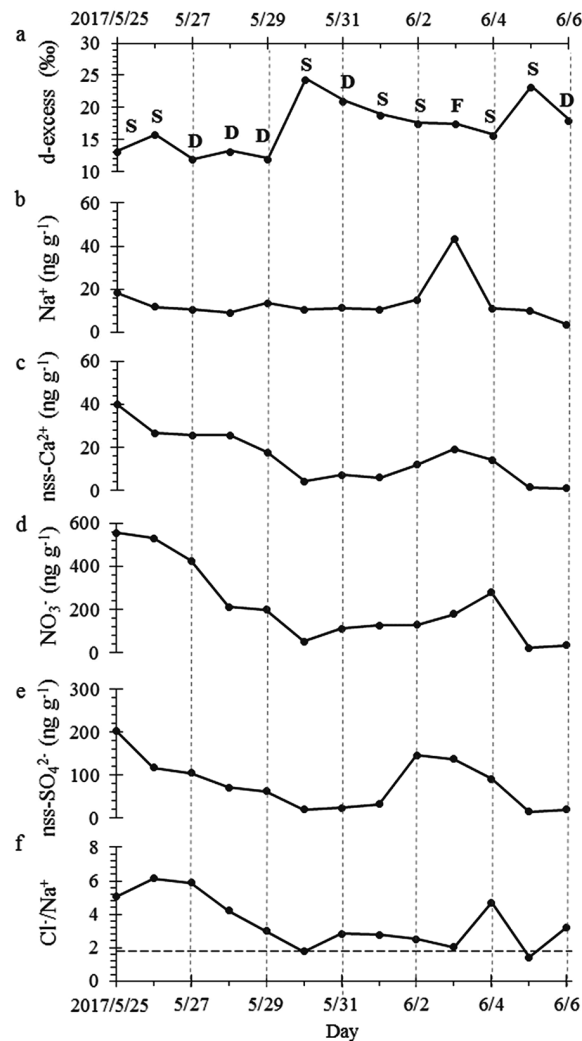


図 2 SIGMA-A で採取された表面雪の (a) d-excess と溶存イオン種濃度 (b) Na^+ , (c) nss-Ca^{2+} , (d) NO_3^- , (e) nss-SO_4^{2-} , (f) Cl^-/Na^+ 比. 表面雪は, 採取時の目視による判断で降雪が積もった表面雪 (S: Snow), 前日に生じた降雪が地吹雪によって吹きだまりになった表面雪 (D: Drift), 積雪表面に形成された霜 (F: Frost) に分類した. 点線は海水の Cl^- と Na^+ の重量比 (1.80).

Dimethyl sulfate) が主な起源である nss-SO_4^{2-} (Legrand and Mayewski, 1997) は 5 月 30 日と 6 月 5 日に低い値を取り, nss-Ca^{2+} と似た挙動を示した.

3.3 空気塊の輸送経路

表面雪を採取した期間の後方流跡線と海水密接度の日平均値を図 3 に示す. 海水密接度は, ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) が提供している ERA-interim

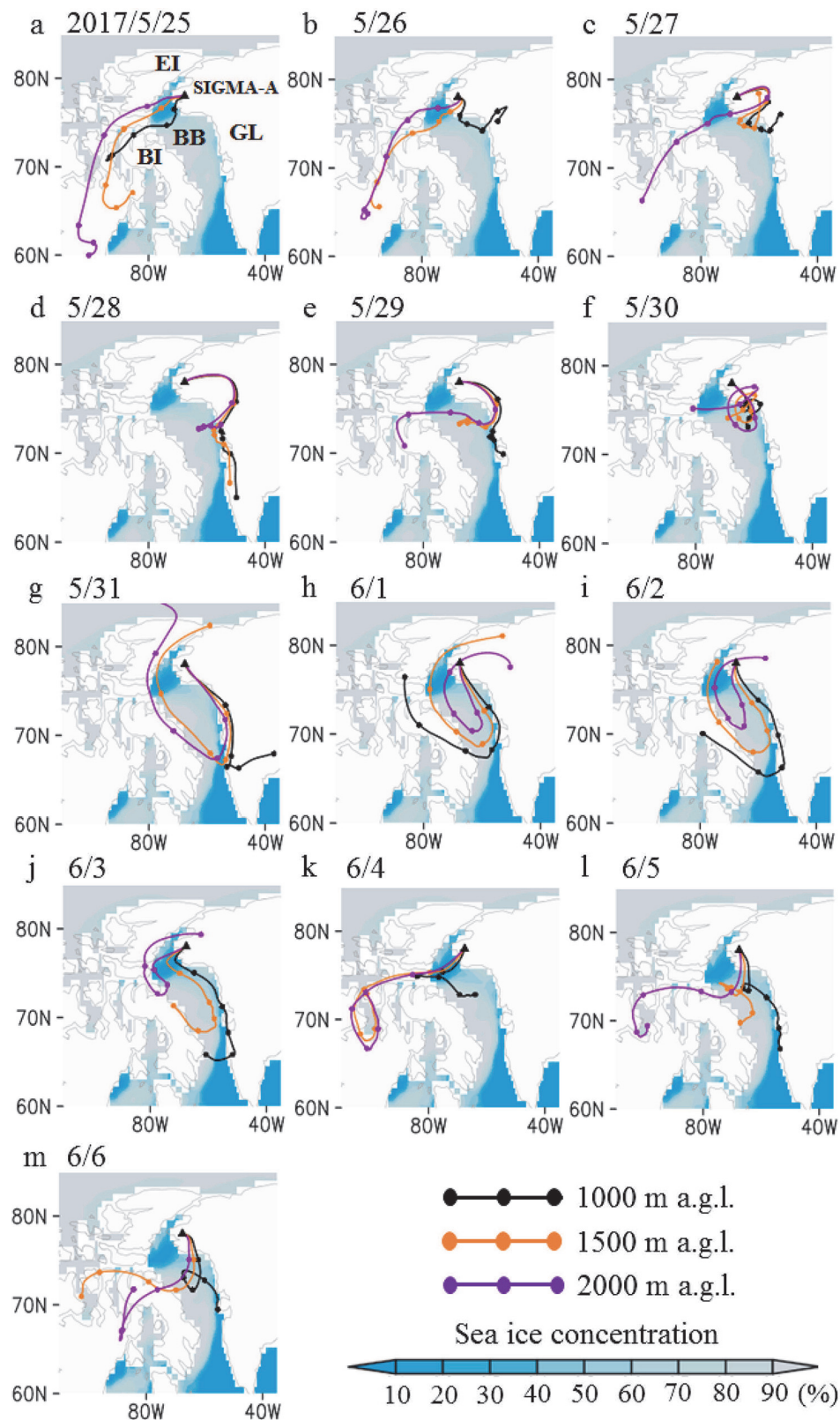


図 3 SIGMA-A 付近の各日午前 9 時 (UTC) (現地時間午前 7 時), 1000 m a.g.l. (黒), 1500 m a.g.l. (オレンジ), 2000 m a.g.l. (紫) を起点とする 5 日間の後方流跡線。▲は SIGMA-A の位置を示す。流跡線上の各色の点は、起点となる日の午前 9 時 (UTC) から 24 時間ずつ過去に遡った時の空気塊の位置を表している。海洋上の色は各日午前 9 時 (UTC) から過去 120 時間の平均海水氷接度である。データは ERA-interim (Dee *et al.*, 2011) から取得した。図中の地点は GL : Greenland, EI : Ellesmere Island, BB : Baffin Bay, BI : Baffin Island を示す。

(Dee *et al.*, 2011) から取得した, 後方流跡線解析を行った期間の海水密接度は, NOW とバフィン湾南東部 (北緯 70 度以南) において低い値を示した (図 3). 5 月 25 日と 5 月 26 日に SIGMA-A に到達した空気塊は, 5 月 26 日に SIGMA-A の 1000 m a.g.l. に到達した空気塊を除いて, 5 日前にはカナダ北東部に位置し, その後 NOW 上空を通過した (図 3-a, b). 5 月 27 日になると, 空気塊はグリーンランド内陸部を経由するようになり, 5 月 27 日から 5 月 29 日にかけて, バフィン湾北東部, グリーンランド内陸部を通過し東から SIGMA-A に輸送される空気塊が増加した (図 3-c, d, e). 5 月 30 日に SIGMA-A に到達した空気塊は, 約 4 日間バフィン湾北東部の比較的海水密接度が高い地域の上空を滞留していた (図 3-f). 5 月 31 日から 6 月 3 日は, 空気塊は北緯 80 度以北から北緯 70 度以南まで南下し, バフィン湾上空を経由して南から SIGMA-A に到達する輸送経路をたどった (図 3-g, h, i, j). しかし, 5 月 31 日から 6 月 3 日にかけて 5 日前の空気塊の位置はしだいに南下した. 6 月 4 日になると再びカナダ北東部の空気塊が多く SIGMA-A に輸送されるようになった (図 3-k). 6 月 5 日の 1000 m a.g.l. と 1500 m a.g.l., 6 月 6 日の 1000 m a.g.l. に到達した空気塊は, バフィン湾の北緯 73 度, 西経 65 度付近を 2 日から 3 日間滞留したのち輸送され, 6 月 5 日と 6 月 6 日のその他の対地高度に到達した空気塊はカナダ北東部から輸送された.

3.4 空気塊の輸送経路と比湿

各日の午前 9 時 (UTC) に SIGMA-A に到達した空気塊の後方流跡線に沿った午前 6 時 (UTC) から 6 時間毎の比湿を図 4 に示す. 本研究では空気塊が SIGMA-A に到達する前の 5 日間において, 比湿が増加した日に, 空気塊が存在した地点周辺の海洋からの蒸発による水蒸気を取り込んだと仮定し, 比湿が増加した日に着目した. 5 月 25 日と 5 月 26 日に SIGMA-A に到達した空気塊は, 5 月 24 日に空気塊が NOW 上空を輸送中に比湿が増加した (図 4-a・紫, b・黒). 5 月 27 日に SIGMA-A に到達した空気塊は, 5 月 24 日にバフィン湾北東部上空を輸送中に比湿が増加した (図 4-c・黒, オレンジ, 紫). 5 月 28 日, 5 月 29 日に SIGMA-A に到達した空気塊は海上を輸送中

に比湿の増加は見られなかった (図 4-d, e). 5 月 30 日に SIGMA-A に到達した空気塊は, 5 月 27 日にバフィン湾北東部を輸送中に比湿が増加した (図 4-f・紫). 5 月 31 日に SIGMA-A に到達した空気塊は, 5 月 29 日に, 6 月 1 日から 6 月 3 日に SIGMA-A に到達した空気塊は, 5 月 30 日または 5 月 31 日にバフィン湾南東部の比較的海水密接度が低い海域を輸送中に比湿が増加した (図 4-g・紫, h・黒, i・オレンジ, j・黒, オレンジ). 6 月 3 日と 6 月 4 日に SIGMA-A に到達した空気塊は, それぞれ 1 日前に NOW を輸送中に比湿が増加した (図 4-j・黒, k・紫). 6 月 5 日に SIGMA-A に到達した空気塊は, 6 月 1 日と 6 月 2 日にバフィン湾東部の海水密接度が低い海域を, 6 月 4 日にバフィン湾の北緯 75 度, 西経 65 度付近を輸送中に比湿が増加した (図 4-l・黒, オレンジ, 紫). 6 月 6 日に SIGMA-A に到達した空気塊は, 6 月 1 日にバフィン湾東部の海水密接度が低い海域を, 6 月 4 日にバフィン湾の北緯 75 度, 西経 65 度付近を輸送中に比湿が増加した (図 4-m・黒, オレンジ, 紫).

以上のことから, 観測期間中に SIGMA-A に輸送された空気塊は, NOW またはバフィン湾上空を通過したときに水蒸気を取り込み, SIGMA-A に降雪をもたらせたことがわかり, 降雪の水安定同位体比には, NOW またはバフィン湾から蒸発した水蒸気が影響していることが考えられる.

4. 考 察

4.1 化学成分と空気塊の輸送経路の関係

海塩粒子中の NaCl は大気中で硫酸 (Cadle, 1972) (式 2) または硝酸 (Kerminen *et al.*, 2000) (式 3) と反応することが知られている.



Na_2SO_4 , NaNO_3 はエアロゾル粒子であり, 雲の凝結核や降水に伴う洗浄効果によって大気中から除去される. 海塩粒子が大気中で滞留する時間が長い程, 硫酸や硝酸との反応が進み, Cl^- に対して Na^+ が除去される量が多くなるため, Cl^-/Na^+ 比が海水における値 (1.80) より大きくな

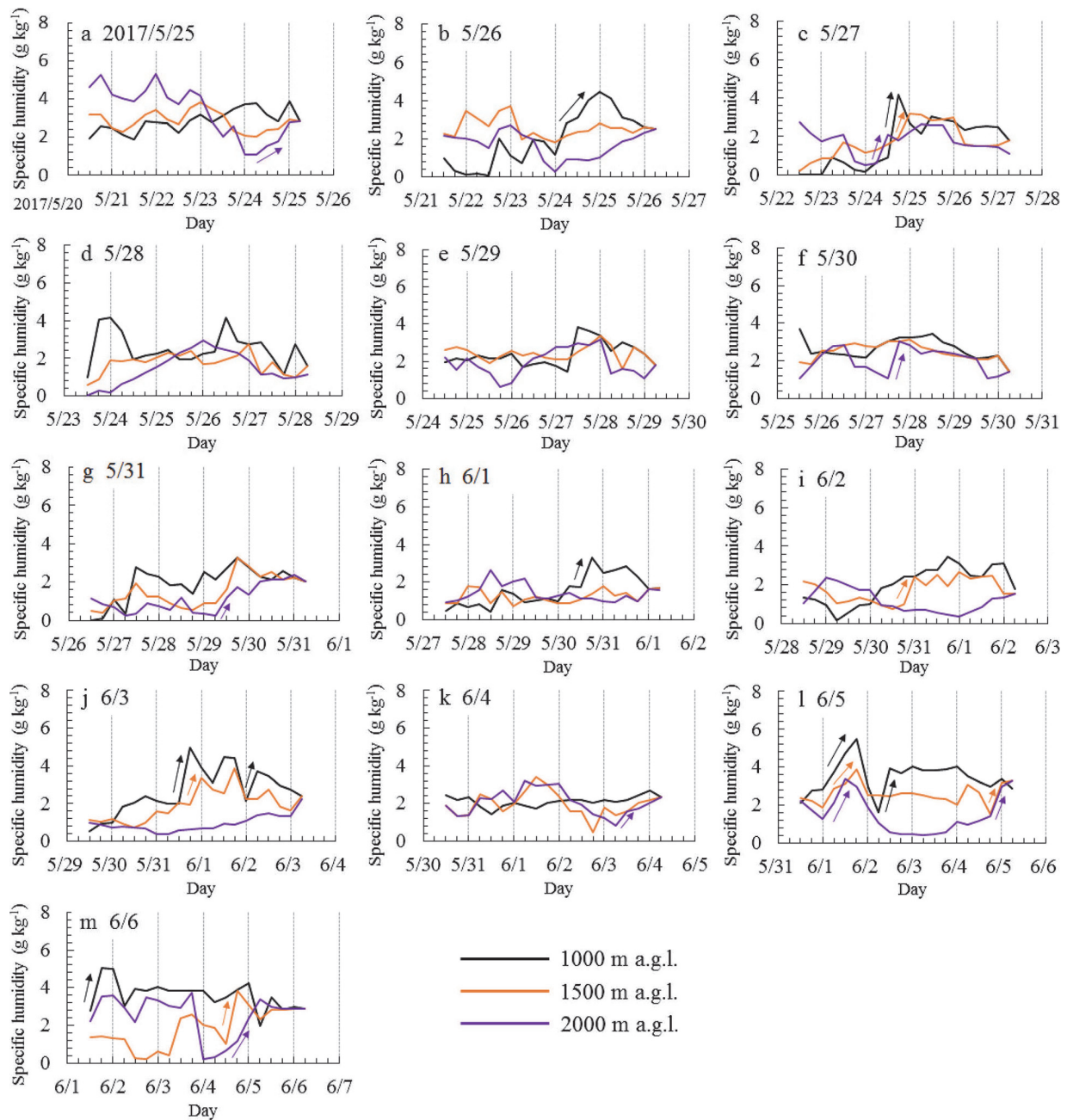


図 4 各日の午前 9 時 (UTC) に SIGMA-A の 1000 m a.g.l. (黒), 1500 m a.g.l. (オレンジ), 2000 m a.g.l. (紫) に到達した空気塊の後方流跡線に沿った 6 時間毎の比湿の変化。各日の午前 6 時 (UTC) から過去 5 日間の変化を示している。図中の矢印は各日に SIGMA-A に到達した空気塊が海洋上を通過していた時に比湿が増加したタイミングを示している。

る。つまり、海水の Cl^-/Na^+ 比に測定値に近い程、海塩粒子が大気中で滞留している時間が短いということが推定できる (Legrand and Delmas, 1988)。また、グリーンランド氷床において、表面雪中の Cl^-/Na^+ 比は 3 月以降に海水比より大きくなり 6, 7 月に極大値を示し、10 月以降に海水比に近くなることが知られている (Dibb *et al.*,

2007; Furukawa *et al.*, 2017)。5 月 25 日から 5 月 27 日と 6 月 4 日の Cl^-/Na^+ 比, nss-Ca^{2+} , NO_3^- , nss-SO_4^{2-} は比較的高い値を示した (図 2-c, d, e, f)。これは、空気塊がカナダ北東部とグリーンランド西部の陸上または人間活動が活発な地域を通過していた時に nss-Ca^{2+} , NO_3^- , nss-SO_4^{2-} を多く取り込んだことを示唆してい

る。また、これらの期間に SIGMA-A に輸送された空気塊は、比較的海氷密接度が低い NOW の上空を通過したときに (図 3-a, b, c, k), 海塩粒子を取り込んだ可能性がある。しかし、NOW 上空で取り込まれた海塩粒子は空気塊に含まれていた硫酸、硝酸と反応し、 Cl^-/Na^+ 比が高くなったと考えられる。

5 月 29 日から 6 月 3 日と 6 月 5 日は Cl^-/Na^+ 比が海水比に近い値を示した (図 2-f)。その中でも d-excess が極大値を示した 5 月 30 日、6 月 5 日と表面霜を採取した日である 6 月 3 日は、極小値を示し、より海水比に近い値を示した。6 月 3 日の表面雪には、 Na^+ が高く (図 2-b), SIGMA-A に輸送された空気塊が NOW を通過したときに、NOW からの海塩粒子が多く含まれていると考えられる。5 月 30 日と 6 月 5 日は、空気塊がバフィン湾北部で数日間滞留している時に水蒸気と海塩粒子を取り込んだが、空気塊中の NO_3^- 、 nss-SO_4^{2-} が他の日に比べて低く (図 2-d, e), 海塩粒子が硫酸や硝酸による変質の影響を比較的に受けて、SIGMA-A に沈着したと考えられる。5 月 29 日に SIGMA-A の 1500 m a.g.l. に輸送された空気塊もバフィン湾上空で数日間滞留し、開水面から海塩粒子を取り込んだ可能性があるが、空気塊に NO_3^- 、 nss-SO_4^{2-} が含まれており、空気塊がグリーンランド内陸部を輸送されている時に海塩の変質が起き、 Cl^-/Na^+ 比が海水比より高くなったことが考えられる。また、5 月 31 日から 6 月 2 日は、バフィン湾南東部の比較的海氷密接度が低い海域を通過し、2 日以上かけて SIGMA-A に空気塊が輸送されてきた。空気塊がバフィン湾南東部を輸送されている時に、海塩粒子を取り込んだ可能性が高いが、空気塊に含まれていた NO_3^- 、 nss-SO_4^{2-} によって海塩の変質が起きたため、 Cl^-/Na^+ 比が海水比より高くなったことが考えられる。

4.2 空気塊の起源周辺の環境と d-excess の関係

観測期間中の各日に SIGMA-A に降雪をもたらした空気塊は NOW またはバフィン湾上空を輸送中に比湿の増加が見られた。海面から大気中に拡散される水蒸気の d-excess の値は、海面近く的环境によって変化し降水中の d-excess に影響を与える。空気塊が海洋上を輸送中に比湿が増加

した日における 10 m a.g.l. の風向・風速と 2 m a.g.l. の気温を図 5, 10 m a.g.l. の風向・風速と地表面付近の相対湿度を図 6, 5 月 20 日から 6 月 6 日の SST (Reynolds *et al.*, 2007) の平均値を図 7 に示す。5 月 27 日、6 月 1 日、6 月 4 日はバフィン湾北部で低気圧性循環の風が発達していた (図 5-b, f, i)。そのなかで、5 月 27 日と 6 月 4 日は低気圧性循環の風によって北緯 80 度以北の高緯度の低温、乾燥した空気塊が NOW とバフィン湾北部に向かって吹いていた (図 5-b, i, 図 6-b, i)。5 月 27 日の低気圧性循環の風は 5 月 29 日には勢力を弱めていたが (図 5-c), 5 月 30 日にかけて低温な空気がバフィン湾南東部の開水面まで輸送された (図 5-b, c, d)。5 月 31 日から 6 月 3 日までは北緯 80 度において南寄りの風が発達し高緯度の低温、乾燥した空気がバフィン湾に輸送されなかった (図 5-e, f, g, h, 図 6-e, f, g, h)。また、5 月 27 日、5 月 30 日、6 月 1 日はグリーンランド南部の内陸の低温、乾燥した空気がバフィン湾南東部に向かって吹いていた (図 5-b, d, f, 図 6-b, d, f)。したがって、NOW 上空を空気塊が輸送されている時の比湿の増加は北緯 80 度以北の低温、乾燥した空気が北寄りの風によって流入したことによって引き起こされたと考えられる。一方、バフィン湾南東部を空気塊が輸送されている時の比湿の増加は、低気圧性循環の風によって高緯度の低温な空気が流入したことと、グリーンランド南部の低温、乾燥した空気が流入したことによって引き起こされたと考えられる。

SST が高く海面上の相対湿度が低いと高い d-excess の水蒸気が大気中に拡散される (Uemura *et al.*, 2008 など)。また、開水面上の気温も水蒸気の d-excess に影響を与えることが指摘されている (Gat and Carmi, 1970)。特に SST が高く開水面上の気温が低い場合には、高い d-excess の水蒸気が大気中にもたらされる (Kurita, 2011)。SST はバフィン湾南東部北緯 70 度付近で 0°C から 2°C 、NOW で -1°C から 0.5°C であり、バフィン湾南東部の方が最大で 3°C 程高温であった (図 7)。2 m a.g.l. の気温は、北緯 80 度以北では -7°C 以下の領域が広範囲を占めており、5 月 29 日と 5 月 30 日のような高緯度からバフィン湾南東部に向かって低温域が伸びている領域では、一部の領

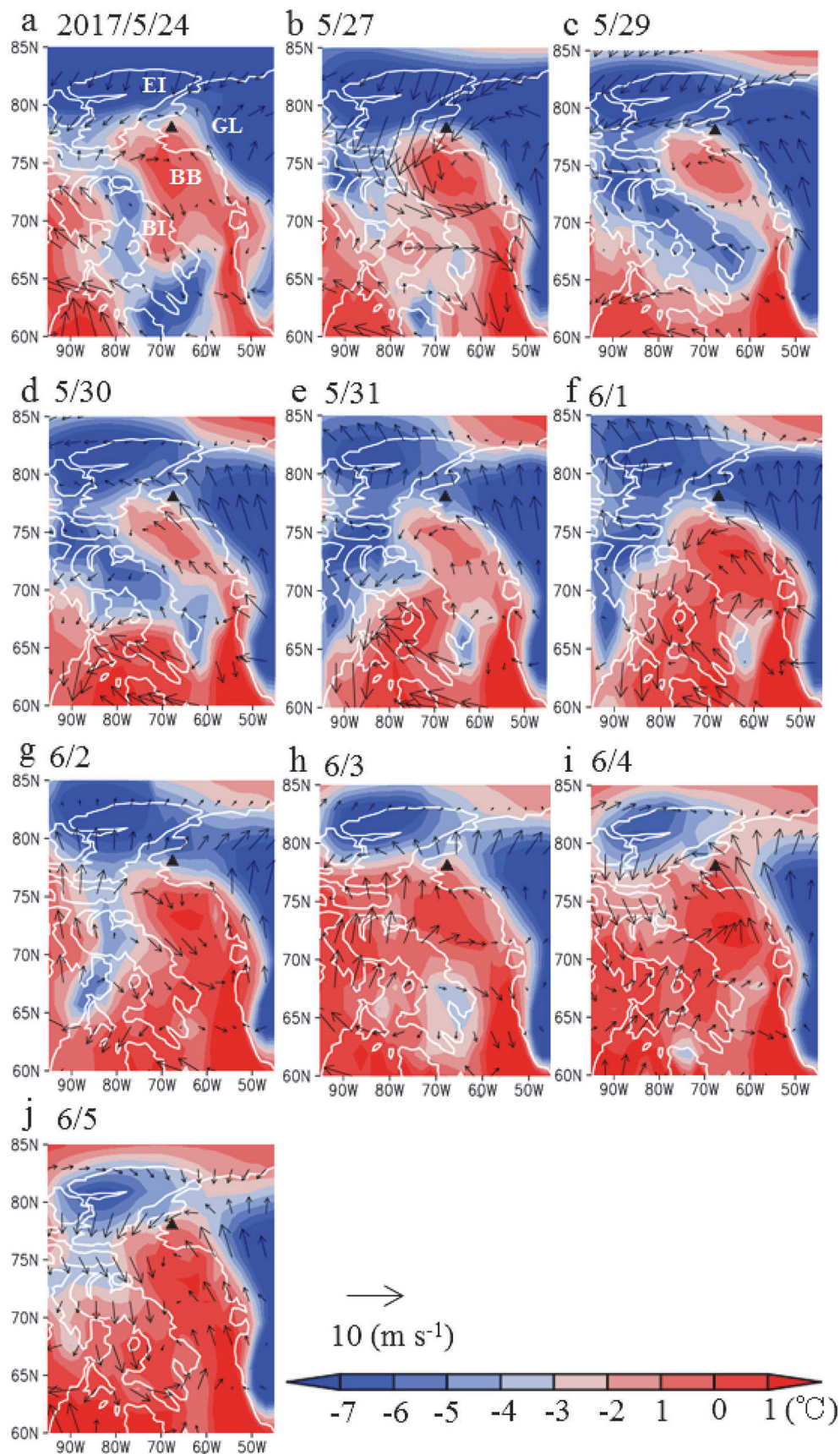


図 5 NCEP/NCAR 再解析データによる 10 m a.g.l. の風向・風速の日平均値 (ベクトル) と 2 m a.g.l. の気温の日平均値 (カラーバー). ▲は SIGMA-A の位置を示す. 図中の地点は, GL : Greenland, EI : Ellesmere Island, BB : Baffin Bay, BI : Baffin Island を示す.

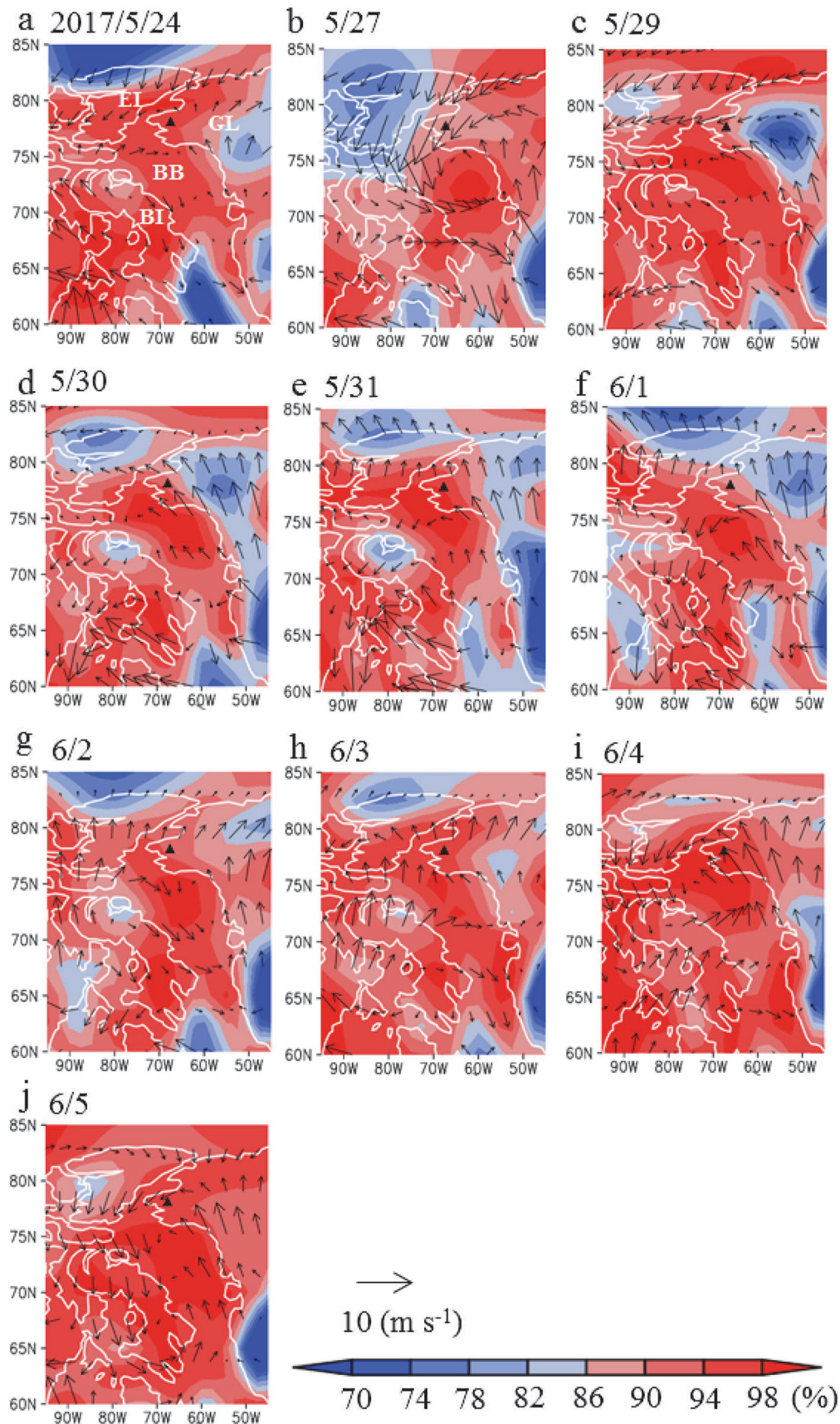


図 6 NCEP/NCAR 再解析データによる 10 m a.g.l.の風向・風速の日平均値 (ベクトル) と地表面の相対湿度の日平均値 (カラーバー). ▲は SIGMA-A の位置を示す. 図中の地点は, GL: Greenland, EI: Ellesmere Island, BB: Baffin Bay, BI: Baffin Island を示す.

域が -7°C 以下であり、領域の殆どは -5°C 以上であった(図5). また、グリーンランド南部の陸上は -7°C 以下の領域が広範囲を占めていた. 相対湿度は北緯80度以北とグリーンランド南部において低く、5月30日、5月31日、6月2日、6月3日は北緯73度、西経80度付近において低い値を示した(図6). 以上より、初夏におけるバフィン湾では、5月27日、5月30日、6月1日のようなグリーンランド南部の低温、乾燥した空気がバフィン湾南東部の高いSSTの海面上を通過する時に高いd-excessの水蒸気がもたらされ、次いで5月27日、6月4日、6月5日のような北緯80度以北の低温または乾燥した空気がNOWを通過する時、あるいは5月29日、5月30日のような高緯度からバフィン湾南東部に向かって輸送された低温な空気がバフィン湾南東部の開水面上を通過する時に高いd-excessの水蒸気が大気中にもたらされると考えられる.

4.3 5月30日と6月5日にd-excessが極大値を示した原因

これまで述べた2 m a.g.l.の気温、地上の相対湿度、SSTの分布から、5月27日はNOWとバフィン湾南東部の開水面において、6月4日と6月5日はNOWにおいて、5月29日、5月30日、6月1日はバフィン湾南東部の開水面において比較的高いd-excessの水蒸気が大気中に拡散されたと推定された. それらの水蒸気がSIGMA-Aに降雪をもたらした日は5月30日から6月3日、6月5日と6月6日であり、それらの日の降雪は比較的高いd-excessを示した(図2-a). そのうち5月30日と6月5日にはd-excessが極大値を示しており、降雪が高いd-excessを持つ他の要因があると考えられる. Klein and Welker (2016)は、海水域における水蒸気の安定同位体観測から、d-excessと風速には正の有意な相関があることを示した. 5月27日のNOWにおける10 m a.g.l.の風は北寄りの風 10 m s^{-1} 以上で比較的高い値を示した(図5-b). この北寄りの風はバフィン湾北部の低気圧性循環の風の一部である. また、5月27日は、エルズミア島において比較的大きな乾燥空気の領域が見られた(図6-b). その乾燥空気の領域は強い北寄りの風によって北緯75度付近まで広がっていた. したがって、5月27日

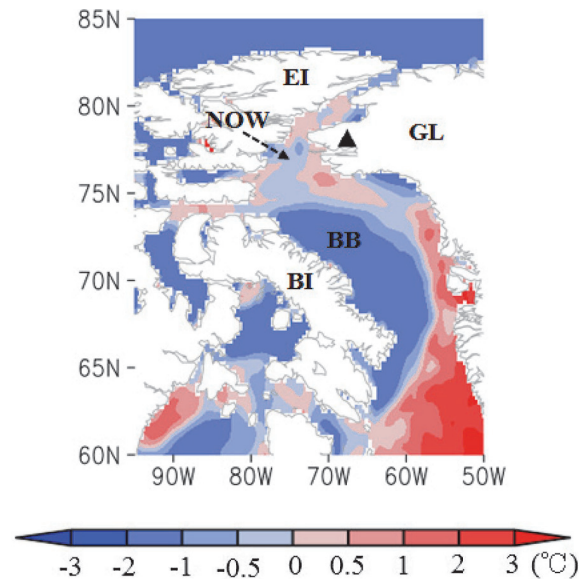


図7 2017年5月20日から6月6日の海面水温(SST: Sea Surface Temperature)の平均値. ▲はSIGMA-Aの位置を示す. 図中の地点は、GL: Greenland, EI: Ellesmere Island, BB: Baffin Bay, BI: Baffin Island, NOW: North Waterを示す.

は強い北風によって、NOWにおいて高いd-excessが大気中に拡散されることが考えられる. 5月30日と6月5日に降雪をもたらした水蒸気は輸送中にバフィン湾上空で比較的長時間滞留していた(図3-f, l). 空気塊が滞留した期間は低気圧性循環の風が発達した日であった. 一方、6月1日から6月3日にSIGMA-Aに到達した空気塊は、バフィン湾上の一定の場所で留まることなく速やかにSIGMA-Aに輸送され(図3-h, i, j), このときの降雪のd-excessは5月30日と6月5日より低い値を示した(図2-a). また6月5日は、SIGMA-Aの1000 m a.g.l.と1500 m a.g.l.に到達した空気塊がバフィン湾上で2日以上滞留していたのに対し(図3-l), 6月6日は、SIGMA-Aの1000 m a.g.l.に到達した空気塊のみがバフィン湾上で2日以上滞留していた(図3-m). そのため6月5日には、6月6日より高いd-excessの水蒸気を取り込んだ空気塊の量が多かったと考えられる.

以上のことから5月30日と6月5日はSIGMA-Aに降雪をもたらす空気塊の輸送中にNOWまたは、バフィン湾南東部の開水面で高いd-excessをもたらす水蒸気の蒸発が起こり、バフィン湾上

で比較的長時間滞留することで多くの空気塊が高い d-excess の水蒸気を取り込んだことによって d-excess が極大値を示したことが考えられる。また、バフィン湾北部に発達した低気圧性循環の風が高い d-excess をもたらす水蒸気の蒸発とバフィン湾上の空気塊の滞留に大きく寄与していることが示唆された。

5. まとめ

本研究では、グリーンランド氷床北西部 SIGMA-A において初夏の表面雪の d-excess と化学成分の変化と、降雪をもたらす水蒸気の起源周辺の環境との関係を明らかにした。観測期間中の表面雪の d-excess には、2 度の極大値が見られた。溶存イオン種濃度との関係を調べると、d-excess が極大値を示した日は、 nss-Ca^{2+} 、 NO_3^- 、 nss-SO_4^{2-} が低い値を取り、 Cl^-/Na^+ 比は海水比に近い値を示した。d-excess が高い降雪をもたらし水蒸気を含む空気塊は人間活動域や陸域を通らず、海塩粒子は SIGMA-A に近い海域から SIGMA-A に輸送されたと考えられる。

また、降雪中の d-excess を変化させた水蒸気の起源を推定するため、後方流跡線解析と後方流跡線に沿った比湿の変化の算出を行った。空気塊が海洋上を通過した時に比湿が増加した日および地点で水蒸気が空気塊に取り込まれたと仮定した。その結果、水蒸気を取り込みは NOW またはバフィン湾南東部の開水面で生じていることが明らかになった。更に、SIGMA-A に輸送中の空気塊が水蒸気を取り込んだ時の海面付近の気象条件と空気塊が取り込んだと考えられる水蒸気の d-excess の変化について考察した。その結果、グリーンランド南部の低温で乾燥した空気がバフィン湾南東部の高い SST の海面上を通過する時に高い d-excess の水蒸気を取り込まれ、次いで北緯 80 度以北の低温で乾燥した空気が NOW を通過する時、あるいは低気圧性循環の風によって高緯度からバフィン湾南東部に向かって輸送された低温な空気がバフィン湾南東部の開水面上を通過する時に高い d-excess の水蒸気が大気中に取り込まれることが示唆された。表面雪の d-excess が極大値を示した 5 月 30 日と 6 月 5 日に SIGMA-A に到達した空気塊はそれぞれ NOW ま

たはバフィン湾南東部で高い d-excess が大気中にもたらされた日にバフィン湾上で水蒸気を取り込んでいた。更に、5 月 30 日と 6 月 5 日に SIGMA-A に到達した空気塊は、数日間バフィン湾上で比較的長時間滞留していたことから、NOW とバフィン湾南東部から蒸発した高い d-excess の水蒸気を他の日より多く取り込んだことが考えられる。また、空気塊がバフィン湾上で長時間滞留した日や、NOW とバフィン湾南東部で高い d-excess を持つ水蒸気が蒸発した日は、バフィン湾北部の 10 m a.g.l. において低気圧性循環の風が発達していた。したがって、バフィン湾北部に発達する低気圧性循環の風が初夏において SIGMA-A に降雪をもたらす水蒸気の d-excess を高めた間接的な要因であることが考えられる。

本研究では、SIGMA-A における初夏の表面雪の d-excess、化学成分の変動のメカニズムを、降雪をもたらす水蒸気の起源周辺の環境を推定することで明らかにした。今後、SIGMA-A とその近傍におけるアイスコア研究において、各年の初夏の層の d-excess が高く、 nss-Ca^{2+} 、 NO_3^- 、 nss-SO_4^{2-} の濃度が低く、 Cl^-/Na^+ 比が海水比に近ければ、初夏のバフィン湾北部における低気圧循環の風の発生頻度が増加したということが推測できる。グリーンランド氷床において、アイスコア中の Na^+ 、 Cl^-/Na^+ 比、d-excess は季節変動することが知られている (Furukawa *et al.*, 2017, Steen-Larsen *et al.*, 2011)。そのため、グリーンランド氷床北西部のアイスコアによる気象データが存在しない過去の水蒸気起源周辺の環境の推定には、積雪断面観測によって得られた積雪サンプル、アイスコアの気象データが存在する期間の解析により d-excess、化学成分の季節変動のメカニズムを明らかにする必要がある。また、NOW ポリニヤは、11 月から 3 月の間に形成され、バフィン湾の海水は 1 年を通じて大きく変動する (Barber, *et al.*, 1996)。今後、積雪サンプル、アイスコアによって d-excess、化学成分の変動のメカニズムを解明するためには、バフィン湾の海水変動による、SST、海面付近の相対湿度、気温、風向、風速の変化の関係を明らかにする必要がある。

謝 辞

本論文に関する観測に協力いただいた、(一社)アバンナットの山崎哲秀氏に心からお礼申し上げます。本研究は、ArCS 北極域研究推進プロジェクトおよび SIGMA-II プロジェクトの一部として実施された。また本研究は、JSPS 科研費 16H01772, 26257201, 15H01733 の助成を受けた。

文 献

- Barber, D.G., Hanesiak, J.M., Chan, W. and Piwowar, J. (1996): Sea-ice and meteorological conditions in Northern Baffin Bay and the North Water polynya between 1979 and 1996. *Atmosphere-Ocean*, **39** (3), 343-359.
- Benson, C.S. (1960): Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland Ice Sheet. Ph.D. thesis, California Institute of Technology.
- Bonne, J.L., Masson-Delmotte, V., Cattani, O., Delmotte, M., Risi, C., Sodemann, H. and Steen-Larsen, H.C. (2014): The isotopic composition of water vapor and precipitation in Ivittuut, southern Greenland. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 4419-4439.
- Cadle, R.D., (1972): Formation and Chemical Reactions of Atmospheric Particle. *J. Colloid and Interface Science*, **39**, 25-31.
- Dansgaard, W. (1964): Stable isotope in precipitation. *Tellus*, **16** (4), 436-468.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., Berg, L. van de., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.J., Park, B.K., Peubey, C., Rosnay, P. de., Tavolato, C., Thépaut, J.N. and Vitart, F. (2011): The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597.
- Dibb, J.E., Whitlow, S.L. and Arsenault, M. (2007): Seasonal variations in the soluble ion content of snow at Summit, Greenland: Constant from three years of daily surface snow samples. *Atmos. Environ.*, **41** (24), 5007-5019.
- Dunbar, M.J. (1969): The geophysical position of the North Water. *Arctic*, **22**, 438-441.
- EPICA Community Members (2004): Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, **429**, 623-628.
- Furukawa, R., Uemura, R., Fujita, K., Sjolte, J., Yoshimura, K., Matoba, S. and Iizuka, Y. (2017): Seasonal scale dating of a shallow ice core from Greenland using oxygen isotope matching between data and simulation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, 10873-10887.
- Gat, J.R., (1996): Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **24** (1), 225-262.
- Gat, J.R. and Carmi, I. (1970): Evolution of the Isotopic Composition of Atmospheric Waters in the Mediterranean Sea Area. *J. Geophys. Res.*, **75**, 15.
- Iizuka, Y., Uemura, R., Fujita, K., Hattori, K., Seki, O., Miyamoto, C., Suzuki, T., Yoshida, N., Motoyama, H. and Matoba, S. (2018): A 60 year record of atmospheric aerosol depositions preserved in a high-accumulation dome ice core, Southeast Greenland. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 574-589.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R. and Joseph, D. (1996): The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-470.
- Kerminen, V.M., Teinilä, K. and Hillamo, R., (2000): chemistry of sea-salt particles in the summer Antarctica atmosphere. *Atmos. Environ.*, **34**, 2817-2825.
- Klein, E.S. and Welker, J.M. (2016): Influence of sea ice on ocean water vapor isotopes and Greenland ice core records. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 12475-12483.
- Kurita, N. (2011): Origin of Arctic water vapor during the ice-growth season. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 2825-2528.
- Legrand, M. and Delmas, R.S. (1988): Formation of HCl in the Antarctic atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **93**, 7153-7168.
- Legrand, M. and Mayewski, P. (1997): Glaciochemistry of polar ice cores: A review. *Rev. Geophys.*, **35** (3), 219-244.
- Matoba, S., Yamasaki, T., Miyahata, M. and Motoyama, H. (2014): Spatial variations of $\delta^{18}\text{O}$ and ion species in the snowpack of the northwestern Greenland ice Sheet. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 79-84.
- Matoba, S., Motoyama, H., Fujita, K., Yamasaki, T., Minowa, M., Onuma, Y., Komuro, Y., Aoki, T., Yamaguchi, S., Sugiyama, S. and Enomoto, H. (2015): Glaciological and meteorological observations at the

- SIGMA-D site, northwestern Greenland Ice Sheet. *Bull. Glaciol. Res.*, **33**, 7–14.
- Matoba, S., Niwano M., Tanikawa, T., Iizuka, Y., Yamasaki, T., Kurosaki, Y., Aoki, T., Hashimoto, A., Hosaka, M. and Sugiyama, S. (2018): Field activities at the SIGMA-A site, northwestern Greenland Ice Sheet, 2017. *Bull. Glaciol. Res.*, **36**, 15–22.
- Merlivat, L. and Jouzel, J. (1979): Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen-18 relationship for precipitation. *J. Geophys. Res.* **84**, 5029–5033.
- Ohmura, A. and Reeh N. (1991): New precipitation and accumulation maps for Greenland. *J. Glaciol.*, **37**(125), 140–148.
- Osterberg, E.C., Hawley, R.L., Wong, G., Kopec, B., Ferris, D. and Howley, J. (2015): Coastal ice-core record of recent northwest Greenland temperature and sea-ice concentration. *J. Glaciol.*, **61** (230), 1137–1146.
- Reynolds, R.W., Smith, T.M., Liu, C., Chelton, D.B., Casey, K.S. and Schlax, M.G. (2007): Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *J. Climate*, **20**, 5473–5496.
- Smith, S.D., Muench, R.D. and Pease, C.H. (1990): Polynyas and Leads: An Overview of Physical Processes and Environment. *J. Geophys. Res.*, **95**, 9461–9479.
- Steen-Larsen, H.C., Masson-Delmotte, V., Sjolte, J., Johnsen, S.J., Vinther, B.M., Breon, F.M., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Falourd, S., Fettweis, X., Gallee, H., Jouzel, J., Kageyama, M., Lerche, H., Minster, B., Picard, G., Punge, H. J., Risi, C., Salas, D., Schwander, J., Steffen, K., Sveinbjörnsdottir, A.E., Svensson, A. and White, J. (2011): Understanding the climatic signal in the water stable isotope records from the Neem shallow firn/ice cores in northwest Greenland. *J. Geophys. Res.*, **116**, D06108.
- Steen-Larsen, H.C., Johnsen, S.J., Masson-Delmotte, V., Stenni, B., Risi, C., Sodemann, H., Balslev-Clausen, D., Blunier, T., Dahl-Jensen, D., Ellehoj, M.D., Falourd, S., Grindsted, A., Gkinis, V., Jouzel, J., Popp, T., Sheldon, S., Simonsen, S.B., Sjolte, J., Steffensen, J.P., Sperlich, P., Sveinbjörnsdottir, A.E., Vinther, B.M. and White, J.W.C. (2013): Continuous monitoring of summer surface water vapor isotopic composition above the Greenland Ice Sheet. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 4815–4828.
- Steen-Larsen, H.C., Sveinbjörnsdottir, A.E., Peters, A.J., Masson-Delmotte, V., Guishard, M.P., Hsiao, G., Jouzel, J., Noone, D., Warren, J.K. and White, J.W.C. (2014): Climate controls on water vapor deuterium excess in the marine boundary layer of the North Atlantic based on 500 days of in situ, continuous measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 7741–7756.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D. and Ngan, F. (2015): NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96** (12), 2059–2077.
- Uemura, R., Matsui, Y., Yoshimura, K., Motoyama, H. and Yoshida, N. (2008): Evidence of deuterium excess in water vapor as an indicator of ocean surface condition. *J. Geophys. Res.*, **113**, D19114.
- Wilson, T.R.S. (1975): Salinity and the major elements of sea water. *Chemical Oceanography*, edited by J.P. Riley and G. Skittow, San Diego, Calif., Academic, 365–413.
- Yamanaka, T., Shimada, J. and Miyaoka, K. (2002): Foot-print analysis using event – based isotope data for identifying source area of precipitated water. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **107** (D22), 4624.

Influence of environmental conditions near Baffin Bay on deuterium excess and chemical substances in falling snow in northwestern Greenland

Yutaka KUROSAKI^{1,2*}, Sumito MATOBA², Yoshinori IIZUKA², Masashi NIWANO³,
Tomonori TANIKAWA³ and Teruo AOKI⁴

¹ *Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, N10W5, Sapporo, Hokkaido 060-0810*

² *Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, N19W8, Sapporo, Hokkaido 060-0819*

³ *Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency,
1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052*

⁴ *Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University,
3-1-1, Tsushima-Naka, Kita-Ku, Okayama 700-8530*

* *Corresponding author: kurosaki_96@pop.lowtem.hokudai.ac.jp*

Abstract: To understand the mechanisms of changes in water-stable isotopes and chemical substances in falling snow in northwestern Greenland, we sampled surface snow at the SIGMA-A site of the northwestern Greenland Ice Sheet from 25 May to 6 June 2017, and analyzed water-stable isotopes and chemical substances in the samples. During the observation period, deuterium excess (d-excess) peaked on 30 May and 5 June, corresponding to low concentrations of chemical substances from terrestrial mineral dust and anthropogenic activity and a low Cl^-/Na^+ ratio, which was close to the ratio in seawater. This suggests that sea salt and air were transported from seawater close to SIGMA-A. Analyses of the backward trajectory and meteorological conditions showed that the air mass leading to the high d-excess snowfall was transported toward SIGMA-A above an open water area in a cold, dry air mass that stayed over Baffin Bay for a relatively long period of time because of cyclonic flow into a depression over 10 m above sea level over the bay.

(2018 年 6 月 8 日受付, 2018 年 8 月 8 日改稿受付, 2018 年 9 月 20 日最終改稿受付,
2018 年 9 月 25 日受理, 討論期限 2019 年 5 月 15 日)