

北極域のアイスコアによる古環境研究：歴史と今後の展望

東 久美子^{1, 2, *}

(2019年1月15日受付, 2019年5月14日受理)

Studies on the past environment using Arctic ice cores: History and future prospects

Kumiko GOTO-AZUMA^{1, 2, *}

¹ National Institute of Polar Research
10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo 190-8518, Japan
² The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI
* E-mail: kumiko@nipr.ac.jp

Due to global warming, the Arctic has been changing drastically and rapidly. The changes in the Arctic cryosphere affect not only the Arctic climate and environment but also the global climate system. There is an urgent need to improve the projections of future Arctic climate and environment, including mass loss of the Greenland ice sheet, which affects the global sea level, ocean circulation and global climate. To achieve these goals, we need to advance ice sheet and climate modeling. Long-term records of the past Arctic warmings and their impacts, and the understanding of the mechanisms are necessary. Arctic ice cores have been providing us with valuable information on different time-scales from decadal to orbital time-scales. For example, deep ice cores from Greenland have revealed abrupt warming events in the glacial and deglacial periods and their links to global environmental changes. Multiple ice cores from the Arctic have been used to reconstruct the elevations of the past Greenland ice sheet. Shallow ice cores from circum-Arctic ice caps and Greenland have shown anthropogenic increases of acids, toxic metals etc. after the industrial revolution. This paper briefly reviews the history of ice core studies in the Arctic and discusses future prospects.

Key words: Ice core, Arctic, Environmental change, Abrupt climate change, Greenland Ice sheet

1. はじめに

北極域は近年、人間活動による地球温暖化の影響で急激に変化しており、グリーンランド氷床および北極域各地の氷河における質量損失の加速や、北極海の海水の減少が社会の注目を集めている (Rignot *et al.*, 2011; IPCC, 2013; Vallelonga *et al.*, 2014)。特にグリーンランド氷床は、南極氷床を除く地球上の氷床・氷河の氷の全体積の9割以上を占めており、氷がすべて融けると海水準が約7 m上昇すると考えられている (IPCC, 2013) ため、その動向に関心が寄せられている。氷床・氷河の質量損失は海面上昇を引き起こすだ

けでなく、陸域のアルベド低下や海洋循環の変化を通じて全球の気候にも影響を与える。また、海水の減少も、北極域だけでなくアジアや全球の気候・環境に影響を及ぼす。北極域の氷床・氷河や海水の変化の実態を把握し、そのメカニズムを解明すること、更にその影響を正しく評価することが急務である。そのためには過去に生じた気候・環境変動を研究し、そのメカニズムを理解することが有効な手段となる。古気候・古環境を記録している媒体としてはアイスコア、海底・湖底堆積物、年輪などが挙げられるが、本稿では古気候・古環境研究に大きく貢献してきた、北極域におけるアイスコア研究について紹介する。なお、狭義の北極域は、Arctic Circle (北緯66度33分の緯線) よりも高緯度の地域であるが、本稿ではそれよりも若干低緯度の地域におけるアイスコア研究も含める。

¹ 国立極地研究所
〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3
² 総合研究大学院大学

北極域にはグリーンランド氷床を始め、アメリカ、カナダ、ノルウェー、ロシアなど各地に氷河が分布している (IPCC, 2013)。氷床や氷河の標高の高い場所では夏でも雪が融けないため、新しく降る雪は過去に降り積もった雪の上に積み重なっていく。古い雪はその上に堆積する雪の重さで圧縮され、徐々に雪から氷へと変化していく。氷床・氷河に降り積もった雪が氷に変化していく過程で、大気やエアロゾル等が氷床・氷河の氷の中に取り込まれる。氷床・氷河には過去から現在までの雪と空気が冷凍保存されているので、氷床や氷河を掘削することで、過去から現在に至るまでの雪と大気を取り出すことができる。氷床や氷河でボーリングによって掘削された氷をアイスコアと呼ぶが、その中で特にグリーンランド氷床と南極氷床で掘削されたアイスコアを氷床コアとも言う。アイスコアの氷を構成する水分子の安定同位体比 (酸素同位体比および水素同位体比) やアイスコアに含まれているエアロゾルや空気の成分を分析することで、雪が氷床・氷河に降り積もった当時、あるいは空気が氷床・氷河の氷に取り込まれた当時の気温、陸海域環境、氷床・氷河の高度、大気成分、大気循環などを復元することができる (植村, 2007; 川村, 2009; 藤井・本山, 2011)。

氷床・氷河を構成する氷は、塑性変形により流動する。Fig. 1のように鏡餅のような形をした氷床・氷河の頂部 (A) では水平方向の流動がないため、同じ地点の雪や空気が過去から現在に至るまで保存されている。これに対して、水平方向の流動がある地点 (B) では、深さによって異なる地点の雪や空気が保存されているので、氷の流動モデルによって深さ毎に積雪の起源となる場所を推定する必要が生じる。このため、アイスコアの掘削は通常、できるだけ水平方向の流動

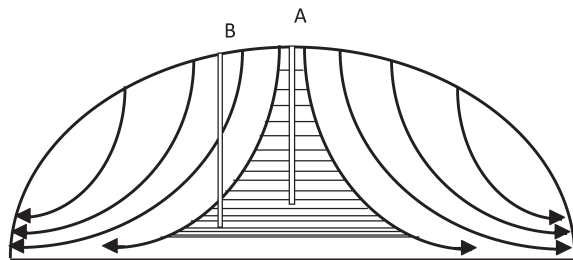


Fig. 1 Schematic diagram of ice flow in an ice sheet or an ice cap. Arrows represent ice flow directions. "A" is a site without horizontal flow, which is the best ice coring site to reconstruct the past climate and environment. "B" is a site with horizontal flow.

速度の小さい地点で行われる。また、夏期に氷床・氷河の融解が生じる地点では融け水が流下して古い氷と混合してしまうため、できるだけ融解が生じない地点で行われる。本稿は、2章で北極域におけるアイスコア研究の歴史を、3章~5章でこれまでに得られた主要な成果を紹介し、6章で今後の研究展望について述べる。

2. 北極域におけるアイスコア研究の歴史

アメリカのチェスター・ラングウェー・ジュニア (Chester Langway Jr.) とデンマークのウィリー・ダンスガード (Willi Dansgaard) がアイスコア研究の元祖と言える (Dansgaard, 2005; Langway, 2008)。アメリカは1950年代に南極でアイスコアの掘削を開始しており (Langway, 2008), ダンスガードは1954年の論文でグリーンランド氷床氷の水分子の安定同位体比を分析することで過去の気温が復元できると提唱した (Dansgaard, 1954)。ダンスガードの研究グループは、アメリカが1960年代に南極やグリーンランドで掘削したアイスコアの酸素同位体比を分析することで、その考えが正しかったことを証明した (Dansgaard *et al.*, 1969; Dansgaard, 2005)。更にスイスのハンス・オシュガー (Hans Oeschger) は、アイスコアから抽出した空気から過去の二酸化炭素やメタンなどの気体成分の変動が復元できることを示した (Oeschger *et al.*, 1982; Oeschger, 1985; Dansgaard, 2005; Langway, 2008)。その後、氷の中に含まれるさまざまな不純物やその同位体の分析が行われるようになり、不純物の起源の推定や、不純物の起源となる陸域や海域の環境、大気循環などについての知見が得られるようになった (藤井・本山, 2011)。北極域においては、これまで欧米、カナダ、ロシアや日本を始めとする各国がグリーンランド氷床やカナダ北極域、アラスカ、ユーコン、スバルバル、ロシア等の氷河でアイスコアの掘削と分析を行ってきた。

グリーンランド氷床では、1960年代から2012年までに Camp Century (1966年に1375 mまで掘削), DYE3 (1981年に2037 mまで掘削), GRIP (Greenland Ice Core Projectの略, 1992年に3029 mまで掘削), GISP2 (Greenland Ice Sheet Program 2の略, 1993年に3053 mまで掘削), NGRIP (North Greenland Ice Core Projectの略, North GRIPと呼ばれることもある。2003年に3085 mまで掘削), NEEM (North Greenland Eemian Ice Drillingの略, 2012

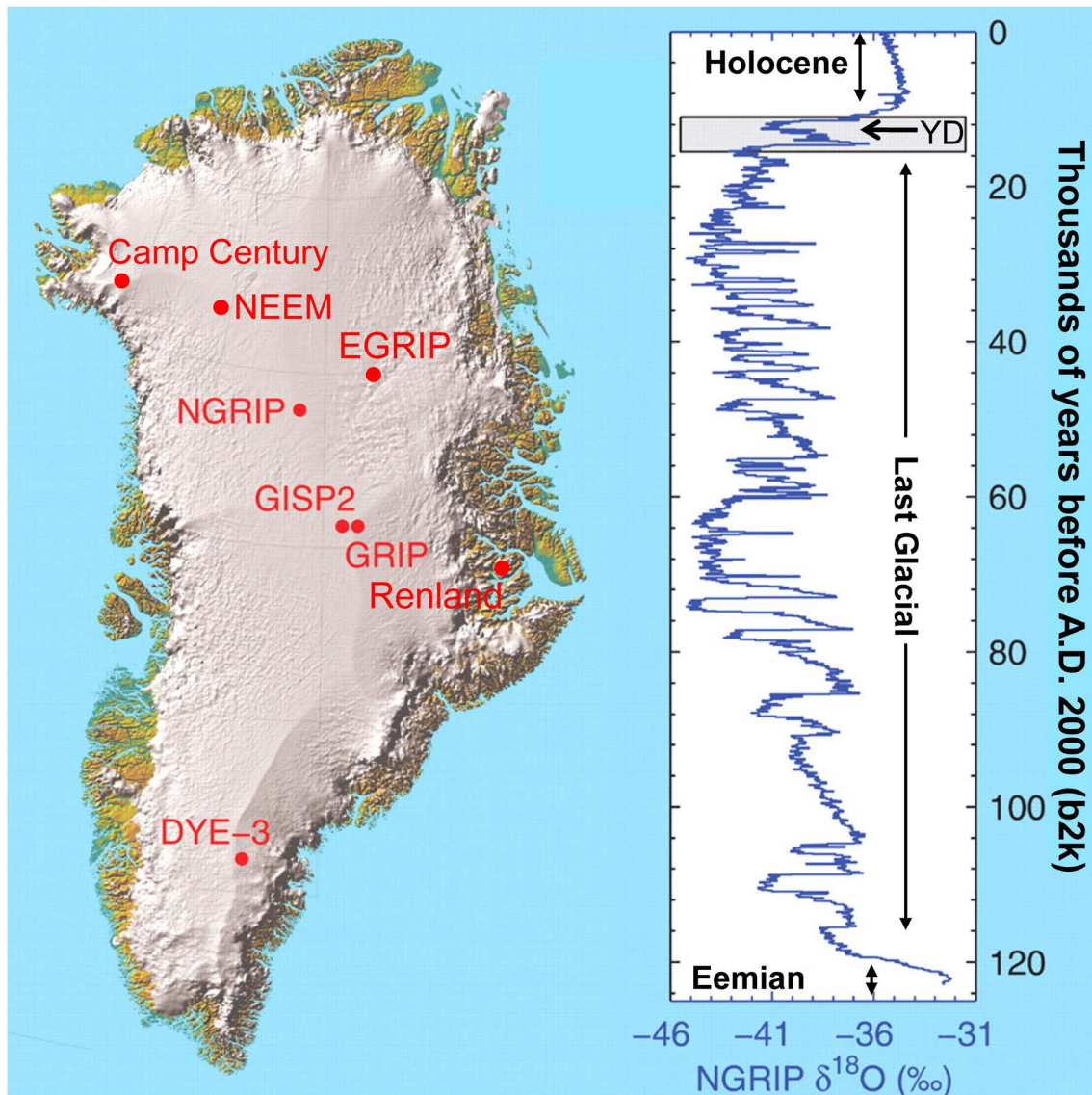


Fig. 2 (Color online) Ice coring sites on the Greenland ice sheet cited in the text (left) and the $\delta^{18}\text{O}$ (a proxy for air temperature) record from NGRIP core (right) (Steffensen *et al.*, 2008). YD represents Younger Dryas. During the last glacial period, temperature oscillation called DO events were first recognized in GRIP core and have been seen in all the deep ice cores from Greenland (see text). Here we show NGRIP $\delta^{18}\text{O}$ record instead of GRIP $\delta^{18}\text{O}$ record, because unlike GRIP core, NGRIP core does not show any disturbances in the record.

年に2540 mまで掘削)の6地点 (Fig. 2) で千メートルを超える深層アイスコアが掘削された。Camp CenturyおよびDYE3は米軍基地の名称であるが、掘削されたアイスコアの名称としても使われる。GRIP, GISP2, NGRIP, NEEMはプロジェクトの名称であるが掘削地点名や掘削されたアイスコアの名称としても用いられる。これらの地点で掘削された深層アイスコアの解析により、氷期・間氷期の万年スケールの大規模な気候変動や、数千年スケールの気候変動など、さまざまな時間・空間スケールを持つ気候変動について、現在の気候学の根幹をなす新しい発見が続々と

たらされた。1992年に掘削されたGRIPコアの酸素同位体比の分析結果から、グリーンランドでは最終氷期に二十数回も急激な気候変動が発生していたことが明らかになり、気候変動の研究に新しい展開をもたらした (Johnsen *et al.*, 1992; North Greenland Ice Core Project members, 2004, Fig. 2)。この急激な気候変動については3章で述べる。

DYE3, GRIP, NGRIP, NEEMで実施されたグリーンランドの氷床掘削プロジェクトは国際共同研究として実施された。DYE3では日本人研究者がアイスコアの分析に関わり、GRIP, NGRIP, NEEMでは、日本

の研究チームが正式なメンバーとして掘削・研究プロジェクトに参加した。グリーンランドの深層掘削プロジェクトでは、新しいアイスコアを掘削する度に新しい発見があった。これは、アイスコアの分析技術が日進月歩であり、時代が新しくなるほど高度な分析技術が利用できるようになったこと、また、それぞれの掘削地点の地理的・気候的条件が異なっていることなどによるものである。

GRIP コアの底部付近では、酸素同位体比が激しく変動しており、最初はグリーンランドで最終間氷期 (Eemian 間氷期または Sangamon 間氷期と呼ばれる) に激しい気候変動が繰り返されたと解釈された (Dansgaard *et al.*, 1993; Greenland Ice-Core Project members, 1993)。しかし、その後、GRIP コアから1年遅れて、約30キロメートルしか離れていない地点で米国が掘削したGISP2 コアの酸素同位体比のデータが、コアの深部でGRIP コアのデータと一致しないことから、両方のコアともに氷床底部で褶曲によって氷の層構造が乱れていたことがわかり、最終間氷期に激しい気候変動影響があったという解釈が間違いである可能性が高くなった (Grootes *et al.*, 1993)。それ以来、現在よりも温暖で、温暖化が進行した近未来の地球環境を推定するためのヒントとなる最終間氷期の気候・環境変動を北極域のアイスコアから復元することがアイスコア研究コミュニティの悲願となった。NGRIP 計画では最終間氷期の氷の採取を目標として掘削を行ったが、氷床の底で融解が生じており、古い時代の氷が融けて消失していたため、最終間氷期の氷は一部しか取得することができなかった (North Greenland Ice Core Project members, 2004)。しかし、取得できた最終間氷期中盤頃の氷から、当時は現在よりも気温が5℃程度も高かったことが推定され、これほど高温でもグリーンランド氷床の氷が消失しなかったことが明らかになった。この発見により、最終間氷期の最温暖期における気温や氷床の厚さを推定し、更に最終間氷期に激しい気候変動があったのかどうかを知ることが重要な課題となった。そこで、国際極年 (IPY) をきっかけとして14カ国が参加して実施したNEEM計画では、最終間氷期全体をカバーするアイスコアを掘削することを目的として掘削を行った。事前のアイスレーダー探査ではNEEM地点で底面融解や褶曲が生じていないと考えられていたが、掘削したアイスコアを実際に分析したところ、氷床深部で褶曲が生じており、同じ時代の氷が複数回出現する

深度帯や、上下が逆転している深度帯があった。分析データ取得直後は、データの異常の原因がわからなかったが、その後、気体分析や南極氷床コアとの比較により、異常なデータの原因が褶曲であったことが明らかになった (NEEM community members, 2013)。幸いにも最終間氷期全体にわたる氷が連続的に保存されている深度帯があり、NEEM コアから最終間氷期全体の気候・環境を復元することができた。その研究成果については4章で述べる。

グリーンランドでは1000~3000 mを超える深層アイスコアだけでなく、数十m~300 m程度の浅層アイスコアが多数掘削され、過去数十年~数百年の気候・環境変動が研究されている。グリーンランドでは水の安定同位体比や化学成分濃度の季節変動を過去に遡って追跡できる地点が多く、そのような地点で掘削したアイスコアは、年輪のように一年一年の層を正確に決めることができる。そのため、降雪量を正確に求めたり、気象観測データや衛星観測データと比較したり、人為起源物質の排出インベントリーと比較することが可能であり、気候・環境変動を高時間分解能で詳細に研究することができる。アメリカが実施したPARCA (Program for Arctic Regional Climate Assessment) プロジェクトでは、グリーンランド氷床における過去数十年の年間積雪量の空間分布を調べるためにグリーンランドの広域で浅層コアを掘削した (Mosley-Thompson *et al.*, 2001)。ドイツのグループもグリーンランドの広域で多数の浅層コアを掘削し、その解析結果から過去数百年の大気汚染物質の変動史の解析や、気候変動のテレコネクションなどに関する研究を実施した (Fischer *et al.*, 1998a, 1998b; Fischer, 2001)。日本の研究グループは、アメリカやデンマークとの国際共同研究や日本が中心となって実施したプロジェクトにより、グリーンランドのアイスコアを用いて過去数十年~数百年の大気汚染の歴史や、気候変動に伴う陸海域起源の有機物の変動などの研究を行っている (Kawamura *et al.*, 1999; Goto-Azuma and Koerner, 2001; Kawamura *et al.*, 2001; Iizuka *et al.*, 2018)。

グリーンランド以外では、ロシアが1970年代からスバルバルおよびロシア北極域のセベルナヤ・ゼムリヤやフランツ・ヨセフ・ランドでアイスコア研究を行っており (Fig. 3)、過去数百年の気温変動を復元した (Kotlyakov *et al.*, 2004) が、分析項目が限られていたことと、年代決定精度が低かったことにより、

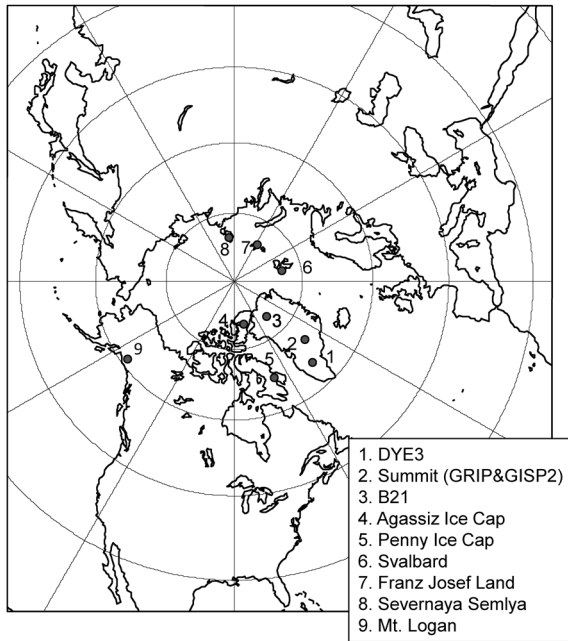


Fig. 3 Ice coring sites in the Arctic cited in this paper. For Greenland, only the sites shown in Fig. 7 are displayed.

あまり詳細な気候・環境変動の復元には至っていなかった。カナダも1970年代からカナダ北極群島でアイスコア研究を行っており、わずか100 m程度の厚さの氷の底部に氷期の氷が保存されていることや、完新世初期の温暖期に夏季の融解量が増加したこと、産業革命後の酸性物質濃度の変動などを明らかにした (Koerner, 1977; Koerner and Fisher, 1982; Koerner and Fisher, 1990; Fisher *et al.*, 1995)。しかし、1990年代中盤までは、北極域におけるアイスコア研究の中心はグリーンランドであり、グリーンランド以外のアイスコア研究はあまり注目されていなかった。

今は亡きカナダ地質調査所のイギリス人、ロイ・カーナー (Roy Koerner) は、グリーンランドと南極のアイスコアだけが注目されることに反発し、1990年代にグリーンランド以外の多地点でアイスコアを掘削して気候・環境変動の空間分布を研究することの必要性を強く主張した。カーナーの呼びかけにより、1990年代中盤にICAPP (Ice-Core Circum-Arctic Paleoclimate Program) という国際プロジェクトが立ち上がり、1990年代中盤から2000年代中盤にかけて各国が北極域のさまざまな場所でアイスコア掘削を精力的に行うこととなった (Fisher *et al.*, 1998; Yalcin and Wake, 2001; Wake *et al.*, 2002; Isaksson *et al.*, 2003; Yalcin *et al.*, 2003; Isaksson *et al.*, 2005a, 2005 b; Yalcin *et al.*, 2006; Winski *et al.*, 2017)。日

本はカナダと共同でカナダ北極域や、ユーコンのマウント・ローガンでアイスコア研究を実施した (Goto-Azuma *et al.*, 2002; Goto-Azuma *et al.*, 2003; Shiraiwa *et al.*, 2003)。また、ノルウェーとの共同によりスバルバルでアイスコア研究を実施し、1920年代の顕著な温暖化やスバルバルにおける酸性物質の変動史を解明した (Goto-Azuma *et al.*, 1995; Watanabe *et al.*, 2001; Matoba *et al.*, 2002)。また、アラスカでは日本が中心となってアイスコア研究を実施した (Yasunari *et al.*, 2007; Tsushima *et al.*, 2015; Sasaki *et al.*, 2016)。ノルウェーは最近、スイス等と協力してスバルバルでアイスコア研究を行っている (Osmond *et al.*, 2018)。しかし、スバルバルは夏季の融解量が多いため、アイスコアの年代決定の不確定性や融解による化学成分濃度の変化が問題になることが多々あり (たとえばIizuka *et al.*, 2002)、アイスコア・データの解釈には注意が必要である。

3. 最終氷期の急激な気候変動

3.1 グリーンランドのアイスコアから明らかになった急激な気候変動

Camp CenturyとDYE 3のアイスコアから、最終氷期が終わって完新世 (現在の間氷期) に移行する時代 (最終退氷期) に、グリーンランドでは温暖化の途中でヤンガー・ドリラス (以後YDと略) と呼ばれる一時的な寒冷期があったことがわかった (Fig. 2の四角で囲んだ時代, Alley, 2000; Dansgaard, 2005) が、DYE 3コアから、YD終了時に、わずか50年で7°Cも気温が上昇したと推定された (Dansgaard *et al.*, 1989)。この寒冷期はグリーンランドで掘削されたすべての深層アイスコアで見ついている。GRIPとGISP2のアイスコアから、グリーンランドではYDと同様の急激な気候変動が最終氷期から最終退氷期にかけて25回も発生し、寒冷期 (亜氷期) と温暖期 (亜間氷期) が交互に繰り返されていたことが明らかになった。その後、グリーンランドで掘削された深層アイスコアのすべてにこのような急激な気候変動が記録されていることが明らかになった (Fig. 2, Dansgaard *et al.*, 1982; Dansgaard *et al.*, 1989; Dansgaard and Oeschger, 1989; Johnsen *et al.*, 1992; Grootes *et al.*, 1993; Steffensen *et al.*, 2008, Rasmussen *et al.*, 2014)。この気候変動は発見者の名前にちなんでダンスガード・オシュガーイベント (Dansgaard-Oeschger events), 略してDOイベントと名

付けられたが、各DOイベントでは、600~2000年かけて8~15°Cの寒冷化が起こった後、亜間氷期の最寒期に達した。この最寒期が300~700年続いた後、1世紀あたり3~5°Cという非常に速い速度で亜間氷期に移った。このような速い速度で気候変動が生じることがわかったことで、社会に大きな衝撃を与えた。

YDを含むDOイベントが生じた原因は北大西洋の海洋の熱塩循環の変化にあると考えられている。温暖化の過程で北半球の氷床が融けたり、氷期の寒冷期に大きく拡大して不安定になった北半球の氷床が崩壊することで、大西洋に大量の淡水が流入し、北大西洋深層水の循環が一時的に停止したか弱まったことが寒冷化を招いたと考えられている (Rahmstorf, 1996; Ganopolski and Rahmstorf, 2001)。YDについては、氷期の終了に伴う温暖化で、北米大陸を覆っていたローレンタイド氷床が融解して五大湖周辺にアガシー湖という湖を形成し、この湖が突然決壊したことが、北大西洋への淡水流入の原因であるとする説が最も有力である (Kennett and Shackleton, 1975; Broecker *et al.*, 1988; Broecker, 1998; Broecker, 2006)。

分析技術の進歩により、CFA (Continuous Flow Analysis) と呼ばれる方法 (Röthlisberger *et al.*, 2000) によりアイスコアを融解しながら分析を行うことができるようになった結果、グリーンランドのアイスコアを、数万年という古い時代まで遡って季節単位や年単位で高時間分解能分析することが可能になった。NGRIP コアを従来になく高時間分解能で連続分析したところ、YD 付近の高時間分解能データから、更に衝撃的な事実が明らかになった (Steffensen *et al.*, 2008)。YD を挟む 15,500 年前~11,000 年前の時代に着目すると、NGRIP 地点の気温は 14,700 年前頃に上昇した後、11,700 年前頃に低下したが、12,900 年前頃、再び上昇した。14,700 年前頃と 11,700 年前頃の温暖化に少し先だち、まず鉍物ダスト降下量が減少し始めた。次に、グリーンランドの降水の起源となる海域の海水温が 1~3 年という短期間で 2~4 度も低下した。その後、グリーンランドの気温が、最初の温暖化の際にはわずか 3 年で、後の温暖化の際には 50~60 年で 10°C も上昇した。これほど急激な気候変動は、NGRIP コアの分析結果が出る前は予想もしていなかったものである。

NGRIP コアにおいて温暖化の際に見られた鉍物ダスト降下量の減少はグリーンランドに飛来する鉍物ダストの発生源であるアジアの砂漠が湿潤化したため

あると考えられ、降水の起源域となる海域の海水温の低下は水蒸気の起源となる海域が北に移動したためであると考えられる。これらの変化は、熱帯収束帯 (Inter Tropical Convergence Zone, 略して ITCZ) が北に移動して北半球の大気循環が変化したことが原因であると考えられているが、このように急激な気候・環境変動が生じたメカニズムの詳細は不明である。

3.2 グリーンランドと全球の気候変動のリンク

グリーンランド氷床コアから DO イベントが発見された後、北大西洋の海底コアでも同様の気候変動が見出され、DO イベントは北大西洋の気候変動イベントとして広く知られるようになった (Bond *et al.*, 1997)。更に、北大西洋だけでなく、中国の洞窟や日本海海底コアを初め、世界各地で DO イベントとリンクした気候・環境変動が生じていたこともわかった (多田, 1998; Wang *et al.*, 2001; Zhao *et al.*, 2003; Nagashima *et al.*, 2007)。南極の氷床コアでもグリーンランドで発生した 25 回の DO イベントのすべてに対応する温暖化イベントが見つかり、AIM (Antarctic Isotope Maximum) と名付けられた (EPICA community members, 2007)。DO イベントと AIM は海洋循環を通じて「バイポーラー・シーソー」と呼ばれるシーソー現象によってリンクしていたと考えられている (Broecker, 1991; Broecker, 1998; Stocker and Johnsen, 2003)。北大西洋深層水の循環が停止するか弱まると、北大西洋は南からの暖流が停止または弱まることで寒冷化し、南大洋は北への熱の流れが停止または弱まることで熱が奪われなくなるため温暖化する。海洋の熱塩循環を通じた南北の熱輸送は、南大洋と言う大きな熱の貯蔵庫を介在するため、グリーンランドが寒冷化するタイミングよりも南極が温暖化するタイミングは、1000~1500 年遅くなると考えられた (Stocker and Johnsen, 2003)。また、北大西洋に端を発する気候変動のシグナルが南極に達するまでにシグナルの振幅は小さくなり、変動の速度もゆっくりとしたものになる。グリーンランドの DO イベントに比べて南極の AIM イベントで気温変動の振幅と速度が小さかったのは、そのためだと考えられる。

日本の南極観測隊が南極のドームふじ観測拠点で掘削したアイスコアにも、AIM が記録されていた (Dome Fuji Ice Core Project members, 2017) (Fig. 4)。鉍物ダストの降下量は AIM の温暖期に減少し、寒冷期に増加していたが、これは南極に飛来する鉍物ダストの発生源である南米の乾燥域の環境が変化

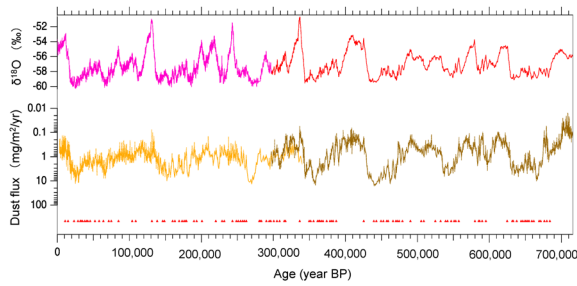


Fig. 4 (Color online) $\delta^{18}\text{O}$ and dust flux records at Dome Fuji, Antarctica (Dome Fuji Ice Core Project members, 2017). Dots at the bottom represent peak positions of warming events.

したことが原因で、その変化はITCZの移動によるものと考えられている。グリーンランドのアイスコアよりもはるかに古い、72万年前の時代まで遡ることができるドームふじコアの解析の結果、最終氷期だけでなく、ドームふじコアに記録されていた過去7回の氷期のすべてでDOイベントのような急激な気候変動が生じていたことが明らかになった。更に、ドームふじコアの解析結果と日本が開発した最新の大気・海洋・氷床結合モデルによる研究を組み合わせることで、現在のような間氷期（温暖期）でも、氷期の最寒期でもなく、氷期の中間期にこのような気候変動が発生しやすいことや、この時期に大気中の二酸化炭素濃度が低下したことで南極を含む地球全体が寒冷化し、深層循環が弱まりやすくなったことが重要であることが明らかになった (Dome Fuji Ice Core Project Members, 2017)。

最近では北大西洋に端を発する急激な気候変動が南極に伝搬するメカニズムの研究が更に進んでいる。火山噴火の後で南極氷床に堆積する硫酸エアロゾルが、アイスコアの中で硫酸濃度のピークあるいは電気伝導度や誘電率のピークとして検出されるが、これらのピークが異なる場所ではほぼ同時に形成されることを利用して、異なる地点で掘削されたアイスコアの年代を1年程度の精度で同期することができる (たとえば Fujita *et al.*, 2015)。アメリカと日本を含む国際研究チームがこの方法を用い、ドームふじを含む南極の5箇所掘削された深層アイスコアの年代軸を同期してAIMイベントの際の気温変化のタイミングを比較した。更にグリーンランドのアイスコアとも年代軸を同期して解析した結果、北大西洋で起こった急激な気候変動が、「大気」による数年スケールの迅速な伝搬と、「海洋」による約200年をかけたゆっくりとした伝搬という2つの経路によって、南極大陸へ伝搬していた

ことが初めて実証された (Buizert *et al.*, 2018)。

4. 完新世および最終間氷期の気候・環境変動

グリーンランドやカナダのアイスコアの酸素同位体比のデータから、完新世（現在の間氷期）は、最終氷期や退氷期と異なり、ごく限られた時代を除いて気候が安定していたことが示された。ところが、グリーンランドでは、氷床本体から独立して存在するレンランド氷帽 (Fig. 2) で掘削されたアイスコアのように、南極内陸部のアイスコアと同様、完新世初期から産業革命前の時代にかけて寒冷化傾向を示すコアがある一方で、Camp Century コアのように完新世初期から完新世中期にかけて温暖化傾向を示すアイスコアや、GRIP コアのように完新世を通じて気温変化が非常に小さいアイスコアがあり、完新世における気温の変化傾向が場所によって大きく異なっていた。一方、カーナーらの研究グループは、カナダ北極群島のエルズミア島のAgassiz氷帽 (Fig. 3) で掘削したアイスコアの解析結果がグリーンランド内陸部で掘削したアイスコアと異なり、完新世初期に最も温暖で、その後気温が低下する傾向があることを1990年代から学会等で度々指摘していた。カナダ地質調査所とコペンハーゲン大学の合同チームがエルズミア島のアイスコアとグリーンランドの複数のアイスコアを比較して検討した結果、エルズミア島やレンランドの氷帽は、地形的な制約から氷期にも拡大できず、最終氷期～完新世を通じて独立した氷帽として存在しており、ほぼ同じ標高を保っていたために、これらの氷帽で掘削したアイスコアが、同じ高度での気温の変化を記録していること、これに対してグリーンランド氷床では氷期・間氷期の気候変動に伴って氷床高度が大きく変化したため、グリーンランド氷床のアイスコア (DYE3, GRIP, NGRIP, Camp Century) のアイスコアが示す気温変動は、同一の高度における気温変化に加えて氷床高度の変化の影響があったことを示した (Vinther *et al.*, 2009)。更に、グリーンランド氷床上の4箇所 (DYE3, GRIP, NGRIP, Camp Century) のアイスコアが示す気温変動が、エルズミア島とレンランドのアイスコアから復元された真の気温変動に、氷床高度変化の影響を重ね合わせたものであると仮定して、グリーンランドの4箇所における氷床高度の変動を復元した。そして、グリーンランド氷床では完新世において沿岸に近いほど氷床高度の減少幅が大きかったことを明らかにした。カナダ北極域のアイスコアの研究成

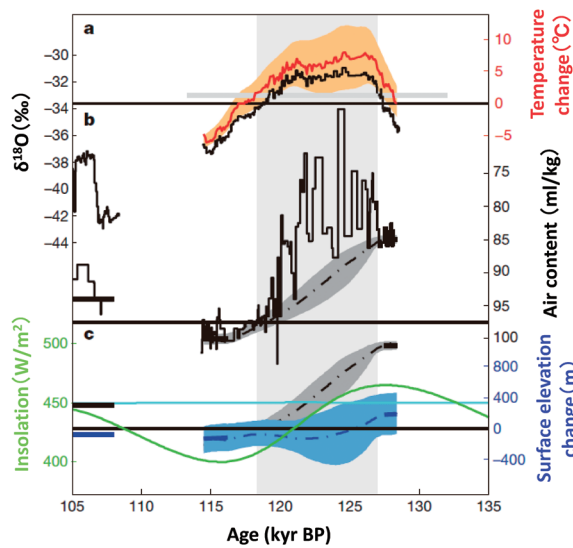


Fig. 5 Temperature and surface elevation changes during the Eemian interglacial reconstructed at NEEM, Greenland (NEEM community members, 2013).

果が、グリーンランドのアイスコアのデータ解釈にも新しい知見を与えたことは興味深い。

2章で述べたように、NEEMコアから最終間氷期全体の気候・環境を復元することができた。Fig. 5にNEEM地点における最終間氷期の気温と氷床高度の変動を示す (NEEM community members, 2013)。Fig. 5aの黒線は水の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) を、赤線は $\delta^{18}\text{O}$ から推定された気温を示す。気温は最近1000年の平均値からのずれとして表されている。Fig. 5bの実線は含有空気量のデータで、一点鎖線は氷床表面融解がない場合の推定値である。実際には氷床表面融解が生じていたため、含有空気量は一点鎖線からはずれて値が大きく低下している。Fig. 5cの青色の一点鎖線は、融解がない場合の含有空気量の推定値 (黒の一点鎖線) から日射量の変化 (緑色線) による影響と氷床流動の影響 (水色線) を差し引いて、氷床高度の変化を推定した結果である。氷床高度は現在からの差として示されている。

Fig. 5によると、北グリーンランドでは最終間氷期開始期の12万6千年前頃が最も温暖で、現在よりも気温が約 $8^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ 高かった。また、12万8千年前と12万2千年前の間の6000年間に氷床の厚さが 400 ± 250 m減少し、12万2千年前には氷床表面高度が現在よりも 130 ± 300 m低下していた。Fig. 5の薄い灰色で囲まれた部分 (11万8千年前~12万7千年前) は、氷床の表面が融解していた時代である。現在の北グ

リーンランド内陸部は夏でも融雪が生じることは非常に希であり、2012年の7月のようなグリーンランド氷床全域に及ぶ顕著な氷床表面の融解 (Nghiem *et al.*, 2012) は、過去百年以上生じていなかった。しかし、NEEMコアの分析結果から、最終間氷期には2012年7月のような氷床表面融解が頻繁に生じていたことがわかった。最終間氷期には含有空気量だけでなく、NEEMコアから抽出した空気希ガスの存在比 ($\delta\text{Kr}/\text{Ar}$, $\delta\text{Xe}/\text{Ar}$) やメタンガス濃度も極端に大きな値になっている部分があり、氷床表面が融解していたことを裏付ける強力な証拠である (NEEM community members, 2013)。

NEEMコアから推定された氷床表面高度の変化に基づいて計算すると、このように顕著な氷床表面融解が生じていたにも関わらず、最終間氷期におけるグリーンランド氷床の水の量は、最低でも現在の90%はあったと推定される。これは従来の推定値よりもはるかに大きい。最終間氷期には海水準が現在よりも4~8 m高かったと推定されているが、グリーンランド氷床の縮小だけではこれだけの海面上昇は説明できない。この結果は、最終間氷期に南極氷床が縮小し、海面上昇に大きく寄与していたことを示唆する (NEEM community members, 2013)。

NEEMコアのCFA分析の結果から、最終間氷期と完新世における北米大陸やアジアの砂漠の環境変動についての知見が得られた。Schüpbach *et al.* (2018) によると、北米の陸域植物起源と考えられている硝酸イオンの濃度は、最終間氷期の方が完新世よりも低かったが、同じく北米の陸域植物起源と考えられているアンモニウムイオンや、アジアの砂漠の鉱物ダストを起源とするカルシウムイオンの濃度は、両方の時代で違いがほとんど見られなかった。これらのエアロゾル成分の濃度はその発生源の強度だけでなく、発生源からグリーンランドまでの輸送とグリーンランドでの堆積過程の変化に依存するため、Schüpbach *et al.* (2018) はモデル計算により発生源強度の変化とそれ以外の効果を分離した。その結果、この3種のイオンの発生源の強度は完新世と最終間氷期で大きな変化がなかったことが示唆された。上述したようにグリーンランドでは最終間氷期の最温暖期は現代よりも $8^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ 温暖だったが、北極の温暖化増幅を考慮すると、COP21のパリ協定で議論されたように全球の平均気温の上昇を $1.5 \sim 2^{\circ}\text{C}$ に抑えることができた場合、北米、アジアやグリーンランド周辺の地域ではそれほど

顕著な環境変化が起きないことを示唆している。

5. 近年の気候・環境変動

これまで述べてきたのは人間活動とは無関係に自然に生じた気候変動であるが、本章では化石燃料の燃焼に伴う温室効果ガスの増加が原因となって生じた近年の温暖化や、人為起源物質による近年の大気環境の変化について述べる。気候変動には火山噴火の影響による数年スケールの寒冷化や、北極振動 (Arctic Oscillation)、北大西洋振動 (North Atlantic Oscillation)、太平洋十年規模振動 (Pacific Decadal Oscillation) などの数十年スケールの変動、DOイベントのような数百年～数千年スケールの変動が含まれるため、短期間だけのデータを見ても、人為起源と自然起源の気候変動を区別できない。人為起源の温暖化のシグナルを確実に見いだすには、産業革命以前の時代に遡って数百年～数千年間の気候変動の実態とそのメカニズムを把握する必要がある。

Kobashi *et al.* (2011, 2013, 2015) はアイスコアから抽出した空気に含まれるアルゴンと窒素の同位体比から過去の気温を復元する方法を開発し、グリーンランドのGISP2およびNGRIPにおいて、それぞれ過去4000年および2100年の気温を復元した。従来の水の安定同位体比から復元した気温は、降雪があった時の気温であり、冬よりも夏の降雪が卓越する地域が多いグリーンランドでは、夏の気温のバイアスが大きくなる。これに対してKobashi *et al.* (2011, 2013, 2015) の方法は空気の温度の復元になり、冬と夏のバイアスがないというメリットがあるが、水同位体比のように高時間分解能の分析をすることができない。両者を組み合わせることで、より正確な気温復元が可能となる。Kobashi *et al.* (2011, 2013, 2015) はこれらの方法でアイスコアから復元された過去の気温のデータを気象観測データや一次元エネルギーバランスモデルと組み合わせて詳細に解析し、さまざまな時間スケールでのグリーンランドの気温変動とその要因について考察した。変動の原因としては地球軌道の変動や温室効果ガス、火山、太陽活動が示唆された (Kobashi *et al.*, 2011, 2013, 2015)。1840年～2010年の170年間の10年平均気温に着目すると、グリーンランドでは1930年代～1950年代に温暖化し、その後、寒冷化に転じた後で再び温暖化し、直近の10年間は1930～1940年代の温暖期と同程度に温暖な時期であることがわかった (Kobashi *et al.*, 2011)。このように温暖

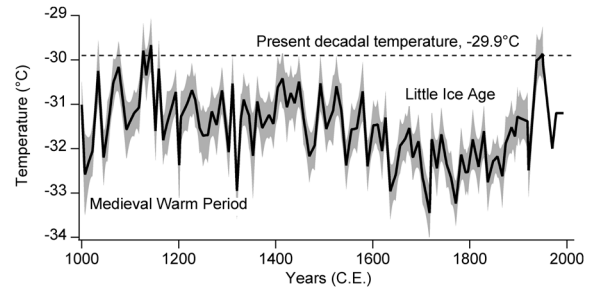


Fig. 6 Greenland snow surface temperatures reconstructed from the GISP2 core for the past 1000 years (Kobashi *et al.*, 2011). The line and band represent the reconstructed Greenland temperature and 1σ error, respectively.

な時期は過去1000年間を見ても中世温暖期の1140年代以外になかった (Fig. 6)。Kobashi *et al.* (2015) は更にグリーンランドの気温が太陽活動と連動して変化していることを見だし、1980年から1990年代中盤まで見られたグリーンランドおよび亜寒帯北大西洋の特異的な低温が、20世紀の中盤から後半にかけて起こった太陽活動の活発化によるものであると推定した。その原因は、太陽活動の増加に伴って北大西洋子午面循環が弱まり、大西洋の南から北への熱輸送が弱まったことで、グリーンランドを含む亜寒帯北大西洋が寒冷化したことであつたと考えられる。太陽活動の変化がグリーンランドの気温へ影響を及ぼすまでに数十年の遅れがあるため、現在太陽活動が弱くなっている影響が、2025年以降にグリーンランドの気温上昇として顕在化し、将来、人為起源の気温上昇と、太陽活動減少の影響でグリーンランドの気温が大きく上昇し、これまで考えられていたより早く氷床の融解が進む可能性が高いことが示唆された。

北極域のアイスコアから人為起源の大気汚染物質、たとえば酸性雨の原因となる硫酸や硝酸、北極の生態系に影響を及ぼす重金属や有機物など、さまざまな物質の歴史の変遷に関する研究が行われてきた (Koerner and Fisher, 1982; Holdsworth and Peake, 1985; Holdsworth *et al.*, 1988; Koerner *et al.*, 1999; Goto-Azuma and Koerner, 2001; Matoba *et al.*, 2002; Isaksson *et al.*, 2003; McConnell and Edwards, 2008; Ruggirello *et al.*, 2010; Iizuka *et al.*, 2018)。その中で硫酸は酸性雨の原因となるだけでなく、大気の放射強制力にも影響を及ぼすため多くの研究者の関心を集めてきた。Goto-Azuma and Koerner (2001) は北極域の多点のアイスコアから北極域広域における過去150年間の硫酸および硝酸の濃度変化のトレンド

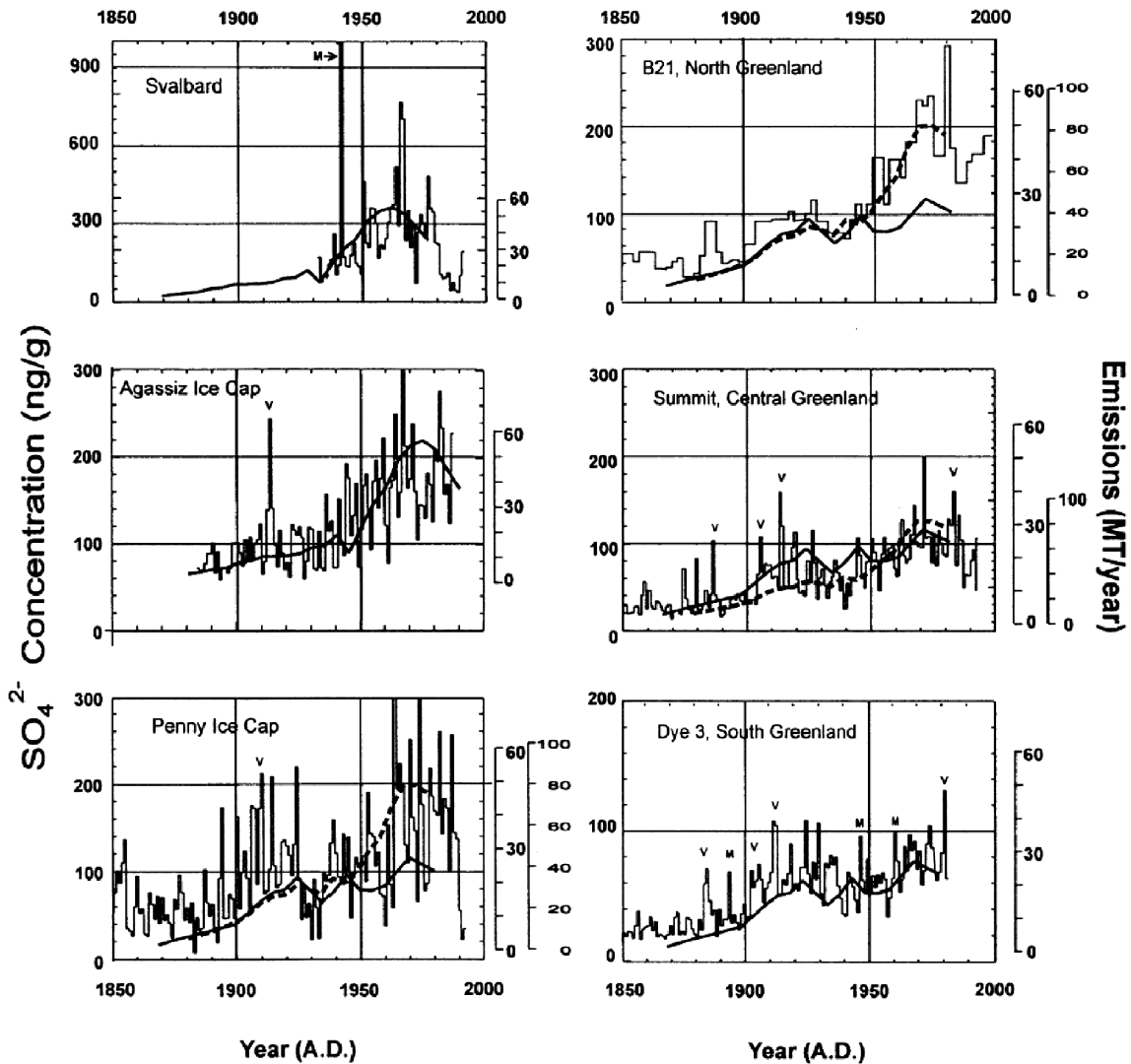


Fig. 7 Ice-core sulfate records from the Arctic and SO_2 emission records from the industrialized regions (Goto-Azuma and Koerner, 2001). The continuous curves are the Eurasian emission rates in the Agassiz Ice Cap and Svalbard diagrams and the North American emission rates in the other four diagrams. The dashed curves are the total (Eurasian plus North American) emission rates. The emission rate scales on the right-hand side of each diagram are scaled vertically to allow comparison with the concentration records. Where there are two such scales, the right-hand one refers to the total emission rate, and the left-hand one refers to the North American emission rate. Peaks marked with Vs and Ms are associated with volcanic eruptions and melt layers, respectively. The Penny Ice Cap record is not marked with Ms because there is too much melt to identify peaks solely due to melt concentration of the ions. Apart from the distinct peak in 1941, the same is true of the Svalbard record. Volcanic peaks in the B21 record have been removed from the raw data set (Fischer *et al.*, 1998a).

を明らかにした (Fig. 7)。北極域において人為起源の硫酸の濃度が19世紀末あるいは20世紀中盤に大きく増加し、自然起源の硫酸の濃度を超えること、濃度増加のトレンドには地域差があること、濃度が1970年代でピークとなった後、欧米先進国における法的規制によって減少したことがわかった。また、硫酸イオン濃度をその前駆物質である二酸化硫黄の排出インベントリーと比較することで、地域差の原因は、

ユーラシアの工業地帯の影響を強く受ける地域と、北米東部の工業地帯の影響を強く受ける地域があるためであると推定した。

レーザー誘起白熱法によるブラックカーボン分析技術の開発により、近年は北極のアイスコアに含まれる微量のブラックカーボンの分析が可能になった (McConnell *et al.*, 2007)。ブラックカーボンは放射強制力に影響を与えるだけでなく、雪氷表面に沈着すると

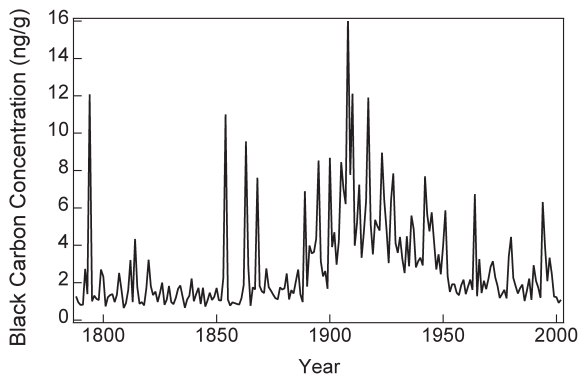


Fig. 8 Annual mean concentrations of black carbon reconstructed from a Greenland ice core (McConnell *et al.*, 2007).

アルベドを低下させて融雪を促進する効果がある (IPCC, 2013) ため、最近、注目を集めている。McConnell (2007) らはグリーンランドのアイスコアから過去約200年のブラックカーボン濃度を復元し (Fig. 8)、ブラックカーボンの濃度が19世紀後半から人間活動の影響で増加し、1910年前後に最大となり、その後減少し始めたこと、濃度の最大値は濃度増加が始まる前の時代の7倍にもなっていたこと、濃度の増加が主として冬期に起きていたこと、1950年頃には濃度が大きく減少していたことなどを明らかにし、人為起源のブラックカーボンが放射強制力に及ぼす影響を見積もった。

6. 今後の研究展望

上述したように、これまでのアイスコア掘削は、水平方向の水の流動ができるだけ小さい地点を選んで実施された (Fig. 1)。しかし、グリーンランド氷床からの水の流出を将来予測するには、氷の流動の歴史とメカニズムを研究することも重要である。そこで、現在進行中のグリーンランド深層掘削プロジェクト (East Greenland Ice Core Project, 略してEGRIPまたはEastGRIP) では、今までと視点を大きく変え、グリーンランド最大の氷流である北東グリーンランド氷流 (North East Greenland Ice Stream) の上流部に位置する、水平方向の流動速度が大きい地点で掘削を実施している。EGRIPで掘削されたアイスコアの物理解析および掘削孔の観測等により、氷の変形メカニズム、氷流の形成メカニズム、氷床流動メカニズムなど氷床ダイナミクスに関する理解が大きく前進することが期待される。日本もこのプロジェクトに参加しているが、西グリーンランドとは気候や地理的な条件

の異なる東グリーンランドで初の深層掘削ともなるため、氷床ダイナミクスに関する新しい知見だけでなく、気候・環境変動についても従来とは異なる研究成果が期待されている。また、従来のグリーンランドのアイスコアは、完新世初期の温暖期に対応する深さの水が、非常に割れやすい性質を持っているため、高時間分解能かつ高精度の化学分析データや気体分析データがほとんど取得されていなかった。EGRIPでは冷凍機と低温室を設置し、掘削直後の水を -25°C 以下に保ったり、コアの現場処理ラインにおける数十ミクロンの小さな段差をなくすことでアイスコアの破壊を極力抑える努力を行った。これにより、割れやすい深度帯からもCFA分析が可能なアイスコアが取得されており、今後、詳細な化学分析や気体分析のデータを取得できることが期待される。

アイスコアはサンプルの量が限られており、微量成分の分析が困難であったが、最近の分析技術の進歩により、従来分析できなかった微量成分の分析が可能になってきた。今後、さまざまな微量化学成分の濃度や同位体比などの分析が行われ、新しい環境情報が得られることが期待される。ブラックカーボンについては、以前は測定精度が低かったが、最近では日本の研究グループが開発した方法を用いて濃度だけでなく粒径分布も正確に測定できるようになり (Mori *et al.*, 2016)、SIGMAプロジェクトで掘削されたアイスコア (Matoba *et al.*, 2015) のCFA分析に応用され、現在筆者らの研究グループがデータ解析を進めている。ブラックカーボンと同じく、光吸収性エアロゾルの一種である鉍物ダストも最近脚光を浴び、しばらく行われていなかった分析法の開発にも再び着手されるようになり、鉍物ダスト粒子の濃度や粒径分布だけでなく粒子の形状にも着目されるようになった (Potenza *et al.*, 2016; Villa *et al.*, 2016; Simonsen *et al.*, 2018)。また、近年、北極域の海水が予測を大きく超える速度で減少していることから、過去の温暖期の海水復元による海水減少メカニズムの解明が重要な課題となっており、海底堆積物やアイスコアから過去の海水変動を復元するための指標に関心が集まっている。アイスコアでは最近、臭素やヨウ素から過去の海水面積を復元する試みが行われている (Spolaor *et al.*, 2016a, 2016b; Maselli *et al.*, 2017) が、これらは反応性が高い不安定な物質であることや、その生成量が海水面積だけに依存するとは限らないため、分析データの解釈には注意が必要であり、今後更にこれらの物質の濃度

と海水変動との関係を詳しく調べる必要がある。アイスコアに含まれる微生物や、そのDNAについての研究も開始されており、今後、新しい研究の展開が期待できる。

アイスコア分析に関する研究の方向性としては、新しい成分の分析法を開発する以外に、分析をより高時間分解能にすることも重要である。CFAを用いたDOイベントの高時間分解能分析は限られたDOイベントにしか適用されていないが、今後はより多数の化学成分について全DOイベントの高時間分解能分析を行い、急激な気候変動が生じる時間スケールとメカニズム、更に陸海域環境や生態系への影響を詳細に研究する必要がある。温暖化が更に進行すると地球の気候システムがティッピング・ポイント（たとえばLenton *et al.*, 2008）を超えるのではないかと危惧されているが、筆者らの研究グループはDOイベントが過去にティッピング・ポイントを実際に超えたイベントであると考えており、人間活動によって生じたのではないもの、ティッピング・ポイントを超える条件や変化の速度、さらに超えた際の環境への影響などを推定するためのヒントを与えてくれると期待している。

北極域の小さな氷河は融解が進行しており、過去にほとんど融解が生じなかったカナダ北極群島の氷河頂上付近でも融解が起きるようになってきている（Fisher *et al.*, 2012）。また、スバルバルのように以前から夏期に融解が発生していた場所では、アイスコアの化学成分に及ぼす融解の影響が益々増加している。このため、北極域の小さな氷河でのアイスコアの掘削が急務となっている。カナダ北極域、スバルバル、ロシアの氷河のアイスコアは1990年代までに掘削されたものが多く、それ以降の気候・環境変動の記録を取得するために、これらの地域で浅層コアを多数掘削する必要がある。同じ年代のコアでも現代の最先端の分析技術を用いることで、過去に得られなかった情報が得られることも期待できる。

アイスコアの分析研究だけでなく、アイスコアの分析データから気候・環境変動のメカニズムを解明し、アイスコアから得られた知見に基づいて高精度の将来予測を行うためには、氷床・海洋・気候の統合的モデル研究も重要である。日本ではアイスコアの研究コミュニティとモデル研究コミュニティの連携体制が整っており、特に南極ドームふじコアの研究では成果を上げている（Dome Fuji Ice Core Project Members, 2017）が、北極域における気候・環境変動の研

究においても一層連携を進める必要がある。

謝 辞

本特集号に執筆させていただく機会をいただいたことに深く感謝いたします。また、大変有益なコメントを下さった植村立先生他1名の査読者、丁寧な編集作業を行って下さった亀山宗彦先生と小畑元先生、引用文献の整理と図の作成を手伝って下さった塚川佳美氏に感謝の意を表します。本研究の一部は、北極域研究推進プロジェクト（ArCS）およびJSPS科研費18H04140の助成を受けたものです。

引用文献

- Alley, R. B. (2000) The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland. *Quaternary Science Reviews*, **19**, 213–226.
- Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I. and Bonani, G. (1997) A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic holocene and glacial climates. *Science*, **278**, 1257–1266, doi: 10.1126/science.278.5341.1257.
- Broecker, W. S. (1991) The great ocean conveyor. *Oceanography*, **4**, 79–89.
- Broecker, W. S. (1998) Paleocirculation during the last deglaciation: A bipolar seesaw? *Paleoceanography*, **13**, 119–121.
- Broecker, W. S. (2006) Was the Younger Dryas triggered by a flood? *Science*, **312**, 1146–1157.
- Broecker, W. S., Andree, M., Wolfli, W., Oeschger, H., Bonani, G., Kennett, J. and Peteet, D. (1988) The chronology of the last Deglaciation: Implications to the cause of the Younger Dryas Event. *Paleoceanography*, **3**(1), 1–19, doi:10.1029/PA003i001p00001.
- Buizert, C., Sigl, M., Severi, M., Markle, B. R., Wettstein, J. J., McConnell, J. R., Pedro, J. B., Sodemann, H., Goto-Azuma, K., Kawamura, K., Fujita, S., Motoyama, H., Hirabayashi, M., Uemura, R., Stenni, B., Parrenin, F., He, F., Fudge, T. J. and Steig, E. J. (2018) Abrupt ice-age shifts in southern westerly winds and Antarctic climate forced from the north. *Nature*, **563**, 681–685, doi: 10.1038/s41586-018-0727-5.
- Dansgaard, W. (1954) The O¹⁸ abundance in fresh water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **6**, 5/6, 241–260.
- Dansgaard, W. (2005) Frozen Annals—Greenland Ice Sheet Research. Niels Bohr Institute, Copenhagen, Denmark. http://www.iceandclimate.nbi.ku.dk/publications/frozen_annals/
- Dansgaard, W. and Oeschger, H. (1989) Past environmental long-term records from the Arctic. In: *The Environmental Record in Glaciers and Ice Sheets* (ed. H. Oeschger and C. C. Langway, Jr), John Wiley and Sons Limited, pp. 287–318.
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Møller, J. and Langway, C. C. (1969) One thousand centuries of climatic record

- from camp century on the Greenland ice sheet. *Science*, **166**, 377–380.
- Dansgaard, W., Clausen, H. B., Gunderstrup, N., Hammer, C. U., Johnsen, S. J., Kristindottir, P. M. and N. Reeh (1982) A new Greenland deep ice core. *Science*, **218**, 1273–1277.
- Dansgaard, W., White, J. W. C. and Johnsen, S. J. (1989) The abrupt termination of the Younger Dryas climate event. *Nature*, **339**, 532–534.
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahljensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjornsdottir, A. E., Jouzel, J. and Bond, G. (1993) Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, **364**, 218–220.
- Dome Fuji Ice Core Project Members (2017) State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling. *Science Advances*, **3**, e1600446, doi: 10.1126/sciadv.1600446.
- EPICA community members (2007) One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature*, **444**, 195–198.
- Fischer, H. (2001) Imprint of large-scale atmospheric transport patterns on sea-salt records in northern Greenland ice cores. *Journal of Geophysical Research*, **106**, D20, 23977–23984.
- Fischer, H., Wagenbach, D. and Kipfstuhl, J. (1998a) Sulfate and nitrate firn concentrations on the Greenland ice sheet-1. Large-scale geographical deposition changes. *Journal of Geophysical Research*, **103**, D17, 21927–21934.
- Fischer, H., Wagenbach, D. and Kipfstuhl, J. (1998b) Sulfate and nitrate firn concentrations on the Greenland ice sheet-2. Temporal anthropogenic deposition changes. *Journal of Geophysical Research*, **103**, D17, 21935–21942.
- Fisher, D. A., Koerner, R. M. and Reeh, N. (1995) Holocene climatic records from Agassiz Ice Cap, Ellesmere Island, NWT, Canada. *The Holocene*, **5**, 19–24.
- Fisher, D. A., Koerner, R. M., Bourgeois, J. C., Zielinski, G., Wake, C., Hammer, C. U., Clausen, H. B., Johnsen, S., Goto-Azuma, K., Hondoh, T., Blake, E. and Gerasimoff, M. (1998) Penny Ice Cap Cores, Baffin Island, Canada, and the Wisconsin Foxe Dome Connection: Two States of Hudson Bay Ice Cover. *Science*, **279**, 692–695.
- Fisher, D., Zheng, J., Burgess, D., Zdanowicz, C., Kinard, C., Sharp, M. and Bourgeois, J. (2012) Recent melt rates of Canadian arctic ice caps are the highest in four millennia. *Global and Planetary Change*, **84–85**, 3–7.
- 藤井理行・本山秀明編 (2011) アイスコア—地球環境のタイムカプセル—. 成山堂書店, 233 pp.
- Fujita, S., Parrenin, F., Severi, M., Motoyama, H. and Wolff, E. W. (2015) Volcanic synchronization of Dome Fuji and Dome C Antarctic deep ice cores over the past 216 kyr. *Climate of the Past*, **11**, 1395–1416, doi: 10.5194/cp-11-1395-2015.
- Ganopolski, A. and Rahmstorf, S. (2001) Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model. *Nature*, **409**, 153–158, doi: 10.1038/35051500.
- Goto-Azuma, K. and Koerner, R. M. (2001) Ice core studies of anthropogenic sulfate and nitrate trends in the Arctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **106**, D5, 4959–4969.
- Goto-Azuma, K., Kohshima, S., Kameda, T., Takahashi, S., Watanabe, O., Fujii, Y. and Hagen, J. O. (1995) An ice-core chemistry record from Snøfjellaonna, northwestern Spitsbergen. *Annals of Glaciology*, **21**, 213–218.
- Goto-Azuma, K., Koerner, R. M. and Fisher, D. A. (2002) An ice core record over the last two centuries from Penny Ice Cap, Baffin Island, Canada. *Annals of Glaciology*, **35**, 29–35.
- Goto-Azuma, K., Shiraiwa, T., Matoba, S., Segawa, T., Kanamori, S., Fujii, Y. and Yamasaki, T., (2003) An overview of the Japanese glaciological studies on Mt. Logan, Yukon Territory, Canada in 2002. *Bulletin of Glaciological Research*, **20**, 65–72.
- Greenland Ice-Core Project members (1993) Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature*, **364**, 203–207.
- Groote, P. M., Stuiver, M., White, J. W. C., Johnsen, S. J. and Jouzel, J. (1993) Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, **66**, 552–554.
- Holdsworth, G. and Peake, E. (1985) Acid content of snow from a mid-troposphere sampling site on Mount Logan, Yukon Territory, Canada. *Annals of Glaciology*, **7**, 153–160.
- Holdsworth, G., Krouse, H. R. and Peake, E. (1988) Trace-acid ion content of shallow snow and ice cores from mountain sites in western Canada. *Annals of Glaciology*, **10**, 57–62.
- Iizuka, Y., Igarashi, M., Kamiyama, K., Motoyama, H. and Watanabe, O. (2002) Ratios of Mg^{2+}/Na^{+} in snow-pack and an ice core at Austfonna ice cap, Svalbard, as an indicator of seasonal melting. *Journal of Glaciology*, **48**, 452–460, doi: 10.3189/172756502781831304.
- Iizuka, Y., Uemura, R., Fujita, K., Hattori, S., 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. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **123**, 574–589.
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Isaksson, E., Hermanson, M., Hicks, S., Igarashi, M., Kamiyama, K., Moore, J., Motoyama, H., Muir, D., Pohjola, V., Vaikmäe, R., van de Wal, R. S. W. and Watanabe, O. (2003) Ice cores from Svalbard—Useful archives of past climate and pollution history. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **28**, 1217–1228.

- Isaksson, E., Kohler, J., Pohjola, V., Moore, J., Igarashi, M., Karlöf, L., Martma, T., Meijer, H., Motoyama, H., Vaikmäe, R. and van de Wal, R. S. W. (2005a) Two ice-core $\delta^{18}\text{O}$ records from Svalbard illustrating climate and sea-ice variability over the last 400 years. *The Holocene*, **15**(4), 501–509, <https://doi.org/10.1191/0959683605hl820rp>.
- Isaksson, E., Divine, D., Kohler, J., Martma, T., Pohjola, V., Motoyama, H. and Watanabe, O. (2005b) Climate oscillations as recorded in Svalbard ice core $\delta^{18}\text{O}$ records between ad 1200 and 1997. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, **87**, 203–214.
- Johnsen S. J., Clausen, H. B., Dansgaard, W., Fuhrer, K., Gundestrup, N., Hammer, C. U., Iversen, P., Jouzel, J., Stauffer, B. and Steffensen, J. P. (1992) Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. *Nature*, **359**, 311–313.
- Kawamura, K., Yokoyama, K., Fujii, Y. and Watanabe, O. (1999) Implication of azealaic acid in a Greenland ice core for oceanic and atmospheric changes in high latitudes. *Geophysical Research Letters*, **26**, 871–874.
- Kawamura, K., Yokoyama, K., Fujii, Y. and Watanabe, O. (2001) A Greenland ice core record of low molecular weight dicarboxylic acids, ketocarboxylic acids, and α -dicarbonyls: A trend from little ice age to the present (1540 to 1989 A.D.). *Journal of Geophysical Research*, **106**, 1331–1345.
- 川村賢二 (2009) 氷床コアから探る第四紀後期の地球システム変動. 第四紀研究, **48** 109–129.
- Kennett, J. P. and Shackleton, N. J., (1975) Laurentide Ice Sheet meltwater recorded in Gulf of Mexico deep-sea cores. *Science*, **188**, 147–150.
- Kobashi, T., Kawamura, K., Severinghaus, J. P., Barnola, J.-M., Nakaegawa, T., Vinther, B. M., Johnsen, S. J. and Box, J. E. (2011) High variability of Greenland surface temperature over the past 4000 years estimated from trapped air in an ice core. *Geophysical Research Letters*, **38**, L21501, doi: 10.1029/2011gl049444.
- Kobashi, T., Goto-Azuma, K., Box, J. E., Gao, C.-C. and Nakaegawa, T. (2013) Causes of Greenland temperature variability over the past 4000 yr: Implications for northern hemispheric temperature change. *Climate of the Past*, **9**, 2299–2317.
- Kobashi, T., Box, J. E., Vinther, B. M., Goto-Azuma, K., Blunier, T., White, J. W. C., Nakaegawa, T. and Andresen, C. S. (2015) Modern solar maximum forced late twentieth century Greenland cooling. *Geophysical Research Letters*, **42**, 5992–5999, doi: 10.1002/2015GL064764.
- Koerner, R. M. (1977) Devon Island ice cap: Core stratigraphy and paleoclimate. *Nature*, **343**, 630–631.
- Koerner, R. M. and Fisher, D. (1982) Acid snow in the Canadian high Arctic. *Nature*, **295**, 137–140, doi: 10.1038/295137a0.
- Koerner, R. M. and Fisher, D. A. (1990) A record of Holocene summer climate from a Canadian high-Arctic ice core. *Nature*, **343**, 630–631, doi: 10.1038/343630a0.
- Koerner, R. M., Fisher, D. A. and Goto-Azuma, K. (1999) A 100 year record of ion chemistry from Agassiz Ice Cap Northern Ellesmere Island NWT, Canada. *Atmospheric Environment*, **33**, 347–357.
- Kotlyakov, V. M., Arkhipov, S. M., Henderson, K. A. and Nagornov, O. V. (2004) Deep drilling of glaciers in Eurasian Arctic as a source of paleoclimatic records. *Quaternary Science Reviews*, **23**, 1371–1390.
- Langway, Jr., C. C. (2008) The history of early polar ice cores. *Cold Regions Science and Technology*, **52**, 101–117.
- Lenton, T. M., Held, H., Krieger, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S. and Schellnhuber, H. J. (2008) Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**, 1786–1793.
- Maselli, O. J., Chellman, N. J., Grieman, M., Layman, L., McConnell, J. R., Pasteris, D., Rhodes, R. H., Saltzman, E. and Sigl, M. (2017) Sea ice and pollution-modulated changes in Greenland ice core methanesulfonate and bromine. *Climate of the Past*, **13**, 39–59, doi: 10.5194/cp-13-39-2017.
- Matoba, S., Narita, H., Motoyama, H., Kamiyama, K. and Watanabe, O. (2002) Ice core chemistry of Vestfonna Ice Cap in Svalbard, Norway. *Journal of Geophysical Research*, **107**, D23, 4721, doi: 10.1029/2002jd002205.
- 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. *Bulletin of Glaciological Research*, **33**, 7–14.
- McConnell, J. R. and Edwards, R. (2008) Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**, 12140–12144, doi: 10.1073/pnas.0803564105.
- McConnell, J. R., Edwards, R., Kok, G. L., Flanner, M. G., Zender, C. S., Saltzman, E. S., Banta, J. R., Pasteris, D. R., Carter, M. M. and Kahl, J. D. (2007) 20th-century industrial black carbon emissions altered Arctic climate forcing. *Science*, **317**, 1381–1384, doi: 10.1126/science.1144856.
- Mori, T., Moteki, N., Ohata, S., Koike, M., Goto-Azuma, K., Miyazaki, Y. and Kondo, Y. (2016) Improved technique for measuring the size distribution of black carbon particles in liquid water. *Aerosol Science and Technology*, **50**, 242–254, doi: 10.1080/02786826.2016.1147644.
- Mosley-Thompson, E., McConnell, J. R., Bales, R. C., Li, Z., Lin, P.-N., Steffen, K., Thompson, L. G., Edwards, R. and Bathke, D. (2001) Local to regional-scale variability of annual net accumulation on the Greenland ice sheet from PARCA cores. *Journal of Geophysical Research*, **106**(D24), 33839–33852.
- Nagashima, K., Tada, R., Matsui, H., Irino, T., Tani, A. and Toyoda, S. (2007) Orbital- and millennial-scale variations in Asian dust transport path to the Japan Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **247**, 144–161, doi: 10.1016/j.palaeo.2006.11.027.
- NEEM community members (2013) Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core.

- Nature*, **493**, 489–494.
- Nghiem, S. V., Hall, D. K., Mote, T. L., Tedesco, M., Albert, M. R., Keegan, K., Shuman, C. A., DiGirolamo, N. E. and Neumann, G. (2012) The extreme melt across the Greenland ice sheet in 2012. *Geophysical Research Letters*, **39**, L20502, doi: 10.1029/2012gl053611.
- North Greenland Ice Core Project members (2004) High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, **431**, 147–151.
- Oeschger, H. (1985) The contribution of ice core studies to the understanding of environmental processes. Greenland Ice Cores: Geophysics, Geochemistry, and the Environment. In: *Geophysical Monograph* (ed. C. C. Langway, Jr., H. Oeschger and W. Dansgaard), **33**, American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 9–17.
- Oeschger, H., Stauffer, B., Neftel, A., Schwander, J. and Zimbrunn, R. (1982) Atmospheric CO₂ content in the past deduced from ice-core analyses. *Annals of Glaciology*, **3**, 227–232.
- Osmont, D., Wendl, I. A., Schmidely, L., Sigl, M., Vega, C. P., Isaksson, E. and Schwikowski, M. (2018) An 800-year high-resolution black carbon ice core record from Lomonosovfonna, Svalbard. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **18**, 12777–12795, doi: 10.5194/acp-18-12777-2018.
- Potenza, M. A. C., Albani, S., Delmonte, B., Villa, S., Sanvito, T., Paroli, B., Pullia, A., Baccolo, G., Mahowald, N. and Maggi, V. (2016) Shape and size constraints on dust optical properties from the Dome C ice core, Antarctica. *Scientific Reports*, **6**, 28162, <https://doi.org/10.1038/srep28162>.
- Rahmstorf, S. (1996) On the freshwater forcing and transport of the Atlantic thermohaline circulation. *Climate Dynamics*, **12**, 799–811.
- Rasmussen, S. O. et al. (2014) A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quaternary Science Reviews*, **106**, 14–28.
- Rignot, E., Velicogna, I., van den Broeke, M. R., Monaghan, A. and Lenaerts, J. T. M. (2011) Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophysical Research Letters*, **38**, L05503, doi:10.1029/2011gl046583.
- Röthlisberger, R., Bigler, M., Hutterli, M., Sommer, S., Stauffer, B., Junghans, H. G. and Wagenbach, D. (2000) Technique for continuous high-resolution analysis of trace substances in firn and ice cores. *Environmental Science & Technology*, **34**, 338–342, doi: 10.1021/es9907055.
- Ruggirello, R. M., Hermanson, M. H., Isaksson, E., Teixeira, C., Forsström, S., Muir, D. C. G., Pohjola, V., van de Wal, R. and Meijer, H. A. J. (2010) Current use and legacy pesticide deposition to ice caps on Svalbard, Norway. *Journal of Geophysical Research*, **115**, D18308, doi:10.1029/2010jd014005.
- Sasaki, H., Matoba, S., Shiraiwa, T. and Benson, C. S. (2016) Temporal variation in iron flux deposition onto the northern North Pacific reconstructed from an ice core drilled at Mount Wrangell, Alaska. *SOLA*, **12**, 287–290.
- Schüpbach, S. et al. (2018) Greenland records of aerosol source and atmospheric lifetime changes from the Eemian to the Holocene. *Nature Communications*, **9**, 1476, doi: 10.1038/s41467-018-03924-3.
- Shiraiwa, T., Goto-Azuma, K., Matoba, S., Yamasaki, T., Segawa, T., Kanamori, S., Matsuo, K. and Fujii, Y. (2003) Ice core drilling at King Col, Mount Logan 2002. *Bulletin of Glaciological Research*, **20**, 57–63.
- Simonsen, M. F., Cremonesi, L., Baccolo, G., Bosch, S., Delmonte, B., Erhardt, T., Kjær, H. A., Potenza, M., Svensson, A. and Vallelonga, P. (2018) Particle shape accounts for instrumental discrepancy in ice core dust size distributions. *Climate of the Past*, **14**, 601–608, doi: 10.5194/cp-14-601-2018.
- Spolaor, A., Opel, T., McConnell, J. R., Maselli, O. J., Spreen, G., Varin, C., Kirchgeorg, T., Fritzsche, D., Saiz-Lopez, A. and Vallelonga, P. (2016a) Halogen-based reconstruction of Russian Arctic sea ice area from the Akademii Nauk ice core (Severnaya Zemlya). *The Cryosphere*, **10**, 245–256, doi: 10.5194/tc-10-245-2016.
- Spolaor, A., Vallelonga, P., Turetta, C., Maffezzoli, N., Cozzi, G., Gabrieli, J., Barbante, C., Goto-Azuma, K., Saiz-Lopez, A., Cuevas, C. A. and Dahl-Jensen, D. (2016b) Canadian Arctic sea ice reconstructed from bromine in the Greenland NEEM ice core. *Scientific Reports*, **6**, 33925, doi: 10.1038/srep33925.
- Steffensen, J. P. et al. (2008) High-resolution Greenland ice core data show abrupt climate change happens in few years. *Science*, **321**, 680–684, doi: 10.1126/science.1157707.
- Stocker, T. and Johnsen, S. (2003) A minimum thermodynamic model for the bipolar seesaw. *Paleoceanography*, **18**(4), 1087, doi: 10.1029/2003pa000920.
- 多田隆治 (1998) 数百年～数千年スケールの急激な気候変動—ダンスガード・サイクルに対する地球システムの応答—。地学雑誌, **107**, 218–233.
- Tsushima, A., Matoba, S., Shiraiwa, T., Okamoto, S., Sasaki, H., Solie, D. J. and Yoshikawa, K. (2015) Reconstruction of recent climate change in Alaska from the Aurora Peak ice core, central Alaska. *Climate of the Past*, **11**, 217–226.
- 植村立 (2007) 水の安定同位体比による古気温推定の研究—極域氷床コアからの数千年スケールの気候変動の復元—。第四紀研究, **46**, 147–164.
- Vallelonga, P. et al. (2014) Initial results from geophysical surveys and shallow coring of the Northeast Greenland Ice Stream (NEGIS). *The Cryosphere*, **8**, 1275–1287.
- Villa, S., Sanvito, T., Paroli, B., Pullia, A., Delmonte, B. and Potenza, M. A. C. (2016) Measuring shape and size of micrometric particles from the analysis of the forward scattered field. *Journal of Applied Physics*, **119**, 224901, <https://doi.org/10.1063/1.4953332>.
- Vinther, B. M., Buchardt, S. L., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Johnsen, S. J., Fisher, D. A., Koerner, R. M., Raynaud, D., Lipenkov, V., Andersen, K. K., Blunier,

- T., Rasmussen, S. O., Steffensen, J. P. and Svensson, A. M. (2009) Holocene thinning of the Greenland ice sheet. *Nature*, **461**, 385–388, doi: 10.1038/nature08355.
- Wake, C.P., Yalcin, K. and Gundestrup, N. S. (2002) The climate signal recorded in the oxygen-isotope, accumulation and major-ion time series from the Eclipse ice core, Yukon Territory, Canada. *Annals of Glaciology*, **35**, 416–422.
- Wang, Y. J., Cheng, H., Edwards, R. L., An, Z. S., Wu, J. Y., Shen, C. C. and Dorale, J. A. (2001) A high resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, **294**, 2345–2348.
- Watanabe, O., Motoyama, H., Igarashi, M., Kamiyama, K., Matoba, S., Goto-Azuma, K., Narita, H. and Kamada, T. (2001) Studies on climatic and environmental changes during the last few hundred years using ice cores from various sites in Nordaustlandet, Svalbard. *Memoir of National Institute of Polar Research, Special Issue*, **54**, 227–242.
- Winski, D., Osterberg, E., Ferris, D., Kreutz, K., Wake, C., Campbell, S., Hawley, R., Roy, S., Birkel, S., Introne, D. and Handley, M. (2017) Industrial-age doubling of snow accumulation in the Alaska Range linked to tropical ocean warming. *Scientific Reports*, **7**, 17869, doi: 10.1038/s41598-017-18022-5.
- Yalcin, K. and Wake, C. P. (2001) Anthropogenic signals recorded in an ice core from Eclipse Icefield, Yukon Territory, Canada. *Geophysical Research Letters*, **28**(23), 4487–4490.
- Yalcin, K., Wake, C. P. and Germani, M (2003) A 100-year record of North Pacific volcanism in an ice core from Eclipse Icefield, Yukon Territory, Canada. *Journal of Geophysical Research*, **108**(D1), 4012.
- Yalcin, K., Wake, C. P., Kreutz, K. J. and Whitlow, S. I. (2006) A 1000-yr record of forest fire activity from Eclipse Icefield, Yukon, Canada. *The Holocene*, **16**(2), 200–209.
- Yasunari, T. J., Shiraiwa, T., Kanamori, S., Fujii, Y., Igarashi, M., Yamazaki, K., Benson, C. S. and Hondoh, T. (2007) Intra-annual variations in atmospheric dust and tritium in the North Pacific region detected from an ice core from Mount Wrangell, Alaska. *Journal of Geophysical Research*, **112**, doi: 10.1029/2006jd008121.
- Zhao, J. X., Wang, Y. J., Collerson, K. D. and Gagan, M. K. (2003) Speleothem U-series of semi-synchronous climate oscillations during the last deglaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, **216**, 155–161.