

極域アイスコアに記録された地球環境変動

藤井 理 行*

Climate and Environment Signals Recorded in Polar Ice Sheets

Yoshiyuki FUJII*

Abstract

This paper describes past climate and environmental changes during the past 10^1 to 10^5 year time scale obtained by recent studies on ice cores from Arctic and Antarctica. Shallow ice cores from Greenland and Svalbard show clear North Atlantic Oscillation (NAO) signals and explosive volcanic activities in the Northern Hemisphere and the equatorial regions. A deep ice core drilled to 2503 m at Dome Fuji, Antarctica covers the past 320 ka, which includes 3 glacial-interglacial cycles with Milankovitch cycles of about 20, 40, and 100 ka. Major chemical compositions and microparticle flux show high concentrations in glacials and low concentrations in interglacials, suggesting changes in the terrestrial and marine environment and atmospheric circulation in high-middle latitudes during glacial-interglacial cycles. The Dome Fuji deep ice core contains 25 visible tephra layers. An analysis of the chemical compositions shows the possible source volcanoes in and around the Antarctica.

Key words : ice core, climate change, Antarctica, Arctic, Milankovitch cycles

キーワード : アイスコア, 気候変動, 南極, 北極, ミランコヴィチサイクル

I. 地球環境のタイムカプセル

南極氷床やグリーンランド氷床は、過去の地球環境を連続して保存するタイムカプセルである。氷床には、海洋、森林、砂漠、火山などを起源とするさまざまな物質が大気の循環によって運ばれ、雪と共に堆積する(図1)。氷床の内陸部では、雪は融けることなく年々積もって次第に氷になるが、その過程で空気も気泡として氷の中に取り込まれる。この氷に閉じ込められた空気からは、その当時の二酸化炭素など大気の組成を抽出することができる。また、降雪それ自身を構成する水分子は、水蒸気が凝結する時の気温を反映

した同位体組成を持つ。さらに、太陽活動の痕跡は、太陽磁場の消長に依存して生成される宇宙線生成核種として保存されている。このように、氷床は、地球の環境や気候のみならず太陽の活動をも連続して保存している優れた記録媒体と言える。

II. 氷床コア掘削

氷床コア掘削は、図2(藤井, 1993を改編)に示すように南極やグリーンランドの多くの場所で行なわれてきた。氷床コア掘削が精力的に行なわれてきている理由は、極域氷床が地球規模の気候や環境の変動を理解するのに優れたデータを提供す

* 国立極地研究所

* National Institute of Polar Research

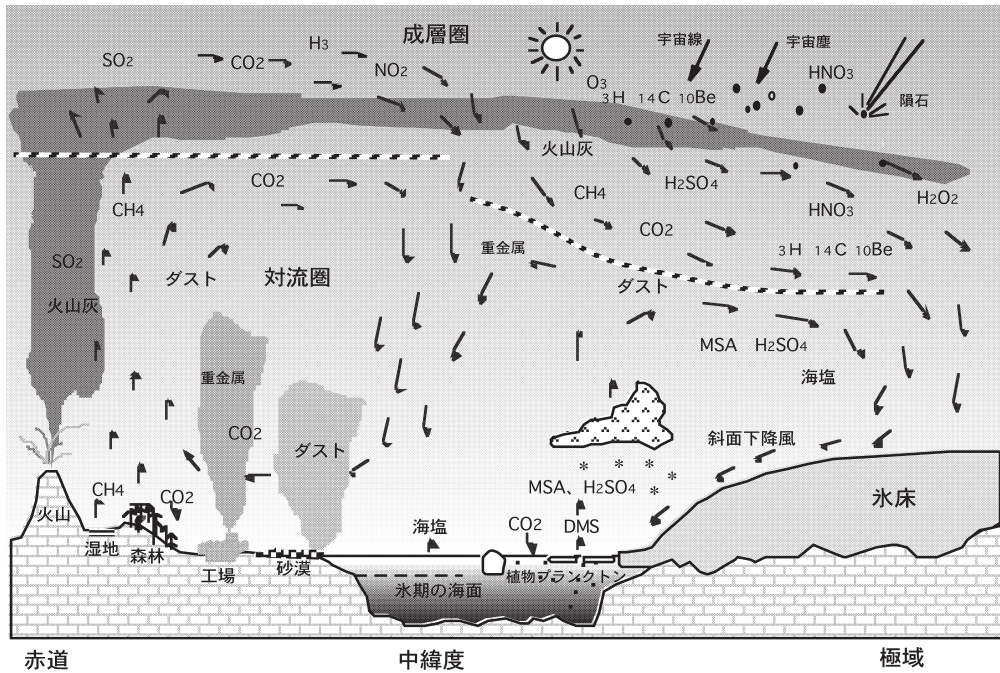


図 1 極域の水床へ輸送される様々な環境を起源とする物質。

Fig. 1 Environment signals transported from various sources to polar ice sheets.

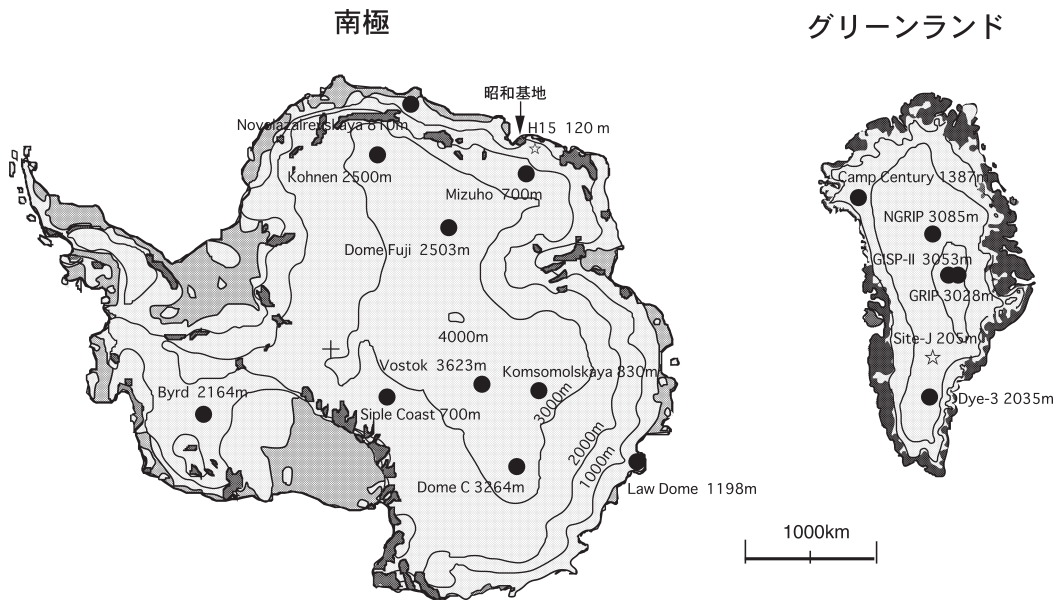


図 2 南極とグリーンランド氷床における主要なコア掘削地点とその深度（藤井, 1993 を改編）。

Fig. 2 Major ice core drilling sites and the drilled depth on the Antarctic and Greenland ice sheets.

るとともに、こうしたデータが将来の地球環境の予測に重要な手がかりをもたらしと考えられるからである。

氷床コアは、深さとともに年代が古くなる。しかし、深さと年代の関係は、積雪量や氷床の厚さなどで変わるため、場所によって異なる。南極やグリーンランドの氷床の年間積雪量は、沿岸部で1 m、内陸部で10 ~ 30 cmほどである。また、氷は自分の重みで塑性変形するので、深いところほど、氷の年層は薄くなる。氷床コアの年代は、およそ深さ10 mで数十年前、100 mで数百年前、1000 mで数万年、3000 mで10万年以上前となる。このため、研究の目的に応じて掘削の深さを決める。例えば、産業革命以降の環境変化を研究するには深さ100 ~ 200 mの掘削を、氷期-間氷期サイクルの地球規模の環境変動の研究には1000 m以上の掘削を行うことになる。

氷床コアは、柱状の氷の試料として地上からドリルによって掘り出される。掘り出す方法には、超硬合金の刃で削るメカニカル掘削方法と、リング状のヒータで氷を融かすサーマル掘削方法とがある。融解による掘削は、装置の構造はシンプルという利点があるが、熱をかけるために熱応力がかかり、氷の試料に細かなクラックを生じさせる欠点がある。このクラックは氷試料を汚染させるので、最近ではメカニカル掘削が主流となっている。氷の掘削に要する時間は、10 mの掘削で数時間、100 mで約1週間、1000 mで数カ月ほどである。1000 m以上の深い掘削になると、掘った穴の収縮が掘削に支障を及ぼすので、氷と同等の比重を持った不凍液で満たすと同時に、液圧に耐える密封型のドリルを使用する必要がある。

図3に、雪氷コア掘削ドリルの模式図を示す。ここに示した深層コア掘削ドリルは、国立極地研究所が南極ドームふじ深層コア掘削のために開発したドリルで、1回の掘削で4 m弱のコアが得られる。安定した掘削を可能にするさまざまな工夫がされており、世界で最も優れたドリルの1つである。

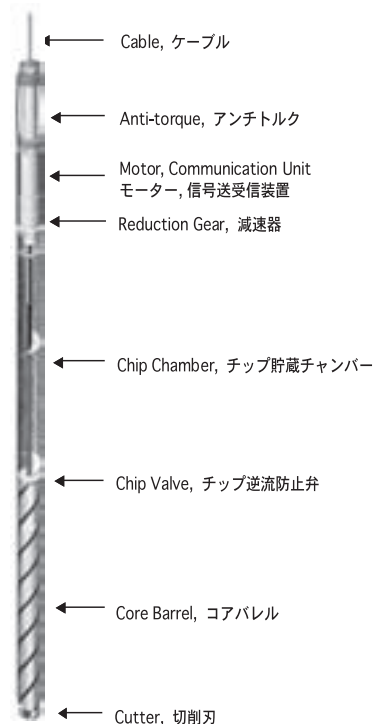


図3 氷床深層コア掘削ドリル。第二期ドーム計画で使用しているドリルで、1回の掘削で3.8 m長のコアが得られる。コアの直径は約10 cmである。ドリルの全長は13.3 m、外径は0.17 m。図の縦横比は、実際より直径方向を強調して示している。

Fig. 3 A deep ice core drill used at Dome Fuji, Antarctica.

III. 過去数百年の気候・環境変化

1) 気温変化

水分子を構成している酸素と水素の原子には、質量数が大きな原子(同位体)が含まれている。酸素には質量数が17と18の安定同位体が、また水素には質量数が2(D, 重水素)の安定同位体がある。このため、天然水では主要な水分子として $H_2^{16}O$ 、 $H_2^{18}O$ 、 $HD^{16}O$ が、99.768%、0.200%、0.032%の割合で存在する。この他の $HD^{18}O$ や $\delta_2^{18}O$ などの水分子は無視できるほどの量である。 ^{18}O やDなどの安定同位体が含まれる割合が気温と密接に関係していることを利用して、過去の気温を復元する。

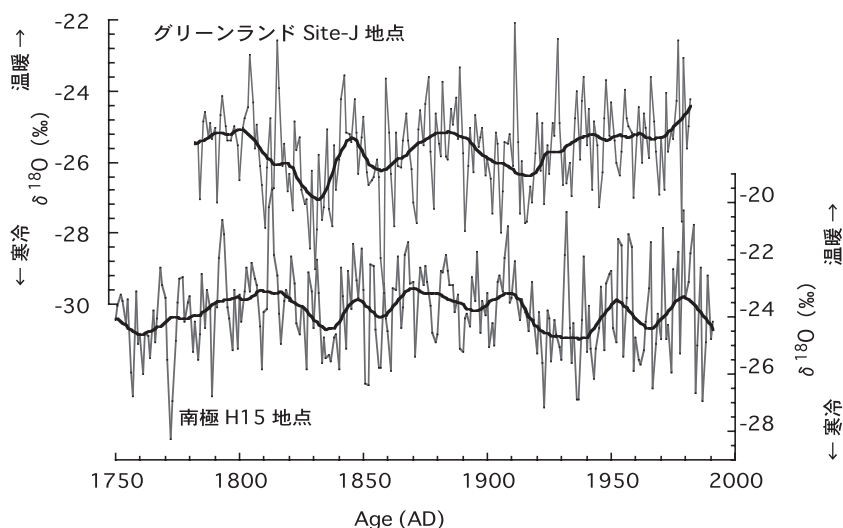


図 4 グリーンランド Site-J と南極みずほ高原 H15 (図 2 の 印) で掘削した浅層コア解析から復元した過去 250 年の気温 (酸素同位体組成) 変化 .

Fig. 4 Climate change reconstructed by the analyses of $\delta^{18}\text{O}$ of ice cores from Site-J, Greenland and H15, Antarctica during the past 250 years.

過去 200 ~ 250 年の気温の変化を、グリーンランド Site-J 地点 (標高 2050 m) と南極 H15 地点 (標高 1035 m) で掘削された浅層コアの酸素同位体組成として図 4 に示す。いずれも 2 年以下の変化をカットし 1 年毎のスプラインフィッティングで示してある。また、図中の太実線は加重帰帰曲線である。過去 200 年を比較すると、1800 年頃の温暖期、1830 ~ 40 年の寒冷期、1840 ~ 50 年の温暖期、1860 年頃の寒冷期は両極で共通している。1830 ~ 40 年の寒冷期は、北半球では北極カナダのデボン氷帽コア (Fisher and Koerner, 1994)、スバルバル諸島アウストフォンナ氷帽コア (Tarussov, 1992)、カナダのユーコン川流域の年輪 (Jacoby and Cook, 1981) などでも認められる。南北両極の過去数百年スケールの気温変動の同期性は十分研究されていないが、19 世紀においては、図 4 に示すように南極 H15 地点の酸素同位体組成のプロファイルは、弱いシグナルながらも北半球と同期した寒冷期の存在を示唆している。

19 世紀末以降の気温変化の傾向は異なる。グリーンランドでは、1870 ~ 80 年の温暖期の後

1910 ~ 20 年の寒冷期とその後の温暖化傾向という特徴が読み取れる。1915 ~ 20 年頃の気温の温暖化については、スバルバル諸島の複数地点の雪氷コアでも見られる (Watanabe *et al.*, 2001)。一方、南極の場合、1900 ~ 1910 年の温暖期、1920 ~ 1940 年の寒冷期、1950 年頃の温暖期、1960 ~ 70 年の寒冷期、1980 年頃の温暖期と 20 ~ 40 年の周期の気温変動があり、北極でのような今世紀初めからの温暖化傾向は認められない。

2) 北大西洋振動の復元

北大西洋のアゾレス高気圧とアイスランド低気圧間の気圧振動現象である北大西洋振動 (NAO) や極渦の気圧振動である北極振動 (AO) は、北極での数年スケールの気候変動モードとして近年注目されている。図 5 は、グリーンランド氷床南部の Site-J コアと、スバルバル諸島北東島のアウストフォンナ氷帽のコアの酸素同位体組成に見られる気温の変化を、過去 140 年間について示したものである。両地点の気温変化は、スバルバルが温暖 (寒冷) な時期にはグリーンランドが寒冷 (温暖) になる明瞭なシーソー振動を示し

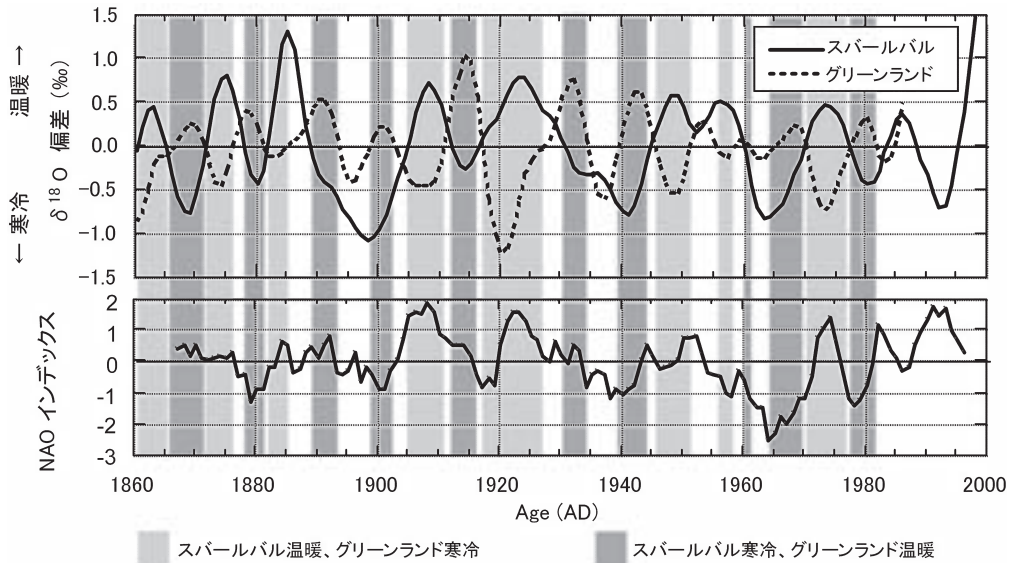


図 5 北極、グリーンランド Site-J とスバルバル諸島アウストフォンナ浅層コアの $\delta^{18}\text{O}$ の長期変動からの偏差が示す過去 140 年間のシーソー現象と冬期 12 ~ 2 月) の NAO インデックス。NAO インデックス (12 ~ 2 月) が高い時期には、スバルバルで高温、グリーンランドで低温になる。

Fig. 5 Anomalies of $\delta^{18}\text{O}$ of ice cores from Austfonna, Svalbard and Site-J, Greenland in the past 140 years. Masked parts indicate a negative correlation of the anomalies associated with the winter (Dec. to Feb.) North Atlantic Oscillation.

ている。この気温変化の傾向は、NAO インデックス (北大西洋における気圧の振動現象を示す指標で、アゾレス諸島とアイスランド間の月平均気圧の平年値からの差により表現される) と良く調和していることが分かる。すなわち、アイスランド低気圧が強化され NAO インデックスが高くなる時期には、スバルバルが温暖でグリーンランドが寒冷になる。これは、アイスランド低気圧の発達に伴い、スバルバルには暖気が南方から侵入し温暖化するが、グリーンランド南部では北方からの寒気の侵入により寒冷化することによる。

NAO は、Site-J とスバルバルのコアの酸性度 (pH) でも、気温のシーソー現象と同期した変動として明瞭に現れている。すなわち、NAO インデックスが高い時期には、スバルバルには汚染された大気が南方から流入し pH が低くなるが、グリーンランドでは北からのより清浄な大気が流れ込み pH が高くなる。

このように、グリーンランドとスバルバルのアイスコアの対比は、過去千年スケールでの北大西洋振動の復元の可能性を示すものである。

3) 産業革命以降の降水の酸性化

北極のアイスコアは、産業革命以降の人間活動による大気汚染の実態を明瞭に示している。18 世紀中頃からの産業革命以降、人間活動は大量にエネルギーを消費する社会となった。そのエネルギーの主要なものは石炭であったが、1950 年代以降、内燃機関の発達や自動車の普及により石油への依存度が急速に増大した。この結果、産業革命以降、北半球では北極圏でも降水の酸性化が進行した。

図 6 に、グリーンランドの Site-J 地点での 205 m コア (Fujii *et al.*, 2001) と、南極みずほ高原 H15 地点の 120 m コアの解析結果を示す。

グリーンランド Site-J では、pH は産業革命以降 1860 年頃から徐々に低下し始め、20 世紀に

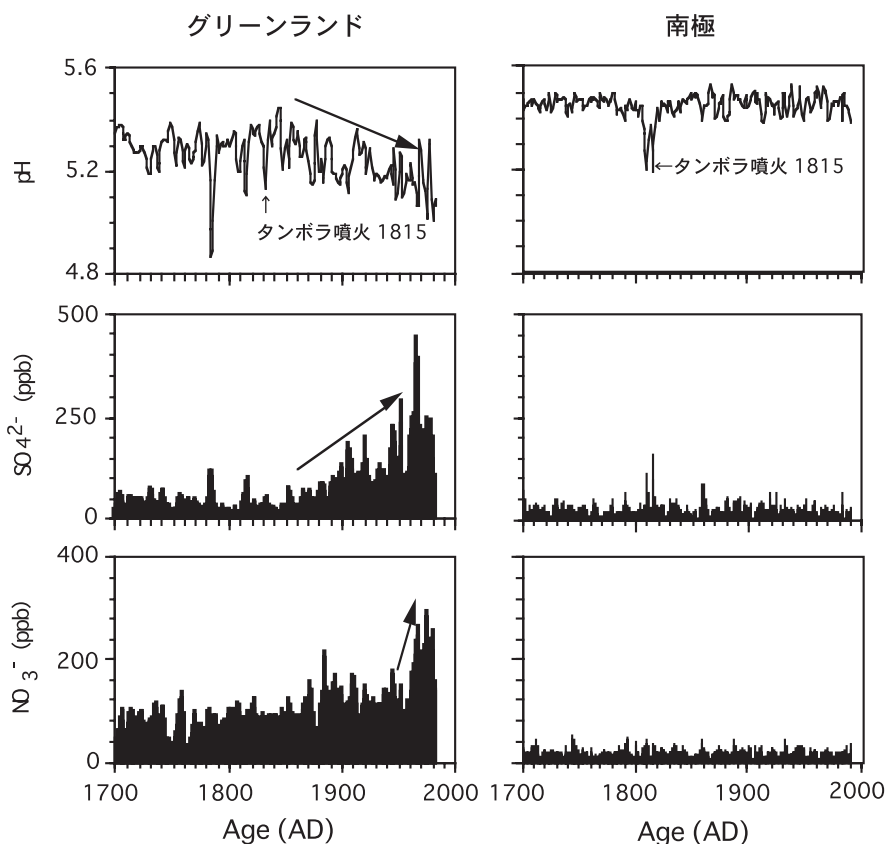


図 6 南極 H15 地点 (右) とグリーンランド Site-J (左) の浅層コアに記録された過去 300 年の pH, 非海塩性硫酸イオンと硝酸イオンの変化。

グリーンランドでは、1860 年頃からの降水の酸性化が明瞭である。これは、石炭の消費による硫酸イオンの増大と、また 1950 年頃からの石油の消費による硝酸イオンの増大による大気汚染を反映している。しかし、南極では産業革命以降の降水の酸性化は見られない。

Fig. 6 Time series of the past 300 years of acidity (pH), nss sulfate and nitrate recorded in ice cores from H15 site, Antarctica (right) and Site-J, Greenland (left), which shows acidification progress since ca.1860, 40 years earlier than previously reported.

入ると急激に酸性化が進行し 1970 年頃にピークに達した。酸性度は、産業革命以前のバックグラウンドレベルから 1.4 倍にも増加した。スバル諸島では、1.9 ~ 2.0 倍である。コアサンプルの化学主成分分析の結果は、硫酸イオンの増加が 1860 年頃から始まったことを示している。硫酸イオンの 19 世紀中ごろからの増大は、これまでのグリーンランドでのコア研究 (Mayewski *et al.*, 1990) により指摘されている 20 世紀初頭よ

り 40 年程早いものである。また、硝酸イオンが 1960 年代に急激に増加しているのは、石油消費の急激な増加によるものと考えられる (Fujii *et al.*, 2001)。

1860 年以降の石炭と石油の生産量の変化 (The Carbon Dioxide Information Analysis Center, 1990) と比べると、グリーンランドにおける硫酸イオンと硝酸イオンの増加は、それぞれ石炭と石油の消費 (生産) 量との関連性が高い。産業革

命以降の化石燃料の消費による大気汚染の北極圏への拡散を如実に示すものである。

一方、南極圏では産業革命以降の pH の顕著な低下（酸性度の増加）、硫酸イオンと硝酸イオン濃度の増加は認められず、北極と大きな相違を示している。1980 年以降の酸性化も自然のゆらぎの範囲であると言える。これは、南半球では人間活動が北半球に比べ限定されていること、南極を取り囲む暴風圏が天然のエアーカーテンになっていること、極渦の蛇行が小さく低緯度側からの大気が入りにくいこと、などの理由による。

4) 火山活動

大規模な火山活動は、高度 10 km 以上の成層圏にまで達する多量の灰やガスを噴出する。成層圏は大気が安定しており降水による除去はないので、こうした物質は重力の作用でゆっくり沈降しつつ 1 年ほどの時間をかけて極域へ流れていく。極域の高気圧圏に達すると、大気の沈降流により地上に運ばれる。亜硫酸ガスなどのガスは途中酸化され硫酸などの小さなエアロゾルになるが、重力沈降が大きな火山灰と比べ効率良く極域へ運ばれる。このようにして極地の氷床に輸送された火山起源の物質は、目に見える火山灰の層、あるいは目には見えないが硫酸などを多く含む層として雪とともに積もり、氷の中に記録される。

グリーンランド Site-J の過去 200 年分の氷の分析から得られた火山活動の記録 (Fujii *et al.*, 2001) を図 7 に示す。氷の電気伝導度を調べたものであるが、火山活動に伴い堆積した酸が高い電気伝導度として現れている。1960 年頃からの高い電気伝導度は、火山活動によるものではなく大気汚染、すなわち化石燃料、特に石油の多量消費で放出された硫酸による。過去 200 年、グリーンランド氷床にその痕跡を残している火山活動は、アイスランド、アラスカ、カムチャッカ半島などの火山の他、日本の火山としては桜島 (1914 年)、磐梯山 (1888 年)、北海道駒ヶ岳 (1856 年)、有珠山 (1822 年) などである。

南極 H15 地点の pH と電気伝導度のプロファイルから判定された火山噴火シグナル (Kohno and Fujii, 2002) と比べると以下のような事が明

らかとなった。過去 200 年、北極と南極の氷床コアで検出される火山噴火シグナルは、エルチチョン (メキシコ, 1982 年)、サンタマリア (ガテマラ, 1902 年)、クラカトア (インドネシア, 1883 年)、コシグウイナ (ニカラグア, 1835 年)、タンボラ (インドネシア, 1815 年) で、いずれも赤道付近の低緯度地域の火山で火山爆発指数 (VEI; Volcanic Explosiveity Index: Simkin and Sibert, 1994) が 5 (噴煙柱高度が 25 km 以上の噴火) 以上の巨大噴火と分類される大規模火山噴火である。

過去 200 年の火山噴火で両極のコアで最も大きなシグナルとして現れるのは、1815 年のインドネシアのタンボラ火山噴火である。この噴火は、過去 1000 年で最大と言われる大噴火で、9 万 2 千人もの犠牲者を出した他、成層圏に噴き上げられた多量のダストは、5 ~ 6 年にわたり地球を覆い、翌 1816 年は「夏のない年」と呼ばれるなど、地球上各地で異常気象を誘発した (ストンメル・ストンメル, 1985)。

IV . 過去数千年の変化

最後の氷期 (ウィスコンシン氷期などと呼ばれている) の終焉後現在に至る過去 1 万年は、完新世と呼ばれる。図 8 は、北極ではカナダのエルズミア島のアガシー氷帽 (Fisher *et al.*, 1995) とグリーンランド氷床 GRIP 地点 (Dansgaard *et al.*, 1993)、南極ではドーム C (Lorius *et al.*, 1979)、ポストーク (Jouzel *et al.*, 1987)、ドームふじのコア解析から求められた気温の変化を、酸素あるいは水素の安定同位体組成の変化として示したものである。図の縦軸の目盛の範囲は、酸素同位体組成の場合 6‰、水素同位体組成では $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + D$ の関係を考慮し酸素同位体組成の軸長に近い 50‰ をとっている。

北極カナダのアガシー氷帽では、8000 年ほど前に最温暖期がありその後緩やかな寒冷化が続いており、コア中の融解氷層の分布と良い一致を示す (Fisher *et al.*, 1998)。また、150 年程前からの温暖化傾向も読み取れる。この長期トレンドは、完新世初めには氷帽が現在より 130 m 程高

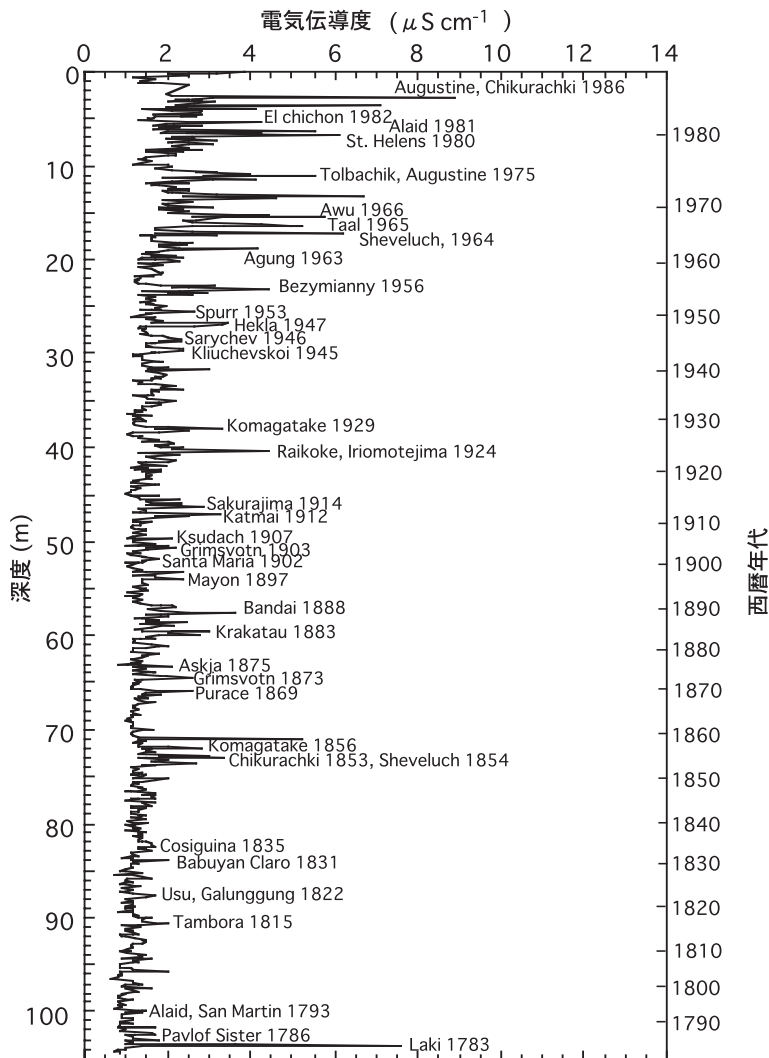


図 7 グリーンランド Site-J コアの電気伝導度が示す過去 220 年の火山噴火。

これらは、赤道地域および北半球における火山爆発指数 4 以上の火山噴火である。(Fujii *et al.*, 2001)

Fig. 7 Distinct peaks of electrical conductivity of an ice core from Site-J, Greenland during the past 220 years.

They are closely associated with explosive volcanic eruptions with VEI larger than 4 in the equatorial region and the Northern Hemisphere. (Fujii *et al.*, 2001)

かったことによる可能性がある。また、グリーンランド中央部の GRIP 地点では、8210 ± 30 年前の寒冷なピーク (Dansgaard *et al.*, 1993) を除き過去 1 万年間、極めて安定な気候が継続した。

約 8200 年前の寒冷化はグリーンランドで 4 ~ 8 (Bond *et al.*, 1992)、北大西洋では 1.5 ~ 3 (Marshall and Clarke, 1997) の寒冷化に当たり、氷期に北米大陸を覆っていたローレンタイド

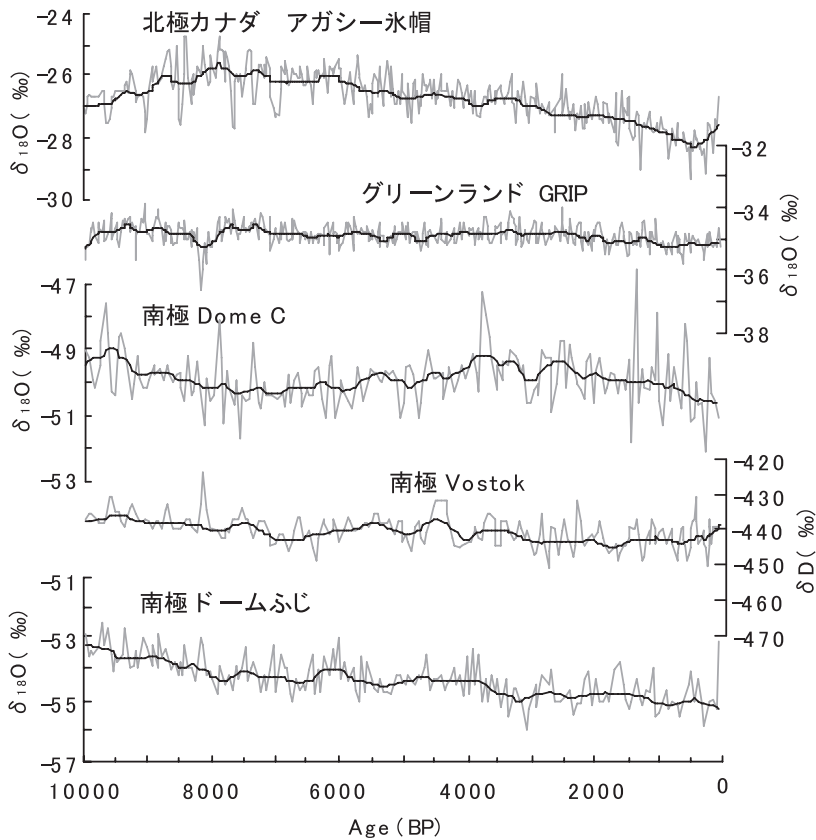


図 8 両極の雪氷コアから復元された酸素または水素同位体が示す過去 1 万年の気温変化。比較のため縦軸は同一スケールで示してある。

Fig. 8 Past 10 k-year climate changes shown by $\delta^{18}\text{O}$ or δD of various ice cores from the Arctic and the Antarctic.

氷床の縮小過程で東西に分離し、この氷床南に発達していたアガシー湖とオジブウェイ湖の湖水が分離した氷床間をハドソン湾に突如流れ込んだ為に引き起こされたと考えられている (Barber *et al.*, 1999)。

南極ドーム C コアの酸素同位体組成は、9 千年程前の完新世の最暖期の後に寒冷化が進行し 6 ~ 8 千年前の寒冷期が出現、その後緩やかな温暖化が起り 2500 年と 1000 年程前を中心とした温暖期が継続したことを物語っている。ポストークコアは、完新世初頭に温暖ピークを示しその後緩やかな寒冷化が継続したことを示している。

両極の氷コアが示す過去 1 万年の気温変化を

概観したが、共通して以下のようなことが言える。1) 気温の短期の変動振幅は、酸素同位体で 1‰、水素同位体で 10‰程度で、気温に換算 (Robin, 1983) すると 1 ~ 2 程度と小さい。2) 北半球の中緯度帯で広く知られている完新世中期 (5000 ~ 6000 年前) の温暖期 (Hypsithermalあるいは Climatic Optimum などと呼ばれる) は、極域では明瞭ではない。

V. 氷期サイクルにおける気候と環境の変化

1) ドーム計画

「南極ドーム計画」は、南極氷床の頂上で氷床深層掘削により過去数十万年の地球環境のタイム

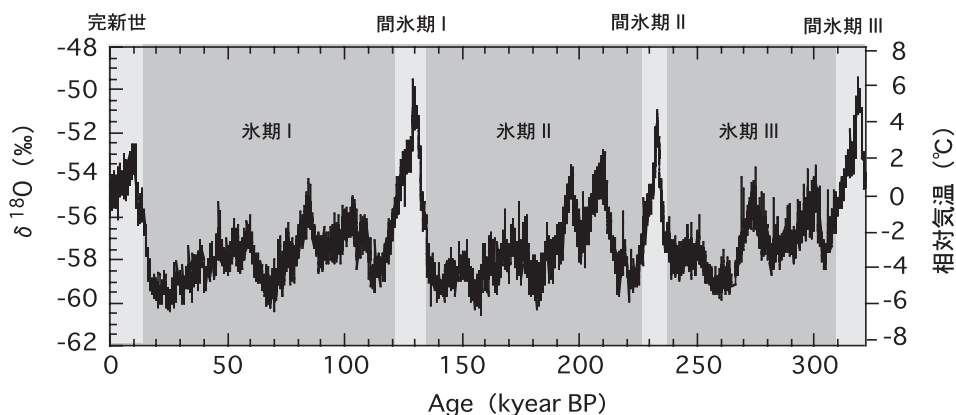


図 9 南極ドームふじ氷床深層コアの酸素同位体組成が示す過去 32 万年の気温変化。氷期を濃いグレーで示している。

Fig. 9 Past 320 k-year climate change shown by $\delta^{18}\text{O}$ of a deep ice core from Dome Fuji, Antarctica. The glacial periods are masked in dark grey.

カプセルを取り出す計画（渡邊，1994）で、さまざまな準備を経て 1995 年から 1996 年にかけて実施された。氷床深層掘削のために、南極観測隊は、昭和基地から 1000 km 南の氷床頂上（標高 3810 m）に基地を作り、ドームふじ基地と命名した。ここでは 9 名が越冬し、最新鋭のドリルを用いて 2 年がかりでボーリングを行い、1996 年 12 月に 2503 m の深さまでの氷の採取に成功した（藤井ほか，1999）。2003 年 /2004 年の南極の夏シーズンから、3000 m の氷床全層を掘削する第二期ドーム計画を開始した。この計画では、約 80 万年前の地球磁場反転期（ブリューヌ・松山反転）を含む過去 100 万年にわたる地球の気候・環境および太陽活動を復元する。

ドームふじ深層コアの分析は、国立極地研究所をはじめさまざまな大学、研究機関で進められている。これまでの研究の結果により、このコアが過去 32 万年にわたること、そしてその 32 万年間の地球の気候や環境の変化などが次第に明らかとなってきた。

2) 気温変化

過去の気温の復元には、氷を構成する酸素あるいは水素の安定同位体の量比が気温に依存する関係を利用する。図 9 は、酸素同位体比の変化に基づく、過去 32 万年間の気温の変化を示してい

る（Watanabe *et al.*, 2003）。この結果は、現在より 8 ~ 10 低い気候が約 10 万年間続いた氷期と、現在に近い温暖な気候が約 1 万数千年間続いた間氷期が、繰り返し起こっていたことを明瞭に示している。万年スケールの気温変化は、各氷期サイクルで共通して認められる。卓越した周期は、2 万年、4 万年、10 万年で、これはそれぞれ、ミランコヴィチサイクル（柏谷ほか，1992）として知られる地球自転軸の歳差運動周期、地球自転軸の傾斜角の変動周期、地球公転軌道周期に一致する周期（Satow *et al.*, 2004）である。

しかし、類似した変動周期を持つにもかかわらず、変動の振幅は次のように異なることも明らかとなった。氷期から間氷期にかけての気温の変化はいずれの場合も約 8 ~ 10 と大きく変わることはない。しかし、最終氷期以降の最暖期（完新世）の気温は二つ前の間氷期（間氷期 II）の気温に近いが、スーパー間氷期と呼ばれる一つ前の間氷期 I および三つ前の間氷期 III と比べて約 2 低い。また、氷期における気温変動は、最終氷期（氷期 I）と氷期 III では約 4 であるのに対し、氷期 II では 6 以上と大きい。氷期サイクルにおける気温変化は、これを引き起こす特別な変動機構が働いたことを示唆するものである。

3 回の氷期サイクルにおける気温変動は、前

述のミランコヴィチサイクルと一致した10万年、4万年、2万年の周期を持つ (Satow *et al.*, 2004)。ミランコヴィチサイクルは、地球が太陽から受ける日射量の変化に起因するものであるが、日射量の変化のみでは、氷期-間氷期といった8~10もの大きな気温変化は起きない。このため、数値シミュレーションによる古気候モデル研究の多くは、この10万年周期発現機構の解明に焦点をあてていると言っても過言ではない (福山, 1992)。

このため10万年周期の氷期サイクルの発現には、地球規模の気候変動を加速する何らかの正のフィードバック機構が働いていると考えられる。その一つとして、寒冷化 氷床の発達 海面低下 大陸棚の露出・乾燥域の拡大 大気中のダスト濃度の増加 海洋植物プランクトンへの栄養塩・鉄の供給増大 植物プランクトン繁殖 大気中の二酸化炭素の吸収 温室効果の減少 寒冷化の促進、といったシナリオが提案されている。これは、地球規模の気候変化を起こす正のフィードバック機構の一つのシナリオ (Eppley and Peterson, 1979; Martin, 1990) で、「生物学的ポンプ」と呼ばれるが、このプロセスについては不明な点が多い。

この極めて周期的な気候の変化から類推すると、現在は1万数千年続く暖かい時期の半ば、しかも最暖期を過ぎ次の氷期に向かっている時期である。しかし、現在は人類が化石燃料を多量に消費するため、温室効果ガスである二酸化炭素が増え続け、気候の温暖化が懸念されている。こういった地球のもつ長いリズムによる寒冷化と急激な温暖化の問題は、地球の気候の将来予測のためにも、現在の地球科学にとって最大の研究課題の一つといえる。

3) 陸域環境変動

コアの溶存イオン中のカルシウムイオンと固体微粒子濃度は、陸域環境変化の指標となる。カルシウムイオン濃度はイオンクロマトグラフで、また直径0.5 μm 以上の固体微粒子濃度はレーザーパーティクルカウンターにより分析した (Fujii *et al.*, 2003)。この結果、カルシウムイオンと固

体微粒子濃度は、約10万年間続く氷期の進行とともに増大し、氷期末期には現在 (間氷期) の5倍から10倍の量に達していたことが明らかとなった (図10)。また、氷期においては、亜氷期 (特に寒冷な時期) に増大、亜間氷期 (特に温暖な時期) に減少することも明らかとなった。この理由として、氷期は気候が乾燥し、かつ大気の南北循環が強かったこと、があげられる。この2点に加え、北半球での大規模な氷床の発達により地球規模で海面が最大120mも低下し、それに伴って南米南部の大陸棚がパタゴニア沖500kmのフォークランド諸島まで干上がり、広大なダスト供給地となったことが重要である。

4) 海域環境変動

海域環境変化を探るため、海洋を主要な起源とするナトリウム、塩化物各イオン、メタンスルホン酸のイオンクロマトグラフによる分析を進めた。ナトリウムと塩化物各イオンは、主に海塩として海から大気に供給されたもので、いずれも、氷期の進行とともに増大、間氷期に減少という傾向を示した。氷期においては、亜氷期に増大、亜間氷期に減少することが明らかとなった (図10)。しかし、塩化物イオンに対するナトリウムイオンの量比は、氷期には海水に近いが、間氷期には大きな値となる。これは、南極周辺の海洋から南極氷床内陸部に輸送される過程での化学反応が起きたこと原因と考えられる。メタンスルホン酸 (MSA) は、海洋中の生物プランクトン起源のジメチルサルファイド (DMS) の酸化によって形成される物質で、海洋の一次生産の指標になると考えられる。MSA濃度は、気温が低く一次生産も低くなると考えられる氷期に高濃度を示す。このことは、海洋の一次生産が栄養塩としての陸域起源ダストなどに規定されていることを示唆するものである。

5) 火山活動

ドームふじ氷床コアでは、肉眼で確認できる25層の火山灰層と、1991年のフィリピンのピナツボ火山噴火をはるかに超える規模の噴火による200以上もの火山性硫酸層を見出した (Fujii *et al.*, 1999)。この25層の火山灰層は、図11に

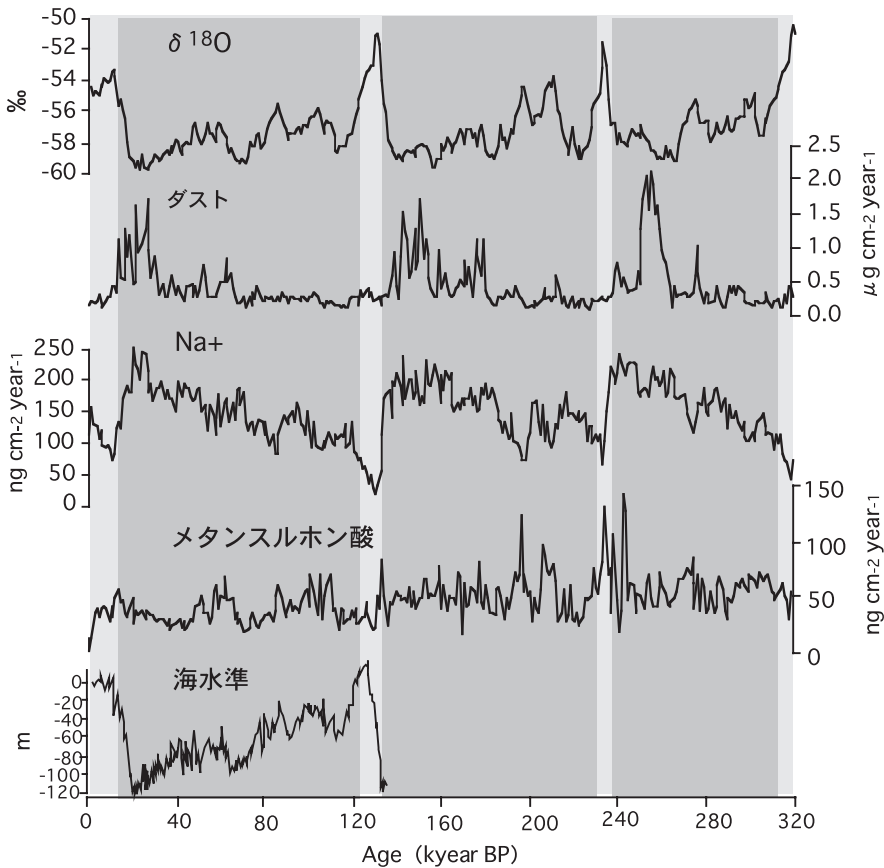


図 10 ドームふじコアが示す過去 32 万年の気温 ($\delta^{18}\text{O}$) と、陸域起源物質 (ダスト)、海塩起源物質 (Na^+)、海洋プランクトン起源物質 (MSA) のフラックス、および過去 14 万年の海水準 (Shackleton, 1987) の変化。氷期を灰色でマスクしてある。

Fig. 10 Past 320 k-year records of $\delta^{18}\text{O}$ and flux of dust, Na^+ and MSA recorded in a deep ice core from Dome Fuji, Antarctica. Sea-level change after Shackleton (1987) is shown in the bottom of the figure.

示すように粒径が数十マイクロンと大きく、また、その主要化学組成から、南極あるいはその周辺のサウスサンドウィッチ諸島などの火山を噴出源とすることが明らかとなった (Kohno *et al.*, 2005)。注目すべきは、これらの多くは氷期の、しかもその寒冷な時期に堆積しており、寒冷期に南極あるいはその周辺の火山活動が活発であったことである。このことは、氷期の寒冷期に、南極氷床が厚くなり、その地殻への圧力増大が火山活動を誘発した、すなわち気候の変化が火山活動を

誘発したことを示唆する。

VI. おわりに

氷床コアの研究により、過去数百年から氷期スケールにいたる地球規模の気候や環境の変動が明らかになってきた。

将来の気候を予測することは、地球科学の重要な課題であるが、数値シミュレーションの結果が研究グループによって大きくばらつくこと (気象庁, 1996) から、極めて困難な課題でもある。

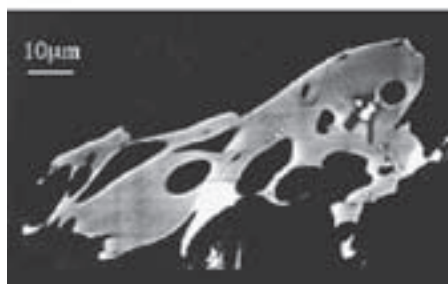
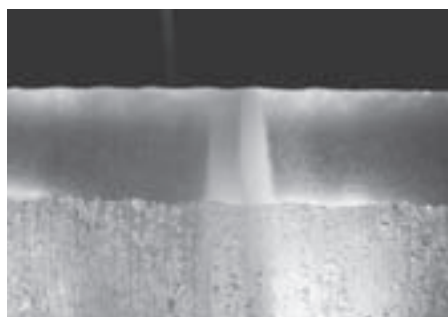


図 11 南極ドームふじ深層コアで見られた火山灰層の一例（上）と電子顕微鏡で撮影した火山灰粒子（下）。

現地では、電気伝導度測定などの解析のためコアの側面を切断した。写真（上）は、横にしたコアの切断面に見られた火山灰層である。こうした火山灰層には、最大でも $100\ \mu\text{m}$ 以下の粒子が多数含まれ、研磨して成分分析を行った。

Fig. 11 An example of a tephra layer (top) and a tephra particle (bottom) found in the Dome Fuji deep ice core, Antarctica.

しかし、氷床コアなどによる古気候、古環境の研究は、過去の豊富な事例を提供するとともに、数値モデルの検証材料を与えることになるので、気候の将来予測に際して、重要性が認識されるようになってきた。このため、2007年に刊行されるIPCC（気候変動に関する政府間パネル）第四次報告書では、独立した「古環境」の章が設けられる予定である。

南極ドームふじ深層コアが示す過去32万年間の気温変化は、現在が1万年前の温暖なピークから氷期に向かう寒冷化の途上にあることを示唆している。一方、 CO_2 濃度は、気温の変化と調和的な変化を示しているが、現在の380 ppmv

という濃度が、過去32万年間（最大値は約300 ppmv）では例を見ない程の高濃度になっており、この温室効果による温暖化が起きつつある、あるいは、今後起こると予想されている。この異常とも言える高濃度の温室効果ガスによる温暖化は、ミランコヴィチサイクルから予想される長期の寒冷化傾向の中でも捉えてみる必要がある。

また、気温変化速度が、温暖期あるいは温暖期のピークからの寒冷化進行期で大きくなるメカニズムの解明も、今後の気候を予測する上で重要である。長期的な気候変化の視点で見ると、現在は、まさに温暖期のピークからの寒冷化進行期にあたる。今後の温室効果ガスによる温暖化が、気候変化の振幅をさらに増大させると考えられる。

【用語解説】

スバルバル諸島：北緯 $74 \sim 81^\circ$ 、東経 $10 \sim 25^\circ$ の地域にある総面積 $61,200\ \text{km}^2$ の諸島で、その中で最大の島はスピッツベルゲン島（面積 $38,000\ \text{km}^2$ ）である。これに次いで大きい島は、北東島（ $14,000\ \text{km}^2$ ）である。メキシコ湾流の影響を受けた海洋性暖気団と北極寒気団との境に位置するため、降水量は $500 \sim 1000\ \text{mm/年}$ と多く、諸島の60%が氷河や氷帽に覆われている。スピッツベルゲン島のニーオルスンと呼ばれる場所には、日本の国立極地研究所をはじめ各国の観測基地がある。

火山爆発指数（Volcanic Explosivity Index: VEI）火山灰を噴出するような爆発的な噴火を示す尺度で、噴出した火山灰の体積に基づいている。火山灰の体積が $10^4\ \text{m}^3$ 未満の噴火から $10^{12}\ \text{m}^3$ を超える噴火を、0から8までの9つの指数に分けて示される。指数が1増えるごとに、噴出量は10倍大きくなる。例えば、歴史時代で最大規模のインドネシアのタンボラ噴火（1815年）のVEIは7で、ハワイの火山のように、主な噴出物が溶岩である噴火の場合には、溶岩噴出量がどんなに多くともVEIは0となる（河野、2000）。

酸素と水素の安定同位体組成：水（氷、水蒸気）を構成する酸素と水素の天然に存在する安定同位体（原子番号が同じで質量数の異なる核種で、放射壊変しないもの）としては、酸素では ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O 、水素では ^1H 、 ^2H （重水素、Dとも書かれる）がある。海水中では、こうした同位体組成はほぼ一定であるが、蒸発、凝結などの相変化をすると、その温度に応じて同位体分別が起こる。降水中の安定同位体の量は非常に微量で、その変動は更に小さな値となるため、酸素同位体の場合、同位体比 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ をとり、次式で示されるように、海水を基準とした変化量の比として千分率（パーミル；‰）で定義される。

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{サンプル}} - {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{標準海水}}}{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{標準海水}}} \right) \times 1000$$

地球磁場反転：地球磁場の方向が、正磁極から逆磁極へと180°変化すること。過去何度も反転が起こっている。約79万年前には、松山・ブリューヌ反転と呼ばれる地球磁場の反転があった。反転は、通常数千年から1万年を要して進行し、この間の磁場の相対強度は、通常の1/10以下に減少し、太陽風をはじめとする様々な宇宙線が大気圏深くまで侵入する。

サウスサンドウィッチ諸島：南大西洋の南緯56°18' ~ 59°28'、西経26°14' ~ 28°11'に位置する無人の諸島。氷河を抱く11の小さな火山島からなり、分布は390 kmにおよぶ。英国の統治下にあるが、アルゼンチンも領有権を主張している。

文 献

- Barber, D.C., Dyke, A., Hillaire-Marche, C., Jennings, A.E., Andrews, J.T., Kerwin, M.W., Bilodeau, G., McNeely, B.R., Southern, J., Morehead, M.D. and Gagnon, J.-M. (1999) Forcing of the cold event of 8,200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes. *Nature*, **400**, 344-348.
- Bond, G., Heinrich, H., Broecker, W., Labeyrie, L., McManus, J., Andrews, J., Huon, S., Jantschik, R., Casen, S., Simet, C., Tedesco, K., Klas, M., Bonani, G. and Ivy, S. (1992) Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic ocean during the last glacial period. *Nature*, **360**, 245-249.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjörnsdóttir, 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.
- Eppley, R.W. and Peterson, B.J. (1979) Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature*, **282**, 677-680.
- Fisher, D.A. and Koerner, R.M. (1994) Signal and noise in four ice-core records from the Agassiz Ice Cap, Ellesmere Island, Canada: Details of the last millennium for stable isotopes, melt and solid conductivity. *Holocene*, **4**, 113-120.
- Fisher, D.A., Koerner, R.M. and Reeh, N. (1995) Holocene climatic records from Agassiz Ice Cap, Ellesmere Island, NWT, Canada. *Holocene*, **5**, 19-24.
- Fisher, D.S., Koerner, R. M., Bourgeois, J.C., Zielinski, G., Wake, C., Hammer, C.U., Clausen, H.B., Gundestrup, N., Johnsen, S., Azuma, K.G., 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.
- 藤井理行 (1993) 氷床掘削・極地, **57**, 15-22.
- 藤井理行 (2001) 南極氷床ドームふじコアに記録された過去33万年の気候・環境変動. 学術月報, **54**, 158-163.
- 藤井理行・東 信彦・田中洋一・高橋昭好・新堀邦夫・本山秀明・片桐一夫・藤田秀二・宮原盛厚・中山芳樹・亀田貴雄・斎藤隆志・斎藤 健・庄子 仁・白岩孝行・成田英器・神山孝吉・古川晶雄・前野英生・榎本浩之・成瀬廉二・横山宏太郎・本堂武夫・上田豊・川田邦夫・渡辺興亜 (1999) 南極ドームふじ観測拠点における氷床深層コア掘削. 南極資料, **43**, 162-210.
- Fujii, Y., Kohno, M., Motoyama, H., Matoba, S., Watanabe, O., Fujita, S., Azuma, N., Kikuchi, T., Fukuoka, T. and Suzuki, T. (1999) Tephra layers in the Dome Fuji (Antarctica) deep ice core. *Ann. Glaciol.*, **29**, 126-130.
- Fujii, Y., Kamiyama, K., Shoji, S., Narita, H., Nishio, F., Kameda, T. and Watanabe, O. (2001) 210-year ice core records of dust storm, volcanic eruption and acidification at Site-J, Greenland. *Mem. Natl. Inst. Polar. Res. Spec. Issue*, **54**, 209-220.
- Fujii, Y., Kohno, M., Matoba, S., Motoyama, H. and Watanabe, O. (2003) A 320 k-year record of microparticles in the Dome Fuji, Antarctica ice core measured by laser-light scattering. *Mem. Natl. Inst. Polar. Res. Spec. Issue*, **57**, 46-62.
- 福山 薫 (1992) 地球環境変動とミランコヴィチ・サイクル. 古今書院.
- Jacoby, G.C. and Cook, E.R. (1981) Past temperature variations inferred from a 400-year tree-ring chronology from Yukon Territory. *Arct. Alp. Res.*, **13**, 409-418.
- Jouzel, J., Lorius, C., Petit, J.R., Genthon, C., Barkov, N.I., Kotolyakov, V.M. and Petrov, V.M. (1987) Vostok ice core: A continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years). *Nature*, **329**, 403-413.
- 粕谷健二・山本淳之・大村 誠・福山 薫・安成哲三 訳 (1992) ミランコヴィチ 気候変動の天文学理論と氷河時代. 古今書院.
- 気象庁編 (1996) IPCC 第二次報告「地球温暖化の実態と見通し」世界の第一線の科学者による最新の報告.
- 河野美香 (2000) 氷床コアに保存された火山起源物質. 雪氷, **62**, 197-213.
- Kohno, M. and Fujii, Y. (2002) Past 220 year bipolar volcanic signals: Remarks on common features of their source volcanic eruptions. *Ann. Glaciol.*, **35**, 217-223.
- Kohno, M., Fujii, Y. and Hirata, T. (2005) Chemical composition of volcanic glasses in visible tephra layers found in a 2503 m deep ice core from Dome Fuji, Antarctica. *Ann. Glaciol.*, **39**, (in press).
- Lorius, C., Merlivat, L., Jouzel, J. and Pourchet, M. (1979) A 30,000-yr isotope climatic record from Antarctic ice. *Nature*, **280**, 644-648.
- Marshall, S.J. and Clarke, G.K.C. (1997) A continuum mixture model of ice stream thermomechanics in the Laurentide Ice Sheet, II. Application to the Hudson Strait Ice Stream. *J. Geophys. Res.*, **102**

- (B9) 20615 20638.
- Martin, J. (1990) Glacial-Interglacial CO2 Change: The Iron Hypothesis. *Paleoceanography*, **5**, 1 13.
- Mayewski, P.A., Lyons, W.B., Spencer, M.J., Twickler, M.S., Buck, C.F. and Whitlo, S. (1990) An ice-core record of atmospheric response to anthropogenic sulphate and nitrate. *Nature*, **346**, 554 556.
- Robin, G. de Q. ed. (1983) *The Climate in Polar Ice Sheets*. Cambridge University Press.
- Satow, K., Watanabe, O., Fujii, Y., Kamiyama, K., Motoyama, H., Furukawa, T., Igarashi, M. and Kanamori, S. (2004) Periodicities of paleo-climatic records extracted from the Dome Fuji deep core. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **18**, 72 81.
- Shackleton, N.J. (1987) Oxygen isotopes, ice volume and sea level. *Quat. Sci. Rev.*, **6**, 183 190.
- Simkin, T. and Sibert, L. (1994) *Volcanoes of the World. 2nd ed.* Geosience Press Inc..
- ストーンメル, H.・ストーンメル, E.・山越幸江訳 (1985) 夏のない年 . 地人書館 .
- Tarussov, A. (1992) The Arctic from Svalbard to Severnaya Zembyla: Climatic reconstruction from ice cores. In Bradley, R.S. and Jones, P.D. eds.: *Climate Since A.D. 1500*. Routledge, 505 516.
- The Carbon Dioxide Information Analysis Center (1990) *Trends '90: A Compilation of Data on Global Changes*. Oak Ridge National Laboratory.
- 渡邊興亜 (1994) 南極氷床に地球の気候変動を探る . 科学, **64**, 52 60.
- Watanabe, O., Motoyama, H., Igarashi, M., Kamiyama, K., Matoba, S., Goto-Azuma, K., Narita, H. and Kameda, T. (2001) Studies on climatic and environmental changes during the last few hundred years using ice cores from various sites in Nordaustlandet, Svalbard. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **54**, 227 242.
- Watanabe, O., Jouzel, J., Johnsen, S., Parrenin, F., Shoji, H. and Yoshida, N. (2003) Homogeneous climate variability across East Antarctica over the past three glacial cycles. *Nature*, **422**, 509 512.
- (2005 年 7 月 20 日受付, 2005 年 9 月 29 日受理)