

南極氷床，ドームふじコアから読む地球気候・環境変動

渡辺 興 亜* 藤井 理 行* 神山 孝 吉*

Global Climate and Environment Change during the Last Three Glacial Cycles Recorded in Dome Fuji Core, Antarctica

Okitsugu WATANABE*, Yoshiyuki FUJII* and Kokichi KAMIYAMA*

Abstract

In 1968, a US drilling team succeeded in drilling through the full depth of the Ice Sheet at Byrd station, West Antarctica, following a similar success on the Greenland Ice Sheet in 1966. From the temperature profile derived from oxygen isotopic analyses of these cores, synchronized climatic change in the north and south polar regions during the glacial-interglacial cycle was confirmed.

Following this success, several attempts at deep ice drilling in the Antarctic Ice Sheet have been carried out. A Japanese glaciological team succeeded in deep ice drilling at Dome Fuji, one of the summits of East Antarctica. The results of an analysis of the Dome Fuji core to a depth of 2500 m reveal global climatic and environmental changes during the last 320,000 years. Changes in the living human environment are discussed in view of these climatic changes.

Key words : Antarctica, global climatic change, global environment change, Dome Fuji core, ice core study

キーワード : 南極, 地球気候変動, 地球環境変動, ドームふじコア, 雪氷コア研究

1. はじめに

南極大陸における氷河形成の最初の記録は4900 万年前の始新世中期といわれ, 3700 万年前の漸新世初期には氷床の形成がはじまり, 80 万年前頃より地球の気候は10 万年周期の寒・暖期の繰り返しが始まってきた。南極氷床は, その地理的位置および大陸としての地形的特性から, 第四紀氷河時代の気候変動に対してその規模を大きく変動させなかったと考えられているが, 気候変動そのものの記録は氷床堆積層に刻みこまれてきた。

第四紀気候変動は地球雪氷圏の状態に大きな影響を与えたが, 特に北半球の氷床の規模を大きく変動させた。現在は間氷期で海水位にして70 m 分が淡水として陸上にあり, その大半(99.7%) は氷床であり, 南極氷床とグリーンランド氷床が現存する。氷期には現在量の二倍の陸氷が存在し, そのため海水位は現在より125 m 低下したと考えられている。

北半球における氷床の拡大は気候の変化と相まって, 人類の生存環境に大きな影響を与え, また海水位の低下は大陸間の陸橋を形成し, 人類の

* 国立極地研究所

* National Institute of Polar Research

移動を促した一つの原因となったと想像することは許されるであろう。人類の変遷に対する地球気候および環境の変動がどのようなものであったかを南極氷床堆積層に残された変動指標のプロファイルから検討する。

II. 氷床に保存された過去の気候・環境シグナル

南極氷床は視覚的には鏡餅のような形と形容されるが、厚さに対してその直径が1000倍もある円形の板に近い。沿岸から急激に高まる氷床は、沿岸から5～600 km以南の内陸域に広大な緩傾斜の高原状の地形をもち、そこにはいくつかの高まり(ドーム)がある。ドームふじ(F)はその一つで、昭和基地南方1000 km付近にある。南極氷床の最も高いドームAは、4000 m以上の標高がある。これまでの観測によれば、ドームFは頂上で3810 mの標高を有し、そこでは海拔600～1600 mの起伏をもつ基盤上に3200～2200 mの厚さの氷が覆っている(渡辺, 1994)。

南極大陸の平均の標高は2290 mで他の大陸に比べて異常に大きい。例えば巨大なチベット高原を擁するユーラシア大陸でさえ、平均標高は800 m程度にすぎない。南極大陸はこのように異常に大きな標高をもち、その大部分が積雪の累重で形成された大陸であり、一般的意味での大陸ではない。南極氷床はその存在自体を気候現象と見なすことができ、その規模は気候の状態で変動する。

氷床の成立そのものに地球の気候システムが関係し、また氷床が存在することによって特有の氷床気候システムを作り出し、その両者が全体として、氷床の質量維持および変動の機構として働いている。そしてそれらのシステムの全体は地球規模の気候変動を反映している。

地球は南北の緯度50度付近で太陽輻射入射量と地球からの放射量の差し引きのバランスが逆転する。低緯度側で受熱、高緯度側で放熱が上まわる。つまり大気に対して、赤道側が熱源であるのに対し、極域側は冷源である。熱源から冷源への大気圏内での熱輸送が生じ、その結果として大気

の大循環が起こる。南極域へもたらされる降水はその過程での潜熱輸送の結果である。

氷床は毎年降り積もる雪が積み重なってできた雪氷層から成り立っている。毎年の積雪はその質量収支過程として生じ、積雪は累重するそれ自体の重さによって次第に氷化し、氷は塑性変形によって流動し、数万年かけて海に戻っていく。こうした質量収支過程や流動の過程は、氷床全体としてのゆっくりとした水循環過程でもある。

極域は大気大循環の過程に伴う物質循環の収束域でもある。氷床には対流圏のみならず成層圏内物質輸送過程によってもたらされた諸物質も蓄積されている。平均の厚さ2650 mに達する東南極大陸の雪氷層には、降雪によりもたらされた膨大な量の固体の水分子の他に、大気中に漂い、ウオッシュアウト、ドライフォールアウトによって地上に運ばれたさまざまなエアロゾル、固体微粒子を含んでいる。また積雪中に含まれる大気は積雪の氷化過程で大気と切り離され、独立した気泡として氷層に閉じ込められ、過去の大気成分や微量成分をほぼ永久に保存する。気泡は氷床中では、深さとともに次第にハイドレート・クラスレートに変化する。氷層中の気泡は過去の大気のみを現存する試料である。

南極の氷床は、人為的な大気汚染源から遠く離れた地域にあること、寒冷な気候のため氷に閉じ込められた諸物質が化学的に変質しにくいこと、厚い雪氷層の存在と比較的小規模な年々の堆積量から長年月の堆積層が存在することなど、過去の気候・環境変動シグナルの保存にとって有利な条件の場となっている。

氷床コア中の諸化学成分、微粒子量、大気成分、水分子の安定同位体組成などは過去の気候や環境の変動を反映してその一般的特性や存在量、組成比を変化させ、大気状態や気候・環境の変動復元の良き情報(シグナル)源となる。

雪氷コア中に含まれる各種のシグナルは、その示標要素から次のように分けられる。

- (i) 気候要素：水の同位体組成や包接水和物(クラスレートハイドレート)などによる気温、降水量、水蒸気量や大気組成など気

候現象の変化、変動を示す要素。

- (ii) 地球環境要素: 各種化学成分, 微粒子濃度, 電気伝導度, 誘電率などによって示される火山活動, 生物活動, 大陸の乾燥度, 雪氷圏規模の変動, 太陽活動など。地球環境の変化に伴う成分, 組成の変化および大規模事件に伴って大気に放出される物質の種類および量などが示標要素。
- (iii) 氷床変動要素: 含有空気量, クラスレート含有量, 水の同位体組成などによる氷床規模や周辺海水域規模の変動など。
- (iv) 氷床の動力学的要素: 氷の力学的および電氣的性質, 氷結晶の諸物性, クラスレートや気泡の産状など, また直接的な情報として雪氷コアを抜き取った後の掘削孔の変形やその歪量, 氷温分布など。

雪氷コアの分析や解析によって, 各種シグナルを読みとり, その総合的な検討から気候や環境の変動およびそれに伴う氷床規模の変動を復元していくのであるが, その前提として雪氷コアに時間尺度を付す必要がある。氷床コアの年代を求める方法として, これまでにいくつかの有効な方法が確かめられている。それらは (i) 氷の安定同位体組成や海塩成分などが示す季節的周期性, (ii) 核実験によって生成された人工放射性核種, 大規模火山活動による火山噴出物などによる特定年代層示準, (iii) 放射性同位体による絶対年代の推定および, (iv) 氷床流動モデルを用いた理論的堆積経過年代の推定などであるが, 氷床や氷河の堆積環境によってはシグナルの欠如, 変質あるいはシグナルが弱く分離抽出できないということも生じる (渡辺, 1999, 2002 など)。

III. 極域氷床における氷床コア研究

極地氷床から掘りだされた深層コア研究は, 1966年グリーンランド北西部のキャンプ・センチュリーでの米国隊による基盤までの1387m全層掘削の成功, 引き続き1968年南極バード基地における2164mの氷床全層掘削の成功に始まる。この成功により, 過去十数万年におよぶ気温変動情報が得られ, また南北両極域の気候変動の同期性

が確かめられた。この地球科学的成果は大きな衝撃として各国の地球科学者に受け止められ, その後, 中深層氷床掘削がグリーンランド, 南極の両氷床で米, 露, 仏, 豪, 日本の各国によって行われ, 現在でも各地で各国が単独あるいは共同で, 氷床コア掘削計画のための探査や掘削が行われている。

南極氷床ではバード基地での成功の後, 旧ソ連はポストーク基地で掘削を続け, 3623m深までの掘削に成功している。この掘削孔の123m下にポストーク氷床下湖があり, 湖水の汚染を避ける掘削方法が検討されている。フランスはドームCで, 1978年に905m深までの掘削に成功し, 最終氷期以降の地球環境変動, 主に地球化学的変動の解析に大きな成果を得ている。21世紀に入り, ドームCでは新たな深層掘削計画がフランス, イタリアの協同計画として進められ, 2002年現在, 2800mを超す深さまで掘削が進められている。ポストークコアの初期の解析からは, 気温変動にミランコビッチサイクルが確認されるとともに (Jouzel *et al.*, 1987), コアに含まれる気泡中の二酸化炭素濃度が気温と調和的に変動すること (Barnola *et al.*, 1987) が明らかにされた。

グリーンランド氷床では, キャンプ・センチュリーでの成功以降の1970~80年代に, 米国, デンマーク, スイスの協同計画 (GISP) として深層掘削が行われた。グリーンランドのDye 3では1981年に基盤に達する2037mの掘削に成功し, 多くの新たな情報が得られた。最終氷期から間氷期 (完新世) への移行期のヤングドライアス末期における急激な温暖化, 氷期から間氷期への移行に数十年しか要しなかったことなど, また氷期中に寒冷な気候は安定的に継続せず, 急激な短期的気候変動 (ダンスガード・オシュガーサイクルあるいはD-Oサイクル) を繰り返していたことなどが見出された (Dansgaard *et al.*, 1993)。

1990年代の初めには, グリーンランド氷床の頂上域で, デンマーク他のヨーロッパグループ (GRIP) と米国 (GISP-II) が掘削を行い, とともに基盤に達している。

IV. わが国の氷床コア研究

1996年12月、南極氷床の2番目に高いドームふじ(南緯77°19′, 東経39°42′, 標高3810m)で、2503.52m深までのコアが掘削された(図1)。この掘削計画(ドームふじ深層掘削計画:ドームF計画)は、南極観測の第5期5カ年計画の主要観測課題として、氷期・間氷期サイクルを含む過去20万年以上にわたる気候および環境の変動を明らかにすることを目的に、2000m深までのコア採取を目指すものであった(渡邊, 1994; 藤井ほか, 2002)。得られたコアの年代は、その後の研究で3回の氷期サイクルを含む過去34万年(Watanabe *et al.*, 1999:その後、モデルやタイムマーカの導入など推定法を改良し、32万年となった)をカバーすることが明らかとなった。

ドーム頂上では水平方向からの氷の移流はなく、

鉛直方向の氷の沈降だけが起こるので、“その場所”で堆積した積雪層のみを取り出すことができる。氷床斜面域にある“みずほ基地”の700m深の雪氷ボーリングコアの解析では、表層はみずほ基地付近の積雪であるが700mの深さの氷層は9400年前にみずほ基地の上流110kmの地点で積もった雪であることが明らかにされた。こうした水平方向の氷の移流が生じる場所では、鉛直方向の雪氷コアは異なった堆積環境下での積雪の集積であり、時間尺度の設定が複雑で、雪氷層の諸性質の鉛直方向の変動は時間的変動に地域的な変化が重ね合わさった結果となる。ドーム頂上の雪氷コアは、その点理想的な時間尺度をもつ基準コアになるといえる。

1) ドームふじコア年代の決定について

深層コア年代の推定は氷床流動モデルを用いる方法が一般的であり、この推定には氷床表面での

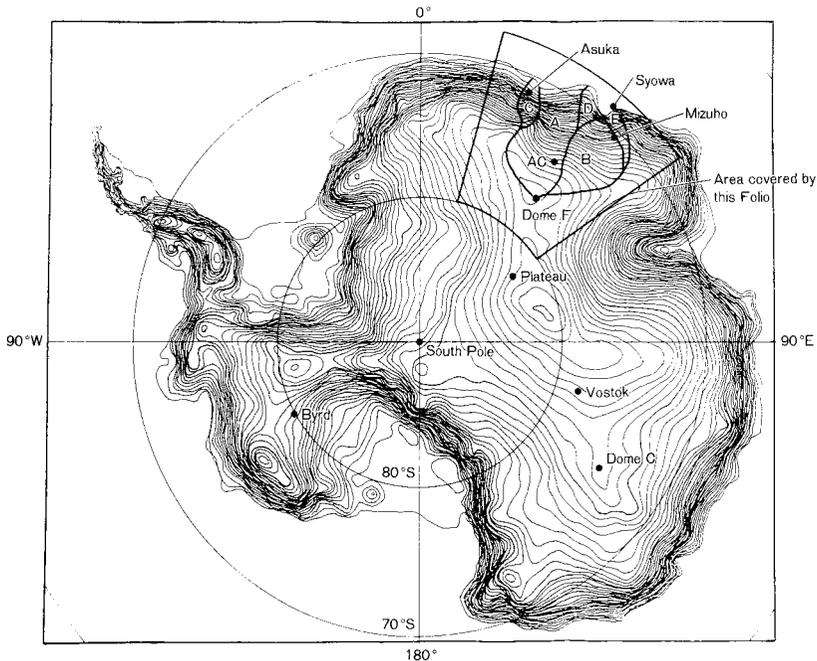


図1 南極大陸とドームふじ(Dome F)基地。

A: ラグンヒルド流域, B: 白瀬氷河流域, AC: 前進拠点

Fig. 1 The location of Dome Fuji station in Antarctica.

A: Ragnhild drainage area, B: Shirase drainage area, AC: Advance Camp

堆積速度を見積もる必要がある。現在の気候下でのドームふじ付近の堆積速度は核実験による人工放射性核種や火山起源物質の堆積によって特定される層位年代からも推定でき、後氷期の堆積速度として水換算で 30 mm/年 ± 10% の値が得られている (Satow *et al.*, 1999)。

水の流動については、流動速度の水平成分を零とし、鉛直成分の深さ変化パターンをグリーンランド氷床中央ドーム(サミット)で得られたパターンと同じであると仮定した。過去の涵養量は、東クイーンモードランドの高原部で得られた「酸素同位体組成と涵養量(積雪堆積速度)との間の関係を示す経験式」が過去についても有効であるものと仮定して用い、この式に実測されたコアの同位体組成の値を代入して算定した。氷厚は一定で時間変化はないものとする、深さ毎の氷の層について逐次計算することにより、年代プロファイルを算出できる。

2) 層位構造が示す気候変化シグナル

190 m の深さまで氷床表面層のコアの層位観察によって 過去 5000 年間の年間降水量が推定された。年間降水量は約 4000 年前から徐々に増加し、1200 年前に最大に達した後、減少に転じていることが明らかにされた。過去 5000 年間の平均降水量は水換算で 28 mm であるが、4000 年前は 20 mm、1200 年前は 40 50 mm、近年は 20 mm で、その後増加して現在は 30 mm となっている。

フィルンから氷、クラスレート・ハイドレートへと変わる一連の圧密過程を詳細に調べると、意外な事実が明らかになった。表層部における圧密過程では、独特な層構造が形成されるが、これが深層部まで残っているのである。しかも、この層厚が年涵養量に相当すること、および気泡やクラスレート・ハイドレートの数密度が表層部の温度を反映することが明らかになり、新たな年層シグナルと見なされるようになり、全層にわたる涵養量の解析に可能性が広がっている。

3) 酸素および水素同位体組成プロファイルについて

ドームふじコアの酸素同位体組成プロファイルには、過去 32 万年におよぶ気温変動が示されてお

り、その期間中に約 10 万年周期で繰り返された氷期・間氷期のサイクルが 3 回、極めて類似した気温変動パターンで起こっていたことが明瞭に示されている (図 2)。また、現在は約 2 万年継続する間氷期の後半にあり、次の氷期に向かうゆっくりとした寒冷化の過程にある。

酸素(水素)同位体組成と気温との間には直線

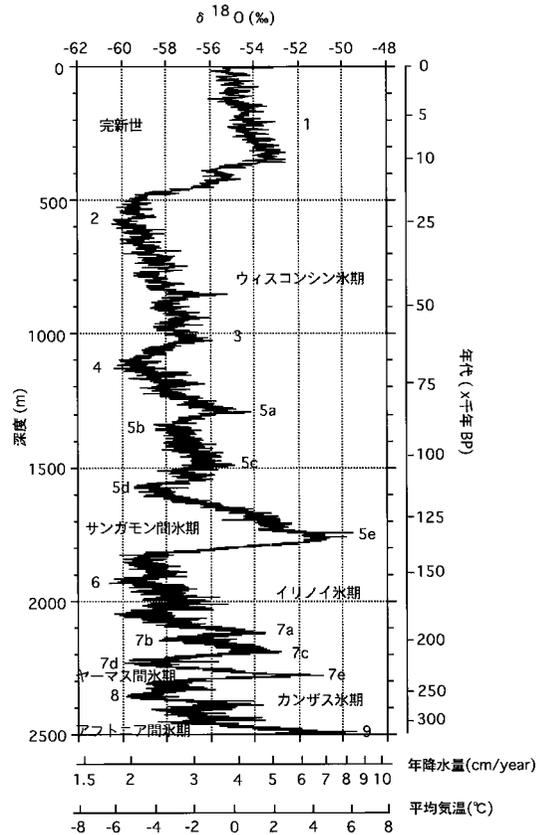


図 2 ドームふじコア中の酸素同位体組成変動。図中の数字は深海底堆積物による時代区分 (Marine Isotope Stage), 平均気温 (図下) は現在を基準にした相対気温。

Fig. 2 Oxygen isotopic composition (^{18}O) profile of Dome Fuji deep ice core. Numbers shown in the figure are Marine Isotope Stages (M.I.S.). Average temperatures were calculated using the present relationship between ^{18}O and mean annual air temperature.

関係があることがドームふじ地域を含む氷床内陸域の野外観測で明らかにされており、この関係を適用すると氷期から間氷期への気温変化は 8 10

であった。また、グリーンランド、サミット (GRIP) コア・プロファイルに見られる最終氷期中の亜間氷期の頻繁な出現または短周期の寒冷・温暖振動 (ダンスガード・オシュガーサイクル) は、ドームふじコアのプロファイルでは現在までのデータを見る限り顕著ではないが一部の亜間氷期は同期している。ただし、氷期・間氷期サイクルのような長周期の気温変動については、南北両極でほぼ同時に起こっていたことがはっきりと支持されている。

氷期の最寒期の気温は、いずれの氷期サイクルでも現在より約 6 °C 低かった。しかし、約 1 万年前までの完新世の最暖期の気温は、過去 3 回の間氷期の最暖期の気温と比べて約 2.4 °C 低い。特に、サンガモン間氷期の最暖期は過去 32 万年間で最も温暖で、現在より約 6 °C も高温であった。各氷期サイクルは、2 万年、4 万年、10 万年のミランコビッチサイクルで特徴づけられるが、異なった変動パターンが見られる。例えば、氷期における寒冷期 (亜氷期) や温暖期 (亜間氷期) の規模や発現回数、発現間隔は、各氷期サイクルで異なる。

ドームふじコアの同位体組成プロファイルを、同じ南極氷床から採取されたポストークコアのプロファイルと比較すると、一般的な気温変動の傾向は酷似しており、それぞれの変動が起こった時期についても各年代の約 20% の範囲内では見事に一致していることが明らかとなった。短期的変動の序列的特徴については、両者の間にかなりの不一致が見られる。これについての詳細な議論には、各種イベント (火山噴火、 ^{10}Be 濃度変動等) の詳細解析によるドームふじコア年代の信頼性の向上が必要である。

ポストークコアは氷床流域の斜面部から採取されており、各深さの氷の層が経験した流動場および堆積環境は互いに異なっていることが、年代計算を複雑かつ困難にしている。これに対してドームふじにおける氷の流動場の単純さは、海底・湖底コア等との比較研究を含めた将来の詳細な気候

変化研究のための標準コアとなる可能性が大きい。

4) 海起源物質が示す地球環境の変化

ドームふじコアの全層にわたる酸素同位体組成、炭酸ガス濃度、微粒子濃度とともに海水起源の主要イオン (Na^+) および海洋微生物を主要な起源とするイオン (MSA) の変動プロファイルが図 3 に示されている。

Na^+ 濃度は、気温との間に高い逆相関が見られる。氷期の最寒冷期には、間氷期の 5 ~ 10 倍も高い濃度を示すが、氷期における積雪涵養量は現在の 75% 程度なので、積雪量の減少で Na^+ 濃度の増大は説明できない。 Na^+ の起源として陸域のダストの寄与は 3.4% 程度 (Legrand and Delmas, 1988) に過ぎず、その大部分は南極を取り囲む南大洋を起源とする。氷期には海水が現在より広範囲に分布し、南極氷床の内陸までの輸送距離が増大したことを考えると、氷期の進行とともに Na^+ 濃度が増大する理由は、大気循環が強化されたことにほかならない。このように、 Na^+ 濃度は大気南北循環強度の指標となる可能性がある。

海洋から波しぶきにより大気中に放出された塩は、南極氷床に輸送される過程で酸との化学反応 ($2\text{NaCl} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{HCl}$ など) や堆積後の化学反応や揮発などの過程 (transfer function) により変質を受けるため、表面積雪層を通過してより深部に流動した雪氷コアの化学成分プロファイルは堆積直後の状態、組成とは異なることに注意する必要がある。しかし、こうした変質過程そのものが大気環境や雪氷環境を反映するとも考えられるので、プロファイルそのものが環境の変動を示すといえるであろう。

5) 微粒子が示す地球環境の変化

陸域を起源とするダストは、氷期に高く間氷期に低い傾向を示す。氷期の寒冷期における濃度は、間氷期あるいは完新世の 10 ~ 20 倍と高く、この変化は氷期における積雪涵養量の減少 (20 ~ 30% 程度) では説明がつかず、発現域の変化と大気輸送力の変化に依存した変化と考えられる (Petit *et al.*, 1981)。

最終間氷期から完新世にいたる過去 14 万年間の 5 千年毎の気候変化 (^{18}O)、海面変動 (Shack-

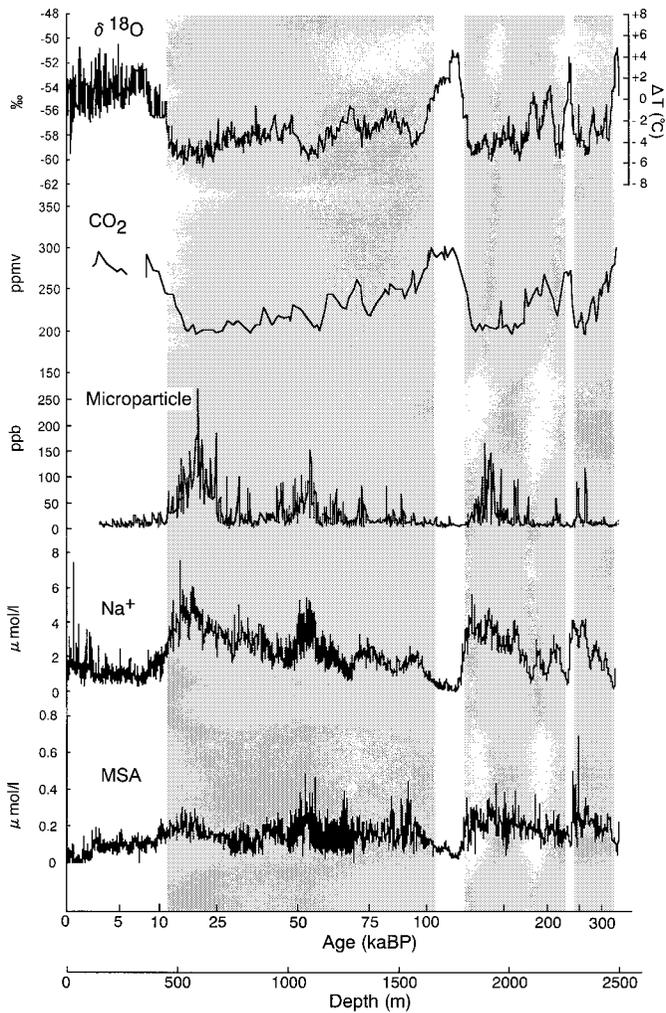


図 3 ドームふじコア中の各種起源物質濃度の変動。
影領域：氷期，Depth：コアの深度

Fig. 3 Vertical profile of concentrations of major anions and cations from various sources in the Dome Fuji deep ice core.
Shadow area : Glacial period, Depth : depth of the core from the surface

leton, 1987) と海面変化によって露出した大陸棚面積，ダストフラックスの関係を図 4 に示す。海水準は氷期末期には，主に北半球におけるローレンタイド氷床やユーラシア氷床などの発達により，現在と比べ 125 m 程低下し，広大な大陸棚が露出した。特に，南米大陸南部パタゴニア沖での大陸

棚の露出が顕著で，現在の海岸線から 500 km 沖のフォークランド諸島まで広範囲に露出し，南極氷床への主なダスト供給地と考えられている (Grousset *et al.*, 1992)。

ダストの体積濃度と年間降水量 (現在の年平均酸素同位体組成と年間降水量の関係から推定) が

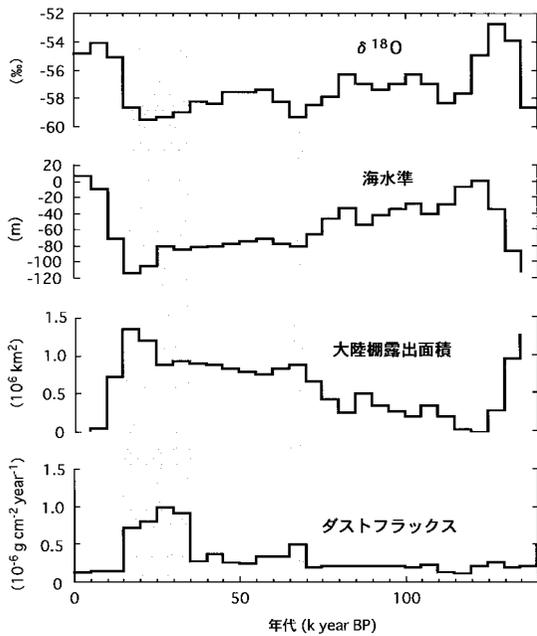


図 4 大陸棚面積変動とダスト・フラックスの変動。最終氷期前の間氷期から完新世の 14 万年間の 5000 年平均値。

Fig. 4 Variations of continental shelf area and dust flux. The dust flux is the average over 5000 years during the Last Interglacial.

ら算出したダストフラックスは南半球の南緯 40 度以南で露出した大陸棚面積にほぼ比例するが、7 ~ 6.5 万年前と 3.5 ~ 1.5 万年前のピークはこの比例関係から大きく外れる。これは、7 ~ 6.5 万年前と 3.5 ~ 1.5 万年前の亜氷期では、強い風による陸面から空中へのダストの舞い上げと南極への長距離輸送力が強まったためにほかならない。

氷期におけるダスト濃度の変化は、図 3 に見られるように、 Na^+ 濃度の変化に比べて先行している。大気の南北循環場の変化は、陸域からのダストと海域からの Na^+ の輸送に対して同期した変化を引き起こすと考えられるので、この時間的ずれは、ダスト濃度の変化が海面変化に伴う大陸棚の露出面積の変化に強く依存したことを示唆する (Fujii *et al.*, 1999)。

過去 32 万年間のコア中には 25 層の火山灰層が見出された。最も厚い火山灰層は 4 年以上の層に含まれ、長期にわたる多量の火山灰の降下が推定される。火山灰粒子の元素組成の分析も開始され、南極あるいは南極周辺の島の火山からと考えられる火山灰が見出されている。氷床コアの直流および交流の電気伝導度の分析から、高濃度の酸性物

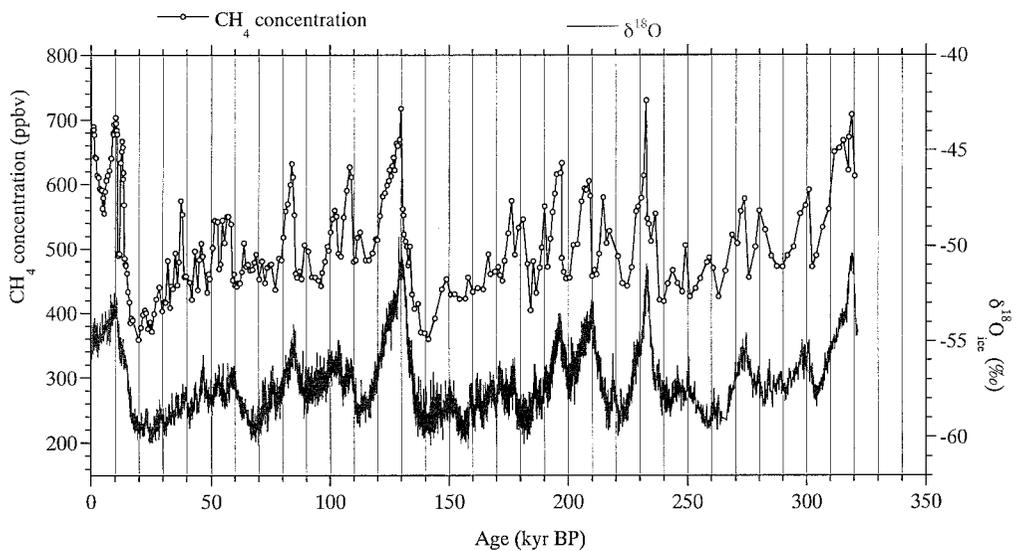


図 5 メタン濃度の変動。

Fig. 5 Variation of methane concentration during the last 320,000 years.

質が10～20年間もの長期にわたって南極に降り続いたと思われるシグナルが、過去20万年の間に少なくとも7回発生したことが明らかになった。原因としては、大気中に膨大な酸性ガスを噴出した大規模な火山爆発が地球上で発生したものと考えられる。

6) コアに含まれる大気微量成分の変化

メタン濃度の32万年間の変動プロフィールを図5に示した。メタン濃度は氷期から間氷期への移行期に360～420 ppbvから700～730 ppbvの上昇を示している。間氷期以降のメタン濃度は470～490 ppbvに急激に低下しており、そこから氷期最寒期に向けて100 ppmv以上の振幅で増減を繰り返しながら徐々に低下している。メタン濃度の変動は全般的には気温変動と極めて良く対応している。この事実は熱帯域から北半球の中緯度域にかけて存在するメタンの発生源が気候変動の影響を強く

受けていることを示している。

しかし、約24万年前の氷期最寒期におけるメタンの放出強度はそれ以外の氷期最寒期に比べて約13%大きかったことが見出された。またメタン濃度が気温変動と必ずしも良い相関を示さない場合もあり、メタン放出源が存在する熱帯域から北半球にかけての地域の気候変動と南極域の気候変動が必ずしも同期していないことを示唆している。

ドームふじコアの二酸化炭素濃度は190 ppmvから300 ppmvの間で変動しており、氷期・間氷期変動とよく対応している。メタン濃度の変動とは必ずしも一致しない。二酸化炭素濃度の時系列データのスペクトル解析の結果は10.5万年の周期が卓越していることを示した。

V. 過去32万年間の気候変動と地球環境

過去数十万年の地球の気候および環境変動は、

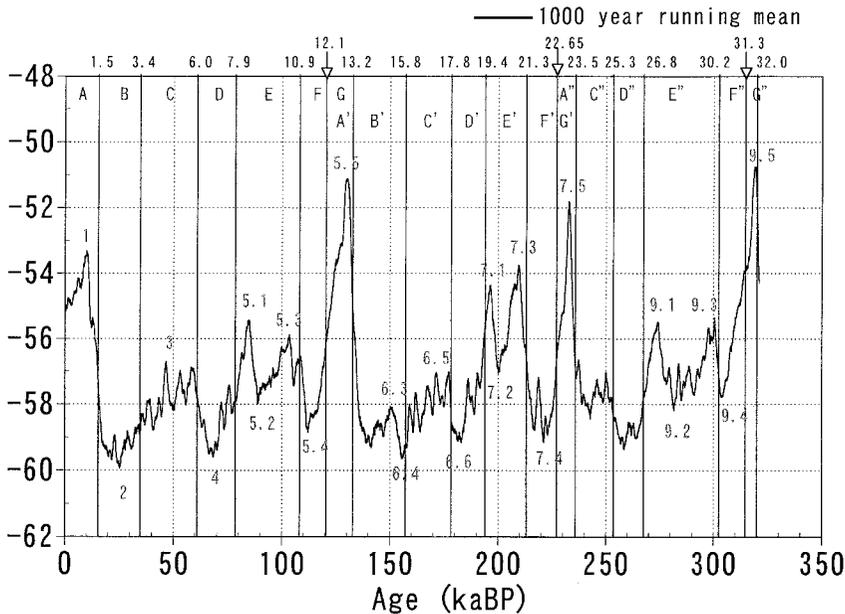


図6 気温変動からみた気候区分(試案)。

A～G:氷期・間氷期の気候区分記号(AおよびG:間氷期)。数字: Marine Isotope Stage。酸素同位体組成は1000年間の移動平均値。

Fig. 6 Proposed climatic deviation estimated from the temperature Variation.
A～G: Symbols of climatic deviation (A and G: Interglacial). Numbers: Marine Isotope Stage. Oxygen isotope composition: Running 1000 yr means.

これまでに解析された南北両極域の氷床コア中の気候・環境シグナルが示すように、ほぼ共通した傾向を示している。グリーンランド・コアの最終氷期中の変動プロファイルにはダンスガード・オシュガーサイクル（振動とも呼ばれる）頻繁な亜間氷期振動（Johnsen *et al.*, 1992）が見られ、こうした振動は南極氷床コアのプロファイルでは顕著ではなく、南北両極域の気候変動は完全には同期していない。しかし、この振動が北大西洋とグリーンランド氷床との相互作用に基づく変動であると考えれば、グリーンランド氷床の地域的な特性と見なすこともできよう。

人類の生存環境に対して、こうした全球的な気候および環境の変動がどのような影響を与えたかについて考察することは容易ではないが、極域深層コア中の各種の気候・環境指標シグナルの変動傾向、シグナル間の諸関係からシグナル発生源での変化、極域への輸送過程の特性等の解析が可能であり、そうした情報を総合的に検討することにより、低・中緯度域の自然の変動をある程度であるが類推することができる。

1) 氷期・間氷期の気候区分

ドームふじコアの気温変動プロファイルおよび海、陸起源物質シグナルおよび大気微量成分の変動プロファイル（Watanabe *et al.*, 1997）から解析された過去3回の氷期・間氷期サイクルの気候区分図（試案）を図6に示した。これまでも南北両極域の氷床各地で得られた深層コアの気温変動プロファイルについて、深海底堆積物中の酸素同位体組成プロファイルとの比較から、氷期・間氷期間の気候区分が試みられ、変動パターンとその規模の特性などからA～Fに区分されている。Aは間氷期である。ドームふじコアでは図6から明らかのように、氷期・間氷期の各サイクルでは気温変動規模は一致しないが、変動傾向のパターンは極めて類似する。しかし詳しくみると、例えば最終氷期の二つ前の氷期でのBの気候の欠如の可能性、最寒期の出現時期などに各サイクル間の変動傾向の違いが見られる。各氷期・間氷期サイクルの気候区分に対応する海および陸起源物質の変動プロファイルを図7に示した。気温（ ^{18}O ）

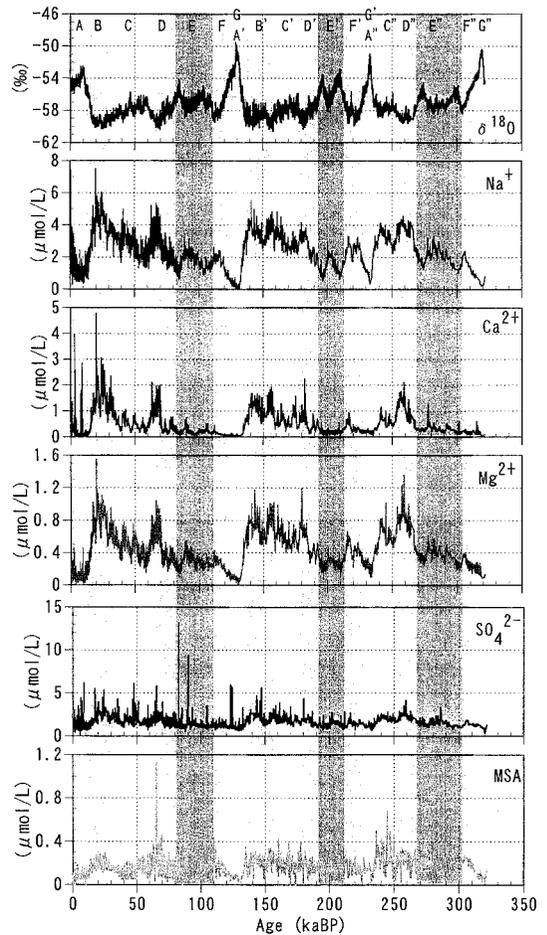


図7 海洋および陸起源物質濃度の気候区分比較。

Fig. 7 Comparison between concentrations of substances from marine and terrestrial sources in the proposed climatic variability.

の変動に逆相関する物質（ Na^+ など）、特に相関しない物質（ SO_4^{2-} など）に分かれるが、これらの変動傾向は地球環境の解明にとって重要な情報を提供する。

以下では氷期・間氷期サイクルが同一の気候変動傾向を示すと仮定し、最終氷期の変動パターンをもとに考察する。

2) 氷期・間氷期の気候変動と人類の居住環境

間氷期（A'）の気候は氷期の終わりからの急激

な気温上昇と最暖期に達した後の急激な寒冷化と特徴づけることができよう。氷期に入ると暖期の気温が次第に低下する三つの亜間氷期を経て氷期最寒期に向かう。最寒期の出現時期はそれぞれの気候サイクルで異なるが、いずれも次の間氷期開始直前に出現する。

海底堆積物中の有孔虫などの貝殻に含まれる酸素同位体組成のプロファイルは氷床コアのそれと類似するが、両者を比較すると深海底プロファイルでは氷期の始まりからの三つの亜間氷期が生じる時期とその後では酸素同位体組成のレベルが大きく異なっている。このことは氷期の開始からほぼ半ばを過ぎた頃(亜間氷期が出現しなくなる頃)以降に氷床形成が急速に進み、氷期の最大規模に達することを物語っている。海底堆積物が示す同位体組成は陸水の増大(氷床形成)に伴う海水の平均同位体組成の変化であり、氷床コアのそれは気温の変動を示す。氷期には間氷期の二倍の陸氷が生じるために、軽い酸素(^{16}O)は陸水側により多く移動し、重い酸素同位体(^{18}O)は相対的に海水側で増加する。

例えば北米大陸では、間氷期に氷期氷床の残存氷体は極北域のデボン、パフィン、エルズミア島にわずかに残るにすぎないが、氷期に入るとハドソン湾周辺の山岳地から氷床の形成が始まり、次第にその規模が拡大しつつ、ついには合体して一つの氷床(ローレンタイド氷床)となり、さらに拡大しながら南に流下し、五大湖付近からさらにニューヨーク、ボストン付近まで南下する。こうした北半球の雪氷圏の拡大状況はユーラシア大陸西部でも同じで、スカンジナビア半島付近で生じた氷床はその先端をベルリン、ロンドン北方まで延ばす。このヨーロッパ(ユーラシア)氷床の東端はタイミール半島、西端はブリテン島まで拡大したと考えられている。

氷期における中緯度の気温低下は極域(8-10)ほど低下せず、5-6程度と考えられているが、それでも5-6の低下は気候境界の大きな変位であり、そこに住む人類がもし同じ居住環境を求めるならば数100 kmの移動を余儀なくされたはずである。間氷期にスカンジナビア半島に住んでい

た動物、人類は気候変化のみならず、北からの氷床縁辺部の南下に伴って南への移動を余儀なくされるはずである。人類の移動は定住人類からみれば侵入者であり、気候変動が人類の摩擦を引き起こしたことは想像に難くない。また気候の変化は食文化や居住文化に影響を及ぼし、新たな文化の創造あるいは滅亡を引き起こしたはずである。

氷床の拡大は海水位の低下をもたらし、地球各地に大陸棚の陸化をもたらしたことは氷床コア中の微粒子濃度の増加が物語っている。またユーラシア大陸と北米大陸間のベーリング海峡の陸橋化は、ベーリングシアを出現させた。ユーラシア氷床の拡大は北極海の永久海氷域の増加と相まって、西からの水蒸気の輸送を遮断したためシベリア西部は非氷床・氷河地域となり、寒帯・乾燥ステップ、ツンドラ地帯を形成し、寒冷域に生息する大型動物の群棲地となっていたといわれている(米倉, 1992)。狩猟対象動物の分布と陸橋の存在はモンゴロイドの北米大陸への移動の環境を作り出したと考えられる。

グリーンランド氷床コアの気温変動プロファイルは最終氷期から完新世の移行期に「寒の戻り期」であるヤンガードライアス期の存在を記録している。10,700年前のその終焉期(間氷期の始まり)には5-6の気温上昇が50年程度の短期間に生じ、それに伴う大気循環の変化が数十年で生じたことを示している。このような急激な気候変化が人類の生存環境にどのような影響を及ぼしたかについては想像を越えるものがあるが、急速な氷床の融解、降水量の変化など水環境の変化は現在の「地球温暖化」を大きく越える、居住環境の劇的な変化をもたらしたことであろう。

文 献

- Barnola, J.M., Raynaud, D., Korotkevich, Y.S. and Lorius, C.(1987) Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO_2 . *Nature*, **329**, 408-413.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjørnsdóttir, A.E. and Jouzel, J.(1993) Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, **364**, 218-220.

- 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. *Annals of Glaciology*, **29**, 126-130.
- 藤井理行・渡辺興亜・神山孝吉・本山秀明・河野美香 (2002) 南極ドームふじ深層コアに記録された氷期サイクルにおける気候および陸海域環境変動. 雪氷, **64**, 341-349.
- Grousset, F.E., Biscay, P.E., Revel, M., Petit, J.-R., Pye, K., Joussaume, S. and Jouzel, J. (1992) Antarctic (Dome C) ice-core dust at 18 k.y. B.P.: Isotopic constrains on origins. *Earth and Planetary Science Letters*, **111**, 175-182.
- Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dansgaard, W., Fuhrer, K., Gundestrup, N., Hammer, C.U., Iverson, P., Jouzel, J., Stauffer, B. and Steffensen, J.P. (1992) Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. *Nature*, **359**, 311-313.
- 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.
- Legrand, M.R. and Delmas, R. (1988) Soluble impurities in four Antarctic ice cores over the last 30000 years. *Annals of Glaciology*, **10**, 116-120.
- Petit, J.R., Briat, M. and Royer, A. (1981) Ice age aerosol content from East Antarctic ice core samples and past wind strength. *Nature*, **293**, 857-859.
- Satow, K., Watanabe, O., Shoji, H. and Motoyama, H. (1999) The relationship among accumulation rate, stable isotope ratio and surface temperature on the plateau of east Dronning Maud Land, Antarctica. *Polar Meteorology and Glaciology*, **13**, 43-52.
- Shackleton, N.J. (1987) Oxygen isotopes, ice volume and sea level. *Quat. Sci. Rev.*, **6**, 183-190.
- 渡辺興亜 (1994) 南極氷床に地球の気候変動を探る. 科学, **64**, 52-60.
- 渡辺興亜 (1999) 34万年の地球環境変動を南極氷床コアに読む. 科学, **69**, 608-618.
- 渡辺興亜 (2002) わが国の南極雪氷研究の歴史と今後の課題, 雪氷, **64**, 329-339.
- Watanabe, O., Fujii, Y., Motoyama, H., Furukawa, T., Shoji, H., Enomoto, H., Kameda, T., Narita, H., Naruse, R., Hondoh, T., Fujita, S., Mae, S., Azuma, N., Kobayashi, S., Nakawo, M. and Ageta, Y. (1997) A preliminary study of ice core chronology at Dome Fuji Station, Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **11**, 9-13.
- Watanabe, O., Fujii, Y., Kamiyama, K., Motoyama, H., Furukawa, T., Igarashi, M., Kohno, M., Kanamori, S., Kanamori, N., Ageta, Y., Nakawo, M., Tanaka, H., Satow, K., Shoji, H., Kawamura, K., Matoba, S. and Shimada, W. (1999) Basic analyses of Dome Fuji deep ice core Part 1: Stable oxygen and hydrogen isotope ratios, major chemical compositions and dust concentration. *Polar Meteorology and Glaciology*, **13**, 83-89.
- 米倉伸之 (1992) 最終氷期の地球. 第6回「大学と科学」公開シンポジウム組織委員会編: 講演集「モンゴロイド地球を動く」. クバプロ社.

(2002年8月30日受付, 2002年12月3日受理)