

南極を掘る ―氷が語る気候変動―

高橋修平（北見工業大学）

1. 南極大陸への道

「しらせ」出港

毎年11月14日になると東京・晴海埠頭では南極観測船「しらせ」が出港する。家族や職場の仲間が大勢集まって手を打ち振る中、吹奏楽団の蜚の光とともに1万6千トンの巨体がしずしずと埠頭を離れる。色とりどりのテープが切れると、感きわまって泣き出す家族も多い。船は1年に1回しか南極に行かないので、越冬隊員は1年4ヶ月の長い旅路になる。なぜに彼らはつらい思いまでして厳しい南極へ向かい、何をしてくるのだろうか。極地で行われている研究の一端を紹介したい。

南極氷床 ―巨大な氷の大陸―

南極大陸はさしわたし約4千km、中央部の高さは約4千mの平べったい鏡もちのような形をしている。岩盤の標高は大陸内部でも数百m程度、大陸の高さのほとんどは氷であり、総質量は2.5兆tと膨大な量である。

氷は大きな圧力を受けると水あめのようにゆっくり流れだす。川のように流れるものは「氷河」、5万km²を越す面積の大きなものを「氷床」（ひょうしょう）と呼ぶ。現在、氷床はグリーンランドと南極大陸にあり、氷河期にはさらに北米にローレンタイド氷床が、ヨーロッパ北部にスカンジナビア氷床が覆っていたという。

氷床頂部はドームと呼ばれ、氷床が流れて海に長く張り出した部分は棚氷（たなごおり）という。棚氷が板状に割れて流れ出したものが氷山であり、南極の氷山にテーブル型が多いのはこのためである（図1）。

雪上車から見た雪面

南極大陸の沿岸部から、氷床頂部のドーム基地を目指して雪上車旅行するとき、南極氷床の表面の様子がどのように変わっていくか見てみよう。オングル島にある昭和基地を出発し、海氷の上を渡って南極大陸に取り付くと、まず出会うのは氷

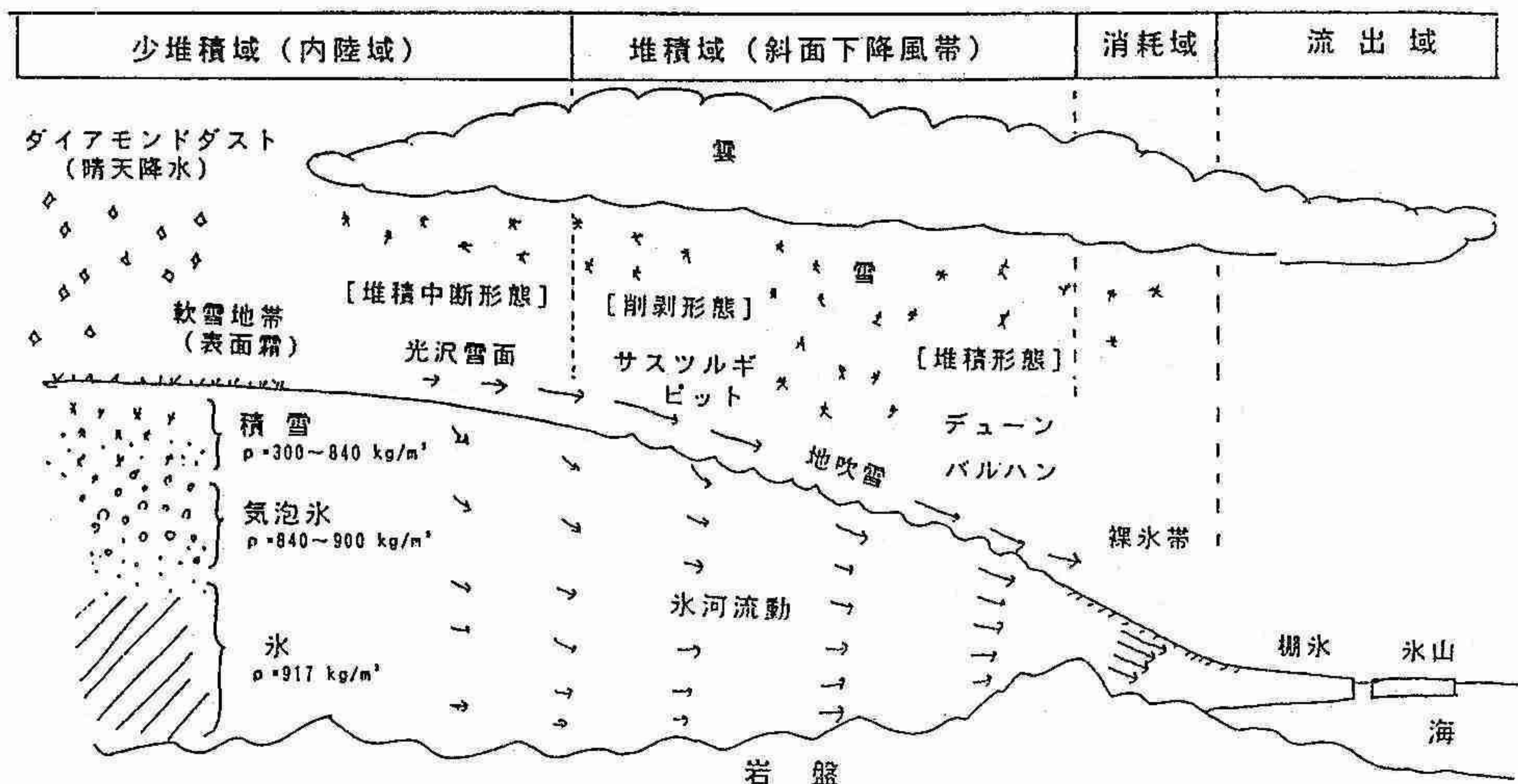


図1 南極氷床の積雪から流出までの諸過程

南極大陸の表面に積もった雪は自重で圧縮されて氷となり、次第に流れて海へ向かう。
海に棚氷として張り出した氷はいずれ割れて氷山となる

床末端の青く光る氷が出ている裸氷(らひょう)帯。ここは、夏には氷が融解するため、氷床深部にあった氷が顔を出しており、深い亀裂のクレバス帯になっていて危険なところでもある。

さらに標高が上がると次第に雪が表面を氷を覆い、非常に積雪の多い地帯となる。標高千m前後から、雪面には風向方向に波状に削られた大きい凹凸のサスツルギ模様が見られるようになり、雪上車の揺れが激しくなる。

標高2千mを越しみずほ基地(1987年に閉鎖)を過ぎると、サスツルギの合間に表面が非常に滑らかな光沢雪面が現れることが多くなる。雪上車を長々運転していると、サスツルギ帯は嵐の海、光沢雪面は鏡のように静かな赤道の海のようなものである。

標高三千mを越すと、斜面下降風は弱くなり、平坦な軟雪域が広がる。昭和基地から千km、氷床頂部のドーム基地はもうすぐである。

2. 南極に積もる雪

表面質量収支 —雪のこづかい帳—

雪の表面で雪が積もったり、融けたり、蒸発したりして雪の出入りした結果の量を「表面質量収支」という。言ってみれば雪のこづかい帳であり、正なら「堆積」、負なら「削剥」となる。

積雪量は、雪上車のルート沿い約1km毎に立て

た竹竿(雪尺)の高さを測ることによって求められる。日本の南極観測隊では、この雪尺観測を長年行ってきており、その範囲は昭和基地を中心として千km四方に及んでいる。図2に昭和基地から内陸にかけての積雪水量(積雪を水の値に直したもの)の変化を示す。細かい変動はあるが、沿岸に近い地域で積雪水量は年間300mm以上と大きく、標高の高い内陸部では50mm以下と小さい。

雪から氷へ —どこからが氷?—

南極の氷は、もともと氷床表面に積もった雪が圧縮されて氷になったものである。では雪と氷の境目はどこなのだろうか。雪粒子が球形として一番落ちてく最密充てんの状態は、密度 $550\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ であり、みずほ基地の場合、深さ8mである。このときの雪粒子間の空気はつながっており、この段階ではまだ雪である。

氷となるのは通気性がなくなるとき、つまり、さらに圧縮されて氷粒子自身が変形し、すべての空隙が独立気泡となるとときである。そのときの密度は $840\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、深さは55mである。それより深いところではさらに圧縮が進行し、純氷の密度 $917\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ に近づいていく。それに従って気泡は小さくなり、いつしか気泡は見えなくなってしまう。

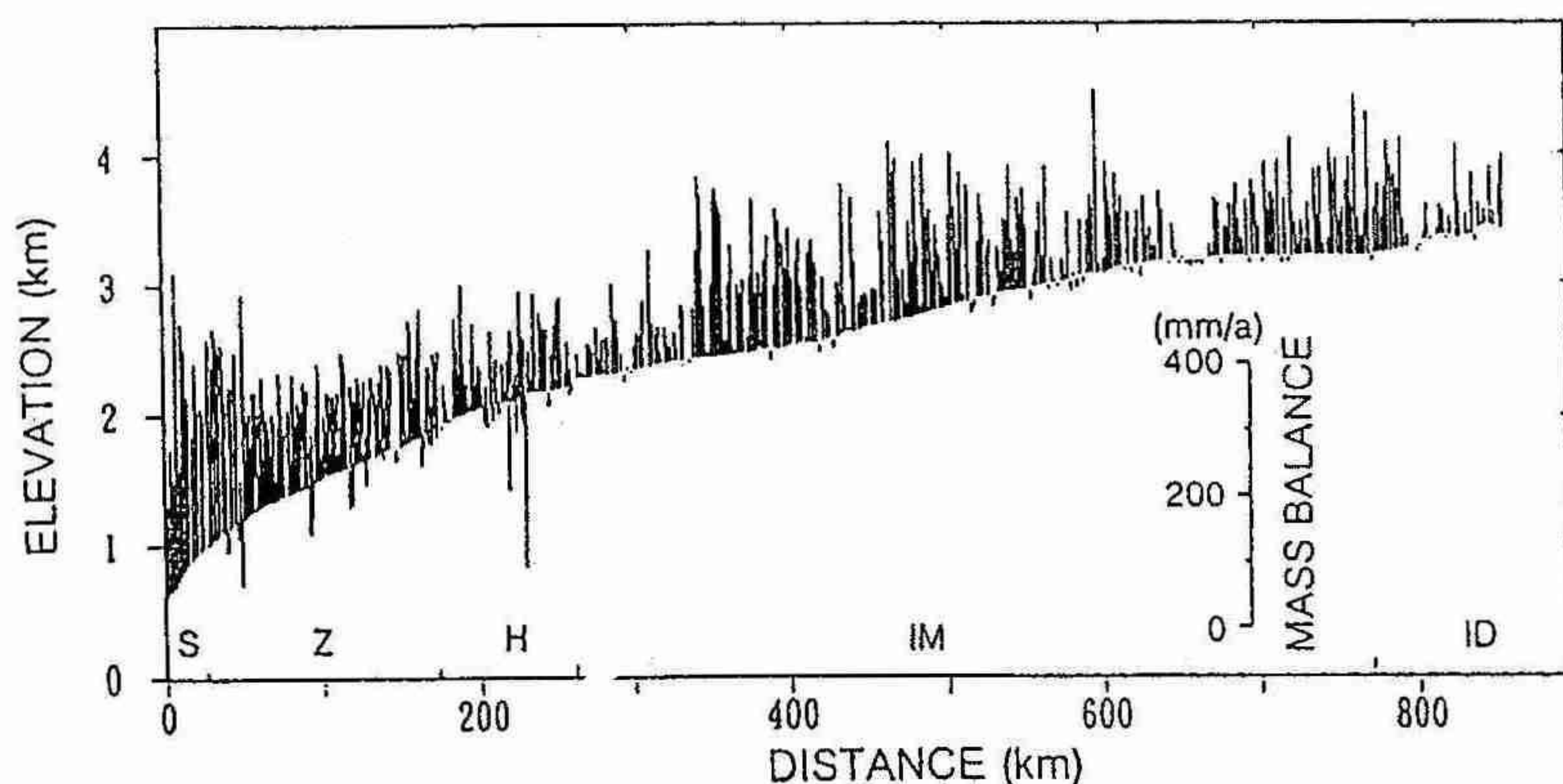


図2 南極氷床表面の積雪水量(S16地点～前進拠点)。

氷床表面の標高上に積雪水量を棒の高さであらわす

3. 南極を掘る

氷床ドーム深層掘削計画

南極やグリーンランド氷床の深層部の氷には、現在から過去数十万年前にさかのぼる地球の気候・環境変動の歴史が記録されている。また、極地は、厳しい環境であるが故に、人為的な大気汚染源から遠く離れた地域にあり、さらにまた低温環境のために諸物質の化学変化がおきにくく、氷掘削による過去の気候・環境の研究に有利な条件がそろっている。

そこで、過去の氷期・間氷期の2周期分以上を含む環境変動の復元を目的として、氷床の最頂部であるドーム地点で深層掘削を行う「氷床ドーム深層掘削計画」が計画された。

ドーム地点が選ばれたのは、氷が最も厚く、より古い氷が得られること、頂部で積もった雪は水平移動せずそのまま垂直に圧縮されるため、結果の解釈がより確実になるからである。この計画を実施するためには、32次隊（1991年）の物資輸送にはじまり、33次隊の大型雪上車テスト、34～35次隊の基地建設、36～37次隊の掘削まで足かけ6年の歳月が必要であった。

この目的のために、ドームふじ基地が、ドーム頂部の標高3810m、沿岸から千km離れた地点に新しく建設され（図3）、1995年、第36次観測隊によって初めて越冬観測が開始された。越冬隊員は男9名、限られた人数なので、飲料水用雪取り、燃料運び、生命線の発電機の保守など自分の専門以外の仕事もいくつもこなさねばならない。最低気温-79.6℃を記録し、寒さと低い気圧（地上の6割以下）のため、越冬後には皆、体重が5～10kgも減っていた。

掘削機は一回の掘削で最大2m長の氷コア（直径9.5cm）を採取する。採取した氷コアはその長さで重量を測って密度を求め、バンドソーで早期解析用と長期研究用のコアに切り分ける。早期解析用コアは、表面電気伝導度を測定した後、日本での分析用に、さらに分割して梱包される。

36次隊では深度600mまでの掘削が行われ、翌37次隊では1996年12月に2500mの掘削を達成した。この深度は30万年を越す年代と見積もられている。掘削された氷コアは日本に低温のまま持ち帰られ、各種分析が進行中である。

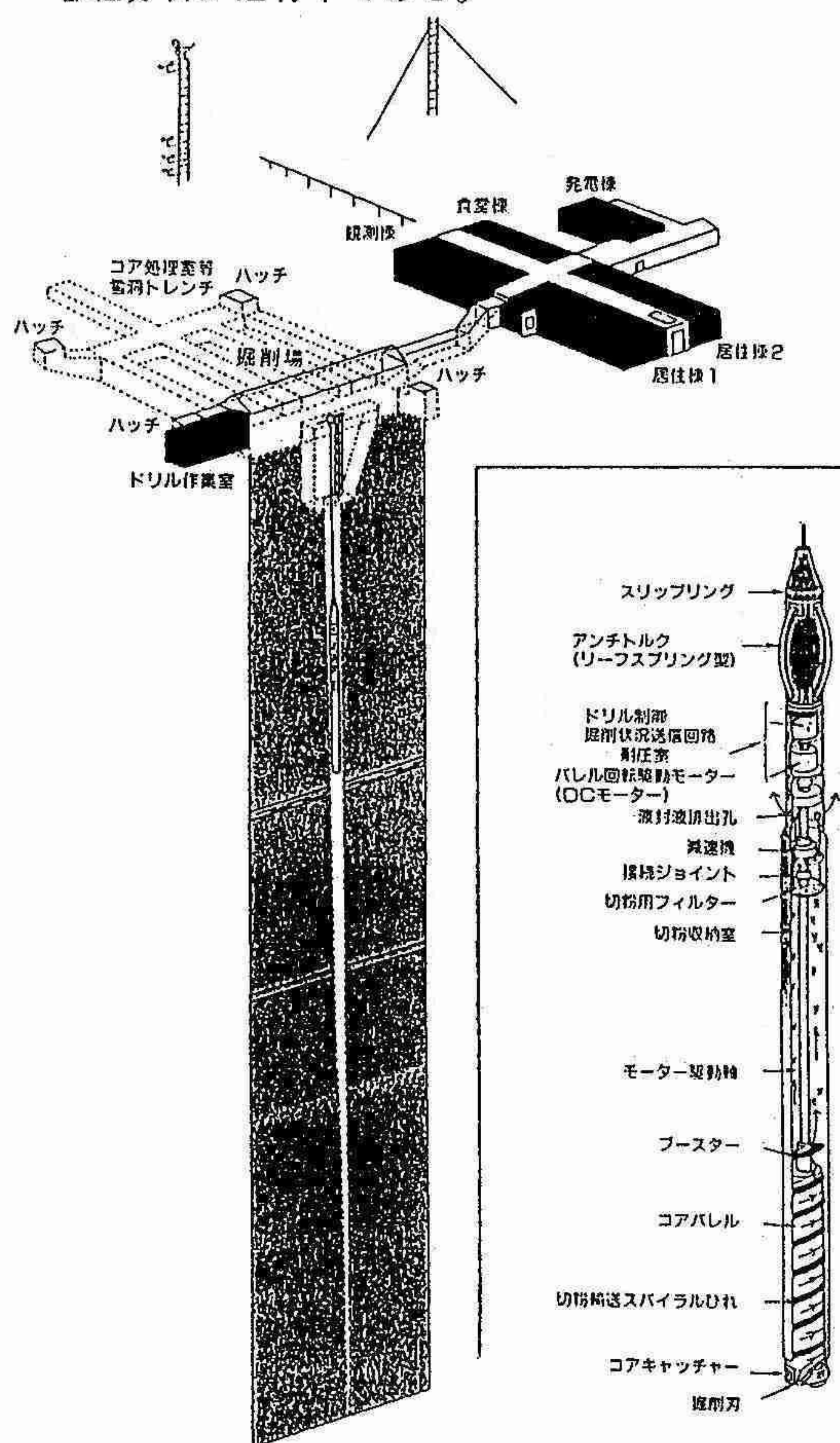


図3 ドーム基地概観図と深層掘削機構造

4. 氷床コアが語る地球環境の歴史

重い雪と軽い雪

氷には、分子数18の普通の水分子のほかに、重水素Dや酸素同位体¹⁸Oを含む「重い水」がわずかに含まれている。その成分比が雪の堆積時の温度に依存するため、同位体比から過去の温度を知ることが出来る。氷の温度依存傾向を一言で言う

と、「暖かい時には、重い雪（同位体濃度の大きい雪）が降り、寒い時には軽い雪（同位体の濃度の小さい雪）が降る」と言える。この質量の差はごくわずかであり、高性能の質量分析計を用いてはじめて測定できる。

過去16万年の気候変動

図4に南極とグリーンランドで採取された氷床コアの同位体濃度を示す。縦軸には、現在からさかのぼる年代であり、深さ、降水量、圧縮速度から計算された値である。この図によると、現在の暖かい気候は、1.5万年ほど前までであり、それ以前は寒冷な氷期が10万年近くも続き、さらにその以前は2万年ほどの暖い時期（間氷期）があったことが分る。過去の歴史の示すところは、我々はあまり長くは続かない間氷期にあり、いずれまた氷期に入る可能性が大きいことである。大きな気候変動の傾向は、南極でもグリーンランドでも同じであるが、グリーンランドの方が大きく変動し、北半球は南半球に比べて気候の変動が激しかったことを示している。

氷の気泡はどこへ消えた？

気候変動の要因の1つとして、大気中の二酸化炭素の濃度の変化があげられる。いわゆる温室効果である。氷床は、過去の大気を気泡として保存しているという点でも極めて貴重な情報源である。ところが、深部の氷は完全に透明で気泡は全く見えない。気泡は、高い圧力で押しつぶされて消えてしまうのである。では、空気はどこへ行ってしまふのか？

この問題も永い間謎であったが、今では包接水和物（クラストレート・ハイドレート）と呼ばれる特殊結晶の中に空気分子が含まれていることが分っている。水分子が作るかご型構造の中に、 N_2 、 O_2 といった気体分子がとり込まれている。この結晶の存在によって、空気分子はしっかりと氷の中に固定されているのである。

最近、オホーツク海など日本近辺でメタンハイドレートが発見され、新エネルギーとして注目さ

れている。これはメタンが海底の水圧で結晶として閉じこめられたものであり、氷の包接水和物と同じ構造をもつため、深層氷コアの研究がエネルギー政策の面から急に脚光を浴びてきている

温室効果ガスと気候変動

氷コアから取り出された空気から、温室効果ガスである二酸化炭素とメタンの濃度の過去20万年にわたる変動を再現すると、どちらも温暖期には濃度が高くなっている。きっかけは別の原因で温暖化が始まり、その結果として海水などから大気中に温室効果ガスが放出された可能性もあるが、温室効果ガスの増加が温暖化を加速したことは間違いのないことであろう。今日、地球温暖化として問題になっているのは、ここ200年ほどの人間の活動によって、二酸化炭素の濃度が350ppmに上昇したことにある。現在の地球は過去20万年一度も体験したことのない高濃度の二酸化炭素におおわれているのである。

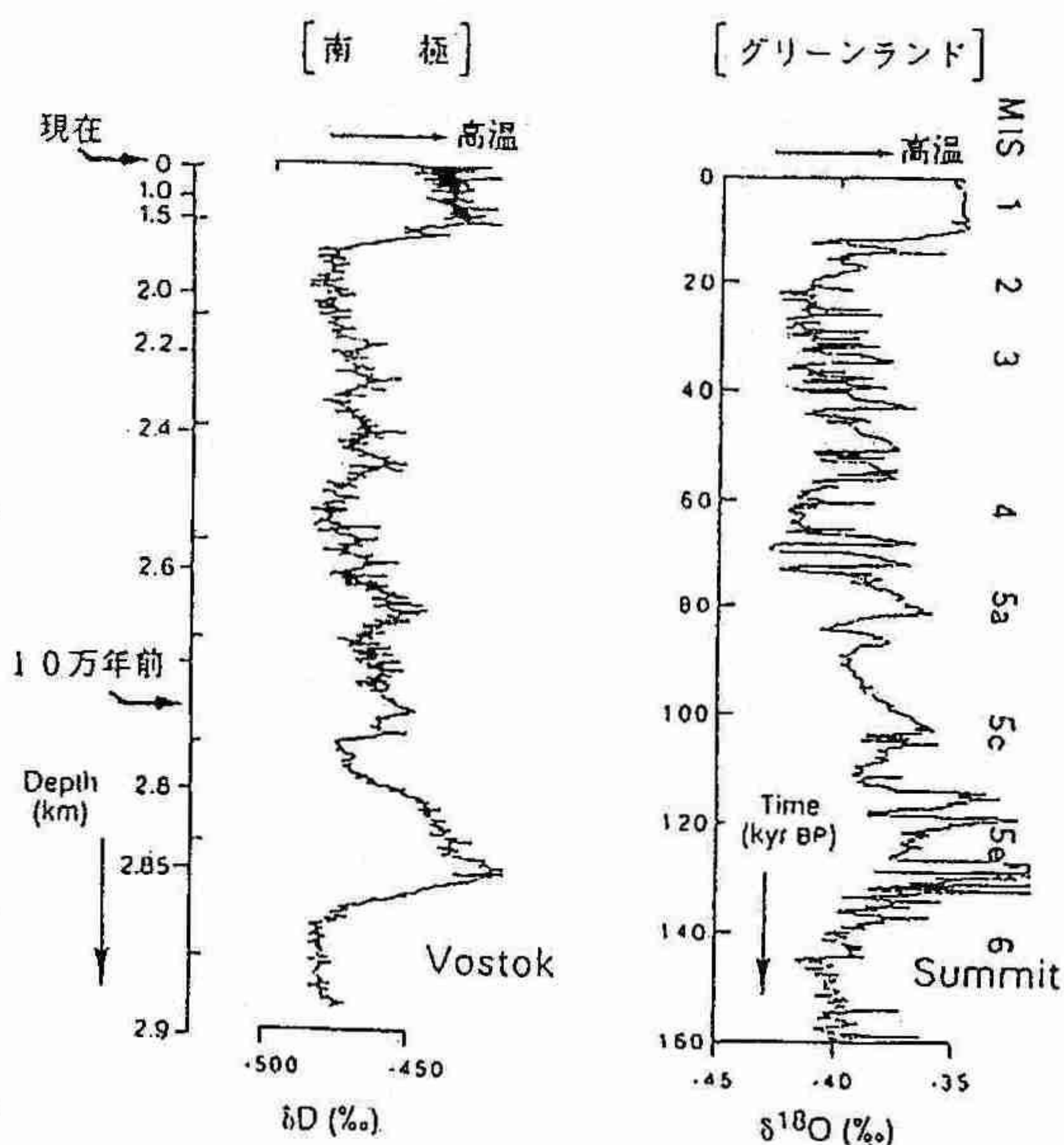


図4 氷コアの同位体から得られた気温変化
南極ボストーク基地氷コア（左）とグリーンランド・サミットの氷コア（右）の同位体比から求めた過去16万年の気温変化