

報 文

南極浅層コア (H72, ドーム南) の基本解析

——測定方法および装置——

西尾文彦¹⁾, 五十嵐誠²⁾, 亀田貴雄³⁾, 本山秀明²⁾,
直木和弘⁴⁾, 高田守昌⁵⁾, 戸山陽子⁴⁾, 渡邊興亜²⁾

要 旨

過去数百年程度の時間スケールにおける気候・環境因子を南極氷床の広域で求め比較し, 産業革命以降の人間活動の地球規模での影響を評価する「国際南極横断観測計画」(ITASE: International Trans-Antarctic Scientific Expedition) が浅層雪氷コアを用いて国際的に進められている. この目的のためには, 氷床コアの同位体組成, 化学主成分などを初めとする種々の要素を高精度で測定する必要がある. また, 広域で採取されたコアネットワークのデータを比較することから, タイムマーカーとなる示準層の検出や年代決定の高精度化が期待されている. さらに, 可能な限り共通の分析手法を用いて, 測定値の標準化が推薦されている. 本稿では, 2本の南極浅層コア (H72, ドーム南) の基本解析 (層位, 密度, ECM, デジタルモザイク画像, 非通気性係数, レーザートモグラフ, 化学分析) で用いた測定方法および装置, 解析作業を記述した.

キーワード: 雪氷コア, 解析装置, 南極氷床, 古気候・古環境, ITASE

Key words: Ice core, analytical method, Antarctic ice sheet, past environment and climate, ITASE

1. はじめに

南極氷床中に残された過去の環境変動の記録を読みとることは, 地球規模での環境変動を解明するための重要な研究課題の一つである. 南極科学委員会 (SCAR) は, 南極氷床上の広域多点で採取された浅層コアから過去の環境因子の変動記録を得ることを国際共同研究として推進することを決めた. この国際共同研究は「国際南極横断観測計画」(ITASE: International Trans-Antarctic Scientific Expedition) として12ヶ国が参加し,

実施することになった (ITASE: planning document, 1992). 日本においても1992~97年に実施した南極氷床ドーム深層掘削観測計画の終了後, 南極観測第V期五ヶ年計画 (1997~2002) 期間中の研究課題「南極氷床変動システムの研究」の中の一つの課題「最近数百年間の表面質量収支の変動」として研究が進められている (極地雪氷分科会将来計画委員会, 1997).

ITASE計画の重要な研究課題は, 過去数百年間程度の時間スケールにおける気候・環境因子を南極氷床の広域で求め比較し, 産業革命以降の人間活動の地球規模での影響を評価する事である. この目的のためには, 氷床中の同位体組成や化学主成分などを初めとする種々の要素を高精度で測定する必要がある. また, 広域のコアネットワークのデータを比較することから, タイムマーカーとなる示準層の検出や年代決定の高精度化が求められている. さらに, 可能な限り共通の分析項目を

1) 千葉大学環境リモートセンシング研究センター
〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1番33号

2) 国立極地研究所
〒173-8515 東京都板橋区加賀1丁目9番10号

3) 北見工業大学
〒090-8507 北見市公園町165番地

4) 北海道教育大学釧路校
〒085-0826 釧路市城山1丁目15番55号

5) 総合研究大学院大学
〒173-8515 東京都板橋区加賀1丁目9番10号

用いて、測定値が相互に比較できるようにすることが期待されている。本稿では、2本の南極浅層コア(H72, ドーム南)の基本解析(層位、密度、ECM, デジタルモザイク画像、非通気性係数、レーザートモグラフ、化学分析)で用いた測定方法および装置、解析作業を記述した。これは、藤井他(1989)で報告されていた従来の南極や北極域で採取された浅層コアの基本解析を基本として、その後新たに加わった分析項目や分析方法の変更をまとめて記述した事になる。なお、ここで浅層コアとは深さ約50~200m程度の雪氷コアを意味する。

1.1 ITASE 計画の最近の状況、成果および高精度測定

ITASEに関する会議は、二年に一回程度開催されており、そこでは各国の研究活動と成果が報告されている。最近では、1999年4月に米国、ニューハンプシャー州ダーハム市のニューハンプシャー大学で開催された(Mayewski and Goodwin, 1999)。ここでは、そこでの主要な報告事項を簡単に述べる。

会議では、地球規模の気候変動に対する南極氷床の応答と変動に関心が集まっていた。具体的には、南極氷床での過去数十年の表面質量収支(表面涵養量)の変動とエルニーニョ南方振動(ENSO)や環南極波動(ACW: Antarctic Circumpolar Wave)が強く相関しており、ENSO・南極気候テレコネクションの存在の可能性を指摘する研究、また、南極点コアの解析からENSOを西暦1500年まで遡る研究、などである。さらに南極点の年平均気温と南方振動指数(SOI)の前年の年平均値と正の相関があり、エルニーニョ期間中にメタンスルホン酸(MSA)濃度が増加することも示され、海水の広がりやMSAの強い相関が報告された。一方、コアの酸素や水素同位体比の解析から、南極半島やクイーンモードランドでは、過去数十年間でおおよそ1°Cの温暖化が起こっていることが報告された。以上のように、ITASEによる広域コアネットワークの研究成果は、最近のENSOと南極氷床を取り囲む南半球の大気・海洋の年々さらに数十年スケールの気候変動を明らかにしてきている。

このように広域コアネットワークの成果は、熱

帯と高緯度の気候・海洋現象のリンクを明らかにすることが期待されているが、このためには、コアの年代決定の高精度化が非常に重要となる。従来、酸素や水素の同位体組成、化学組成、固体微粒子の季節変化を利用した年層識別が行われてきたが、このデータは年代が分かっている火山噴火や放射性降下物の堆積年代によって修正する必要がある。コアの年代決定の方法論については、藤井・河野(1999)のレビューがあるので本稿ではふれないが、多くの南極コアで検出されている火山噴火を表1にまとめた。ここでは、火山噴火規模の指標として、VEI(Volcanic Explosivity Index; Newhall and Self, 1982)とDVI(Dust Veil Index; Lamb, 1972)の値を併記した。

Year	Volcano	Country	VEI	DVI
1993	Lascar	Chile	-	
1991	Pinatubo	Philippines	-	
1991	Cerro Hudson	Chile	-	
1982	El Chichon	Mexico	-	
1972	Deception	South	-	(200)
1969	Island	Shetlands		
1967				
1963	Agung	Indonesia	4	800
1932	Cerro Azul	Argentina	5	
1902	Santa Maria	Guatemala	6	600
1886	Tarawera	New Zealand	5	
1883	Krakatau	Indonesia	6	1000
1835	Coseguina	Nicaragua	5	4000
1831	Babuyan	Philippines	-	300
1822	Galunggung	Indonesia	5?	500
1815	Tambora	Indonesia	7	3000 (4400)*

* 1811~1818年における総量に換算。

表1 コアネットワークで示準層になる火山噴火と年代。

Table 1 Major volcanic eruptions detected in Antarctic ice cores.

1.2 浅層コアの基本解析項目

浅層コア解析の基本解析は、コアに含まれている主要な堆積環境情報の変動傾向を明らかにし、コア年代を確定することが目的であり、研究グループとして実施した。表2に解析に用いたドーム南コアとH72コアの採取地点や平均表面質量収支などをまとめた。ここで、ドーム南コアの表面質量収支は、ドームふじ浅層コアのECMの測定結果(Watanabe *et al.*, 1997a)との比較から求めた。H72コアでは、本稿2.4節の3)のECM値の周期的変動から求めた。

表3にこれら2本コアで実施する基本解析項目

表2 解析したコアの概要.
Table 2 Basic data for ice cores (DFS, H72) used in this study.

採取地点名	ドーム南 (DFS) (79° 00'S, 42° 30'E, 3710m)	H72 (69° 12'17"S, 41° 5'26"E, 1214m)
採取年 (観測隊次)	1997 年 (第 38 次南極観測隊)	1998 年 (第 39 次南極観測隊)
深さ (m)	56.435	73.285
表面質量収支 (mm yr ⁻¹ in water eq.)	24	300
コア底の推定年代	AD800	AD1825

をまとめた. これらの解析項目は, コア全層にわたって連続的に測定する「連続解析」と一部分の深度や一定間隔の深度のみで測定する「特定解析」に分けた. 化学分析は, 連続解析では 15 ~ 20 cm を基本とした. 73.285 m の H72 コアの場合, 446 サンプルになった. 1 試料の長さを短くするとデータの分解能は向上するが, 測定サンプル数が増え, 測定に要する時間がかかる. ここでは, 分析能力と測定に要する時間とを勘案し, サンプル間隔を 15 ~ 20 cm と決めた. H72 コアでは 1 サンプルで半年から 1 年程度 (年層 1 ~ 2 サンプル) に相当し, ドーム南コアでは 1 サンプルで 10 ~ 15 年 (年層 0.06 ~ 0.1 サンプル) に相当する. また, 年層検出を目的として, H72 コアでは 4 つの深さで合計 5.5 m 分を 5 cm 間隔で分析した (サンプル数 121). 一方, 全層にわたる詳細な分析や基本解析以外の解析項目は, 研究解析として基本解析終了後に実施する.

なお, ITASE で提案されているコアの「基本解析」および「研究解析」を表 4 に示す (Mayewski and Goodwin, 1996 の Table 1, 2 から作成). 表 3 に示した H72 コアとドーム南コアの基本解析項目は, 表 4 の「基本解析」と必ずしも一致しないが, 表 3 ではコアから主要な堆積環境情報を抽出

するために必要な項目を取り入れた. また, 表 3 には最近開発された解析項目 (非通気性係数, レーザートモグラフ) も取り入れた.

表3 浅層コアの基本解析項目.
Table 3 Basic analyses for shallow ice cores.

解析種別	項目
連続解析	層位 (目視記録、画像による記録)、密度、ECM、レーザートモグラフ、酸素同位体・化学主成分・電気伝導度、pH・過酸化水素 (15~20cm 間隔)
特定解析	化学詳細分析 (1.5m 長を 5cm 間隔で 3 深度)、放射性同位体 (トリチウム)、非通気性係数

2. 基本解析の方法

2.1 コアの切断

南極氷床で採取されたコアは, 掘削直後に現地で 50 cm 毎に切断され, 国内へ輸送される. これらのコアは, 基本解析および研究解析で使われる A コア, 保存用 B コア, 化学分析用 C コア, 研究解析用 D コアに分割した. H72 コアの分割方法を図 1 に示す. その切断割合は, A コア 35 %, B コア 25 %, C コア 20 %, D コア 20 % とした. 保存用 B コアは, 今後新たに開発される測定項目の

表4 ITASE で採取するコアの基本解析および研究解析.
Table 4 Standard and research ITASE ice core analytical elements.

基本解析	研究解析
<ul style="list-style-type: none">・ 物理解析 (層位、密度、結晶粒径、結晶形状、結晶の配列、C 軸方位分布)・ ECM・ 酸素および水素同位体組成・ 化学主成分 (Ca, Mg, Na, NH₄, K, Cl, SO₄, NO₃) およびその他の化学成分 (F, I, Br, MSA, H₂O₂, HCHO)・ 固体微粒子濃度・ ガンマ線およびベータ線	<ul style="list-style-type: none">・ 宇宙線起源同位体 (¹⁰Be, ³⁶Cl, ²⁶Al)・ 放射性元素・ 火山灰分析・ 微量元素 (Se, Pb, Hg, V, Mn)・ 微量元素 (Cs, Rb, Ba, Sr)・ 同位体 (Nd, Sr, Pb)・ 気体微量成分 (CO₂, CH₄, N₂O, CFC's, CO, methyl-halides)・ 生物起源物質 (花粉、珪藻)・ 生物化合物 (DMSO, DMSO₂)・ 有機酸

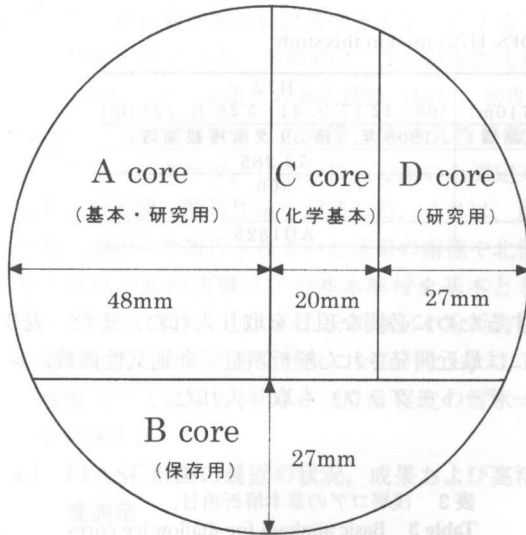


図1 コアの切断方法 (H72 コア).

Fig. 1 Core cutting plan for H72 ice core.

ために保管するものであるが、ドームふじ深層コア（60%が保存コア）に比べ、上記の保存用Bコアは切断割合が少ない。これは、新たな測定項目のために多くのサンプルが必要になった時には、浅層コアは深層コアに比べ、比較的容易に再び採取することが可能なためである。

図2に基本解析時の低温室内におけるコア処理の流れを示す。これに沿って、低温室内でコアが分割され、基本解析が実施された。以下の章でそれぞれの解析項目で使用した解析方法および装置を記述する。なお、ドームふじ観測拠点での深層

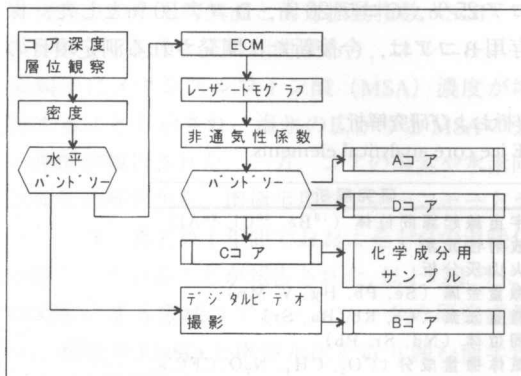


図2 基本解析におけるコアの流れ (低温室内).

Fig. 2 Flow chart of ice core processing in the cold room.

コアの解析作業については、南極雪氷調査指針(1995), Shoji *et al.* (1994) に記述されている。

2.2 層位

コアの層位は、ライトテーブルを用いて観察する。ライトテーブルの上にコアを置くと、コア中の氷板やクラスト層、結晶粒径の違いなどを直接観察することができる。観察結果は、実寸でライトテーブルの下に置いた記録用紙に書いた(図3に30 cm分を示す)。これは、25 cm単位に折っており、1部で25 m分を記録することができる。また、上部に深さをメートル単位で記入する欄があり、そこに深さを書き込みながら、層位の記録を取る。また、0.1 m単位で数字が印刷してあり、低温室での層位観察中に深さの書き間違えが起らないように配慮してある。

今後の改良点としては、25 cm単位に織り込んだ部分にミシン目が入っており、ここから切れやすくなっているのをこれをなくす事、さらに野外での利用を考慮した記録紙の防水紙化などが挙げられる。

2.3 密度

コアの密度は、電子天秤とノギスを用いて測定する。電子天秤は、最大秤量6 kg、分解能1 gのもの(例えばシマズ, EL-6000など)をAC電源で使用する。秤量部には、円筒形のコアが転がらないように断熱材などで回り止めをつける。また、コアは直径が95 mm前後であるので、最大径を

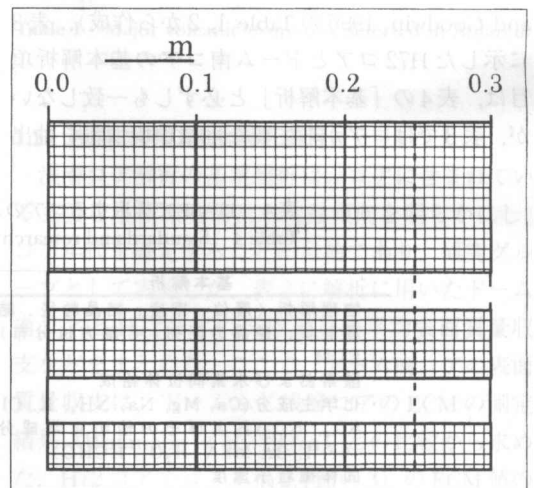


図3 層位記載のための記録用紙.

Fig. 3 Core logging chart.

ノギスで測定するためには、47.5 mm 以上の長さの測定部（内径用ジョウ）が必要である。通常のノギスではこれが40 mm のものが多いので、カーテンレールなどに用いるアルミチャンネル（幅3.5 mm）を継ぎ足し、50 mm 程度に伸ばして使用した。

2.4 ECM

ECM (Electrical Conductivity Measurement) とは、1970 年代にコペンハーゲン大学のグループが開発した手法である (Hammer, 1980)。氷表面の2点に高電圧電極を接触させ、その間に流れる電流値を測定し、氷中に存在する水素イオン濃度を明らかにすることができる。ここでは、直流型 ECM (DC-ECM) の測定方法および装置について説明する。

1) 測定装置の構成

今回、用いた ECM の測定系は、図4に示すように、ポテンシオメータが備わった ECM 測器と高圧電源（東亜工業製 DPT-8751）、ECM-AMP、デジタル・マルチメーター（ADVANTEST, R6451）、パソコン（IBM 製）、XYレコーダー（GRAPHTEC, WX1200）で構成されている。

ECM 本体はコアホルダーが幅 11 cm、縦 120 cm、高さ 6 cm で、電極を走査する架台にマイクロトームが備え付けられている。電極は真鍮製であり、2本の電極の間隔は 40 mm、氷と接触す

る電極の先端の直径は 1 mm である。電極の上に 250 g の重りを載せ、氷表面と電極間の接触を良くした。ただし、フィルン層の密度が小さい部分では、電極が試料中に埋まるため、重りは使用しなかった。ECM 測定値の記録はドームふじ深層掘削で使用された ECM-AMP (Ohi and Narita, 1996) とデジタルマルチメータを使用した。また、パソコンによるデジタル値の記録とともにアンプから直接 XY レコーダーに記録する方法をとり、解析現場で容易に結果を確認できるクイック・ルック仕様とした。

高圧電源装置は 3 kV まで出力可能な電源装置を使用し、1250 V の電圧を使用した。この電源装置は、RESET ボタンと TEST ボタンが備え付けられ、測定毎に主電源を切る必要がない点が利点としてあげられる。

ECM-AMP は、ECM のシグナルを増幅するためのアンプである。ECM-AMP は Head-Amp と ISO-Amp から構成されており、電源は 12 V のバッテリーを使用する。Head-Amp では、高入力抵抗 $10^{13} \text{ } (\Omega)$ 、超入力バイアス電流 150 (μA)、低オフセット電圧 0.5 (mV) のオペアンプを使用し、入力した電流を電圧に変換する。その後、ISO-Amp 基盤の前段に使用したアイソレーション・アンプの内部で入力側と出力側を絶縁させ、フローティング回路を採用することにより、絶縁性を

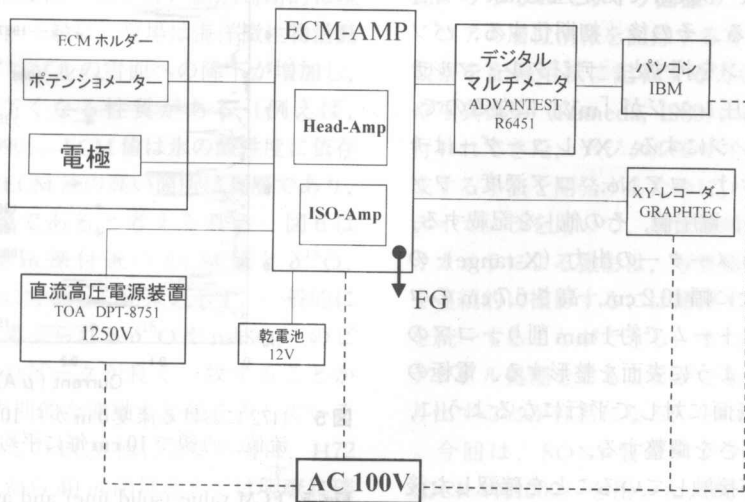


図4 ECM測定装置の構成。点線はAC100Vの供給である。

Fig. 4 Configuration of ECM instruments. Dotted lines show 100V power supply.

良くした。このECM-Ampでは、入力電流 $20\mu\text{A}$ に対し 5V まで出力電圧に変換できる。

ECM測定は、まず最初にパソコンを立ち上げる。ECMソフトウェアの初期化を行った後に計測を始める。デジタル・マルチメータの出力電圧レンジは、AUTOレンジと任意の単位に設定できるレンジがあるが、ECMソフトウェアの初期化を行うと自動的に「mV」のレンジに固定される。「mV」レンジでは出力電圧が 2V 以上になると、デジタル・マルチメータには出力電圧が表示されなくなる。AUTOレンジでは、出力電圧が 2V を超えると自動的に「mV」から「V」レンジに切り替わり、 1000V まで測定できる。不純物濃度の高い雪氷コアは出力電圧が 2V 以上になる場合があるので、今後この装置でECM測定を行う時は出力電圧の測定レンジをAUTOにする必要がある。

記録に使用したパソコンはIBM製で、使用したソフトはVisual C++ (マイクロソフト社) を用いて作成し、インターフェースはGPIBボード (REX-5052, ラトックシステム (株)) を用いた。GPIBボードはデジタル処理を行う際に、デジタル・マルチメータからパソコンへの転送速度が早く、分解能が高くなる事が利点である。

2) ECMの測定方法

初めにパソコンとXYレコーダーの記録の準備を行う。パソコンはソフトを立ち上げた後、ファイル名と測定回数 (50 cm で測定速度 fast の場合 400 回) を確認する。その後、初期化する。パソコンの初期化ボタンを押すと、デジタル・マルチメータの出力電圧レンジが「mV」になるので、それをAUTOレンジにする。XYレコーダーはチャート紙に「日付け、コアNo., コア深度、ファイルNo., Y-range, 電圧値, その他」を記載する。また、ポテンシオメータの出力 (X-range) の幅を調節する。次に幅 10.2 cm 、高さ 6.7 cm のコアの表面をミクロトームで約 1 mm 削り、コアの表面が平らになるように表面を整形する。電極の接触面がコアの表面に対して平行になるように、設置する電極の高さを調整する。

氷表面に電極が接触していることを確認した後、高圧電源装置のTESTボタンを押して 1250 V の電圧をかける。XYレコーダーのX-rangeとY-

rangeのボタンを測定にした後、パソコンの「計測」をクリックし、電極を走査する。電極の走査速度は氷の電気的特性である空間電荷を考慮し、 1 cm/sec を目安とした。ECM測定は可能な限りレンジを上げて2回測定し、再現性を確認した。

ECM測定を行う際に注意する点は、測定時の環境温度である。ECM電流は、温度依存性があるため一定の低温下の条件で測定するのが良い (例えば, Taylor *et al.*, 1992)。今回のECM測定では、コアは低温室に保存されていたので、コアの温度は一定 (-20°C) であった。

3) ECMの測定例

H72コアのECM測定例を図5に示す。深度は表面から 10 m であり、ECM値は測定データ (実線) および 10 cm 毎の平均値 (点線) を示す。こ

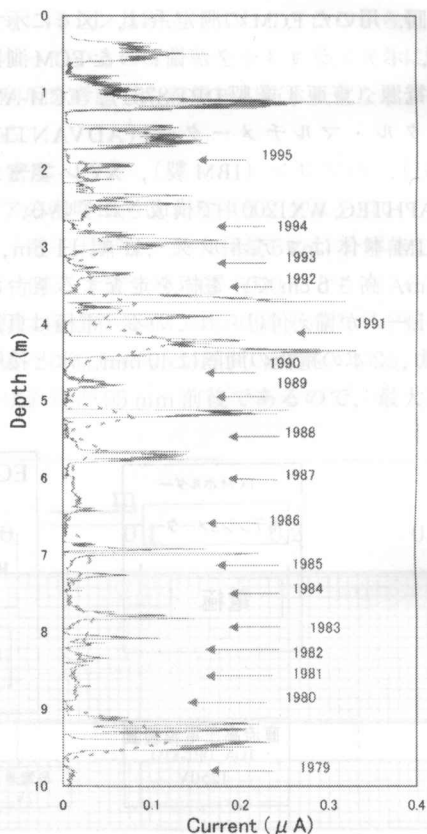


図5 H72における深度 0 m から 10 m までのECM電流値。点線で 10 cm 毎に平均したECM値を示す。

Fig. 5 ECM value (solid line) and average ECM value (10-cm core segment; dotted line) between 0 m to 10 m depth for H72 ice core.

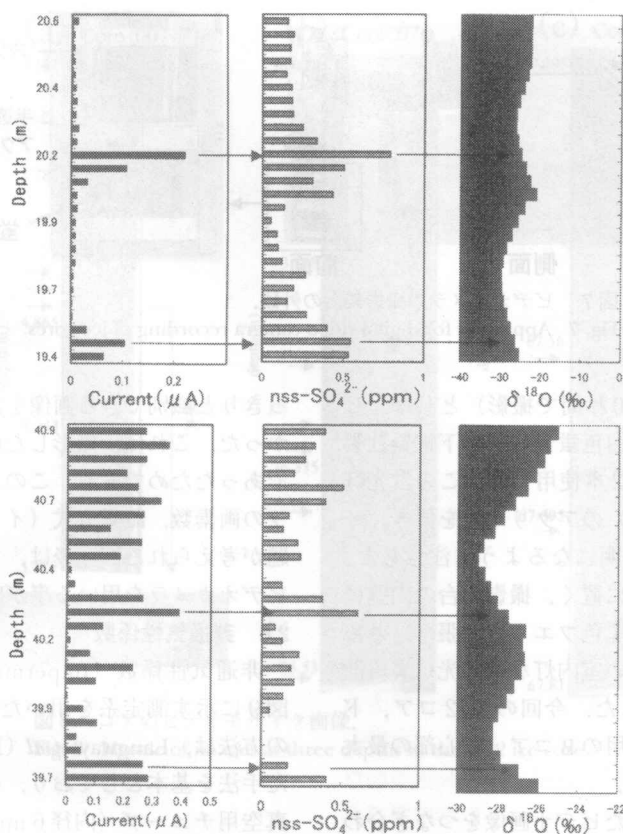


図6 H72におけるECM電流値と化学成分(nssSO_4^{2-} , 酸素同位体比)との関係。

Fig. 6 Relation between ECM current values and chemical composition (nssSO_4^{2-} , $\delta^{18}\text{O}$) of H72 ice core.

の図から ECM 値は高い値と低い値が周期的に現れる事がわかる。一般に、夏場は海洋微生物活動による硫酸エアロゾルの雪面への降下が増加し、雪の酸性度が高くなる性質がある（例えば、Kohno *et al.*, 1999）。ECM 値は氷の酸性度に依存しているため、ECM 値の高い箇所は夏層であり、低い部分は冬層であると考えられる。図6は20 m および 40 m 深付近の ECM 値と $\delta^{18}\text{O}$, nssSO_4^{2-} を詳細に分析した結果を示す。一般的に年層シグナルと考えられる $\delta^{18}\text{O}$ や nssSO_4^{2-} のピークと ECM 値のピークが良く一致することから、ECM 値の周期的な変動も年層を表していると考えられる。この ECM 値による年層は、H72 のコアでは表面から 40 m 深付近までは明瞭に確認できた。それ以深では ECM 値のレベルが減少するために、年層ピークの確定が難しくなった。

2.5 デジタルモザイク画像

コアの層位情報を記録する方法に、目視による観察を記録用紙に記載する方法 (Nishio, 1984) や写真撮影 (Kameda, 1989)、ビデオ撮影などが行われてきた。デジタルモザイク画像を簡便に作成する手法を開発するために、市販のデジタルビデオカメラを用いて、層位情報を記録した。ビデオカメラによる撮影は、写真撮影に比べ長いコアを連続的に撮影するには簡便であり、画像の輝度を統一することができる。また、記録した画像はデジタル処理をすることができ、任意の部分を取り出すことが容易になる。(直木他, 1998)。

今回は、SONY 製のデジタルビデオカメラ (DCR-VX1000) を用いた。図7に示すような撮影架台を作成し、上部から手でビデオカメラを走査させ撮影を行った。走査速度は約 16 mm/秒

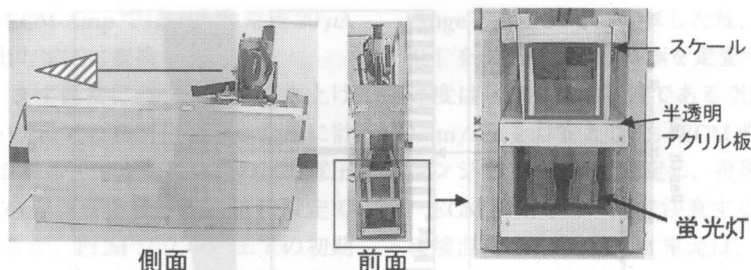


図7 ビデオカメラの撮影架台の外観。

Fig. 7 Apparatus for digital video camera recording of ice cores.

(コア長500 mmを約30秒間で撮影)とした。ビデオカメラの光源には白色蛍光灯(松下電器社製FL20 SS・EX-D/18)を2本使用した。この蛍光灯の上に半透明(乳白色)のアクリル板を置き、一様な明るさをもった照明になるように注意した。コアはアクリル板の上に置く。撮影架台の内壁には散乱光を防ぐために黒色フェルトを張り、さらに暗幕で装置全体を覆い室内灯などの光による散乱光の影響を少なくした。今回のH72コア、ドーム南コアでは、保存用のBコア(中心部の最大厚27 mm)を使用した。

次に、コアを撮影したビデオ画像をつなぎ合わせるにより、コアの層位情報としての「モザイク画像」を作成した。これは、パソコン(SONY, VAI0 PCV-S600)のDV入出力用端子からビデオ画像(フレームレートは30フレーム/秒)を入力し、保存した後に、画像データを織田(1998)が開発したビデオモザイク作成ソフトにより連続的に画像を接合して作成した。

図8には、H72の3つの深度における長さ約50 cmのモザイク画像を示す。(a)のモザイク画像には、厚さ約1 mmの4枚の氷板が存在している(左側の矢印)。深さ4.865 mの氷板を拡大すると、3枚の氷板が重なっている多重クラスト層(Multi-layered crust; Watanabe, 1978)である事がわかる。(b)ではコアには厚さ約1 mmの氷板が8枚あり、傾斜している氷板の様子も確認できる。(c)では深さ67.385 m, 67.56 m, 67.695 mの3ヶ所でコアの明暗が変化していることが判別できる。この氷の明暗は、氷の粒径サイズにより、透過光の散乱が変化するために生じていると思われる。

今回のシステムでは、フィルンの組織(雪粒子の大きさや形状、また空隙の形状など)まで、は

っきりと識別できる画像を記録することができなかった。これは、撮影した画像の分解能が不十分であったためである。この原因としてビデオカメラの画素数、記録方式(インターレス方式)の問題が考えられる。今後は、プログレッシブ方式のビデオカメラを用いる事が望ましい。

2.6 非通気性係数

非通気性係数(Impermeability)の測定には、図9に示す測定系を用いた(Kameda, 1994)。この方法は、Langway *et al* (1993)により報告された手法を基本としており、小型ポンプにつなげた真空用チューブ(内径6 mm, 外径18 mm)の端の「測定点」をコア表面に密着させ、その時のチューブ内の大気圧からの減圧量(ΔP)を小型圧力計(横河電気製, FP101型)で測定する。ここで、圧力計は直流(12 V)で動作し、 ΔP に比例した電圧(V)を出力するので、小型デジタルテスターを電圧出力用に使用した。コアの非通気性係数を測定する際には、通気性がないもの(例えば、機の表面)に測定点を密着させた時のテスター表示値(V_c)および測定点が解放されている時のテスター表示値(V_o)を記録した。コアにチューブを密着させた時の大気圧からの減圧量を ΔP 、通気性がないものに対する減圧量を ΔP_c とおくと、以下の式でコアの非通気性係数(IMP)を定義した。

$$IMP(\%) = \Delta P / \Delta P_c \times 100$$

ここで、テスターで測定される電圧値(V, V_c, V_o)を用いると、IMP(%)は以下の式で計算できる。

$$IMP(\%) = (V_o - V) / (V_o - V_c) \times 100$$

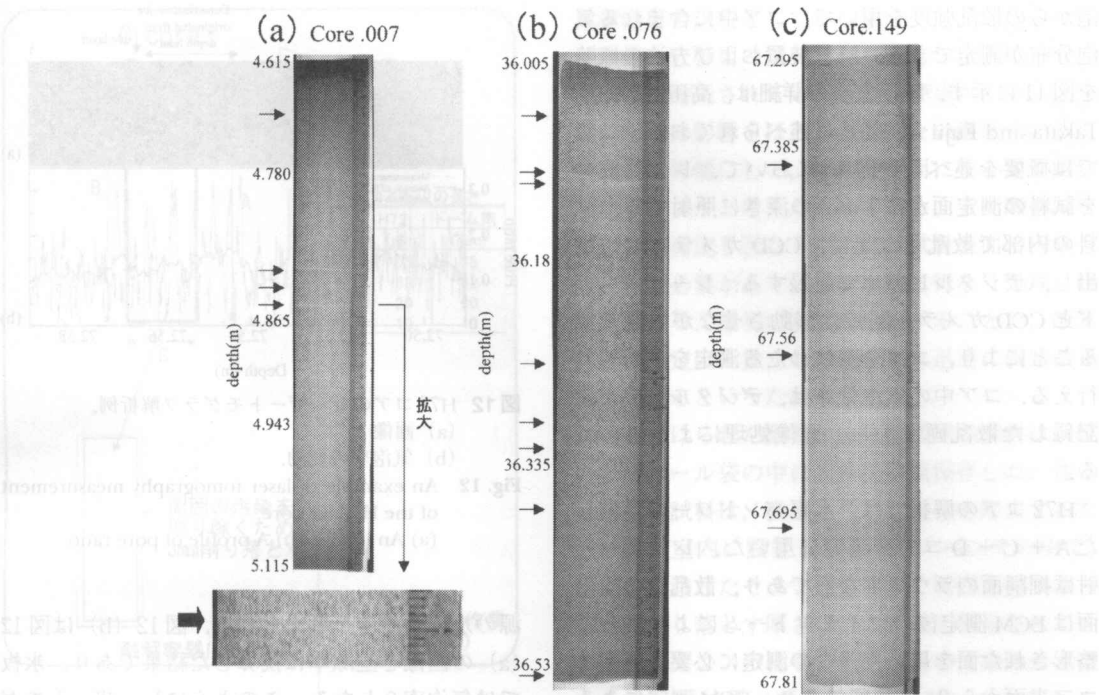


図 8 コアのビデオモザイク画像.
Fig. 8 Mosaic of images at three depths in the H72 ice core.

なお、Vは、コアに対する（テスター表示値）である。

IMP が 100 % になると、フィルン中を空気が通過しなくなること（氷化）を意味し、0 % では空気がフィルン中を通過する時に何ら抵抗がないことを意味する。つまり、非通気性係数とは、フィルン中の空気の通過抵抗を意味しており、フィルン中の氷粒子間の空隙の直径、数、屈曲度などに

依存している。図 10 に H72 コアの非通気性係数の測定結果（56 ～ 70 m 深）を示す。H72 コアは、58 m 深から氷化し始め、氷化部分と未氷化部分が互層となり、63 m 以深では多くが氷化している（IMP = 100 %）ことがわかる。

2.7 レーザートモグラフ

気泡が含まれる雪氷コアのレーザートモグラフによる解析では、レーザー光をコアに照射し、気

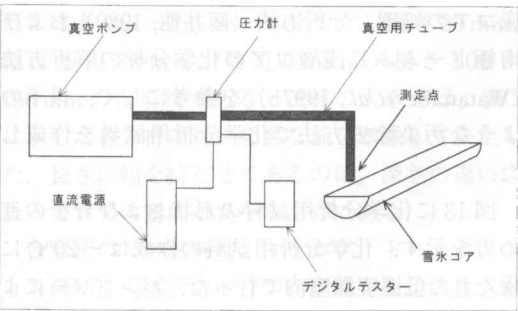


図 9 非通気性係数の測定系.
Fig. 9 Impermeability measurement system.

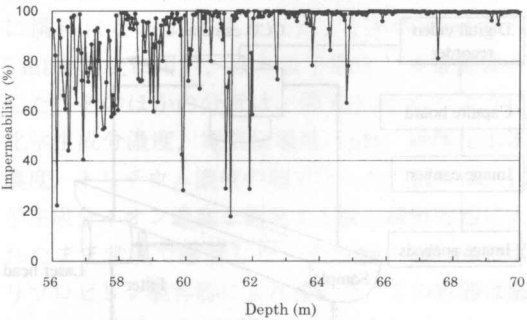


図 10 非通気性係数の測定結果（56 ～ 70 m 深）.
Fig. 10 Results of impermeability measurements for H72 ice core (56 to 70 m in depth).

泡からの散乱強度を用いて、コア中に含まれる気泡分布が測定できる。解析装置および方法の概略を図11に示す。解析方法の詳細は、高田(1999)、Takata and Fujii(2000)に述べられており、ここでは概要を述べる。図11において、レーザー光を試料の測定面から1 mmの深さに照射する。試料の内部で散乱した光は、CCDカメラを用い検出し、デジタルビデオで記録する。レーザーヘッドとCCDカメラを同時に移動させながら測定することにより、コア全長にわたる測定を連続的に行える。コア中の気泡分布は、デジタルビデオに記録した散乱画像から、画像処理により得られる。

H72 コアの解析では、水平バンドソーで半割したA + C + D コアを測定に用いた。レーザー入射は掘削面のラウンドな面であり、散乱光の検出面はECM測定後のマイクロトームにより平らに整形された面を用いた。この測定に必要な範囲はコア表面から2 cm程度であり、ECM測定によるコア表面中央部付近の電極の傷跡は測定に影響しなかった。レーザー入射深さが試料の全長にわたり試料表面から1 mmとなるよう調整が必要であった。測定に要する時間は、50 cm長のコアで約100秒である。

図12にH72 コアの72 m 深の測定例を示す。図12(a)はレーザートモグラフィ解析により得られた画像である。白い部分が気泡であり、黒い部分が氷である。図12(a)より1.4 mm 幅の水板が検出されていることが分かる。また、気泡分布は1本のコア中でも異なることが分かる。特に、大きな気泡が存在している部分は、しもざらめ起

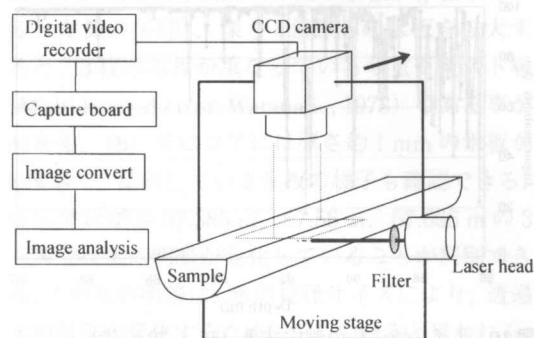


図11 レーザートモグラフィ装置。

Fig. 11 Laser tomography measurement system.

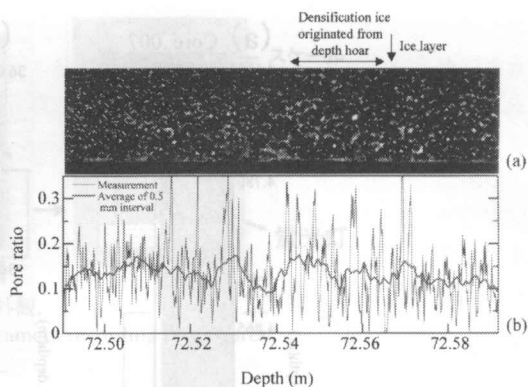


図12 H72 コアのレーザートモグラフィ解析例。

(a) 画像

(b) 気泡率の変動。

Fig. 12 An example of laser tomography measurement of the H72 ice core.

(a) An image. (b) A profile of pore ratio.

源の水層であると考えられる。図12(b)は図12(a)の画像を空隙率に換算した結果であり、氷板では気泡率0となる。このようにレーザートモグラフィ測定は氷化以深のコアの堆積構造を気泡分布の情報として迅速に明らかにすることが可能である。

2.8 化学分析

1) コア整形の方法

雪氷コアの表面は掘削されてから化学分析用の試料を作成するまでにさまざまな汚染を受けている。したがって分析機器にかけ前に適切な方法で汚染を取り除く必要がある。南極浅層コアの基本解析では酸素同位体組成、化学主成分(無機イオン、有機酸イオン)濃度、電気伝導度、pH、トリチウム、過酸化水素を分析した。分析方法は、南極東クィーンモードランド地域で掘削された氷床コアの処理・分析方法(藤井他, 1989)および南極ドームふじ浅層コアの化学分析の解析方法(Watanabe *et al.*, 1997b)を参考にして、以下のような汚染除去方法で化学分析用試料を作成した。

図13に化学分析用試料の形状および分析の進め方を示す。化学分析用試料の作成は -20°C に保たれた低温実験室内で行った。バンドソーによって切り分けられた化学分析用コア試料(Cコア)の形状は、H72 コアでは厚さ20 mm、幅は短辺55 mm、長辺67 mm、長さは200 ~ 300 mmの台

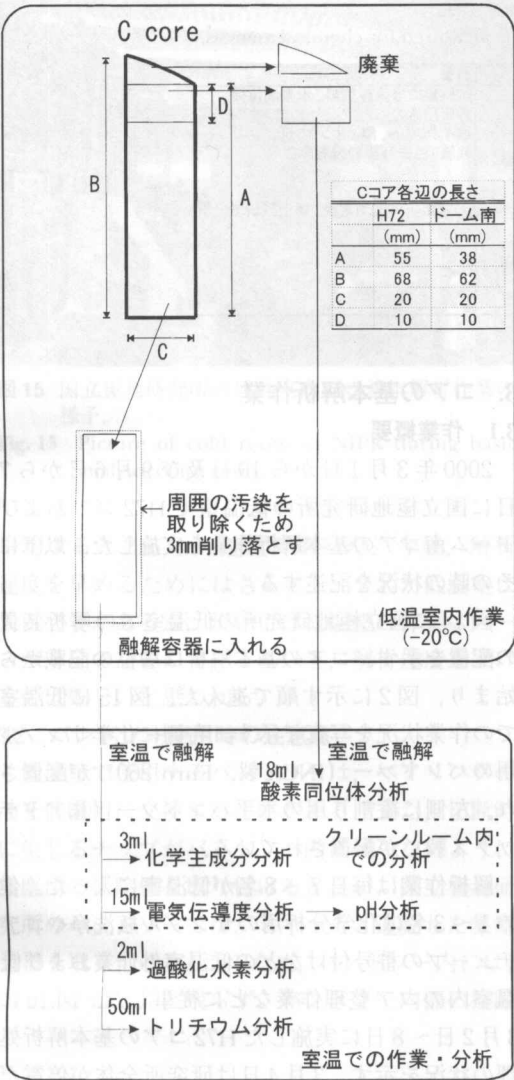


図 13 化学主成分測定系のフローチャート。

Fig. 13 Flow chart for chemical analysis.

形状であり、一方、ドーム南コアは厚さ 20 mm、幅は短辺 38 mm、長辺 62 mm、長さ 100 ~ 150 mm の台形状である。試料の大きさは、表 5 に示した各分析項目に必要な量を考慮して決定した。長さに幅を持たせてあるのは、深さの違いによってコアの密度が異なるためである。

台形状のコア試料は、H72 コア、ドーム南コアとも最初に円弧状のドリル切削面を長辺の長さが短辺の長さと同じになるように、バンドソーによって切り落とした。直方体になったコア試料は、ドリル掘削面に近い方から幅 10 mm を酸素同位

体測定用の試料としてバンドソーで切り分け、残りを他の分析用の試料とした。これはドリル掘削面が最も汚染されている可能性が高いため、測定値が汚染の影響をほとんど受けない酸素同位体の試料を外側にして、他の分析用に中心側の試料を使用しようと考えたためである。また酸素同位体以外の測定を行なうためには試料表面の汚染を除去する必要がある、分析以前に行なう処理に時間を要する。最初に試料を分割することで、酸素同位体測定のみ独立して進められ迅速に測定結果を得られるといった利点もある。

切り分けられた酸素同位体分析用の試料は、乾いたビニール袋の中に入れて冷凍保存した。他の分析用の試料は、表面についた汚染を除去するために低温室内に設置したクリーンベンチの中で、純水で洗浄したセラミック包丁で周囲を削り落とした。削り落とす厚さは、これまで報告されている南極氷床コアの化学分析用試料の汚染除去方法とその分析結果（藤井他, 1989; Watanabe *et al.*, 1997 b）より、3 mm 程度が妥当であると判断した。その後、あらかじめ純水で超音波洗浄をしておいた融解容器の中へ入れて、測定直前まで冷凍保存した。

2) 分析方法

化学分析用の試料は、酸素同位体測定用と他の化学分析用とに分割したので、それぞれ独立して分析を進めた（図 13）。表 5 に各種分析を行うために使用する測定機器をまとめた。

酸素同位体測定は、質量分析計（Delta-plus, finnigan-MAT）で行なった。試料は、少なくとも測定開始 3 ~ 4 時間前に冷凍庫から取り出し室温で融解した。融解試料は 9 ml のガラス瓶 2 本に満杯になるよう注入した。1 本の 9 ml から 5 ml を測定に用い、残りは予備として常温保存した。そのほかの分析は、図 13 に示したように化学主成分濃度、電気伝導度、pH、過酸化水素濃度、トリチウム濃度の順で行った。試料は、化学主成分イオン濃度を測定する前に融解容器に入れたまま常温で融解した。その後、100 ml のポリプロピレン製容器に入れ替えた。この容器は融解容器と同様、純水で超音波洗浄を施したものである。試料はトリチウム分析が終了するまで 4℃ 以下に保った。

表5 各分析に必要な試料の量と測定機器一覧.

Table 5 Sample amount and instruments measured for chemical analysis.

	試料量	分析機器	備考
酸素同位体	18ml	質量分析計 (Delta-plus, Finnigan-Mat)	試料量には保存試料、水素同位体 分析用含む
化学主成分	3ml	イオンクロマトグラフ (DX-500, Dionex)	陰イオン1ml、陽イオン0.5ml 共洗い、保存試料分も含む
電気伝導度	15ml	電気伝導度計 (Flow cell, TOA CG-90005PL)	
pH	(*)	pH計 (Flow cell, TOA GS-80B)	(*)電気伝導度測定後、同一試料で分析
過酸化水素	2ml	蛍光分光光度計 (kamiyama and Nakayama, 1992参照)	
トリチウム	50ml	液体シンチレーションカウンター (LSC-LBⅢ, アロカ)	

化学主成分濃度はイオンクロマトグラフ (DX-500, Dionex) で分析した. 今回測定の対象とする成分は, 陰イオンでは Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , F^- , NO_2^- , CH_3SO_3^- , HCOO^- , CH_3COO^- , $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$, PO_4^{3-} , 陽イオンでは Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NH_4^+ である. 分析方法は, 五十嵐他 (1998) に準拠した.

電気伝導度と pH は, 同一試料で電気伝導度・pH の測定が可能であるとする Watanabe *et al.* (1997 b) で報告された測定法を用いた. この分析法は藤井他 (1989) が pH 測定時に問題点としてあげている (1) pH センサーのガラス電極と比較電極使用上の問題, (2) 大気中の CO_2 が測定中にサンプル中へ溶解し pH の値に影響を及ぼす問題, を考慮したものである. (1) に対してはガラス電極と比較電極が分離したフロー・セル (東亜電波, GS-80 B) を用いることで対処した. (2) については, 試料を入れたボトルと電気伝導度測定用, pH 測定用のフロー・セルを順にタイゴンチューブでつなぎ, ポンプによって送液することで試料を空気に触れさせないようにした. 送液速度は電気伝導度セル, pH のフロー・セルの感度を考慮して $1.2 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ とした.

過酸化水素の分析は Kamiyama and Nakayama (1992) に準拠した. 南極氷床上のトリチウム濃度は, 沿岸域で濃度が低く, 内陸で高い傾向があり, 沿岸域の場合は濃縮して測定する必要がある (神山・五十嵐, 2000). H72 は, ちょうどその境界に位置するが, 本研究では低濃度の値については議論しないので, 神山 (1997) に従い, トリチウム濃度を測定した.

3. コアの基本解析作業

3.1 作業概要

2000年3月1日から10日及び9月6日から7日に国立極地研究所の低温室で H72 コアおよびドーム南コアの基本解析作業を実施した. 以下にその時の状況を記述する.

図14に国立極地研究所の低温室での解析装置の配置を示す. コアの基本解析は層位の記載から始まり, 図2に示す順に進んだ. 図15に低温室での作業状況を写真で示す. 右側に化学サンプル用のバンドソー (INCA 製, Euro 260) が配置され, 左側に縦割り用の水平バンドソー (株アデックス製) が配置されている.

解析作業は毎日7~8名が低温室に入った. 他の1~3名は化学分析用のサンプル瓶洗浄やコアチューブの番号付けなどの低温室外作業および低温室内のコア整理作業などに従事した. 図16に3月2日~8日に実施した H72 コアの基本解析処理の状況を示す. 3月4日は研究所全体が停電だったので, 基本解析は行なっていない. H72 コアの解析は6日間で終了したので, 平均すると 12 m/day で進んだ. 1日6時間 (9:30~12:30, 13:30~16:30) の解析作業を行なったので,

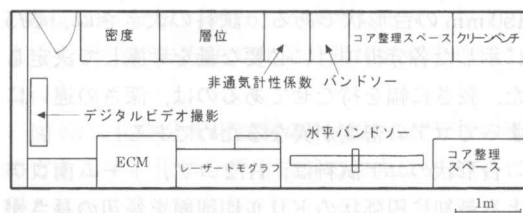


図14 国立極地研究所の低温室での測定装置の配置.

Fig. 14 Arrangements of analytical instruments for basic analyses of ice core in the Cold room at NIPR.

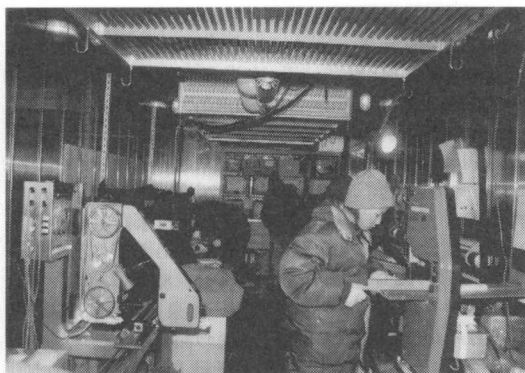


図15 国立極地研究所の低温室内での基本解析作業の様子。

Fig. 15 Picture of cold room in NIPR during basic analyses of ice cores.

平均すると2 m/hの速度であった。今後、解析速度を早めるためにはさらに1～2名が低温室に入る必要があるが、現状では低温室の作業スペースが十分でないで、これ以上、解析速度を上げるのは難しいと思われる。

3.2 バンドソー使用時の注意点

低温室で使用するバンドソーは、ベアリングの油を低温用に交換する必要がある。また、切断時に生じるチップがバンドソー内に残らないように集塵用の掃除機を取り付けると良い。国立極地研究所のバンドソーでは、スイッチと連動した集塵装置を取り付けた。このため、バンドソー内には、チップがほとんど残らず、バンドソー内部の掃除

は1日2回で済んだ。

図17に使用した水平バンドソーの写真を示す。これは、垂直ステージに取付けられたバンドソー、コアを固定し等速で動かす水平移動ステージ、それらを動かす制御回路から構成されている。バンドソーのスイッチを入れ、水平移動ステージの移動速度を調節し、コアがバンドソー刃を通過するとコアが縦割りに切断される。コア切断の厚さは、バンドソー刃の高さを垂直ステージで調節することにより変更可能である。コアの切削速度は2～40 mm s^{-1} の範囲で調節できる。浅層コアの場合、平均して約10 mm s^{-1} で切断した。コアを保持台にセットした後、縦割り切断は自動的に進むが、切断したコアの落下防止とバンドソー刃の破損対応のため、常時1人が監視した。なお、水平バンドソーの刃はあまり丈夫ではなく、20 m程度コアを切断した後で溶接部で破断する事が多く、刃を交換する必要があった。この装置は全てが制御回路によりコントロールされているため、低温室で使用するためには3日程度、事前に暖気運転をする必要があった。また、基本解析作業中も水平移動ステージが動かなくなる事やコア縦割り時の水平移動ステージ速度の微調整が難しいなどの問題があった。これらの問題のため、全ての移動ステージをより簡単な回路で制御でき、さらに水平移動ステージの速度が微調整可能な水平バンドソーを新たに開発する事が望まれる。

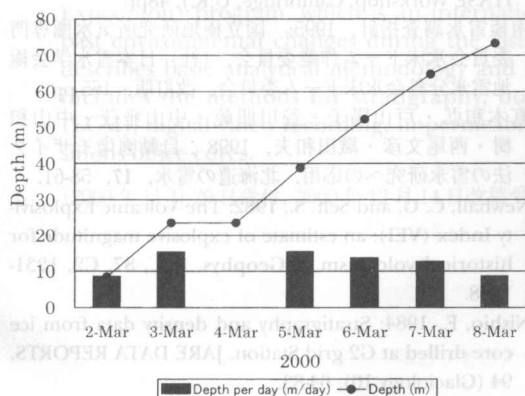


図16 コアの基本解析作業の状況 (H72コア, 2000年3月2日～8日に実施)。

Fig. 16 Ice core processing condition for basic analyses of H72 ice core (March 2-8, 2000).

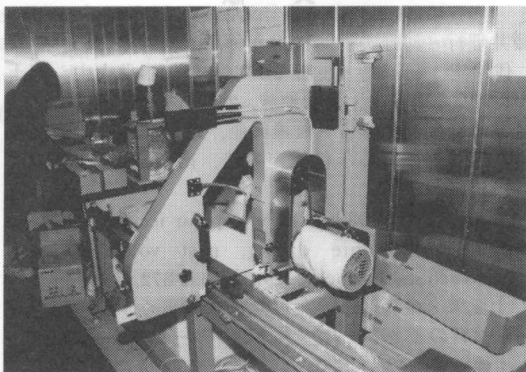


図17 水平バンドソー。

Fig. 17 Horizontal band-saw in the cold room at NIPR.

謝 辞

南極浅層コアの基本解析を実施するに当たり、さまざまな人の協力を得た。解析したドーム南コアとH72コアは、第38次南極地域観測隊(本山秀明, 川村泰史)および39次隊(山田知充, 鈴木啓助, 橋田元)が過酷な環境下で採取したものである。国立極地研究所で実施したコアの基本解析作業には、多くの人(山田知充, 奥山純一, 古川晶雄, 橋田元, 河野美香, 飯塚芳徳, 田上美枝, 石原成知, 佐藤和秀, 鈴木啓助, 白肌真由美, 渡辺幸一, 李院生)が参加した。本研究で使用したECM測定機器は北海道大学低温科学研究所の成田英器博士からお借りし、ECM-AMPは同研究所の大井正行氏が作成した。また、ECM測定の解析ソフトウェアは中山雅茂氏(東海大学大学院工学研究科光工学専攻)が作成した。デジタルビデオ撮影で使用したモザイク処理ソフトはアジア航測株式会社が開発した。レーザートモグラフィの解析システムの一部には小島鉄工所からの援助を受けた。国立極地研究所低温室のコア切断用バンドソーでの自動集塵装置は島田 互博士(当時国立極地研究所COE研究員, 現北海道工業技術研究所)が製作した。国立極地研究所の藤井理行教授からは、本稿に対して適切なコメントを頂いた。以上の皆様に深甚なる感謝の意を表します。なお、本研究には国立極地研究所共同研究費および文部省科学研究費(課題番号: 12680537, 代表者: 本山秀明・国立極地研究所)の補助を受けた。付記して謝意を表する。

文 献

藤井理行・河野美香, 1999: 極域氷河・氷床のコア年代決定 — 流動・圧密モデルと年代示準火山シグナルによる方法 —. 月刊地球, **26**, 163-173.

藤井理行・神山孝吉・渡邊興亜, 1989: 氷床・氷河のコア解析による年代推定方法. 南極資料, **33** (2), 156-190.

Hammer, C.U., 1980: Acidity of polar ice cores in relation to absolute dating, past volcanism and radio-echoes. *J. Glaciol.*, **25**(93), 359-372.

五十嵐誠・金森暢子・渡辺興亜, 1998: 少量の極域雪氷試料のイオンクロマトグラフィーによる化学分析. 南極資料, **42**, 64-80.

ITASE: planning document, 1992: SCAR Working Group on Glaciology. 24pp.

Kameda, T., 1994: A Study of Transformation Processes from Snow to Ice in Polar Ice Sheets. Ph.D. dissertation, Hokkaido University, 121pp.

Kameda, T., Kawamura, T., Fujii, Y. and Enomoto, H., 1989: Shapes and distribution of air bubbles in an ice cores from Aasgaardfonna, Spitsbergen. *Bull. Glacier Res.*, **7**, 221-226.

神山孝吉・五十嵐誠, 2000: 極域各種氷試料中の低濃度HTO測定のための電解濃縮を含めた液体シンチレーション法の検討. 南極資料, **44**, 83-96.

神山孝吉・島田 互・北島豪一・和泉 薫・江角周一, 1997: 雪氷試料中のHTO濃度の測定法と極域雪氷圏堆積環境研究への適用. 南極資料, **41**, 631-642.

Kamiyama, K. and Nakayama, E., 1992: Determination of hydrogen peroxide in snow: Preliminary results for snow samples in the inland region, Antarctica. *NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **5**, 113-119.

Kohno, M., Fujii, Y., Kusakabe, M. and Fukuoka, T., 1999: The last 300-year volcanic signals recorded in an ice core from site H15, Antarctica. *Seppyo*, **61**, 13-24.

極域雪氷分科会将来計画委員会, 1997: 南極氷床変動システムの研究. 雪氷, **59** (1), 11-22.

Lamb, H.H., 1972: Climate: Present, Past and Future. Fundamentals and climate now, Vol.1, London, Methuen and Co. Ltd., 613pp.

Langway, C.C.Jr, Shoji, H., Mitani, A., Clausen, H.B., 1993: Transformation process observations of polar firn to ice. *Ann. Glaciol.*, **18**, 199-202.

Mayewski, P.A. and Goodwin, I.D., 1999: Antarctic's Role Pursued in Global Climate Change. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 80, No. 35, Aug. **31**, 398-400.

Mayewski, P. A. and Goodwin, I.D., 1996: International Trans-Antarctic Scientific Expedition (ITASE), "200 Years of Past Antarctic Climate and Environmental Change, Science and Implementation Plan 1996". *PAGES Workshop Report Series 97-1* (Report from the ITASE Workshop, Cambridge, U.K.), 48pp.

南極雪氷調査指針, 1995: 国立極地研究所気水圏専門委員会氷床ドーム作業委員会, (社)日本雪氷学会極域雪氷分科会氷床ドーム委員会, 改訂版, 165 pp.

直木和弘・戸山陽子・谷川朋範・中山雅茂・中山和樹・西尾文彦・織田和夫, 1998: 自動画像モザイク法の雪氷研究への応用. 北海道の雪氷, **17**, 58-61.

Newhall, C. G. and Self, S., 1982: The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.*, **87**, C2, 1231-1238.

Nishio, F., 1984: Stratigraphy and density data from ice core drilled at G2 grid Station. *JARE DATA REPORTS*, **94** (Glaciology 10), 64-83.

織田和夫・近藤 剛・尾崎昌芳・土居原健, 1998: LM法による画像の自動モザイク. 写真測量とリモートセンシング, **37** (3), 42-51.

Ohi, M. and Narita, H., 1996: Development of high-performance amplifier of ECM-system for ice core analysis

- and data management. *Nankyoku Shiryo (Antarctic Record)*, **40**(3), 307-313.
- Shoji, H., Narita, H., Fujii, Y., Kamiyama, K. and Azuma, N., 1994: Ice core processing at Dome F, Antarctica. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **49**, 291-297.
- Takata, M. and Fujii, Y., 2000: A Laser tomograph technique for ice core stratigraphy analysis. *Polar Meteorol. Glaciol.* **14**, 16-26.
- 高田守昌, 1999: レーザートモグラフによる極域雪氷コアの微細堆積構造の解析, 総合研究大学院大学博士論文. 77 pp.
- Taylor, K., Alley, R., Fiacco, J., Crootes, P., Lamorey, G., Mayewski, P. and Spencer, M., 1992: Ice-core dating and chemistry by direct-current electrical conductivity. *J. Glaciol.*, **38**, 130, 325-332.
- 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. 1997a: A preliminary study of ice core chronology at Dome Fuji Station, Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **11**, 9-13.
- Watanabe, O., Kamiyama, K., Motoyama, H., Igarashi, M., Matoba, S., Shiraiwa, T., Yamada, T., Shoji, H., Kanamori, S., Kanamori, N., Nakawo, M., Ageta, Y., Koga, S. and Satow, K., 1997b: Preliminary report on analyses of melted Dome Fuji ice core obtained in 1993. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **11**, 14-23.
- Watanabe, O., 1978: Stratigraphic studies of the snow cover in Mizuho Plateau. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **7**, 154-181.

Basic analytical procedure for Antarctic shallow ice cores: methodology and instrumentation

Fumihiko NISHIO¹⁾, Makoto IGARASHI²⁾, Takao KAMEDA³⁾, Hideaki MOTOYAMA²⁾,
Kazuhiro NAOKI⁴⁾, Morimasa TAKATA⁵⁾, Yoko TOYAMA⁴⁾ and Okitsugu WATANABE²⁾

1) Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University

1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

2) National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515

3) Kitami Institute of Technology, 165, Koen-cho, Kitami, 090-8507

4) Hokkaido University of Education, Kushiro Campus, 1-15-55, Shiroyama, Kushiro 085-0826

5) The Graduate University for Advanced Studies, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515

Abstract: Japanese Antarctic Research Expeditions (JAREs) have collected shallow ice cores in East Queen Maud Land during the last two decades. The object of retrieving the ice cores is to obtain records of climate, atmospheric chemistry and surface mass balance through the ice core analyses. The ice core study is a part of the ITASE (International Trans-Antarctic Scientific Expedition) program, which is an international effort to obtain shallow ice cores and clarify past environmental changes during the last few hundreds years in the Antarctic. This paper describes basic analytical methodology and instrumentation for shallow ice cores in Japan. It includes the methods for stratigraphy, bulk density, electrical conductivity measurement (ECM), digital video recording, impermeability, laser tomography and major chemical compositions of ice cores.

(2000年11月29日受付, 2000年12月14日改稿受付, 2000年12月14日受理, 討論期限2001年7月15日)