

グリーンランド Site J におけるコアの現場処理、
解析および輸送の方法について

庄子 仁¹・成田英器²・神山孝吉³

Core Processing, Analysis and Transportation Procedures at Site J,
Greenland (JAGE-89)

Hitoshi SHOJI¹, Hideki NARITA² and Kokichi KAMIYAMA³

Abstract: The field activities of the Japanese Arctic Glaciological Expedition (JAGE-89; PI, O. WATANABE) were conducted at Site J, West Greenland (66°51.9'N, 46°15.9'W) during the period of May to June in 1989. The main objective of the JAGE-89 field operation by eight members (field leader, Y. FUJII) was to drill, process and analyze shallow ice cores in the field and transport some of them into Japan for further analyses. Such investigations will make clear the environmental record preserved in the Greenland ice sheet. Two ice cores were obtained, 101 m and 206 m long each, by using two sets of electro-mechanical drills. Physical property studies of the fresh ice cores were conducted, immediately after each core portion was recovered in the field. These studies include measurements on ECM, stratigraphy, bulk density, and others. Electrical conductivity and pH measurements were also carried out on melted samples. The rates of core drilling and processing/analyzing were almost equal to each other; *ca.* 10 m/day. After the field operations, the total weight of 720 kg of core samples were transported to Japan for further laboratory studies.

要旨: 北極圏氷河学術調査隊 (JAGE-89; 研究代表者: 渡辺興亜) は、グリーンランド・ソンドレストレムフィヨルドの東約 200 km の Site J 地点 (66°51.9'N, 46°15.9'W) で浅層掘削を試みた。目的は、地球環境特に北極域環境変動の研究のための雪氷コア解析を行うことである。1989年5-6月に、電動メカニカルドリルを用いて、主に 101 m と 206 m の深さまでの2本のコアを採取した。コアは回収後現場処理された。さらに現場での解析項目として物理解析 (固体電気伝導度、層位観察、バルク密度測定他) および化学解析 (電気伝導度、pH) を行うとともに、化学試料の一部はポリ瓶に処理した。コアの掘削とその処理・解析の進捗は、共に約 10 m/日であった。採取した雪氷コア試料の一部は国内に持ち帰ったが、その総量は約 720 kg である。

¹ 富山大学理学部地球科学科. Department of Earth Science, Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama 930.

² 北海道大学低温科学研究所. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060.

³ 京都大学理学部附属地球物理学研究施設. Geophysical Research Station, Kyoto University, Noguchibaru, Beppu 874.

1. はじめに

北極圏氷河学術調査隊 (JAGE-89; 研究代表者: 渡辺興亜) は, 先発隊が 1989 年 5 月 5 日にソンドレストレムフィヨルド(交信基地)に到着し, すべての作業を終えて 6 月 29 日に同地を離れるまでの 55 日間グリーンランドに滞在した. 滞在期間中に主として Site J (66°51.9'N, 46°15.9'W) における浅層雪氷コアの掘削とその現場解析を行った. 本調査は昭和 62 年度にノルウェー本土とスバルバル諸島で開始された北極圏雪氷コア研究計画の一環であり, 北極域の環境変動および雪氷圏環境の地域特性を雪氷コアから復元することを目指している. 本報告の目的は, 上記の目的を合理的に達成するために, 雪氷コアの現場処理・解析およびコア輸送に関する方法を検討することにある. なお, グリーンランド氷床上での観測活動は浅層掘削を含めてわが国で最初のものである. 本報文では, 主として現場で行われたコア処理, 解析および輸送に関する作業手順について報告する. その他についてはすでにいくつかの報告を行っている (亀田・藤井, 1989; 藤井, 1990). また, Site J 滞在中の交信基地との無線交信およびその他の設営支援をコペンハーゲン大学地球物理学研究所 (代表: ウィリー・ダンスガード教授) から受けたことを記しておきたい.

2. 氷堆積年代の推定

現場における解析試料の切断, 各種解析情報の採取準備のために, 年間の堆積量とその変動を見積もることは極めて有用である (藤井ら, 1990). そこで, 現場処理に先だって, コアの深さ (y) と年代 (τ) の関係を数値計算から求めた. 涵養量 (\dot{A}) が一定である場合, 氷層の積雪/フィルン/氷の年代は,

$$\tau = \int_0^y \rho dy / \dot{A}, \quad (1)$$

で与えられる. ここで密度 (ρ) プロファイルは, HERRON and LANGWAY (1980) の式を用いて算出された. 計算に必要なパラメーターとしての年平均気温と年涵養量の値については, 気候図から Site J 付近の値として, それぞれ -17°C (OHMURA, 1987), $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (REEH, 1985) を求めた. 表面密度は $360 \text{ kg}/\text{m}^3$ と仮定した.

氷床深部では, 年層の厚さ ($\lambda \text{ cm}/\text{a}$) は氷床流動の影響により深さと共に減少するため, 年代計算にその補正を考慮する必要がある. λ の一般的な近似は, 次式で与えられる.

$$\lambda = \dot{A}(H-y)/(\rho_i \cdot H), \quad (2)$$

ここで H と ρ_i は, それぞれ氷換算した氷床の厚さと純水の密度 ($\rho_i = 900 \text{ kg}/\text{m}^3$) である. H については Site J 付近の値として地形図から 2000 m とした (REEH, 1985). 式 (2) を用いた補正は, ρ プロファイルで密度 $900 \text{ kg}/\text{m}^3$ となる深さについて行った. また, この深さ以下の密度は, $900 \text{ kg}/\text{m}^3$ の一定値を取るものと仮定してある.

λ と τ は、次式により容易に変換される。

$$d\tau = dy/\lambda. \quad (3)$$

式(2)から算出された λ と、式(1)と(3)から計算された λ とは、密度 900 kg/m^3 の深さで交差する。そこで、密度 500 kg/m^3 に達する深さで深での λ プロファイルを滑らかにするために、次の簡単な近似式を用いた。

$$\lambda = \frac{\exp(-y/40)}{3} + 0.2862, \quad (4)$$

ここで、右辺の3つの定数値は、式(1)~(3)で算出された λ 値に最も良く合うようにして決められている。式(1)~(4)の見積もりによると、深さ 100 m で 1700 年代、深さ 200 m で 1300 年代に堆積した氷となる。気泡が形成され始める深さ (密度: 800 kg/m^3) は、計算された ρ プロファイルから、約 50 m 深と推定された。図 1 に国内での準備段階で想定した、コア深度と密度・年代 (掘削時点からさかのぼった年代) を示す。本データはコンピューターに入力されており、パソコンを現場に持ち込み、コアから直接得られたデータで直ちに補正することによってコア処理に反映させた。

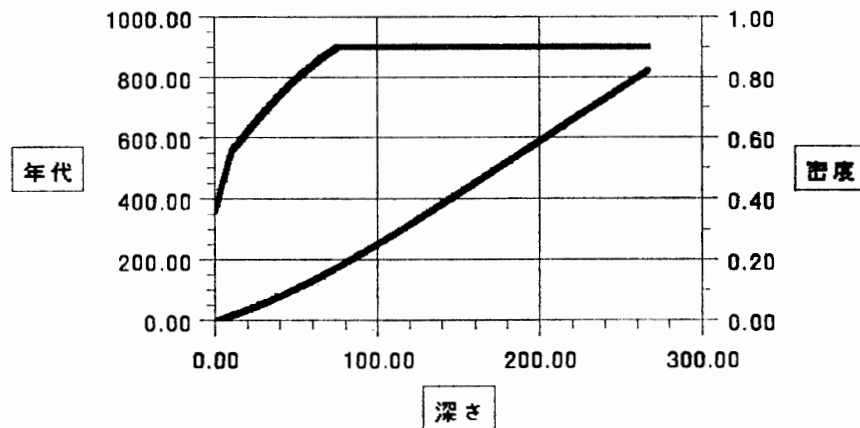


図 1 掘削コアの深さと密度・年代についての国内予想図 (年代は積雪表面を 0 年としてさかのぼった年代を示す)。深さの単位は m。

Fig. 1. Profiles of ice core density (Mg/m^3) and age (year before present) with depth (m).

氷の年代決定は、それ自体一つの重要な研究項目であり、Site J の年代についても、解析の進展によって必要データが集積されつつあるので、その解析結果は別に報告される予定である。

3. 雪氷床掘削地点 Site J での設営

掘削地点の Site J は、ソンドレストレムフィヨルドから東へ約 200 km、レーダーサイト Dye 2 から北へ約 50 km 離れた海拔高度約 2000 m の地点 ($66^\circ 51.9' \text{N}$, $46^\circ 15.9' \text{W}$) である (図 2)。氷床の周辺部近くには氷床上にクレバス、融水路、氷上湖などが発達しているが、

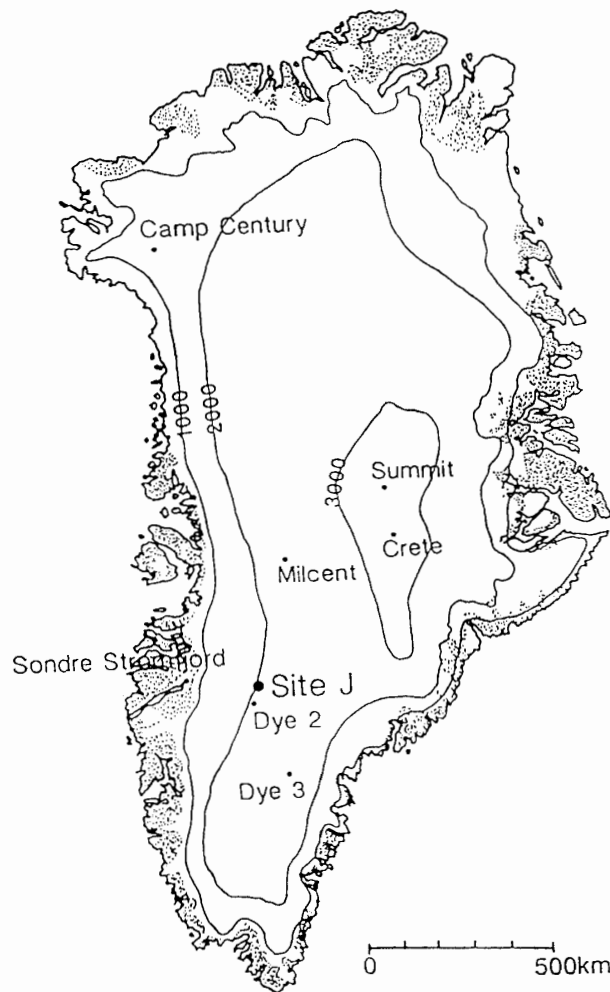


図 2 グリーンランド氷床におけるコアボーリング地点 Site J.
 Fig. 2. Ice core drilling site, Greenland (Site J).

内陸に入るにつれほぼ平坦な積雪表面となる。しかし、積雪層中には前年の夏に形成された氷板（厚いところでは約 0.3 m 厚の単一氷板もある）が、1 m 以浅にも存在している。こうした多数の氷層の存在のために、積雪層にピットを掘るのも困難なほどである。夏期昇温によって表面付近では融解・再凍結がくり返されるため、融水の弊害を受けぬように基地設営を行った。このような積雪層内の夏期融解・再凍結過程の存在はコア解析においても考慮する必要がある。基地の概要として、居住区(半地下)、ボーリング場および化学系分析区割(半地下)、物理解析区割(地下)と戸外の試料冷凍保存用埋設貯蔵庫の配置を示した(図 3)。

雪氷コア掘削は、2 種類（直径 8 cm と 10 cm）の電動メカニカルドリルを用いて行い、良質のコアを表面から連続して採取することができた。表 1 には、掘削したコアの深度、ドリルの口径、コア最深部の現地推定年代を示した。なおその後国内でさらに解析を加えた結果、本推定年代には若干の訂正がある。なお 6 m 深度までのコアは近年の環境情報を気象要素と併せて詳しく研究するためのものであり、そのまますべて国内に持ち帰った。掘削に

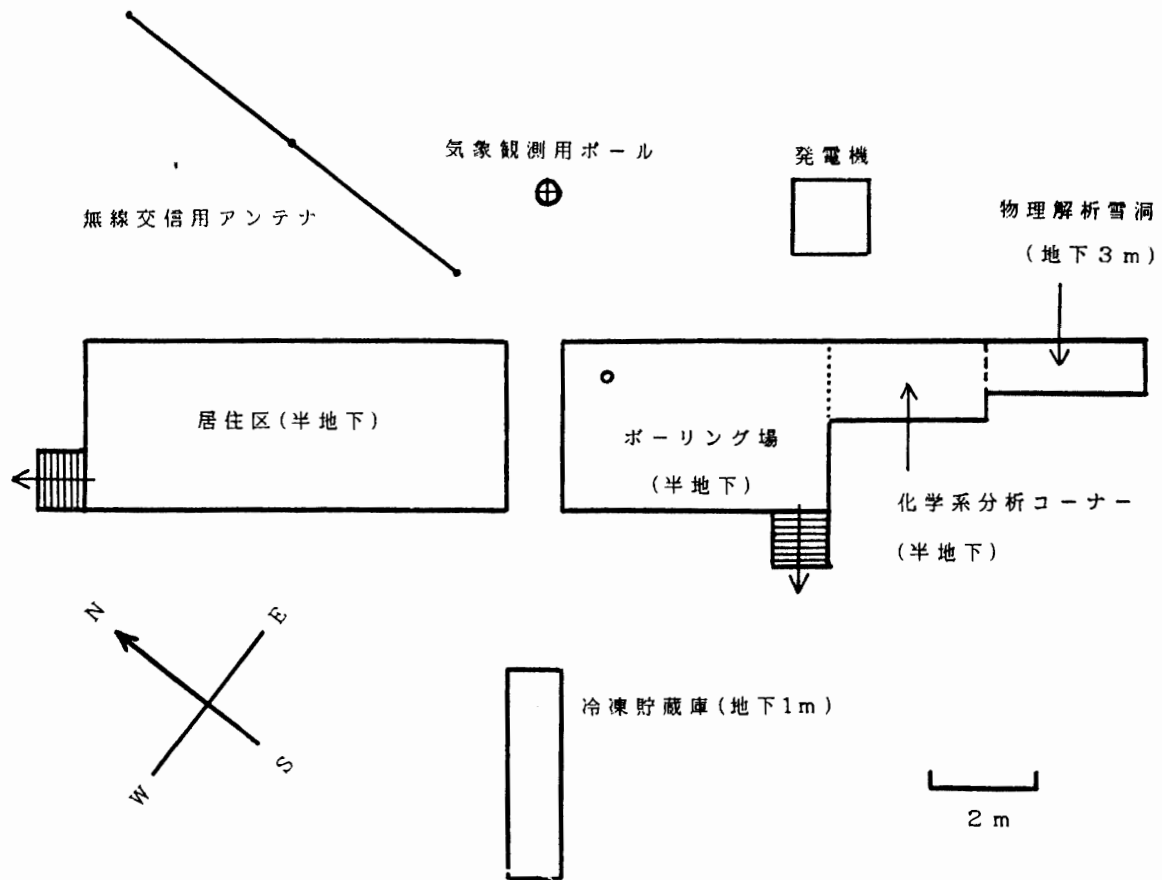


図 3 Site J におけるボーリングおよびコア処理・解析トレンチの配置図

Fig. 3. Field camp at Site J, Greenland.

表 1 採取したコアと推定堆積年代 (年代はその後国内解析の後に若干の修正が加えられている)

Table 1. Ice cores and their ages of deposition at the bottom.

使用ドリル径 (cm)	掘削深度 (m)	推定堆積年代 (年前)
10	101	255
8	206	610
8	6	9

要した総時間は約 250 時間である。雪氷コア掘削およびコア処理・解析のための電源としては、2 台の発電機 (1.7kVA, EC2000X, HONDA; 2.8kVA, EC3000, HONDA) を使用した。掘削深度 101 m と 206 m の両者のコアについては、ドリリング作業時のドリル先端の到達深度、日コア回収量の経時変動を図 4 に示した。両者のドリルバレル長に違いがあるため両コアの掘削速度を一概に比較することは難しいので、ここでは 206 m コアの日回収量について検討してみよう。図からわかるように、表面から 100 m まで、100 m から 170 m まで、170 m 以深で、日平均回収量に明かな違いがみられる。すなわち深度が大きくなると、回収量が急激に落ち込むことである。これはドリルが掘削孔中を上下することに要する時間

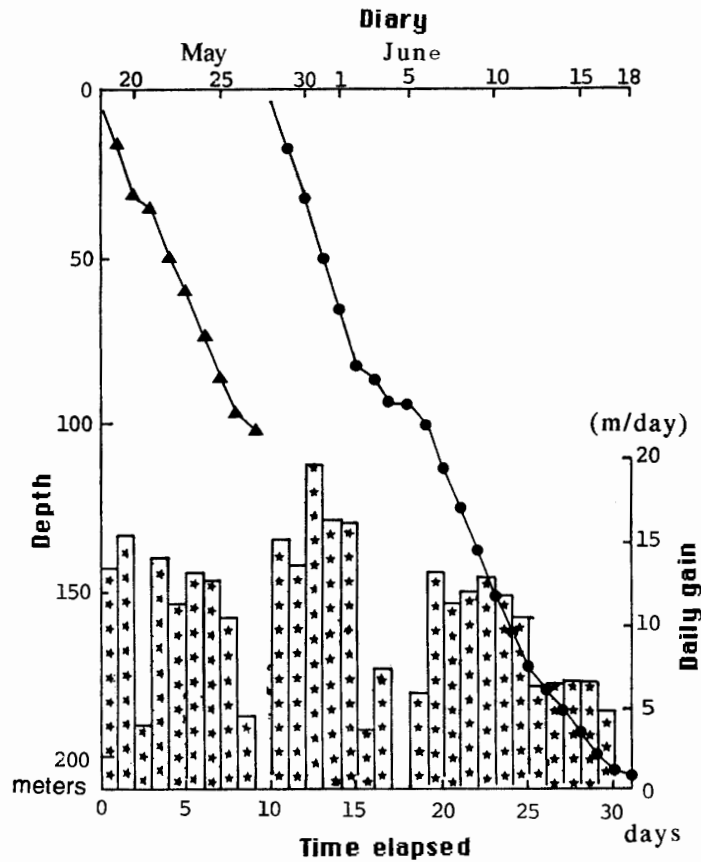


図 4 コア掘削の進行状況（折れ線グラフはコアドリルの進行深度、棒グラフは日コア回収量を示す）

Fig. 4. Progress of ice core drilling and daily gain length of ice core samples.

が、実掘削時間やドリルからコアを回収することに要する時間に比べて深度とともに急激に増加するためである。孔壁を痛めないように掘削孔中をドリルを注意深く上下させることに要する時間は、掘削深度とともに大きく増大することが予想される。なお 100 m 深度付近で掘削長が一時的に停滞しているのはドリルの保守・点検作業を行ったためである。

4. コア現場処理・解析

採取された雪氷コアの保管に関する一連の作業をコア処理と呼び、これは個々の研究項目に関連したコア解析と区別される。現場における作業能率向上のために両者の作業手順の一体化を図り、コア処理・解析ラインを設定した。国内で行う予定の解析項目を十分に考慮した上で、現場における処理項目と方法を検討し、限られた時間内で作業能率を最大限に生かすために、以下のような項目について現場作業を行った。

- (1) 雪氷コアの基本的な記録作業：層位記録，写真記録，コア重量測定
- (2) 雪氷コアの経時変化に関する測定：バルク密度，固体電気伝導度，超音波速度
- (3) 現地解析：融液電気伝導度，pH，力学試験

(4) 国内解析のための現地処理：化学分析用試料の融解と切断処理，物理解析試料採取
 これらの4項目については，現場で要求される作業ラインの円滑化を考慮して連続あるいは非連続解析の別，試料サイズを選択，測定装置・方法などについて現在の解析能力から最適なものを採用した。

現場で用いられたコア処理・解析ラインおよび作業手順は，チャート図と流れ図を用いて示した(図5，図6)．また図6中の融解処理作業については，連続試料処理と不連続試料処理の両者を行ったが，詳細な流れ図をそれぞれ図7と図8に示した．次にコア作業の流れに沿って処理手順を説明する．

浅層コアドリルにより採取されたコアは，毎回の掘削ごとに掘削番号，コア番号，採取日時などを記載したコアラベルと共に，上下方向表示のついたプラスチック袋に入れられる．そして，掘削現場から雪面下 1.5 m ほどに作られた物理解析雪洞内 (-15~-10°C) の処理・解析ライン(図5)に持ち込まれる．これらのコアは，透過光台(ライトテーブル)上でその前の掘削によって得られたコアと尻合わせをされた後，コアに沿って置かれたロール記録紙上に，尻合わせ部分，コアの破断具合を実際の深さで書き移すとともに，層位構造(雪質，気泡形，結晶粒径，氷板の厚さ)を同時に実寸大で記録した．そして，化学解析用としての深さ方向約 10 cm の小サンプルを細分化するためのマーキングをコア表面に，そしてその位置を記録紙上に書き入れた後，長いコアを 50 cm ごとに切断した．50 cm の長さは，日

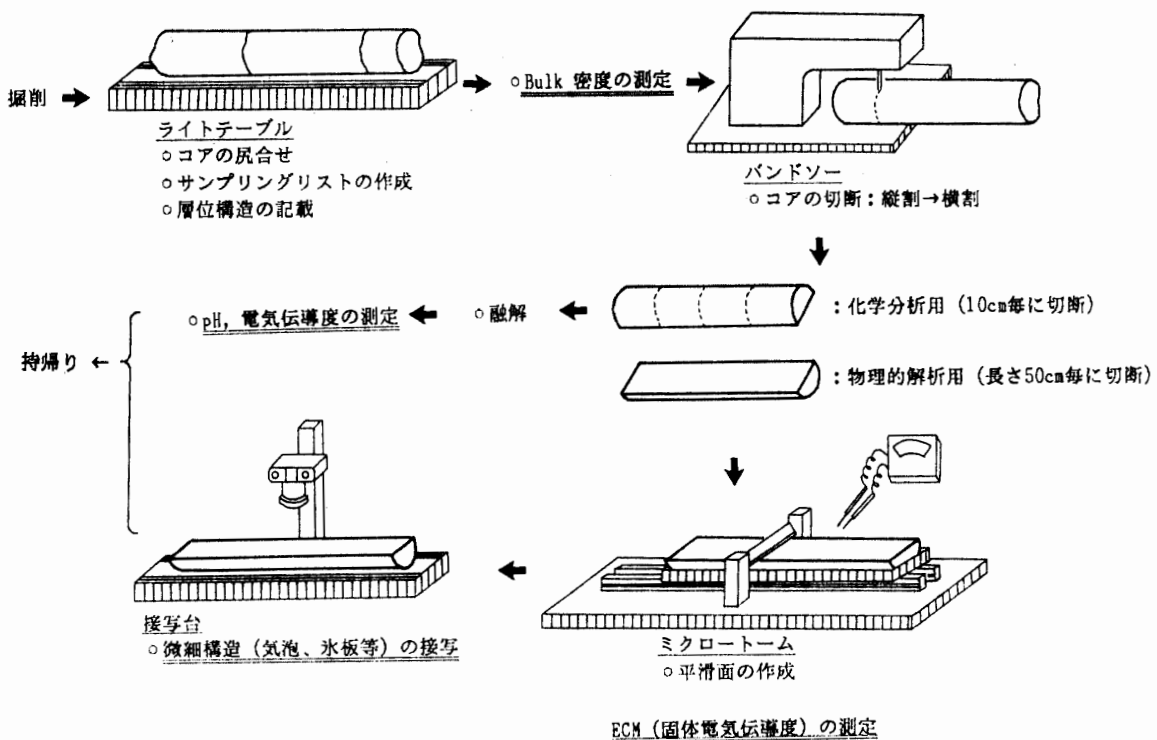


図5 コア処理・解析ラインの模式図

Fig. 5. Ice core processing and analyses.

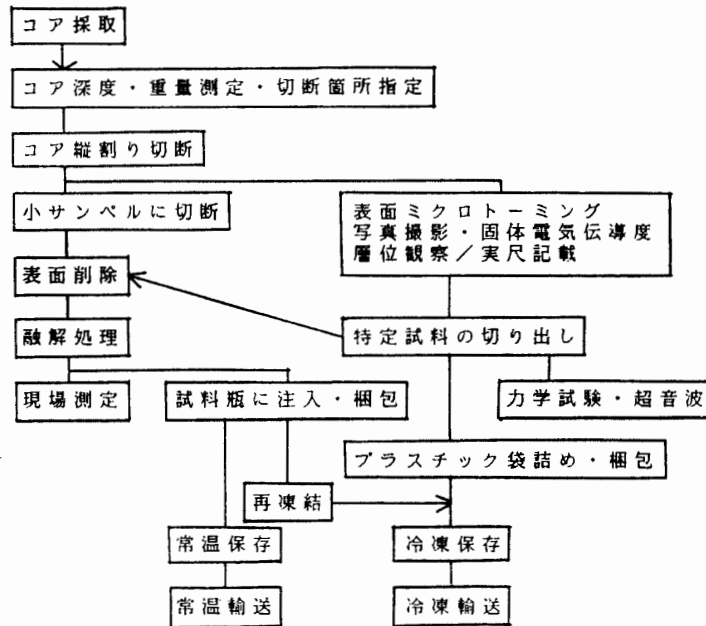


図 6 コア作業手順の流れ図

Fig. 6. Ice core sampling procedures.

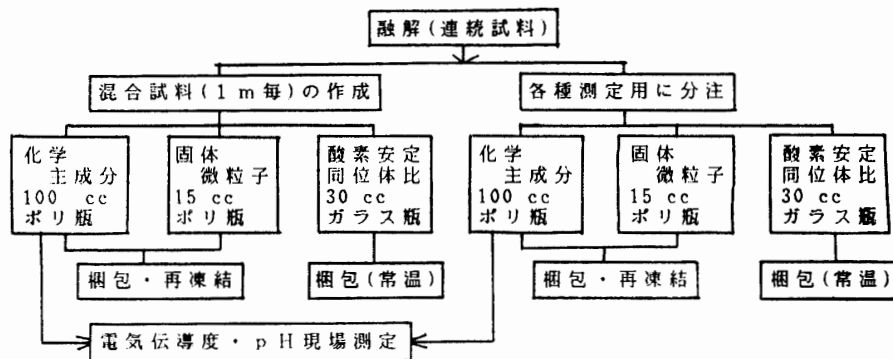


図 7 化学解析用連続試料処理の流れ図

Fig. 7. Sample preparations for continuous chemical analyses.

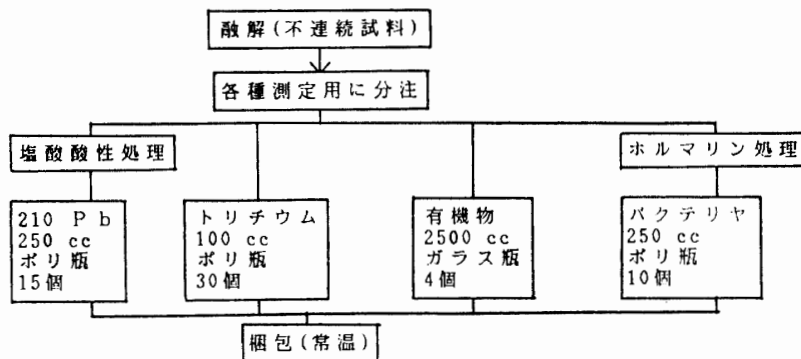


図 8 化学解析用不連続試料処理の流れ図

Fig. 8. Sample preparations for discrete chemical analyses.

本持ち帰りの試料箱の寸法のためである。50 cm コアについては、重量測定を行ってバルク (Bulk) 密度を求めた。再び、これら 50 cm コアに、新しいコア番号、採取日、コア上端、下端の深さを記載したコアカードが添えられる。次に、このコアを縦割りにほぼ 2 等分し、その一つは主として物理解析用とした。もう一方は化学解析用としてさらにバンドソーで深さ方向約 10 cm 間隔の小サンプルに細分され、試料表面部の汚れを削除したあとそれぞれ試料番号を付したプラスチック袋に小分けしたのち、化学分析用として融解する。物理解析用のコアは、切断面をマイクロームで平滑にしたのち、写真撮影と固体電気伝導度測定が行われる。その後、特定箇所から力学試験と超音波測定用の試料および化学分析用の追加試料が採取される。残りの部分は国内解析用の持ち帰り冷凍試料として、上下方向・コア番号・深さ等の表示の付いた新しいプラスチック袋に挿入され、断熱プラスチックダンボール箱内に梱包する。コアの隙間を埋める梱包材としては、積雪を用いた。

一方、融解用に渡された小サンプルは、人為的汚染を避けるように工夫された化学系分析区割りに運びこまれ、ここでクリーンウェア、ポリグローブ等の防塵着衣を着用し、清浄済みの化学容器・装置を用いてサンプル処理が以下に述べる方法で行われた。

連続試料処理(図 7): それぞれの小サンプル外側の汚染部をステンレスナイフで削除したのち、融解専用のテフロン瓶に入れて電子レンジで解凍した。雪粒間の空隙が気泡となって、サンプルに通気性が無い場合には、電子レンジによって表面を若干融解し、その融解水によって試料を 2 回“とも洗い”した。融解液試料は、その後、各種測定用に分注あるいは 1 m ごと混合サンプル作製用に分けられた。化学主成分測定用の融解試料溶液の一部を用いて、電気伝導度と pH の現場測定を行った。得られた結果は、物理解析による現場データと合わせて、その後の深度の試料サイズおよび切断箇所決定に利用した。

不連続試料処理(図 8): 連続した情報が必ずしも必要のない項目については、不連続試料採取を行った。それぞれの試料は、その解析項目に応じた“前処理”がなされている。浅層コア (101 m, 206 m 深) 以外にも、表面ピット試料が採取・処理された。

国内への持ち帰り用に試料瓶に分注されたサンプルは、常温輸送用と冷凍輸送用に分けて

表 2 国内解析用コア試料の輸送量
Table 2. Ice core samples for laboratory analyses.

解析項目	輸送	重量	箱数
物理解析	冷凍	400	24
化学主成分	冷凍	200	10
固体微粒子	冷凍	30	2
酸素安定同位体比	常温	60	3
有機物・バクテリア	常温	20	1
²¹⁰ Pb・トリチウム	常温	18	1
合計		720 kg	41箱

ダンボール箱に梱包され、居住区割の常温貯蔵個所あるいは、戸外の埋設冷凍貯蔵庫内に保管した。

梱包後冷凍あるいは常温保存されていた試料は、Site J からソンドレストレムフィヨルドに空輸した。その後直ちに冷凍倉庫（ -20°C ）あるいは常温倉庫に保管された試料は、別便で日本まで空輸された。輸送されたサンプル量の詳細は表 2 に示されている。冷凍輸送および常温輸送の総重量はそれぞれ 630 kg、98 kg となった。

5. 現場解析結果

現場解析を行って、コア情報を国内での解析に先立って現地で入手することには以下のよ
うな利益がある。

- (1) コアの変質以前に測定を終え輸送量の削減ができる。
- (2) コア情報が現場作業に反映できる。
- (3) コア情報が早期に入手できる。
- (4) 現場作業の人員配置を円滑化できる。

次に各項目について具体的に述べてみよう。輸送過程において、コア試料は常に変質の可能性にさらされている。したがって解析の一部を現地で行い、加えて国内持ち込みのための試料処理を行うことは、この危険性と負担を軽減することになる。さらに反応性の著しい化学成分などについては、いずれにしても早急な測定が望ましい。さらに付随的な利点として輸送量の削減を図ることができる。

現地において、国内でのコア解析計画に応じた試料の作成・整理がより有効に行える。さらには輸送上あるいは国内の保管体制の制約から試料の一部を現地に残置せざるを得ない場合に現地で適切な判断ができる。

国内の解析者にコア全体の情報が解ることによって、必要とする試料のコア全体に対する位置付けの確認、コア解析の優先順位の決定などの有効な情報となる。

ドリリング作業は、設営・保守などのため、時として多くの人員を必要とする。したがって定常的にはコアの現場解析を行っている人員が可動要員としてドリリングに適宜参加することが望ましい。

今回の現地解析についてその一部を具体的に述べてみよう。コアの国内配分については、なるべく正確なコアの推定年代に基づいた試料の配分が期待される。ドリリング計画の立案時に、コアの深度と年代との関係を推定したことは前に述べた通りである。しかし現地で測定した固体電気伝導度などの結果（西尾ら、1990）を考慮して、氷堆積年代の推定値を直ちに修正し試料を処理するときの参考とした。化学試料については上述のように大部分を融解試料として処理した。これは国内持ち込み試料の輸送時の安全性とその後の利便性、輸送試料の削減を目的としたものである。化学主成分は分析に必要な試料の量が大きく、またコア

表 3 現地で行った融解処理後の測定結果

Table 3. Preliminary results of EC and pH measurements obtained in the field.

測定項目	電気伝導度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH
測定数	1543	218*
平均値	1.5	5.32
最大値	12	6.55
最小値	0.78	4.25
標準偏差	0.70	0.27

* 国内持ち帰り直後の測定値も含む。

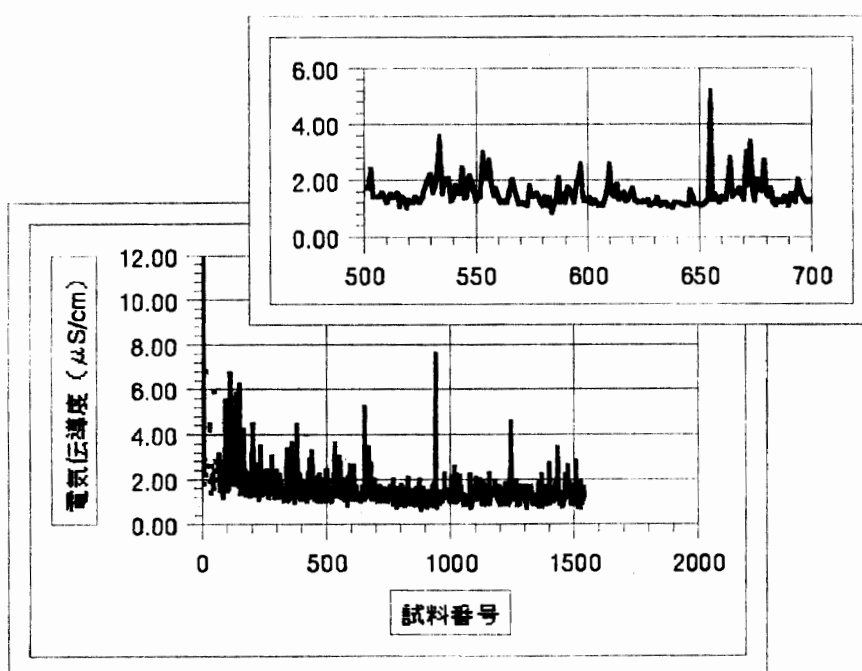


図 9 現地で得られたコア融解試料の電気伝導度のコア全体のプロフィールと一部拡大図

Fig. 9. Profiles of electrical conductivity for liquid core samples.

試料の重要な部分は原則的に冷凍コアとして持ち帰ることなどを考慮し、融解試料の一部は現地に残置した。2000 試料に及ぶ融解試料から持ち帰り試料を選定するためには、試料融解後直ちに行った電気伝導度の計測結果を利用した(表 3)。測定結果をパソコンに入力し現地でコア全体のプロフィールを作成(図 9)、コア情報を持ち帰りの試料選定に反映させた。図は現場のデータであるので、便宜的に試料番号で表示している。試料番号はコア深度に対応しており、測定結果を理解し易いように、全体図と部分拡大図を表示した。拡大図からは高電気伝導度を有する試料が特定の深度に連続して出現していることが解る。したがって電気伝導度の高い部分が単なる処理過程の試料汚染に由来するものではなく、環境変動を現していることが確認できる。

6. コア処理・解析速度についての考察

以上述べてきたように、現地でのコア処理・解析は試料輸送に先だって必要であるばかりでなく、国内における解析体制を有意に稼働させる上でも欠かすことができない。設営の章で述べたように、コア掘削の当初には掘削速度に比べて処理速度の遅れが著しい。また設営上の仕事も掘削の初期に集中している。ドリルの保守・定期点検、基地の維持作業なども時々生ずることを考慮すると、コア処理・解析の迅速化は急務である。

現場で行われたコアの処理・解析速度は、掘削速度とほぼ同じ約 10 m/日であった。作業人員は平均 5 名で、それぞれ主として層位記録・重量測定・切断個所指定、バンドソー切断、マイクロミング・写真撮影、固体電気伝導度、融解化学処理に分かれて担当し、空いた時間に不定期な作業（ボーリング孔温度測定、ピット観測、降雪、飛雪サンプリング、降雪量測定、梱包作業、無線連絡など）を行った。その他設営上の諸作業のために毎日ほぼ 0.5-1 名が欠員することを考慮すると、10 m/日の処理・解析速度は実働 4 名の作業に相当する。作業進度は、主としてバンドソーによるコア切断（輪切、縦割切断）と透過光台上での記載作業に規制される。今回は後者の作業以外では、固体電気伝導度の測定などすべて 50 cm 長ごとの切断コアで行われた。先に述べたように、氷床コアは掘削採取後、すぐに現場で（特殊な解析や分析を除き）測定・処理されるのが最も望ましい。今回の測定・処理のほとんどは手作業で行ったものであり、結果として約 10 m/日の解析・測定・処理速度であった。この速度は、深層掘削のようなコア採取速度が大きい場合には対応できないものである。それ故、たとえば層位構造関連の観測には画像処理システムを導入し、コア切断作業には少なくとも 2 m 長のコアを一気に切断・処理できる信頼性の高い自動化したバンドソー切断システムの開発、そして固体電気伝導度のような深さ方向に連続測定を必要とするものは、同様に長いコアの自動測定システムの開発が不可欠である。このことは、切断個所のデータの欠測を防ぐとともに、作業効率を向上させ、将来ここで報告したケースの 2 倍以上の速さで処理・解析することは十分可能であろう。

化学処理と解析については、当初融解試料の電気伝導度、pH、化学主成分用試料のフィルター処理を試みた。その後時間的制約からフィルター処理を放棄し、試料を再度冷凍し国内へ持ち帰ることとした。その後 pH 測定も国内測定項目へと変更した。そのため表 3 からわかるように pH のデータは電気伝導度に比較して著しく少なく、現地でのコア全体についての化学情報へのアクセスは電気伝導度値に限られた。電気伝導度の情報のみでも現地での持ち帰り試料の選定には有効であったものの、今後国内での試料処理をさらに円滑に進めるためにも現地でのコア情報へのアクセスの機会は大きいことが望ましい。今後処理の自動化による迅速化が前者と同様に不可欠であろう。

7. おわりに

本報文では現地でのコア処理・解析, 国内への輸送について簡単に述べた。それぞれの処理手順・解析結果の詳細な議論は, 今後それぞれの測定項目に関する報文の中で報告される。将来の本格的な深層掘削とそれに伴う現場解析の手順・方法については, その実施前に十分な検討と準備が必要であろう。本報文がそのための一つの参考になれば幸いである。各方面の専門家からの批判, 助言を期待したい。

文 献

- 藤井理行 (1990): グリーンランド氷床掘削. 極地研ニュース, **95**, 2-5.
- 藤井理行・神山孝吉・渡辺興亜 (1990): 氷床・氷河のコア解析による年代推定方法. 南極資料, **33**, 156-190.
- HERRON, M. M. and LANGWAY, C. C., Jr. (1980): Firn densification: An empirical model. *J. Glaciol.*, **25**, 373-385.
- 亀田貴雄・藤井理行 (1989): グリーンランドでの氷河調査のための諸情報. 雪氷, **51**, 316-317.
- 西尾文彦・庄子 仁・成田英器 (1990): グリーンランド氷床コアの固体電気伝導度測定, 氷の構造と物性に関する総合的研究—生命科学から宇宙科学まで—研究報告書. 平成元年度文部省科研費総合 B, 北大低温科学研究所, 97-102.
- OHMURA, A. (1987): New temperature distribution maps for Greenland. *Z. Gletscherkd. Glazial-geol.*, **23**, 1-45.
- REEH, N. (1985): Greenland ice-sheet mass balance and sea-level change. *Glaciers, Ice Sheets and Sea Level: Effect of a CO₂-Induced Climatic Change; Report of a Workshop held in Seattle, Washington, September 13-15, 1984.* Washington, D.C., U.S. Department of Energy, 155-171.

(1990年11月14日受付; 1991年2月12日改訂稿受理)