

第二期 Dome Fuji 氷床コアプロジェクトに用いる 光学層位記録装置の開発

高田守昌^{1*}・飯塚芳徳^{1†}・庄子 仁²・宮本 淳^{2‡}・Sepp Kipfstuhl³・
 本堂武夫¹・藤田秀二⁴・藤井理行⁴

Development of an optical scanner for Dome Fuji II ice core project

Morimasa Takata^{1*}, Yoshinori Iizuka^{1†}, Hitoshi Shoji², Atsushi Miyamoto^{2‡}, Sepp Kipfstuhl³,
 Takeo Hondoh¹, Shuji Fujita⁴ and Yoshiyuki Fujii⁴

(2003年6月2日受付; 2003年8月11日受理)

Abstract: An optical scanner for stratigraphical study was developed for the Dome Fuji ice core project II. The optical scanner measures two-dimensional light scattering intensities and records optical structures of ice cores. We developed the scanner hardware and control software. The line scanner is controlled by a personal computer and is constructed for automatic measurement. The sliding speed of the scanner is about 5 mm per second and, therefore, one ice core sample with a standard length for our sample processes (1.5 m long) can be measured within about six minutes. The line scanner was transported to Dome Fuji Station, Antarctica, by the wintering party of the 44th Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-44), and will be used for Dome Fuji II ice core measurement by the JARE-45 summer party and successive parties.

要旨: 第二期ドームふじ氷床コアプロジェクトの現場解析において、簡便に光学層位を記録するため、専用装置を開発した。この装置は、二次元的な光の散乱強度を氷床コアサンプルの深さ方向に沿って連続的に測定する。我々は、この装置のハードウェアおよび制御ソフトウェアを開発した。この結果、経験のないオペレーターでも容易に測定可能な、自動測定装置が完成した。測定速度は5 mm/sを想定しており、この場合、現場処理解析の基本長である1.5 mのサンプルを約6分間で

¹ 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 060-0819.

² 北見工業大学未利用エネルギー研究センター. New Energy Resources Research Center, Kitami Institute of Technology, 165, Koen-cho, Kitami 090-8507.

³ Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, P.O. Box 120161, D27515 Bremerhaven, Germany.

⁴ 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

Present address:

* 長岡技術科学大学工学部. Nagaoka University of Technology, 1603-1, Kamitomioka, Nagaoka 940-2188.

† 弓削商船高等専門学校. National College of Maritime Technology, 1000, Shimoyuge, Yuge-cho, Ochigun, Ehime 794-2506.

‡ 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 060-0819.

測定可能である。この装置は第 44 次越冬隊が南極ドームふじ観測拠点に搬入し、第 45 次夏隊から始まる深層コア掘削の現場解析処理に使用される予定である。

1. はじめに

氷床コアの層位構造は降雪時の粒子や堆積後の変態により形成され、古くから研究されている（例えば Benson, 1962; Watanabe *et al.*, 1978）。また、氷床には降雪だけでなく、微量であるが固体微粒子も堆積し、氷床中に取り込まれていく。例えば、ドームふじコアや Vostok コアには火山起源の固体微粒子が含まれていることが確認されている（Fuji *et al.*, 1999; Basile *et al.*, 2001）。火山灰層は、多地点のコアを比較する場合に等年代の示準層となり、コア年代の決定に重要な役割を果たすため、その検出は極めて重要である。また、グリーンランドのコアにおいて、隣接するクラウドバンドとクリアー層は、年層として年代決定に利用されている（Meese *et al.*, 1997）。このように氷床コアの層位構造の測定は、示準層の検出や年層の把握などが可能であり、古環境を解読する鍵の一つとなる。しかし、氷床コア研究が始まった 1950 年代から 1990 年代前半のグリーンランド氷床研究計画 2（GISP2）（Meese *et al.*, 1997; Alley *et al.*, 1997）まで、その測定は目視による方法で行われてきた。近年ドイツ・デンマークのグループにより光学層位測定装置（ラインスキャナ）が開発され、北グリーンランド深層コア掘削解析計画（NGRIP）で採取されたコアのクラウドバンドなどの特徴的な層構造の記録に成功している（Dahl-Jensen *et al.*, 2002）。また、同じ装置を用いて、南極 Dome C コア、南極 DML（Dronning Maud Land）コアの測定が行われている（S. Kipfstuhl, 私信）。

第一期ドームふじ氷床コアプロジェクト（以後「第一期」と呼ぶ）では、2500 m 深までのコアが採取され、過去 32 万年までの環境因子の抽出に成功した（例えば、Watanabe *et al.*, 1999）。第二期ドームふじ氷床コアプロジェクト（以後「第二期」と呼ぶ）計画では、岩盤までの掘削による過去 80 万年前までの環境情報の解読を目指し、第 45 次夏隊から新たに表面から掘削を再開する予定である。第一期では、越冬による掘削および掘削地での氷床コア解析（以後「現場解析」と呼ぶ）であったため、時間をかけることにより作業の延べ人数を増やし、手作業による解析を行った（Fujita *et al.*, 2002）。一方、第二期計画では、夏隊に限定した短期集中型の掘削が予定され、また人員輸送の制限から現場解析の人員が限られることから、解析には自動化された装置が必要である。そこで、自動化された氷床コア切断用のバンドソー、氷床コアサンプルの電気的性質測定装置（飯塚ら、投稿準備中）、そして光学層位記録装置の開発が行われた。本稿では、新規に設計開発した光学層位記録装置の概要と国内での試験結果について述べる。

2. 装 置

2.1. 装置の概要

図1に装置の概要, 図2に装置の写真を, 図3に測定部の概要を示す. 表1に装置に用いた機器の詳細を示す. 装置は, ロボットモジュール(移動系), 画像測定に用いる光源と CCD (Charge Coupled Device) カメラの測定系, 得られた画像を保存するデジタルビデオデッキ, そして機器の制御と画像の取り込みおよび画像処理を行うパソコン(PC) から構成されている. 測定系はロボットモジュールの稼動部に設置し, 氷床コアサンプル軸に沿って移動させることにより, サンプル全長にわたり測定する. それぞれの部品の組付には, シグマ光機製および特注作品を使用した. 開発した装置は, レーザートモグラフ装置 (Takata and Fujii, 2000) を基本とした. レーザートモグラフ装置は, サンプルの側面からレーザー光を照射し, 90度方向から散乱光を CCD カメラで検出する測定方式であり, 開発した装置とは照明方式のみが異なる. このため測定系の CCD カメラやデジタルビデオデッキなどは, 共通した機材である.

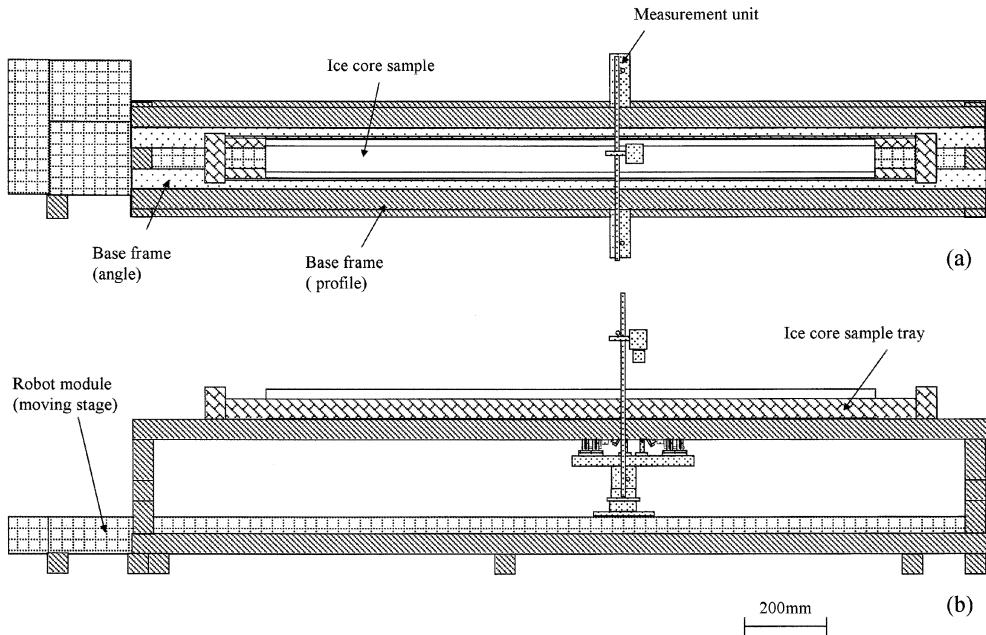


図1 装置の概要図. (a) 平面図, (b) 側面図. 装置は, ロボットモジュール, 架台, コア置きトレイ, 測定系から構成されている. ロボットモジュールの移動ステージに取付けた測定系が, 氷床コアサンプルに沿って移動することにより, 全長にわたり測定を行う. 機器の全長は2.4mである.

Fig. 1. Design image of equipment. (a) View from top. (b) View from front. The equipment was made from a robot module, base frame, ice core sample tray, and a measurement unit. The measurement unit was mounted on the movable stage of the robot module and moves along an ice core sample in order to measure the samples along the whole length. The width of the equipment is about 2.4 m.



図 2 装置の全景写真

Fig. 2. A picture of the equipment.

ラインスキャナは、図3に示すように、光は氷床コアサンプルの斜め下から照射し、鏡を用いて反射させ、サンプルに照射する。測定する氷床コアサンプルは、光源と CCD カメラ間に配置し、CCD カメラはサンプル内部で生じた透過方向の散乱光強度の二次元分布を検出する。光源からの直接光が、CCD カメラに直接入射しないため、サンプル内で光散乱が起こらない場合は暗く、強い光散乱が起こる場合は明るく写る。カメラレンズの焦点は、サンプルの上側の表面に合うよう位置を調節する。ロボットモジュールは、PC の RS-232C 経由で制御を行う。

PC には、Canopus 社製の画像取り込みボードが増設されており、CCD カメラで得られる画像を動画形式で保存できる。CCD カメラで得られる画像の時間間隔は 1/30 秒であり、これらの画像を PC のハードディスク上に保存する。このため、大量のデータを高速に記録する必要があり、これに対応した保存システムが必要である。予備的な実験段階において、オペレーティングシステム (OS) がインストールされたハードディスクに CCD カメラからの画像を保存した場合、保存速度が追いつかず途中で画像の記録が止まってしまうことがあった。そこで、OS がインストールされたハードディスクとは別に 2 台のハードディスクを増設した。この 2 台のハードディスクを PC に増設した Adaptec 社製の RAID (Redundant Array of Independent Disks) ボードに接続し、RAID レベル 0 (分割書き込み) に設定することで、大容量で高速書き込みが可能な画像の保存領域を確保した。増設した画像取り込みボードは、CCD カメラで撮影した画像を PC に取り込むとともに、デジタルビデオデッキを制御する役割も果たしている。また、この PC は測定で得られた画像から、氷床コアサンプル画像

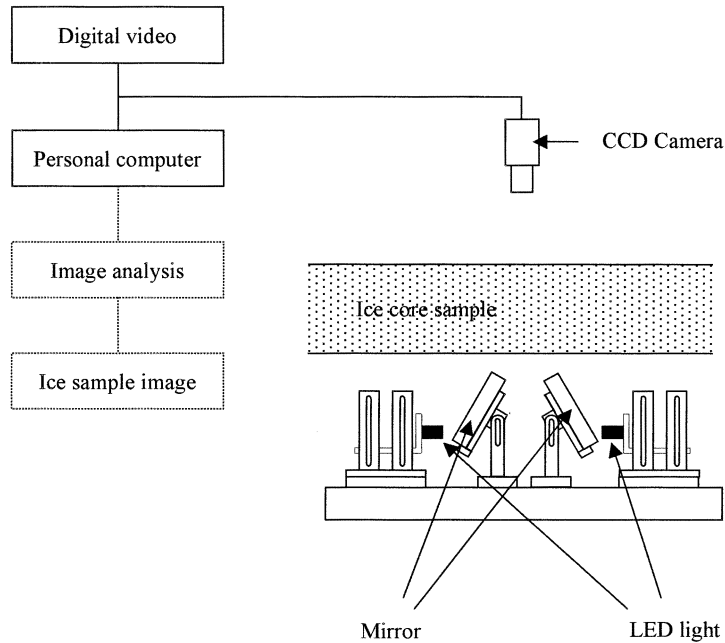


図 3 装置の測定部の概要. 光源からの光は鏡で反射し、氷コアサンプルに斜め下方向から入射する. サンプルからの散乱光強度の分布は CCD カメラで検出され、デジタルビデオと PC に保存される. PC に保存した画像を解析処理することにより測定した氷床コアサンプル全長の画像を得る.

Fig. 3. Detailed drawing of the measurement unit. LED lights were reflected by mirrors and irradiated on to the ice core sample. A CCD camera detected the distribution of scattering light intensity and obtained images were recorded in a digital video recorder and hard disk drive on PC. An image of ice core sample was obtained by image analysis of the obtained images along the ice sample.

表 1 装置の主な機器の詳細
Table 1. Details of system components.

Device component	Maker	Model
Robot module	NSK	XY-HRS200-RH409
CCD camera	Toshiba	IK-C40
Lens	Canon	VF25 1.4 with 5 mm extension ring
Light source	Imac	IDB-100/11W
Mirror	Siguma Kouki	TFA-6080R12-0.3
Computer	Tukumo Denki	TH-Series H
Capture board	Canopus	DVStorm-RT Light
RAID board	Adaptec	ATA RAID 1200A
Digital video recorder	Sony	DSR-30
Base frame	Meiritu Seiki	50 mm alminium profile

を作成するための解析にも利用する。また、データバックアップのため、データサーバーに接続するための LAN (Local Area Network) ボード、SCSI (Small Computer System Interface) ボード、DVD-R (Digital Versatile Disk Recordable) ドライブが増設されており、得られるコア画像のバックアップ体制を整えている。

測定時、氷床コアサンプルは専用のコア置きトレイに乗せる。コア置きトレイの底面には幅 50 mm のスリットが 1700 mm 長にわたり切られており、ここから透過方向の光が入射する。トレイを利用する理由は、測定時にコアを置く場所が高く、滑りやすいコアを安全に運ぶため、また、測定時のサンプル位置の誤差が±1 mm 内になるようにするためである。持ち運びの利便性とトレイの剛性の面から、トレイに取手を付けた。

本測定は、光強度を測定するため、測定に用いる光源以外からの光が CCD カメラに入らないようにする必要がある。このため、図 2 の木枠で周囲を囲い、外壁に遮光カーテンを取り付け、暗室空間を作った。

2.2. 測定系の選定

2.2.1. レンズ

第二期ドームふじ深層コアは、既に採取されている 2500 m 深まではコアの保存に重点が置かれている。このため、コアの切断を最小限に留める予定となっている。掘削されるコアの直径は 94 mm であり (Takahashi *et al.*, 2002)、ラインスキャン測定には、コアの端面から 10 mm 位置で二面を切断した 74 mm 厚の試料を測定に用いる予定である。端面から 10 mm 厚で切断したときの切断面の幅は 58 mm であり、それぞれの面は、CCD カメラでの測定面と光の入射面に用いる。レンズの焦点は試料表面に合わせるが、氷は透過性のある物質であるため、CCD カメラは表面の画像だけではなく、表面から内部の情報も写し込む。焦点から離れるに従い検出する情報は減るが、得られる空間サイズはカメラからの距離が離れるとともに増加する。焦点からの距離が離れるとともに得られる情報は不明瞭となるが、サンプル表面から 74 mm 遠方でも、コア置きトレイのスリット幅である 50 mm 以上にならないという条件が必要である。CCD カメラは、レーザートモグラフ装置の備品を流用するため、レンズは C マウントレンズの中から選定を行った。ドームふじコアは、第一期の現場解析担当者から、掘削直後は散乱の要因である空気含有物や微粒子が非常に少ないとの情報があり、弱い散乱を検出する必要があると考えられる。このため、絞りを小さくして SN (Signal to Noise) 比を上げる必要性も考えられる。これらを踏まえ、数種類のレンズを比較検討した結果、Canon 社製の VF25 1.4 に 5 mm 厚の接写リングを取り付けたものが上述の条件に合うことから、これを採用することにした。これを用いると、サンプル表面における一画素あたりの空間分解能はサブミリメートルとなり、高空間分解能の画像を得ることができる。

2.2.2. 光源

光源にはサンプルの撮影に十分な光量が得られ、光が撮影範囲で同じ強度で照射されるという条件が必要である。測定速度の関係から、CCD カメラのシャッター速度を 1/125 秒以下にする必要があるため、非常に安定した光源を用いる必要がある。さらに、測定対象が氷サンプルなので、光源および光の照射により氷が昇温し、物理的性質に変化が起こらないよう低発熱であるという条件も必要である。

これまでに実験で使用した光源および候補として考えた光源について、総括した結果を表 2 に示す。予備の実験の段階では、蛍光灯とハロゲンランプを用いて実験を行った。蛍光灯は測定幅に均等に光源を照射でき消費電力も小さいという利点があるが、低温下では安定しにくく、長時間の安定性が悪いといった欠点がある。一方、ハロゲン系のロッドタイプ光源は、安定であり測定幅に均等に光源を照射することが可能であるが、定格消費電力は 150 W であり発熱が非常に大きいという問題がある。ハロゲン光源に加える電圧を下げ、発熱を抑えようと試みたが、測定に必要な光量を得るためには相当な発熱があることが分かった。安定かつ発熱の問題がない光源として、Stemmer Inc. 社製の LightLine 照明がある。これはドイツ・デンマークグループが採用しており、光源として使用実績があるが、非常に高価であり限られた予算では購入できない。そこで、上述の条件を満足し、しかも安価な光源を新たに探した結果、白色 LED 光源を候補とした。この光源は、白色の LED を並べて光の強度を高めており、任意の形状で作成可能である。LED の数および配列により数多くの種類が存在している。そこで、Imac (株) 社製の 11 cm 幅に 24 個のダイオードが 2 列 (計 48 個) 並んだものを光源として評価を行った。結果としてこの照明は、CCD カメラのシャッター速度である 1/125 秒の間隔でも安定していることを確認した。また、 -20°C の温度条件でも動作保障されており、 -25°C の温度下でのテストでも点灯直後からの照射強度安定性が良かった。そして、LED 光源の寿命は、 25°C の環境下で LED 素子の輝度半減期が約 2 万時間と長い。他用途において報告されている LED 光源の最低寿命は、5000–6000 時間であり、ラインスキャナ測定の光源として使用するには十分に長い時間である。LED 素子は高温状態に弱い

表 2 光源の比較。◎印は非常に優れている、○は優れている、×は劣っていることを示す。

Table 2. Comparison of light source. “◎” mark indicates excellent, “○” mark indicates good, and “×” mark indicates poor.

Light type	Stability in cold temperature	Low heat radiation	Price	Maker
Fluorescent light	×	○	◎	e.g. Toshiba
Light Line	○	○	×	Stemmer Imaging
Halogen rod light	○	×	◎	e.g. Phoenix Denki
LED light	○	◎	○	Imac

温下では発熱による問題が起こりにくく光源の劣化の心配は少ない(小西, 私信). これらから LED 光源は氷床コアのラインスキャナ測定に適していると判断し, サイズ的にも適合していることから, この LED 光源を採用することとした.

2.3. 制御プログラム

装置の制御プログラムを Windows XP Professional edition 上において, Visual Basic 6.0 で作成した. 動作には, PC にシリアルポートが存在し, 画像取込みボードが増設されている必要がある. 開発した制御ソフトによる本システムの動作は, 以下のとおりである. 1) PC の画面上の測定開始ボタンをマウスでクリックすると, 移動系が作動し, 画像の取り込みおよびデジタルビデオ上への画像記録が開始される. 2) 測定は自動的に終了し移動系は自動的に元の位置に戻る. 3) 測定終了後, PC 上に取り込まれた動画は, 別途開発した独自の画像解析プログラムを用いることにより, 測定したサンプル画像が作成できる.

2.4. 低温対策

移動系, 測定系をそれぞれ別々に低温テストした. 移動系のサーボモーターに低温異常は認められなかったが, 移動ステージの動作性が悪いことが分かった. 原因として移動系の潤滑剤の硬化が考えられ, 現場でも同様な場合は低温下でも硬化しない潤滑剤に交換できる準備をした. CCD カメラおよび LED 光源は -25°C の低温下でも全く問題なく作動するので, このままの状態で使用する. また, CCD カメラおよび光源用のケーブルは測定時に動くので, 低温下で硬化しないことが必要である. そこで, 稼動部にリボンヒーターを巻き, 加熱することにより硬化しないように工夫した. また, PC 本体, デジタルビデオデッキ, ロボットモジュールコントローラーは保温箱に入れることとした.

2.5. 測定方法

測定は, PC 画面上のスタートボタンを押すことにより開始され, 自動的に測定が行われる. なお, 測定中は外部からの光が入らないよう, 遮光カーテンを閉める必要がある. 測定終了後, 測定系は自動的に元の位置に戻り, 次の測定が可能となる. 測定速度は変更可能であるが, 5 mm/s 前後を想定しており, 現場解析処理の単位長さである 1.5 m のコア試料を 6 分程度で測定することが見込まれる. 完全に自動測定が行われるため, 作業者は他の仕事に従事することが可能である. なお, 測定には平行した二面のバンドソーによる切断および, マイクロトームナイフによるバンドソーの切断跡の除去が必要である. 測定範囲に切断跡が存在すると, そこで生じる強い散乱光のため, 層位とは関係ない異常な輝度情報を得ることになる. 従って, 表面加工には細心の注意が必要である.

3. 結果および課題

自動解析可能な光学層位記録装置のハードウェアが完成し、第44次越冬隊によってドームふじ観測拠点に輸送された。我々はこの装置を「J (Japan) タイプラインスキャナー」と命名した。このJタイプラインスキャナーを、第45次夏隊から始まる深層掘削の現場解析で用いる予定である。装置の主要部は完成したが、測定之最適な条件とソフトウェアの詳細については、今後検討が必要である。図3において、光源を配置する位置、光源の強度、ミラーの位置と角度、レンズの絞りが特に検討課題であり、弱い散乱でも敏感に検出可能となるようなSN比が高い測定条件を決める必要がある。また、位置分解能の精度を高めるため、画像の空間分解能に合わせて、適した測定速度を決めるなど、装置の運用方法を決定し、細かな点についても検討を行う必要がある。

本装置と同じ測定系および画像解析を行い、得られた結果を図4に示す。測定したサンプルは第一期で採取され、物理解析用に保存されていた24mm厚のドームふじコアである。得られた画像から、この測定装置を用いることにより、良好な氷床コア画像が得られることが分かった。第一期の現場解析の層位観察において検出された層位を画像の下に灰色で示しているが、得られた画像から、それらの層が散乱強度の強い層として良く検出されていることが分かった。また、この測定系を用いることにより、明らかに数多くの層が検出可能であることが分かる。

Jタイプラインスキャナー測定により得られる結果から、ドームふじコアの詳細な層位構造を知り、Dronning Maud Landの頂上であるドームふじと流線上にあるDMLコアとの対比を行うことが可能になり、過去数十万年オーダーの堆積環境の比較研究が進んでいくもの

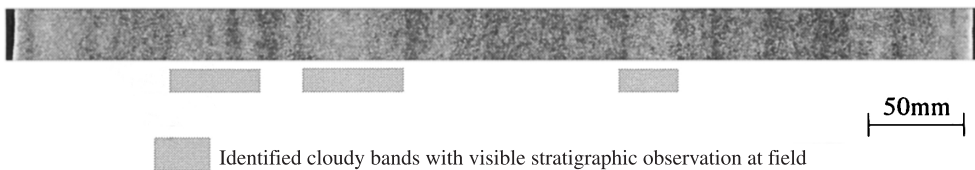


図4 50 cm長のドームふじ氷床コアのサンプル画像。測定には、開発した装置と同じ測定系を用いた。画像の輝度レベルは256であり、白色ほど散乱強度が強いことを示している。画像下のグレーで示した部分は、第一期コアの現場解析による目視観察で検出された層である。測定画像は、目視観察で検出した層を高輝度の集合体として検出している。また、目視観察で検出した一層（左）は、何層にも分かれており、また、他の部分でも高輝度の集合体が存在し、新たな層を検出している。

Fig. 4. An image of one 50 cm long Dome Fuji ice core sample obtained by a line scanner measurement. The measurement was carried out using the same measurement unit with the developed equipment. The intensity level is 256; white color shows maximum scattering intensity on the image. Rectangular gray color objects show cloudy layers identified by initial visible stratigraphy observation. The obtained image shows that the identified layers were detected completely as strong scattering regions. The obtained image also shows that one identified layer (left side) separated into several layers and other cloudy layers could be identified.

と期待する。

謝 辞

本装置の設計開発にあたり、デンマークコペンハーゲン大学 Niels Bohr 研究所の Prof. Dorte Dahl-Jensen, Prof. Henrik B. Clausen, Dr. Anders Svensson, Mr. Soren Wedel Nielsen から貴重なコメントを頂いた。製作にあたり、新堀邦夫技官をはじめとする北海道大学低温科学研究所技術部にお世話になった。光源の選定にあたり、ドイツ Alfred Wegener Institute の Dr. Renate Treffeisen, ダイナテック株式会社の小西和登氏にお世話になった。装置の組立および移動系の制御には、国立極地研究所の森本真司助手に助言を頂いた。ここに感謝の意を表します。

この装置開発は、第二期ドームふじ氷床コアプロジェクト（リーダー：国立極地研究所 藤井理行教授）の準備の一環として行われた。装置開発費は、第 44 次隊南極観測予算および科学研究費補助金（研究代表者：北海道大学低温科学研究所本堂武夫，課題番号 14GS0202）の一部を充てた。

文 献

- Alley, R.B., Shuman, C.A., Meese, D.A., Gow, A.J., Taylor, K.C., Cuffey, K.M., Fitzpatrick, J.J., Grootes, P.M., Zielinski, G.A., Ram, M., Spinelli, G. and Elder, B. (1997): Visual-stratigraphic dating of GISP2 ice core: Basis, reproducibility, and application. *J. Geophys. Res.*, **102**, 26367–26381.
- Basile, I., Petit, J.R., Touron, S., Grousset, F.E. and Barkov, N. (2001): Volcanic layers in Antarctic (Vostok) ice cores: Source identification and atmospheric implications. *J. Geophys. Res.*, **106**, 31915–31931.
- Benson, C.S. (1962): Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland ice sheet. *CRREL Res. Rep.*, **70**, 93 p.
- Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Miller, H., Watanabe, O., Johnsen, S.J., Steffensen, J.P., Clausen, H.B., Svensson, A. and Larsen, L.B. (2002): The NorthGRIP deep drilling program. *Ann. Glaciol.*, **35**, 1–4.
- 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.
- Fujita, S., Azuma, N., Fujii, Y., Kameda, T., Kamiyama, K., Motoyama, H., Narita, H., Shoji, H. and Watanabe, O. (2002): Ice core processing at Dome Fuji Station, Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **56**, 275–286.
- Meese, D.A., Gow, A.J., Alley, R.B., Zielinski, G.A., Grootes, P.M., Ram, M., Taylor, K.C., Mayewski, P. A. and Bolzan, J.F. (1997): The Greenland Ice Sheet Project 2 depth-age scale: Methods and results. *J. Geophys. Res.*, **102**, 26411–26423.
- Takahashi, A., Fujii, Y., Azuma, N., Motoyama, H., Shinbori, K., Tanaka, Y., Narita, H., Nakayama, Y., Kameda, T., Fujita, S., Furukawa, T., Takata, M., Miyahara, M. and Watanabe, O. (2002): Improvements on the JARE deep ice core drill. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **56**, 117–125.
- Takata, M. and Fujii, Y. (2000): A laser tomograph technique for ice core stratigraphy. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **14**, 16–26.
- Watanabe, O., Satow, K. and Okuhira, F. (1978): Stratigraphic analysis of firn and ice at Mizuho Station. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **10**, 25–46.
- Watanabe, O., Kamiyama, K., Motoyama, H., Fujii, Y., Shoji, H. and Satow, K. (1999): The paleoclimate record in the ice core at Dome Fuji Station, East Antarctica. *Ann. Glaciol.*, **29**, 176–178.