報 文

カムチャツカ半島ウシュコフスキー氷冠に おける雪氷コア掘削

白 岩 孝 行¹⁾, 西 尾 文 彦²⁾, 亀 田 貴 雄³⁾, 高 橋 昭 好⁴⁾,
戸 山 陽 子²⁾, Yaroslav D. MURAVYEV⁵⁾, Alexander A. OVSYANNIKOV⁵⁾

要 旨

カムチャツカ半島ウシュコフスキー氷冠において雪氷コア掘削ならびに現場解析を実施した。標高 3,901 m, 氷厚 240 m を有する K2 地点に総計 2.4 トンの物資をヘリコプター輸送し, 1998 年 6 月 20 日から 30 日にかけて雪氷コアを掘削した。総掘削回数 307 回, 総掘削時間 103 時間で全長 211.7 m の雪氷コアを採取した。掘削終了後, 20 m 毎に掘削孔壁の温度を測定した。深度 10 m は -15.7°C , 底部 211.7 m は -4.2°C であり, 表面からはほぼ直線的に漸増する温度垂直分布が得られた。掘削と並行して, 層序観察, バルク密度測定, ECM (固体電気伝導度) 測定, デジタルビデオによるコアの撮影を行った。現場解析ができた表面から深度 141 m までのコアによれば, 55 m 付近の氷化深度以浅では, コアは融解・再凍結氷と融解を経験していないフィルンからなり, 氷化深度以深では融解・再凍結氷と圧密氷との互層から構成されていた。深度 141 m までのコア中には目視できる火山灰だけでも 183 層が確認され, そのうち 2 層が火山灰の特徴から噴出年代が特定された。ECM とビデオ撮影したコアのモザイク画像とを比較した結果, ECM シグナルは火山灰層で低下, 融解・再凍結氷層で上昇する傾向が見られた。一方, 高所における掘削オペレーションであったため, 人員の健康面での各種データを採取し, 高所順応の個人差を考察した。

キーワード: 古気候, 雪氷コア掘削, 氷河, 火山灰, カムチャツカ

Key Words: paleoclimate, ice core drilling, glacier, volcanic ash, Kamchatka

1. はじめに

雪氷コアを用いた氷期・間氷期にわたる古気候研究が極域・高緯度を中心に進展する一方, 近年の気候研究は中・低緯度の気候現象に関して飛躍的に進展してきた。中でもエル・ニーニョを始めとする大気・海洋相互作用による地球規模の気候

変動は最大の注目を集め, これに加えて, 最近では十年～数十年スケールの気候変動の原因解明が気候研究の主要課題となっている。しかし, 気候研究においては使用できる実測データが過去 100 年程度に限定されるため, 中・低緯度に発現する十年～数十年の変動周期を有する気候現象の検証については, 全地球気候モデル (GCM) などに頼らざるを得ない状況である。

近年, 雪氷コアによる古環境復元がいくつかの中・低緯度の氷河でも実施され, 高時間分解能をもつ有力な古気候情報として注目されている。例えば, ペルーアンデスのケルカヤ (Quelccaya) 氷冠による例では ENSO の変動が復元され (Thompson *et al.*, 1984), チベット高原のグリヤ (Guliya) 氷冠ではモンスーン循環の変遷に加え

- 1) 北海道大学低温科学研究所
〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目
- 2) 北海道教育大学釧路校
〒085-0826 釧路市城山 1-15-55
- 3) 北見工業大学
〒090-0015 北見市公園町 165 番地
- 4) ㈱地球工学研究所
〒461-0011 名古屋市中区白壁 4-29
- 5) Institute of Volcanology, Russian Academy of Sciences,
Piip Boulevard 9, Petropavlovsk-Kamchatsky,
Russia

氷期・間氷期サイクル (Thompson *et al.*, 1997) さえ復元されつつある。これらの研究により、極域の寒冷環境に類似した条件が存在する高山の氷河においては、雪氷コアによる高時間分解能の古環境復元が中・低緯度においても可能であることが示された。さらに、中・低緯度に位置する氷河は一般に高所に存在することから、地球規模の環境変動は低地の局地的な影響を受けない中・低緯度の高所氷河にこそ良く記録されるという主張さえある (Thompson *et al.*, 1997)。

オホーツク海をとりまく陸域雪氷圏は、ユーラシア大陸に発達するシベリア高気圧と北太平洋に発達するアリューシャン低気圧の狭間に位置し、著しい気圧勾配のもとに置かれている。このため、シベリアや北太平洋域で生じる気候変動は、環オホーツク地域の雪氷圏に敏感に反映されることが容易に予想できる。事実、1970年代後半に北太平洋の平均海面気圧の低下が生じ、アリューシャン低気圧の東偏が生じた (Nitta and Yamada, 1989; Trenberth, 1990)。その結果、アラスカやカムチャツカではこの変化を境にして氷河の質量収支に著しい変化が見られた (Walters and Meier, 1989; McCabe and Fountain, 1995)。最近の気候学・海洋学の研究成果によれば、北太平洋域で生じるこの現象は大気・海洋相互作用によって生じる数十年スケールの周期をもつ現象であることがわかってきた (Minobe, 1997)。しかし、気象データは長期間の解析を可能にするだけの蓄積はなく、気象データにかわる古気候情報が、この気候現象の変動に関する有力な情報を提供し得ると考えられている。

このような状況を鑑み、北太平洋とシベリアに挟まれた環オホーツク地域の古気候を復元すべく、環オホーツク地域における雪氷コア掘削が計画された (Kobayashi *et al.*, 1997)。対象地域として選んだカムチャツカ半島はオホーツク海と北太平洋を区切る地域でもあるため、オホーツク海の海洋環境、特に冬期の海水発達状況の変遷も雪氷コアのシグナルに残されている可能性もある。

以上のような背景の下、1998年6月にカムチャツカ半島ウシュコフスキー氷冠 (Ushkovsky ice cap) において深度211.7 mまでの雪氷コア掘削を実施した。本報告は、この掘削プロジェクトの

輸送・設営・掘削・コア現場処理・気象観測・健康管理を報告し、掘削オペレーション全体の統括を行うことを目的とする。

2. 掘削地点の概要

掘削地点はカムチャツカ半島中央部に位置するウシュコフスキー火山 (標高3,903 m; 56°04'N, 160°28'E) の山頂カルデラを覆う氷冠である (図1, 2)。氷冠は直径約4 kmの大きさを有し、南寄りに位置する山頂 (標高3,903 m) から北端のビルチェノック氷河流出口 (標高3,200 m) にかけて緩く傾斜している。山頂には氷河に埋積された二つのクレーターが存在する。南西側のゴルシュコフ (Gorshkov) クレーターは直径800 m、北東側のヘルツ (Herz) クレーターは直径200 mである。以下、カルデラとクレーターを埋積する山頂部の氷河全体の呼称としてウシュコフスキー氷冠を用い、掘削に関わる氷冠上の特定地点を示す名称として、ゴルシュコフ・クレーターを用いる。

ウシュコフスキー氷冠は1980年代に本研究の共同研究者であるY. ムラビエフらによって氷河学の観点から (Murav'ev and Salamatina, 1990)、またA. オブシャニコフによって火山学の観点から研究が開始された (Flerov and Ovsyannikov, 1991)。我々は掘削地点の選点のため、掘削に先立ち3年間の予察調査を実施した。初年度の

図1 北から望んだウシュコフスキー氷冠全景 (1995.9.2 白岩撮影)。中央の最高所が掘削を実施したゴルシュコフ・クレーター。

Fig. 1 Ushkovsky ice cap viewed from the north (Photo taken by Shiraiwa on Sept. 2, 1995). The highest point at the center of photo is Gorshkov crater.

図2 ウシュコフスキー氷冠の地形図。実線および破線はそれぞれ氷河と基盤地形の等高線を示す。

Fig. 2 Topographic map of the summit ice cap of the Ushkovsky volcano, Kamchatka. Solid and dotted contours are for the glacier and bedrock, respectively.

1995年9月には、ヘリコプターにより標高5,000 mの高度において各方位から写真撮影を行い、氷冠の形態を調べた。1996年7月24日から8月4日には、ゴルシュコフ・クレターにおいて浅層27 mコアの掘削および掘削孔を利用した垂直温度分布測定、表層積雪のピット調査を行い、フィルン・コアの物理特性と層序解析から過去の気候シグナルの検出を試みた (Kodama *et al.*, 1996; Shiraiwa *et al.*, 1997)。また、インパルスレーダーによる氷厚探査を行い、ゴルシュコフ・クレターの深度が180 m程度であることを明らかにした (松岡ら, 1997)。1997年6月9日～6月21日には、インパルスレーダーによるウシュコフスキー氷冠全体の氷厚探査を実施するとともに、カルデラを含む3地点において表層10 mの雪氷コアを取得し、物理・化学的な基本解析を実施した (Shiraiwa *et al.*, in press; Matsuoka *et al.*, in press)。この時は、雪氷コア10 mを凍結したまま日本国内に輸送する実験を行い、無事輸送可能

なことも確認した。

以上の予察調査結果により、氷冠の氷厚は最深部のゴルシュコフ・クレター K2 地点で約240 m, K2 近傍では年代既知の火山灰層から推定される1969年から1996年までの平均の年収支は水当量で $0.57 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ と推定された。また、通年の27 m深までの雪温測定結果から、10 m深の年平均雪温は -15.8°C であり、表層部をのぞき融解が生じないこと、表層部の融解も夏の極めてわずかな時間にしか生じないことが判明した。これより、表層部で生じた融解水は氷体内部で再凍結し、液体として氷冠外へ流出する量は極めて少ない。また、本氷冠は中緯度の湿潤地帯に位置するので、昇華凝結・蒸発が質量収支に寄与する割合は小さいと考えられる。従って、先に求めた平均の年収支 $0.57 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ はほぼ年間涵養速度とみなして差し支えないであろう。以上のことより、本氷冠には少なく見積っても420年以上の古気候記録が保存されていることになり、環オホーツク地域の古環境復元にとって貴重な雪氷コアとなることが予想される。

3. 輸送・設営

3.1 輸送

ウシュコフスキー氷冠における雪氷コア掘削を最も効率良く実施するため、掘削担当者3名 (高橋・亀田・シェフツォフ)、現場解析担当者4名 (白岩・西尾・戸山・ムラビエフ)、ロジスティックス担当者1名 (オブシャニコフ)、調理担当者1名 (コルキナ) の計9名の人員を確保した。また、20日間の現場作業を可能にするために総計2,400 kgの物資を輸送した。表1に今回使用した物資の項目毎の体積・重量に関する情報を掲げる。

遠征出発点であるカムチャツカの州都ペトロパブロフスク・カムチャツキー市からウシュコフスキー氷冠までは500 kmの距離がある (図2)。財政的な理由からヘリコプターの利用をできるだけ少なくする必要があったため、ペトロパブロフスク・カムチャツキー市からウシュコフスキー氷冠山麓のコズイレフスク村までは軍用トラック1台で約2,400 kgの物資を輸送し、人員9名はマイクロバス1台で移動した。所要時間は約10時間で

表1 掘削オペレーション関連物資の項目別重量および体積

Table 1 Weights and volumes of materials prepared for the drilling operation.

Name	Volume (m ³)	Gross weight (kg)	Remarks
Drill system	1.54	501	
Generator 1	0.22	80	3.5 kVA
Generator 2	0.11	44	2.0 kVA
Drilling tent	0.22	52	
Science tent	0.20	39	
Science items	1.73	323	
Logistical items	2.00	500	
Food	1.30	450	
Fuel	0.40	400	Petrol
Total	7.72	2389	

あった。

標高 40 m のコズイレフスク村からウシュコフスキー氷冠ゴルシュコフ・クレターの掘削地点である標高 3,901 m の K2 地点への荷揚げはヘリコプターを利用した。ロシア製大型ヘリコプター Mi8 型機は、平地では約 4,000 kg の最大積載可能重量をもつが、高所では当然のことながらこの値は減少する。今回のゴルシュコフ・クレターへの荷揚げに際しては約 800 kg が上限であった。荷揚げする総重量は、物資 2,400 kg に人員 9 名（1 名 90 kg として計算）の 810 kg を加えた計 3,210 kg である。これより、6 月 18 日の往路では 4 往復、計 3 時間 20 分の所要時間で物資・人員輸送を実施した。7 月 5 日の帰路は、掘削した雪氷コア（約 1,800 kg）と消費した食料・燃料（850 kg）の差引で合計 4,160 kg を 4 回の往復で輸送した（所要時間 3 時間 35 分）。帰路に 1 回あたりの積載可能重量が 1,040 kg と増えたのは、天候状況が良かったことと、往路と異なり離着陸点となる K2 地点付近の雪面状態が比較的硬かったためである。

3.2 設営

ゴルシュコフ・クレターにおける掘削キャンプの平面図を図 3 に示す。悪天下での作業も予想されたので、掘削作業と現場解析作業はそれぞれ掘削テント（幅 3.5 m × 長さ 5.4 m × 高さ 2.75 m）と解析テント（幅 3.5 m × 長さ 4.5 m × 高さ 2.25 m）を作成して内部で行った。後述するように、掘削

図 3 ウシュコフスキー氷冠ゴルシュコフクレター内の K2 地点に設けられた掘削キャンプの平面図。雪氷コア掘削を行った K2 地点は 56°4.468'N, 160°28.058'E, 3,901 m a.s.l. に位置する。

Fig. 3 Plan view of the ice-coring camp at K2 (56° 4.468'N, 160°28.058'E, 3,901 m a.s.l.), Gorshkov crater, Ushkovsky ice cap.

期間中は比較的好天に恵まれた。このため、日中、気温が 0°C 近傍まで上昇することがあり、テント内は 0°C 以上となった。このような時はドリル本体に融解水が付着し、これが掘削孔内の低温で凍結して掘削に支障をきたす場合が見られた。このため、掘削開始から 6 日目以降、掘削は外気温の低下する夜間を実施した。一方、解析テント内でも日中の昇温が問題となったため、テント内の雪面を 150 cm 掘り下げ、少しでもテント内温度を下げるよう務めた。ただし、ECM（固体電気伝導度）測定には十分な低温環境を得られなかったため、現場解析も掘削に準じて 6 日目以降夜間実施することとした。

掘削した雪氷コアは、現場解析を実施するまで、掘削テントの北東に掘った深さ 1.5 m のコア貯蔵トレンチに保管した。トレンチ内の温度はほぼ -10°C 程度で安定していた。

就寝は 1 人ないし 2 人で 1 つのドーム型テントを使用し、十分な休息をとれるよう考慮した。食

事は常設の食堂テントを作成し、常時ここで採るようにした。以上のテントはすべて直径 6 mm のライフロープで連結し、高い地吹雪でもテント間の移動が安全に行えるよう配慮した。

現地作業中は、緊急事態の発生に備えて 1 日 1 回現地時間午前 10:00 にペトロパブロフスク・カムチャツキー市の火山学研究所 Institute of Volcanology と HF 無線機により定時交信を行った。帰路のヘリコプター要請に際しては現地の天候を確実に伝える点でもこの交信は必要不可欠であった。

4. 掘 削

4.1 掘削オペレーション

出発前の予定では 15 日間を掘削期間とし、目標深度は 220 m であった。しかし、別送した掘削機材の通関手続きに 20 日間を要し、実際の掘削日数は 10 日と短縮せざるを得ず、到達した深さは 211.7 m にとどまった。掘削作業は多くの火山

灰層による刃の消耗により時間と労力を消費したことを除けばほぼ順調に推移した。

掘削機材は北見工業大学所有、(株)地球工学研究所製作の D-2 型浅層掘削機 (高橋, 1996) および浅層型ウィンチを使用した。主な仕様を表 2 に示す。地上での作業時間を節約するためコアバレルは 2 本用いた。発電機は、3.5 kVA の出力をもつガソリン発電機 (ヤマハ製 EF-4000 型) を用いた。ただし、高所での使用のため、噴射ノズルをより口径の小さなものに変更したので出力は 65 % 程度に低下した。カムチャツカではオクタン価の高い A-96 と低い A-76 と呼ばれるガソリンが流通しており、前者を用いることにより、上記発電機は支障なく作動した。但し、発電機をテント外に設置していたため、地吹雪時にはエアフィルターが目詰まりをおこし、出力の低下がしばしば生じた。

1998 年 6 月 20 日午後から掘削を開始し、6 月 30 日深夜に掘削を終了した。図 4 に一日の掘削長とその積算掘削深を示す。掘削が最も順調に進んだ日 (6 月 22 日) は、 $31.4 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$ であった。この日の掘削作業時間 (前後の準備も含む) は 10 時間で、掘削スピードは $3.1 \text{ m} \cdot \text{hr}^{-1}$ であった。また、12 日間の延べ掘削時間は 103 時間であったので、平均掘削スピードは、 $2.1 \text{ m} \cdot \text{hr}^{-1}$ であった。

図 5 に一回の掘削で採取したコアの長さを示

表 2 ドリルおよびウィンチの主要な仕様
Table 2 Specifications of ice drilling system

Drill system (Type D-2)

Type	Electro-mechanical drill
Core diameter	94 mm
Core length	Firm: 1.0 m Ice: 0.8 m
Drilling speed	$15\text{--}40 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$: Variable by replacing cutters and heels
Size of drill	125 mm x 3020 mm
Type of anti-torque	Leaf spring type
Motor	AC 200 V, 600 W
Barrel specification	Applicable for both of dry and liquid-filled boreholes
Controlling system	Variable by cylister voltage controller
Remarks	Water proof ($0.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Mast and winch system (Type W-3)

Type	Tilting tower type
Height	3.5 m
Winch speed	$30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ in average
Maximum load	80 kg
Motor	200 V, 0.75 kW
Controlling system	Inverter system
Cable	Armored cable, diameter 5.7 mm, length 240 m, drilling depth 220 m, conductor 4 lines

図 4 掘削期間 (1998 年 6 月 20 日 ~ 30 日) における日々の掘削深と積算掘削深度。

Fig. 4 Daily ice-coring depths and their cumulative depth curve during the drilling operation from June 20 to 30, 1998.

図5 全307回に及ぶ掘削回毎の雪氷コアの長さ。0 cmはコアが採取できなかったことを示す。平均長さは69.2 cmであった。

Fig. 5 Lengths of the ice-cores retrieved at each drilling run. The length of 0 cm indicates that no core was obtained. The average length of the whole run was 69.2 cm.

す。全掘削(307回)での平均コア長は69.2 cmであった。図中、0 cmはコアを回収できなかった事を意味する。表面から50 m深までのフィルンコアでは、平均84.0 cm長であった。これは、表層ではコアの密度が比較的小さいために、掘削時のチップ量が少なくなること起因している。また、コア長が80 cmよりも短い場合は、火山灰層に当たった場合が多い。これは火山灰層に当たると掘削が進まず、そのたびにドリルを地上に出したためである。目視観測で検出した火山灰層は、141 m深まででも183層に及んだ。灰の密度にもよるが、二層ほど掘ると刃が傷んで交換しなければならぬ。一層を突破するのに2組の刃を必要とした場合もあった。8組準備した刃はすぐ使いきってしまったので、その後は砥石で砥ぎつつ掘削を行わねばならなかった。全てのケースにおいて刃の逃げ面(掘削孔底に対峙する刃側の面; 水平面との間で逃げ角をなす: 高橋, 1996の図6参照)が傷んでいたため研ぎ代が大きく、さらに回転砥石が無かったため、この作業に多くの労力と時間を必要とした。

表層部のコアはフィルン層と再凍結氷層の互層構造であった。このため、ドリルの刃がフィルン層を抜けて氷層に入った時、急激に切削トルクが増えるため、アンチトルクとして使用していたリーフスプリング(高橋, 1996の図1参照)がフ

ィルンを削ってアンチトルクがきかなくなる現象がしばしば見られた。これは、刃の切り込み量を減らす事とリーフスプリングの強度を強くする事で対応できた。

190 m深からシルト質氷や砂礫と思われる固体粒子含有層が現れ、基盤に近いことがうかがわれた。続いて211.7 mでは空洞があるかのごとくドリルが40 cmほどスルスルと進んだと感じられたが、コアにはそのような形跡は見られず事実かどうか確証は無い。最後となった307回目の掘削では、コアカット時にドリルが上がらずスタックが懸念されたが、数分のちにケーブルを手で引っ張るとドリルが上下に動くようになっていた。上がって来たドリルには全く異常が無く、この引っかかる原因は不明である。掘削はここで終了し、その後掘削孔内の氷温を測定した。

4.2 本掘削の問題点

今回の掘削の最大の問題点は何といっても多数の火山灰層が存在したことによる刃の消耗である。通常1組の刃で100 m程度は掘削可能である。今回は火山灰層が多いことを予想して8組の刃を準備したものの、灰の多さとその密度は完全に予想を大きく超えるものであったため、すぐ予備の刃を使いきってしまった。このような状況ではたとえ10組、20組の刃を用意したとしても現場の研磨を必要としたことは間違いない。それよりも回転砥石を持っていくべきであった。

刃と同様、コア・キャッチャー(高橋, 1996の図8参照)もコアに触れる中心部の磨耗が激しく、コアカットのミスやバレルからはみ出しにつながった。そのためコア・キャッチャーの交換および研磨をそれぞれ一回づつ行った。通常の氷ならば200 m程度の掘削の場合、1組のコア・キャッチャーで間に合うと思われる。

140 mより深いところではコアが破碎するケースが多々あった。この現象はほとんどの浅層掘削に伴う問題点であるが、その原因は特定できず、解決策は確立されていない。今回良質コアを採るため一回につき2~3リットルの軽油を孔内へ入れる部分液封掘削(ごく少量の液封液を潤滑用に孔底に溜めた掘削)を予定し、263回目(深度193.76 m)の掘削にて実施した。ところが液封液

を用いない通常の掘削に戻したとき刃が氷に食いつかず、3回の掘削を無駄にする状況となった。この時期は残された時間を気にしつつ目標に達するか否かの分岐点であったため極力時間を節約する必要があり、部分液封掘削はこの一回のみで打ち切った。この時採れたコアは明らかに他と比べれば良質であったが、ただの一回の結果で評価することは出来ない。

ウインチ速度は荷重とモーター容量によって決まり、今回の場合は平均 $30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。深くなるにつれてドリルの上げ下げに時間がかかり、210 m ではドリルの上げ降ろしに14分(片道7分)を必要とした。この時間は実に長く感じられ、スピードアップが切実に望まれた。しかし0.75 kW モーターの上位機種は1.5 kW と倍になり、インバータや発電機の容量まで影響を与えるので総合的な判断を必要とする。一秒でも早くドリルを上げ下げしたいためスピードダイヤルを上げすぎて、インバータのトリップを引き起こす事が頻繁に発生した。

このシステムには深度計は付いていないため、ケーブルに1 m 毎の深度目盛りを書き込んで深度を記録した。深度の点検の際に深度目盛りの書き込みミスが発見された。今後は、自動的に深さを操作盤に表示する事ができるよう、装置の導入が必要である。

5. 検層およびコア現場処理

掘削終了後、掘削孔の温度測定を行った。また、コア貯蔵トレンチ内から解析 TENT に運ばれたコアは、6月21日～7月3日にかけて、以下に述べる現場解析を順次行った。時間的な制約から、全層211.7 m のコアに対し、現場解析を終了できたのは141 m 深までであった。

5.1 氷温測定

掘削孔を利用した氷冠内の温度測定は、接触型測温装置(リーフスプリング型)を使用した(Kameda *et al.*, 1993)。リーフスプリングにサーミスターセンサー(テクノセブン社製BYE-64型)を固定した。このセンサーは、12 mmx16 mm の長方形をしており、孔壁との接触面積を大きくとれる利点がある。この測温装置を掘削用ケーブル

に接続し、ケーブル抵抗をデジタルマルチメーター(イワツ SC7401 型)で測定した。20 m 間隔を基本にして、一カ所で2時間測定するようにした。なお、測定した結果を温度に換算する際には、ケーブル抵抗を減じ、絶対確度 $\pm 0.04^\circ\text{C}$ の温度校正システム(気象庁)で校正した基準白金抵抗温度計を使い、温度に換算した。

図6に40 m 深での測定結果を示す。横軸の時間は、センサーを所定の深度に設置してから時間(分)を示す。初めは孔壁とセンサーとの摩擦熱により高い値を示すが、5分後に最低値を示す。その後温度は徐々に高くなり、一定温度に近づいてくる。これは40 m での測定前に20 m 深で2時間水温を測定したために、センサー自体が40 m 深の氷温よりも冷えていたためと思われる。

この測定システムで測定した氷温には、以下の3つの主要な測定誤差がある。

a. 校正基準の誤差

気象庁温度校正システム(絶対確度 $\pm 0.04^\circ\text{C}$, HP2804 A 型)を用いて校正した基準白金抵抗温度計の誤差($\pm 0.06^\circ\text{C}$ 程度)。

b. 測定誤差

現地で使用したデジタルマルチメーターによる抵抗測定の誤差($\pm 0.04^\circ\text{C}$ 程度)。

c. 掘削による「安定氷温」からのずれ 不明。

要因 c. は短期間の温度測定では確定できないの

図6 深度40 mにおける掘削孔壁温度の測定開始から2時間後までの時間推移。

Fig. 6 Changes in ice temperature from the start of measurement to 2 hours later at a depth of 40 m.

で, 要因 a + b のみを考慮すると, 合計で $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ となる. 要因 c は不明ではあるが, 掘削終了から 7 ~ 48 時間過ぎているので, その深さの平衡温度「安定氷温」からのずれは, 0.1°C より小さいと思われる. 従って, 測定値の誤差は, $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 程度と考えられる.

図 7 に掘削孔の氷温測定結果を示す. これは, 各深度での氷温の時間変動から推定された「安定氷温」をまとめたものである. 年間の温度振幅が $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ の 10 m 深 (Shiraiwa *et al.*, in press) で -15.7°C , 掘削孔底部の 211.70 m で -4.2°C であり, 深くなるにつれてほぼ直線的に氷温が高くなることが判明した.

5.2 層序・バルク密度

コア貯蔵トレンチから解析テントに運ばれたコ

図 7 掘削孔壁の氷温とコアのバルク密度プロファイル.

Fig. 7 Profiles of the ice temperature at borehole wall and the bulk densities of ice cores.

アは, 直径と重量を測り, バルク密度を求めた. 次いで, ライトテーブルを使用して丸コアの層序を観察し, 実寸大のコアチャート紙に層序の特徴を記載した. 注目した点は, フィルン層の場合, 層境界, 雪粒の粒径, 融解・再凍結を示す氷板の形状であり, 氷化後は気泡の形状・分布状況である. 火山灰層の分布, 色相, 密度は特に注意して観察し, 忠実にコアチャート紙に記載した.

図 7 にバルク密度分布を示す. バルク密度の測定に際しては, 氷層のあるなしに関わらず, 掘削されたコア毎の密度を測定しているもので, 詳細な圧密過程そのものを示しているわけではない. 大まかな特徴として, 深度 55 m 付近で密度 $830\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ に達し, 氷化している. Shiraiwa *et al.* (1997) は, 表層 27 m のフィルンコアの密度, 温度, 平均質量収支のデータを用い, Herron and Langway (1980) の圧密モデルから氷化深度を 58 m と予測した. 今回の実測結果は, 予測とほぼ同深度で氷化していることから, Herron and Langway モデルがウシュコフスキー氷冠においても適用可能なことを示している.

図 8 に表面から深度 60 m までのコアの層序を示す. 図中, 矢印は火山灰層の位置を表している. 柱状図では, フィルン中の氷層ならびに氷化深度以深は球形気泡を少量もしくはほとんど含まない氷層を融解・再凍結を経たものとして黒ヌキに, フィルン層および氷化深度以深は気泡を多数含む氷層を融解を経験していないと考えて白ヌキで示した.

この雪氷コアの最大の特徴は, 表面から最深部にわたって断続的に火山灰層を包含することであり, 深度 141 m までで目視できるだけでも 183 層が認められた. これらの火山灰層の中には層厚 1 cm を越えるものが深度 140 m 未満だけでも 3 層あった. 大部分の火山灰は黒色のスコリア質火山灰であるが, 12.30 m 深と 35.49 m 深で発見された火山灰はパミスに富んだ灰褐色を呈し, その層相からそれぞれ 1986 年 5 月と 1956 年 3 月にウシュコフスキー氷冠の南東 14 km に位置するベズイミヤニイ火山 (2,869 m) から噴出した火山灰と考えられる. 後者の火山灰を用いて計算される 1956 ~ 1998 年までの平均年収支 (水当量) は $0.54\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ となる.

融解・再凍結氷の層厚が単位長さのコアに占める割合を Melt Feature Percentage (MFP) と呼び、しばしば夏の気温の指標として注目されてきた (Koerner, 1977; Kameda *et al.*, 1995). ゴルシュコフ・クレーターにおいても、表層 27 m のフィルンコアの解析から、MFP と 6 月～8 月のカムチャツカ半島上空 700 hPa の平均気温が良い正の相関をもつことが示された (Shiraiwa *et al.*, 1997). 図 9 は、深度 140 m までの MFP の変動を示したものである。図中、二つの線があるが、一方は全ての融解・再凍結氷を考慮したもの、他方は火山灰を含む融解・再凍結氷を除外したものである。後者を作成した理由は、比較的高温な夏に再凍結氷が形成されるのに加え、低温でも火山灰の被覆によるアルベド低下により融解・再凍結が生じる可能性があるためである。従って、火山灰を伴う氷

層は、夏の気温とは無関係に形成された可能性がある。事実、1997 年 5 月 9 日に噴火したベズィミヤニイ火山の火山灰が降下した雪面では、同年 6 月の観察によれば、 -10°C の気温下においても表面融解が生じていた (Shiraiwa *et al.*, in press).

図 9 の火山灰層を含む氷層を除外した MFP の分布は、表層から深度 140 m にわたって大きく変動しており、3 m 付近、18 m 付近、40 m 付近、60～80 m、95 m 付近、110～130 m に割合の小さい部分が見られる。これらの MFP の割合の小さい期間は、夏に低温であったと推定される。図 9 には MFP と共に、雪氷コア 1 m に含まれる火山灰層の枚数を示した。火山灰層の分布と MFP との間に明瞭な関係は見られないが、60～80 m 付近と 110～130 m 付近で MFP の極小期に火山灰の枚数が多いことが興味深い。

図 8 コアの表面から 60 m 深までの層序。柱状図で黒ヌキは融解・再凍結氷、白ヌキは融解を受けていないフィルンないし圧密氷。柱状図の横の矢印は火山灰層が存在することを示す。

Fig. 8 Stratigraphic sections of the ice core from the surface to a depth of 60 m. Black and white parts of the columns indicate melt-freeze ice and firm/compacted ice layers, respectively. Arrows beside the sections show horizons of volcanic ashes.

図9 融解・再凍結氷の層厚がコア1 mに占める割合 (MFP: %), およびコア1 mに含まれる火山灰層の枚数の140 m深までの分布. MFPについては, 全ての融解・再凍結氷を考慮した場合と, 火山灰層を含む融解・再凍結氷を除外した場合を示す. 全てのデータはコア7 m毎に移動平均値として示した.

Fig. 9 Profiles of the melt feature percentage (MFP: %) (Koerner, 1977; Kameda *et al.*, 1995) and a number of volcanic ash layers within 1 m of cores. Two profiles were made for MFP: one is including all melt-freeze ice layers and the other is excluding ice layers associated with ashes. All the values are shown as 7 m running average.

5.3 ECM測定

ECM (固体電気伝導度) は, 測定する際のコアの温度が -10°C 以下で一定であることが望ましい測定条件である. 今回のウシュコフスキー氷冠での現場解析では昼間の気温が高く, コア貯蔵トレンチ内の温度が -10°C 以上に上がったため, 夜間に測定を行った. 実際の温度条件としては, 解析テント内が平均で -3°C 前後, コア貯蔵トレンチ内の温度が $-10^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$, コアの温度が $-6^{\circ}\text{C} \sim -12^{\circ}\text{C}$ の範囲であり, 平均 -8°C の条件のもとで行うことができた.

今回用いた測定装置は直流方式であり, 高電圧発生装置で1250 Vの直流電圧を発生させ, 真鍮の棒を加工した幅2.5 cmの電極で測定した. 電極は架台をスライドできるようになっており, 走査は約 $1\text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ の速度で手動によって行った.

ECM測定をおこなうコアの表面は, 表面から深さ61.04 mまではバンドソーで半割りにしたコアの表面をマイクロトームで削ったもの, 61.04 mから140.58 mまでは丸コアに直接マイクロトームをかけ, 幅4 cm程度の平らな表面を削り出し測

定を行った. 一つのコアの測定に対して2回ずつ連続して測定を行い, 再現性を確認した. また, 数個のブロックに分かれたコアは, 全て架台に並べ, まとめてマイクロトームをかけて測定した. 深度47.18 m以深のコアからは電極と氷の接触をよくするために電極の上に250 gの重りをのせた. 記録はXYレコーダーのチャートに記録した. 記録紙に記録されたアナログデータのデジタル化を帰国後実施し, 後述するデジタルビデオによるコアの画像データと比較することにより, ECMデータと層序との関係を検討した.

図10に3つの深度における様々な層序を示すコア画像とECMデータを示す. フィルン層と氷層の互層構造では, フィルン層でECMレベルが低く, 氷層で高い傾向が見られた (図10-a). また, 氷化深度以深でも, 融解していない圧密氷層と再凍結氷層では, 再凍結氷層でECMレベルの上昇が見られた (図10-b). 火山灰とECMとの対応については, 火山灰層が薄い場合には, 火山灰の部分でレベルが低下し, その下はまたもとのレベルに戻るといった現象が見られた (図10-cの上部1番の火山灰層). 一方, 厚い火山灰層ではECMレベルがほぼゼロになり, その火山灰の下層においてもレベルの低い部分が続いた (図10-cの下部2番の火山灰層). ECMは水素イオン指数に変換できるので, このコアに見られる火山灰層は弱アルカリ性であることを意味する.

ECM測定の問題点としては, 現場解析を行っているときのコアに約 $2^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$ の温度の上昇があり, 今後, 温度補正を行うことが必要である. また, 記録のデジタル化により, 140.58 mまでの全体像を一つのグラフに作成したが, 個々のコアのECMデータを単につないで作成するだけでは, 全体像に出ているゼロレベルがコアのつなぎ目であるのか, 火山灰等によるゼロレベルなのか識別することが困難である. そこでECMレベルが示すシグナルを, 火山灰の種類, 氷板, また化学分析の結果と照合することによって解釈を行っていく予定である.

5.4 ビデオモザイク撮影

目視による層序観察と並行して, デジタルビデオを用いたコアの連続撮影を行った. 撮影架台に

図10 ECM レベル (μA) とコアのモザイク画像による層序との対比. 各深度は, a) 50.51 ~ 51.01 m, b) 99.04 ~ 99.55 m, c) 197.70 ~ 198.45 m.

Fig. 10 Comparison between ECM levels (μA) and ice core images by a digital video camera. Depths of each profile are a) 50.51-51.01 m, b) 99.04-99.55 m and c) 197.70-198.45 m.

コアを設置した後、撮影架台上でビデオを手動で走査し、コアの連続撮影を行った。光源は白色灯による透過光である。コアの横には定規を置き、定規に焦点をあわせて撮影した。

図10で示した3本のコアの柱状図は上記の操作によって作成されたモザイク画像である。このモザイク画像からは、火山灰の色、粒度、厚さの他、気泡の形状、大きさ、氷板の厚さ、そして火山灰や氷板がどのような形態でコアに存在しているかという情報を視覚的に読み取ることができる。

モザイク画像作成の問題点としては、モザイク画像をより鮮明にするための架台の改良、光源の選択が挙げられる。また、ECM等のデータと照合する際にスケールの一致を正確に行うことが必要である。

6. 気象観測

掘削期間中は天候・気圧・気温・風向・風速・

図11 掘削期間中の気温 (10分インターバル) と気圧 (1日3回現地時間 09:00, 15:00, 21:00) データ。

Fig. 11 Air temperature ($^{\circ}\text{C}$: 10-min interval) and atmospheric pressure (hPa: 09:00, 15:00 and 21:00 LT) during the ice-coring operation.

視程・雲量・雲形に関する観測を1日3回(現地時間 09:00, 15:00, 21:00)行うと共に、無人気象測器により10分毎の気温・湿度の測定を実施した。

図11に滞在期間中の気温ならびに気圧測定結果を示す。6月19日から27日までは、概ね-1

～ -7°C で推移した。28日は -12°C まで低下したが、その後上昇し、 $0 \sim -4^{\circ}\text{C}$ で変化した。気圧は、635～657 hPaで変動したが、気温と連動して29日から上昇に転じた。滞在期間中に風速が $10 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ を越す日は3日あり、高い地吹雪となったが、それ以外の期間は平穏な日が多く、滞在期間中の平均風速は $5 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 程度であった。またはっきりとした卓越風向は観測されなかった。

7. 健康管理

標高4000 m以上の高度に車やヘリコプターで「一気」に登ると年齢、性別、体力には関係なく、ほぼ全員が急性高山病（頭痛、吐き気、めまい、動稀、息切れ等）にかかる。ウシュコフスキー氷冠は標高3,900 m付近に発達するため、十分、高度障害が生じる危険性が予想された。そのため、予防と対処の2つに分けて高山病対策を準備した。予防については、入山前および初日における降圧利尿剤の服用、並びに高度障害を警告反応の段階で捉えるために、パルスオキシメーターとAMSスコアによる自己健康管理を行った。また、対処については、減圧により一時的に高度障害による症状を緩和できるガモフバックを携行すると共に、徒歩にて下山可能な下山路を確保した。結果的には、問題となるような高度障害は現れず、用意した対処法は試みることがなかった。

7.1 パルスオキシメーターと AMS スコアによる自己健康管理

パルスオキシメーターとは、動脈血中ヘモグロビン酸素飽和度 (SaO_2) を百分率で計測し、同時に1分間心拍数 (HR) を測ることができる計器である。酸素飽和度は、動脈血拍によって起こる波動信号を皮膚を通して透過する赤 (660 nm) と赤外 (910 nm) 光によって計測し、計測された二つの色の波動比で決定することができる。この値が高いと高所に順応している目安となる。測定は朝食の前後に、安静時に近い状態の座位で実施した。高所では心拍数など変動が激しいため、1分程度計り、その平均値をとっている。

一方、AMSスコアとは、「頭痛、消化器症状、疲労・脱力、めまいふらつき、睡眠障害、小便」

の6種類の症状について0～4の点数を自己申告にもとづいて評価し、合計点を求めたものである (山本, 私信)。合計点が高い場合や、急激に高くなってきた場合は、重症の高山病になりかかっている可能性があると判断される。AMSスコアに関しては、寝る前にその日の自己健康状態を記録した。

表3に今回の被験者に関する個人データを、図12に掘削オペレーション中の被験者毎の酸素飽和度 (SaO_2)、心拍数 (HR)、AMSスコアの時系列データを示す。酸素飽和度の値で全員に共通していることは、山頂では平地での値より15～20%低下したことである。低下の様子は個人によって様々であったが、ウシュコフスキー氷冠上に登って初日に最低値を示し徐々に値が上がっていくタイプと、値は平地と比べて低下するのだが、4日～5日後に最低値を示し、徐々に上がっていくタイプの二つのパターンが見られた。前者のパターンは高所経験の回数が多い白岩、コルキナであった。南極ドーム基地 (標高3,800 m) での越冬の経験のある亀田は後者のパターンであった。しかし、亀田の変動の様子は他のメンバーとは少し違っており、山頂に上がった初日の酸素飽和度は平地とあまり変わらず、最低値を示すまで日数が一番かかっている。最低値を示してから回復が速く、10日目頃からは他のメンバーの値より比較的高い値 (約90%) で安定した値をとっている。最高齢の高橋は他のメンバーと比較して、酸素飽和度の絶対値が全体的に低かったが、値の大きな変動はなく、比較的安定しながら徐々に高所順応していく傾向がみられた。

表3 高所順応に関わる被験者の個人データ
Table 3 Personal data of the members in relation with acclimatization.

Name	Sex	Age	Height/weight	Max. height ever attained
Takahashi	M	57	157cm/55.2kg	5,000m
Nishio	M	51	170cm/75kg	4,500m
Kameda	M	35	170cm/64kg	4,000m
Shiraiwa	M	34	176cm/67kg	6,100m
Toyama	F	21	165cm/55kg	3,100m
Korkina	F	35	155cm/45kg	5,000m

図 12 表 3 に示した被験者の掘削オペレーション中の酸素飽和度 (SaO₂), 心拍数 (HR), AMS スコアの変化。

Fig. 12 Changes in Oxygen Saturation Percentage (SaO₂), Pulsation (HR) and AMS score of each member as shown in Table 3 during the ice-coring operation.

下山する2～3日前から酸素飽和度が下がるタイプと最後まで上がっているタイプが見られる。これは氷冠上での活動内容が個人によって違った事に要因がある。例えば、西尾・戸山・亀田は前者であり、高橋・白岩・コルキナは後者のタイプである。西尾・戸山・亀田は、この時期、解析・掘削孔の温度測定を行っており、睡眠時間が少なく、疲労の様子が一時的な酸素飽和度の低下に現われていると考えられる。とくに掘削孔の温度測定を徹夜で行っていた亀田にはその様子が顕著に現われている。一方、高橋は、掘削が終了し、比較的他のメンバーより睡眠時間を多くとることができた。しかし、白岩は、後者のタイプであるがコアの梱包や撤収で西尾・戸山・亀田らの活動との間にあまり違いはなかった。

酸素飽和度の値は高度によって顕著にその変化がみられ、ヘリコプターで下山した直後に計測すると、山頂での値より10%程度の上昇がみられた。

心拍数は、少しの動作で10程度の値は急激に変化する傾向がみられた。とくに食前と食後ではその差が顕著で、食後は10近く心拍数が上昇することが、全員に見られた。また、腹式呼吸をすると心拍数も酸素飽和度も上がることが顕著に現われた。

氷冠上における自己健康管理の総合評価として、AMSスコアの各項目を合計した点数とパルスオキシメーターによる酸素飽和度の比較を行った。AMSスコアは自己の診断に基づいて評価するが、酸素飽和度は計測器による診断という違いがある。しかし、実際に比較してみると、戸山、西尾、亀田に見るように、AMSスコアが高くなると酸素飽和度は低くなるという関係が明確にみられ、自己評価が予想以上に正確にできていたことがうかがえる。

7.2 高所における女性の生理、および怪我・病気と薬の服用について

女性の生理については、被験者が少ないものの、生理中よりも生理2日前から激しい脱力感に見舞われる傾向が見られた。とくに朝食後にその傾向が強く現われ、心臓が鼓動している様子がはっきりとわかるくらい心拍数が増え、息苦しくなった。

テント内でシュラフに入り極めて安静な状態で測定しても心拍数は80以上で、朝食前に食堂テントで他のメンバーと同じ条件で測ると90～100の数値を示した。実際に、生理前の日の心拍数が山頂に滞在した期間の中で最も高い数値を表している。そして、生理が始まると心拍数は低下していった。生理中の身体の状態や生理痛の具合は平地での時とあまり変わらず、生理不順もなかった。一方、酸素飽和度には生理前、中とあまり変化は見られなかった。

薬品については、今回高橋を除いた全員がダイアモックスという降圧利尿剤を初日に服用した。この薬品は急性高山病の治療に効果があるということで公募登山やトレッキングでは一般的に広く使用されている。この薬の副作用としては、唇や指先にびりびりする感じ、眼のかすみ、味覚の変化が現われるといわれている。薬を飲んだメンバーのうち、白岩と戸山が翌日、指先や足先に痺れを感じた。また、利尿作用の効果は大きく、2～3時間おきにトイレに行く被験者も現れた。この他にメンバーが使用した薬品は、高度障害による頭痛を緩和するための鎮痛剤（セデス、バファリン）、胃腸薬（正露丸、ビオフェルミン、漢方胃腸薬）である。頭痛薬の効果は大きく、快適な睡眠をとれたメンバーもいた。

怪我・病気に関して、軽い凍傷や裂傷が見られた。手荒れ、特に爪が割れるなどの症状に対し、クリームやバンドエイドの消耗が多かった。凍傷に関しては、コルキナの足がしもやけになり赤く腫れた。戸山も同様、足の指先の感覚がなくなり、それから痛みだし痺れた感覚が続いた。ただし、コルキナと異なるのは足先に外見上の変化が全くみられないことである。なお、その痺れは弱まってはきたが長く残った。戸山、白岩の両頬に軽い凍傷あるいは日焼けによると判断されるカサブタ状の炎症ができた。とくに戸山の方は、後半から、両頬の腫れが膿んでひどくなり、風が当たると痛みを感じた。

8. まとめ

本論では1998年6月、カムチャツカ半島ウシユコフスキー氷冠において実施した深度211.7 mに及ぶ雪氷コア掘削ならびに現場解析について、

掘削の意義、掘削地点の概要、輸送、設営、掘削、検層、コア現場処理、気象観測から総合報告を行った。併せて短期間における高所での作業が人員に与える影響について、酸素飽和度などの日々のデータから考察した。

今回掘削した雪氷コア 211.7 m は、カムチャツカから海路により輸送され、1998 年 10 月に低温科学研究所の分析棟低温室に到着した。現場解析で半分に分割したコア (0 ~ 61.04 m)、一部マイクロトームで削ったコア (61.04 ~ 140.58 m)、および未処理の丸コア (140.58 ~ 211.70 m) を輸送したが、途中、融解した形跡は見られなかった。今後は、現場解析のやり残しを行うと共に、酸素・水素同位体比にみられる季節変化を利用したコアの年代決定、主要イオンによる大気ないし周辺火山群からの供給物質の変化の追跡を行い、これらのデータを基礎とした環オホーツク地域ならびに北太平洋における古気候変化について研究を進める予定である。また、本コアの物理的な性質の解析から、クレーターという特殊な器に収まる氷河の特徴についても明らかにできることを期待している。

謝 辞

北海道大学低温科学研究所所長の本堂武夫教授ならびに同研究所の成瀬廉二助教授、小林大二教授には予察調査も含め本掘削に至る 4 年間、終始ご指導・ご援助いただいた。また、国立極地研究所の渡辺興亜教授および藤井理行教授には本掘削プロジェクトを環北極海雪氷コア観測計画 (ICAPP) に位置づけていただき、様々な御教示・ご援助をいただいた。ロシア連邦 Kazan 州立大学の Andrey N. Salamatina 教授には掘削地の選定にあたり理論的見地から検討していただき、貴重な助言をいただいた。今回使用した掘削機システムは、北見工業大学地域共同研究センター所有のものを同大学、高橋修平教授のご好意により使用させていただいたものである。ECM 測定装置は低温科学研究所の成田英器助教授から借用した。低温科学研究所金属工作室の新堀邦夫氏には掘削孔内で使用した接触型測温装置を製作していただくとともに、同氏をはじめとする技術部の技官の方々には準備段階で掘削・機材に関する様々

なご助言をいただいた。名古屋大学総合保健体育科学センターの島岡清教授ならびに鹿屋体育大学の山本正嘉助教授には急性高山病に関する情報をいただくと共に、パルスオキシメーターをお借りした。以上の皆様に厚くお礼申し上げます。

本研究は北海道大学低温科学研究所 COE プロジェクト「オホーツク海と周辺陸域における大気-海洋-雪氷圏相互作用」の一部として実施された。また、実施にあたっての経費は、文部省国際学術研究「カムチャツカ半島における氷河をとりまく水循環過程およびその変遷に関する研究 (代表: 小林大二, 課題番号 08041090)」および低温科学研究所 COE 特別推進経費から支出された。

文 献

- Flerov, G. B. and Ovsyannikov, A. A., 1991: Ushkovsky Volcano. In Fedotov and Masurenkov (eds.) "Active Volcanoes of Kamchatka Vol. 1", Nauka Publishers, Moscow, 156-165.
- Herron, M. M. and Langway, C. C., 1980: Firn densification: an empirical model. *Journal of Glaciology*, **25**, 373-385.
- Kameda, T., Takahashi, S., Goto-Azuma, K., Kohshima, S., Watanabe, O. and Hagen, J. O., 1993: First report of ice core analyses and borehole temperatures on the highest ice field on western Spitsbergen in 1992. *Bulletin of Glacier Research*, **11**, 51-61.
- Kameda, T., Narita, H., Shoji, H., Nishio, F., Fujii, Y. and Watanabe, O., 1995: Melt features in ice cores from Site J, southern Greenland: some implications for summer climate since AD 1550. *Annals of Glaciology*, **21**, 51-58.
- Kobayashi, D., Muravyev, Y. D., Kodama, Y. and Shiraiwa, T., 1997: An outline of Russo-Japanese joint glacier research project in Kamchatka, 1996. *Bulletin of Glacier Research*, **15**, 19-26.
- Kodama, Y., Shiraiwa, T., Kobayashi, D., Matsumoto, T., Yamaguchi, S., Muravyev, Y. D. and Glazirin, G. E., 1996: Hydrometeorological and Glaciological Observations in the Koryto and Ushkovsky Glaciers, Kamchatka, 1996. *Low Temperature Science, Ser. A*, **55**. Data Report, 120-149.
- Koerner, R. M., 1977: Devon Island ice cap: core stratigraphy and paleoclimate. *Science*, **196**, 15-18.
- 松岡健一・白岩孝行・浦塚清峰・大井正行・前野英生・山口悟・Y. D. Muravyev・成瀬廉二・前晋爾, 1997: ロシア連邦カムチャツカ半島のウシュコフスキー氷冠におけるアイスレーダー観測. 雪氷, **59**, 257-262.
- Matsuoka, K., Horikawa, S., Shiraiwa, T., Muravyev, Y. D., Salamatina, A. N., Ovsyannikov, A. A., Maeno, H. and

- Ohi, M., in press: Radio echo soundings at the summit ice cap of Ushkovsky volcano, Kamchatka. In R. Naruse (ed.) "Cryospheric Studies in Kamchatka II", Institute of Low Temperature Science.
- McCabe, G. J. and Fountain, A. G., 1995: Relations between atmospheric circulation and mass balance of South Cascade glacier, Washington, U. S. A. *Arctic and Alpine Research*, **27**, 226-233.
- Minobe, S., 1997: A 50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophysical Research Letters*, **24**, 683-686.
- Murav'ev, Ya. D. and Salamatin, A. N., 1990: Mass balance and thermal regime of a crater glacier at Ushkovskii volcano. *Volcanology and Seismology*, **11**, 411-424.
- Nitta, T. and Yamada, S., 1989: Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. *Journal of Meteorological Society of Japan*, **67**, 375-383.
- Shiraiwa, T., Muravyev, Y. and Yamaguchi, S., 1997: Stratigraphic features of firn as proxy climate signals at the summit ice cap of Ushkovsky Volcano, Kamchatka, Russia. *Arctic and Alpine Research*, **29**, 414-421.
- Shiraiwa, T., Muravyev, Y., Matsuoka, K., Salamatin, A., Horikawa, S., Ovsyannikov, A., Fujikawa, T. and Tanaka, N., in press: Geophysical and paleoclimatic implications of the Ushkovsky Ice Cap in Kamchatka. In R. Naruse (ed.) "Cryospheric Studies in Kamchatka II", Institute of Low Temperature Science.
- 高橋昭好, 1996: 新型雪氷浅層コアドリルの開発, 雪氷, **58**, 29-37.
- Thompson, L. G., Thompson, E. M. and Morales Arnao, B., 1984: El Niño-Southern Oscillation recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya ice cap, Peru. *Science*, **226**, 50-53.
- Thompson, L. G., 1997: Tropical climate variability: the last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. *Science*, **276**, 1821-1825.
- Trenberth, K. E., 1990: Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bulletin of American Meteorological Society*, **71**, 988-993.
- Walters, R. A. and Meier, M. F., 1989: Variability of glacier mass balance in western North America. In D. H. Peterson (ed.) "Aspects of Climate Variability in the Pacific and Western Americas", *Geophysical Monograph* **55**, American Geophysical Union, 365-374.
- 山本正嘉 (私信) 「高所作業マニュアル」.

Ice core drilling at Ushkovsky ice cap, Kamchatka, Russia

Takayuki SHIRAIWA¹⁾, Fumihiko NISHIO²⁾, Takao KAMEDA³⁾, Akiyoshi TAKAHASHI⁴⁾,
Yoko TOYAMA²⁾, Yaroslav D. MURAVYEV⁵⁾ and Alexander A. OVSYANNIKOV⁵⁾

1) Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo 060-0819

2) Hokkaido University of Education, Kushiro Campus, Shiroyama, Kushiro 085-0831

3) Kitami Institute of Technology, Koencho, Kitami 090-0015

4) Geo Tecs Co. Ltd., Shirakabe, Nagoya 461-0011

5) Institute of Volcanology, Russian Academy of Sciences, Piip Boulevard 9,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract: Ice-core drilling and *in situ* ice-core analyses were carried out at Ushkovsky ice cap, Kamchatka, Russia. After transporting approximately 2.4 tons of a drilling system and camping equipments to the summit of the ice cap, ice-coring was operated at Site K2 (3,901 m a.s.l.; ice thickness 240 m) from June 20 to 30, 1998. During 307 drilling runs in 103 hours, ice cores of 211.7 m in total length were recovered and the temperature of borehole-wall was measured down to 211.7 m. Temperatures at 10 m depth and the bottom of the borehole were -15.7°C and -4.2°C , respectively, showing a linear temperature increase with the depth. Ice cores were subjected to stratigraphic observation, bulk density measurements, electrical conductivity measurements (ECM) and imaging the whole length of ice cores with a digital video camera. *In-situ* ice core analyses of upper 141 m revealed that shallow cores above the pore close-off depth at about 55 m were composed of melt-frozen ice and dry firn, and of melt-frozen ice and compacted ice below that depth. There were 183 volcanic ash layers in the ice cores down to 141 m, and two ash layers were dated as specific erupted ashes by their facies. ECM signals were high at ice layers and reduced at volcanic ash layers. In addition to the glaciological work, the influence of high altitude on the physical conditions of members was studied.

(1998年11月20日受付, 1998年11月30日改稿受付, 1998年12月1日受理, 討論期限1999年7月15日)