

極域の雪氷観測・解析技術に関する研究小集会報告

神山 孝吉*

Report of “Workshop on the Glaciological Technology in Polar Regions”

Kokichi KAMIYAMA*

Abstract: A workshop on Glaciological Technology in Polar Regions was organized to discuss recent progress in glaciological technology, including observation and analytical methods. Several techniques, including those of other disciplines such as deep drilling of the oceanic floor, were introduced for the future development of glaciological observations. Electrical support for automatic data logging instruments is important in a remote area under the environment of extremely low temperature. Glaciological observations should be combined with information obtained from satellites. The discussion suggested that glaciologists would find it useful to develop and combine some techniques in order to understand glaciers more clearly. Some difficulties that should be overcome in the near future were also discussed.

要旨: 近年極域の雪氷観測には様々な技術的進歩が見られる。極域の雪氷観測・解析技術に関する研究小集会を開催し、主にフィールドで実施している観測技術を概観し今後の発展させるべき技術などについて活発な討論が行われた。また海洋底ボーリングなど他研究分野の技術の紹介なども、将来の雪氷観測技術への積極的適用を目指して紹介された。さらに共通認識として遠隔地・低温下での観測用電源の確保の重要性などが指摘された。従来の雪氷観測技術を衛星情報を積極的に利用して再構築する必要性が議論された。現在雪氷研究は多岐に渡ってきているが、野外調査方法の展望を議論する機会がもてたことは有意義であった。また克服すべき技術的問題についても共通認識が得られた。

1. はじめに

極域の雪氷観測・解析技術に関する研究小集会報告は、平成6年7月12日、国立極地研究所・講義室において開催された。出席者は26名であった。近年南極氷床や北極雪氷圏で、雪氷コア掘削を始め多くの調査・研究が実施されている。同時に国内においても持ち帰った試資料を用いて様々な解析が行われている。近年の観測・解析技術の進歩は、観測フィールドにおいても実験室においても我々の研究に様々なインパクトを与えつつある。さらには衛星観測技術の進歩は研究者に多様な情報を与えるので、逆に研究者にとってはフィールドでの観測を様々な視点から議論し衛星観測とのリンクを計る必要が生じてきた。総合科学としてのフィールドサイエンスとしては当然の発展形態であろう。

*国立極地研究所。National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

本研究小集会は以下のような目的で実施された。1) 雪氷観測・解析技術の最近の発展を概観し、これまでの手法について総括する。2) 雪氷観測に有効な他分野の技術を紹介し、新たな手法を模索する。さらに積極的に推進すべき技術について、今後の開発計画の作成を行うべく議論する。3) 雪氷観測・解析技術について研究者相互に認識を深め、極域での運用方法などについて情報交換を行う。

2. 研究小集会の概要

小集会のプログラムを表1に示した。リモートセンシング技術とその利用といった側面から衛星観測やアイスレーダーの現状と今後の展開が議論された。衛星観測による氷床観測の実際が紹介され、多波長アイスレーダーによる氷床内部構造探査の展望が確認された。従来、気象情報収集の一環として無人観測手法が進められてきたが、今までのシステムを総括し今後の無人観測用測器を運用する指針が示された。すなわちこれまで蓄積された多大のノウハウを整理し、技術的弱点を集中的に改善すべく対応した。

わが国の雪氷掘削技術は近年大きく発展している。一方ロシアにおいても独自の掘削技術が開発されており、氷河・氷床調査方法の展望の一環としてロシアの氷床掘削技術の紹介が行われた。海洋底コア探査技術の発展的転用を目的として海洋底掘削観測技術について紹介があり、雪氷掘削への応用が議論された。また合衆国のグループが最近開発した掘削孔を使つての γ 線直接計測の紹介と、現地での堆積速度推定の試みが議論された。さらに雪氷コアを採取せず掘削しながら氷床内部を探査する装置のアイデアも提示された。加えて最近急速に進歩したGPS干渉測位の現状と、GPS衛星の雪氷観測への利用方法が検討された。議論された要旨の一部を本報告に掲載した。最後に行われた総合討論では、以下のことが議論

表1 極域の雪氷観測・解析技術に関する研究小集会プログラム
 Table 1. Program of the "Workshop on the Glaciological Technology in Polar Regions".

主旨説明	神山孝吉 (極地研)
各種観測・解析技術の発展	座長 古川晶雄 (極地研)
衛星観測	西尾文彦 (北教大), 古川晶雄 (極地研)
マイクロ波レーダーによる雪氷表層とその形態の研究	
アイスレーダー	藤田秀二 (北大工)
多周波レーダー観測によりわかる氷床氷体の内部構造	
無人気象観測	高橋修平, 榎本浩之 (北見工大)
無人気象観測と電源開発の現状と今後の開発方針	
氷河・氷床調査	
Some concepts of deep thermal drilling of glaciers	
	Prof. Igor Zolnikov (極地研客員教授)
掘削孔を使つての観測	内田努 (北海道工業技研)
ドリル孔での直接 γ 線計測の紹介	神山孝吉 (極地研)
Non-ice core 氷床内部探査	藤井理行 (極地研)
GPS干渉測位による氷河流動観測	本山秀明 (極地研)
総合討論	座長 藤井理行 (極地研)

された。雪氷のモニタリング手法として衛星観測は、狭い範囲を詳しく調査する地上検証・観測と組み合わせると一層有効である。例えばマイクロ波レーダーなどはマイクロ波が雪氷内部に浸透するため氷床内部の水分状態まで検出できる可能性があるが、地上観測によって検証する必要がある。新技術によってさらに多くの情報を得ることが出来るが、従来の手法で情報の有意性を検討することが重要である。

3. 発表・議論の要旨

以下に一部の講演の発表と議論の要旨を取りまとめて記載した。

多周波レーダー観測によりわかる、氷床氷体の内部構造：メガヘルツ帯アイスレーダーを利用して氷床の基盤地形や内部層構造を探る試みは、南極雪氷学の中では1960年代から精力的に行われてきた。“飛び道具”である電磁波を用いて遠隔探査が可能なこの技術は、南極氷床の内部構造を探るうえで不可欠なものとなっている。さて、過去数年、メガヘルツ帯における氷の誘電特性に関する知識が急速に増大したため、従来では考えられなかった観測方法やデータの解析方法が新たに可能になってきた。

その一つが、複数の周波数の電磁波を用いたアイスレーダー観測である。多周波観測の原理と意義を簡単に紹介する。近年明らかになった氷の非常に重要な融電特性は、1) 氷の誘電異方性と、2) 酸を含む氷の高周波電気伝導特性である。1) は、氷の誘電率が結晶方位に依存した値をもつという性質であり、この特性により、氷床の中で結晶方位が周りの層と異なる層があればそこで電波は反射する。2) は、氷床の中に過去の火山噴出物の堆積などの酸性度の高い層があれば、そこでは電気伝導度が高いという性質である。このような層に入射した電磁波も、そこで反射する。1) と2) のそれぞれの原因による電波反射特性の大きな違いは、1) のメカニズムによる電波反射強度が周波数に依存しないのに対して、2) のメカニズムによる電波反射強度は周波数の2乗に逆比例することである。今考慮しているこれらのどちらのタイプの氷床内部構造も、氷床の中に実際に存在することはわかっている。

しかし、その頻度分布や二つのメカニズムの相関はわかっていない。これを知るには従来行われている方法に頼るならば綿密な氷床コア解析に頼るしかない。しかし、複数の周波数を用いたレーダーで、氷床の内部電波反射層を観測し、電磁波の反射係数の周波数依存性を調べれば、それぞれの電波反射層の反射原因は何かを判別することができる。さらには、二つのメカニズムの相関を明らかにできる。二つのメカニズムは氷床の層位構造や動力学特性を研究するうえでキーポイントとなるものであるから、多周波レーダー観測により、氷床の内部構造に関する知識は飛躍的に増大する。氷床コアからは広大な氷床のただ1地点のみの情報しか得られないのに対し、レーダー観測では非常に広範囲の情報が得られる。コアとレーダーの両方のデータを相補的に用いれば、氷床氷体の綿密な3次元内部構造の再現が可能である。多周波レーダー観測技術の蓄積が必要であるが、見通しは非常に明るい。

無人気象観測と電源開発の現状と今後の開発方針：南極内陸部における3-5年の長期無人気象観測を目的とする電源確保のため、風力発電機および太陽電池の試験観測を南極および国内において行った。

風力発電（中継拠点）：JARE-34により中継拠点にA型（サボニウス+高速翼型）、B型（変形ダリウス型）の2種の風力発電機が設置され、1993年1月から1994年1月までの観測がなされた。そのうちのA型は冬期間でも発電したが、作動が間欠的であった。その原因としては雪つまりなどが考えられる。

太陽電池（中継拠点）：同じく中継拠点に設置された極地仕様の太陽電池は、日射がある間はよく作動した。余剰電力は保温箱の加熱に使われ夏季は最高温度60°Cまでに達したが、日射の無い冬は-50°C以下に下がった。

風力発電（北海道）：1994年1-5月の期間、北海道・美幌峠において風車型発電機および小型サボニウス型の試験を行った。風車型発電機FM910は、4月の保守観測までは順調に作動していたが、5月撤収時には支柱が外れて倒れていた。小型サボニウス型は回転翼は順調に回転したが、回転翼部と発電機の連結部に異常が見られた。

掘削孔を使つての観測：氷床深層掘削では、良質な氷コアが、連続に得られる。従つて氷コア解析により、多様な情報が精度良く得られる。しかし氷コアを掘削し、運搬するには、多大な労力や時間、経費が必要となる。また氷コアの直径は10cm程度であり、多種多様な解析ニーズに対して不十分である。そこで、氷コアを用いない「掘削孔を使った観測」を考える。

まず、孔内計測の有効性を考える。氷コア試料は、掘削による影響を受けることがある。例えば、fracture zoneでは氷コアの質が悪く、氷の物性や含有空気などの情報を得ることが困難である。そこで掘削孔内に測器を導入し、直接観察することが有効である。観測方法によっては、掘削孔周辺外部雪氷層の情報まで得られるため、掘削による影響を消去可能である。またこの方法で、直接氷の解析が可能になれば、氷コアの運搬にかかる時間や労力が軽減され、運搬中の氷コアの変質の心配もなく、さらに現場で情報が得られるために解析速度も上がるだろう。そこで例えば、孔内計測とノンコアボーリングとを組み合わせれば、多点深層掘削解析も可能である。孔内計測技術の一例として、海底掘削で使用される孔内超音波テレビなどが挙げられる。この測器は、孔壁状況をモニターするだけでなく、掘削孔周囲の応力場がわかるため、最近の掘削では多用されている。掘削孔を使った観測としては、特定深度における各種測定 of 長期モニタリングも考えられる。例えば南海トラフの海洋底掘削孔には孔温度観測装置が設置されている。雪氷地域でも電源や通信手段の開発が進めば、遠隔地の氷床深層部の長期モニタリングを人工衛星などを利用して無人で行うことができる。また、同位体組成など、ある深さから大量の試料を必要とする解析には、現在の氷コア量でも不十分である。そこで掘削孔を使つて、必要深度から大量の氷やガスのサンプリングをす

ることが考えられる。またフィルン中の気体拡散の研究も、同様の方法で可能である。これまでに Bern 大学などで研究が行われているが、まだ技術の確立には至っていない。孔内計測で得られるデータは、以上のようなメリットがある反面、さまざまな情報が複雑に含まれている。従って、こうした技術を雪氷学に応用するには、まず研究者が目的を明確にし、目的にあった測定方法を開発しなければならない。

ドリル孔での直接 γ 線計測の紹介：Nuclear Instruments and Methods に P. DUNPHY, J. DIBB and E. CHUPP によって提出・受理された論文 “A gamma-ray detector for *in-situ* measurement of ^{137}Cs radioactivity in snowfields and glaciers” を紹介した。彼らは以下の方法でグリーンランド・サミットの氷床掘削孔で ^{137}Cs の氷床中の鉛直分布を明らかにした。検出器である 7.6×7.6 cm NI (TI) シンチレーション・ディテクターを雪氷掘削孔に挿入する。各深度で γ 線計測を約 1000 秒間実施する。その後各深度の ^{137}Cs の強度を分離しプロファイルを作成する。なお上層（浅い深さの部分）に ^{137}Cs が高濃度であるが、氷床中の放射能に空中からの自然放射能が加わっているためと考えられる。雪氷観測現場での観測にこのような機器を使用すると、以下の点で有効性がある。

- 1) 氷河・氷床の涵養量：掘削地点での環境放射能のプロファイルが直ちに測定でき、1960年代のピークを検出することによって堆積速度が推定できる。
- 2) 大気環境のモニター：現場で大気中の環境放射能の直接モニターを行い、大気環境の変動特性を観測できる。

Non-ice core・氷床内部探査：氷河・氷床内部の化学的プロファイルを得る方法として、雪氷コアの解析が一般的であり、方法論的にも確立している。しかし、この方法は、掘削、コアの輸送、コア処理、分析など一連の作業が必要で、研究のためのデータを得るまでにかなりの時間と労力を必要とする。また、コアの分析にいたるまでのプロセスで、雪氷コアの二次的変態による特性変化、揮発性物質の蒸発による濃度変化、人為的汚染などの影響を受け、コアの化学的特性の初期状態が変化する危険性を伴う。こうしたコア解析によらない方法を提案する。

掘削孔壁利用の ECM 法：掘削孔に ECM ゾンデを降ろし、一定の速度で引き上げる過程で、孔壁に電極を圧着させ固体電気伝導度を測定する。測定する孔壁はサイドカッターで表面を削り、新鮮な面を出して測定する。測定結果は、ケーブルを通して地上のデータロガーに収録される。

アイスゾンデ法：ヒータで融解掘進しながら、融解水の測定とサンプリングを行い、所定の深さに達した後、再凍結した氷をゾンデ上部のヒータで融解しながらゾンデをウインチにより地上に引き上げる。フローラインの途中で、融解水の電気伝導度、ダスト濃度、pH などの測定をし、データを地上に送信する。融解水はサンプルチューブに送られる。ゾンデ引き上げ後、サンプルチューブを回収し、冷凍状態で保存され持ち帰る。解析に

あたっては、冷凍サンプルチューブを必要な長さに切断し、融解してサンプルを回収し、分析にかける。

GPS 干渉測位による氷河流動観測：JARE-33 から始まった南極氷床ドーム深層掘削観測計画の一環として、S16 からドーム F にいたるトラバースルート沿いに設置された基本観測点において、GPS 干渉測位による氷河流動観測を実施している。これは、昭和基地 GPS 基準点と内陸基本観測点において GPS 2 周波の同時観測を行うことで、内陸基本観測点の位置座標（基線ベクトル）が精度良く求まることを利用している。

昭和基地から 1000 km 離れたドームふじ観測拠点において、1994 年 1 月に 1 日 10 数時間の受信を行い、昭和基地との基線ベクトルを求めた。GPS 干渉測位による位置精度は、基線長が長いほど悪くなり、1000 km だと 1 m 程度となる。しかし 4 日間の干渉測位によって得られた基線ベクトルを比較すると、水平・鉛直の変動（精度）は 50 cm 以内にはおさまっていた。

1992 年から 1994 年の各 1 月に S16, H15, H260, みずほ基地, MD120, MD240, MD364（中継拠点）で GPS 観測を行い、昭和基地との基線ベクトルを求めた。これらの基線ベクトルの計算値から 1 年ごとの流動ベクトルを求めた。2 年間の流動量には有意な差はない。鉛直方向の変化は、おおむね 1992 年は低下して 1993 年は上昇しているように見える。これらの観測は今後も続ける計画であり、詳細な経年変動が観測されるであろう。以上の結果から、昭和基地を基準点として行っている GPS 干渉測位による氷河流動観測は、中継拠点以北（650 km 未満）では年間流動量の水平成分を議論するのに十分である（ただし鉛直成分を論ずるにはまだ観測結果が足りない）。GPS 干渉測位観測は、ある基準点（昭和基地など）との同時観測を数時間から 10 数時間行えば、精度良く基線ベクトルが計算される。また GPS 観測の設置、撤収にかかる時間は高々 10 分程度である。日本の水準測量においても、GPS 干渉測位が主流になりつつある。今後は南極においても氷床流動観測、基準点測量などに有効に利用されるであろう。

4. おわりに

近年雪氷の観測対象は両極域にまで拡大している。しかしながら、調査・観測には極域独特の困難性があることも事実である。とりわけ遠隔地・低温下における観測用電源の確立は重要事項であり、系統的に対応する必要がある。また、衛星情報は広域を研究対象に設定することが可能であるが、検証実験の必要性が増大していることが共通認識として確認された。さらに、従来から継続して実施している観測についても衛星観測を検証するという視点から新たな研究観測としての意義を生じ始めたように思われた。なお講演の要旨と議論について資料をお寄せいただいた発表者に感謝いたします。

(1994 年 12 月 2 日受付; 1995 年 1 月 26 日改訂稿受理)