



写真 2 エクスカーションで訪れたドラムリンの上に集う参加者 (成瀬廉二撮影)

的な挙動に関する分野を除いて未開拓の分野であり、今後に大きな可能性を秘めているのではない。バレンツ海で得られた豊富な海底地形と地震波のデータを基にして、スカンジナビア氷床の変動を詳細に再現した研究も非常に興味深い (Andreassen and others)。巨大な氷床がその底面に残した爪あとが、これほど鮮明に残されている事に驚かされた。

5 日間にわたる学会の中日にはエクスカーションが準備された。アイルランドには現在氷河が存在しないが、氷期に氷床で覆われていたことを示す氷底地形が残されている。参加者はバス 3 台に分乗して、今は牛がゆったりと牧草を食むドラムリンやモレーンを訪れた。大会主催者のひとりである応用数学者 Andrew Fowler の解説のもと、

100 名近い参加者が牛に威嚇されながら移動するさまは何ともユーモラスである。バスの旅はアイルランド西部のカルスト地形、西海岸へと続き、地元のアイリッシュ・パブで夕食。ギネスビールを堪能して街に戻ったのは 22:00 過ぎであった。

今回アイルランドまで足を運んだ参加者にとって幸運だったのは、雪氷学への著しい貢献者に IGS から与えられる、Seligman Crystal の授賞式と記念講演がプログラムに含められていたことだ。2005 年の Richard Alley に続く受賞者は Ronnie Thompson。山岳氷河における氷コア掘削と、コア解析による中緯度域の古環境復元のパイオニアである。5 大陸 15 ケ国にまたがる 50 回以上の高地エクスペディション、200 編以上に及ぶ成果論文の出版。これだけでも彼の講演を心から楽しみにしていた参加者の気持ちがわかるであろう。失敗に終わった南米アンデスでの最初の掘削から語り始めた 1 時間の講演は、その期待を裏切らないものであった。講演後のスタンディングオベーションに続いて、今回出席した過去の受賞者 (Hans Röthlisberger, Garry Clarke, Kolumban Hutter) が演台に上がり、会場は大きな拍手に包まれた。

以上の報告中で引用した発表タイトル、学会に関するその他の情報は、以下の web サイトを参照して欲しい。

<http://www.macsi.ie/igs/Home.html>

(2008 年 9 月 22 日受付)

電波雪氷学とその応用に関する国際シンポジウム出席報告

国立極地研究所 藤田 秀二
ワシントン大学 松岡 健一

International Glaciological Society (IGS) 主催の標記の会合が、本年の 6 月 9 日～13 日にスベ

インのマドリッドで開催された。会合の概要や、発表された研究の動向、参加しての印象などをこ



図：シンポジウムのロゴマーク

ここに報告する。

1. 会合の概要

(1) 主催組織および参加者

学会会場は、マドリッド市内にある大学 Telecommunication Engineering of the Technical University of Madrid であった。開催のホストは雪氷学者の Francisco Navarro 氏を代表とした組織委員会であった。サイエンスエディターのリードは British Antarctic Survey に所属する氷床モデル研究者である Richard Hindmarsh 氏がつとめた。参加者としては、22 カ国から 100 人のレジストレーションがあった。全部で 99 の講演を 4 日半かけて実施をした。筆者のうち藤田はサイエンスエディターグループの 1 人として参加し、松岡は招待講演者 8 名のうちの 1 人をつとめ、キーとなる講演を担当した。

(2) シンポジウムのテーマやトピック

今回のシンポジウムの特徴は、初めて電波雪氷学 (Radioglaciology) を単一のテーマにしたことにある。従来にも、リモートセンシングをテーマにした IGS シンポは数回実施されてきた。しかし、リモートセンシングをテーマにした場合には、人工衛星画像による広域観測の研究についての発表が多数派で、センサーの種類も多様になる。氷床や氷河の電波探査を主体にした電波雪氷学はリモートセンシングの多分野の一つという扱いであった。今回は、氷床や氷河に対するレーダ探査を特にテーマとした会議となった。この先に述べるように多種の先端レーダを氷床や氷河に応用する多数の技術や観測事例や考察にあふれたシンポジウムとなった。レーダ探査は雪氷学の一手段とみなすこともできるが、技術や観測対象を総

合した関連する一連の研究はひとまとまりの学問領域を形成する様相となっている。

氷を対象とする電波探査によって、氷床や氷河など氷の下にある地形や、基盤の性質や、氷内部の層位がわかる。歴史をふりかえると、1970 年代から 80 年代のパイオニアの時期においては、南極やグリーンランドの氷床が比較的限定された周波数帯とアナログ機器を用いて氷の厚さを測る事を主目的に実施されてきた。それ以来、氷探査用のレーダ技術は発達し、周波数帯を拡張し、観測対象も極域氷床では基盤だけでなく浅層から中深度の氷内部層に、そして温暖氷河や polythermal 氷河の水分布などに拡張した。電磁波の信号を氷の内部や基盤の物理的な性質に関連づける研究がすすんだ。そして、レーダ内部層を氷床流動のフォワードモデルやインバースモデルに活用するようになった。地球上の氷のみではなく、太陽系の惑星やその衛星、たとえば火星氷床への応用も現実のものとなっている。

本シンポは、氷床や氷河に対するレーダーサウンディングやその応用課題に対するすべての要素を包含するものとして企画された。対象は雪氷学のみではなく、地球科学や気候研究を広く含めるものとされた。今回対象とした研究は、浅層および深層を含めた氷探査を対象とした。たとえば、以下を例とする：① どのようにして電磁波の反射が人工衛星に戻るか、② 人工衛星からの観測による地球や惑星の氷の深部探査、③ 氷内部や底面からの電磁反射に対する物理的な解釈、④ 結晶主軸方位分布が電磁波伝搬にどのように影響を与えるか、⑤ 雪やフィルンに対する研究、⑥ レーダ信号に出現する層位からの涵養量推定、⑦ レーダ探査を他の地球物理探査手法とともに用いること、⑧ 大規模な地図作成や、⑨ レーダ層位や底面反射信号の画像化、⑩ レーダ探査の際の電磁波伝搬のモデル化、⑪ レーダ探査結果に基づく層位への年代付けや層位の相関。

サイエンスコミッティは、より具体的なトピックとして以下を提案した。

① 深部探査

氷下地形、氷と底面の界面状態、底面の構造、氷下湖、氷下水のチャンネル、氷下物質のサウン

ディング

② 内部構造

内部層位とアイスコアとの相関、構造の検知 (たとえば埋まったクレバスや褶曲や断層, 他), 氷床内部の水路, 温度構造, 氷の物理的な性質 (密度, 空隙度, 温暖な氷のなかに含まれる水の量, 他), 氷の電気的な性質, 氷の内部のエコフリー (電波無反射) 構造

③ 表層や浅層のサウンディング

雪やフィルンの内部層位, 稠密氷, 堆積率の見積もり, 海水

④ 惑星に対する/衛星軌道上からのレーダーサウンディング

理論的な研究, 衛星からの探査, 火星上の氷, 木星の衛星の Europa や土星の衛星である Enceladus

⑤ 数値モデル

氷の流動, 層位に対する年代付け, 流動パラメータの逆問題を解くこと

⑥ ハードウェアや処理手法

レーダー機器 (コヒーレントレーダー, 合成開口, 他), 補足的な地球物理技術, レーダーデータのプロセッシング

⑦ 理論的および実験的にみた, 氷のなかでの電磁波伝搬

結晶主軸方位や物理的性質, 体積散乱や表面散乱

2. 発表された研究の動向

発表された研究は基本的に上に書いた課題リストに沿ったものであったが, ここでは, 筆者らの視点で特に印象深かった研究や, 見聞した近年の研究の動向について報告をしたい。

(1) 先端レーダー技術の氷床研究への応用

基調講演は, 米国カンサス大学の氷床リモートセンシングセンター (以下 CReSIS と略) の長である Gogineni 氏がおこなった。CReSIS は, 米国科学財団 (NSF) にファンドされた Science and Technology Center のひとつで, 先端のレーダー計測技術を南極やグリーンランドの氷床観測に応用する研究を積極的におこなっている研究機関である。氷床観測のなかの観測ターゲットを定め, それに適した先端的なレーダーの開発を実施

し, それを実際の観測に応用する作業を米国内外の氷床研究者とネットワークを構築しながらすすめている。Gogineni 氏の講演では, 地球気候変動にともない氷床変動が出現するとみなされる観測対象を挙げたのち, 氷床観測としては新たな試みとなるいくつかのレーダーの開発と応用を紹介した。たとえば, 合成開口レーダーを用いた氷床底面状態のイメージング観測, 超広帯域の送受信機を用いた超高分解能氷床内部観測, 衛星搭載を視野に入れた P バンド (250–500 メガヘルツの帯域) マイクロ波レーダー等である。これらが観測の結果例とともに示された。Gogineni 氏の見解として, 今後挑戦する研究対象として, 氷流 (fast flow) の内部や底面のレーダー観測, 氷床底面のイメージング, それに, レーダクラッターを抑制するためにアンテナアレーを利用した信号処理をすすめることが紹介されていた。レーダー技術の先端研究者の参画があり効果的に前進している研究で, CReSIS の特色をよく出していた。「今まで見えなかったことが見える」ことがアピールポイントであった。

(2) 位相検波や合成開口処理の普及

位相検波のレーダーの氷河や氷床の電波観測への応用が本格化したのは 1990 年代の後半である。今回のシンポジウムのなかでは, 位相検波に基づく位相合成平均, 合成開口手法が比較的多数のグループによって観測に導入されていた。合成開口処理により, 従来の電力情報のみを用いたレーダーのデータよりもターゲット (基盤地形) を明瞭に表示させたり, 氷河や氷床の微小な変位をとらえたりしている。これが多数報告されていた。筆者 (藤田) は日本の国立極地研究所において位相検波レーダーの製作および南極での観測応用に携わっている。同時代の技術進歩によって, 各国の進歩も案外横並びにすすんでいるとの印象をもった。

(3) 将来の地球観測用レーダー候補としての P バンドレーダー

南極やグリーンランドの氷床の厚さを, もし衛星軌道からレーダー計測をすることができれば, 地球計測としては画期的な進歩となる。しかし, 実際には, 氷の内部を電磁波が伝搬する際の大きな減衰や, 衛星軌道から電磁波を照射することによる電波の幾何学的な広がり, それに, 衛星に搭載

するアンテナサイズの制約等, 様々な困難があり実現はしていない。これを実現できる可能性があると思われる周波数帯が P バンドマイクロ波帯 (250–500 メガヘルツ) である。P バンドの電磁波は, 電磁波の水内部への浸透深さの点でみたとき, 地上や航空機搭載レーダ用に普及している 250 メガヘルツ以下の周波数帯域のもつ浸透深さとそれほど変わらない。ただし, 高周波になるほど電磁波の減衰は増大する。また, P バンドであればアンテナのサイズがより小さく, 人工衛星搭載としても取扱い可能なサイズでデザインできる可能性が高まることから, 電磁波の減衰とアンテナ寸法の点で妥協点と見なされている領域である。このため, 筆者を含め, 各グループは興味をもって研究をすすめている。欧州宇宙機構 (ESA) は将来の衛星地球観測のシーズ研究として積極的に取り組んでいる。2005 年に, 欧州宇宙機構が「ESA — Call for Earth Explorer Core Mission Ideas」として将来の中核となる衛星観測を募集し, そのなかに P バンドレーダの提案が複数の欧州グループから提案された。技術的なレビューののち, ただちに開始する衛星ミッションとしてはどれも採択には至らなかったが, 技術研究として着手をした。試験的なレーダの設計と製作を受託する研究先を公募し, それに対して 6 つの研究グループが応募した。最終的に選ばれた 1 チームは, デンマーク工科大学 (DTU) である。フルポラリメトリック (送受信アンテナ共, 水平と垂直偏波のアンテナ素子をもち, 偏波情報を取得できる) レーダを製作し, グリーンランド氷床で 2008 年 3 月にテストをした結果が紹介されていた。P バンドレーダは, このほか, カンサス大学, ドイツの航空宇宙局 (DLR), 日本の国立極地研究所が開発をしている。デンマーク工科大学のチームは 1970 年代から 80 年代に英米デンマーク (SPRI/NSF/DTU) が大規模な南極大陸のレーダ探査を展開した際にレーダを製作したチームである。とてもハイスpekのレーダの開発でありながら, 開発経費は 600000 ユーロであるという。このクラスの開発としては破格の安価と言っている。これは, 技術要素の各所に, 合成開口レーダの開発で蓄積をした既存技術の転用ができていている結果であると聞いた。技術ノウハウを蓄積した大

学をしての強みを大いに発揮しているとみえた。レーダの目的として, 氷床の結晶主軸の探査がターゲットの一つとして明示されていた。ESA の研究開発担当者も, 研究にかかる情報収集のために本シンポに参加をしていた。

さて, 衛星搭載の氷床探査レーダの技術面での最大の問題は, 氷床表面で発生するクラッターと呼ばれる雑音状の信号, それに, イオノスフィアで起こる電波伝搬の歪みである。CReSIS の Gogineni 氏も, P バンドレーダを試作し, 実験を行っている。彼らの実験でも, 氷床表面からの大きなクラッターを観測した。その結果として, P バンドレーダの実用化は相当な困難を伴うであろうとの見解を発表中で提示していた。

(4) 火 星

太陽系惑星を研究する研究者らは, 惑星探査衛星に搭載したレーダでとらえた火星北極氷床の内部構造や基盤の 3 次元構造について発表した。これらが一目瞭然であった。ESA が開発をしたレーダ「Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding (MARSIS)」は合成開口レーダで, 1.8, 3, 4, 5 MHz の低周波のレーダである。チャープとパルス圧縮という技術を用い, わずか 5 ワットのパワーで, 地上 800km からの軌道上からの観測でありながら, 厚さ数千メートルの氷の内部や底面の探査に成功している。筆者の地球の南極氷床の観測経験から考えれば, 探査深度の点で驚かされる。マーズ・リコネッサンス・オービターは NASA が火星探査に打ち上げた探査衛星であるが, これには Shallow Subsurface Radar (SHARAD) と呼ばれるレーダが搭載をされている。メガヘルツ帯の周波数を用いたレーダを用いて, 南極や北極に存在する氷床 (North/South Polar Layered Deposits: NPLD, SPLD) の形状や内部を構成する物質について議論が提示された。

(5) 氷床観測のターゲット

氷床観測を実施する際のターゲットとしては, 内部層, 氷厚, 底面状態, 堆積, 温度の推定, 内部構造が示された。

(6) 溢流水河や氷帽における航空機探査

比較的小規模であるものの地上からの観測で網羅することが難しい氷帽やクレバス等によって地

上観測が難しい溢流水河の新しい観測手段として、比較的低周波 (0.5–25 MHz) を用いたインパルス (別名モノパルス) レーダを航空機に搭載した事例が複数報告された。このレーダそのものは従来から極域や谷氷河でよく用いられているものであるが、これを航空機に搭載するという事例はなかった。殆どの事例は小型航空機 からアンテナとなるワイアを尻尾のように垂らしている。そのためアンテナ特性の把握などは困難であるが、氷の厚さと基盤高度を測るという目的には十分な成果を発揮しつつある。

(7) 温暖氷河

温暖氷河を研究するグループの興味のひとつは、氷河の内部に融解水がどういった幾何構造をもって分布しているかという点にある。水や氷や岩石の混合誘電体の誘電率を検討するために、英国 Swansea University の Murray 教授は、複数の混合誘電体理論の妥当性についての議論を展開した。米国 Boise State University の Bradford 博士らは、市販の地中探査レーダ (Ground Penetrating Radar : GPR) に多数の受信アンテナを配列して用い、温暖氷河内部の電波散乱のトモグラフィを実施した事例を発表した。内部の温度や水の分布が 2 次元断面として示された。

(8) 氷床底面や氷床下湖

南極氷床の下に分布する氷床下湖 (Subglacial Lakes) は、2005 年頃までの集計で 145 あるとされていた。その後の発見を更に追加した積算数を筆者は知らないが、近年の南極観測で検知された氷床下湖の事例がいくつか紹介された。氷床下湖の同定には、レーダ信号の特徴から、米国テキサス大学オースチン校の Carter 博士は、レーダ信号にいくつかの判断基準を用意して、従来は一律に湖と判断されていたものに、氷が完全に浮いているような典型的な湖か、典型的な湖ではないものの高い確率で湖であるか、あるいは湖というよりもむしろ凍結した堆積物のような沼のような可能性があるか、を判定する手法をとった。British Antarctic Survey の Corr 博士のグループは、東南極の Aurora Subglacial Basin 近傍で航空機探査を実施し、Carter 博士の判定基準に基づき新たに発見した湖についての事例を紹介した。このほか、氷床の底面を対象にしたレーダ観測で、ド

ム C 地域の氷床深層コア掘削点近傍での底面物理状態の空間分布を反射強度分布から読み取る試みがイタリアのグループから示されていた。

(9) 氷流下の基盤の観測

英国 British Antarctic Survey の King 博士のグループは、インパルスレーダを橇に搭載し、それをスノーモービルで引きグリッド上に走りまわり、氷流 (Stream flow) の下の基盤の特徴をとらえた観測を紹介した。西南極の Rutford Ice Stream を対象にした観測を実施している。氷流下には、岩盤が氷の流れで削られて、流れの方向に沿った縞状の筋 (Mega-scale glacial lineations と呼ぶ) が発達している。北米大陸に現在露出している氷食地形のなかに、非常に似た地形があることを示していた。氷流を、その発生域 (onset) と、中流域等いくつかの区画に分け、それぞれの地域で 20 km × 20 km の領域を 250 m または 500 m のグリッドで基盤の目のような観測を実施した。観測の狙いを氷流の発達にしばり、機動力や身軽さをもったプラットフォームで、比較的狭い領域を丹念に観測していることが印象的であった。

(10) 氷床流動モデル計算と等年代層解析の融合

今回のシンポジウムでは、氷床流動モデル計算を専門とする研究者も多数参加をしていた。氷床流動の種々のパターンや、堆積環境の変化に対して生じる氷床内部層の形状についてもモデル計算結果を示していた。英国ブリストル大の研究者は、1970 年代から 80 年代に英米デンマーク (SPRI/NSF/DTU) が大規模な南極大陸のレーダ探査を展開し蓄積をしたデータから広域の等年代 3 次元図を作成し、氷床の流動計算との比較を示した。30–40 年前のデータ資源が、解析を重ねるにつれて新たな価値を発揮しはじめている。観測と計算の比較は今後の重要な研究のすそめかたになるであろう。

デンマークのコペンハーゲン大学の D. Dahl-Jensen 氏は、グリーンランド氷床の挙動の研究のなかでの氷床レーダーサウンディングの役割について講演をした。レーダで抽出される内部等年代層は、氷床流動モデル研究者にとっては常に挑戦すべき課題であることや、氷床のなかで底面融解が不均一に発生していることを、モデル計算と

レーダ観測の比較に基づいて示した。

(1) フィルン内部の層位構造の分析

米国の S. Arcone 氏は、南極地域で GPR を用いたフィルン内部の層位構造の分析を積極的におこなっている。米国 GSSI 社製の GPR (200 メガヘルツと 400 メガヘルツ) 用い、東南極と西南極にまたがる 1200 km の測線で 100 m 深付近までのフィルン内部をみた結果の発表があった。S. Arcone 氏によれば、観測を実施した地域におけるかぎり、西南極地域ではフィルン内部の層位が安定していて、コア掘削に適しているという。対照的に東南極地域では雪面の堆積の粗さが特徴的であるとの見解を提起した。筆者の藤田は、東南極内陸部で、夏期の夏至の時期に圧密が広汎な地域で発生したという観測事例を示し、これが南極の氷床コアの解釈に重要な役割を果たすとの見解を提起した。S. Arcone 氏はそれには懐疑的な見解を示し、今後議論がぶつかり発展していくことを予感した。重要な点は、市販の GPR が氷床表層部の層位構造の広域の観測に大変に有効なツールであることである。プラットフォームを地上に置き走り回る観測で、氷床の堆積環境について大量の情報を獲得できることがわかってきた。今後の研究の躍進に大きく貢献するであろう。

3. 会議の印象

種々のレーダ技術を多岐にわたる観測対象に応用した事例を見るにつけ、筆者らにとっては大変にエキサイティングな会合であった。参加者の多くから、お世辞ではなく、同様の感想を聞いた。電波雪氷に関連した研究者がこれだけ集中してプレゼンや交流をはかった点でも重要なイベントであったとおもう。実際、共同研究のシーズも多数生まれ、会議終了後の交流もすすんでいる。観測

の形態やプラットフォームも、人工衛星、航空機、車輻搭載、地上固定点設置等、目的に応じて多岐にわたっている。氷床や氷河の内部や物理メカニズムの研究には、レーダ観測技術はますます本質的な技術になっていくとの感を強く持った。氷床観測のリモートセンシングは、今後より高い情報生産量とより深部にすすむはずである。「今まで見えなかったことが見える」状況が将来さらにすすんでいくことだろう。多種の先端的なレーダの紹介をみるにつけ、そうした先端レーダが一般的な氷河氷床研究室が使用できる当たり前の技術に今後なっていくかどうかという点がしばしば気になった。南極雪氷学の進歩のためには、できるだけ種々のレーダが汎用化されていってほしいとおもう。米国では CReSIS が活動しており、先端のレーダ技術が氷床に着々と応用されていくであろう。レーダを搭載するプラットフォームとしても、航空機を保有する国々は米独英伊等、多数ある。日本の南極観測で使用をしてきたレーダの特徴は、詳細な地上探査と氷の誘電物性の知識、それにドームふじ氷床深層コアを用いた Validation である。技術力や航空機資源をもつ他の研究グループとの関係を如何に構築し、そして筋のいい研究の切り口を見いだしていくか、思案の契機になった会議であった。航空機観測は広域を得意とするが、地上観測はレーダを観測対象に最も近づけて詳細な観測を可能にする利点がある。地上をベースにした内陸広域観測を基盤にする日本の研究環境の利点を生かして、今後の研究を展開していくことになるのであろう。使用するレーダ技術とその開発や導入、それに解明したい現象の両にらみで、研究者は新知見の解明にチャレンジしていくことになるのであろう。

(2008 年 10 月 12 日受付)