

学位論文題名

Multi-frequency radar sounding of the interior of
the Antarctic ice sheet and its application to ice-sheet dynamics

(南極氷床内部の多周波レーダ観測とその氷床動力学への応用)

学位論文内容の要旨

地球上の熱・水循環に大きな影響を与えている氷床は、気候形成とその変動に能動的な役割を果たす一方、氷床自身も地球上の大気圏－水圏－陸圏の相互作用の結果として存在している。氷床に堆積した雪は気候を反映する物理化学的特性（例えば、含有化学物質濃度）をもつ。また、氷床内部の雪氷は氷床変動で生じた特性（例えば、氷結晶軸方位）も併せ持つ。これらの特性は相互作用の反映であるから、地球環境の変動機構を理解し将来の変動を予測するために、氷床内部に蓄えられた情報を調べることは重要である。

本研究では、電波リモートセンシングを用いて氷床の内部を広範囲に観測し、氷床の動力学にとって有用な等年代層の深さ分布と氷結晶軸方位の分布を調べることを目的としている。特に、室内実験から得た結果を利用して氷床中の酸性度変化が得られるレーダを設計した点、流域規模で結晶軸方位分布を明らかにした点に本研究の特徴がある。氷床内部における電波反射の原因が周波数によって異なることは既に提唱されていたが、本研究で用いた周波数範囲の一部では、酸性度変化による電波反射係数の見積もりはなかった。また氷床流動に大きな影響を及ぼす氷結晶主軸方位分布は、氷コア解析や理論的研究により調べられてはいたが、氷床の流域規模での観測は皆無であった。そこで本研究ではまず最初に氷の誘電測定を行い、電波反射係数を見積もった。そしてその結果を用いて 30 MHz レーダを新たに開発し、既存のレーダと組み合わせて観測を行い、氷床動力学へ応用した。

純水に塩酸・硝酸・硫酸をそれぞれ混入して作成した酸添加氷の複素誘電率を、容量法で 1 kHz から 30 MHz、 -9°C から -33°C の範囲で測定し、単位濃度当たりの誘電率増加量を周波数・温度の関数として表した。次に、北極氷冠氷の AC-ECM 測定を 300 kHz から 1 MHz、 -12°C から -27°C の範囲で行った。AC-ECM シグナルは酸の濃度に支配されるが塩も影響しており、単位濃度当たりで比べると塩の影響は酸の 10%程度であることが分かった。また酸の影響は両測定で調和的であることから、酸添加氷で得た結果は多様な不純物が共存する氷にも適用可能である。そこで、酸添加氷で得た結果を用いて、氷床中の酸の濃度変化による電波反射係数を 1 MHz から 30 MHz で算出した。その結果、誘電率実部の増加が反射係数に与える影響は約 0.4 dB であることを示した。すなわち、この周波数帯においても電気伝導度の増加によって反射係数が決定でき、酸性度変化に起因する反射係数は周波数に逆比例することが分かった。

酸性度変化以外の要因による電波反射係数は周波数に依存しないため、低周波では酸性度変化による反射が卓越する。そこで、氷床中の酸性度変化を検知できるレーダの仕様を検討し、30 MHz において新規にレーダを開発した。このレーダと既存の 60 MHz, 179 MHz レーダを用いて、東南極しらせ流域において観測を行った。観測は、移動観測と定点観測に大別できる。移動観測は、ド

ムフジから主流線に沿った 670 km の測線と、中流域で氷床流に直交する 300 km と 20 km の測線で行った。定点観測では、6 地点において、偏波面を 22.5 度ずつ変えた 8 偏波面で観測を行った。60 MHz と 179 MHz では全領域において、30 MHz では機器の不調から内陸域においてのみ、明瞭な氷床内部と基盤からのエコーを得ることができた。

氷床中の大きな酸性度変化は火山噴火によることから、酸性度変化に起因する内部反射層は等年代層であると考えられる。そこで、定常状態を仮定し層流近似の流動モデルで計算した等年代層と 30 MHz で得られた内部反射層の深さ分布を比較した。その結果、内部反射層とモデル計算した等年代層の深さ分布は、基盤の起伏が小さなところでは良く一致した。しかし、基盤の起伏が激しいところでは、モデル計算結果が小さな起伏を反映するのに対し、内部反射層の深さ分布は余り反映しなかった。これはモデルでは考慮していない縦偏差応力(伸長と圧縮)の影響によると考えられる。

中流域の観測からは、水平方向に連続したエコーの強い層が約 1000 m 深に存在することを明らかにした。エコー強度の偏波面对称性から、この異方性は複屈折によるものではなく反射層の異方性によるものである。また、この異方性を持つ反射層(ARZ)は、179 MHz で観測したエコー強度が 60 MHz におけるエコー強度よりも大きいことから、氷結晶主軸方位の変化によるものと考えられる。すなわち、ARZ の上端において、軸方位が氷の流動方向に直交する面に集中するガードル型分布から鉛直軸に集中する単極大型分布へ移行していると結論した。ARZ は氷床流が収斂する領域でのみ観測され、「収斂域ではガードル型が発達する」とした理論予測が流域規模で成り立っていることを示している。コア年代を参照すると、ARZ は氷期氷に相当する。また、ARZ の厚さはレーダの鉛直分解能を越えることから、ARZ 内に複数の反射層が存在する。ARZ の異方性を説明するためには、ARZ 内で単極大型とガードル型が混在している必要がある。すなわち、氷厚のおおよそ半分の深さにおいても、不純物を多く含む氷期氷は卓越して変形し異なる結晶軸方位が混在していることが示唆された。

以上の結果は、従来用いられることの少なかった低周波レーダの有用性と、現在の氷床モデルでは全く考慮されてない氷床内部の力学特性の不均一性を流域規模で示したものであり、より正確な氷床変動機構の理解に繋がるものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 本 堂 武 夫

副 査 教 授 前 晋 爾 (北海道大学大学院工学研究科)

副 査 教 授 平 川 一 臣

副 査 助 教 授 成 瀬 廉 二

学 位 論 文 題 名

Multi-frequency radar sounding of the interior of the Antarctic ice sheet and its application to ice-sheet dynamics

(南極氷床内部の多周波レーダ観測とその氷床動力学への応用)

南極とグリーンランドに存在する氷床は、地球の熱・水循環システムの一部として、気候形成とその変動に深く関わっていると同時に、気候・環境変動の歴史を記録している貴重な存在である。気候変動に対する氷床の応答を明らかにするためにも、氷床から過去の地球環境情報を抽出するためにも、過去にさかのぼって氷床全体にわたる堆積速度の分布や流動状態を把握することが極めて重要である。そのためには、過去の堆積環境と流動状態を反映する氷床内部の層構造を広域にわたって観測することが求められる。

電波リモートセンシングは、氷床の厚さや基盤地形を明らかにする手法として広く用いられており、氷床内部の電波反射層の観察にも使用されてきた。特に、最近開発された多周波レーダ観測法は、氷床内部の反射層の実体を明らかにする画期的な手法として注目されている。

本研究は、申請者自身が開発に携わってきた多周波レーダ観測法を南極における広域観測に初めて応用した研究であり、結果として、この手法が堆積環境と流動状態を把握する上で極めて有力な手法であることを立証したものである。

本論文は、8章からなり、第1章では、氷床流動および電波リモートセンシングに関するこれまでの研究の概観と本研究の位置付けを示している。第2章は、酸を含む氷の複素誘電率を広い周波数範囲にわたって測定した結果を述べており、第3章では、第2章の結果に基づいて、電波反射係数を計算し、1-30 MHz において酸濃度の変化による反射係数が周波数に反比例することおよび他の要因による反射係数が周波数に依存しないことを述べている。第4章

では、この計算結果に基づいて、氷床内部の酸濃度の変化を検知し得るレーダの仕様を検討し、既存の60MHz、120MHzレーダの他に30MHzのレーダを新たに開発した経緯が述べられている。第5章では、東南極しらせ氷河流域において実施したレーダ観測とそのデータ処理について述べており、総延長1600kmに及ぶ広域連続観測および同一地点で偏波面を変えてエコー強度を調べる定点観測が特徴的である。後者は、流動によって生ずる多結晶氷組織の異方性を検出することを目的として行われた。

観測結果として、第6章で等年代層について、第7章で氷結晶方位分布について、それぞれ詳細な検討結果が述べられている。一部データにノイズレベルの高い部分があり、全域にわたる解析はできていないが、新たに導入した30MHzレーダが等年代層検知に有効であることが示されている。また、流動方向に対して偏波面を回転することによって得られたデータから、氷床内部の氷結晶方位分布を推定し、流動に伴う方位分布の発達過程の解析が可能であることが述べられている。第8章では、本研究で得られた結果がまとめられている。

以上、本研究は、実験データに基づく新たな観測手法の開発から観測計画の策定と実施、データ処理、データ解釈までの一連の研究を申請者自らが行ったものであり、得られた結果も、氷床の電波リモートセンシングに新たな一歩を印すものである。本研究の手法が広く応用されることによって、広域にわたる堆積環境と流動状態の解析が可能になると期待できる。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した。