

学 位 論 文 題 名

マイクロ波領域における氷結晶の誘電特性の測定と、
極域雪氷圏における電波リモートセンシングへの応用

学位論文内容の要旨

地球規模の気候・環境変動の解明にとって、両極域の雪氷圏の研究が果たす役割は大きい。それは、極域雪氷圏が、地球上の熱や水の循環、地球大気及び海洋の循環系に大きな影響を与えているからである。その極域雪氷圏の観測に、人工衛星や航空機を用いた電波リモートセンシングは欠かせない技術である。本論文は、マイクロ波領域の周波数である9.7GHzにおいて氷の誘電特性を測定し、その結果を極域雪氷圏における電波リモートセンシングによって得られる観測データの解釈、更には将来あるべきレーダーやセンサーの開発思想に応用した一連の研究の結果を述べたものである。

まず、第1章には氷の誘電特性の研究のレビューを示す。第2章は本研究で用いた測定手法やシステムについての解説である。

第3章と第4章が具体的な測定結果をまとめたものであり、ここではいくつかの新事実を示す。まず第3章では、氷の誘電率実数部の一軸異方性をはじめて定量的に明らかにする。測定の結果、結晶C軸と電場ベクトルが平行な場合の誘電率 $\epsilon'_{\parallel c}$ は結晶C軸と電場ベクトルが垂直な場合の誘電率 $\epsilon'_{\perp c}$ よりも大きいことが明らかになった。この傾向は、デバイ緩和周波数領域から静的誘電率の領域の低周波で観測されているものと同じである。この事実、9.7GHzと低周波数の中間の周波数領域であるHF、VHF、マイクロ波領域でも $\epsilon'_{\parallel c} > \epsilon'_{\perp c}$ であることを示唆している。 $\epsilon'_{\parallel c}$ と $\epsilon'_{\perp c}$ は共に温度にわずかに依存するが誘電異方性 $\Delta \epsilon' (= \epsilon'_{\parallel c} - \epsilon'_{\perp c})$ は一定であり、0.037 (± 0.007) であった。この結果に基づいた計算から、ラジオエコーサウンディング (Radio Echo Sounding) 技術で極地氷床の内部層から観測される電波の反射の主要原因の一つが氷の誘電異方性であるという結論を導いた。

次に第4章では、含有不純物として酸を含む氷の複素誘電率を明らかにする。酸天然の雪や氷に含まれる主要な不純物でありながら、それがマイクロ波領域での氷の誘電特性に与える影響は従来全くわかっていなかった。本研究では、氷の複素誘電率が氷が含有する酸の濃度に比例して

増大し、さらには酸の濃度を体積モル濃度で表すとき、その直線関係は酸の種類に依存しないことをはじめて明らかにした。特に誘電損失は含有する酸に大きな影響を受ける。

次に第5章では、4章で述べたような酸を含有する氷の9.7GHzでの誘電特性を、従来他の研究者によって低周波帯（LF帯）で得られているそれと比較する。その結果、第4章に得られたような酸の濃度と誘電損失のもつ直線関係を電気伝導度で書き表した場合、それはマイクロ波帯でもLF帯でもほぼ同一の値になることがわかった。またさらには、氷が酸を含有することによって起こる電気伝導度の値は、かつて極地氷床氷の直流電気伝導メカニズムを説明するために提唱されてきたモデルから得られる値ともよく一致することがわかった。

第6章では、第5章までに得られた氷の高周波での誘電特性から、氷体内をMHz帯とGHz帯の電磁波が伝播する際の電波特性を示す。氷体中の電磁波の伝播速度は、およそ $169\text{m}/\mu\text{sec}$ であるが、この速度は氷体温度の上昇と共に $0.023\text{m}/\mu\text{sec}^{\circ}\text{C}$ の割合で減少する。氷単結晶の誘電率には一軸対称の誘電異方性があることから、伝播速度は電磁波のもつ電場ベクトルと氷の結晶C軸の角度に応じて $1\text{m}/\mu\text{sec}$ 変化する。氷単結晶に一軸対称の誘電異方性があるということは、氷多結晶のもつ誘電率テンソルもまた異方性をもつことを意味している。この事実、氷体中を伝播する電磁波の偏波状態はこの誘電率テンソルによって決定されていることを意味している。

氷多結晶の誘電損失は、それが含有する酸の濃度に比例して大きく変化するので、酸を含有する氷の中では純氷の中よりも著しい電磁波の減衰が起こる。電磁波の氷体への浸透深さを、水素イオン濃度指数pHの関数として見積もった結果、それはpHと温度と測定周波数に強く依存することがわかった。

第7章では氷床内部反射層の原因と性質を議論する。氷床内部反射は、氷床内部でファブリックパターンが深さ方向に変化したとき、あるいは、含有する酸の濃度が変化し結果として電気伝導度に変化したときに起こり得ることを明らかにする。氷床内部反射の原因は、氷床浅層部では密度変化が支配的であるが、深層部ではファブリックパターンの変化と電気伝導度の変化の両方であるという結論が導かれる。それぞれの反射層がそのどちらかの原因で成り立っているかは、電磁波の強度反射係数（PRC）の周波数依存性を調べればわかることを示す。

第8章では、南極みずほ基地で観測された氷床内部反射と、ここで掘削された氷床コアのファブリックパターンの関係について論じる。179MHzのラジオエコーサウンディング（RES）のデータと700m深の氷床コアから測定したファブリックパターンのデータを用いた。これらのデータから計算した氷床の誘電率テンソルから、みずほ基地下の氷床が一軸異方性の複屈折媒体

であることがわかった。

第9章では南極氷床を形成する多結晶氷のファブリックパターンが、その地域の氷床の動力学的環境を密接に反映している例を示す。東南極、セルロンダーネ山地の周辺地域から得られた氷試料のファブリックの解析から、氷床流に対し、山脈の側方にあたる地域の氷床表面氷は、広域にわたって側方からのせん断歪が蓄積されていることを示すファブリックパターンをもっていることを明らかにする。

第10章は本論文のまとめである。

学位論文審査の要旨

主査	教授	前	晋爾
副査	教授	大塚	喜弘
副査	教授	堤	耀広
副査	教授	伊藤	精彦

地球規模の気候・環境変動の解明にとって、両極域の雪氷圏の研究が果たす役割は大きい。それは、極域雪氷圏が、地球上の熱や水の循環、地球大気及び海洋の循環系に大きな影響を与えているからである。その極域雪氷圏の観測に、人工衛星や航空機を用いた電波リモートセンシングは欠かせない技術である。

本論文は、マイクロ波領域の周波数9.7GHzでの氷の誘電特性の測定結果を、極域雪氷圏における電波リモートセンシングによって得られる観測データの解釈、更には将来あるべきレーダーやセンサーの開発思想に応用した一連の研究をまとめたものである。

まず、第1章では氷の誘電特性の研究のレビューを示し、第2章では本研究で用いた測定手法やシステムについて解説している。

第3章では、氷の誘電率実数部の一軸異方性をはじめて定量的に検討している。測定の結果、結晶C軸と電場ベクトルが平行な場合の誘電率 $\epsilon'_{\parallel}$ は結晶C軸と電場ベクトルが垂直な場合の誘電率 $\epsilon'_{\perp}$ よりも大きいことが明らかになった。 $\epsilon'_{\parallel}$ と $\epsilon'_{\perp}$ は共に温度にわずかに依存するが誘電異方性 $\Delta\epsilon' (= \epsilon'_{\parallel} - \epsilon'_{\perp})$ は一定であり、0.037 (± 0.007)であった。この結果に基づいた計算から、ラジオエコーサウンディングで観測される氷床内部層電波反射の主要原因の一つが氷の

誘電異方性であるという結論を導いた。

次に第4章では、天然の雪や氷に含まれる主要な不純物である酸がマイクロ波領域での氷の誘電特性に与える影響を明らかにした。氷の複素誘電率は、酸の体積モル濃度に直線的に比例し、酸の種類に依存しないことを発見した。

第5章では、第4章に得られた酸の濃度と誘電損失のもつ直線関係を電気伝導度で書き表した場合、周波数によらず一定となり、その関係が極地氷床氷の直流電気伝導メカニズムを説明するために提唱されてきたモデルで説明されることを示した。

第6章では、氷体内を MHz 帯と GHz 帯の電磁波が伝播する際の電波特性について述べている。氷単結晶の一軸対称誘電異方性から、氷多結晶のもつ誘電率テンソルも異方性をもつことを示し、氷体中を伝播する電磁波が偏波状態にあることを明らかにした。氷多結晶の誘電損失は、それが含有する酸の濃度に比例して大きく変化するので、酸を含有する氷の中では純氷の中よりも著しい電磁波の減衰が起こる。電磁波の氷体への浸透深さは、水素イオン濃度指数 pH と温度と測定周波数に強く依存することが明らかとなった。

第7章では、氷床内部反射は、氷床内部でファブリックパターンが深さ方向に変化したとき、あるいは、含有する酸の濃度が変化し結果として電気伝導度が変化したときに起こり得ることを明らかにしている。反射層がそのどちらの原因で成り立っているかは、電磁波の強度反射係数（PRC）の周波数依存性を調べればわかることを示した。

第8章では、ラジオエコーサウンディングのデータと700m深の氷床コアから測定したファブリックパターンのデータを用い、みずほ基地下の氷床が一軸異方性の複屈折媒体であることを示した。

第9章では東南極、セルロンダーネ山地の周辺地域から得られた氷試料のファブリックの解析から、氷床流に対し、山脈の側方にあたる地域の氷床表面氷は、広域にわたって側方からのせん断歪が蓄積されていることを示すファブリックパターンをもっていることを明らかにした。

第10章は本論文のまとめである。

以上のように著者は、氷結晶のマイクロ波誘電物性についての新知見を得るとともに、極域雪氷圏リモートセンシング技術に関しても新しい提案を行っており応用物理学の進歩に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。