

学 位 論 文 題 名

マイクロ波領域での氷結晶の誘電的性質と不純物効果

学位論文内容の要旨

南極やグリーンランドなどの極域雪氷圏の気候や環境を広域に観測することは、地球規模での気候や環境の変動を解明する上で非常に重要になっている。何故なら極域氷床は、その拡大および縮小規模、表面形態、氷床の流動速度などをパラメータとして、地球全体の気候変動と複雑に相互作用をもつからである。これらのパラメータを観測するため、現在、雪氷圏においてマイクロ波を用いた人工衛星によるリモートセンシングやアイスレーダ観測が盛んにおこなわれている。

しかしながら、氷体内でのマイクロ波の伝播特性（伝播速度や反射、散乱、減衰など）を規定する物理量である氷結晶の誘電率の測定値が、この周波数領域で極めて乏しいのが現状である。それ故に、これらのマイクロ波レーダで得られた探査データを正確に解析するためには、精度の高い氷結晶の誘電率測定が必要とされていた。この必要性に応えるため、本研究では高精度の誘電率測定手法である空洞共振器法および開放型共振器法を用いたシステムを作製し種々の測定を行なった。

本論文は、マイクロ波領域での氷結晶の誘電的特性を氷結晶のもつ種々の物性（結晶粒径、結晶方位、含有不純物等）との関連で明らかにした一連の研究の結果を述べたものである。

本論文は6章から構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的を述べる。

第2章では、本研究で開発され氷結晶の複素誘電率の精密測定に使用された、空洞共振器法および開放型共振器法について詳細に述べる。

第3章では不純物を含まない純粋氷結晶の比複素誘電率を温度範囲190 K (-83℃)から265 K (-8℃) にわたり測定した結果について述べる。5, 10 GHzでは空洞共振器法で、33, 39 GHzでは開放型共振器法により測定を行った。誘電率実数部は周波数には依存せず、ほぼ一定値になった。また、誘電率実数部は温度上昇に対して増大した。これらについて、氷結晶の赤外分極率（分子分極率）の非調和効果の寄与として論じる。誘電率虚数部は桁が10の-4乗から-3乗の非常に小さい値であり、その温度

依存性・周波数依存性が明らかになった。誘電率虚数部の測定値は過去に行われた測定の温度・周波数範囲の空白を埋めるものであり、その温度依存性・周波数依存性は主に赤外領域の格子振動による吸収帯の効果として論じる。また、温度降下に伴い、周波数に対する誘電率虚数部の変化が大きくなることが明らかになった。このことから、赤外領域よりも低周波数側にも誘電分散による吸収が起こっている可能性を示す。

第4章では、開放型共振器法によって39 GHzでの氷結晶のc軸に対して平行な方向と垂直な方向の誘電率を温度範囲194 Kから262 Kで精密に測定した結果について述べる。マイクロ波帯の周波数での氷結晶の誘電異方性は極域雪氷圏でのアイスレーダや人工衛星搭載型のマイクロ波レーダおよび放射計で得られるリモートセンシングデータの正確な解釈に重要である。極めて精密な誘電異方性の測定は共振器中の一つの単結晶氷試料から二つの共振ピークを同時に検出することにより達成された。39 GHzでの誘電率実数部の異方性 ($\Delta\epsilon' = \epsilon'_{//c} - \epsilon'_{\perp c}$) は252 Kで 0.0339 ± 0.0007 (1.07% $\pm$ 0.02%) で、僅かに温度依存性を示す。また、参照測定として1 MHzでも平行円盤電極を用いた容量法を使って誘電異方性を測定した。マイクロ波帯で測定された誘電異方性の値は1 MHzの誘電異方性の値と非常に良く一致した。39 GHzでの $\epsilon'_{//c}$ および $\epsilon'_{\perp c}$ の絶対値はそれぞれ1 MHzでの $\epsilon'_{//c}$ および $\epsilon'_{\perp c}$ よりも小さく、252 Kでその差はおよそ0.044であった。この結果は、マイクロ波帯とMHz帯の間に小さな誘電分散（配向分極の誘電分散に比べ）が存在するが、誘電異方性の絶対値は周波数に依存していないことを示す。

第5章では、イオン性不純物を含む多結晶氷の比複素誘電率を周波数5 GHzでの空洞共振器法を用いて温度範囲-80℃から-2℃にわたり測定した結果について述べる。氷結晶に混入した不純物は塩としてNaCl、酸としてHNO₃、H₂SO₄を用いた。不純物濃度は10⁻⁵ M (molarity) から10⁻³ Mであった。多結晶氷の誘電率虚数部は、温度上昇、不純物濃度増加に伴い増大した。-80℃から温度を上昇させながら測定するとNaCl、HNO₃、H₂SO₄を含む氷の誘電率虚数部の値はそれぞれの共晶点-21℃、-43℃、-73℃、の直上で急激に増大した。この変化は多結晶氷に含まれている不純物が共晶点より高温で液相を形成することに起因する。顕微鏡観察により、氷試料中の液相は三つの結晶粒に挟まれる三叉粒界の管の中と二つの結晶粒の間の結晶粒界面のレンズ形包含物として存在することを確認した。また、本研究で使用した試料では液相の90%がレンズとして存在していることが分かった。不純物を含む氷の誘電率虚数部の変化を支配する機構について、温度変化にともなう不純物液相の氷に対する体積比の変化と不純物液相中の濃度の変化から議論する。

第6章では本研究を総括する。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 前 晋 爾

副 査 教 授 丸 川 健三郎

副 査 教 授 堤 耀 広

学 位 論 文 題 名

マイクロ波領域での氷結晶の誘電的性質と不純物効果

南極やグリーンランドなどの極域雪氷圏の気候や環境を広域に観測することは、地球規模での気候や環境の変動を解明する上で非常に重要になっている。何故なら極域氷床は、その拡大および縮小規模、表面形態、氷床の流動速度などをパラメータとして、地球全体の気候変動と複雑に相互作用をもつからである。これらのパラメータを観測するため、現在、雪氷圏においてマイクロ波を用いた人工衛星によるリモートセンシングやアイスレーダ観測が盛んにおこなわれている。

しかしながら、氷体内でのマイクロ波の伝播特性（伝播速度や反射、散乱、減衰など）を規定する物理量である氷結晶の誘電率の測定やそれに基づく研究が、この周波数領域で極めて乏しく、リモートセンシングデータの解析が進んでいないのが現状である。それ故に、これらのマイクロ波レーダで得られた探査データを正確に解析するためには、精度の高い氷結晶の誘電率測定が必要とされていた。この必要性に応えるため、本研究では高精度の誘電率測定手法である空洞共振器法および開放型共振器法を用いたシステムを作製し種々の測定を行なった。

本論文は、マイクロ波領域での氷結晶の誘電的特性として、マイクロ波リモートセンシングデータ解析にとって重要な誘電異方性、温度依存性および地球環境変動の重要な指標である酸や塩等の不純物の効果について明らかにした一連の研究の結果を述べたものである。本論文の主要な成果は次の通りである。

- ①開放型共振器法によって、39GHzでの誘電異方性を極めて高い精度（2%）で、かつ広い温度範囲（ -79°C ～ -10°C ）で測定した。この誘電異方性は1 MHzの誘電異方性と良く一致することから、周波数に依存しないことおよび温度変化が極めて小さいことが明らかとなった。
- ②マイクロ波誘電損失は、低周波分散であるデバイ分散および高周波分散である赤外分散による損失の重なりから主として決定されること、および赤外より低い周波数領域にも新たな誘電分散が存在している可能性を示した。
- ③地球環境を表す指標として知られる酸および塩を含有する氷結晶の誘電損失は、不純物の共晶点温度で急激に変化することを明らかにした。この結果から、共晶点より高い温度では酸や塩が結晶の境界面や三叉粒界で溶液を形成することを示した。

以上のように著者は、マイクロ波における氷結晶誘電率の精密測定を行い、誘電異方性温度変化および不純物効果を明らかにしたものであり、応用物性学と応用物理学の進歩に寄与するところ大である。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。