

平行線路電極を用いた表面付近の積雪の誘電観測

竹井 巖*, 前野 紀一**

Dielectric Observations of Snow Cover near the Surface by means
of a Parallel Line Capacitor

Iwao Takei *, Norikazu Maeno **

Received October 30, 1998

この論文では、北陸大学薬学部キャンパス（金沢）における1997年1月29日から2月7日までの期間の積雪に対して、平行線路電極を用いて行ったその積雪の表面付近の誘電観測の結果を示し、新たに得られた積雪の構造変化過程に関する知見を報告する。得られた結果より、積雪の誘電損失D（100Hzを代表とする低周波数での測定結果）の値が、降雪によって積雪が形成された直後から徐々に減少することと、その誘電損失Dの減少基調の時間変化の上に、いくつかのピークが観測されることが認められた。各ピークは①放射冷却②暖気の流入③冷気の流入といった外部環境の急激な変化が起こる時期に発生した。これらは、各外部環境の急激な変化により積雪表面付近に急峻な温度勾配が生じた時期に生じたものであり、温度勾配を駆動原因とする雪粒子を構成する水分子の不可逆的挙動の様子が誘電損失Dの増大として観測されたものと考えられた。

キーワード：積雪，誘電測定，誘電容量，誘電損失，構造変化過程

Keywords: snow, dielectric measurement, capacitance, loss factor, metamorphic process

1. はじめに

冬季の北西の冷たい季節風が、暖かい日本海の上を渡ってくる間に多量の水蒸気を含み、北陸地方の背後にそびえる白山や立山によって遮られたとき、多量の降雪をもたらすのが北陸地方の冬の特徴である。この地理的な特質よってもたらされる多量の降雪が、北陸地方が温帯に属しているにもかかわらずこの地方を世界有数の豪雪地域とし、積雪地域の雪質分類で表現すれば『湿り雪地域』¹⁾に属させることの原因となる。たとえば北陸大学のある金沢などにおける冬は、温暖多雪という言葉でその特徴を表すことができ、気温は0℃付近より極端に低下することはないにもかかわらず、多量の降雪を経験することになる。この北陸地方の降雪によっ

*薬学部
Faculty of Pharmaceutical Sciences**北海道大学低温科学研究所
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

でもたらされた積雪は、沿岸平野部の湿り雪を主体とする積雪と、白山・立山のような乾き雪でかつ多大な積雪深を示す山岳積雪とに大きく分類することができる。本研究は、金沢に所在する北陸大学の薬学部キャンパスにおいて降雪によって形成された積雪（すなわち沿岸平野部の湿り雪を主体とする積雪）に対し、その変化過程を調査しその特性を明らかにすることを目的としている^{2,3)}。

積雪の誘電的性質の研究は、黒岩⁴⁾の研究を嚆矢として多くの報告例がある⁴⁻¹⁷⁾。積雪の誘電的性質は、積雪の密度^{4, 8), 12)}、含水率^{4-5), 14)}、空隙率¹⁵⁾、雪粒子の結合状態⁴⁻⁶⁾、積雪構造（Wienerの形数、Polder&vanSantenのshape factor）^{4-6), 15)}などに関係付けられて調べられ整理されてきた。これは、積雪を構成する雪粒子（：氷）が誘電媒質であり、その比誘電率が空気（比誘電率が1）や水（比誘電率が80）に比べて比較的大きく異なる（氷：静的誘電率100、高周波誘電率3、ただし融点近傍温度で測定周波数が10kHz前後にて誘電分散を示す¹⁸⁻²⁰⁾）ために、積雪構造の違いや積雪内部の状態を誘電率の測定結果から推測できる可能性をもっているからである。たとえば含水率の測定に高周波数の誘電測定を用いることはある程度実用化されている¹⁴⁾。

一方、私たちが普通に目にする積雪は、融点近傍に存在し、時間と共にその構造や性質を激しく変化していることが知られている²⁰⁻²⁴⁾。積雪は、降雪によって形成されたあと、時間とともにその構造、密度、性質を変化させる。このような積雪の変化の様子は、積雪がさらされる外部環境によって異なる事が予想される。吉田&小島をはじめとする多くの研究者による、実験室における制御された環境下での直視観察では、結晶形の顕著な新雪から球状のしまり雪、ざらめ雪などへの形態変化や雪粒子間の結合状態の変化が、不可逆的な変化として認められる事が報告されている^{7), 21-24)}。Maeno & Ebinuma²⁵⁾によって、氷粒子を用いた圧密過程と構造変化過程の実験室における研究が、密度（体積）変化と種々の圧力・温度について精力的に行われ、積雪の変化過程と水分子の様々な移動拡散過程に関係づけて論ぜられている。そこで整理された雪の構造変化過程の機構は、表面拡散、格子拡散、水蒸気拡散の三つの機構を柱とし、さらに可能性として粒界面拡散、粒界格子拡散も論じられている。

このような雪の構造変化を追跡する観点の研究として、誘電的手法を用いて雪に対する変化過程を調べた研究（実験室および屋外）がいくつか報告されている^{2-6), 10-11), 16), 17)}。黒岩の室内実験⁶⁾では、積雪の誘電的性質の時間的変化を積雪粒子間の結合の形成発達によるものと考えている。Fujino et al.¹⁶⁾は、彼らの自然積雪に対するマイクロ波の後方散乱の時間的変化の測定結果について、積雪表面付近の含水率の増減に関連付けて解釈を加えている。このように、積雪の誘電的性質の時間的変化の測定は、積雪内部の変化の様子を非破壊的に追跡できる利点があるので、積雪の構造変化過程の一端を、特に水分子レベルの挙動に関連付けて論じるための情報を与える可能性を持っている。

最近の測定機器の発達やパーソナルコンピュータの普及により、積雪の時間変化の様子を誘電的手法で調べることの技術的困難（以前のように測定者が時間に拘束されて継続的に測定を繰り返す負担の大きい状況）を自動測定等によって取り除くことが可能になったので、上述の観点の研究の遂行が容易となり、その研究の有用性を生かせる状況になってきた。このような状況を受けて当研究者は、自然積雪に対する測定法の検討や実際の測定および積雪状況などの観測結果より、北陸地方の積雪の特質の一端を論じる試みを進めてきた^{2,3)}。すなわち、どのような積雪の変化過程の情報が得られるのかを検討するため、積雪内部で雪の変化過程を極力乱さないように工夫した平行線路電極²⁾を用いて自然積雪を直接に誘電測定することを試みてきた。その結果、基

本的に誘電パラメータの誘電容量Cは時間とともに増加し、誘電損失Dは時間とともに減少することが観測された³⁾。得られた結果の検討より、誘電容量Cは積雪の密度変化および雪粒子間の結合状態に、誘電損失Dは雪の初期構造変化過程に伴う水分子の不可逆的挙動に強く関連していることが示唆された。この結果は、湿り雪地域の金沢での積雪（ほぼ0℃）に関する変化過程において、電極を外部温度環境の影響が少ない積雪深部に設置した場合に得られたものであった。

近年の暖冬少雪傾向のため、観測対象としての積雪が十分得られないことや降雪によって積雪が形成されても雨が降ったり、冬の北陸には珍しい快晴の日が続いたりして、北陸地域の積雪の研究としては必ずしも良好な環境ではないのが実状である。しかし、こういった気象状況における観測でしか得られないと思われる興味深い結果が得られたので報告する。すなわち、電極を外部温度環境の影響が大きい積雪浅部に設置した場合において、外部環境の変動に伴い、積雪内部の温度勾配を原因とすると考えられる積雪からの誘電的信号を検出したことである。ここでは特に、測定周波数が100Hz付近の低周波数領域の誘電損失Dの結果を、積雪内部の温度勾配と積雪の変化過程を担う水分子の挙動に関連付けて論ずる。

2. 今回用いた平行線路電極

積雪の誘電観測を行うとき、一般に平行平板電極や円筒型電極、棒状電極が用いられ、積雪中に差し込んだり電極間にほぐした雪を詰め込んだりして測定を行う^{4-6), 11), 14-15), 17)}。このような測定では、電極の設置の際に積雪の構造の破壊は多かれ少なかれ避けることはできず、また継続的な測定では時間とともに変化する積雪構造に対して異物としての電極の存在の影響が無視できない場合が多い。

そこでこのような問題を回避するため、細い銅パイプを用いた平行線路電極を使用し、降雪の最中に電極を設置して自然埋設することにより、継続的に誘電測定をおこなうことを提案した²⁾。このような平行線路電極においては、電気力線が大きく湾曲するため、対象媒質の測定領域の厳密な特定や、誘電率として精密な物性定数を求めることが困難である。しかし一方で電極自体の幾何学的大きさが小さいので、積雪内部における異物としての影響を少なくすることができ、積雪内部で生起している現象を反映した誘電的物理量（誘電容量Cや誘電損失Dなど）の変化として検出することが期待できる。実際に得られた測定結果では、積雪の様子の変化やさらされる環境の変化に対して、良好な変化を示していることが確認できている²⁾。

今回はさらに、電気力線の湾曲や広がりを抑えて、比較的小さな測定領域で強い信号を得るため、図1に示すような改良型の平行線路電極（すだれ型電極）を使用した。このすだれ型電極では、長さ50cmの銅パイプ（径3mm）を6本8cm間隔で並べ、縦横50cm×40cmの面積の電極付近の雪の様子を検出することをめざした。パイプ状の電極の極性が交互に並ぶように配置するので、単純な一对の平行線路電極に比べて電気力線の広がりが小さくなり、測定領域がより電極の周囲に限定されるものと期待できる。

観測場所は北陸大学薬学キャンパス（金沢市金川町ホ3）の第三薬学棟と体育館に挟まれた芝生上（標高145m）で、直射日光は当たらない場所である。電極は、降雪時に積雪表面に設置し、積雪中に自然埋設する。電極から5mの同軸ケーブル4本で室内のLCRメーター（ヒューレットパッカード製、HP4274A）に接続する。LCRメーターはコンピュータ（NEC製、

PC9801FA) にGP-IBインターフェイスで結ばれ, そのコンピュータによって, 周波数範囲 100Hz~100kHzの12点 (100, 120, 200, 400, 1k, 2k, 4k, 10k, 20k, 40k, 100kHz) で誘電容量Cと損失係数Dを10分間隔で測定し, 記録することができる。また, 電極付近の雪の中と測定場所付近の地上1mの場所に熱電対による温度センサーを設置し, デジタル温度計 (アドバンテスト製, TR2114) に接続する。この温度計は, GP-IBインターフェイスを介してコンピュータに結ばれ, 雪温と気温を10分間隔で測定し記録するようになっている。

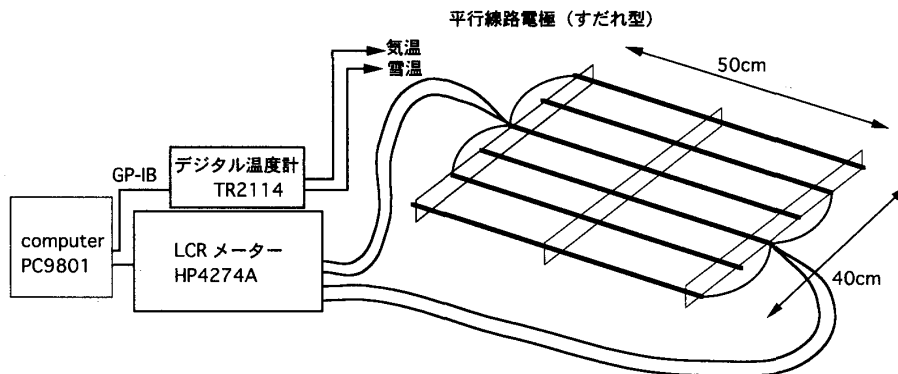


図1 平行線路電極 (すだれ型) と測定装置。平行線路電極 (すだれ型) は, 長さ50cmの直径3mmの銅パイプを6本8cmの間隔で並べ, 細長いプラスチックの絶縁体板で固定されている。電極の極性は交互にとり, 5mのシールド線で室内のLCRメーターに接続されている。この電極を降雪中の雪面に静かに設置し, 降雪で自然に積雪中に埋まるようにする。コンピュータでLCRメーターとデジタル温度計を制御し, 測定値を設定時間毎に記録する。

3. 結果

積雪浅部における誘電測定データ

図2は, 北陸大学薬学部キャンパス (金沢) において1997年1月29日から2月7日までの間, すだれ型電極を用いて誘電測定した時の積雪状況を示したものである。この観測では, 積雪が45cmの降雪時に電極を積雪表面に設置したが, その後, 期待したほどには降雪が無かったため, 電極は積雪表面から数cmの深さの場所に位置することになった。測定期間中は, 金沢に珍しく快晴の日があり, 暖気や寒気の流入, 降雨も観測された。

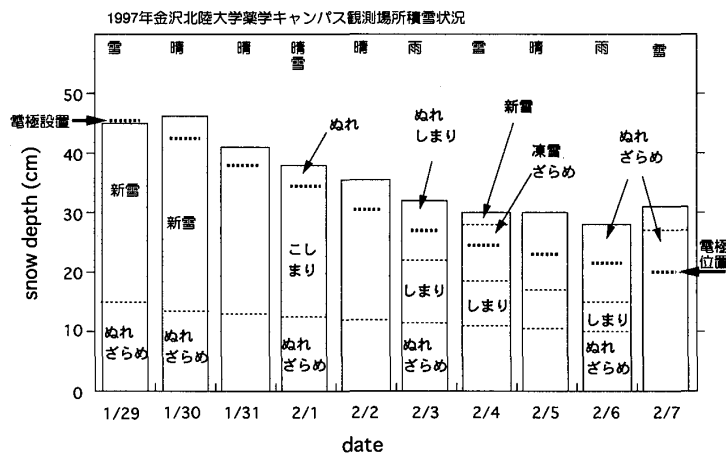


図2 観測場所 (北陸大学薬学部キャンパス, 金沢市金川町ホ3, 標高145m) の1997年1月29日より2月7日までの積雪状況。太い破線で示した場所が, 電極の推定埋設位置。2月3日と2月6日に雨が降る。

誘電測定および温度測定の結果を図3に示す。以前に報告した積雪表面から20cm以下の深い場所に電極が設置された場合の結果³⁾に比べると、得られた測定結果は激しく複雑な時間変化を示している。誘電容量Cの測定値が増加する傾向は基本的に変わらないが、低周波数領域のCの測定値は積雪の温度変動による変化が顕著に認められる。誘電損失Dについては、高周波数領域(100kHz)の値は時間とともに幾分増加する。これに対し、低周波数領域(100, 120, 200, 400Hz)の値は、基本的に大きく減少する基調の上に、電極設置後数日間の激しい変化が重なっている。雨が降った2月3日以降は、誘電容量C、誘電損失Dの測定値の急激な増加が認められる。その後2月7日の異常値まで減少したので、その時点で測定は中止した。この時、電極の周りの雪は濡れたざらめ雪で、空隙の多い状況になっていた。図3には、測定期間中における観測場所の気温と、電極近傍の雪温も示してある。電極が雪表面付近にあるため、電極付近の雪は気温や外部からの熱の出入りの影響を受けやすくなっていることがうかがえる。

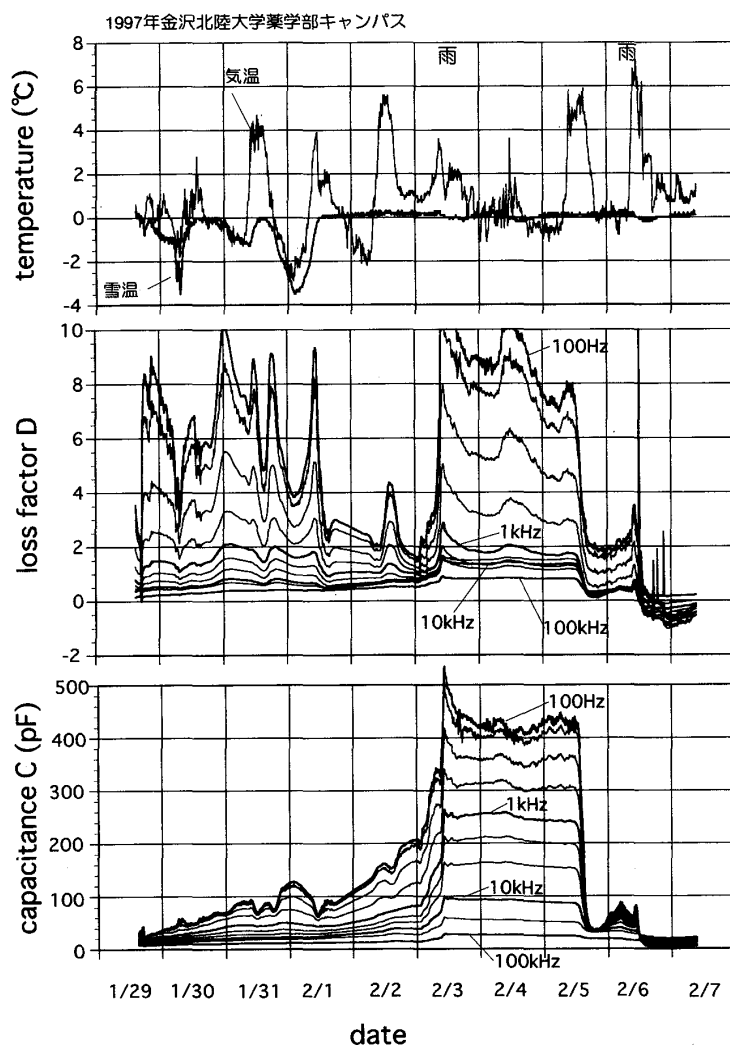


図3 1997年1月29日から2月7日の期間の観測場所（北陸大学薬学部キャンパス，金沢市金川町ホ3，標高145 m）における誘電観測と温度観測の結果。下の図は誘電容量Cの，中の図は損失係数Dの100Hzから100kHzの周波数範囲（100, 120, 200, 400, 1k, 2k, 4k, 10k, 20k, 100kHz）の結果を示している。上の図は電極付近の雪温と地上1 mでの気温の結果である。

電極付近の雪がさらされている温度環境

特に積雪の初期の構造変化が顕著な1月29日から2月2日までの期間について、気温と雪温および誘電損失D（測定周波数が100Hz, 1kHz, 10kHz, 100kHz）の測定結果を示したのが図4である。気温と雪温の測定結果から表面付近の積雪の温度環境は、次の4通りに分類することができる。

- ①雪温が気温に先行して低下する過程（1/29の21:00頃より朝方にかけて、気温に先行して雪温が下がる。同様に1/31の夕方16:00頃より2/1の2:00までの期間。）
- ②気温が雪温に先行して上昇する過程（1/30の朝方7:00頃より昼13:00にかけて、雪温に先行して気温が上昇する。同様に2/1の2:00頃より昼12:00頃までの期間。）
- ③気温が雪温に先行して低下する過程（1/30の夕方16:00頃から朝方にかけて、雪温に先行して気温が下がる。）
- ④気温が0℃以上で雪温が0℃で一定の状態

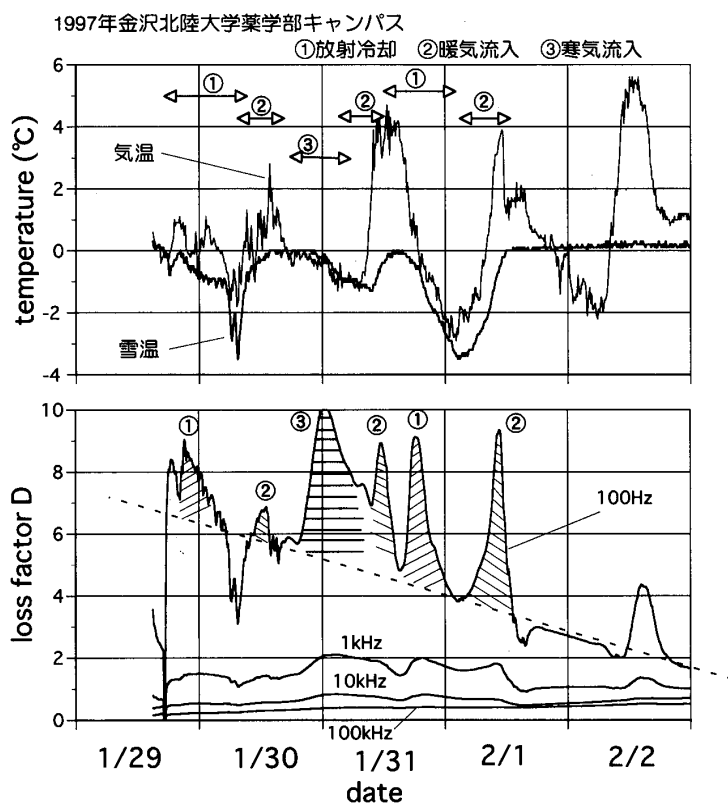


図4 1997年1月29日から2月2日の期間の観測場所（北陸大学薬学部キャンパス，金沢市金川町ホ3，標高145m）における誘電損失Dと温度観測の結果。下の図は損失係数Dの100Hz, 1kHz, 10kHz, 100kHzの結果を示している。破線は100Hzの誘電損失Dの時間変化（減少）の様子の仮想線。上の図は電極付近の雪温と地上1mでの気温の観測結果である。

このうち、①の過程は放射冷却の現象に、②の過程は雪温が0℃以下の時に暖気が入り込んできた気象状況に、③は冷気が入り込んできた気象状況に対応するものと考えられる。一般に金沢での冬季の気象状況においては、積雪内部の温度は表面付近を除いてほぼ0℃になっている。したがって①②③の温度環境は、図5のイメージ図で示すように、積雪表面付近において比較的強い温度勾配が生じていることを意味する。

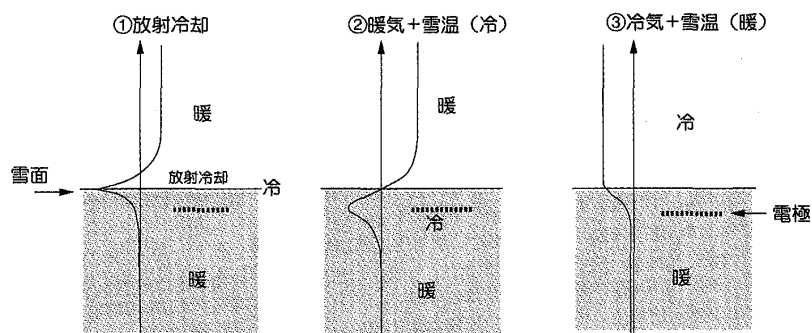


図5 電極付近の雪温と気温のイメージ図。①放射冷却。0℃の積雪の表面が放射冷却で冷やされたとき、表面付近の積雪に強い温度勾配が生じる。時間とともにこの温度勾配の範囲は下方に拡がり、緩やかな温度勾配となる。②暖気流入。雪温が放射冷却等で0℃以下になっているとき、暖気が流入すると表面付近の積雪に強い温度勾配を生じる。時間とともに熱が上方から伝達し、温度勾配は解消される。③寒気流入。雪温が0℃の時に寒気が雪面上方に流入してくると、表面付近の積雪に強い温度勾配を生じる。時間とともにこの温度勾配の範囲は下方に拡がり、緩やかな温度勾配となる。各図において、太い破線は電極位置を、矢印の軸線は深さ・高さ方向の位置と温度の0℃の位置（右方が正、左方が負の温度）を表し、細い実曲線で温度のイメージを示している。

低周波数領域の誘電損失D

損失係数Dの時間変化の様子は、測定周波数が低周波数になるほどその変動が顕著である。100Hzでの測定結果についてみると、基本的にDの値は時間と共に減少する。その基本的な減少変化（図4で破線で示す）の上にピーク状の信号が乗っているように認められる。これらのピークの立ち上がる時刻は、図4より、気温と雪温の結果からうかがえる①②③の現象が始まる時刻に対応していることが確認できる。これらのことから、積雪中に温度勾配が生じると、低い測定周波数の誘電損失Dの値は増加することが結論として得られる。

4. 考 察

得られた測定結果の検討

測定結果から、積雪中に温度勾配が生じると、誘電損失D（低周波数領域）の値は増加することが結論として得られた。誘電損失Dの増減に関わる現象としては、以前に報告したように、新雪からしまり雪に変化する過程で誘電損失Dが徐々に減少する事実、および、降雨によって水が積雪中に浸潤してきたときに誘電損失Dが増大する事実がある³⁾。これらの事実は、誘電損失Dが各測定周波数におけるエネルギー損失の程度を表す量であることから、たとえば雪粒子の形態変化に伴う構成水分子の不可逆的挙動の程度（時間とともにその激しさが減少する）を誘電損失Dが反映していること、または0℃の水の浸潤による雪粒子の周りの水分子の移動を伴う挙動の活発さ（液体の水の存在によってその激しさが増加する）が誘電損失Dに現れていることとして理解することができる。すなわち、誘電損失Dの値は、雪粒子を構成する水分子の不可逆的な挙動の激しさを示していると考えられる。

このような考え方を受け入れて本観測結果を考察すると、積雪中に大きな温度勾配が生じたとき、積雪中の雪粒子表面の水分子は、温度差による蒸気圧や運動エネルギーの違いから高い温度の場所より低い温度の場所へ不可逆的な移動を行うことになるので、そのことが誘電損失

Dの増大となって観測されたものとして理解することができる。したがって、強い温度勾配が生じた時に、誘電損失Dの低周波数領域の値に顕著な増大が認められるという観測結果は、誘電損失Dが雪粒子を構成する水分子の不可逆的な挙動の激しさを示しているとする主張の根拠を与える一つの観測事実と考えることもできる。

図4で見られるように、誘電損失Dの増加が①放射冷却②暖気の流入③冷気の流入などの現象の最初の時期にピークとして現れている。これは、図5のイメージで示すような電極の位置する表面付近の積雪に、強い温度勾配が生じるのがそれらの現象の最初の時期だからである。時間が経過すれば熱の移動に伴い、表面付近の温度勾配はやわらげられるので、水分子の不可逆的な挙動もおさまり、誘電損失Dの値も減少することになる。

では、誘電損失Dのこのような低い測定周波数における観測結果は、実際には積雪内部のどのような物理過程を検出しているのだろうか。現象としては、水分子の不可逆的な挙動の激しさと誘電損失Dの観測値は強い相関を示していることは明らかである。しかし、物理学的な考察における水分子の挙動と誘電パラメータとの関係では、水分子は電気双極子を持つ有極性分子ではあるが、基本的には電氣的に中性であるので、低周波数領域における誘電損失Dへの直接的寄与は考えにくい事実がある。つまり、電気双極子としての水分子は、氷中においては10kHz (0℃) 付近で¹⁸⁻²⁰⁾、また液体の水の中では10GHz (0℃) 付近で²⁶⁻²⁷⁾ 誘電分散を示し、その周波数領域では大きな誘電損失を示すことが知られているが、100Hzのような低い測定周波数では、電気双極子としての水分子の挙動は誘電損失Dには反映されていないはずだからである。また、低い測定周波数領域での誘電損失Dは、ここで扱っている雪(および氷や水)のような媒質においては、その媒質中のイオンなどの荷電粒子による直流電気伝導成分の寄与を強く反映することになるので、電氣的に中性である水分子の挙動とは直接的には無関係のはずである。以下では、この問題について測定周波数領域に分けて考察することにする。

各周波数領域における誘電パラメータの意味

積雪は、氷と空隙(空気)で構成された誘電媒質と考えることができる。氷の誘電的性質は、融点近傍では10kHz付近に緩和周波数をもつ誘電分散を示すので、ここで扱っている周波数範囲(100Hz~100kHz)の誘電パラメータは、100Hz付近の低周波数領域、10kHz付近の誘電緩和領域および100kHzの高周波数領域に分けて考えるのが、積雪内部で生じている現象と誘電パラメータとの関係をみる場合に都合がよい。この10kHz付近の誘電分散は、いうまでもなく水分子の形成する電気双極子が測定周波数における電場変化に効率的に追従して向きを変化させると考えられている現象である。

この緩和周波数より高い周波数領域(たとえば100kHz)では、水分子が電場に追従できないので誘電容量は電子分極等に起因する小さな値を、また損失係数Dもエネルギー損失が小さくなるのでゼロに近い値を示すことになる。したがって、高周波数領域の誘電パラメータの値は、構成原子の周りに局在する電子のような電場に十分追従できる電荷粒子の量と状態によって決まる。このことは、積雪における高周波数領域の誘電パラメータの時間変化が、氷の量すなわち積雪の密度変化の様子を示すことを意味する。このように100kHzでの誘電容量Cおよび誘電損失Dの観測値が、時間とともに増加する結果(図3, 4)は、積雪の密度増加に対応していると考えられる。液体の水が存在すれば、水中の水分子の誘電緩和周波数は10GHz付近

なので、100kHzでの誘電容量はその水分子が電場に十分追従できて大きな値（真空の誘電容量に比べて80倍）を示す²⁶⁻²⁷⁾。したがって、積雪中に水が浸透してくると、その増加量だけ高周波側の誘電容量Cおよび誘電損失Dは増加することになる。

誘電緩和周波数（10kHz）領域では、誘電容量Cが周波数に対する変化の大きい領域なので、Cの値は温度変化に敏感であるのに対して、誘電損失Dは緩和周波数付近が水分子の電場追従に関するエネルギー損失が大きくなだらかな極大を示す領域なので、Dの値は比較的小さい温度変化を示す。そしてここでは、誘電パラメータのいずれもが積雪の密度や積雪構造、液体の水の存在等に大きく影響を受けることが予想されるので、積雪の内部で生起している現象と誘電パラメータとの関係がもっとも複雑に関与している測定周波数領域であると考えられる。測定結果では、1kHz～10kHz付近の誘電容量Cは雪温の変化を受けて変動しているが、基本的には増加していく。それに対して、同じ周波数領域の誘電損失Dの値はその時間変化の様子が明確でない。この周波数領域の誘電損失Dの値では、水分子の電場追従に関するエネルギー損失よりもっと大きなエネルギー損失をもたらすような低周波側で顕著に現れる現象の影響を受けて、その本来の電気双極子としての水分子に起因する時間変化の様子は覆い隠されているようである。

100Hz付近の低周波数領域では、氷中の水分子は電場に十分追従できる周波数なので、その電気双極子による誘電容量Cへの寄与は積雪の密度と構造で決まる最大値に近づき、誘電損失Dに対する寄与は最小値に近づかずである。ところが、特に誘電損失Dの測定値は測定周波数の減少とともに減少するのではなく、逆に増加している。これは、水分子の作る電気双極子の電場追従に関するエネルギー損失を原因とする現象以外の現象が、関与していることを意味する。

一般に、融点近傍の水は H_3O^+ や OH^- イオンを介してプロトン伝導による直流伝導性を示し、この直流伝導性が低周波領域の誘電容量Cや誘電損失Dの値の増加をもたらすことが知られている²⁸⁾。100Hzでの損失係数Dの値は、水分子の作る電気双極子の電場追従に関するエネルギー損失の寄与よりは、直流伝導性によるエネルギー損失の寄与を反映していると考えべきであり、その値が時間とともに減少していく現象は、時間とともに直流伝導性が低下していく過程を表していると思われる。表面エネルギーの差異によって新雪からしまり雪に変化する過程や、ここで論じている強い温度勾配の下での積雪内部の水分子の移動する過程では、水分子は雪粒子表面や空隙、氷中を移動していく（表面拡散、水蒸気拡散、格子拡散）であろう²⁹⁾。そして主に表面を移動する表面拡散の過程が、低周波側の誘電パラメータに対する寄与として支配的であると考えられる。すなわち、融点近傍の積雪のような孔質媒体では、表面電気伝導性が低周波側の誘電測定で優勢に観測されていると考えられる。表面エネルギーの差異や強い温度勾配のもとで激しく雪粒子表面を移動する水分子が存在すれば、当然、水分子が解離した H_3O^+ や OH^- イオンも存在するはずなので、それらのイオンは直流伝導性に寄与することになる。

この雪粒子表面の電気伝導性が存在すれば、雪粒子表面での水分子の不可逆的挙動の激しさを水分子とともに動くイオン等を介して低周波数領域の誘電損失Dが表すことになる。したがって、たとえばとがった部分の多い結晶形の明確な新雪粒子から丸いしまり雪粒子に変化する積雪の初期構造変化過程で、この電気伝導性は時間とともに徐々に減少することが期待される

ので、その低周波数領域（100Hz）の誘電損失Dの測定値が降雪直後からの時間とともに減少することになる。今回の積雪表面付近に電極を設置した場合のように、強い温度勾配が期待される時に誘電損失Dのピークが観測されることは、水分子の雪粒子表面での不可逆的挙動の激しさをイオン等を介してその低周波数領域の誘電損失Dが表しているとして同様に理解することができる。

さて、宇治橋他²⁰⁾の白山山麓尾口村および白峰村を調査地点とした積雪中の無機化学成分の調査研究によると、新雪でPHが4.49~4.66, しまり雪で4.74, ざらめ雪で5.10から5.37となり、かなり強く酸性化した雪が北陸地方に降っているという結果が報告されている。彼らは、海岸線に近づき標高が低い場所になるにつれて降雪の酸性度が高くなるということ、および酸性度に寄与している成分として大陸由来の SO_4^{2-} および NO_3^- イオンを指摘し、また酸性度に大きく寄与しない海塩核由来の Na^+ や Mg^{2+} , Cl^- などの存在も報告している。本研究の実施場所である北陸大学薬学キャンパスで採取した積雪のPH値は、4.1から6.1の範囲で観測されており、4.8程度のPH値の雪が比較的頻繁に観測されるので、さまざまなイオンの存在が予想され、上述で考察したような直流電気伝導現象に大きく関与しているものと考えられる。したがって、誘電観測によって得られた低周波数領域の誘電損失Dの測定値は、水分子が解離して生じているはずのイオン (H_3O^+ , OH^-) や自然積雪中に含まれる SO_4^{2-} および NO_3^- , Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , CO_3^{2-} イオンなどが、雪粒子を構成する水分子の不可逆的移動の挙動に乗って動いている状況を、直接的には見ているものと考えられる。

まとめと今後の展望

このように自然積雪の変化過程に対して誘電的手法を用いると、積雪の構造変化の様子を時々刻々検出できることと、その得られる時間変化の情報を水分子レベルの挙動に結びつけて解釈できることが再確認できた。特に本研究においては、誘電パラメータである低周波側の誘電損失Dの値によって、水分子の不可逆的な移動の様子をイオン等の荷電粒子の動きを介して観察している可能性を指摘した。このことは、数MHz以上の高周波数での誘電パラメータが含水率や密度測定に応用されることの多い積雪の誘電測定の実用に関して、100Hz付近の低周波数領域での誘電パラメータが積雪内部の構造変化過程の情報検出に利用できる可能性を示したものと位置づけることができる。

平行線路電極を用いた自然積雪の誘電的手法による研究は、種々の環境要素が複雑に入り交じった自然環境における積雪の変化の様子を、誘電パラメータの変化として非破壊的に検出できるので、実時間で積雪内部で生起されている現象を捉える点で有用である。特に、その現象を水分子の挙動に関連づけて解釈できることは、積雪の構造変化過程の基本的過程の研究に資することが多いと考えられる。しかし、積雪構造の変化過程に関わる豊かな情報を得ることが期待される反面、複雑な環境要素による積雪の複雑な変化の現象をそのまま検出していることが、どんな物理過程にどの信号が対応しているのか特定する上で、多くの課題をかかえることにもなる。このような課題を解消するためには、さらに多くの観測結果の収集をすることと、たとえば用いる試料や環境をコントロールできる室内実験等による厳密な対照実験の実施が必要であろう。

謝 辞

本研究は、北陸大学特別研究助成による研究であり、経費の一部を当助成から受けて実施した。また、本研究は北海道大学共同研究 (97-A017) のサポートを受けて実施した。記して、感謝します。

references

- 1) 石坂雅昭『メッシュ気候値から推定した日本の雪質分布』, 日本雪氷学会誌「雪氷」, 57巻1号, pp.23-34, (1995).
- 2) 竹井 巖『平行線路電極を用いた積雪の誘電測定』雪氷, 58巻1号, pp.39-42, (1996).
- 3) 竹井 巖, 西村 寛, 前野紀一『誘電的性質からみた金沢の積雪の地域特性』北陸大学紀要, 第20号, pp.59-68, (1996).
- 4) 黒岩大介『積雪の誘電的性質』低温科学, 8, pp.1-57, (1951).
- 5) Z. Yosida, H. Oura, D. Kuroiwa, T. Fuzioka, K. Kojima and S. Kinoshita "Physical Studies on Deposited Snow. V. Dielectric Properties." Contributions from the Institute of Low Temperature Science, No.14, pp.1-33, (1958).
- 6) D. Kuroiwa "Electrical Properties of Snow", In H. Bader "The Physics and Mechanics of Snow as a Material" Cold Regions Science and Engineering (F.J. Sager, ed.), USA CRREL Monograph II-B, pp.63-79, (1962).
- 7) Charles M. Keeler "Some Physical Properties of Alpine Snow" U.S. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Research Report 271, pp.1-67, (1969).
- 8) J.W. Glen and Paren "The Electrical Properties of Snow and Ice" Journal of Glaciology, Vol.15, No.73, pp.15-38, (1975).
- 9) Malcom Mellor "Engineering Properties of Snow", Journal of Glaciology, Vol.19, No.81, pp.15-66, (1977).
- 10) J.G. Paren and J.W. Glen "Electrical Behavior of Finely Divided Ice" Journal of Glaciology, Vol.20, No.85, pp.173-191, (1978).
- 11) L. T. Traub and P. W. F. Gribbon "The Activation Energies of Temperate Snow Sample" Journal of Glaciology, Vol.21, No.85, pp.331-339, (1978).
- 12) Norikazu Maeno "Ice-Coring Project at Mizuho Station, East Antarctica, 1970-1975", Memories of National Institute of Polar Research, Special Issue No.10, pp.77-94, (1978).
- 13) A. Denoth "Effect of Grain Geometry on Electrical Properties of Snow at Frequencies up to 100MHz", J. Appl. Phys., 53 (11), pp.7496-7501, (1982).
- 14) A. Denoth, A. Foglar, P. Weiland, C. Matzler, H. Aebischer, T. Tiuri and A. Sihvola "A Comparative Study of Instruments for Measuring the Liquid Water Content of Snow", J. Appl. Phys. 56 (7), pp.2154-2159, (1984).
- 15) A. Denoth "Static Dielectric Constant as A Textural Index of Snow", Annals of Glaciology, 6, pp.203-206, (1985).
- 16) K. Fujino, G. Wakahama, M. Suzuki, T. Matumoto and D. Kuroiwa "Snow Stratigraphy Measured by an Active Microwave System", Annals of Glaciology, 6, pp.207-210, (1985).
- 17) Paul R. Camp and David R. Labrecque "Dielectric Properties of Wet and Dry Snow, 50Hz - 100kHz", In "Physics and Chemistry of Ice", ed. by N. Maeno and T. Hondoh, Hokkaido University Press, 1992, Sapporo, pp.156-162, (1992).
- 18) R. P. Auty and R. H. Cole "Dielectric properties of ice and solid D₂O", J. Chem. Phys., 20, pp.1309-1314, (1952).
- 19) N. H. Fletcher (前野紀一訳)『氷の化学物理』共立出版, (1974).
- 20) 前野紀一, 福田正己編『基礎雪氷学講座 I 雪氷の構造と物性』古今書院, (1986).
- 21) 吉田順五, 小島賢治『雪の結晶の変形 (I)』低温科学, 5, pp.75-83, (1950).
- 22) 対馬勝年『水に浸かった雪の粗大化』雪氷, 40巻4号, pp.155-165, (1978).
- 23) S.C. Colbeck "An Overview of Seasonal Snow Metamorphism" Review of Geophysics and Space Physics, Vol.20, No.1, pp.45-61, (1982).
- 24) S.C. Colbeck "A Review of the Metamorphism and Classification of Seasonal Snow Cover Crystals" In "Avalanche Formation, Movement and Effects (Proceedings of the Davos Symposium, September 1986). IAHS Publ. no.162, pp.3-33, (1987).
- 25) N. Maeno and T. Ebinuma "Pressure Sintering of Ice and its Implication to the Densification of Snow at Polar Glaciers and Ice Sheets", J. Phys. Chem., 87, pp.4103-4110, (1983).
- 26) D. Eisenberg and W. Kauzmann (関集三, 松尾隆祐訳)『氷の構造と物性』みすず書房, (1975).
- 27) 鈴木啓三『水および水溶液』共立全書235, 共立出版, (1980).
- 28) Iwao Takei and Norikazu Maeno "Dielectric Low-Frequency Dispersion and Crossover Phenomena of HCl-Doped Ice", J. Phys. Chem B, 101 (32), pp.6234-6236, (1997).
- 29) 宇治橋康行, 畑時男, 高瀬信忠, 広部英一『酸性雪の化学成分とその堆積・流出過程に関する研究』水工学論文集, 第38巻, pp.101-106, (1994).