



Title	凍土の誘電的性質の測定
Author(s)	荒木, 寿夫; 前野, 紀一
Citation	低温科学. 物理篇, 48, 27-40
Issue Date	1990-03-12
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18581
Type	bulletin (article)
File Information	48_p27-40.pdf



[Instructions for use](#)

凍土の誘電的性質の測定*

荒木 寿夫

(北海道ガス株式会社)

前野 紀一

(低温科学研究所)

(平成元年10月受理)

1. 序 論

凍土の電気的性質は、凍土の内部構造や物理的性質、あるいは土粒子と水分子の相互作用を解明したり理解する上で重要かつ有力な手段である。また同時に、地球上の凍土の電気探査や、近年活発に行なわれている火星等の惑星あるいは木星や土星の氷衛星の構造調査にも必要不可欠な性質である。しかし、現在のところ凍土の電気的性質に関する情報は少なく、凍土の電気的性質全体に関する系統的な理解はまだ得られていない^{1,2)}。これは、これまで凍土の電気的性質の研究といえば、ほとんどが直流か特定の周波数における凍土の電気伝導度（あるいは電気抵抗）の温度依存の測定を意味し、測定の主目的が不凍水の検出や電気探査のための実用的データの取得にあったためと考えられる。

凍土は、土粒子、水、(不凍)水、イオン等の多相混合物であるから、その電気的性質は複雑である。特に土粒子と氷は、一般に電気的には絶縁体すなわち誘電体とみなされるし、また、凍土内部には吸着あるいは溶解した多種のイオンが存在し、それらは電場において、粒界や固液あるいは気液界面等に起因する多数の電気的不連続面に堆積し、巨視的な誘電分極を示す。したがって、凍土の電気的性質には、種々の緩和機構による多種の誘電分極が重なって現われることが予想される。

最近の凍土の誘電的性質の研究は、二つの方向で進められている。一つは MHz から GHz の、いわゆるマイクロウェーブあるいはそれ以上の高周波数領域での測定であり、他の一つは MHz 以下の、いわゆるラジオ周波数領域での測定である。前者の測定は導波管や時間領域法 (Time Domain Reflectometry: TDR) によっておこなわれるが³⁻⁵⁾、測定結果によれば、この周波数領域における凍土の誘電分散のほとんどは、凍土中の不凍水によって生じる。したがって、これは凍土の含水率の測定に有効に利用できるが、凍土の構造や種類にはあまり敏感ではない。

一方、後者の周波数領域における誘電的性質は本質的に凍土内部の組成や構造に依存し、凍土の他の物性研究と合わせて重要な知見を与えることが期待される。しかし、現在のところこの種の研究としては、Olhoeft⁶⁾ の報告が唯一のものである。Olhoeft は、天然の永久凍土

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 3305 号

試料の誘電的性質を 5 MHz から 100 MHz の周波数領域および温度 -10°C と -27°C の 2 点で測定し、凍土の誘電分散には少なくとも 5 種類の誘電緩和機構が関与していることを示した。すなわち高周波側から、1) 不凍水の水分子によるもの、2) 不凍水中の有機物質分子によるもの、3) 氷結晶中のピエルク欠陥によるもの、4) コロイド粘土粒子によるもの、および 5) 不凍水中のイオンの伝導によるものの 5 つである。しかし、測定結果の解釈には推量や不自然なところが多い。特に、氷のピエルク欠陥による誘電分極と結論した分散はその大きさも発生する周波数もピエルク欠陥による水分子の回転だけでは説明できないであろう。

本研究は、以上の点を踏まえて始められたものであり、凍土の誘電的性質を広い含水率、温度、周波数の領域で測定し、凍土の一般的な電気特性を明らかにすることを目的としている。本研究の第 1 報である本論文では、2 種類の凍土に関して行なわれた誘電測定の結果について報告し、誘電緩和に関する物理機構については別に報告する。

2. 測定装置と方法

(1) 凍土試料

測定に用いられた凍土試料は、藤の森粘土と苫小牧シルトの種類である。それぞれの粒径分布と比重を表 1 に示した⁷⁾。藤の森粘土の粒径は約 85% 以上が $74\ \mu\text{m}$ 以下である。一方、苫小牧シルトの粒径はもっと大きく、かつ分布が非常に広く 2 mm からサブミクロンまで及んでいる。

藤の森粘土と苫小牧シルトが含んでいる電解質成分の目安を得るために、試料の一部を水に懸濁させ、その電気伝導度を測定した。乾燥状態の藤の森粘土（あるいは苫小牧シルト）を 20 g ビーカーに入れ 80 ml の蒸留水を加えて攪拌した。1 時間放置したのち上澄み液の電気伝導度を測定した。測定には数字式電導度計（東亜電波、CM-2 A 型）を用いた。 $+25^{\circ}\text{C}$ に換算した上澄み液の電気伝導度は、藤の森粘土が 5.895 mS/cm、苫小牧シルトが 0.200 mS/cm であった。これを NaCl 水溶液とみなして NaCl 濃度に直すと、それぞれ 3200 ppm および 100 ppm となる。すなわち、藤の森粘土に含まれる電解質成分は、苫小牧シルトのそれより約 30 倍多い。

土試料への水分の供給は長時間かけて行い、試料中の水分分布を出来るだけ均一にした。含水の程度を知るために、実験終了後、試料を $+120^{\circ}\text{C}$ の炉の中に 24 時間放置して乾燥した。乾燥前と後の質量をそれぞれ M_w および M_D とすると、含まれていた水分は $(M_w - M_D)$ で、試料の重量含水率 (W) は

$$W = (M_w - M_D) / M_D \quad (1)$$

と定義される。試料の乾燥密度 (M_D を試料の体積で割った値) と土粒子の比重は既知であるから、重量含水率から土粒子、水および空隙の体積比が算出され、「飽和度 (Degree of satura-

表 1 試料土粒子の比重と粒径データは武田⁷⁾による

項目	試料	
	藤の森粘土	苫小牧シルト
比 重	2.61	2.65
砂・礫 (2.00~0.0074 mm)	15%	39%
シルト (0.0074~0.005 mm)	61%	32%
粘 土 (0.005 mm~)	24%	29%

表2 試料の飽和度，重量含水率および乾燥密度

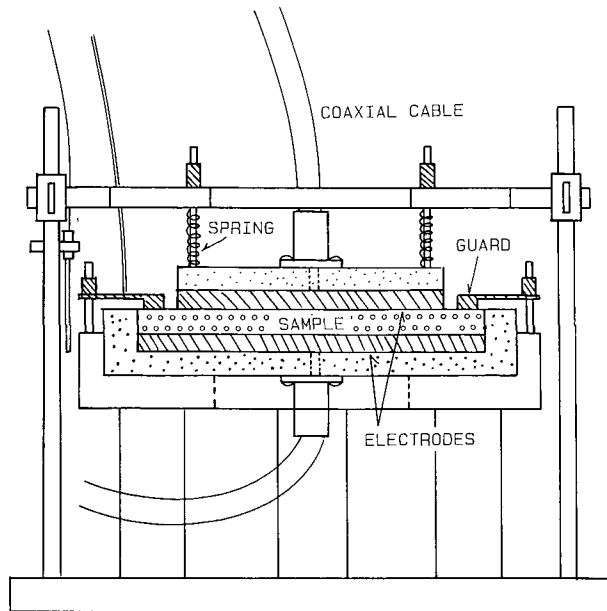
藤の森粘土			苫小牧シルト		
飽和度 (%)	重量含水率 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	飽和度 (%)	重量含水率 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)
0	0	1.07	0	0	0.99
4.9	2.6	1.13	5.2	3.6	0.96
5.2	2.8	1.12	13.5	9.6	1.01
6.3	3.6	1.09	16.9	14.8	0.92
8.5	5.3	1.05	25.9	32.0	0.82
11.1	8.8	0.93	26.6	25.6	0.96
16.0	12.1	0.99	100	75.4	—
20.8	17.5	0.97			

tion)』を決定することができる。飽和度とは、土に含まれる水の体積を空隙の体積（水の体積と空気の体積の和）で割ったものであり、水が空隙に占める割合を示す。今回の測定では、飽和度は藤の森粘土においては0%（乾燥状態）から20.8%まで、苫小牧シルトにおいては乾燥状態から100%（飽和状態）まで変えられた（表2）。

(2) 電極部と温度調節

電極部を含む試料とホルダーの模式図を第1図に示した。土試料を入れる円盤状の皿容器は、電氣的に絶縁体であるナイロン樹脂製で、内径は104 mm、高さ8 mmであり、容器の底は厚さ5 mmの電極（銅にクロームメッキをしたもの）となっている。この容器に一定の含水率を持った土試料を高さ8 mmの円盤形になるように均一に詰め込み、中央に直径80 mmのアルミニウム箔を密着させその上から直径80 mmの電極（銅にクロームメッキをしたもの）を押しつける。電極と試料の間にアルミニウム箔を入れスプリングで押さえたのは、上部電極と試料との電氣的接触をより良くかつ一定に保つためである。飽和度の高い凍土の場合は、竹井・前野⁸⁾が水の誘電測定の時用いた酢酸メチルを使う方法でアルミニウム箔を試料に張り付けた。

試料の上部電極の周りには、上部電極との間隔が4 mmで、幅6 mmの銅のリング状のガード電極



第1図 試料ホルダーと電極の模式図

が設置された。ガード電極の効果については後で述べる。

試料、電極および温度センサーなどが固定された試料ホルダーは、周りが断熱材で覆われたステンレス・スティール製の容器に入れられ、 -30°C まで冷却可能なアイス・ストッカーの中に入れられた(第2図)。試料の温度は、藤の森粘土においては $-100^{\circ}\text{C}\sim+10^{\circ}\text{C}$ の範囲で、また苫小牧シルトにおいては $-30^{\circ}\text{C}\sim+10^{\circ}\text{C}$ の範囲で変えられた。温度制御は、第2図に示したように、液体窒素を用いて行なわれた(安藤電気製 THC-10)。この制御法の原理は、ポンプによる液体窒素の噴出であるが、本実験では噴出ノズルの先に

縦に数カ所孔を開けた銅のパイプをつなぎ、それをステンレス・スティールの容器の中に入れ、試料の側面4方向から液体窒素を噴出させた。試料自身の温度は、試料のごく近くに設置した白金抵抗温度計(システム・テクニク社製 S1200, 分解能 0.001°C)によって測定された。

(3) 電気測定

電気測定は、交流ブリッジ(安藤電気製 TR-10 C)、発振器(WBG-9)および平衡点検出器(BDA-9)を用いて行なわれた。交流ブリッジで測定することができる電気容量の精度は、 0.01 pF である。本実験の測定は、主に周波数 $30\text{ Hz}\sim 100\text{ kHz}$ の範囲の9点で行なわれた。

誘電測定は、試料と交流ブリッジとの電氣的バランスを取ることによって行なわれ、試料の等価キャパシタンス(電気容量)と等価コンダクタンスが求められた。試料の等価電気容量(C_x)と等価コンダクタンス(G_x)が測定されると、誘電率(κ')、電気伝導度(σ)および損失角(δ)などは次の式で算出される。

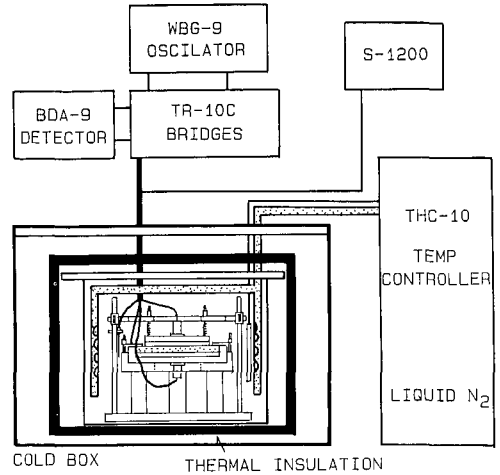
$$\kappa' = (C_x - \Delta C_0) / C_0 \quad (2)$$

$$\sigma = \varepsilon_0 G_x / C_0 \quad (3)$$

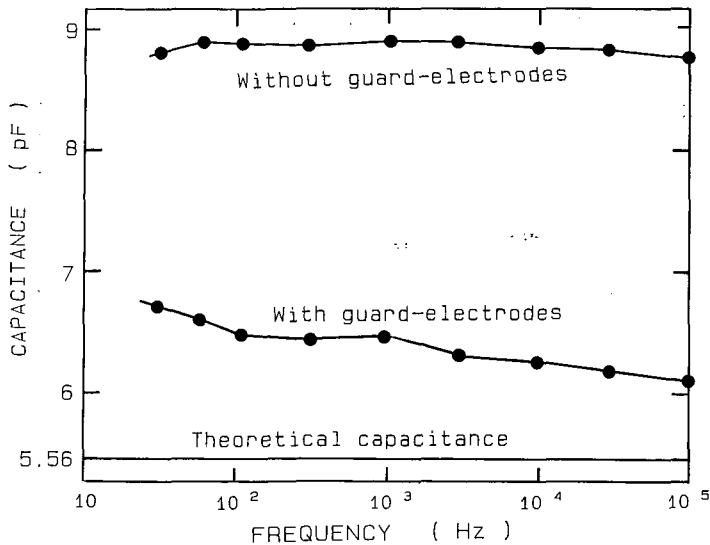
$$\tan \delta = G_x / \omega (C_x - \Delta C_0) = \sigma / \varepsilon_0 \kappa' \omega \quad (4)$$

ここで、 ω は印加交流電場の角周波数($=2\pi f$, f : 周波数)、 ε_0 は真空の誘電率($=8.854\text{ pF/m}$)である。 ΔC_0 は、次に述べるように、あらかじめ各周波数で測定した浮遊容量である。一般に誘電体の電氣的性質は、 κ' 、 σ 、 δ のうちの任意の2個で表現できる。本報告では誘電率(κ')と電気伝導度(σ)を用いることにする。

ガード電極の効果は、全周波数において認められた。第3図は、この電極で測定された厚さ 5 mm 、直径 80 mm の円盤形の空気の電気容量と理論的に計算された電気容量($C_0=5.56\text{ pF}$)とを示したものである。ガード電極を使用した場合と、使用しない場合の両方の値が示されている。ガード電極を使用した方が、電気力線のふくらみ等による影響を受けないので、値が C_0



第2図 誘電測定装置と温度制御器のブロック図



第3図 空の電極の電気容量 (実効直径 80 mm, 厚さ 5 mm)

図には、理論値、およびガード電極を使用した時と使用しない時の測定値が示されている

に近い。しかし、これで測定された等価電気容量 (C_x) には、まだ試料以外の原因による電気容量 ΔC_0 (ケーブルやコネクタ等による、いわゆる浮遊容量) が並列に含まれているので、その部分を取り除かなければならない。第3図において、ガード電極を使用した時の空気の電気容量と C_0 との差が ΔC_0 である。 ΔC_0 の値は、測定周波数領域で 0.55~1.14 pF の範囲の定数で低周波数ほど大きい。

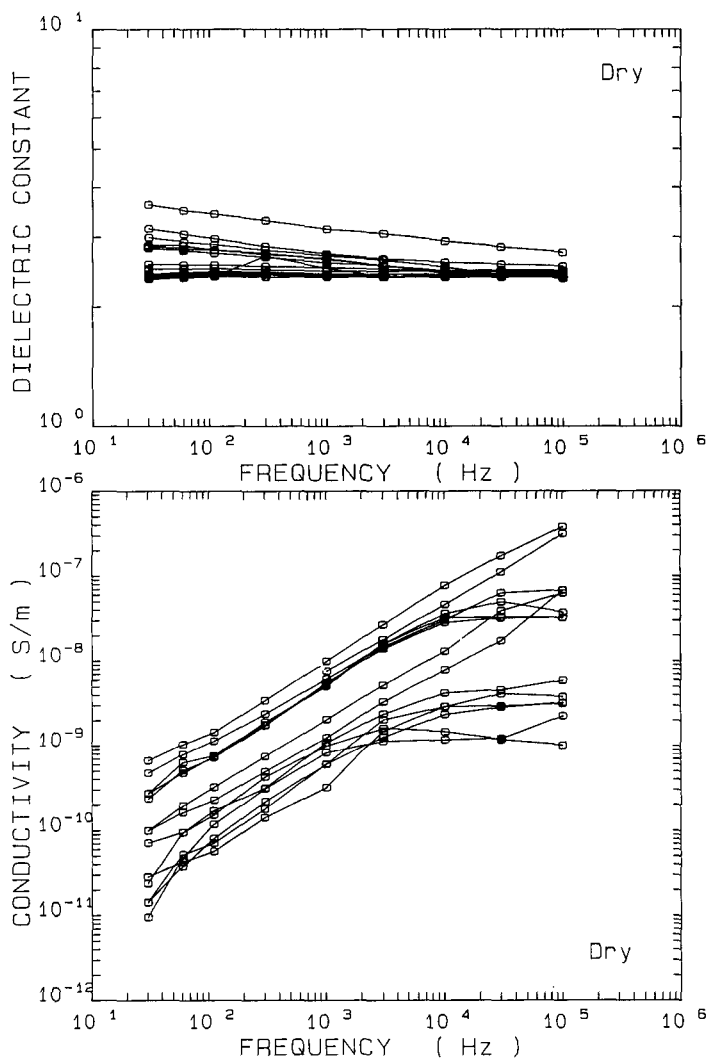
3. 測定結果

(1) 藤の森粘土の誘電率と電気伝導度

第4図は、乾燥状態の藤の森粘土の誘電率と電気伝導度の周波数依存性である。乾燥状態の誘電率の値は 2.3~3.6、電気伝導度の値は 10^{-11} ~ 10^{-7} S/m という小さな値を示しており、藤の森粘土が電氣的な導体というよりは絶縁体あるいは誘電体とみなせることを示している。誘電率にも伝導度にも周波数依存が見られるが、この誘電分散はおそらく粘土粒子内部に含まれるイオン等の電荷キャリア (担体) や、乾燥で除去出来なかった粒子表面に強く吸着した水分子によるものと考えられる。

飽和度 5.2% の試料の誘電率と伝導度を第5図に示した。第4図の乾燥試料に比べると、誘電率も伝導度もそれぞれの周波数と温度において数倍から数10倍大きい値を示している。含水によって、電氣的に移動可能な電荷キャリアの数が増加し、電気伝導を増加させるとともに誘電分極を引き起こしたことが明瞭である。

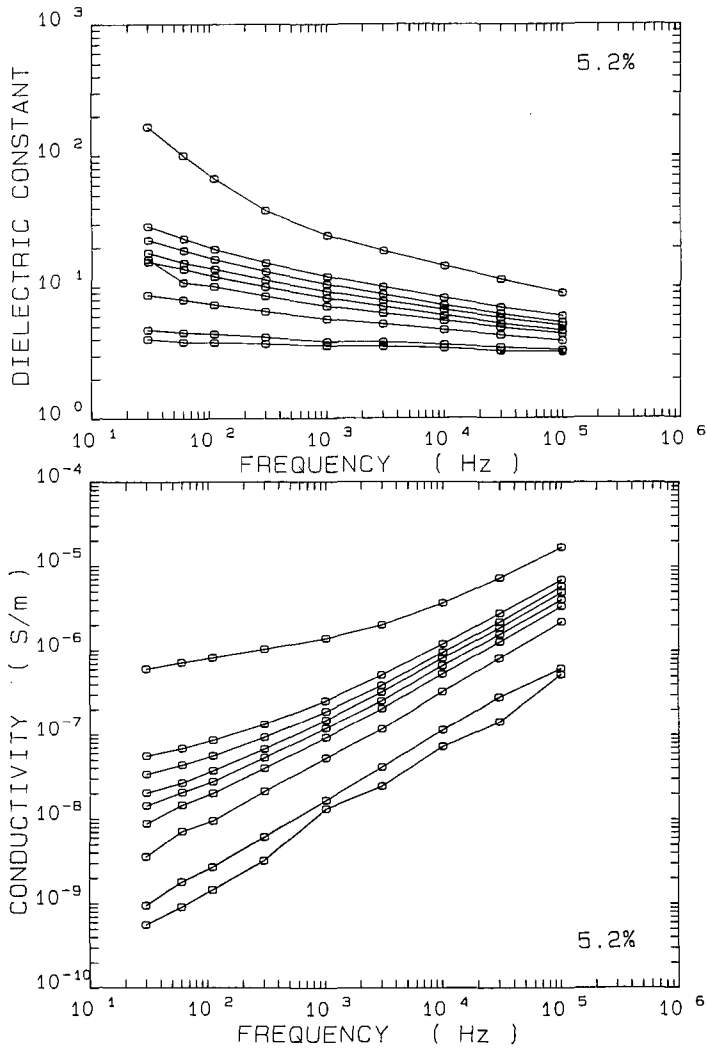
温度が高いほど誘電率と電気伝導度の値が大きくなるのは、二つの理由による。一つは、不凍水が温度の上昇と共に増えるためイオン等の電荷キャリアによる電気伝導と分極が増すためである。もう一つは、氷と土粒子自身の誘電率と伝導度の値が、温度上昇と共に大きくなる



第4図 藤の森粘土(乾燥状態, 飽和度0%)の誘電率と電気伝導度の周波数依存性
 パラメーターは温度で, 14点(+10, 0, -5, -10, -15, -20, -30, -40, -50, -60, -70, -80, -90, -100°C)である。誘電率も電気伝導度も, 各測定点は温度の低くなる順に減少して並んでいる

ためであるが, これは第4図でも確認できる。ただし, これは絶対値が小さいため, 前者の効果に比較すると無視できるであろう。

複数の誘電緩和機構を有する物体の誘電率は, 一般に広い範囲の周波数依存性を示し, 周波数を高くしていくと, 値は不連続的に小さくなってゆく。これは, 高周波数になるに従って, 電場に追従出来ない電荷キャリアが現れ, それが誘起していた誘電分極が消滅するためである。その結果, 全体として誘電率の値は階段状に小さくなってゆく。ところが, 第5図に示されているように, 測定された誘電率の値は周波数の増加とともに階段状に小さくはならず, 滑らかに小さくなっている。これは, 凍土中の誘電緩和, 特に不凍水に関連する緩和に, 緩和時

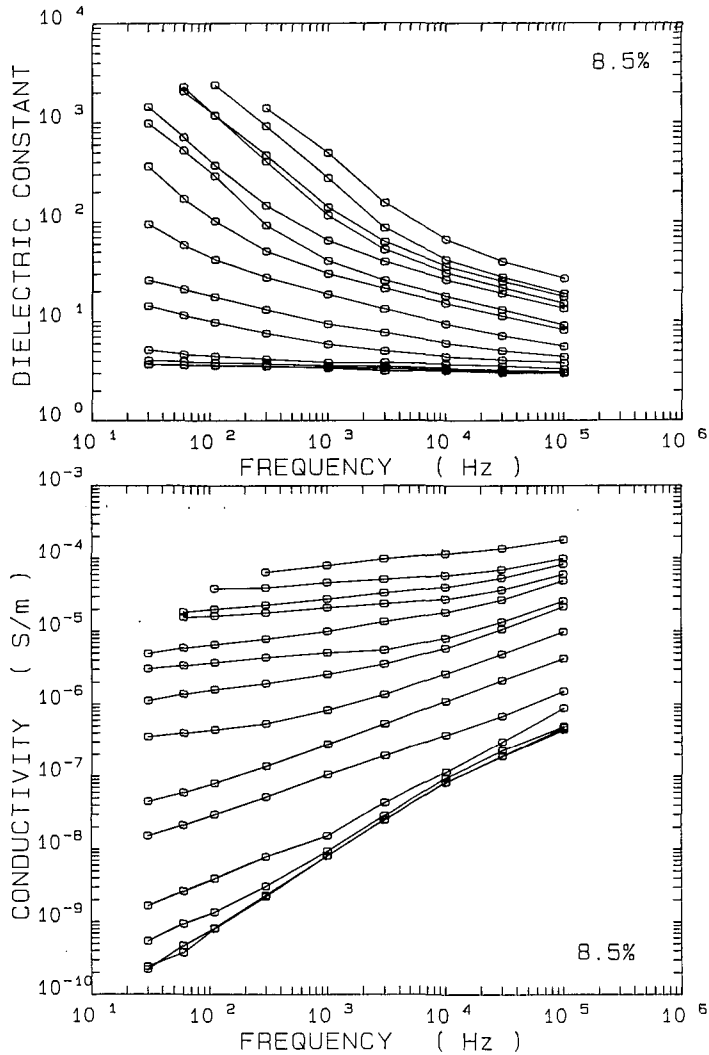


第5図 藤の森粘土(飽和度5.2%)の誘電率と電気伝導度の周波数依存性

パラメーターは温度で、9点(+10, 0, -5, -10, -15, -20, -30, -50, -70°C)である。
誘電率も電気伝導度も、各測定点は温度の低くなる順に減少して並んでいる

間の隣接するものが多数存在しているためと考えられる。

含水による誘電率と電気伝導度の増加の傾向は、更に飽和度が増加した8.5%試料(第6図)と20.8%試料(第7図)においてもっとはっきりと現われている。例えば、1 kHz, -20°Cにおける誘電率と電気伝導度の値は、乾燥試料(第4図)ではそれぞれ2.47および 3.63×10^{-9} S/mであり、飽和度が5.2%ではそれぞれ7.1および 9.31×10^{-8} S/m(第5図)に増加したに過ぎなかったが、8.5%試料(第6図)ではそれぞれ4.45および 5.08×10^{-6} S/m、そして20.8%試料(第7図)ではそれぞれ93.4および 3.68×10^{-5} S/mと増加している。含水による誘電的性質の変化は総体的には不凍水の増加によって説明されるが、後で述べる様にその物理機構は複数と



第6図 藤の森粘土(飽和度8.5%)の誘電率と電気伝導度の周波数依存性

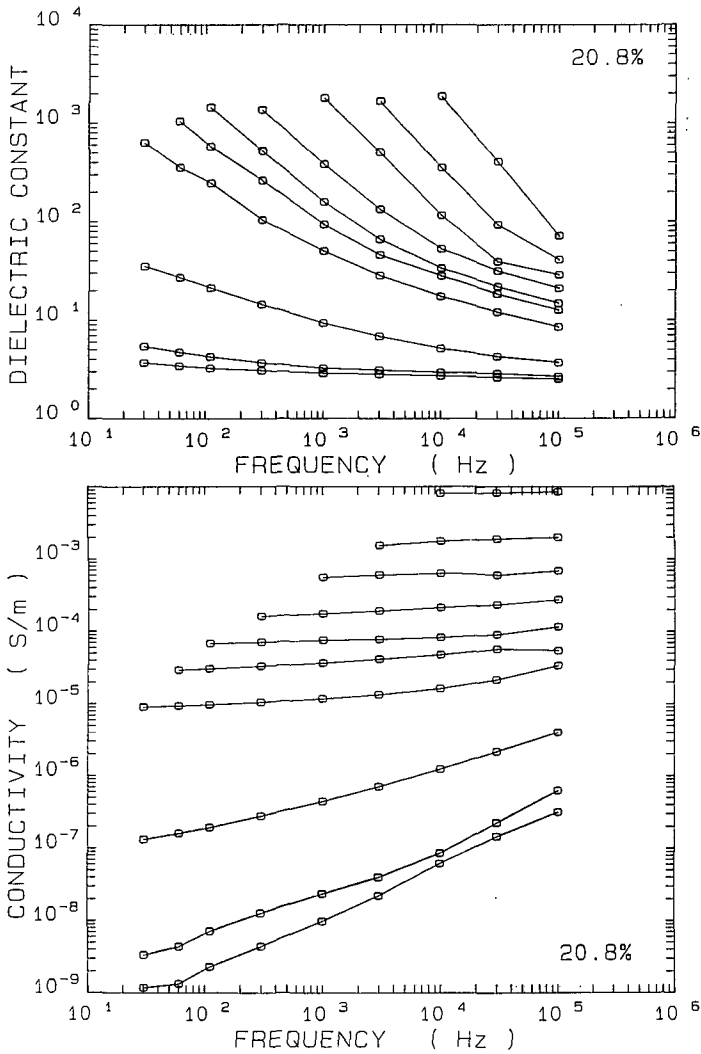
パラメーターは温度で、14点(+10, 0, -5, -10, -15, -20, -30, -40, -50, -60, -70, -80, -90, -100°C)である。誘電率も電気伝導度も、各測定点は温度の低くなる順に減少して並んでいる

考えるべきである。

(2) 苫小牧シルトの誘電率と電気伝導度

第8図は、苫小牧シルトの誘電率と電気伝導度の周波数依存性である。各々の図には、飽和度が0% (乾燥), 5.2% および 13.5% の試料の、複数の温度における測定データが示されている。図から明かな様に、乾燥状態の苫小牧シルトの誘電率と電気伝導度の値はそれぞれ 2.9~4.8 および 10^{-10} ~ 10^{-7} S/m の範囲にあり、藤の森粘土と同じ様に、電気的絶縁体すなわち誘電体ということが出来る。

誘電率と電気伝導度に対する含水と温度の影響は、本質的に藤の森粘土の場合と変わりは



第7図 藤の森粘土 (飽和度 20.8%) の誘電率と電気伝導度の周波数依存性

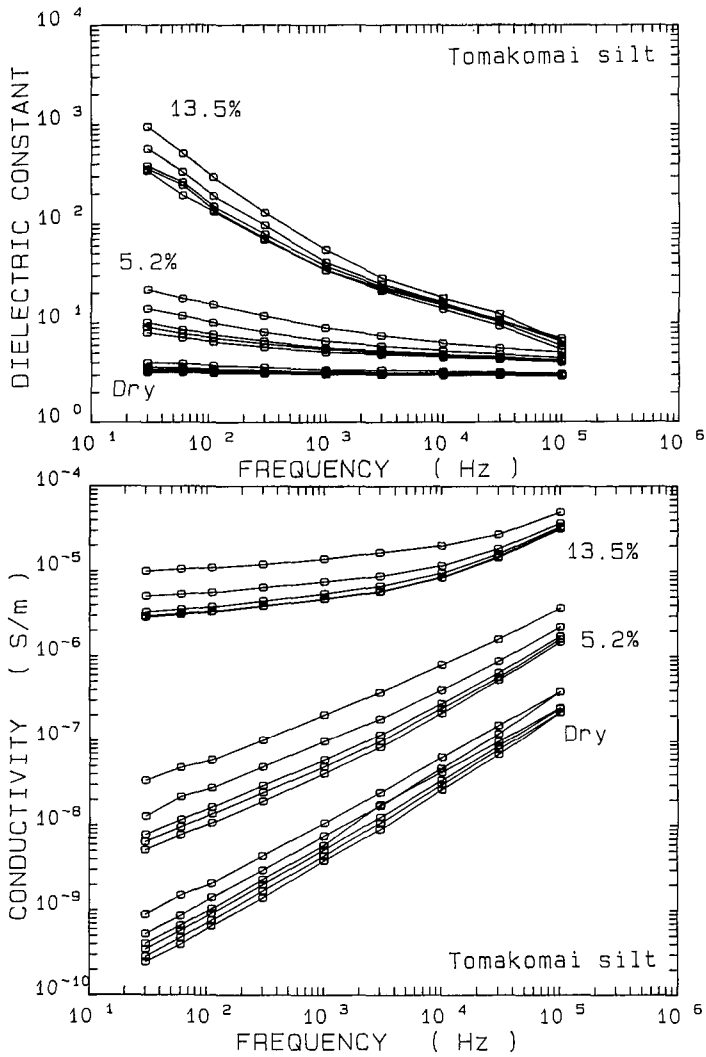
パラメーターは温度で、10点 (+10, 0, -5, -10, -15, -20, -30, -50, -70, -100°C) である。誘電率も電気伝導度も、各測定点は温度の低くなる順に減少して並んでいる

ない。ただし、苫小牧シルトの誘電率および電気伝導度の値は藤の森粘土より小さい。この原因については、次節で述べる。

4. 考 察

前節で明らかになった様に、凍土の誘電的性質に対する水の影響は極めて大きい。しかし、凍土の中で水がどのような状態で存在するのか、そしてそれがどのような物理的機構で誘電分極や電気伝導を増加させるのかは明らかになっていない。これらの点についての手がかりを得るために、ここでは測定された誘電率と電気伝導度の飽和度依存と温度依存について述べる。

第9図は、周波数 110 Hz と 30 kHz における藤の森粘土 (-20°C と -70°C) と苫小牧シル



第8図 苫小牧シルトの誘電率と電気伝導度の周波数依存性

3種類の試料の飽和度は、それぞれ0% (乾燥), 5.2%, 13.5%である。またそれぞれの試料についてのパラメーターは温度で、測定点は、0%試料が7点 (+10, 0, -5, -10, -15, -20, -30°C), 5.2%試料が6点 (+10, 0, -5, -10, -15, -20°C), 13.5%試料が6点 (+10, -5, -10, -14, -15, -20°C)である。誘電率も電気伝導度も、各測定点は温度の低くなる順に減少して並んでいる

ト (-20°C) についての誘電率と飽和度の関係である。藤の森粘土についても苫小牧シルトについても、誘電率は、飽和度の増加とともに増加するが、その増加の仕方は三つの部分に分けることができる。すなわち、飽和度約5%以下の部分と、約5%から約10%にかけての部分、そしてそれより高飽和度の部分である。誘電率は、第一の部分で徐々に増加し、第二の部分で急激に増加する。そして第三の部分では非常にゆっくりと増加するか、ほぼ一定値となる。

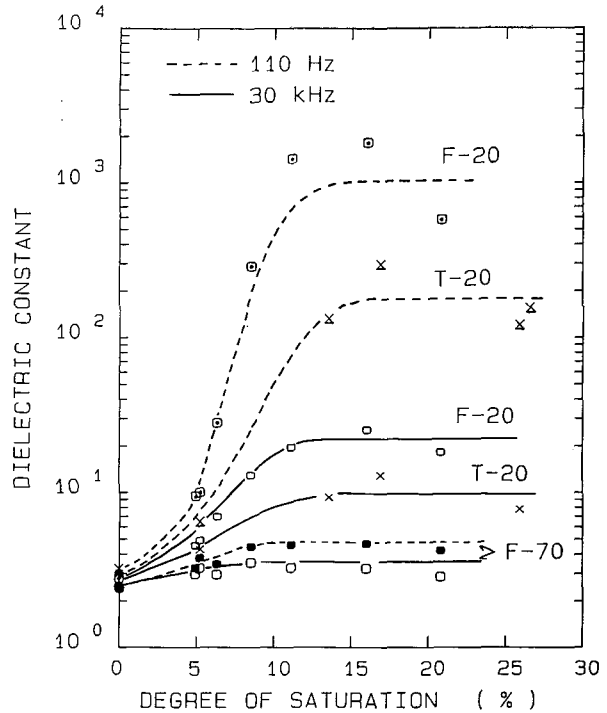
この結果は、凍土中の水の存在状態に三種類あると考えれば説明できる。すなわち、飽和度約5%以下における水は、不凍水ではあるが強く土粒子に吸着しており、あまり自由には動

けない。約5%から10%の領域では、それより弱く土粒子に吸着あるいは束縛された不凍水が存在し始める。その結果、誘電率は急激に増加し、この領域の最後のところでは、藤の森粘土では約1000、苫小牧シルトでは約200という大きな誘電率を生じる。飽和度が約10%以上になると、不凍水として存在することができない余分の水は、巨視的な水となって空隙を埋めてゆく。この領域における誘電率の緩慢な増加は水の増加によるものと考えられる。

ところで、藤の森粘土において -70°C では、110 Hz、30 kHz共に、飽和度の増加による誘電率の増加は非常に小さい。これはこの温度ではほとんど全ての水が不凍水として存在することができず氷になってしまうためと考えられる。

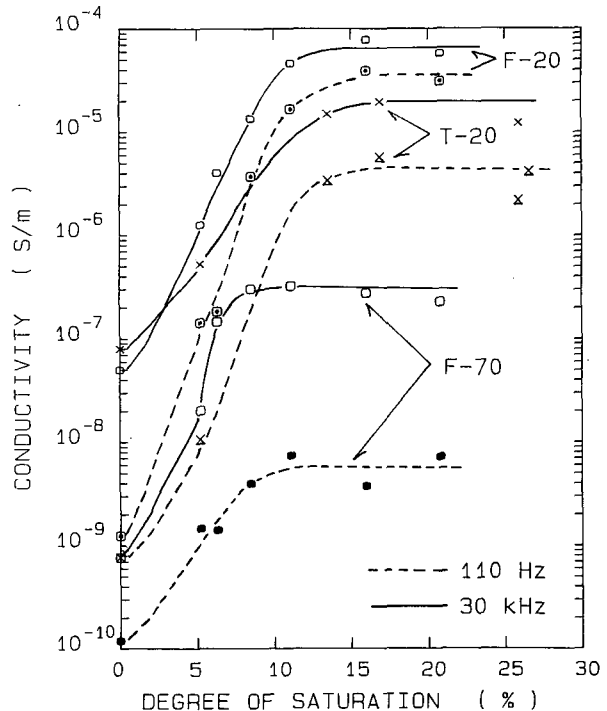
第10図は、第9図と同様の条件における電気伝導度の飽和度に対する依存性を示したものである。上に述べた凍土における水の三つの存在様式の結論は、この電気伝導度の結果によっても支持される。

第11図と第12図は、 -100°C まで測定された藤の森粘土の誘電率と電気伝導度の温度依存性を示したものである。周波数に関係なく、 -100°C から約 -70°C まで、誘電率も電気伝導度もほとんど増えないが、約 -70°C より高温になると、値は急激に増加している。この結果は -70°C 付近で不凍水が存在し始めたことを示している。同様の結果は、他の飽和度の試料においても認



第9図 誘電率の飽和度依存性

FとTは、それぞれ藤の森粘土と苫小牧シルトを意味する。また、その後の数字は温度を意味する(-20°C 、 -70°C)。破線と実線は測定周波数の違いを意味する



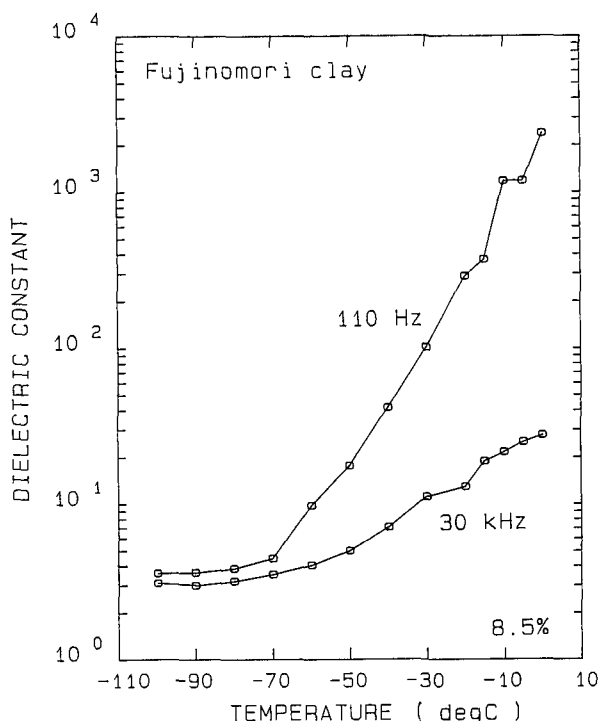
第10図 電気伝導度の飽和度依存性

文字、数字等の意味は第9図に同じ

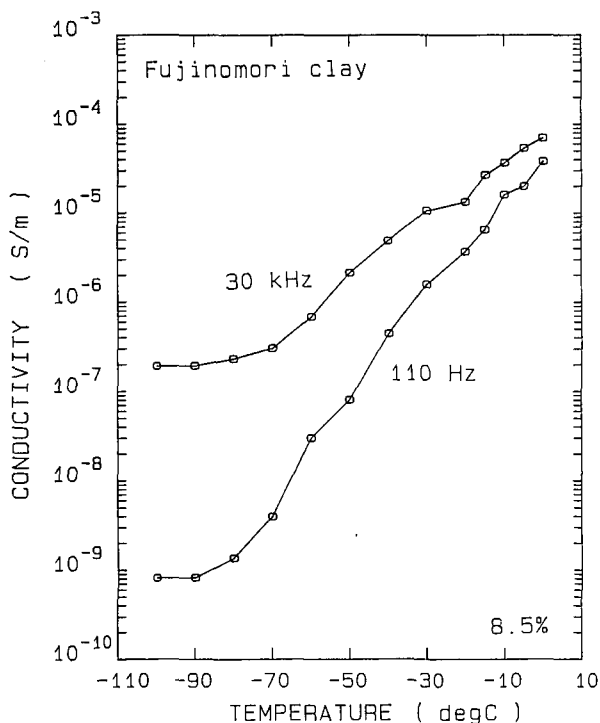
められた。

上の考察で、凍土中の水の存在様式は飽和度約5%と10%を境に3種類あることが結論された。第1次近似として、飽和度約5%のとき水分子は土粒子の表面に単分子層の不凍水膜となって吸着すると仮定し、粒子の全表面積(すなわち藤の森粘土の比表面積)を見積ってみよう。飽和度5%の藤の森粘土1g中の水の質量は 2.6×10^{-3} gである(表2)。したがって、不凍水単分子層の厚さを 2.5×10^{-10} mと置くと、この試料の比表面積は $10.4 \text{ m}^2/\text{g}$ と計算される。この値はBET法による実測値($9.0 \text{ m}^2/\text{g}$, 生頼・他⁹⁾)にほぼ一致し、上の結論や仮定の妥当性を示している。ただし、不凍水の詳しい構造や性質に関しては将来もっと厳密な解析と考察を加えるべきである。

上の結果に基づき、飽和度約5%で藤の森粘土の土粒子の周りの単分子層形成が終了すると考えると、第9図と第10図における飽和度約5%を境にした曲線の傾きの違いが合理的に説明できる。すなわち、飽和度約5%を境に土粒子の吸着水が単分子層から多分子層に変わると考えられるからである。もしもこの推論が正しいとするならば、ここで求めた比表面積の値から、飽和度10%に達した時の藤の森粘土の土粒子を覆う水膜の厚さを見積ることが出来る。計算結果は約4分子層となった。すなわち、藤の森粘土中の水は、およそ4分子層までは不



第11図 藤の森粘土の誘電率の温度依存性
飽和度は8.5%である



第12図 藤の森粘土の電気伝導度の温度依存性
飽和度は8.5%である

凍水として存在できるが、それ以上の水（より外側の水）は巨視的な氷に凍結してしまう。

最後に、藤の森粘土と苫小牧シルトの誘電的性質の違いについて述べる。第9図を見ると、同じ飽和度、同じ周波数で比べても、藤の森粘土の誘電率は苫小牧シルトのそれより大きい。これは、第10図の電気伝導度についても同様である。これには大きく二つの理由が考えられる。一つは、土試料に含まれる電解質の量の違いである。既に述べた様に、藤の森粘土に含まれる電解質の量は、苫小牧シルトに比べて約30倍多い。このため電場が引加されると、種々の電荷キャリアが移動し、電気伝導度を増加させ、誘電分極を引き起こすと考えられる。もう一つの理由は、粒径の違いである。表1より、藤の森粘土と苫小牧シルトの平均粒径はそれぞれ約0.01 mm および約0.1 mm と見積られ、前者は後者より約10倍細かい。したがって藤の森粘土の場合苫小牧シルトに比べると、土粒子と不凍水との接触面積が桁違いに大きく、より多くの電氣的不連続面が存在していると考えられる。その結果、より大きな電気伝導度と誘電率の値を示すことになる。

5. 結 論

凍土の電氣的性質に関する詳しい知見を得る目的で、藤の森粘土と苫小牧シルトの2種類の土試料の誘電的性質を種々の飽和度、周波数、および温度で測定した。その結果、次の様な結論が得られた。

(1) 藤の森粘土、苫小牧シルトの両試料において、誘電率、電気伝導度には大きな周波数依存性と温度依存性が見られた。したがって、凍土の中には、誘電分極と電気伝導を起こす多数のしかも多種類の電荷キャリアが存在することが結論される。

(2) それらの電荷キャリアの多くは、凍土に含まれる水によって活性化されることが分かった。また、凍土の誘電的性質の飽和度依存の測定から、水の存在状態には、飽和度約5%までの、土粒子に強く吸着した不凍水、約5~10%の範囲の、緩やかに吸着した不凍水、および約10%以上の、空隙を埋める巨視的な氷、の3種類あることが結論された。

(3) 簡単な考察から、土粒子に緩やかに吸着する水分子層はおおよそ4分子層と見積られた。

(4) 藤の森粘土については、温度が -70°C を越える付近から不凍水が存在し始めることが分かった。

本報告では飽和度依存の解析は -20°C のデータに限られたが、他の温度での解析は現在進行中である。それについては誘電分極機構の解析結果と合わせて別に報告する予定である。なお、今回の測定は飽和度が5%以上の試料で行われたが、不凍水のより詳しい性質を知るためには、5%以下の領域の測定が不可欠であることを指摘しておく。

本研究は、著者の一人（荒木）の北海道大学大学院環境科学研究科修士課程研究の一部として実施された。研究を進める上でお世話になった低温科学研究所凍土学部門の鈴木義男北大名誉教授と福田正己助教に深く感謝致します。なお、本研究に要した費用の一部は文部省科学研究費補助金から支弁された。

文 献

- 1) Anderson, D. M. and Morgenstern, N. R. 1973 Physics, chemistry, and mechanics of frozen ground: a review. *In* Permafrost, National Academy of Sciences, 257-288.
- 2) 木下誠一 (編) 1982 凍土の物理学. 森北出版, 222 pp.
- 3) Hoekstra, P. and Delaney, A. 1974 Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *J. Geophys. Res.*, **79**(11), 1699-1708.
- 4) Patterson, D. E. 1980 The use of time domain reflectometry for the measurement of unfrozen water content in frozen soils. *Cold Regions Sci. Tech.*, **3**, 205-210.
- 5) Delaney, A. J. and Arcone, S. A. 1984 Dielectric measurements of frozen silt using time domain reflectometry. *Cold Regions Sci. Tech.*, **9**, 39-46.
- 6) Olhoeft, G. R. 1977 Electrical properties of natural clay permafrost. *Can. J. Earth Sci.*, **14**, 16-24.
- 7) 武田一夫 1987 アイスレンズの形成条件に基づく凍土性判定の試み. 雪氷, **49**(2), 75-86.
- 8) 竹井 巖・前野紀一 1981 氷の低周波誘電測定. 低温科学, 物理篇, **A**, **40**, 1-10.
- 9) 生頼孝博・高志 勤・山本英夫・岡本 純 1983 析出氷晶を含む凍土の一軸圧縮強度に関する実験的研究. 雪氷, **45**(1), 1-12.

Summary

Dielectric properties of two kinds of soils, Fujinomori clay and Tomakomai silt, were measured at frequencies from 30 Hz to 100 kHz and temperatures from +10 to -100°C. The degree of saturation of a soil sample, that is the fraction of water volume contained in pores in the sample, was varied from 0 (dry) to 100%.

Both frozen soils showed large dielectric dispersions in wide frequency ranges, suggesting active contributions of various kinds of charge carriers, including ions and intrinsic defects in ice. It was found that most of those charge carriers were activated by the presence of water molecules. The dependence of dielectric constant and conductivity on the degree of saturation suggested three modes of water in frozen soils; they are water molecules strongly adsorbed on surfaces of soil particles (degree of saturation from 0 to about 5%), water molecules (about 4 molecular layers) weakly bound to soil particles (from about 5 to 10%), and bulk ice formed in pores (above about 10%). For Fujinomori clay unfrozen water was found to appear above about -70°C.