



Title	凍土の電気比抵抗値の測定
Author(s)	原田, 敏一郎; HARADA, Koichiro; 福田, 正己 他
Citation	低温科学. 物理篇, 50, 57-68
Issue Date	1992-03-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18604">https://hdl.handle.net/2115/18604</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	50_p57-68.pdf



## 凍土の電気比抵抗値の測定\*

原 田 鉦一郎

(北海道大学大学院理学研究科)

福 田 正 己・石 崎 武 志

(低温科学研究所)

(平成3年10月受理)

### I. 序 論

永久凍土の分布調査に、直流電流を通した大地電気比抵抗探査法が用いられる<sup>1)</sup>。Harlanら(1971)<sup>2)</sup>やHoekstraら(1973)<sup>3)</sup>などの報告にあるように、土の電気比抵抗値は温度に依存し、凍土と未凍土では不連続に変化するという性質を利用している。この探査法は、従来の地温測定などによる地中の探査方法と比較し、①センサー設置のためのボーリングが不必要②広範囲の探査が可能という利点がある。著者らも、山岳永久凍土が存在する大雪山と、1979年に地中より巨大な地下水が発見された置戸町鹿の子ダムサイト(標高480m)において、電気比抵抗探査による地中の内部構造の推定を試みた<sup>4)</sup>。凍結面の位置決定は、高比抵抗値を示す部分を凍結層と見なして行っている。ところが、凍結・未凍結の差によって電気比抵抗値の変化が生ずるのみでなく、他の条件でも相対的な変化が生ずる。すなわち、土質と含水条件である<sup>5)</sup>。そこで、凍結面の位置決定の確度を増すためには、温度条件に加えてこうした土質と含水条件の差を考慮する必要がある。このためには、土の電気比抵抗値に影響を与えるこれらの因子と、その影響の度合を把握することが重要になる。従来の凍土の電氣的性質の研究では、誘電的性質や高周波における電気比抵抗値を取り扱い、直流の電気比抵抗値については、その測定事例は少ない。McGinnisら(1973)<sup>1)</sup>によれば、土の電気比抵抗値 $\rho$ は、絶対温度 $T$ の関数として、

$$\rho = a \cdot \exp(b/T) \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 $a$ 、 $b$ は定数である。また、Harlanら(1971)<sup>2)</sup>は、土質・含水率を考慮した土の電気比抵抗値の変化を検討している。Seguin(1978)<sup>5)</sup>は、数種類の岩石を用いて、乾燥状態の岩石の電気比抵抗値が、0°Cの前後でわずかしき変化しないこと、また飽和状態での値は、その1/10倍程度の値を持つことを報告している。

本研究では、野外で行った電気比抵抗探査の結果の解釈のために、様々な条件での凍土の

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第3512号

直流電気比抵抗値を室内実験で求めた。実験では、粘土・砂の他に、置戸町の調査地より採取した土を用いて、土の電気比抵抗値を測定した。温度や含水量がどのように測定値へ影響を与えるかを明らかにした。この実験結果に基づいて、置戸町で行った電気比抵抗探査の結果も併せて検討を加えた。

## II. 実験装置と方法

### 1. 測定原理

測定の原理は、土試料中に一定の直流電流を流し、それによって形成される電位差より土の電気比抵抗値を求めるものである。試料に流す電流は直流であるが、一定周期毎に極性を切り替える、周波数が数 Hz の交替直流(矩形波)を用いている。これは、分極による電荷の集中を防ぐためである。土試料には、4本の電極を配置する。両端に配置した電流電極間に交替電流を流し、内側に配置されている電位電極間の電位差を読み取り、土試料の電気比抵抗値を求める。この時、電流電極に流した電流値を  $I$ 、電位電極間の電位差を  $V$  とすると、土試料の電気比抵抗値  $\rho$  (単位  $\Omega \cdot m$ ) は次式より求めることができる。

$$\rho = \frac{S}{L} \cdot \frac{V}{I} \quad (2)$$

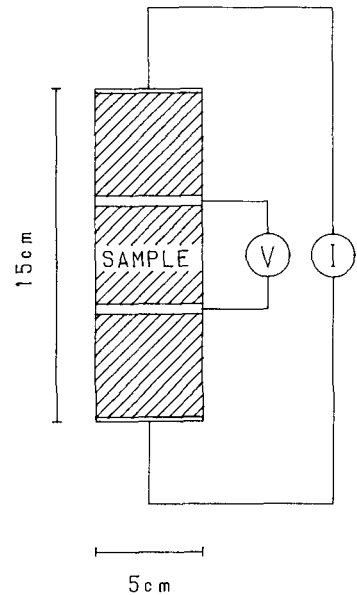
ここで、 $S$  は測定に用いた実験容器の断面積、 $L$  は電位電極間の距離である<sup>9)</sup>。

### 2. 実験装置

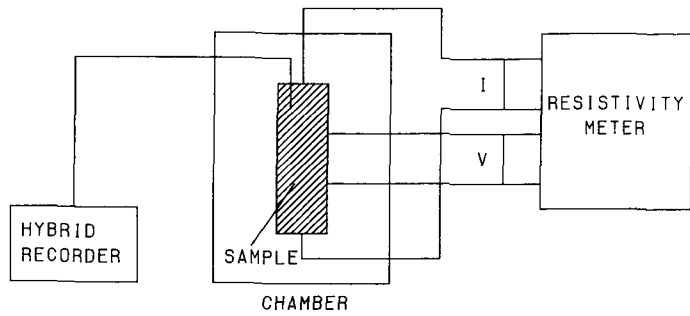
実験装置の模式図を第1図に示す。測定に用いた円筒型容器は、直径 5 cm、高さ 15 cm の塩化ビニール製である。この容器の体積は 294  $cm^3$  である。容器の上下端には、銅製の円盤電流電極が取り付けられており、両端からそれぞれ 5 cm 離れた位置に、リング状の幅 0.5 cm の銅製の電位電極を配置した。電位電極の間隔は中心間で 5 cm である。また、測定に用いられた測器のブロック図を第2図に示す。電流の供給や電位差の読み取りには、電気比抵抗探査用に開発された、RESISTIVITY METER (応用地質社製 McOHM MODEL-2115) を用いた。

### 3. 実験手順

実験手順は以下の通りである。まず、水分量を調整した土試料を容器中に詰め、低温室 ( $-30^\circ C$ ) で急速冷凍させる。これは、凍上発生で土中に氷レンズ(アイスレンズ)が形成されることを防止するためである。24 時間後に容器を低温室より取り出し、恒温槽の中に入れる。 $-10 \sim 10^\circ C$  までの温度範囲で恒温槽の温度を上昇させ、試料の温度を調整する。試料内には熱電対が設置されており、随時試料の温度をモニターし、恒温槽の温度と平衡に達した後に電気比抵抗値の測定を行った。



第1図 実験容器模式図



第2図 測定装置ブロック図

4. 土試料

実験に用いた土試料は、比較的物性が詳しく調べられている藤の森粘土と豊浦標準砂と、置戸町の調査地で採取された砂質土である。

土試料は、間隙率(土試料中の空気と水の占める割合)を一定にするために、乾燥密度( $\rho_b$ )を一定にした。これは、間隙率の変化によっても、土の電気比抵抗値に影響を与えられられるためである。ここで乾燥密度とは、土粒子の重量を土全体の体積(ここでは容器の体積)で割ったものである。

試料の作成では、まず炉で十分に乾燥させた土に蒸留水を加え、重量含水比( $W$ )により水分量を調整した。この重量含水比より、含水状態を体積比で表す体積含水率( $\theta$ )を求める。それぞれの定義式は以下の通りである。

$$\rho_b = M_s / V_t \tag{3}$$

$$W = M_w / M_s \tag{4}$$

$$\theta = V_w / V_t = \rho_b \cdot W \tag{5}$$

$M_s$  : 土粒子の重量(g)

$M_w$  : 水の重量(g)

$V_t$  : 土全体の体積( $\text{cm}^3$ )

$V_w$  : 水の体積( $\text{cm}^3$ )

第1表 試料の重量含水比・乾燥密度・体積含水率

藤の森粘土			豊浦標準砂			置戸砂質土		
重量含水比	乾燥密度 (g/cm)	体積含水率 (%)	重量含水比	乾燥密度 (g/cm)	体積含水率 (%)	重量含水比	乾燥密度 (g/cm)	体積含水率 (%)
0.097	0.993	9.6	0.100	1.27	12.7	0.0649	0.991	6.4
0.205	0.991	20.3	0.191	1.21	24.2	0.110	0.990	10.9
0.299	0.998	29.8	0.299	1.24	37.1	0.222	0.975	21.7
						0.312	0.989	30.8

今回の実験に用いた土試料の含水状態を第1表に示す。藤の森粘土においては乾燥密度を約  $1 \text{ g/cm}^3$  とし、体積含水率が9~30%の試料について電気比抵抗値の測定を行った。豊浦標準砂については、乾燥密度を約  $1.2 \text{ g/cm}^3$  とし、測定を行った試料の体積含水率は13~37%である。また、置戸砂質土は乾燥密度を約  $1 \text{ g/cm}^3$ 、試料の体積含水率を6~31%とした。

### III. 測定結果

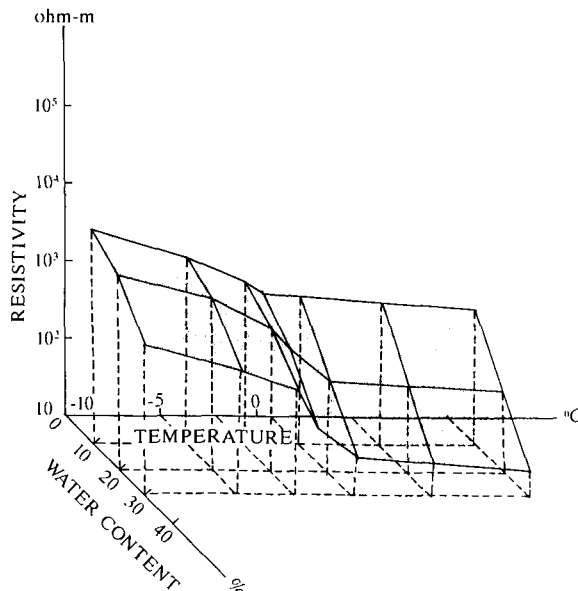
#### 1. 藤の森粘土の電気比抵抗値

藤の森の粘土の電気比抵抗値について、実験結果を第3図に示す。また温度の関数として第4図に、体積含水率の関数として第5図に示す。

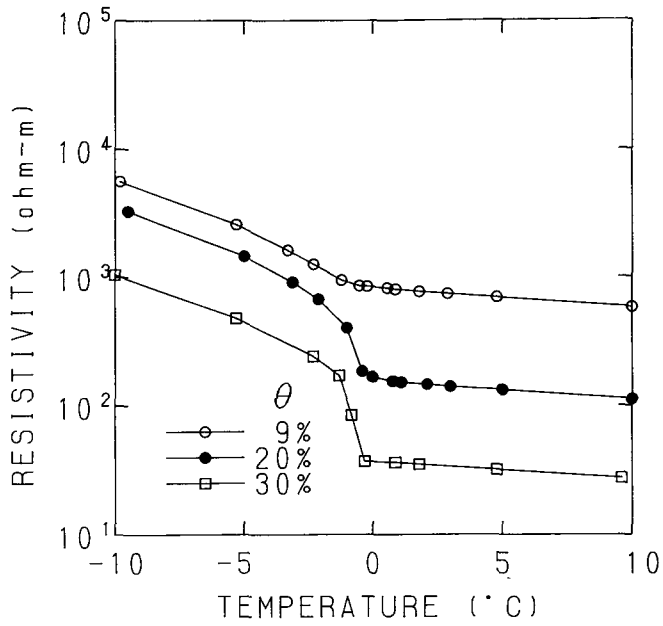
第3図は、凍土の電気比抵抗値は、温度と初期含水率の関数として表すことができることを示している。第4図では、土の電気比抵抗値は温度の低下に伴い増大すること、 $0^\circ\text{C}$ の前後において電気比抵抗値は不連続に変化していることが示されている。温度の変化に対する電気比抵抗値の変化は、凍土では未凍土と比較すると大きくなっている。 $0^\circ\text{C}$ の前後での電気比抵抗値は、体積含水率が20%と30%の試料では大きく変化しており、体積含水率が小さな試料(同9%)では変化が小さい。 $0^\circ\text{C}$ の前後における、電気比抵抗値の初期含水率依存性は、Seguin (1978)<sup>9)</sup>による岩石の電気比抵抗値測定事例と類似した傾向が見られる。この原因として、凍土中の不凍水と氷の存在比の違いが考えられる。

第5図に示すように、含水率の増加に従って電気比抵抗値が減少する傾向は、凍土・未凍土で共通に見られる。しかし、増加の割合はその直線の傾きの差が示唆するように、未凍土では大きく凍土では小さいことが分かる。

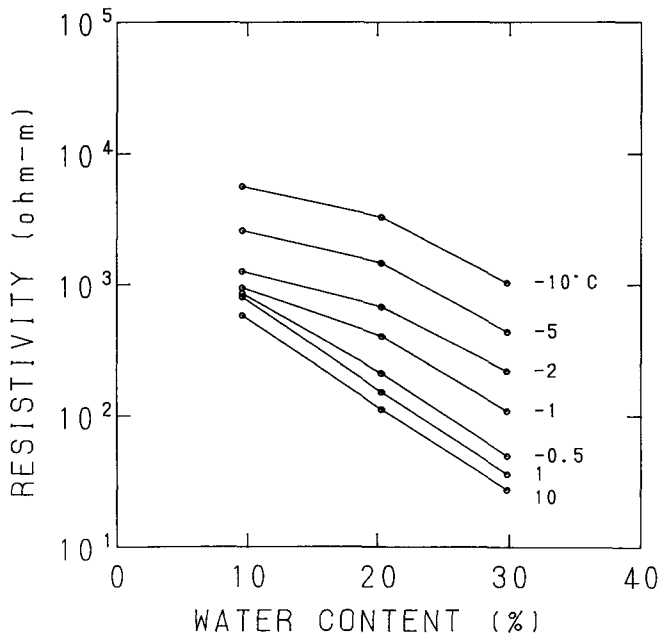
#### 2. 豊浦標準砂の電気比抵抗値



第3図 藤の森粘土 測定結果



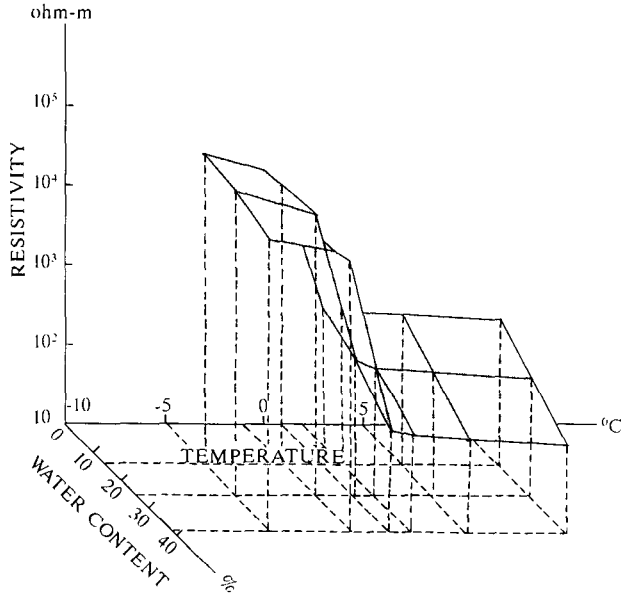
第4図 藤の森粘土 温度依存性  $\theta$ :体積含水率



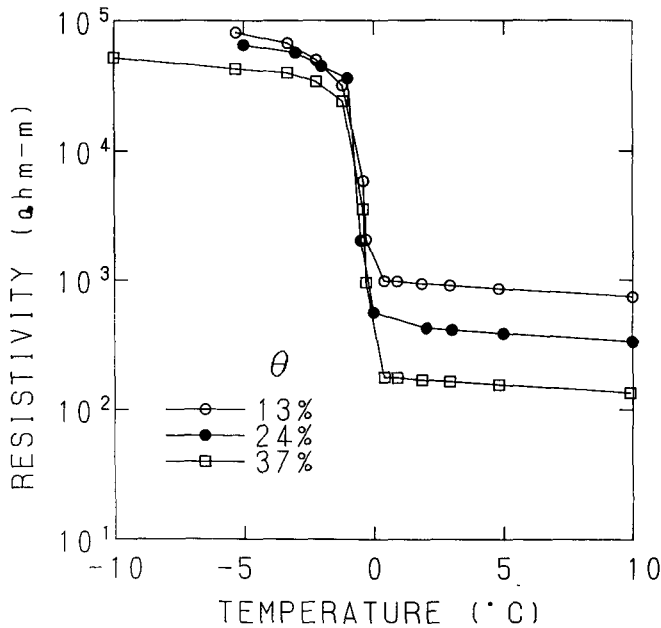
第5図 藤の森粘土 体積含水率依存性

豊浦標準砂の電気比抵抗値の測定結果を第6図に示す。また、温度を関数として第7図に、体積含水率を関数として第8図に示す。

電気比抵抗値は、温度が低いほど大きくなっており、 $0^{\circ}\text{C}$ の前後における変化は、初期含水率の差を反映せず急激である(第7図)。この変化の度合は、藤の森粘土と比較するとかなり大



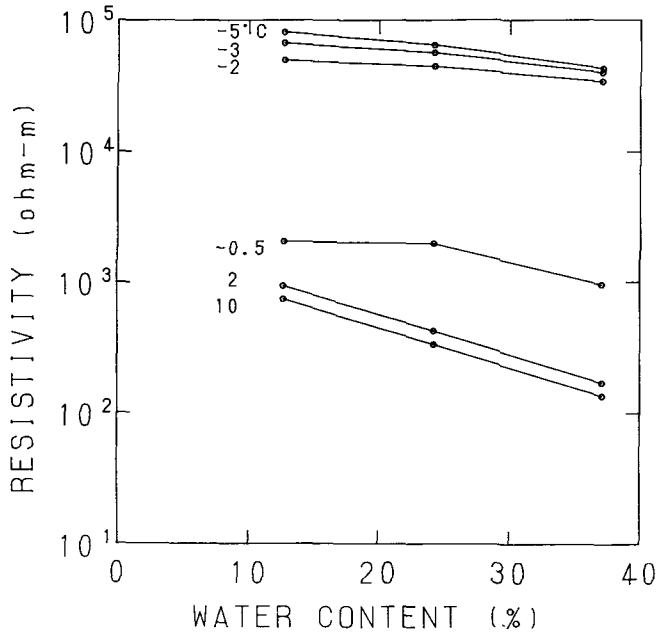
第6図 豊浦標準砂 測定結果



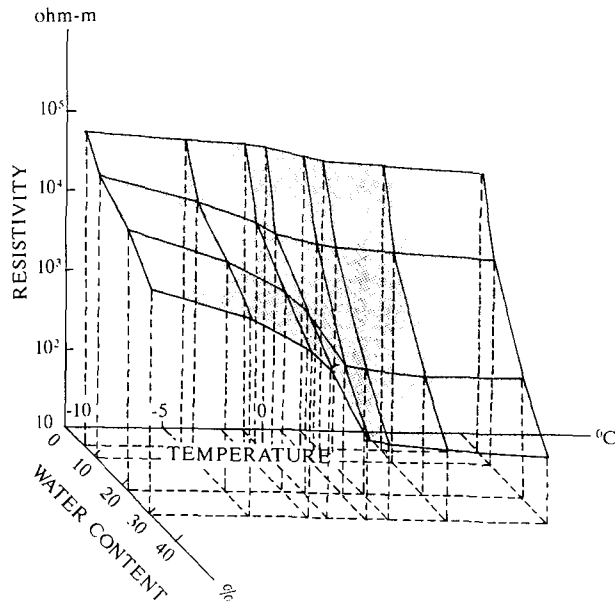
第7図 豊浦標準砂 温度依存性  $\theta$ : 体積含水率

きい。温度に対する凍土の電気比抵抗値の変化は、未凍土での変化とあまり変わらず、藤の森粘土と比較しても小さくなっている。

電気比抵抗値の含水率に対する依存性は、未凍土では、初期含水率の減少に伴い大きくなる傾向を示しているが、凍土では、初期含水率によって電気比抵抗値はあまり変化していない



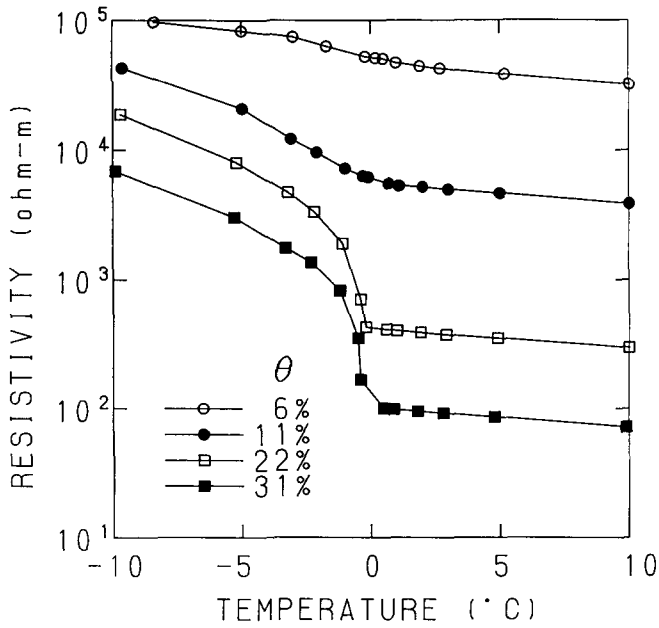
第8図 豊浦標準砂 体積含水率依存性



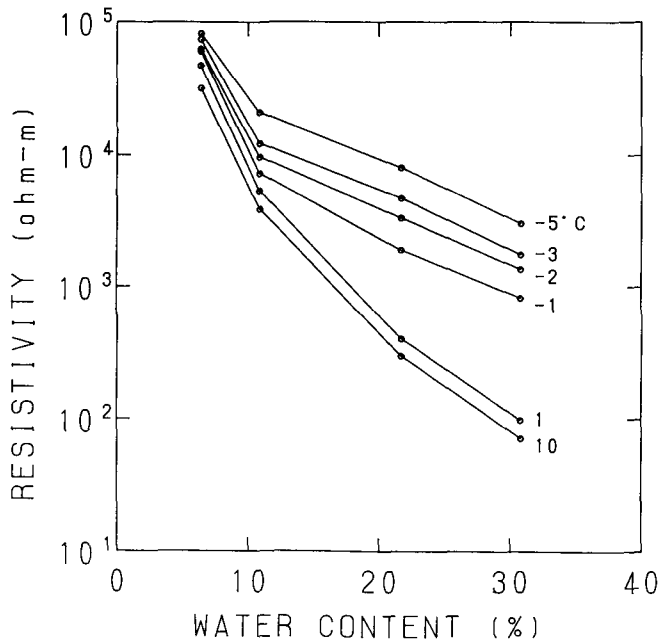
第9図 置戸砂質土 測定結果

(第8図)。これは、凍土中には不凍水がほとんど存在せず、水分量のほとんどが氷として存在しているためと考えられる。

3. 置戸砂質土の電気比抵抗値



第10図 置戸砂質土 温度依存性 θ:体積含水率



第11図 置戸砂質土 体積含水率依存性

置戸町鹿の子ダムサイトで採取した砂質土の電気比抵抗値の測定結果を第9図に、また温度・体積含水率を関数として、それぞれ第10, 11図に示す。

前述の2試料と同様に、温度の低下に伴い電気比抵抗値は大きくなる。凍土の電気比抵抗値を見ると、低含水率の試料では、豊浦標準砂の値と近い値となっている。しかしながら、初期含水率の小さな試料(体積含水率6%と11%)では、0°Cの前後における電気比抵抗値の変化が小さいという藤の森粘土と同様な傾向を示す。

電気比抵抗値の含水率による依存性を見てみると、全ての温度領域において、初期含水率の減少に伴い、電気比抵抗値は増加している(第11図)。その変化の様子は、凍土と未凍土では異なっており、凍土での初期含水率による電気比抵抗値の差は、未凍土での差より小さくなっている。

置戸町で採取された土試料は、砂質土でありながら、上述したように粘土の電気比抵抗値の変化の傾向と非常に似ている。凍土の電気比抵抗値を決める因子として不凍水が主と考えると、この土試料の不凍水分量の温度に対する変化は、藤の森粘土と類似していると推定できる。

## 考 察

### 1. 凍土の電気比抵抗値土質依存性

凍土の電気比抵抗値を、ほぼ同じ体積含水率の試料で比較すると、豊浦標準砂では高い値となり、藤の森粘土は低い値となっている。このように、凍土の電気比抵抗値には、土質依存性がある。また、0°Cの前後における電気比抵抗値の変化の様子は、土質により異なる。この土質依存性は、未凍土でも見られる。

未凍土では、土質による電気比抵抗値の差異は、土試料中に含まれている電解質成分の違いによるところが大きい。つまり、土中水の電気比抵抗値の違いによるものと考えられる。そこで試料の一部を水に懸濁させ、上澄み液の電気比抵抗値の測定を行った。測定には数字式電導度計(東亜電波社製CM-2A)を用いた。その結果、+10°Cでの上澄み液の電気比抵抗値は、藤の森粘土では33.84 Ω・mであり、豊浦標準砂では248.8 Ω・mであった。また、置戸砂質土では60.79 Ω・mである。この土中水の電気比抵抗値の違いが、未凍土での電気比抵抗値の差をもたらすと考えられる。これについては、Panditら(1978)<sup>7)</sup>が、塩分含有土について同様の理由を述べている。

凍土は、土粒子・氷・不凍水・空気から成り立っている。凍土の電気比抵抗値は、これらの構成要素自身の電気比抵抗値とその存在比で決定される。特に、不凍水と氷の存在比が重要になる。土質による凍土の電気比抵抗値の違いは、この凍土中の不凍水と氷の存在比の違いによる。不凍水は土粒子表面に吸着した状態で存在し、その量は温度や土質に依存するが、初期含水率には依存しない。異なる種類の土試料について同水分量で比較すると、不凍水分量がより少ないと凍土中の氷の量が増え、凍土全体としては電気比抵抗値はより大きくなる。-1°Cでの乾燥土100g当りの不凍水分量の比較を行うと、藤の森粘土では20.67gであり、豊浦標準砂では0.13gである<sup>8)</sup>。藤の森粘土の不凍水分量は、豊浦標準砂の不凍水分量の150倍以上である。豊浦標準砂では0°Cに近い温度においても、不凍水がほとんど存在しない。この土質による不

凍水分量の違いにより、凍土の電気比抵抗値の土質による差異が生じ、藤の森粘土の電気比抵抗値は、豊浦標準砂の値よりも小さくなると考えられる。

置戸砂質土の凍土の電気比抵抗値は、豊浦標準砂より小さく、藤の森粘土より大きくなっている。置戸砂質土の不凍水量の測定は行っていないが、逆に電気比抵抗値の測定結果より、藤の森粘土より少なく、豊浦標準砂より多いと考えられる。このことは、 $0^{\circ}\text{C}$ の前後における電気比抵抗値の変化や、凍土の電気比抵抗値の初期含水率依存性からも推定できる。

## 2. 凍土の電気比抵抗値温度依存性

前述したように、凍土中の不凍水と氷の存在比により、凍土の電気比抵抗値が決定される。凍土中の不凍水分量は温度の低下に伴い減少し、このために凍土の電気比抵抗値は増加する。また、 $0^{\circ}\text{C}$ 近傍において、不凍水分量は急激な減少を見せるため、電気比抵抗値の変化の傾向を強めることになる。しかし、初期含水率の小さな試料(藤の森粘土と置戸砂質土)では、 $0^{\circ}\text{C}$ の前後における電気比抵抗値の変化は小さくなっている。これは、 $0^{\circ}\text{C}$ 近傍の凍土中の水はほとんど不凍水の状態で存在し、氷の割合が小さいためと考えられる。

また、豊浦標準砂では、 $0^{\circ}\text{C}$ 近傍でも不凍水はほとんど存在せず、大部分が氷である。このために、 $0^{\circ}\text{C}$ の前後において電気比抵抗値がより急激に変化する。

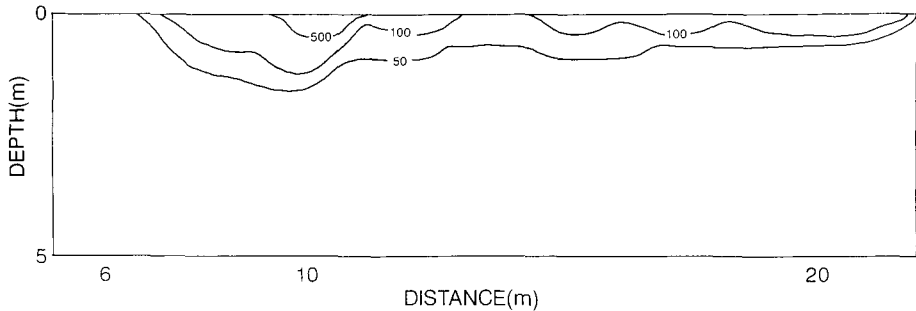
## 3. 凍土の電気比抵抗値含水率依存性

藤の森粘土と置戸砂質土では、初期含水率の増加に伴い、凍土の電気比抵抗値は減少している。不凍水分量は、初期含水率に依存せず、土質により決まった値となるために、含水率が増えると凍土中では氷の含有率が増加する。つまり、氷の含有率のより高い試料が、電気比抵抗値はより小さいことになる。この理由を考えてみる。今回の実験では、乾燥密度をほぼ一定にしているために、凍土中の間隙率は一定と考えてよい。凍土の間隙は不凍水と氷と空気で構成されている。凍土の電気比抵抗値は、これらの構成要素の存在比により決まる。不凍水分量が一定であれば、間隙中の氷と空気の存在比により、凍土の電気比抵抗値が決まる。つまり、無限大の電気比抵抗値を持つ空気と比較し、より小さい電気比抵抗値を持つ氷の存在比が大きくなると、凍土の電気比抵抗値は小さくなる。初期含水率が高い凍土では、間隙中を氷が占める割合は大きくなり、空気の割合が減り、結果として電気比抵抗値は小さくなると考えられる。

豊浦標準砂では、凍土の電気比抵抗値の含水率の変化に対する依存性が小さい。凍結状態の砂の不凍水分量はきわめて少なく、 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ の温度範囲では凍土中の水分の大部分は、氷として存在しているためである。

## 4. 電気比抵抗探査との比較

置戸町鹿の子ダムサイトにおいて、地下水が発見された斜面において、最大傾斜方向に行った電気比抵抗探査の結果を第12図に示す(1990年8月30日実施)<sup>9)</sup>。図中の数値は見掛比抵抗値の等値線を表す。探査時に地温測定を図中の距離10m付近(地下水が発見された地点)で行い、地表面下2~3.5mで凍結層が確認された。しかし、この付近の見掛比抵抗値は、特に高い値を示していない。この原因として、凍結層の地温( $-0.4^{\circ}\text{C}$ )が高く、未凍土との電気比抵抗値の差が小さいためと考えられる。また、実験結果より乾燥状態の凍土では、電気比抵抗値は未凍土での値との差が少ない可能性がある。しかし、調査地の土中の含水率の情報もなく、より詳し



第12図 電気比抵抗探査結果—置戸町鹿の子ダムサイト—1990年8月30日実施  
 DISTANCE: 斜面の下端からの距離  
 DEPTH: 地表面からの深さ

い解釈は困難である。電気比抵抗探査の結果を解釈する際には、これらの因子をできるだけ明確に捕らえることが必要である。また、土質・温度・含水量の他に、密度の情報も必要となってくる。今回は室内実験では、一つの密度についてのみ行ったが、より深い解釈のために、今後は更に広い範囲について、実験を行う予定である。

## V. 結 語

凍土の直流電気比抵抗値の測定を、様々な土質・含水率・温度について行った。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 実験を行った全ての試料について、電気比抵抗値は $0^{\circ}\text{C}$ 以下では温度の低下に伴い増大すること、また $0^{\circ}\text{C}$ の前後において電気比抵抗値は急変することが確かめられた。この変化の傾向は土質・含水率により異なる。

(2) 藤の森粘土と置戸砂質土では、含水率の低い試料では、 $0^{\circ}\text{C}$ の前後における電気比抵抗値の変化は小さい。これは、 $0^{\circ}\text{C}$ 近傍では、土中水分量の大部分は不凍水として存在しているためと考えられる。

(3) 豊浦標準砂では、 $0^{\circ}\text{C}$ の前後における変化も含め、含水率の変化による凍土の電気比抵抗値の変化は、他の試料と比べて小さい。これは、 $0^{\circ}\text{C}$ 以下であれば、凍土中の水分量の大部分が氷として存在していることによると考えられる。

(4) 電気比抵抗探査の解釈には、温度の他に、土質・含水率などの情報も必要である。

本研究は、著者の一人(原田)が北海道大学大学院環境科学研究科環境保全学専攻修士課程の修士論文の一部として行われた。本研究の実施にあたっては、凍上学部門曾根敏雄助手より多大な協力を受けた。また、低温科学研究所および環境科学研究科所属の大学院生の諸氏にも多くの協力を仰いだ。併せてここに感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) McGinnis, L. D., Nakao, K. and Clark, C. C. 1973 Geophysical identification of frozen and unfrozen ground, Antarctica. In Proc. 2nd International Conference on Permafrost, 136-146.

- 2) Harlan, R. L., Banner, J. A. and Freeze, R. A. 1971 Interpretation of electrical-resistance soil moisture data for a freeze-thaw environment. *Can. J. Soil Sci.*, **51**, 249-259.
- 3) Hoekstra, P. and McNeill, D. 1973 Electromagnetic probing of permafrost. In Proc. 2nd International Conference on Permafrost, 517-526.
- 4) 原田敏一郎・福田正己・石崎武志・曾根敏雄 1991 大雪山および周辺低山地における永久凍土の分布. 北海道の雪氷, **10**, 26-27.
- 5) Seguin, M. K. 1978 Temperature-electrical resistivity relationship in continuous permafrost at Purtuniqu, Ungava Peninsula. In Proc. 3rd International Conference on Permafrost, 137-144.
- 6) 村上弘行・宮尾浩一 1990 不飽和土における比抵抗の特性. 土質工学会北海道支部技術報告集, **20**, 29-34.
- 7) Pandit, B. I. and King, M. S. 1978 Influence of pore fluid salinity on seismic and electrical properties of rocks at permafrost temperature. In Proc. 3rd International Conference on Permafrost, 553-559.
- 8) 伊豆田久雄・生瀬孝博・山本英夫・岡本純・高志勤 1982 飽和土の熱伝導率と容積含水(水)率との関係. 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集, **3**, 285-286.

### Summary

An electrical sounding method is used for determining the scale and location of massive ice and frozen ground in the permafrost regions. To analyze the data obtained by this method, it is important to gather data on the direct current resistivities of various soils under different temperature and moisture conditions. This paper reports how these conditions affect the electrical resistivity value of frozen soil.

The samples used here were Fujinomori clay, Toyoura sand, and Oketo sandy soil. Oketo sandy soil was obtained from the site where the electrical sounding was carried out. The temperature range of the experiments was between  $-10$  and  $10$  °C. The volumetric water contents were set variably between 6 and 37%.

From the experimental results, it was confirmed that electrical resistivity depended on soil type, temperature, and water content. The electrical resistivity of the frozen soil increased when decreasing temperature. Near  $0$  °C, the electrical resistivities changed drastically. Those changes corresponded to the changes in unfrozen water content.

The degree of the change ultimately depended on soil type and water content. The change of electrical resistivity was small for Fujinomori clay and Oketo sandy soil with a low water content. This was due to the fact that most of soil water remained unfrozen near  $0$  °C. The electrical resistivity decreased when increasing initial water content. The change of the electrical resistivity near  $0$  °C became great when increasing initial water content.

For Toyoura sand, the change near  $0$  °C was great and the dependency of electrical resistivity on initial water content was small. This corresponded to the fact that most of soil water was frozen near  $0$  °C and the unfrozen water content became very small.

These analyses showed that it was important to get information related to soil type and water content as well as temperature to analyze the data, precisely, obtained by the electrical sounding method.