

凍土層形成に対する物理探査の適用例

—— 帯 広 畜 産 大 学 実 験 圃 場 の 場 合 ——

○河内邦夫・武藤 章・後藤典俊（室蘭工大）、高見雅三・和氣 徹
（道立地下資源調査所）、土谷富士夫（帯広畜産大学）

1. はじめに

土が凍る現象は、程度の差は有るが寒冷地域に広く見られる。この現象の現場での観測には、メチレンブルーの凍結深度管が広く用いられている。筆者らは、工学的立場から凍土層の分布等を簡単な方法で探査できる物理探査法を選択し、凍土層探査に適した機器を開発する目的で研究を始めた。

筆者らは、電気探査・地下レーダ探査・微動探査・地震探査を行ったが、凍土層形成に対し測定値に変化があった電気探査と地下レーダ探査について報告したい。なお、本研究は、平成2年度の道・大学共同研究（課題番号17）費を使用して行われたことを付記する。

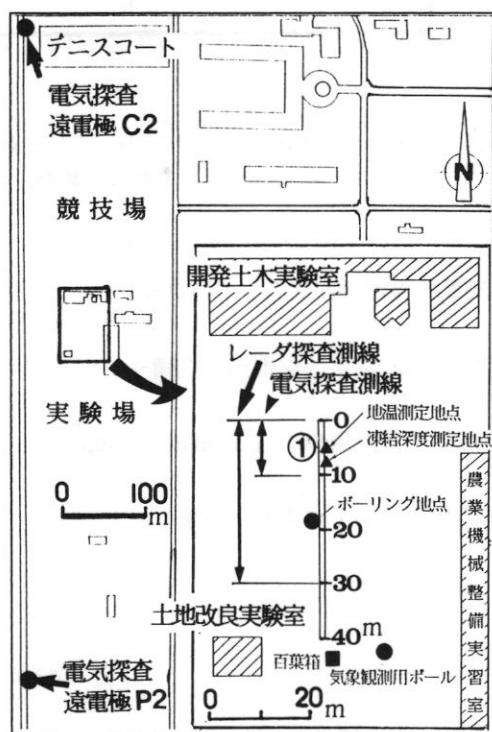


図-1 実験位置図

2. 実験概要

実験は、全て帯広畜産大学の実験圃場内で行った。実験位置図の概略を図-1に示す。

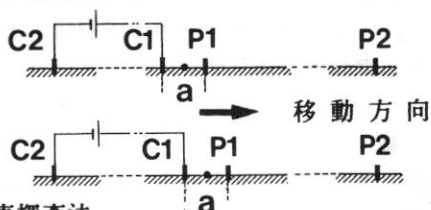
測線0~20mの範囲は、冬季間除雪をした。

2.1 電気探査法

電気探査法には色々あるが、本研究では、浅層構造の解明や冬季での調査等を考慮して比抵抗法を採用した。比抵抗法には、2極法・3極法・ウェンナー法・シュランベルジャー法などがあるが、冬期の作業効率から移動電極が少ない2極法を用いた。この電極配置は、福田(1991)¹⁾らによっても永久凍土の探査に用いられている。また、水平的・平面的な変化を調べる水平探査法と垂直的な変化を調べる垂直探査法がある。

両方法の概略図を、図-2に示す。

水平探査法



垂直探査法

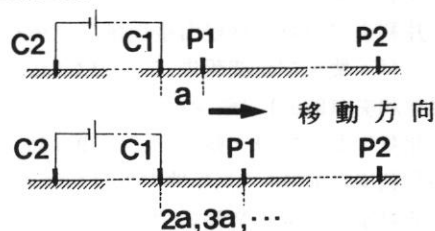


図-2 2極法電気探査の概念図

(C1, C2: 電流電極, P1, P2: 電位電極)

本研究では、電極間隔を凍土の形成に対する水平及び垂直方向の変化を考慮して、探査深度1.5mまでは、0.25m それより5.0mまでは0.5mにした。電流電極C1は、0.5mで移動した。

2.2 地下レーダ探査

地下レーダは、地表面において非常に短い時間内に広域バンドパルスの電磁波を放射しこの電磁波が地層境界面において反射して戻ってくる波をとらえ、地下の構造を調べる探査法である。プロファイル測定とワイドアングル測定とがあり、概略を、図-3に示す。

前者は、反射面の起伏の変化やその構造を連続的かつ定性的に把握でき、後者は、地盤内の電磁波伝播速度の分布が求められる。

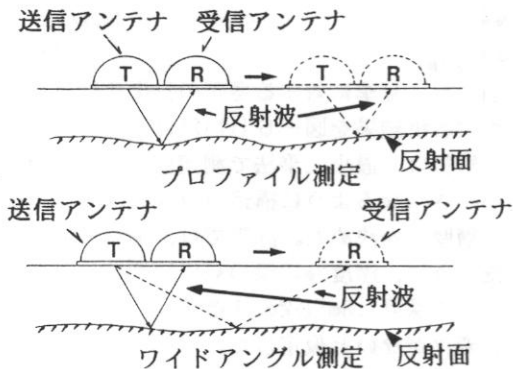


図-3 地下レーダ探査の概略図

3. 実験地の土質条件

3.1 実験調査地の土質

図-1に示した位置で深さ5.0mのボーリング調査を行った。その調査結果とその付近の1m程度のトレンチ調査の結果から求めた実験調査地の土質を表-1に示す。

表-1 土質調査結果

層番号	深度 (m)	色 調	土 質 名	記 載
1	0 ~ 0.40	黄 褐色	火山灰質砂質シルト(表土)	上部に若干の植物根の混入有り
2	0.40 ~ 1.15	黄 褐色	火山灰質砂質シルト(ローム)	新鮮なものは指で潰すのに少し力を要す
3	1.15 ~ 1.70	灰 褐色	火山灰質砂質シルト	上層に比べ細砂の混入有り
4	1.70 ~ 4.65	灰 色	砂 礫	礫最大径50mm 礫平均径10~30mm 円礫、砂は細砂
5	4.65 ~ 5.00	灰 色	砂 礫	礫最大径50mm 礫平均径30~40mm 円礫、細砂混入

3.2 土質試験結果

図-1中の①の東側の地表から深さ0.2~0.3mの土を採取し粒度試験を行い、同時に、比重試験及び含水比試験も行った。

粒度試験を行った土は、表-1の第1層の下部から第2層の上部に相当する。粒度試験の結果、この土は、シルト・粘土分が全体の約25%で、砂分が全体の約75%その内の約2/3が細砂分(0.42~0.074mm)である。また最大粒径は2.00mm、均等係数は約8の砂である。ただし、粒度試験は、この土が火山灰なので二次破碎の軽減のため水中でふるいを手で一段ずつ振るう方法により行った。この土の比重は、2.608、自然含水比は、約64%(採取日1990年11月8日)である。

4. 実験結果及び考察

各物理探査の結果及び考察を以下に述べる。各実験の測線は、図-1中に示した。

4.1 電気探査の水平解析

一般に深度≒電極間隔(以後深度と呼ぶ)の関係があり深度0.25~5.0mまでの見掛け比抵抗分布を図-4に示す。ただし、見掛け比抵抗は、浅部~深部の積分値で直接その深さの比抵抗値や分布を示すのではなく見掛け上の比抵抗値や凍土の分布を示している。

図中(1990/8)では、見掛け比抵抗は表層~深部にかけて増加する傾向を示す。水平的な変化は少なく、表層部(深度0.25m)は、300~500Ωm程度で深度5m付近は1,500Ωm前後で表層部の数倍を示している。

図中(1991/1)・(1991/2)では、夏季と比べ両方とも表層部の見掛け比抵抗分布は、水平・垂直方向共に変化がみられる。(1991/1)では表層部付近が最も大きく10000~20000Ωmを示している。深度3~5mは、夏季より少し高い程度である。(1991/2)では、高比抵抗部は、表層部よりも深部(深度0.5~1.5m)にある。高比抵抗範囲は、さらに深くなっているが、深度3~5mは、(1991/1)とほぼ同じである。

次に、見掛け比抵抗は、浅部~深部にかけての積分値であるので、夏季の見掛け比抵抗値で冬季の見掛け比抵抗値を割った比を取って図-5に示す。1991/1の見掛け比抵抗比は、表層部ほど高く夏季の数10倍、深部にかけては低くなる傾向を示す。すなわち、表層部の土の比抵抗値が凍結により全体的に高い値に変化し

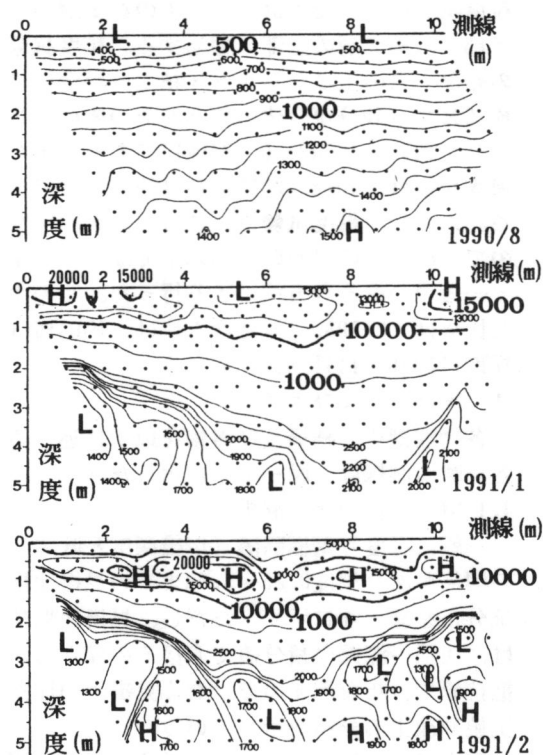


図-4 夏季(1990/8)・冬季(1991/1, 1991/2)

の見掛け比抵抗分布図(図中の単位: Ωm)
たことを示している。一方、1991/2の見掛け比抵抗比は、30~40倍の高比抵抗比を示す範囲が表層よりもやや深い位置(深度0.5~1.25m)に下がっている。これは、表層よりそこが低温になっているのか、上部の凍結による水分の移動がその下部の含水比を低下させて高比抵抗部が出現したのかは、今回は確認していないのでこれ以上考察できない。

また、10倍以下の比抵抗比を示すコンターは、1月も2月もほぼ同じ位置を通ることから、少なくとも10倍以下の深度の土は凍結していないと思われる。

4.2 電気探査の垂直解析

水平探査データを垂直探査データに変換($V/I = V_a/I_a - V_2a/I_2a$; $\rho = 4\pi aV/I$)し、その結果から垂直的な凍土・未凍土の境界を求めるために、水平多層を仮定したリニアフィルタ法²⁾³⁾による1次元解析を用いた。測線5m地

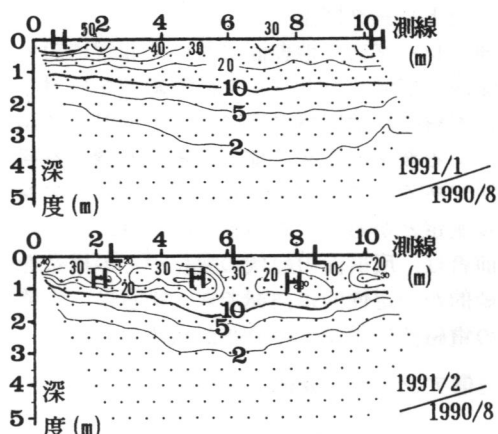


図-5 夏季に対する冬季の見掛け比抵抗比の解析結果を図-6(1)(2)に示す。

解析は、最小二乗法で測定値と計算値の差が小さくなるように構造パラメータ(比抵抗・層厚)を決めた。計算では、図-5に示したように、深度2m以深の見掛け比抵抗に差がないので深度1.8m以深の比抵抗は、夏季も冬季も変化がないと仮定した。つまり、比抵抗だけが気温により変化し、含水比等の他の物性値は季節変化がなく、深度1.8mに430 Ωm と6,000 Ωm の境界が存在するとして解析を行った。従って、凍土層の比抵抗値が実際よりも高く、砂礫層の上面深度がやや深くなった。

図-6中の各図右側(B)には、地盤の状態を示した。土質状態は、表-1の記載で表わした。凍土層厚は、図-1中のメチレンブルーの凍結深度管で計測した。

図中の2月(3)は、表層の比抵抗変化が大きく今回の方法では、解析できなかった。8月と1月の解析結果を、それぞれ(A)に示す。

4.3 地下レーダ探査

図-7にプロファイル測定とワイドアングル測定による電磁波の反射波形成記録を示す。

なお、測定レンジは100nsec、アンテナ間隔は、0.55mで、使用周波数は、250Mzである。

夏季、冬季測定とも、空中直接波(a)、地中直接波(d)、地中反射波(r)が記録されている。

冬季の凍土層による反射面の有無については、レーダ探査の実施に協力して頂いた応用

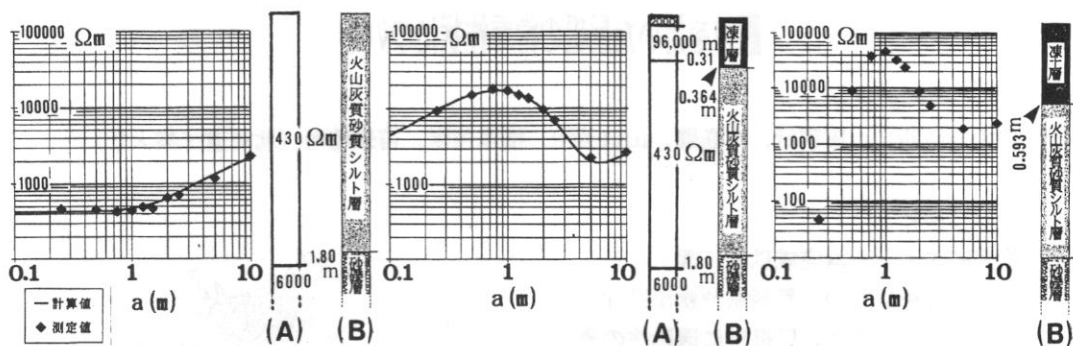


図-6 (1) 5m地点の解析結果(90/8) (2) 5m地点の解析結果(91/1) (3) 5m地点の解析結果(91/2)

地質側の村上弘行氏に相談した結果、それによる反射面は、確認できないとのことであった。しかし、表層部の凍土形成で電磁波速度が速くなったことは、確認できた。

5. おわりに

今回行った物理探査の中では、電気探査が凍土層形成をとらえるのに有効であることが分かった。しかし、解析方法・電極配置等に問題もあり今後の課題としたい。

最後に、研究に協力下さった応用地質側の村上弘行・宮尾浩一の両氏、㈱ズコーシャの渡辺 博氏と環境研究所の各氏に記して感謝致します。

<参考文献>

- 1) 福田正己(1991):北海道置戸町の永久凍土と地下水の成因と形成環境の研究,文部省科研費報告書(研究課題番号01460265),pp.57-72
- 2) GHOSH, D.P. (1971): Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally earth, Geophys. Prosp., 19, pp. 769-775
- 3) O'Neill, D.J. and Merrick, N.P. (1984): A digital linear filter for resistivity sounding with a generalized electrode array, Geophys. Prosp., 32, pp. 105-123

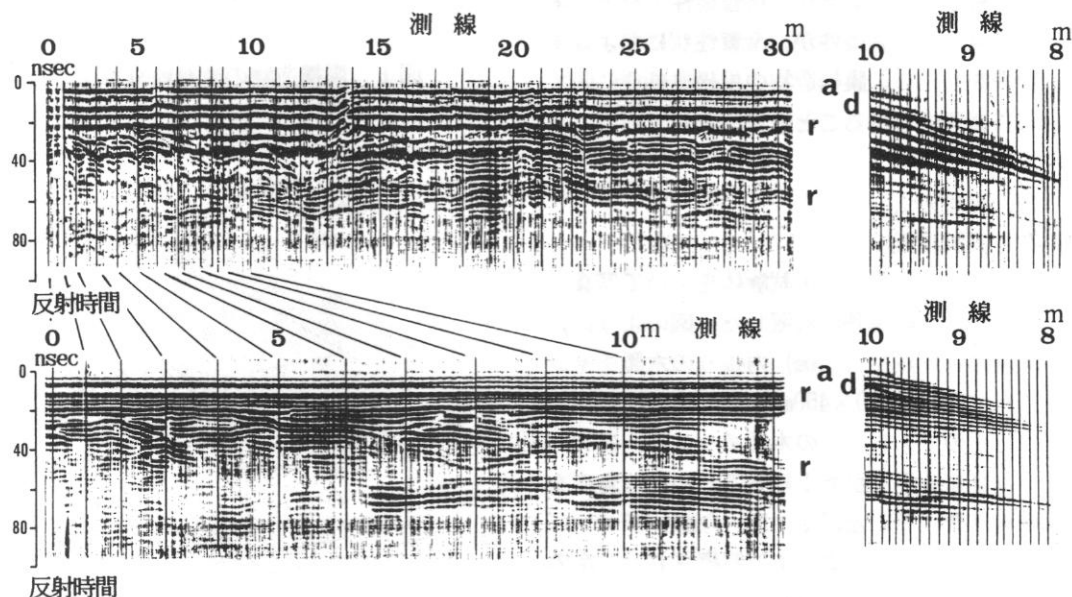


図-7 地下レーダの反射波の記録(左:プロフィール測定、右:ワイドアングル測定)