

凍土用リアルタイム処理物理探査機器の開発研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 河内, 邦夫, 武藤, 章, 後藤, 典俊, 高見, 雅三, 和気, 徹 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/599

凍土用リアルタイム処理物理探査機器の開発研究

その他（別言語等） のタイトル	Development of Real-Time Geophysical Prospecting Equipment for the Frozen Ground
著者	河内 邦夫，武藤 章，後藤 典俊，高見 雅三， 和気 徹
雑誌名	室蘭工業大学研究報告．理工編
巻	43
ページ	31-60
発行年	1993-11-25
URL	http://hdl.handle.net/10258/599

凍土用リアルタイム処理物理探査機器の開発研究

河内 邦夫, 武藤 章, 後藤 典俊, 高見 雅三, 和気 徹

Development of Real-Time Geophysical Prospecting Equipment for the Frozen Ground

Kunio KAWAUCHI ^{*1}, Akira MUTO ^{*1}, Noritoshi GOTO ^{*1}
Masazou TAKAMI ^{*2}, Toru WAKE ^{*2}

Abstract

We tried to use four geophysical prospecting methods (electrical resistivity prospecting method, radar prospecting method, microtremore and elastic wave exploration) for measurements of frozen soils. The result of the survey was that we picked out the electrical resistivity prospecting method better than the other one. Electrical resistivity of frozen soils is inverse proportion to deteriorate of those temperature.

1. はじめに

凍土について、木下誠一著『凍土の物理学』¹⁾の永久凍土の定義の項に次の様に書かれている。「冬に気温が0℃以下になると、土は地面から凍り始める。北海道の寒い所、帯広や北見地方では、だいたい11月末から12月初めに凍り始め、3月にはほぼ1 m近くも凍る。しかし、3月末になって気温が0℃以上になると、土は地面から解け始める。6月になってやっと全部の土が融ける。シベリアやアラスカ・カナダ北部のような非常に寒い所では、いったん凍った土が夏に地面から融けていっても、…すっかり融けきらないうちに、次の冬がやって来る。そして、再び地面から凍り始める。…融けたり凍ったりするのは、表層部の活動層と呼ばれる所だけで、その下には永久に融けることのない土、つまり永久凍土がある。」永久凍土に対して夏季には消滅する凍土を、季節的凍土（以下、これを単に凍土と呼ぶ）という。

寒冷地域では凍結や凍上による被害が、色々な産業に影響を与え、²⁾³⁾、防災面や農業面においては、凍土層の把握が重要である。平成5年1月15日に発生した釧路沖地震では、地表部の凍結（凍土層）が、被害を小さくしたと言われているが、実際にどの程度凍結していたかは定かではなく、今後の研究が待たれる。また、近年各方面で取り上げられている地球温暖化の問題では、

^{*1} 室蘭工業大学工学部 050 室蘭市水元町27番1号

^{*2} 北海道立地下資源調査所 060 札幌市北区北19条西12丁目

シベリアの永久凍土が温暖化の影響で融け、その内部に閉じ込められていたメタンガスが大気中に放出され温暖化を助長するとの報告⁴⁾もあり、シベリアなどの永久凍土の分布や状態の把握も重要になって来ている。

筆者らは、工学的観点から広域にわたって凍土層の深度等を簡便な方法で探査できる物理探査法を選定し、その探査法を寒冷環境下で迅速に行える機器システムを開発する目的で研究を始めた。この報告は、平成2年度から平成4年度に北海道立地下資源調査所と室蘭工業大学の間で行われた表記の題目の共同研究のうち主に帯広畜産大学実験圃場での計測結果をまとめたものである。なお、北海道立地下資源調査所からは3ヵ年にわたり共同研究費（B区分）を頂いた。記して感謝申し上げる。

2. 研究の概要

凍土層の厚さを知るには、メチレンブルーを用いた凍結深計を予め埋設する方法が最も一般的である⁵⁾が、数m以深の凍土を知るには構造的に向かない。数m程度の様子を知る方法には、ボーリングによるコアサンプリングがあり専用の凍土掘削機も試作されている⁵⁾。しかし、どちらも広範囲な分布を短時間に知る目的には向かない。

本研究では、非破壊で凍土を探査する方法として物理探査を用いることにした。物理探査は、物理的性質（抵抗・密度・磁化率など）の相違に着目して、地下の構造や状態を推測する方法である。これには、比抵抗の相違に着目した電気探査（比抵抗法・自然電位法・地磁気地電流法など）、密度の相違に着目した地震探査（弾性波探査）、微動探査、音波探査、重力探査など、磁気異常に着目した磁力探査などがある。本研究ではこの内、電気探査・地下レーダ・微動探査・地震探査（弾性波探査）の4つを夏季と冬季にそれぞれ実施した。

平成2年度に実施した4つの物理探査の結果、本研究には、電気探査が適していることが判明した⁶⁾⁷⁾。平成3年度は、各種電気探査法を実施した結果、寒気という悪条件下での測定、探査効率及び精度等の面から、2極法が有効であることが解った⁸⁾⁹⁾。また、地表付近に凍土が形成されると、電極の接地抵抗が著しく高くなり、測定機器の入力インピーダンスの問題が発生しその点の研究も行った⁸⁾⁹⁾。しかし、冬季の測定が可能になり、比抵抗値が計測されると、今度は $\rho - a$ 曲線上で45度以上の傾斜を示し、従来のカーブマッチング法やリニアフィルタ法¹⁰⁾¹¹⁾などの1次元解析はそのまでは適用できず⁶⁾、新たな簡易解析法を試作した¹²⁾¹³⁾。平成4年度は、凍土用の物理探査機器を試作し、解析ソフト等を作成した¹²⁾。

3. 物理探査の概要

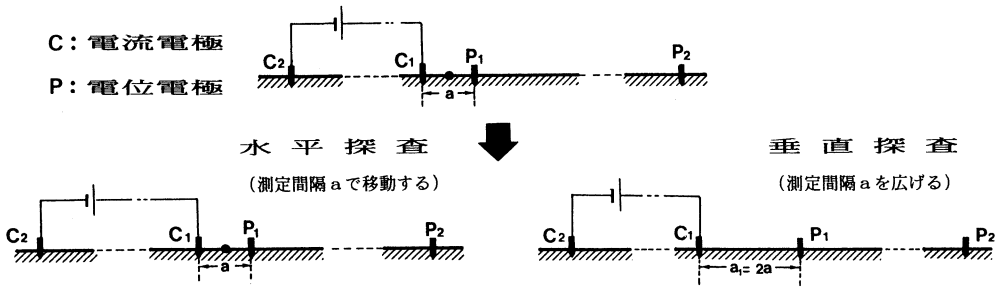
3.1 電気探査

電気探査法には、比抵抗法、誘電分極法、電磁法、地磁気地電流法などがある。本研究で用い

た比抵抗法は、大地に電流を流し、それにより形成される電位から地下の比抵抗分布を解析する方法である。一般に地層の比抵抗は、岩石を構成する鉱物、鉱物粒子間の間隙を満たす水のイオン濃度や温度により異なる。従って、地盤を構成している土、岩石及び鉱物などの電気的性質の差異に着目し、人工的要因によって発生した電位が地表で測定できれば、得られた比抵抗分布から地下構造を推定することができる。

比抵抗法には、電極配置の違いから 2 極法（ポール・ポール法）・3 極法（ポール・ダイポール法）・4 極法（ウェンナ法）・エルトラン電極配置（ダイポール・ダイポール法）・シュランベルジャ法などがある。また、それぞれの方法には、水平的・平面的な比抵抗分布を調べる水平探査法と垂直的な比抵抗変化を調べる垂直探査法がある。本研究で最終的に用いた 2 極法での水平探査・垂直探査の調査概念図を、図－1 に示す。

今回使用した測定システムは、発信器側が横浜電子研究所製 LF-810E 小出力 IP 送信器、受信器側が ONO SOKKI (株) 製フィールド・アナライザ CF-200 で、波形記録は RS-232C を経由してラップトップ型パーソナルコンピュータに記録した。なお、電流は、0.3Hz の交替直流を使用した。



図－1 2 極法の水平探査・垂直探査の調査概念図

3.2 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地表に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¹⁴⁾。ここでは、本研究でも用いた一般的な 2 アンテナ方式（送信アンテナ T と受信アンテナ R を分離した方法）の地下レーダ装置による地下探査について述べる。

測定法には、プロファイル測定とワイドアングル測定とがある。前者は、図－2 に示すように送信アンテナ T と受信アンテナ R の間隔を一定に保ったまま測線上を移動して行う測定方法で、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することができる。一方、後者は、図－3 に示すように送信アンテナ T を 1 点に固定し、受信アンテナ R を移動して行う方法で、観測された地盤中を伝播する電磁波の走時から、地盤内の電磁波伝播速度の分布がもとめられる。

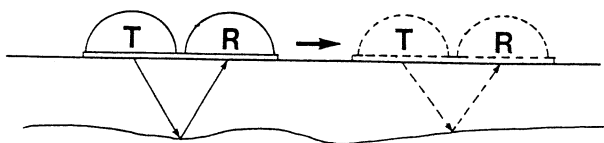


図-2 プロファイル測定の方法

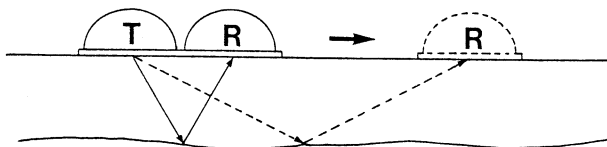


図-3 ワイドアングル測定の方法

この測定で得られた受信波形には、図-4に示すように主として空中直接波 (a), 地中直接波 (d), 地中反射波 (r1, r2...) の位相がみられる。この測定から得られる反射波の走時から地中伝播速度 V ($V1, V2...$) 及び反射面の深さ ($b1, b2...$) が求められる。



土が凍結すると誘電率が変わり電磁波伝播速度が速くなると考えられ¹⁵⁾、凍土が出現した場合の電磁波伝播速度の変化を計測し、凍土・未凍土の境界での反射波を捉える試みを行った。

測定に使用した地下レーダは、応用地質(株)製 GEORADAR- 1 model-2441 で電磁波パルスの中心周波数250MHz、プローブゲイン12dB、フィルタ LPF80

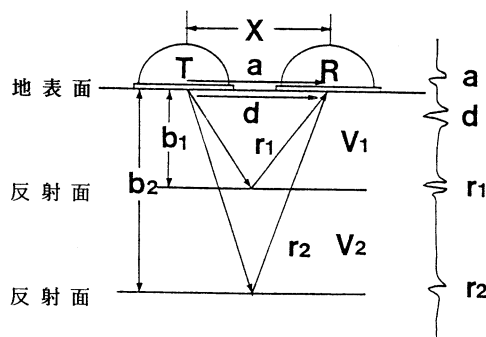


図-4 電磁波の波路と受信波形

3.3 微動探查

私たちが生活している地盤は、絶えず微小な振幅で振動しており、その揺れ方は地盤構成の違いなどで異なる。このような微小な振動の誘因は、交通機関や工場などの操業による常時発生している人工的な振動と火山活動や気象（風、波浪）など自然発生する振動に大別される。

工学的には、測定周波数領域の違いにより0.1～1秒程度の微動を短周期微動、1～10秒程度の微動をやや長周期微動と呼び、それぞれ、その利用が図られてきた。しかし、地下構造解析に対する利用に関しては、いくつかの方法が提案されている¹⁶⁾¹⁷⁾が簡便で工学的に有効な方法はまだ確立されていない。

一般に、常時微動測定により求めた地盤の卓越周波数とその地盤の S 波速度から 1/4 波長則¹⁸⁾

を使って、地盤を2層構造として近似的に求める方法がある¹⁶⁾。さらに斉藤徳美ら^{19) 20)}は、その方法を5 m前後のごく浅層の地盤構成解明に適用した。冬季の凍土層も1 m未満の地表付近に出現するのでこの方法の適用を試みた。

使用した測定機器は、換振器が振動技研(株)製水平動 MTDH-1C が2台、上下動 MTDV-1C が1台の固有周期1秒の速度型地震計で増幅器で増幅した信号を一旦データレコーダに記録し、後日 A/D 変換しコンピュータで FFT 法を用いてパワースペクトル解析した。

3.4 地震探査

この探査は、弾性波探査とも呼ばれ、ハンマや火薬類などで人工的に振源を発生させ、その震源から伝わってくる弾性波を感度の高い地震計(受信機)で検出し、その波の伝わり方の差異から地下構造を推定する方法である。この探査には、屈折法と反射法があり、用いる波には P 波と S 波がある。

寒冷地では、冬季には、土が凍結し堅固になると、その中を伝わる波の速度は速くなる^{21) 22)}。すなわち、地表付近が凍結すると高速度層が出現する。表層部に高速度層が存在する場合の浅層地震探査法としては、S (SH) 波の反射法探査が有効であると考えられる。浅層反射法の研究には、田治米^{23) 24)}などがあり、菊池ら²⁵⁾は、上層に高速度層(舗装表面上の敷石、地固めやアスファルト、コンクリート等)、下層に低速度層がある場合の浅層 SH 波反射法の実験を行い、この探査法の有効性と限界について述べている。菊池らの対象とした速度構造が、凍土が出現する冬季の速度構造に似ており、この S (SH) 波の反射法探査を用い凍土層の探査法を試みた。

地震探査は、応用地質(株)製 McSEIS-170 の24ch を用い、カケヤで角材を起振し行った。

4. 野外実験地の概要

調査は、3 ヶ年間主に帯広畜産大学実験圃場で行った。その調査位置図を図-5(2)に示す。また、図-5(1)には、凍結深計(●, □, ○, ◎)と地中温度計(▲)の設置地点を示す。他に室蘭工業大学構内(旧開発棟と旧応物棟の間の空き地)と登別市のサト岡志別川流域の火山灰裸地斜面でも比抵抗電気探査法を実施した⁸⁾が、ここでは省略する。

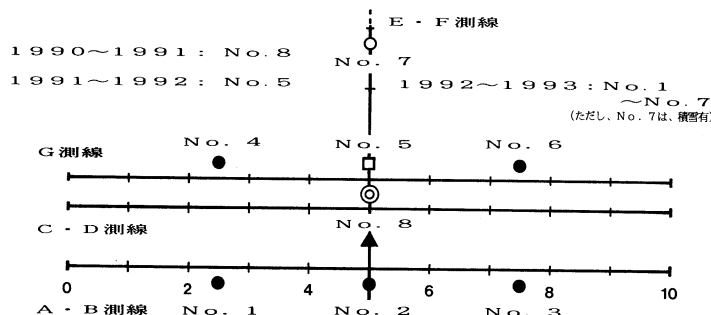


図-5(1) 凍結深計と地中温度計の設置地点

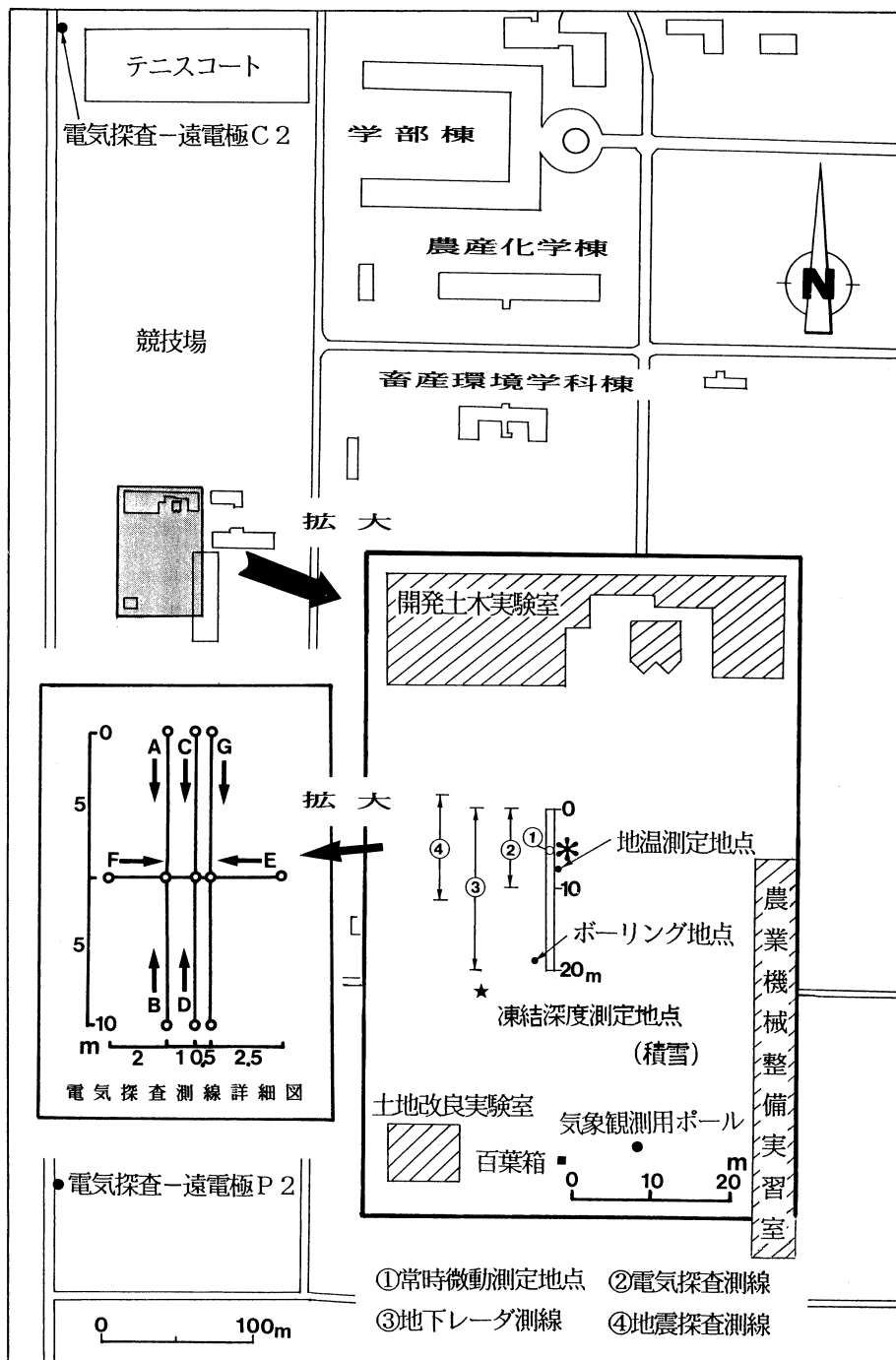


図-5(2) 調査位置図(帯広畜産大学実験圃場)と測線図

5. 調査地の土質と気象観測記録

5.1 調査地の土質

図－5 に示した位置で深度10mの地下水位観測孔用のボーリングを行った。そのボーリングコア試料から判断した土質を表－1 に示す。

地下水位は、深さ4.5m～5.0m程度である。

表－1 調査地の土質

深 度 (m)	色 調	土 質 区 分	記 事
0.00 - 0.40	暗 黄 褐	火山灰質砂質シルト(表土)	上部に若干の根の混入有り
0.40 - 1.15	淡 赤 褐	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
1.15 - 1.70	暗 灰 褐	火山灰質砂質シルト	上層に比べ細砂の混入有り
1.70 - 4.65	暗 灰	砂レキ	レキ最大径50mm 平均径10～30mm 円レキ：砂は細砂
4.65 - 8.40	暗 灰	砂レキ	レキ最大径100mm 平均径30～50mm 円レキ、細砂混入
8.40 - 10.00	暗 赤 褐	シルト混じり砂レキ	レキ最大径100mm 平均径10～30mm

5.2 土質試験結果

図－5 (2) の*地点の地表から深さ0.20～0.30mの土を採取し粒度実験 (JIS A 1204) と比重試験 (JIS A 1202) 及び含水比試験を行った。採取した土は、表－1 から判断すると第1層 (表土) の下部から第2層 (ローム) の上部に相当する。粒度組成は、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 $\frac{2}{3}$ 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。比重 (Gs) は、2.608であった。なお、この土の重量 (自然) 含水比は、この土を採取した1990年11月8日の状態で約64%であった。

5.3 調査地の日平均気温・積雪・日照時間・日射量

付表に1990年11月16日～1991年5月15日、1991年11月16日～1992年5月15日、1992年11月16日～1993年5月15日の調査地の日平均気温・積雪・日照時間 (hr) ・日射量 (Ly) を示す。これらの気象観測データは、帯広畜産大学の土谷富士助教授より提供して頂いた実験圃場 (調査地) の気象月表をまとめたものである。また、凍結深度と地中温度も一部まとめて示す。

6. 調査結果

6.1 電気探査

2極法による電気探査の結果を、図－6～図－29に示す。測定測線及び測線長は図中に記号で示した。例えばA10は、図－5 (2) のA測線方向で測線長10m (0～10m) を測定したことを示す。末尾の+は変形した計測をしたことを示す。

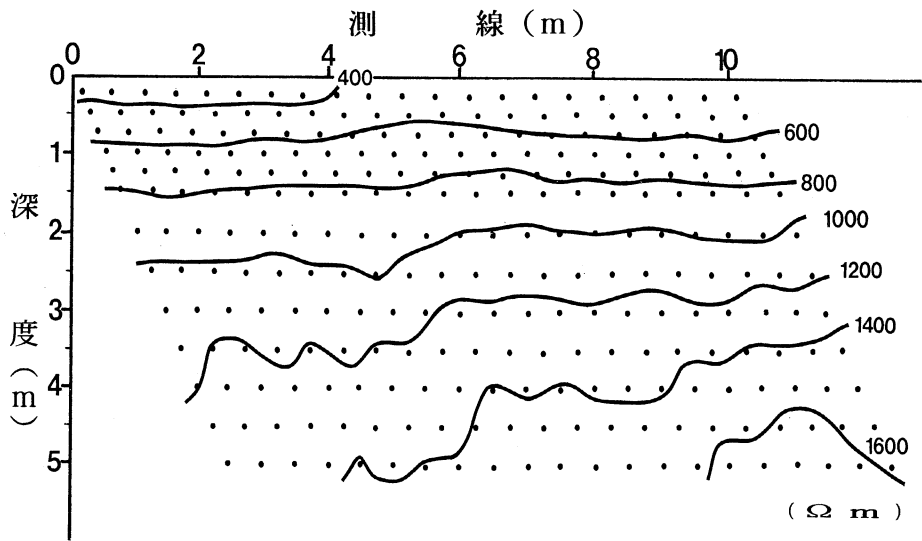


図-6 見掛比抵抗分布図【1990/8/8~8/10】 測線 A10

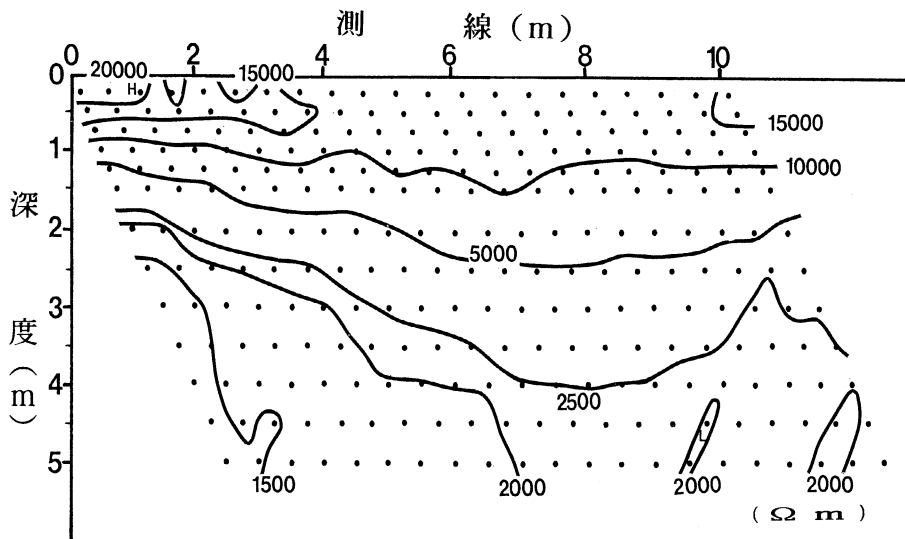


図-7 見掛比抵抗分布図【1991/1/11】 測線 A10

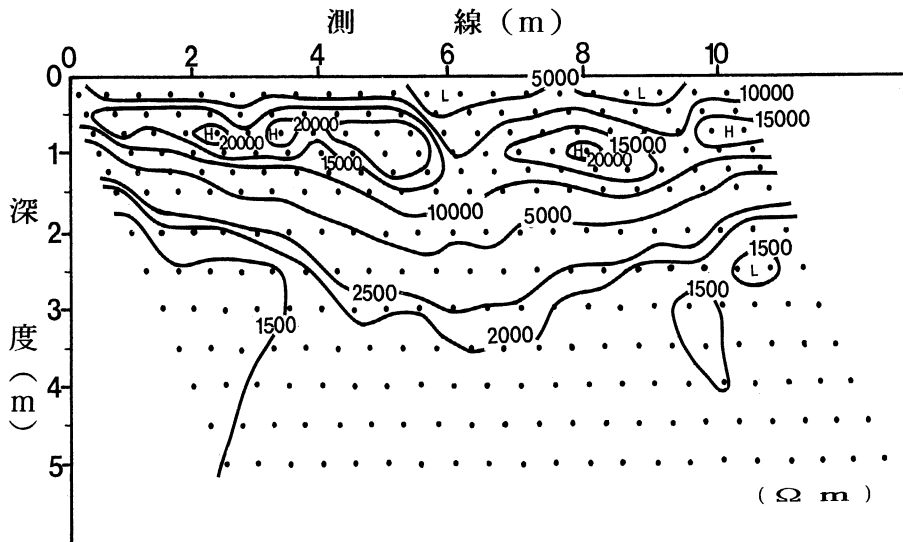


図-8 見掛け抵抗分布図【1991/2/27】(10:00~17:00) 測線 A10

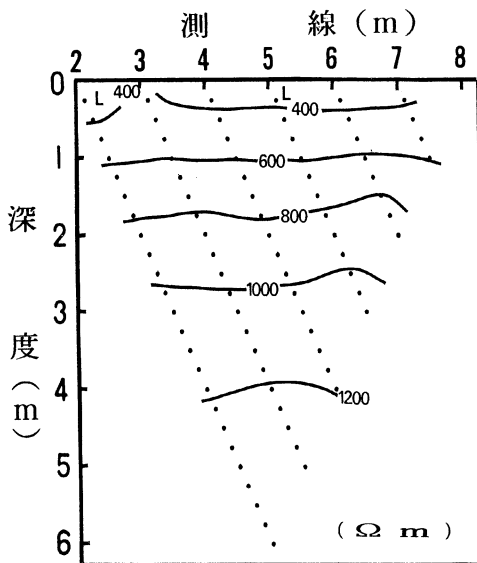


図-9 見掛け抵抗分布図【1991/9/25】 測線 C06

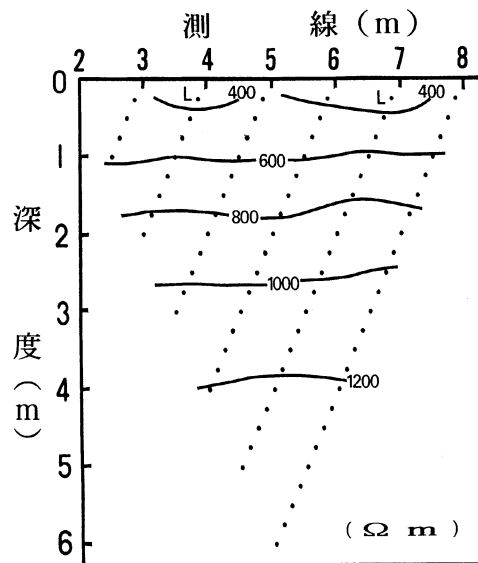
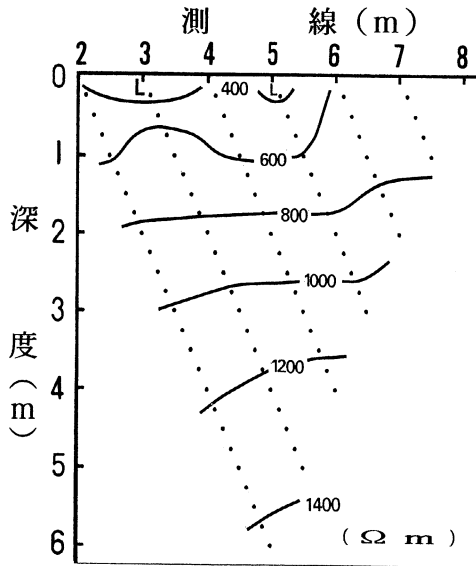
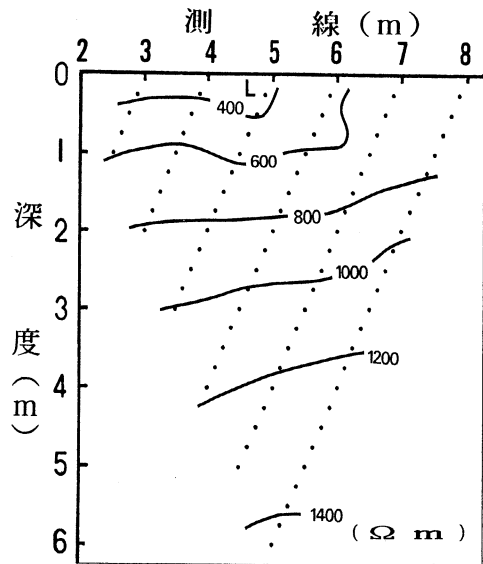


図-10 見掛け抵抗分布図【1991/9/26】 測線 D06



測線 E06
図-11 見掛け抵抗分布図 【1991/9/26】



測線 F06
図-12 見掛け抵抗分布図 【1991/9/26】

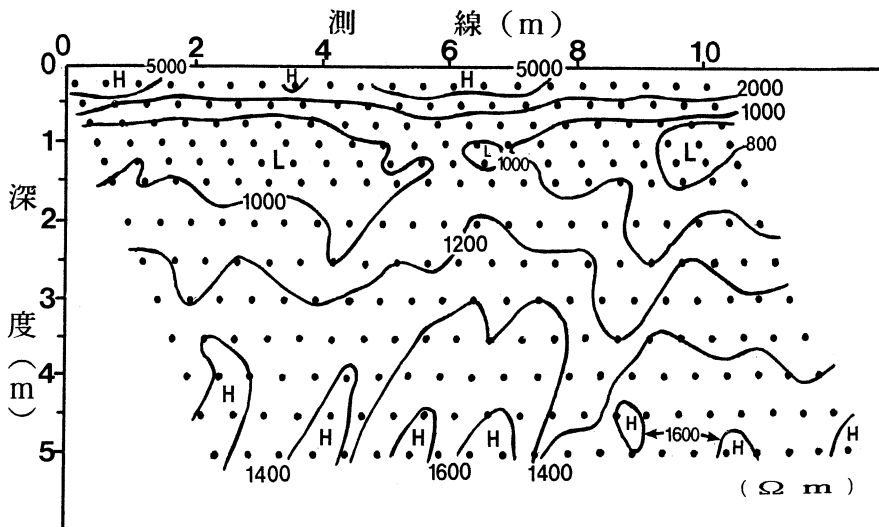
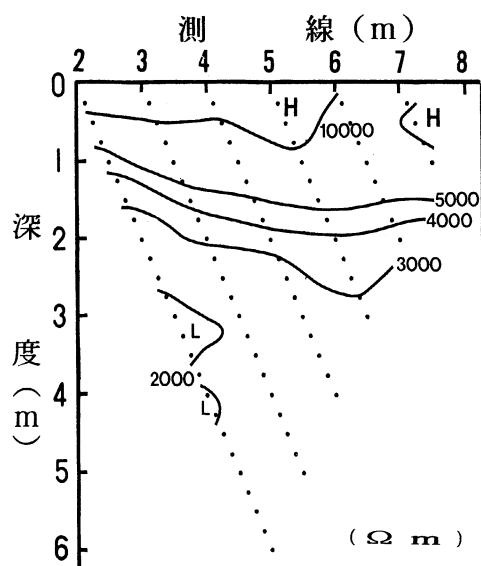
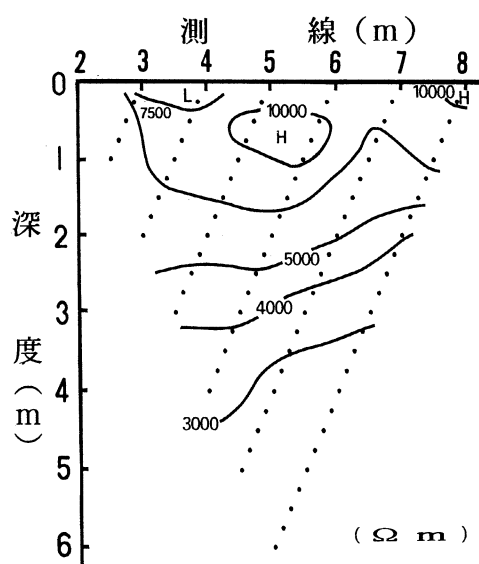


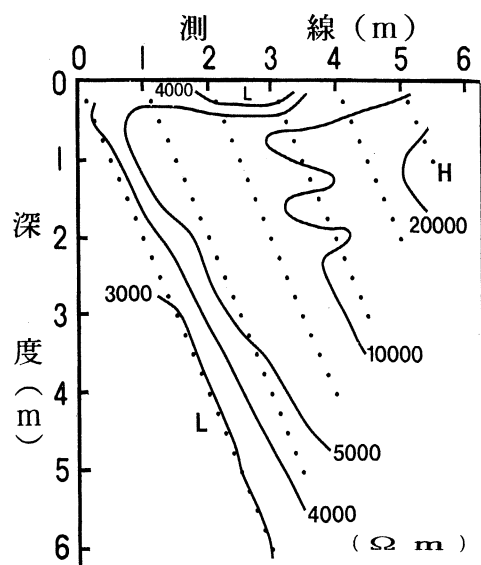
図-13 見掛け抵抗分布図 【1991/12/13】 (10:00~16:00) 測線 A10



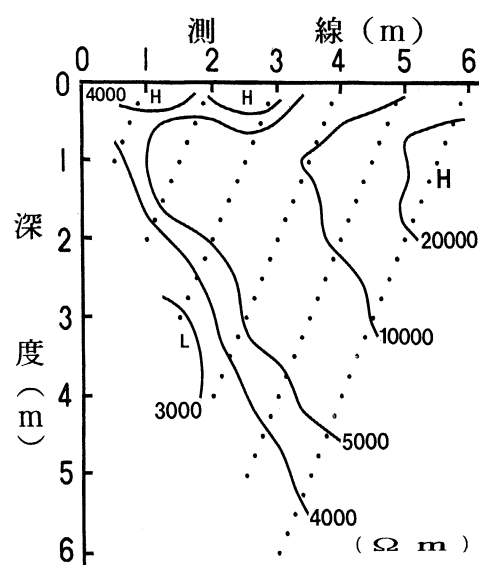
【1992/2/26】(9:25~10:41) 測線 C06
図-14 見掛け抵抗分布図



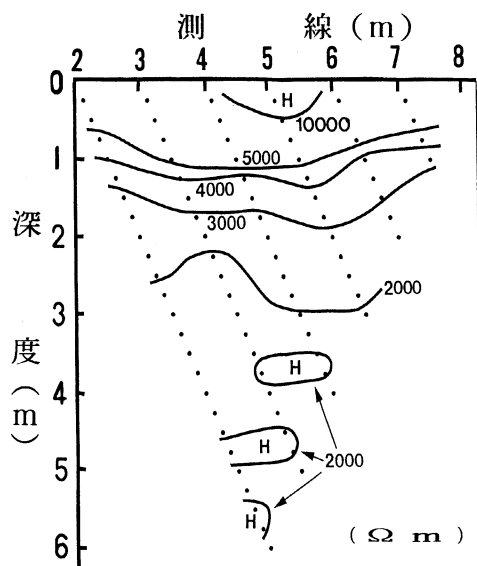
【1992/2/26】(10:53~12:05) 測線 D06
図-15 見掛け抵抗分布図



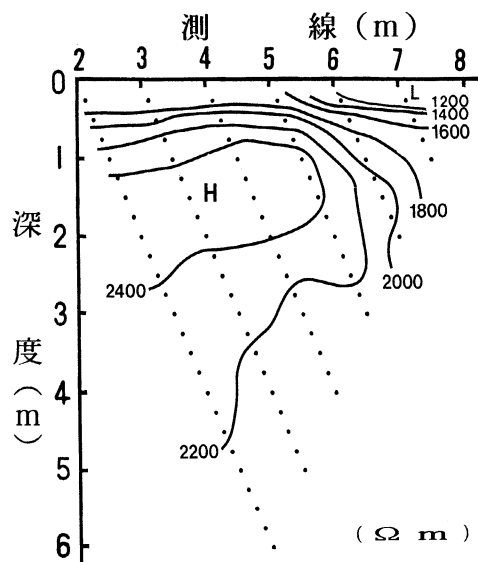
【1992/2/26】(13:03~14:13) 測線 E06
図-16 見掛け抵抗分布図



【1992/2/26】(14:17~15:15) 測線 F06
図-17 見掛け抵抗分布図



【1992/2/29】(8:53~9:57) 測線 C06
図-18 見掛比抵抗分布図



【1992/3/27】(10:05~13:26) 測線 C06
図-19 見掛比抵抗分布図

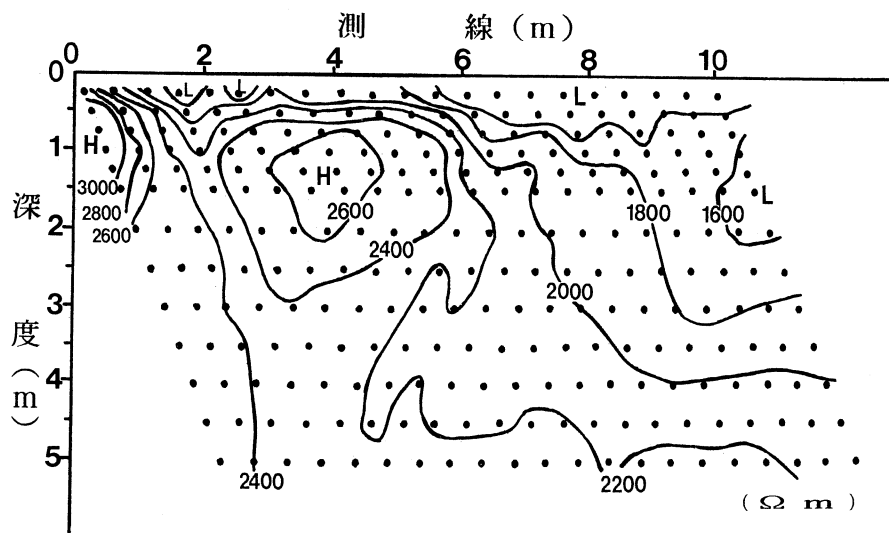
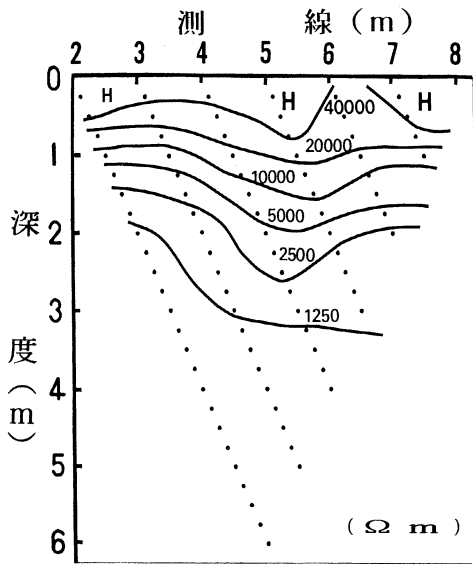
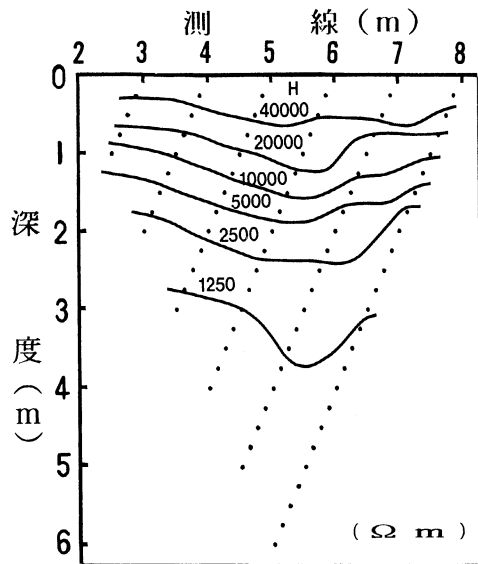


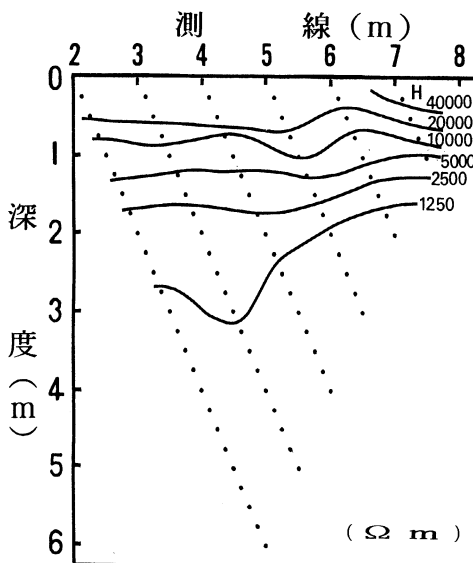
図-20 見掛比抵抗分布図 【1992/3/26】(11:10~15:47) 測線 C10



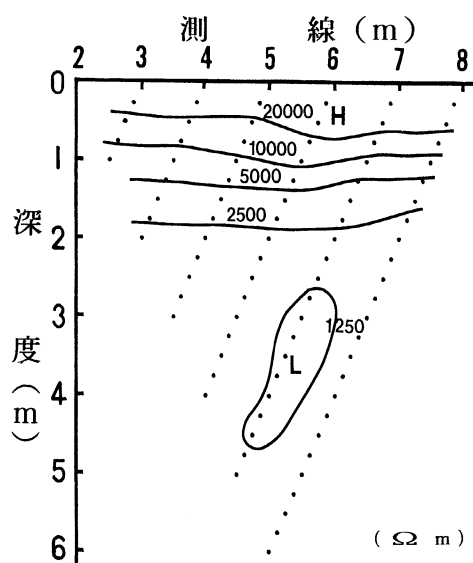
【1993/1/22】(10:10~14:11) 測線 A06
図-21 見掛け抵抗分布図



【1993/1/22】(14:25~15:56) 測線 B06
図-22 見掛け抵抗分布図



【1993/1/22~23】測線 C06
(16:15~17:01; 11:30~12:07)
図-23 見掛け抵抗分布図



【1993/1/21】(13:30~16:03) 測線 D06
図-24 見掛け抵抗分布図

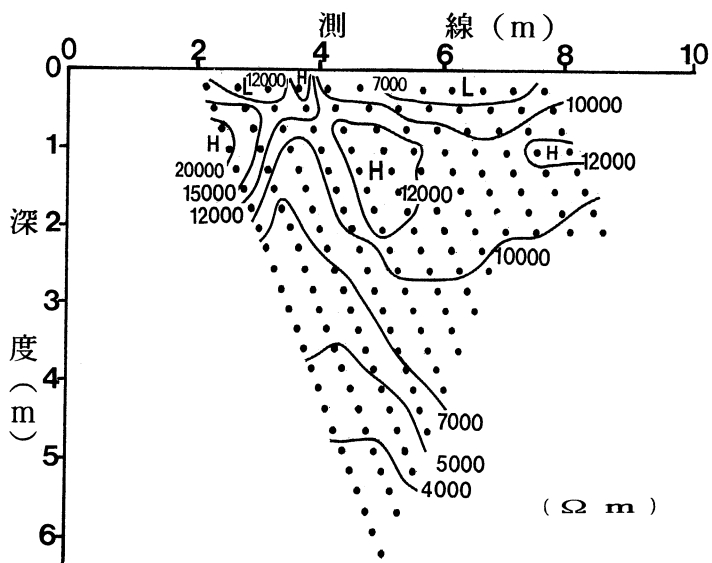


図-25 見掛比抵抗分布図【1993/3/2】(11:15~15:20) 測線 A06+

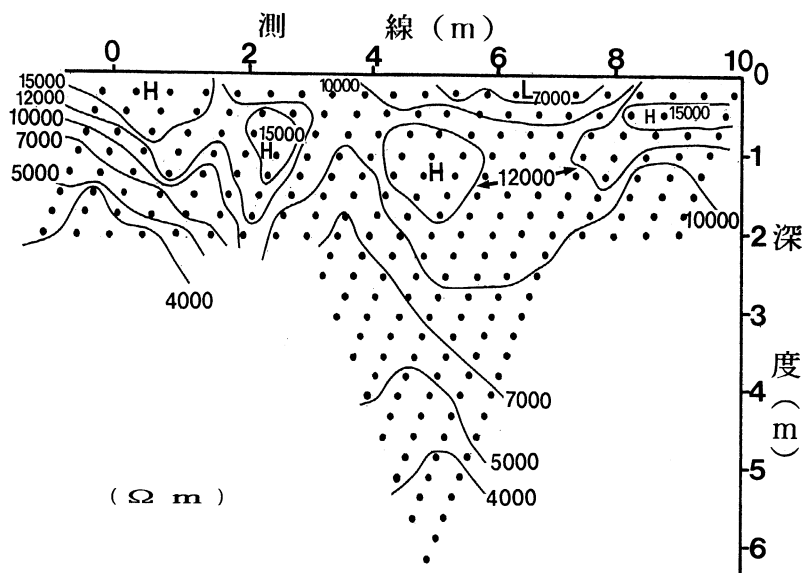


図-26 見掛比抵抗分布図【1993/3/3】(15:24~19:02) 測線 B10+

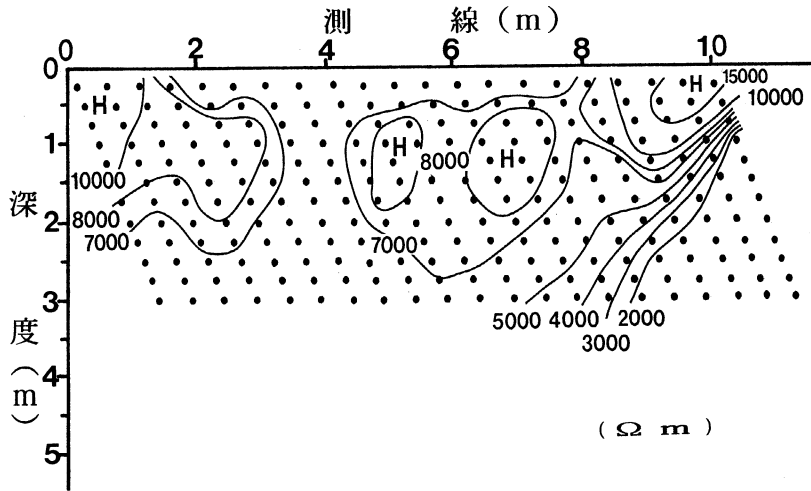
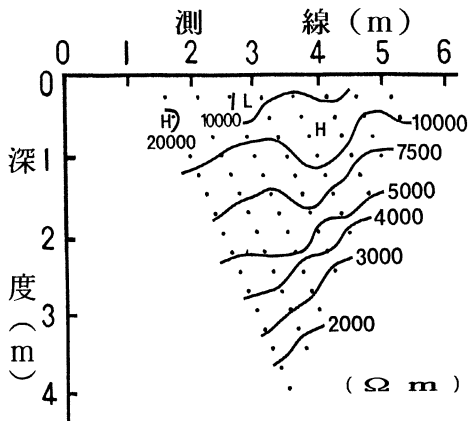
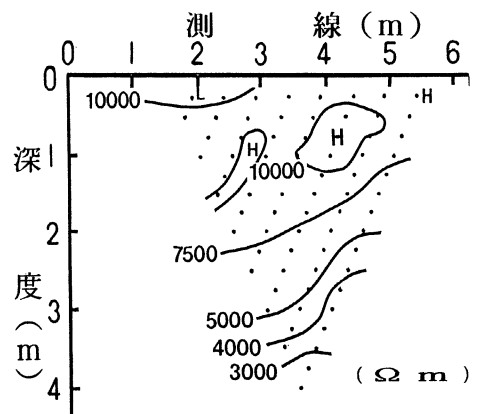


図-27 見掛け抵抗分布図【1993/3/5】(12:22~15:10) 測線 G10+



【1993/3/3】(9:23~10:25) 測線 E04+
図-28 見掛け抵抗分布図



【1993/3/3】(10:25~11:30) 測線 F04+
図-29 見掛け抵抗分布図

6.2 地下レーダ

図-30, 図-31にそれぞれ夏季1990年8月9日と冬季1991年1月8日のプロファイル測定の結果を示す。測定は, 図-5(2)の③の区間で行ったが, ここでは, 0~10mの記録を示す。なお, 測定レンジは100nsec, アンテナ間隔は0.55mである。図-32, 図-33にそれぞれ夏季1990年8月9日と冬季1991年1月8日のワイドアングル測定の結果を示す。測定は, 図-5(2)の③区間の10~8mと18~16mで行ったが, ここでは, 10~8mの記録を示す。

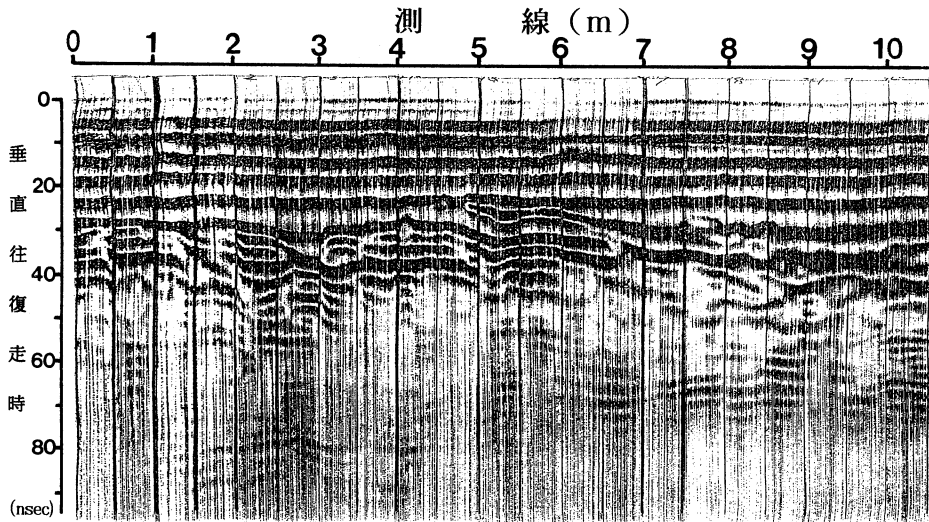


図-30 プロファイル測定記録 (1990/8/9)

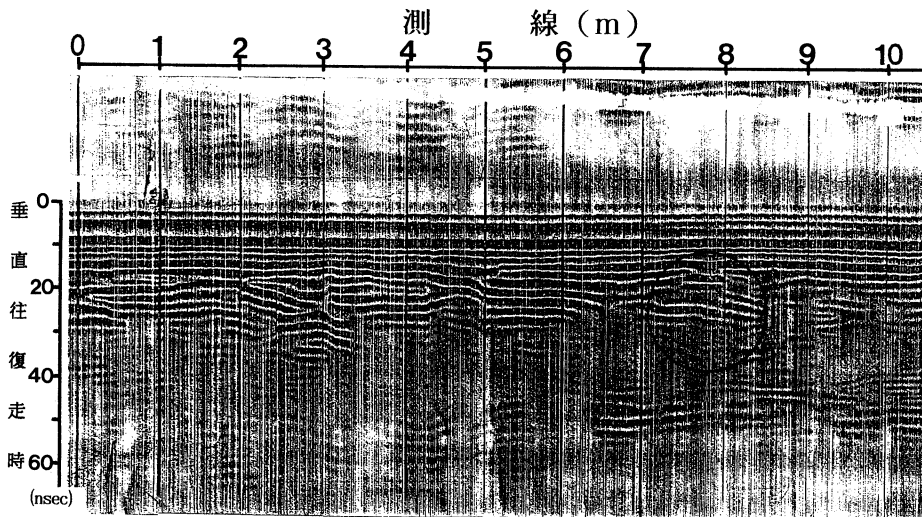


図-31 プロファイル測定記録 (1991/1/8)

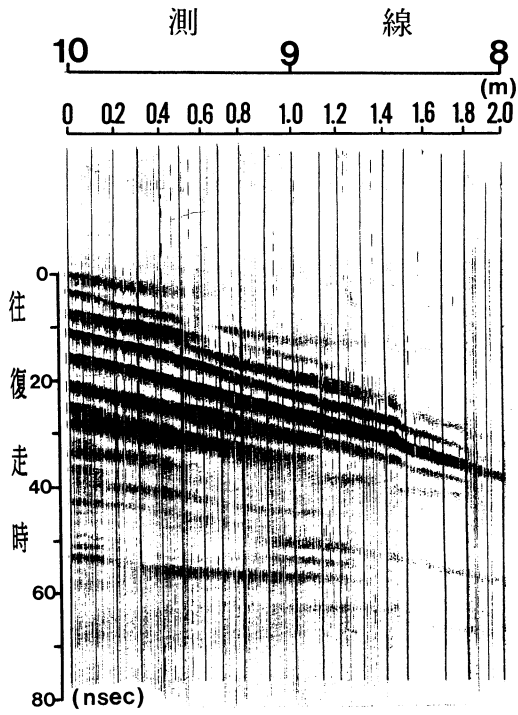


図-32 ワイドアングル測定記録 (1990/8/9)

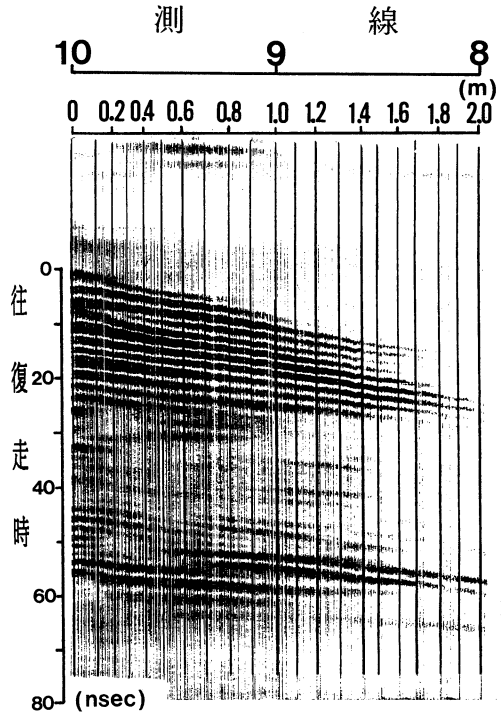
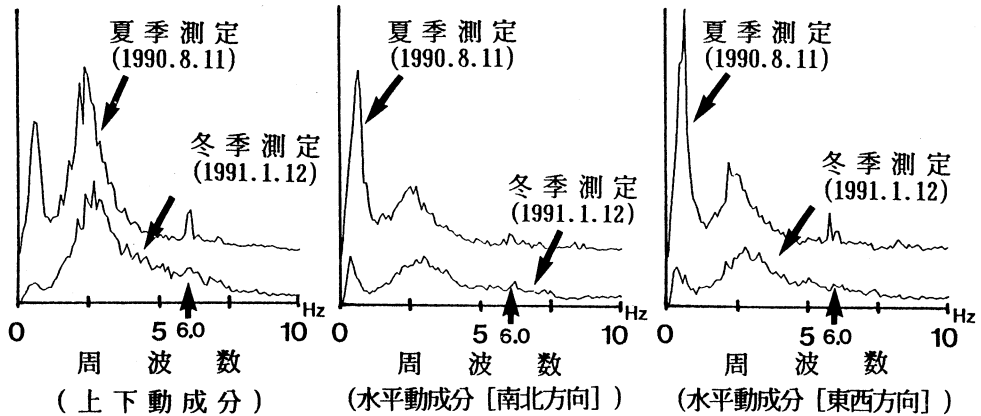


図-33 ワイドアングル測定記録 (1991/1/8)

6.3 微動探査

測定は、図－5（2）の①の地点で夏季1990年8月11日と冬季1991年1月12日の昼間行った。換振器は、上下動・水平動〔南北方向〕・水平動〔東西方向〕の3台同時に設置し、測定時間は、約20分だった。図－34に、夏季・冬季の卓越周期分布図を示す。



図－34 夏季・冬季の卓越周期分布図

6.4 地震探査

測定は、夏季1990年8月9日と冬季1991年2月26日行った。夏季は屈折法（S波：地震計間隔0.5m）、冬季は反射法（SH波：地震計間隔0.25m）を行った。夏季は、波形の記録が取れたが、冬季は、反射波が記録できなかった。ここでは、記録波形は、省略する。

7. 考 察

平成2年度の測定（図－6～図－8参照）によって電気探査が凍土を捕えるのに有効な方法であることが判明した⁶⁾⁷⁾ので、平成3年度からは、電気探査に絞った調査研究を行った。したがって、以下の考察も電気探査が他の3方法に比べ3ヶ年間の結果をふまえたものになった。

7.1 電気探査

7.1.1 垂直解析の問題点と $\rho - a$ 曲線のタイプ分け

結果に示した水平探査データ（見掛け抵抗値）を垂直探査データに変換し²⁶⁾、その結果から垂直解析を行った。凍土層を定量的に解析するために、水平多層を仮定したリニアフィルタ法¹¹⁾による1次元解析を行った結果の例を図－35に示す⁶⁾⁷⁾。なお、解析解を一義的に求めることは困難であるため、最も実測値との誤差が小さくなるように構造パラメータ（比抵抗値・層厚）を決めた。しかし、この解析法では、1991年2月の解析が出来なかった。これは、表層部の比抵抗変化が大きく $\rho - a$ 曲線上で45度以上の傾斜を示すと、従来のカーブマッチング法やこの方法で

は1次元解析ができないことが解った。この他2・3次元解析法²⁸⁾²⁹⁾として有限要素法 (FEM法) が考えられたが、 $\rho - a$ 曲線上で45度以上の傾斜を示す場合は適用出来なかった。

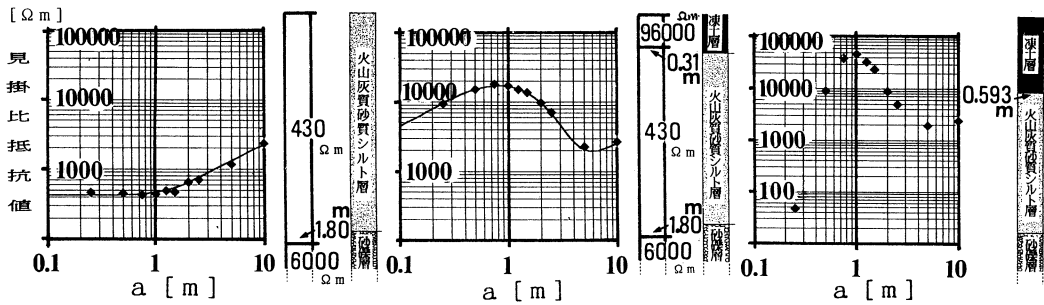


図-35 測線No.1の5m地点での解析結果 (図中の単位のない数値の単位は Ωm)

そこで計測された $\rho - a$ 曲線の形状が凍土層・未凍土層・融解層の垂直的な組み合わせによると仮定した場合、その比抵抗値を表層から ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 とおけば、図-36に示すようにいわゆるKタイプ ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$), Qタイプ ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$), Hタイプ ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), Aタイプ ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$) の4タイプに分類できる³⁰⁾³¹⁾³²⁾。

タイプ	K	Q	H	A
	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$
形状				

図-36 $\rho - a$ 曲線の形状によるタイプ分け

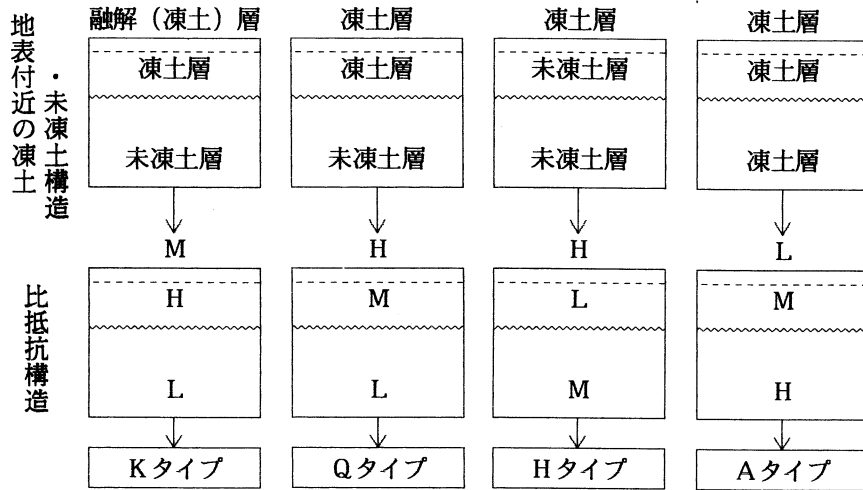
0℃を境に温度が低下すれば比抵抗値は高くなる⁸⁾⁹⁾³³⁾ので、融解層は、地中に分布する凍土層の温度よりも高く、凍土層より低い比抵抗値を示し、未凍土層の比抵抗値は0℃以上を示すので、凍土層より低い比抵抗値を示す。以上のことを概念的に示すと、図-37になる。

なお、これまでの帯広畜産大学実験農場での測定記録をタイプ分けし、地中温度記録などを加味して整理すると以下のことが言える¹²⁾¹³⁾。

- 地中温度が地表温度よりも低い場合、Kタイプになることが多い。
- 地中温度が地表温度とほぼ同じあるいはそれより高い場合、Qタイプになることが多い。

○電極間隔よりも凍土層の層厚が薄い場合, Hタイプになることが多い。

○Aタイプは, 調査した3ヶ年間では測定されなかった。



(H : 高比抵抗、M : 中比抵抗、L : 低比抵抗)

図-37 凍土・未凍土・融解層と比抵抗構造及びタイプ分けの関係

表-2 解析結果

測定・観測月	'91/ 1	'91/ 2	'91/12	'92/2a	'92/2a	'92/3a	'92/3b	'93/3a	'93/3b
凍結深度(m)	0.364	0.593	0.122	0.669	0.666	0.626	0.626	0.632	0.632
融解深度(m)	-----	-----	-----	-----	-----	0.105	0.110	-----	-----
ピーク位置(m)	0.603	0.867	-----	-----	0.658	1.021	1.087	1.000	0.909
解析深度(m)	0.421	0.569	0.176	0.658	0.688	0.652	0.687	0.641	0.592
形状タイプ	K	K	H	Q	K	K	K	K	K

7.1.2 簡易解析法(曲線形状法)

この解析法は, 凍土の真の比抵抗値を求めるのではなく, 測定された $\rho-a$ 曲線の形状と凍結深計の観測結果の相関関係から補正係数(実験式)を求め, 対象とする凍土層の深度を求める方法である¹²⁾¹³⁾。表-2に代表的な解析結果を示す。この方法が, 調査地以外の土質にも適用できるかは, 今後データを蓄積することによって確かめる必要があるが, 平成3年度までの補正係

数を使って平成4年度の解析を行った結果は表-2示す程度の誤差だった。

7.2 レーダ法

7.2.1 プロファイル測定

図30と図-31の記録波形をコンピュータ処理し測線0～20m区間の結果を図-38に示す。図-38の夏季の結果から、空中直接波(a)、地中直接波(d)、地中反射波(r1)、地中反射波(r2)は、反射時間8nsec付近、16nsec付近、24nsec付近、40～60nsecにそれぞれ認められる。24nsec前後の地中反射波(r1)は、測線全体に一樣に連続している。冬季の結果から、空中直接波(a')、地中直接波(d')、地中反射波(r1')、地中反射波(r2')は、反射時間1.6nsec付近、10nsec付近、18nsec付近、35～60nsecにそれぞれ認められる。夏季と同様18nsec前後の地中反射波(r1')は測線全体に一樣に連続している。

一方、夏季に認められなかった多重反射が測線7～8mにみられ反射時間18～35nsecを示す。この多重反射(図-31の丸印)は、1990年の秋に測線7.6m付近の地中に設置した直径10cm、長さ100cmのVPエンビ管の反射と推測される。このエンビ管は、長さ方向が水平で測線に直角でその上面が地表から50cmになるように設置された。測定日の凍結深が、34.8cmなので凍結・未凍結面での反射があればこの多重反射の反射時間より短い反射時間に夏季には無い地中反射波が存在する。しかし、それに相当する地中反射波を(r1')とすると、夏季の(r1)に対応する反射波が存在しないことになり矛盾する。よって、ここではとりあえず凍土・未凍土での反射波は捕らえられていないと考える。この点に関しては、夏季の地中反射波(r1)及び冬季の地中反射波(r1')が表-1の50cm以浅のどの層に対応するかの問題も含めて今回の調査では、明確にできなかった。今後は、更に凍結深が深い場合にこの点を確認する必要がある。

しかし、地中直接波(d)及び地中反射波(r1)が現れる反射時間は、夏季より冬季の方が短くなっている。これは、土の凍結により表層部の物性が変化し、凍土層の電磁波速度が速くなったと判断される。また、地中反射波(r2)の再現性は季節を問わず良く(図中の破線の下側)、空中直接波を反射時間の原点とした場合、地中反射波(r2)の反射時間がほぼ等しくなることから、土の凍結による物性の変化はこの反射面まで達していないと判断できる。

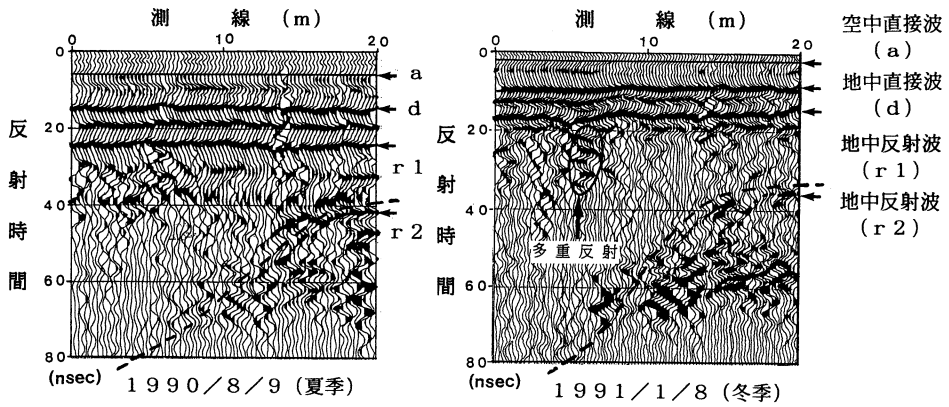


図-38 波形によるプロフィール記録の表示

7.2.2 ワイドアングル測定

図-5(2)の③の10~8mと18~16m地点で行った夏季, 冬季の測定結果から算出した各波形の電磁波伝播速度を表-3に, 走時曲線を図-39, 図-40に示す。

表-3 各波形の電磁波伝播速度

測 定 時 期		1990年 8月			1991年 1月		
測 定 位 置		10m	18m	平均	10m	18m	平均
波 形 の 種 別	地中直接波	7.8	6.4	7.1	10.7	10.9	10.8
	地中反射波(r1)	6.2	6.0	6.1	9.1	10.5	9.8
	地中反射波(r2)	5.8	5.8	5.8	6.5	6.6	6.6

表中の数値の単位: cm/nsec

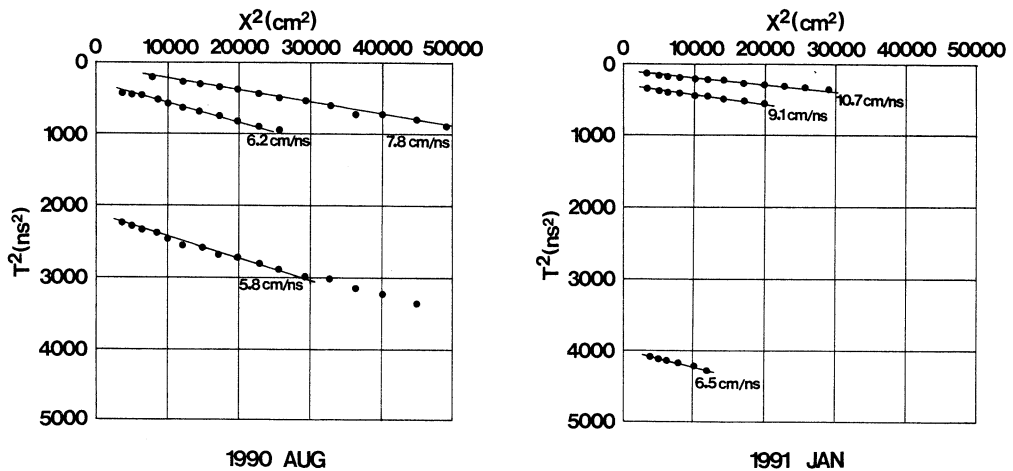


図-39 伝播波の走時曲線 (10m 地点)

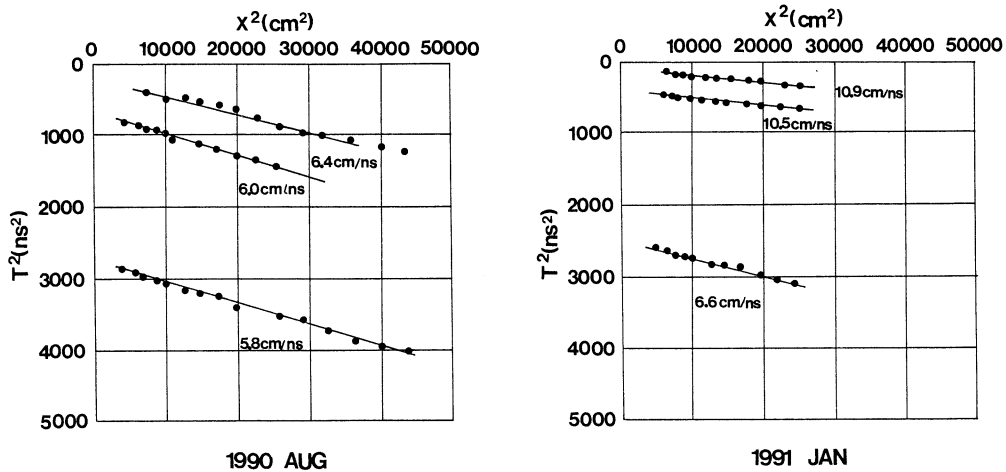


図-40 伝播波の走時曲線 (18m地点)

表-3に示したように夏季と冬季では、各波形の電磁波伝播速度に変化が見られ、地中直接波では約1.5倍、地中反射波 (r1) では約1.6倍、地中反射波 (r2) では約1.1倍の速度増加が認められる。しかし、ワイドアングル測定でも、凍結した層の境界による反射は補らえることはできなかった。

7.3 微動探査

図-34から判る点をまとめると ①夏季、冬季とも見られる0.6Hz 付近の卓越周波数は、いわゆる前述した脈動で調査地の深い地下構造を反映していると思われる。②次に卓越している2.5Hz 付近は、夏季、冬季とも見られ調査地の卓越周波数と判断できる。③6.0Hz 付近も、②同様に夏季、冬季とも見られるがスペクトルのピークが鋭く調査地付近の機械ノイズの可能性がある。

①～③とも夏季になく、冬季に出現する様な波は測定されなかった。従って、凍土・未凍土の境界は、この探査法では捕らえられなかったと考えられる。

7.4 地震探査

この方法では、冬季に観測波形が全く記録できなかったため、凍土・未凍土の境界は捕らえられなかった。この原因を考えると上層の高速度層 (おそらく凍土) を伝播する直達波が優勢で反射波が確認できなかったか、凍土・未凍土の境界面の存在が明確でないか仮に存在してもその面が浅いため反射波を捕らえられなかった等が考えられるが想像の域をでない。なお、この方法でSH 波の反射波を捕らえるには、震源の工夫や地震計 (ピックアップ) の小型化等の技術的問題を解決する必要があることが判った。

8. おわりに

本研究は，寒気の中でリアルタイムで簡便に凍結深度を把握できる機器システムの開発することを目的に行った。実際には，電気探査で凍土層を調査する場合の色々な問題点が明かになった。本報告では，その点を十分に示せなかったが，問題点と今後の課題を以下に要約し終わりたい。

- (1) 電気探査は，工学的観点から広域に凍土層深度を簡便に調査できる物理探査法である。
- (2) 土は，0℃以下（凍土）で比抵抗が常温の数倍～数100倍大きい。
- (3) 凍土の比抵抗が大きいので電極の接地抵抗も大きく設置方法や電極形状の改良が更に必要。
- (4) 測定器の入力インピーダンスは，高い方が良いが10MΩ程度で計測は可能。
- (5) 一般的な垂直解析法は，凍土層解析では解析不能場合があり，新たな解析法が必要。
- (6) 簡易解析法として， $\rho - a$ 曲線の形状から凍土層の厚さを求める曲線形状法を提案した。

今後は，以上の点を一応考慮した試作機器を用いて，夏季は踏査が困難な湿地や軟弱地盤でも冬季に表層部が凍結する地域での冬季の地下構造の把握，凍結工法での凍結結果の確認，寒冷地の液化しやすい砂地盤での凍結深度の把握等を行いたい。

また，数100mの探査深度を要求されるシベリアの凍土層の把握に使える技術の開発と探査機器の改良を行いたい。

最後に本研究で得られた凍土の電氣的性質や探査技術が，上記の目的以外にも利用され寒冷地特有の問題の解決に役立つことを期待したい。

謝 辞：本研究を行うにあたっては，色々な方々の協力を頂いた。北海道大学低温科学研究所の福田正己教授，石崎武志助手の両氏には有意義なご助言を頂いた。帯広畜産大学の土谷富士夫助教授には，実験圃場の使用と貴重な気象データの使用等の研究協力，開発土木研究室の学生の方々には3ヶ年にわたる除雪等の協力を頂いた。また同大学物理学教室の小柳敏郎教授と山藤律子嬢には，研究室の使用や宿泊の便宜を始めとして数々の協力を頂いた。応用地質㈱の村上弘行・宮尾浩一の両氏には地下レーダの操作と解析の協力を頂いた。ズゴーシャの渡辺 博氏及び同社の環境土質研究所の長田所長を始め各位には，地質ボーリングや地震探査等の便宜をして頂いた。本研究期間中に室蘭工業大学大学院に在学していた吉田 透君（現川崎地質㈱）と阿部竜也君（現日特建設㈱）を始め多くの大学院・学部の学生諸氏には，寒気の中での計測やデータの整理の協力を頂いた。以上の各位とそれ以外の色々な方々の協力で本研究が遂行できたことを，記して感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 木下誠一：凍土の物理学，森北出版株式会社，pp.13 (1982)
- 2) 八鍬利助：農業物理学，養賢堂，pp.75～85 (1961)
- 3) 山田 忍：土壌の生成，分類，調査とその活用，養賢堂，pp.62～65 (1968)
- 4) Tomoko NAKAYAMA：Measurement of Methane Flux in Tiksi, Siberia, Proceedings of First Symposium on Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1992, pp.110～112 (1993)
- 5) 日本雪氷学会北海道支部：雪氷調査法，北海道大学図書刊行会 (1991)
- 6) 和気 徹・高見雅三・武藤 章・後藤典俊・河内邦夫：凍土用リアルタイム処理物理探査機器の開発研究，平成2年度共同研究報告書（課題番号17），pp. 1 -33 (1991)
- 7) 河内邦夫・武藤 章・後藤典俊・高見雅三・和気 徹・土谷富士夫：凍土層形成に対する物理探査の適用例ー帯広畜産大学実験圃場の場合ー，北海道の雪氷，No.10, pp.32～35 (1991)
- 8) 河内邦夫・吉田 透・後藤典俊・武藤 章・高見雅三・和気 徹・土谷富士夫・小柳敏郎：電気探査における凍土層調査例，物理探査学会第86回学術講演会講演論文集，pp.384～389 (1992)
- 9) 和気 徹・高見雅三・武藤 章・後藤典俊・河内邦夫：凍土用リアルタイム処理物理探査機器の開発研究，平成3年度共同研究報告書（課題番号8），pp. 1 -21 (1992)
- 10) GHOSH,D.P.：Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally earth, Geophys. Prosp.,19,pp.769～775 (1971)
- 11) O'Neill,D.J. and Merrick,N.P.：A digital linear filter for resistivity sounding with a generalized electrode array, Geophys. Prosp.,32,pp.105～123 (1984)
- 12) 和気 徹・高見雅三・武藤 章・後藤典俊・河内邦夫：凍土用リアルタイム処理物理探査機器の開発研究，平成4年度共同研究報告書（課題番号5），pp. 1 -31 (1993)
- 13) 高見雅三・和気 徹・河内邦夫・後藤典俊・武藤 章：表層における電気探査解析についてー2極法による凍土解析を例としてー，日本情報地質学会，第4回講演会ジョイントフォーラム '93, pp.11～12 (1993)
- 14) 原 徹夫・坂山利彦：地盤調査に対する地下レーダーの適応性について，応用地質調査事務所年報 No.5, pp.77～91 (1983)
- 15) N.Maeno, T.Araki, J.Moore and M.Fukuda：Dielectric Response of Water and Ice in Frozen, physics and Chemistry of Ice,pp.381～386 (1992)
- 16) 野越三雄・乗富一雄：長・短周期微動と地下構造について，物理探査 vol.32, No.3,pp.17～28 (1979)
- 17) 岡田 廣・松島 健・森谷武男・笹谷 努：広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法，

物理探査 vol.43, No.6, pp.402~417 (1990)

18) N.A.Haskel : The Dispersion of Surface Wave on Multi-Layered Media, Bull. Seis. Soc. Ame, vol.43, (1953)

19) 齊藤徳美・阿部 司・小林直太・中島直吉・中村 操・野越三雄・毎熊輝記：秋田県能代市における地盤特性 (1), 物理探査 vol.41, No.1, pp.47~63 (1988)

20) 齊藤徳美・阿部 司・小林直太・中島直吉・中村 操・野越三雄・毎熊輝記：秋田県能代市における地盤特性 (2), 物理探査 vol.41, No.1, pp.64~75 (1988)

21) 福田正己・井上正則：凍土の動的性質について I, 低温科学物理篇第31号, pp.245~259 (1973)

22) 井上正則・木下誠一：凍土の圧縮強度と動的性質に, 低温科学物理篇第33号, pp.243~253 (1975)

23) 田治米鏡二：浅層反射記録の解析法, 物理探査 vol.29, No.3, pp.183~188 (1976)

24) 田治米鏡二：浅層反射記録の解析法 (続), 物理探査 vol.30, No.2, pp.57~63 (1977)

25) 菊池真市・狐崎長狼：舗装地表面上の浅層 SH 波反射法における反射波の特徴, 物理探査 vol.39, No.5, pp.11~23 (1986)

26) 志村 馨：電気探査法, 昭晃堂, pp.29~30 (1965)

27) 高見雅三・和気 徹・河内邦夫・後藤典俊・武藤 章・吉田 透・阿部竜也・土谷富士夫：物理探査による凍土層解析の試みー帯広畜産大学実験圃場の場合ー, 物理探査学会第85回学術講演会講演論文集, pp.345~350 (1992)

28) 佐々木 裕：比抵抗垂直探査における 2 次元構造の自動解析 (I), 物理探査, 第34巻, pp.344~350 (1981)

29) 佐々木 裕：比抵抗垂直探査における 2 次元構造の自動解析 (II), 物理探査, 第34巻, pp.422~434 (1981)

30) 大野博教：石油・ガス鉱床の電気探査 (その 1), 地質調査所月報, 第16巻, 第10号, pp.44~69 (1965)

31) 大野博教：石油・ガス鉱床の電気探査 (その 2), 地質調査所月報, 第16巻, 第11号, pp.61~80 (1965)

32) 大野博教：石油・ガス鉱床の電気探査 (その 3), 地質調査所月報, 第16巻, 第12号, pp.40~74 (1965)

33) 吉田 透・竹内直樹・河内邦夫・武藤 章：土の凍結が電気比抵抗値に及ぼす影響について, 開発技報, 第35号, pp.15~22 (1993)

凍土用リアルタイム処理物理探査機器の開発研究

付表 1

1990 - 1991

1991 - 1992

1992 - 1993

月日	平均(℃)	日照(hr)	日射(Ly)	積雪(cm)	月日	平均(℃)	日照(hr)	日射(Ly)	積雪(cm)	月日	平均(℃)	日照(hr)	日射(Ly)	積雪(cm)
11/16	2.6	5.5	67.0	0	11/16	0.8	8.7	225.0	0	11/16	3.5	6.8	235.0	0
11/17	4.5	8.7	91.0	0	11/17	0.7	2.9	153.0	0	11/17	1.9	5.0	190.0	0
11/18	-0.1	2.0	41.0	0	11/18	2.1	8.4	198.0	0	11/18	1.6	6.3	221.0	0
11/19	3.2	1.6	37.0	0	11/19	0.5	3.2	112.0	0	11/19	-0.7	3.8	153.0	0
11/20	4.8	0	1.0	0	11/20	4.7	6.6	177.0	0	11/20	3.4	1.0	105.0	0
11/21	1.8	6.8	76.0	0	11/21	2.4	8.3	208.0	0	11/21	-0.5	4.8	183.0	0
11/22	1.5	5.8	69.0	0	11/22	2.0	3.4	158.0	0	11/22	-0.3	5.6	210.0	0
11/23	2.0	7.5	80.0	0	11/23	4.1	5.0	153.0	0	11/23	4.1	1.9	110.0	0
11/24	3.0	7.6	74.0	0	11/24	-0.6	4.6	167.0	0	11/24	4.1	7.0	195.0	0
11/25	3.9	2.0	34.0	0	11/25	-2.5	6.6	179.0	0	11/25	4.2	6.4	185.0	0
11/26	4.6	0	0	0	11/26	2.7	8.3	186.0	0	11/26	-0.8	6.3	197.0	21.0
11/27	6.5	8.0	71.0	0	11/27	1.5	5.9	158.0	0	11/27	-5.6	7.5	228.0	15.0
11/28	2.5	0	14.0	0	11/28	5.1	6.5	151.0	0	11/28	-4.1	7.3	124.0	13.0
11/29	-0.4	6.2	64.0	0	11/29	4.3	1.1	88.0	0	11/29	2.4	2.4	73.0	9.0
11/30	0.1	0.7	12.0	0	11/30	3.7	0	36.0	0	11/30	1.3	8.1	212.0	1.0
12/01	6.7	0	0	0	12/01	2.9	5.9	139.0	0	12/01	-2.6	0	46.0	0
12/02	6.6	2.9	33.0	0	12/02	0.8	5.8	158.0	0	12/02	1.6	6.9	200.0	0
12/03	2.3	4.9	45.0	0	12/03	0	0.4	76.0	0	12/03	0.5	7.4	210.0	0
12/04	2.4	8.3	71.0	0	12/04	1.0	7.9	174.0	0	12/04	-2.5	7.3	198.0	0
12/05	3.3	8.4	71.0	0	12/05	0.2	7.9	162.0	0	12/05	-3.9	6.5	191.0	0
12/06	2.7	8.0	66.0	0	12/06	-0.3	5.0	139.0	0	12/06	-5.6	4.8	153.0	0
12/07	5.6	3.5	31.0	0	12/07	-1.0	6.4	165.0	0	12/07	-1.2	0.3	79.0	0
12/08	3.7	7.2	57.0	0	12/08	-4.2	3.1	110.0	0	12/08	3.1	0	43.0	0
12/09	2.5	7.3	60.0	0	12/09	-7.0	7.6	162.0	0	12/09	4.2	5.1	158.0	0
12/10	0.2	0	0	0	12/10	-5.3	7.7	158.0	0	12/10	1.2	0	34.0	0
12/11	-3.0	6.0	66.0	5.0	12/11	-6.0	0.2	69.0	0	12/11	2.1	0.7	74.0	10.0
12/12	-2.3	5.4	62.0	3.0	12/12	-6.9	6.3	146.0	10.0	12/12	-2.1	7.2	176.0	2.0
12/13	-2.7	8.3	69.0	0	12/13	-10.1	8.0	167.0	10.0	12/13	-1.7	7.2	195.0	2.0
12/14	-3.5	2.7	28.0	0	12/14	-10.7	7.9	162.0	10.0	12/14	-1.9	4.1	169.0	21.0
12/15	-2.4	6.7	50.0	0	12/15	-8.5	7.7	158.0	10.0	12/15	-9.3	5.0	169.0	18.0
12/16	-5.1	7.3	65.0	0	12/16	-6.8	1.9	100.0	10.0	12/16	-10.1	4.3	183.0	16.0
12/17	-5.3	7.9	65.0	0	12/17	0.3	1.1	117.0	0	12/17	-10.7	7.8	214.0	15.0
12/18	-5.1	3.2	28.0	0	12/18	1.1	4.9	129.0	0	12/18	-11.9	6.4	191.0	15.0
12/19	-4.1	8.2	68.0	0	12/19	-3.5	5.3	155.0	0	12/19	-7.9	6.0	205.0	14.0
12/20	-5.1	7.8	68.0	0	12/20	-2.9	7.7	162.0	0	12/20	-4.6	0	39.0	14.0
12/21	-2.8	0	5.0	0	12/21	-1.7	7.6	158.0	0	12/21	-8.1	4.9	170.0	22.0
12/22	1.6	0	11.0	5.0	12/22	-2.7	8.0	162.0	0	12/22	-5.3	0	44.0	23.0
12/23	1.9	4.0	52.0	0	12/23	-4.4	0	65.0	0	12/23	-6.0	6.9	208.0	33.0
12/24	-1.5	6.3	55.0	0	12/24	1.4	3.1	98.0	0	12/24	-5.5	4.3	157.0	28.0
12/25	-1.3	7.1	59.0	0	12/25	-4.5	7.7	158.0	0	12/25	-3.7	7.9	199.0	26.0
12/26	-1.4	2.6	26.0	0	12/26	-8.1	7.8	158.0	0	12/26	-7.3	8.0	202.0	26.0
12/27	-0.2	0	11.0	24.0	12/27	-6.7	7.7	151.0	0	12/27	-8.0	7.5	195.0	24.0
12/28	-3.7	6.4	70.0	20.0	12/28	-4.3	0	38.0	0	12/28	-7.5	8.0	214.0	24.0
12/29	-12.3	8.2	79.0	20.0	12/29	-0.8	0	91.0	45.0	12/29	-13.1	0.8	148.0	22.0
12/30	-6.3	8.0	76.0	16.0	12/30	-7.6	4.5	158.0	38.0	12/30	-13.4	7.3	217.0	22.0
12/31	-8.4	7.6	63.0	16.0	12/31	-6.1	8.0	186.0	38.0	12/31	-8.3	7.4	196.0	22.0
01/01	-6.7	1.7	42.0	16.0	01/01	-16.0	5.8	162.0	33.0	01/01	-7.8	7.9	205.0	21.0
01/02	0.7	0	15.0	17.0	01/02	-17.4	7.2	167.0	32.0	01/02	-12.1	2.0	156.0	21.0
01/03	-4.6	6.0	58.0	11.0	01/03	-15.8	7.1	165.0	31.0	01/03	-6.2	2.9	122.0	21.0
01/04	-4.9	6.1	68.0	11.0	01/04	-12.9	6.2	160.0	30.0	01/04	-7.0	7.8	198.0	21.0
01/05	-10.4	8.4	85.0	11.0	01/05	-8.8	6.6	172.0	28.0	01/05	-9.1	3.8	160.0	21.0
01/06	-11.2	8.3	81.0	10.0	01/06	-9.7	3.7	143.0	25.0	01/06	-10.1	8.0	210.0	21.0
01/07	-4.0	7.1	70.0	10.0	01/07	-13.3	0	115.0	25.0	01/07	-8.1	5.3	196.0	21.0
01/08	0.6	5.2	63.0	10.0	01/08	-3.8	7.1	179.0	27.0	01/08	-3.3	4.9	167.0	21.0
01/09	-2.6	5.2	61.0	9.0	01/09	-13.3	1.7	127.0	25.0	01/09	-5.6	6.0	201.0	21.0
01/10	1.2	8.2	72.0	9.0	01/10	-8.8	7.9	179.0	24.0	01/10	-6.7	0	111.0	22.0
01/11	0.3	6.7	74.0	9.0	01/11	-7.3	7.9	184.0	24.0	01/11	-12.9	7.9	231.0	22.0
01/12	-1.2	0.3	40.0	9.0	01/12	-11.1	3.6	131.0	23.0	01/12	-14.1	7.8	236.0	22.0
01/13	0	4.4	58.0	9.0	01/13	-2.0	6.2	170.0	22.0	01/13	-11.2	7.6	210.0	22.0

付表 2

01/14	0.2	0.1	37.0	10.0	01/14	-8.0	0	112.0	28.0	01/14	-14.0	4.3	184.0	22.0
01/15	-1.1	1.8	44.0	10.0	01/15	-15.4	7.1	184.0	28.0	01/15	-17.1	5.6	184.0	22.0
01/16	-3.1	5.3	66.0	15.0	01/16	-10.8	8.0	184.0	28.0	01/16	-15.4	0.9	365.0	22.0
01/17	-7.2	3.5	56.0	15.0	01/17	-5.2	0	53.0	28.0	01/17	-2.9	0	77.0	32.0
01/18	-0.5	0	1.0	93.0	01/18	0.4	3.7	158.0	52.0	01/18	-1.2	0	94.0	37.0
01/19	-10.9	8.6	96.0	93.0	01/19	-6.0	2.0	167.0	47.0	01/19	-0.6	0	46.0	38.0
01/20	-7.1	7.0	77.0	90.0	01/20	-12.4	8.2	203.0	47.0	01/20	-9.7	4.0	208.0	63.0
01/21	-5.1	8.2	84.0	90.0	01/21	-8.4	7.9	203.0	47.0	01/21	-9.2	7.7	261.0	62.0
01/22	-11.3	8.4	96.0	83.0	01/22	-3.6	3.2	186.0	47.0	01/22	-15.2	6.5	256.0	60.0
01/23	-17.1	8.5	101.0	82.0	01/23	-11.2	8.0	194.0	46.0	01/23	-16.8	8.2	252.0	60.0
01/24	-9.3	6.8	81.0	82.0	01/24	-13.9	7.1	215.0	46.0	01/24	-6.3	0	161.0	57.0
01/25	-5.4	0	14.0	80.0	01/25	-16.5	8.0	213.0	46.0	01/25	-2.9	0	106.0	56.0
01/26	1.7	1.0	44.0	90.0	01/26	-12.0	8.0	213.0	45.0	01/26	-2.8	1.4	177.0	57.0
01/27	-3.3	5.2	79.0	92.0	01/27	-10.4	1.3	119.0	45.0	01/27	-0.4	0	58.0	64.0
01/28	-8.0	8.7	102.0	78.0	01/28	-4.2	8.2	229.0	40.0	01/28	1.5	0	58.0	58.0
01/29	-7.0	8.1	98.0	76.0	01/29	-6.0	8.4	229.0	38.0	01/29	2.7	5.1	258.0	55.0
01/30	-13.1	8.7	108.0	76.0	01/30	-13.1	8.5	227.0	36.0	01/30	-0.3	8.5	279.0	48.0
01/31	-13.1	8.1	102.0	74.0	01/31	-11.8	8.2	182.0	37.0	01/31	-1.4	7.6	256.0	46.0
02/01	-11.4	6.9	86.0	73.0	02/01	-6.2	0	112.0	50.0	02/01	-6.4	0	143.0	46.0
02/02	-9.1	3.4	84.0	70.0	02/02	-9.9	8.6	251.0	47.0	02/02	-4.7	6.9	308.0	48.0
02/03	-9.0	8.5	108.0	70.0	02/03	-9.5	2.4	136.0	45.0	02/03	-5.7	6.8	288.0	48.0
02/04	-7.1	6.8	102.0	69.0	02/04	-6.7	4.8	217.0	40.0	02/04	-3.6	6.0	263.0	47.0
02/05	-9.4	7.8	101.0	68.0	02/05	-17.8	8.5	239.0	38.0	02/05	-8.1	7.3	303.0	46.0
02/06	-10.4	5.1	88.0	68.0	02/06	-14.7	8.0	237.0	36.0	02/06	-0.7	0.9	139.0	46.0
02/07	-11.5	7.9	114.0	66.0	02/07	-5.8	2.7	141.0	38.0	02/07	-3.7	0	63.0	46.0
02/08	-10.9	4.8	87.0	66.0	02/08	-6.5	7.7	253.0	38.0	02/08	-6.8	3.9	181.0	53.0
02/09	-11.5	9.1	118.0	65.0	02/09	-13.0	9.0	272.0	38.0	02/09	-13.9	8.6	336.0	54.0
02/10	-10.0	6.9	104.0	65.0	02/10	-9.9	3.4	170.0	38.0	02/10	-7.1	8.7	344.0	54.0
02/11	-2.7	1.0	57.0	65.0	02/11	-6.8	8.3	268.0	39.0	02/11	-4.9	6.7	312.0	53.0
02/12	-8.1	8.5	122.0	65.0	02/12	-9.4	7.1	253.0	39.0	02/12	-3.6	6.1	296.0	52.0
02/13	-5.9	8.3	107.0	65.0	02/13	-7.5	7.6	263.0	38.0	02/13	-8.6	7.5	301.0	51.0
02/14	-5.1	9.0	117.0	61.0	02/14	-11.2	9.1	277.0	38.0	02/14	-7.7	6.7	319.0	50.0
02/15	-8.2	1.7	78.0	61.0	02/15	-7.6	8.4	272.0	38.0	02/15	-6.2	3.8	248.0	50.0
02/16	-1.7	0	0	88.0	02/16	0	2.4	162.0	39.0	02/16	-5.1	8.9	348.0	52.0
02/17	-3.6	0.1	84.0	78.0	02/17	-3.9	9.1	287.0	34.0	02/17	-10.1	0	167.0	54.0
02/18	-11.4	9.4	132.0	79.0	02/18	-6.3	8.3	282.0	33.0	02/18	-5.8	1.3	231.0	58.0
02/19	-18.7	7.9	135.0	78.0	02/19	-5.8	8.0	287.0	39.0	02/19	-5.8	5.2	286.0	62.0
02/20	-18.8	9.6	142.0	75.0	02/20	-12.2	9.0	315.0	36.0	02/20	-6.8	8.8	422.0	62.0
02/21	-11.5	0	3.0	77.0	02/21	-12.9	9.2	301.0	36.0	02/21	-8.7	7.1	374.0	60.0
02/22	-7.3	8.2	115.0	85.0	02/22	-11.2	8.6	313.0	35.0	02/22	-4.2	0.4	150.0	58.0
02/23	-7.3	0	31.0	80.0	02/23	-4.6	8.5	327.0	34.0	02/23	-3.9	0	201.0	63.0
02/24	-8.1	6.7	128.0	80.0	02/24	-4.3	4.0	241.0	33.0	02/24	-5.5	5.0	334.0	62.0
02/25	-13.9	9.4	146.0	78.0	02/25	-5.0	8.3	303.0	32.0	02/25	-5.6	9.5	414.0	58.0
02/26	-10.3	9.5	148.0	77.0	02/26	-2.9	9.5	337.0	32.0	02/26	-7.1	8.9	421.0	56.0
02/27	-6.5	9.2	141.0	76.0	02/27	-5.5	2.9	337.0	32.0	02/27	-6.1	6.7	372.0	56.0
02/28	-2.3	0	55.0	75.0	02/28	-8.3	8.5	327.0	31.0	02/28	-3.4	0.2	246.0	55.0
					02/29	-2.2	8.0	289.0	31.0					
03/01	-3.0	9.9	181.0	76.0	03/01	-0.9	8.9	344.0	27.0	03/01	0.1	2.9	255.0	67.0
03/02	-9.1	9.8	144.0	73.0	03/02	-2.5	9.1	358.0	25.0	03/02	-1.5	7.2	362.0	60.0
03/03	-6.5	8.7	140.0	72.0	03/03	-4.1	9.8	368.0	25.0	03/03	-3.5	5.3	348.0	57.0
03/04	-1.4	10.1	152.0	70.0	03/04	-3.3	9.7	368.0	25.0	03/04	-3.9	9.5	459.0	56.0
03/05	3.6	10.3	146.0	67.0	03/05	-5.0	3.1	277.0	24.0	03/05	-5.2	3.0	303.0	55.0
03/06	-1.7	5.5	114.0	64.0	03/06	-4.9	0	151.0	30.0	03/06	0.5	9.0	429.0	60.0
03/07	-0.9	10.1	147.0	65.0	03/07	-5.8	10.0	404.0	33.0	03/07	-1.1	6.6	414.0	55.0
03/08	-3.8	9.9	152.0	63.0	03/08	-5.6	8.7	363.0	36.0	03/08	-3.6	10.6	492.0	50.0
03/09	-4.9	0	33.0	65.0	03/09	-3.2	5.0	301.0	33.0	03/09	-7.1	10.6	506.0	52.0
03/10	-4.8	9.6	141.0	65.0	03/10	-4.3	3.9	265.0	30.0	03/10	-5.5	6.9	414.0	51.0
03/11	-5.0	10.3	161.0	74.0	03/11	-1.8	8.2	337.0	28.0	03/11	-0.3	3.7	329.0	51.0
03/12	-4.6	8.9	154.0	65.0	03/12	-1.1	9.2	377.0	24.0	03/12	-0.4	10.2	480.0	50.0
03/13	-3.5	8.8	154.0	65.0	03/13	-1.4	6.5	339.0	19.0	03/13	-1.0	9.5	471.0	50.0
03/14	-5.7	10.1	167.0	65.0	03/14	1.7	8.1	370.0	18.0	03/14	-3.2	10.4	506.0	49.0
03/15	-7.3	8.7	162.0	65.0	03/15	1.8	4.7	294.0	10.0	03/15	-1.7	10.4	506.0	49.0

凍土用リアルタイム処理物理探査機器の開発研究

付表 3

03/16	-5.2	0.1	102.0	65.0	03/16	0	7.7	368.0	5.0	03/16	-2.4	6.6	429.0	49.0
03/17	-1.4	6.0	139.0	65.0	03/17	-1.7	10.8	435.0	0	03/17	1.1	4.0	398.0	51.0
03/18	-0.9	10.9	178.0	64.0	03/18	-3.5	2.1	213.0	0	03/18	-1.6	10.3	533.0	47.0
03/19	1.8	8.6	155.0	59.0	03/19	-2.3	7.1	370.0	0	03/19	-1.9	10.8	542.0	46.0
03/20	4.5	5.9	124.0	52.0	03/20	-1.4	7.3	366.0	1.0	03/20	-5.0	10.7	547.0	45.0
03/21	-1.7	11.0	173.0	53.0	03/21	-1.3	0.6	270.0	0	03/21	-2.9	10.5	544.0	38.0
03/22	-1.8	10.8	177.0	40.0	03/22	-3.3	9.2	377.0	0	03/22	2.6	7.6	443.0	31.0
03/23	-1.2	0.7	61.0	33.0	03/23	-0.4	9.9	435.0	0	03/23	2.1	10.0	516.0	23.0
03/24	5.0	10.9	173.0	32.0	03/24	-4.3	9.9	423.0	0	03/24	3.4	9.8	450.0	18.0
03/25	2.0	11.1	172.0	25.0	03/25	-0.8	0	96.0	0	03/25	3.3	6.5	421.0	10.0
03/26	-0.4	10.9	176.0	25.0	03/26	4.0	11.0	468.0	5.0	03/26	2.2	9.8	485.0	0
03/27	-2.5	0.3	79.0	23.0	03/27	5.4	10.3	437.0	0	03/27	0.8	3.9	369.0	0
03/28	-1.1	0	93.0	28.0	03/28	5.8	10.9	440.0	0	03/28	-3.7	8.4	495.0	0
03/29	0.3	6.3	151.0	26.0	03/29	3.7	9.2	425.0	0	03/29	-5.3	6.1	441.0	0
03/30	1.8	0	56.0	23.0	03/30	3.9	0	91.0	0	03/30	-0.9	10.1	547.0	0
03/31	3.0	9.5	163.0	14.0	03/31	6.5	8.2	380.0	0	03/31	3.4	2.6	286.0	0
04/01	1.3	8.2	148.0	13.0	04/01	4.9	4.2	296.0	0	04/01	1.7	0.5	86.0	0
04/02	0.3	11.6	189.0	13.0	04/02	5.5	2.5	167.0	0	04/02	4.8	0	93.0	0
04/03	2.7	9.4	161.0	9.0	04/03	9.5	11.0	468.0	0	04/03	2.7	2.5	296.0	0
04/04	5.9	11.2	172.0	5.0	04/04	9.0	9.6	435.0	0	04/04	3.5	2.9	346.0	0
04/05	1.3	0.3	32.0	3.0	04/05	7.4	5.7	335.0	0	04/05	3.0	8.7	483.0	0
04/06	2.5	0.8	49.0	2.0	04/06	4.6	1.2	163.0	0	04/06	2.3	9.9	570.0	0
04/07	3.5	2.3	100.0	0	04/07	1.2	10.9	514.0	0	04/07	3.9	7.4	343.0	0
04/08	2.8	0	38.0	0	04/08	1.9	10.1	466.0	0	04/08	1.4	0.2	105.0	0
04/09	5.1	2.9	104.0	0	04/09	5.9	8.5	344.0	0	04/09	2.1	4.7	324.0	0
04/10	5.1	7.6	164.0	0	04/10	5.1	6.4	337.0	0	04/10	1.4	1.6	284.0	0
04/11	8.5	8.0	133.0	0	04/11	0.7	0	134.0	0	04/11	1.6	8.6	561.0	0
04/12	7.5	12.2	193.0	0	04/12	0.8	0	222.0	0	04/12	1.1	7.2	502.0	0
04/13	4.8	0	21.0	0	04/13	2.6	3.3	308.0	0	04/13	4.5	10.2	575.0	0
04/14	8.2	8.4	154.0	0	04/14	2.4	2.1	229.0	0	04/14	6.4	9.2	537.0	0
04/15	8.2	9.7	172.0	0	04/15	2.9	1.1	284.0	0	04/15	7.3	9.8	497.0	0
04/16	8.6	11.0	182.0	0	04/16	0.7	0	84.0	0	04/16	8.3	11.8	620.0	0
04/17	10.1	11.5	188.0	0	04/17	3.9	7.8	471.0	22.0	04/17	7.0	11.9	618.0	0
04/18	5.6	0.1	17.0	0	04/18	4.1	1.1	146.0	0	04/18	3.3	5.8	443.0	0
04/19	7.7	12.6	217.0	0	04/19	7.0	4.3	287.0	0	04/19	3.1	10.0	578.0	0
04/20	3.5	2.5	60.0	0	04/20	6.9	9.2	452.0	0	04/20	3.8	11.7	632.0	0
04/21	4.7	6.6	152.0	0	04/21	7.9	7.7	416.0	0	04/21	3.2	11.8	620.0	0
04/22	4.5	10.6	191.0	0	04/22	4.7	0	65.0	0	04/22	5.7	3.4	369.0	0
04/23	5.9	9.8	183.0	0	04/23	5.4	5.2	363.0	0	04/23	6.9	0.4	172.0	0
04/24	10.1	11.8	194.0	0	04/24	9.0	10.2	499.0	0	04/24	6.4	2.5	207.0	0
04/25	4.9	4.3	79.0	0	04/25	8.1	8.7	490.0	0	04/25	3.2	5.1	438.0	0
04/26	8.9	0	88.0	0	04/26	8.8	6.1	368.0	0	04/26	8.4	12.3	694.0	0
04/27	10.9	11.1	205.0	0	04/27	11.0	11.1	571.0	0	04/27	8.7	4.4	358.0	0
04/28	9.3	8.2	169.0	0	04/28	8.8	10.2	511.0	0	04/28	7.9	11.3	687.0	0
04/29	10.1	0.1	52.0	0	04/29	9.2	6.7	401.0	0	04/29	6.8	11.6	692.0	0
04/30	9.0	3.8	106.0	0	04/30	8.1	12.6	602.0	0	04/30	3.5	0.4	298.0	0
05/01	9.2	3.6	315.0	0	05/01	6.0	3.7	429.0	0	05/01	6.0	7.5	248.0	0
05/02	6.3	10.2	395.0	0	05/02	8.4	6.2	474.0	0	05/02	6.8	7.5	502.0	0
05/03	3.9	5.0	305.0	0	05/03	7.3	3.0	366.0	0	05/03	3.1	0	95.0	0
05/04	5.2	0	30.0	0	05/04	6.5	3.6	431.0	0	05/04	5.6	4.6	436.0	0
05/05	11.1	0	75.0	0	05/05	5.9	1.9	248.0	0	05/05	8.6	11.1	594.0	0
05/06	17.2	12.2	445.0	0	05/06	6.6	6.3	547.0	0	05/06	9.9	7.4	530.0	0
05/07	15.2	9.3	380.0	0	05/07	7.5	8.8	582.0	0	05/07	12.5	10.3	649.0	0
05/08	10.6	0	95.0	0	05/08	6.3	0	59.0	0	05/08	9.6	11.4	684.0	0
05/09	13.8	11.5	450.0	0	05/09	13.0	12.4	721.0	0	05/09	6.1	0	157.0	0
05/10	14.8	8.5	340.0	0	05/10	12.4	10.1	658.0	0	05/10	8.1	0	121.0	0
05/11	14.3	2.0	220.0	0	05/11	12.1	13.0	747.0	0	05/11	14.5	9.5	673.0	0
05/12	13.5	8.2	385.0	0	05/12	10.5	11.2	710.0	0	05/12	16.2	9.5	597.0	0
05/13	14.9	8.5	335.0	0	05/13	8.4	4.4	464.0	0	05/13	15.5	6.1	554.0	0
05/14	13.0	0	0	0	05/14	7.7	0	76.0	0	05/14	10.2	7.2	547.0	0
05/15	14.6	0	80.0	0	05/15	15.4	12.0	721.0	0	05/15	7.3	10.0	594.0	0

付表 4

【地 中 温 度】

93/1/21	0.1m	0.2m	0.3m	0.4m	0.5m	93/1/22	0.1m	0.2m	0.3m	0.4m	0.5m
13:30	-3.8	-5.0	-4.2	-2.6	-1.4	9:50	-9.7	-8.3	-5.8	-3.4	—
40	-3.7	-4.6	-3.8	-2.2	-1.2	10:00	-9.6	-8.3	-5.8	-3.3	—
50	-3.6	-4.5	-3.7	-2.2	-1.1	10	-9.1	-8.2	-5.9	-3.4	—
14:00	-3.9	-4.8	-4.1	-2.7	-1.4	20	-8.9	-8.2	-5.8	-3.4	—
10	-3.8	-4.8	-4.2	-2.6	-1.4	30	-8.7	-8.1	-5.8	-3.4	—
20	-3.9	-4.9	-4.3	-2.7	-1.5	40	-8.9	-8.2	-5.9	-3.6	—
30	-4.0	-4.8	-4.3	-2.7	-1.5	50	-8.5	-8.1	-5.9	-3.6	—
40	-4.0	-4.2	-3.6	-2.2	-1.1	11:00	-8.3	-8.1	-5.9	-3.6	—
50	-4.2	-4.4	-3.8	-2.4	-1.3	10	-8.2	-8.1	-6.0	-3.6	—
15:00	-4.3	-4.5	-3.9	-2.5	-1.4	20	-7.9	-8.0	-6.0	-3.7	—
10	-4.3	-4.5	-4.0	-2.6	-1.4	30	-7.6	-8.0	-6.0	-3.7	—
20	-4.4	-4.5	-3.9	-2.5	-1.4	40	-7.4	-7.9	-6.1	-3.8	—
30	-4.5	-4.4	-3.9	-2.5	-1.3	50	-7.4	-7.9	-6.1	-3.8	—
40	-4.6	-4.5	-3.9	-2.6	-1.4	12:00	-7.2	-7.8	-6.1	-3.9	—
50	-4.7	-4.5	-3.9	-2.6	-1.4						
16:00	-4.8	-4.7	-4.1	-2.7	-1.5	13:10	-6.3	-7.6	-6.2	-4.0	-2.1
10	-4.9	-4.8	-4.2	-2.8	-1.5	20	-6.3	-7.6	-6.3	-4.1	-2.2
20	-5.1	-5.0	-4.3	-3.0	-1.6	30	-6.2	-7.4	-6.2	-4.1	-2.2
						40	-6.2	-7.3	-6.2	-4.1	-2.1
93/1/23	0.1m	0.2m	0.3m	0.4m	0.5m	50	-6.2	-7.3	-6.2	-4.2	-2.2
11:20	-10.2	-10.6	-8.1	-5.2	-2.7	14:00	-6.2	-7.2	-6.1	-4.1	-2.1
30	-10.1	-10.6	-8.2	-5.3	-2.8	10	-6.2	-7.1	-6.2	-4.2	-2.2
40	-10.1	-10.5	-8.2	-5.3	-2.8	20	-6.1	-7.0	-6.0	-4.1	-2.1
50	-9.9	-10.5	-8.2	-5.4	-2.9	30	-6.2	-7.0	-6.1	-4.2	-2.2
12:00	-9.7	-10.4	-8.2	-5.4	-2.9	40	-5.9	-6.5	-5.7	-3.8	-1.8
10	-9.4	-10.3	-8.2	-5.4	-2.9	50	-6.2	-6.8	-6.0	-4.2	-2.2
						15:00	-6.2	-6.8	-6.0	-4.1	-2.1
93/3/2	0.1m	0.2m	0.3m	0.4m	0.5m	10	-6.2	-6.8	-6.0	-4.2	-2.2
11:04	0.1	-0.9	-1.3	-1.5	-1.3	20	-6.2	-6.8	-6.0	-4.2	-2.2
20	0.2	-1.0	-1.4	-1.5	-1.4	30	-6.2	-6.8	-6.0	-4.2	-2.2
30	0.2	-1.5	-1.8	-1.9	-1.6	40	-6.3	-6.8	-6.0	-4.3	-2.4
40	0.3	-1.5	-1.8	-1.9	-1.6	50	-6.4	-6.8	-6.0	-4.3	-2.3
50	0.4	-1.5	-1.7	-1.8	-1.5	56	-6.5	-6.7	-6.0	-4.3	-2.3
12:00	0.4	-1.5	-1.7	-1.8	-1.5	16:27	-6.8	-6.5	-5.8	-4.1	-2.2
10	0.5	-1.4	-1.7	-1.8	-1.5	57	-7.2	-6.6	-5.8	-4.2	-2.2
20	0.5	-1.6	-1.7	-1.8	-1.5						
30	0.5	-1.4	-1.7	-1.8	-1.5	93/3/3	0.1m	0.2m	0.3m	0.4m	0.5m
40	0.5	-1.2	-1.6	-1.6	-1.4	9:24	-0.9	-0.8	-1.0	-1.0	-0.8
50	0.5	-1.2	-1.6	-1.6	-1.4	34	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-0.9
13:00	0.5	-1.2	-1.5	-1.6	-1.4	44	-0.8	-0.8	-1.0	-0.9	-0.8
10	0.5	-1.1	-1.5	-1.5	-1.3	54	-0.8	-0.7	-0.9	-0.9	-0.8
20	0.5	-0.9	-1.4	-1.4	-1.2	10:04	-0.8	-0.8	-1.0	-1.0	-0.8
30	0.5	-0.8	-1.2	-1.3	-1.1	14	-0.8	-0.8	-1.0	-0.9	-0.8
40	0.5	-0.8	-1.2	-1.3	-1.1	24	-0.7	-0.8	-0.9	-0.9	-0.8
50	0.5	-0.8	-1.2	-1.4	-1.2	34	-0.6	-0.8	-0.9	-0.9	-0.8
14:00	0.4	-0.9	-1.3	-1.4	-1.2	39	-0.6	-0.8	-1.0	-1.0	-0.8
10	0.4	-1.1	-1.4	-1.5	-1.2						
20	0.2	-1.2	-1.5	-1.5	-1.3	15:19	-0.4	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
30	0.0	-1.2	-1.5	-1.6	-1.3	29	-0.5	-1.0	-1.2	-1.1	-1.0
40	0.0	-1.2	-1.5	-1.6	-1.3	39	-0.5	-1.2	-1.3	-1.3	-1.2
50	-0.1	-1.2	-1.5	-1.6	-1.3	49	-0.5	-1.2	-1.3	-1.4	-1.2
15:00	-0.1	-1.2	-1.5	-1.6	-1.3	16:00	-0.4	-0.7	-0.9	-0.9	-0.8
10	-0.2	-1.2	-1.5	-1.5	-1.3	53	-0.8	-1.9	-1.7	-1.7	-1.5
20	-0.2	-1.0	-1.4	-1.4	-1.2	17:53	-0.9	-1.9	-1.6	-1.6	-1.5
30	-0.3	-1.1	-1.4	-1.5	-1.3	18:53	-0.9	-1.8	-1.6	-1.6	-1.5
93/3/5	0.1m	0.2m	0.3m	0.4m	0.5m	11:54	-0.8	-1.5	-1.3	-1.1	-0.9
10:04	-1.3	-1.0	-0.9	-0.6	-0.5	16:04	-0.5	-1.0	-1.2	-1.0	-0.8
11:04	-0.8	-1.7	-1.4	-1.2	-1.0	17:04	-1.0	-2.2	-1.9	-1.7	-1.4

ただし、表中の値は、5頁の図-5(1)中No. 9地点の地中0.1~0.5mの温度を示す。

【凍 結 深 度】

凍結深計番号			凍結深計番号		
	凍結深 (mm)	融解深 (mm)		凍結深 (mm)	融解深 (mm)
91/1/11	596	0	92/2/26	666	0
2/27	593	0	2/27	666	0
3/1	597	0	2/29	666	0
			3/26	626	105
12/13	122	0	3/27	626	110

凍結深計番号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
93/1/21	5220	5677	5122	5008	5227	5111	3622
1/22	5221	5666	5110	5008	5226	5112	3622
1/23	5222	5700	5100	5009	5234	5122	3622
3/2	6447	6334	6221	6119	6009	6009	4221
3/3	6448	6333	6222	6220	6006	6006	4222
3/5	6533	6332	6223	6220	6335	6005	4220

ただし、93年の値は、凍結深(mm)で融解はなかったもので融解深(mm)0は省略した。
また、表中の凍結深計番号は、5頁の図-5(1)の位置を示す。