

地中探査レーダーによる知床峠の積雪観測

谷口優介、佐藤研吾、高橋修平（北見工業大学）

1. はじめに

地中探査レーダー（GPR）は地中に電波を放射することで、地中内部の構造を非破壊かつ短時間で捉えられる小型の測定器である。元来は地下の物体、空洞、構造物を検知するために発達した機器であるが、その簡便さから地質調査、人口埋蔵物の検知、遺跡調査、凍土探査、地下水探査などに広く応用されている。この地中探査レーダーを用いて 2005 年 3 月 30 日に知床峠の自然積雪を観測した。

2. 観測原理

地中探査レーダーから放射された電磁波（パルス）の反射波は、媒質中（積雪）の比誘電率に差異が生じた箇所にて起こり、反射パルスが極端に強く飽和した状態を示すときは、媒質中の比誘電率及び密度の急激な変化を捕らえている事を示している。また、地中探査レーダーによる反射面の地表面からの深さの度合いは、反射してくる往復反射時間（ $2t$ ）で表示されており、雪層の比誘電率を推定することにより、電磁波速度を換算し算出する事が出来る。図 1 に観測原理図を示す。

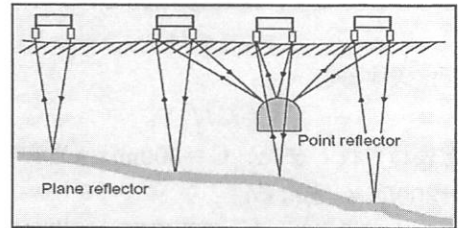


図 1 観測原理図.

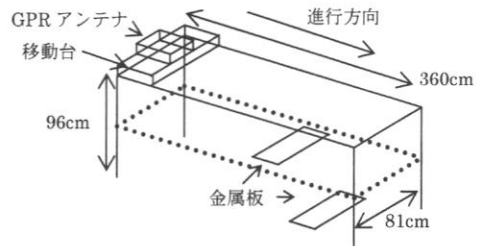


図 2 木製レール概略図.

3. 観測例

北見工業大学グラウンドにおいて木製レールを用いて定点観測を行った。

図 2 に示すように定点観測では木製レール（長さ 360cm 高さ 96cm、幅 81cm）を用いて観測を行った。図 3 の定点観測風景に示すように木製レール上に GPR とパソコンを載せた台を設置し、離れた場所から全体を引張り、レール下の積雪層を観測した。また観測の際、雪面に及び地面に金属板を設置し雪面、地面の検出をおこなった。

図 4 に 2005 年 2 月 3 日定点観測結果を示す。

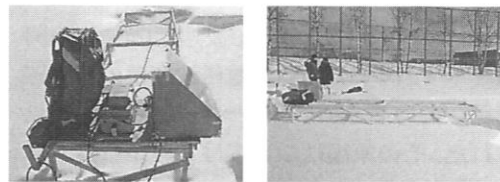


図 3 定点観測風景.

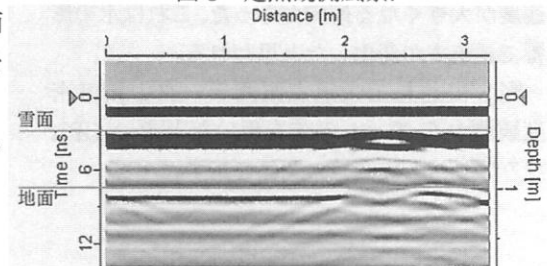


図 4 GPR 観測画像.

(2005 年 2 月 3 日 積雪深 62.8cm)

4. 観測理論

地中探査レーダー観測画像から積雪深を求めるには電磁波速度を定めなければならない。

真空中の電磁波の速さは、

$$C=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \quad (\epsilon_0: \text{真空中の誘電率}, \mu_0: \text{真空中の透磁率})$$

と表される。一般に地中や積雪中などの μ の変化はほとんどなく、誘電率 ϵ が変化することから物質中の電磁波速度 V とすると、

$$V/C=\sqrt{\epsilon_0/\epsilon} \quad (\epsilon: \text{物質の誘電率})$$

となる。ここで、比誘電率 ϵ_r を

$$\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$$

と定義すると、

$$V=C/\sqrt{\epsilon_r}$$

と表わされ、また、 $C=300\text{m}/\mu\text{s}$ なので $V=300/\sqrt{\epsilon_r}$ となる。

また比誘電率 ϵ_r は、積雪密度 ρ に依存し、

$$\epsilon_r=1+1.7\cdot\rho+0.7\cdot\rho^2$$

と表される (Tiuri,1984)。その積雪電磁波速度 V は密度 ρ に依存する。

図5に観測原理フローチャートを示す。この観測原理フローチャートにより GPR 信号から深さを求めることができる。

図6に積雪深と反射時間の関係を示す。図中の直線は電磁波速度を示している。各観測データは積雪中の電磁波速度が200~300 (m/ μ s) の範囲内になった。

図7に積雪密度と電磁波速度(m/ μ s)の関係を示す。図中の曲線は電磁波速度の理論線を示している。各観測データはばらつきが見られた。その原因についてはこれから検討する。3月下旬のぬれざらめ層データは電磁波速度が大きくなる傾向があった。これは水の影響で誘電率が変化したと思われる。

図8に北見工大定点観測データの積雪密度観測から Tiuri の式を用いたときの GPR 読み取り値と実測値の関係を示す。

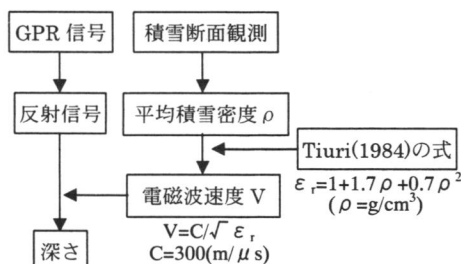


図5 観測原理フローチャート。

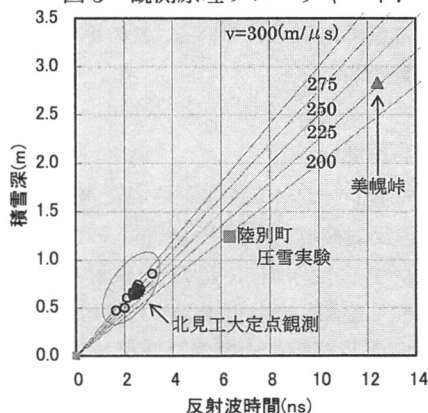


図6 積雪深と反射時間の関係。

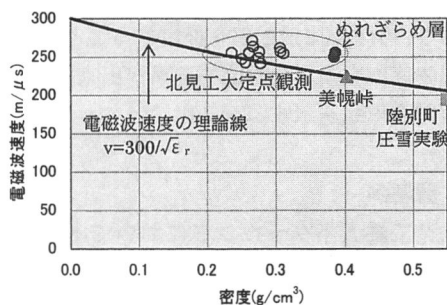


図7 電磁波速度と密度の関係。

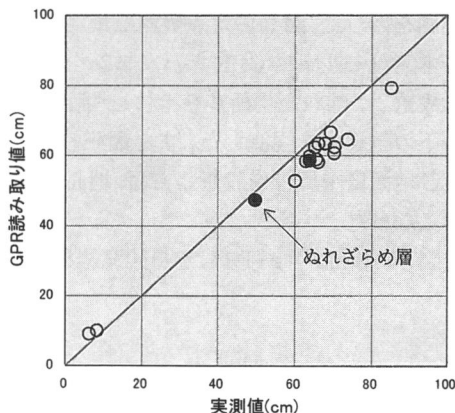


図8 GPR 読み取り値と実測値の関係。

5. 知床峠観測方法

2005 年 3 月 30 日に知床峠の宇登呂ー羅臼を横断する国道上の自然積雪を観測した。図 9 に示すように観測コースは除雪最終地点を出発地点として約 1.4km の国道上を行き観測コース A、観測コース B、帰りは観測コース C で観測をおこなった。悪天候の為、知床峠頂上までは観測を行うことができなかった。

図 10 に示すように GPR 観測機器、パソコン、GPS をそりに載せてスノーモービルで牽引して観測をおこなった。GPR は 1 秒毎に観測し、GPS により位置情報を 10 秒毎に測定した。また 3 つのポイント (①: 観測開始地点、②: 中間地点、③: 折り返し地点) で測深棒を用いて積雪深を測定し、出発地点では図 11 に示すように積雪断面観測をおこなった。



図 9 知床峠観測ルート。
A: ①→②, B: ②→③, C: ③→①



図 10 知床峠観測風景。
(そりの上に GPR を搭載してある)

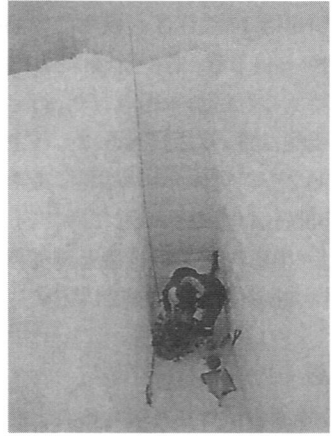


図 11 積雪断面観測風景。

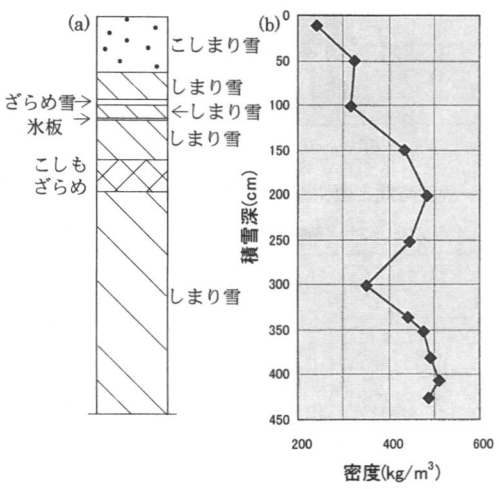


図 12 (a)積雪層構造, (b)積雪深と密度の関係。

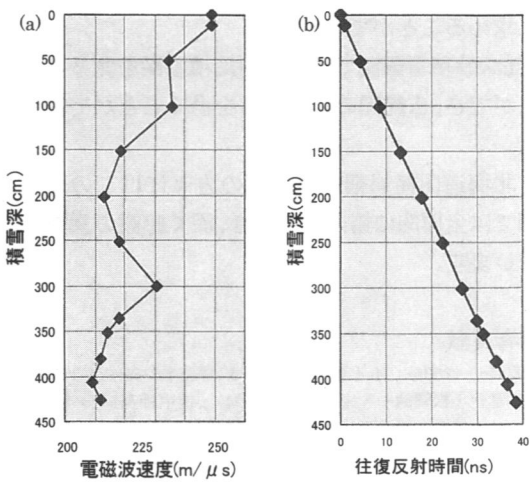


図 13 (a)積雪深と電磁波速度の関係, (b)積雪深と反射時間の関係。

6. 知床峠観測結果

出発地点における積雪断面観測より、図 12(a)の積雪層構造が得られた。

積雪断面地点の積雪深は 430cm、積雪平均密度は $0.437(\text{g}/\text{cm}^3)$ であった。積雪深と密度の関係を図 12(b)に示す。図 13(a)に積雪深と電磁波速度の関係を示す。積雪平均密度による電磁波速度は $219(\text{m}/\mu\text{s})$ であった。図 13(b)に積雪深と反射時間の関係を示す。

観測コース A、B の知床峠 GPR 観測画像を図 14 に、観測コース C の GPR 観測画像を図 15 に示す。

観測コース A、B の反射時間と観測距離の関係を図 16 に、観測コース C の反射時間と観測距離の関係を図 17 に示す。横軸の観測距離は GPS 観測から得られ、右の縦軸は図 15 の積雪深と反射時間の関係から得られた。行きの観測と帰りの観測は良い対応を示した。GPR 観測による観測コース全体の積雪深は、最も浅いところで約 50cm、最も深いところで約 430cm であった。GPR の読み取り値と測深棒による実測値では 4cm~11cm の差が生じた。

7. まとめ

- ・雪面及び地面の信号をとらえることができ積雪深を測ることができた。
- ・深さは Tiuri による密度と電磁波速度の式から求めることができる。
- ・知床峠積雪観測では効率的に積雪深を測ることができ、広範囲の積雪分布を得ることができた。

北海道開発局網走建設部の方々にはこの観測では全面的に協力して頂き、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 松岡健一 (2005) : 16.4 地中探査レーダ, 雪と氷の典, 674-678.
 山本竜也・松岡健一・成瀬廉二 (2004) : 地中探査レーダによる積雪内部構造と積雪水当量の推定, 雪氷 66 巻, 27-34.
 Tiuri, M.E., Sihvola, A.H., Nyfors, E.B., and Hallikaiken, M.T., (1984): The Complex Dielectric Constant of Snow at Microwave Frequencies. IEEE Journal of Oceanic Engineering Vol OE-9, No 5, 377-381.

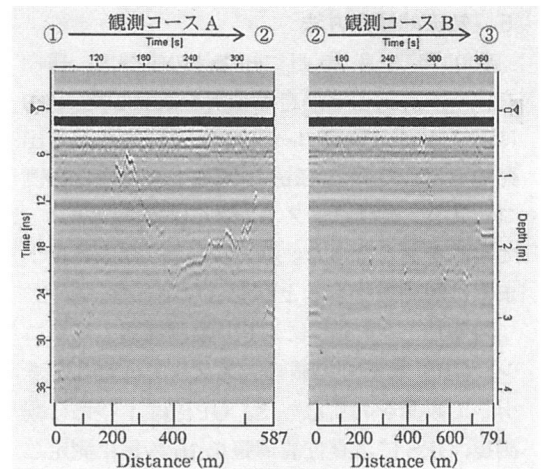


図 14 知床峠 GPR 観測画像.(観測コース A,B)

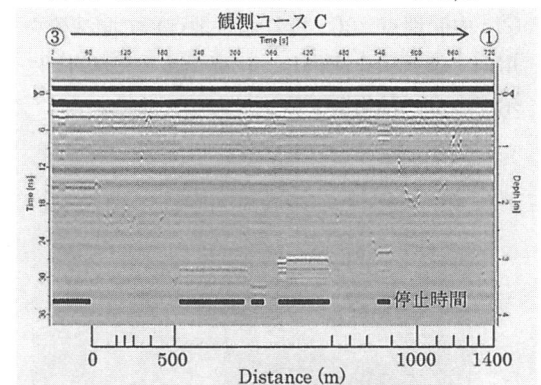


図 15 知床峠 GPR 観測画像.(観測コース C)

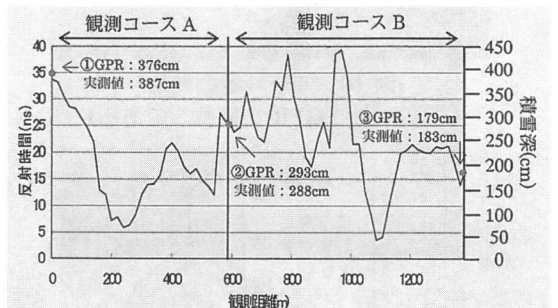


図 16 反射時間と観測距離の関係.(観測コース A,B)

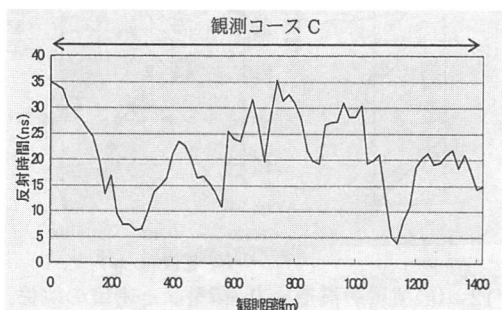


図 17 反射時間と観測距離の関係.(観測コース C)