# 地中探査レーダーによる知床峠の積雪観測(2006年)

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 2006 年 3 月 17 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。

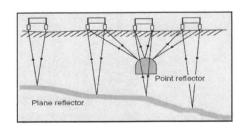


図1 地中探査レーダー観測原理図.

#### 3. 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、

 $C=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$  ( $\epsilon_0$ :真空中の誘電率、

μο: 真空中の透磁率)

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

 $V/C=\sqrt{\epsilon_0/\epsilon_0}$  ( $\epsilon$ :物質の誘電率) となる。ここで、比誘電率  $\epsilon_r$ を

$$\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0$$

と定義すると、

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

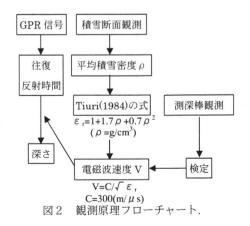
と表わされ、また、 $C = 300 \text{m}/\mu \text{ s}$  なので  $V = 300/\sqrt{\epsilon_{\text{r}}}$  となる。

また比誘電率  $\epsilon_r$ は、積雪密度  $\rho$  に依存し、

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

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

図2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。



### 4. 観測方法

2006 年 3 月 17 日に知床峠の宇登呂―羅臼を横断する国道上の自然積雪を観測した。図 3 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 5.2km の国道上を行きは出発点(羅臼起点より 22.2km)から知床峠まで、帰りは往きと同じコースを、知床峠をスタート地点として羅臼起点より 22.2km 地点まで観測した。また知床峠より先は雪上車で観測を行うことができなかったため、図 4 に示すように徒歩で観測をおこなった。

図4に示すように GPR 観測機器、パソコン、GPS をそりに載せて雪上車で牽引して観測をおこなった。 GPR は2秒毎に観測し、GPSにより位置情報を10秒毎に測定した。また行きの観測では500m 毎に測深棒を用いて積雪深を測定し、出発点(羅臼起点より22.2km)と知床峠頂上では積雪断面観測をおこなった。知床峠頂上および出発点における積雪断面観測より、図6、図7の積雪層構造が得られた。知床峠頂上の積雪深は110cm、積雪平均密度は0.368(g/cm³)であった。出発点の積雪深は120cm、積雪平均密度は0.513(g/cm³)であった。積雪深と密度の関係、層構造図を図6、図7に示す。

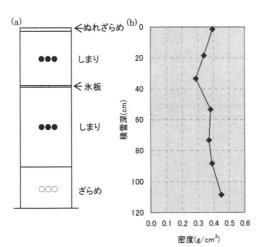


図 6 知床峠頂上断面観測結果 (a)積雪層構造, (b)積雪深と密度の関係

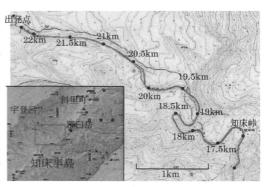


図3 観測場所概略図



図4 観測風景(知床峠羅臼側)



図5 雪上車と GPR 観測機器

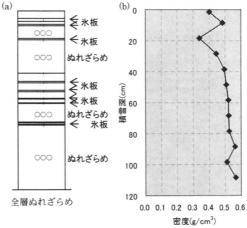


図7 出発点断面観測結果 (a)積雪層構造. (b)積雪深と密度の関係

## 5. 知床峠観測結果

往路の観測コース (時速 14km/h) の GPR 観測画像を図8に示す。往路の観測コースでは500(m)毎に停止し測深棒で実測を計測しながら雪上で牽引して観測をおこなった。復路の観測コース (時速 18km/h) の GPR 観測画像を図9に示す。復路の観測コースでは知床峠頂上から出発点まで停止せずに観測をおこなった。知床峠から羅臼方向(徒歩観測)の観測コースの GPR 観測画像を図10に示す。

図 11 に積雪深と往復反射時間の関係を示す。 電磁波速度はほぼ 220(m/μs)を示していた。

図 12 に図 11 から得られた標高と電磁波速度の関係を示す。標高 500m(22.5km~21.5km区間)以下では電磁波速度を  $200(m/\mu s)$ とした。これは積雪がぬれているためと思われる。標高500m以上では電磁波速度を  $220(m/\mu)$ とした。

図 13 に GPR による積雪深(50m 毎)と実測値の関係を示す。峠からウトロ方向 5km 区間において最大積雪深 3.4m、平均積雪深 1.5m となった。標高 600m 以下(22.5km~20km 区間)では 1~1.5m の一定の積雪深を示していた。標高 600m 以上では吹き溜まりと吹き払いが交互にあらわれていた。とくに 17.6km 地点の峠付近では道路が露出していた。

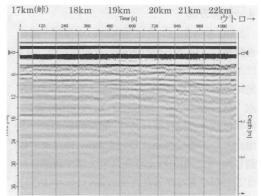
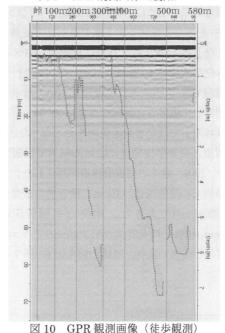


図9 GPR 観測画像 (復路)



出発点 22km 21.5km 21km 20.5km 20km 19.5km 19km 18.5km 18km 17.5km 排

図8 GPR 観測画像(往路)

図 14 に 2005 年、2006 年における積雪深と キロ程の関係を示す。20km から 18km 区間で は 2005 年の方が、積雪が多かった

図 15 に峠から羅臼方向の積雪深を示す。峠から羅臼方向 600m 区間では最大積雪深 7.1m、平均積雪深 3.5m であった。

#### 7. まとめ

- ・地中探査レーダーと GPS を組み合わせる事によって広範囲の積雪分布を得ることができた。
- ・峠からウトロ方向 5km 区間においては最大 積雪深 3.4m、平均積雪深 1.5m となり、峠か ら羅臼方向 600m 区間では最大積雪深 7.1m、 平均積雪深 3.5m であった。
- ・標高 600m 以上の山陰で積雪 2m 以上の吹き 溜まり区間となり、峠付近の風の吹き抜ける地 点では 1m 以下の吹き払い区間となっていた など地形と対応していた。

### 謝辞

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 Snowat Microwave Frequencies. IEEE Journal of Oceanic Engineering Vol OE-9, No 5,377-381.

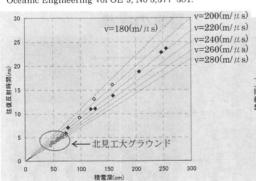


図 11 積雪深と往復反射時間

- ◇は標高 500m 以下
- ◆は標高 500m 以上

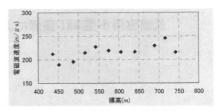


図 12 標高と電磁波速度

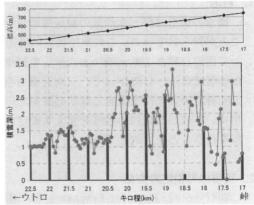


図 13 積雪深とキロ程(羅臼起点) ● は GPR による測定値 棒グラフは測深棒による実測値

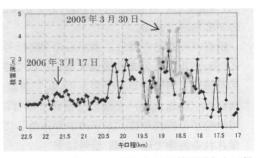


図 14 2005 年、2006 年における積雪深とキロ程

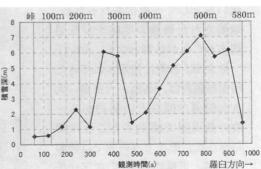


図 15 峠から羅臼方向(GPR 測定値)