

地中レーダー(GPR)による積雪深観測法の改善

木下陽介, 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(Ground Penetrating Radar 以下 GPR と略す)は地中に電波を放射し、地下物体から反射した電波を受信することにより、地下構造を調べる小型の測定器である。元々は地下の物体や空洞を検知したいという都市工学的な要請から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、地下水探査などにも広く応用されており(物理探査学会, 1999)近年では雪氷圏の調査にも用いられてきている。

積雪の堆積状態を知ることは、山岳地帯広域での水資源である積雪や吹雪に伴う積雪の再配分機構等を考える上で重要な指標である。GPR は小型であるため、持ち運びしやすく広範囲の積雪を短時間で観測することが可能であるが、GPR には固有のシステムノイズというものが存在し、観測されたデータのシステムノイズによって埋没した表面積雪の反応の観測が難しい。そのため、本研究では従来の GPR による観測方法を工夫し、さらに取得データの画像解析を行うことによってこの問題を解決することを試みた

2. 地中レーダー観測装置

(1) 観測原理

本研究では Mala Geoscience 社製の GPR を用いている(写真 1)。GPR は地中に電波を放射し、反射波が受信機に戻ってくるまでの電波の往復時間と強度から地中の内部の状態を知る測定器であるため観測されたデータは縦軸が電波の往復時間で示される。



写真 1 観測装置

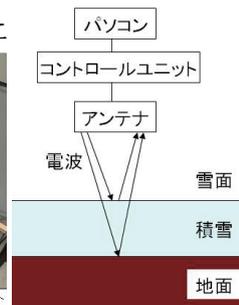


図 1 GPR 観測概念図

GPR から放射された電磁波の反射波は、媒質中(積雪)の比誘電率に差異が生じた箇所では生じる。そのため反射波が極端に強く反応する箇所では、媒質中の比誘電率及び密度の急激な変化を意味している。概念図を図 1 に示す。

(2) 観測理論

観測原理により、GPR 観測データから積雪深を求めるには積雪中の電磁波速度を求める必要がある。電磁波速度はまず真空中では次式で表される。

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

ここで、一般的に地中や積雪中では透磁率の変化はほとんど無いいため、誘電率の変化に電磁波速度は依存するので物質中の電磁波速度は次式のようなになる。

$$V=C\sqrt{(\epsilon_0/\epsilon)} \quad (V: \text{物質中の電磁波速度}, \epsilon: \text{物質の誘電率})$$

ここで比誘電率というものを次式のように定義する。

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (\epsilon_r: \text{比誘電率})$$

積雪中の比誘電率は、積雪密度に依存する次式が経

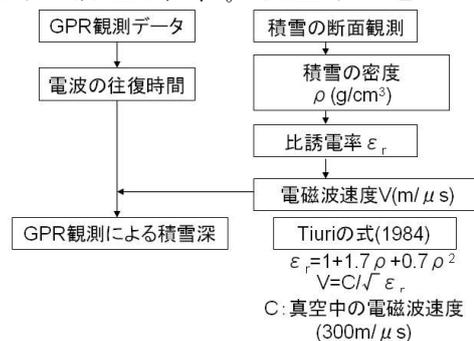


図 2 GPR 観測データによる積雪深計算流れ図

験的に知られている (Tiuri, 1984).

$$\epsilon_r = 1 + 1.7\rho + 0.7\rho^2 \quad (\epsilon_r: \text{比誘電率}, \rho: \text{積雪の密度})$$

また、真空中の電磁波速度は $300\text{m}/\mu\text{s}$ なので積雪中の電磁波速度は次式で表される

$$V = 300 / \sqrt{1 + 1.7\rho + 0.7\rho^2}$$

この式から積雪中の電磁波速度は密度に依存することがわかる。

実際に積雪の断面観測によって積雪の密度と深さを求め、これらの式を用いて GPR 観測データから積雪深を求める。その流れ図を図 2 に示す。

(3) 観測装置

本研究では受信周波数が 800MHz と 1.6GHz の 2 種類のアンテナを用いた。アンテナは送信機と受信機が内蔵されたシールドアンテナになっており、コントロールユニットから接続されている。パソコンもコントロールユニットに接続されており、パソコン上の Ramac GroundVision というソフトによって GPR を使用する。



写真 2 観測用ソリ

この GPR を今回は観測用ソリ (写真 2) に載せて観測する。概念図を図 3 に示す。この観測用ソリは、パソコン、コントロールユニットが収納でき GPR のアンテナの真下の積雪を乱さないよう工夫されており、またアンテナが上下運動できるようになっている。

(4) 2 種類の周波数アンテナ

北見工業大学の GPR 研究では従来まで 800MHz アンテナによる観測を行ってきたが、本研究では新しく 1.6GHz アンテナを用いた。周波数による違いは電波の性質上、波長が 1/2 であるため物質透過性は低いですが、空間分解能が高い。1.6GHz アンテナでは本研究グループで従来まで難しかった GPR 観測による積雪の雪面の確認、積雪内部層の小さな密度変化の確認がより改善される可能性がある。

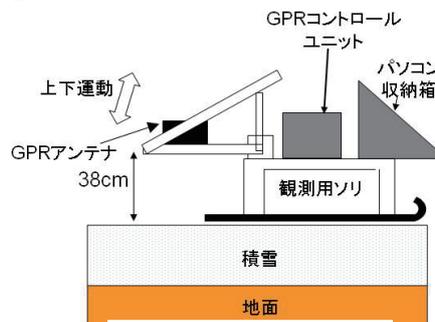


図 3 観測用ソリ概念図

3. 観測方法

(1) アンテナ上下観測方法

本研究では、定点位置で固有のシステムノイズと反射信号を区別するため、アンテナと雪面までの距離を変化させる観測方法によって検定した。この例を図 4 に示す。従来の雪面距離を変えない方法では、雪面反応のような微弱なものはシステムノイズに埋没してしまう。地面反応のように強いものもシステムノイズとの見分けが付きづらい。雪面までの距離を変化させると、システムノイズは変化せず雪面や地面の反応は距離変化に追従して変化する。

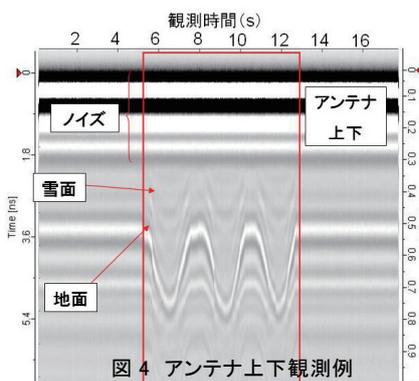


図 4 アンテナ上下観測例

(2) 北見工業大学内グラウンドの定点観測

今冬は 2007 年 12 月 20 日から 2008 年 3 月 10 日の期間に 15 回、北見工業大学内のグラウンドにて積雪の断面観測と GPR 観測を上記のアンテナ上下観測方法で定位置にて行った。

積雪の断面観測は GPR 観測地点の積雪を乱さないよう約



図 5 知床横断道路観測コース

5m離れた地点で行い、積雪深、積雪密度、層構造、雪温を観測した。

(3) 知床横断道路観測

2008年3月19日に宇登呂一羅臼を横断する国道上の自然積雪をGPR観測した。観測

コースを図5に示す。GPR観測は雪上車で牽引しながら行った。断面観測は出発地点と知床峠頂上で行った。

4. 画像処理方法

観測されたGPR画像の画像解析は、行列解析ソフトMATLABによって行う。GPR画像に含まれるシステムノイズを除去するための処理を行った概要を図6に示す。アンテナを上下させて観測したおかげで、アンテナが水平状態の部分で減算するためのデータを元データから取り出し用いることができる。取り出した減算用データは平均し元データから減算した。

5. 画像解析結果

(1) 北見工業大学内グラウンド定点観測結果 [800MHz アンテナ]

観測例は2008年2月11日の積雪断面観測データを表1と図7に示し、その日の800MHzアンテナの観測データを図8に示す。アンテナを上下させたことによって地面反応は見る事ができた。画像解析後には雪面反応は変化している所で反応を見分ける事ができた。

[1.6GHz アンテナ]

800MHzアンテナと同日の観測データを図9に示す。地面反応は明瞭に反応を確認することができ、雪面反応も明瞭に捉えることができた。また積雪の内部層の違いも密度差が約0.09g/cm³の違いを捉えることができた。

6. 知床横断道路観測結果

(1) 800MHz アンテナによる観測 (往路) 結果

停止地点にてアンテナ上下を行ったおかげで、システムノイズに埋もれていない地面反応は停止地

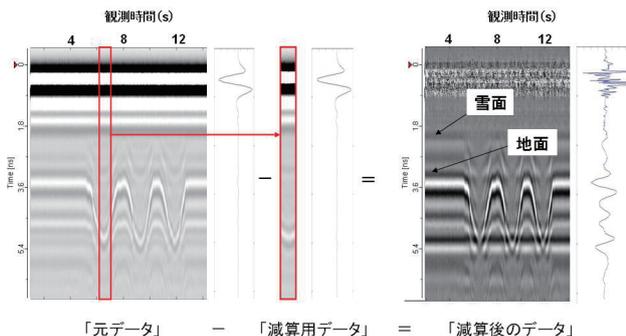


図6 画像処理方法

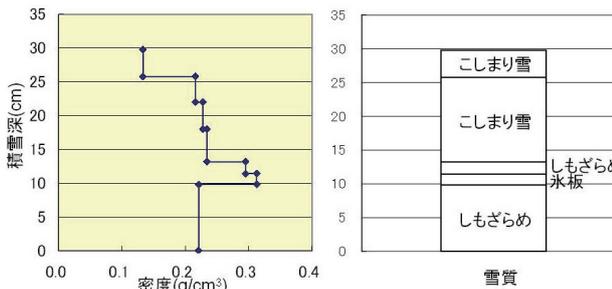


図7 2008年2月11日観測データ

表1 2008年2月11日観測データ

積雪深		雪質	各層の密度 (g/cm ³)	全層平均密度 (g/cm ³)
上部(cm)	下部(cm)			
29.8	25.8	こしまり雪	0.133	0.221
25.8	13.2	こしまり雪	0.226	
13.2	11.4	しもざらめ	0.295	
11.4	9.8	氷板	0.313	
9.8	0.0	しもざらめ	0.221	

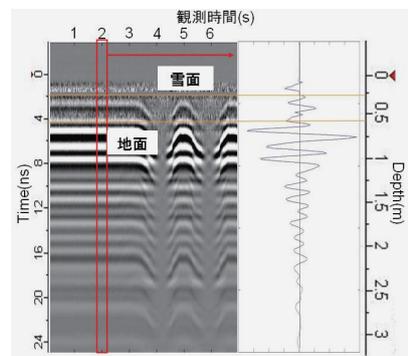


図8 800MHz アンテナによる観測結果

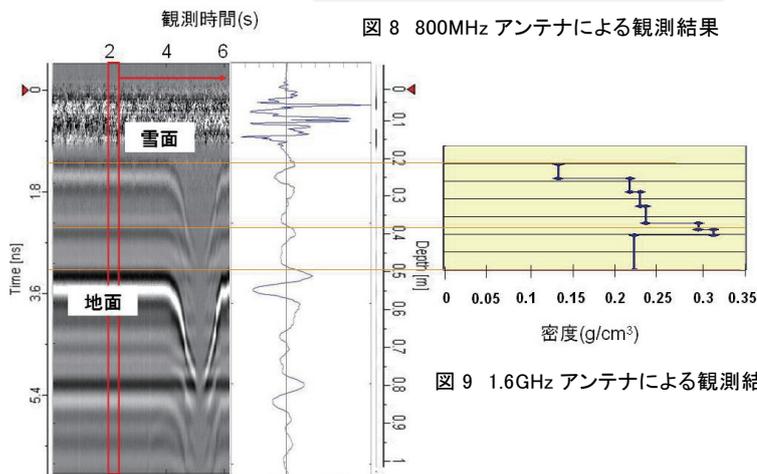


図9 1.6GHz アンテナによる観測結果

点で確認することができた。

(2) 1.6GHz アンテナによる観測 (復路) 結果

雪面反応は捉え続けることができたが、深さに対する取得データ数の設定が少なかったため、地面反応はほとんど捉えることができなかった。

(3) 電磁波速度

結果を図 10 に示す。GPR 観測データから得た地面反応までの往復時間と各キロポストの実測積雪深から積雪の電磁波速度を求めた。実測から求めた $200\text{m}/\mu\text{s}$ から $220\text{m}/\mu\text{s}$ の間に近い値を示した。積雪の浅いところでは密度にばらつきがあることが予想される。

(4) 積雪深実測結果

標高と積雪深観測結果を図 11 に示す。観測の往路の各キロポスト地点にてゾンデ棒により積雪深を観測した。最大積雪深は標高 606m

(19.5km 地点) の 206cm となっており標高 660m を越えた地点からは強風による吹き溜まりと吹き払いが激しく、標高 667m(18.5km) と 715m(17.5km) では地面が露出していた。実測の同一観測区間である標高 434m~573m(22~20km の実測地点) で平均した積雪深を表 2 に示す。過去 3 年で比較したところ、2006 年度:138cm, 2007 年度:178cm, 2008 年度:81cm となっており、2007 年度では一度上昇しているが今年度は過去 3 年中最も積雪が少なかった。

7 まとめ

- ・ 800MHz アンテナを上下させて観測した結果、地面反応が見分けやすくなった。更に画像解析を行ったことで雪面反応も変化するところで確認することができた。知床横断道路観測では停止地点でシステムノイズに埋もれていない地面反応を捉えることができた。
- ・ 1.6GHz アンテナでは雪面を見ることができた。また、上下観測によって地面反応に加え、積雪内部層の密度差 $0.09\text{g}/\text{cm}^3$ の反応を捉えることができた。
- ・ 知床横断道路観測の積雪深の実測を行った結果、標高 660m を越したところから吹き溜まりや吹き払いが激しく、標高 430m~570m 区間での積雪の年度比較から今年度は過去 3 年で最も積雪が少なかった。

参考文献

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.
 物理探査学会編, 1999: 物理探査ハンドブック. 物理探査学会, 第 7 章.

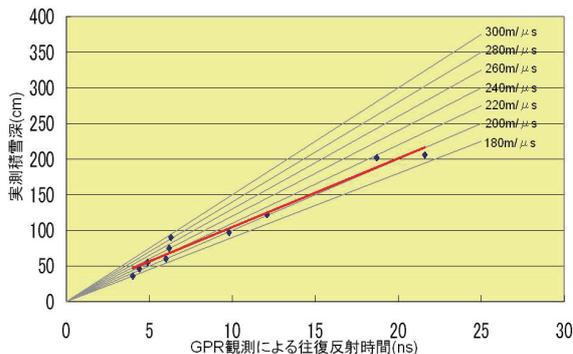


図 10 知床積雪中の電磁波速度

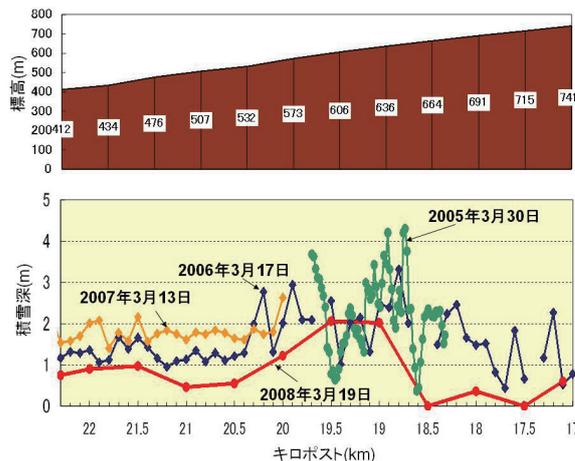


図 11 知床横断道路標高と積雪深

表 2 同一観測区間の平均積雪深比較

年月日	平均積雪深(cm)
2006年3月17日	138
2007年3月13日	178
2008年3月19日	81