

地中レーダー(GPR)による知床峠の積雪観測(2009 年)

木下陽介, 高橋修平 (北見工業大学), 浜名裕司(石川島建材工業)

1. はじめに

積雪の堆積状態を知ることは、吹雪による積雪の再分配機構や山岳地帯での水資源となる積雪を推定する上で重要なものである。実際に雪を掘る積雪の断面観測による方法では多くの時間と労力を必要とし、また広範囲の積雪を見る際には均一性などの問題から誤差が生じる欠点がある。地中レーダー(GPR)は広範囲を迅速に非破壊で観測できる利点があるため、上記の問題を解決することが出来る。しかし、GPR 観測にも問題点があり具体例としては、GPR 内部から生じるシステムノイズと地面信号や雪面信号との判別、電磁波速度の予測等がある。そのため、GPR 観測手法や取得データの解析などを改善する必要がある。

今回 2009 年 3 月 15 日に知床峠横断道路の未除雪区間を GPR により観測した。また、今冬の知床峠の積雪深経過をインターバルカメラによって 4 地点(知床峠頂上付近のカメラは紛失中)で観測した(2008 年 11 月～2009 年 5 月)。このインターバルカメラによるウトロ側 2 地点の積雪観測結果について報告する。新たな観測手法として、システムノイズと地面信号を見分ける手法についても紹介する。

2. 知床峠のインターバルカメラによるウトロ側積雪観測結果

図 1 にインターバルカメラの設置地点を示す。更に図 2 が知床峠横断道路のウトロ側第 3 地点(標高 675m)と第 4 地点(標高 435m)のカメラ映像を示している。積雪深観測結果を図 3 に示す。これにより 2008 年 10 月～2009 年 3 月 15 日 GPR 観測日までの知床峠ウトロ側の積雪開始日、最大積雪深を知ることが出来た。

第 3 地点: 積雪開始日 2008 年 10 月 27 日, 最大積雪深 163cm(2009 年 3 月 15 日) 第 4 地点: 積雪開始日 2008 年 10 月 30 日, 最大積雪深 138cm(2009 年 3 月 2 日)

3. GPR 観測装置, 観測原理

(1) GPR 観測装置

本研究では Mala Geoscience 社製の GPR(写真 1)を用いており、受信周波数は 800MHz のものを用いた。アンテナは電磁波の送信機と受信機が一体となっており、他にパソコン、コントロールユニットを必要とする。電磁波の往復時間は 99ns まで取得した。

(2) GPR 観測理論

GPR 観測を行うと、まず送信機から出た電磁波が反射し、反射してきた電磁波を受信機で受信するまでの時間と反射波の強度が得られる。GPR 観測はこの反射波受信の時間と強度から積雪の深さや内部構造を調べることが出来る機器になっている。積雪中では電磁波速度が遅くなるため GPR 観測データから積雪深を求めるには積雪中の電磁波



図 1 インターバルカメラ設置地点



図 2 インターバルカメラ画像
左: 第 3 地点 右: 第 4 地点

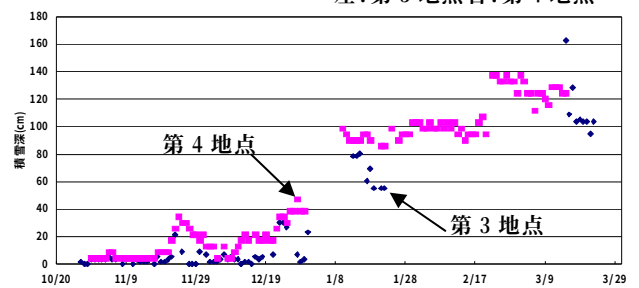


図 3 インターバルカメラによる積雪深観測結果
第 3 地点: 1/1～1/12 吹雪による欠測, 1/23～3/14 カメラ傾きによる欠測
第 4 地点: 1/1～1/12 吹雪による欠測

速度を予測する必要がある。

電磁波速度はまず真空中では次式で表される。

$C=1/\sqrt{(\epsilon_0\mu_0)}$ (C :真空中の電磁波速度, ϵ_0 :真空中の誘電率, μ_0 :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
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
速度は次式のようになる。

$V=C\sqrt{(\epsilon_0/\epsilon)}$ (V :物質中の電磁波速度, ϵ :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。今回の観測で積雪
の断面観測により密度が得られる場所での電磁波速度の予想はこのモデル式にしたが
って計算している。

このように GPR 観測は電磁波を利用し高速かつ非破壊で観測
を行える機器であるが, いくつか問題点があり, 生の観測デー
タには GPR 内部のシステムノイズというものを含んでしまうこ
とが挙げられる。つまり元の GPR 観測データにはシステムノイ
ズと積雪からの信号が混ざっている。そのためシステムノイズ
と積雪からの信号を判別するため, 画像処理解析を行う必要が
ある。



写真1 Mala Geoscience社製 GPR



写真2 雪上車による GPR 搭載ソリ牽引風景

4. 知床峠 GPR 観測

(1) 観測地点

2009年3月15日に知床峠横断道路のウトロ側(22.5km)
～知床峠頂上(17km)まで5.5kmの距離を, GPR 搭載ソリを
主に雪上車により牽引して観測した(写真2)。GPR 搭載ソリ
は22.5km～18.5km付近までは雪上車により牽引し, 18.5km
～18km付近の雪上車が転倒の危険のある区間を人力で牽引
し, 18km～17km区間はスノーモービルによる牽引を
行った。観測コースと標高のグラフを図4に示す。出
発地点では積雪の断面観測と空中信号を取得する観
測も行った。

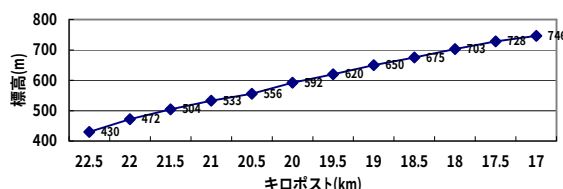
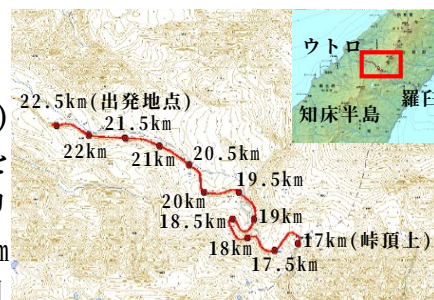


図4 観測コース(上図)と標高(下図)(kmは羅臼からの直線距離)

(2) GPR 搭載ソリ牽引観測

GPR 観測で使用したアンテナの受信周波数は800MHzであり, データ取得インターバ
ルは1秒になっており, 更に位置データをGPSで取得しながら走行した。また, 500m
毎に走行を停止し, 実測の積雪深をゾンデ棒により観測した。GPR 観測用ソリは, GPR
に必要な機材がすべて搭載できる。アンテナ底面と雪面が触れない構造になっており,
そのため取得した観測データは雪面までの距離を考慮する必要がある。

この観測により得られる GPR 観測データの予想電磁波速度は, 観測コース 500m 毎の
実測積雪深と GPR 観測により得られる電磁波往復時間から求めたものを, 前後 200m の

区間において使用した。測深棒の届かない 19km 地点の前後 200m 区間に関しては、出発地点で積雪断面観測により予測した電磁波速度を用いた。

(3) 空中信号を取得する観測

新しい手法として、アンテナを手で持ち、空中信号を取得する観測を行った。受信周波数が 800MHz のアンテナを使用し、データ取得インターバルは 0.01 秒と設定した。観測順序は、アンテナを空中に向け、空中での信号(空中信号)を取得する。次に、アンテナを雪面に近づけて行きぴったりと雪面に接地したら再度、空中信号を取得する。

5. 画像解析

(1) 移動平均減算

解析例を図 5 に示す。GPR 搭載ソリ牽引観測には移動平均減算という画像解析を行う。移動平均減算はアンテナが移動し、変化する信号を抽出することが出来る処理法であり、対象となるデータの前後 90 データを平均した。積雪表層付近の特に強力なシステムノイズが除去され、進行と共に変化する雪面信号、地面信号を読み取ることが可能になった。完全に停止した地点の信号は完全に除去されてしまうが、停止直後の信号により停止地点の信号も読み取ることが可能である。

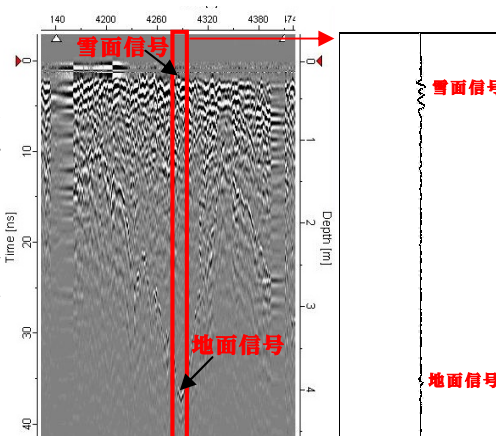


図 5 移動平均減算解析 (20.5km~20km)

(2) 空中信号減算

解析例を図 6 に示す。空中信号取得観測にはこの解析を行う。空中信号 110 データ(12.40 秒~13.50 秒の観測データ)を平均し元データと同じ幅(13.92 秒)に直した減算用データを作成する。システムノイズを含んだ元のデータから、減算用データにより減算を行った。この解析により、システムノイズが除去され地面信号の判別が容易になり、更にシステムノイズに埋もれていた積雪内部からの信号を得ることが出来た。

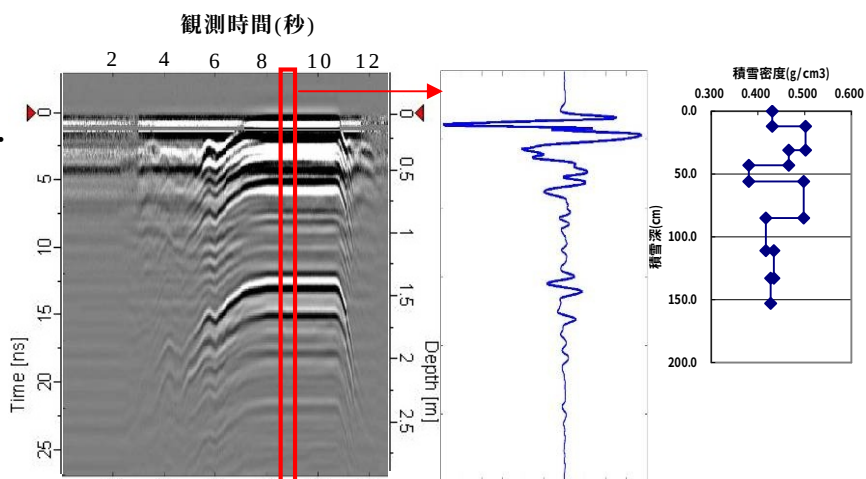


図 6 左図: 空中信号減算解析 右図: 積雪密度データ

6. 観測結果

(1) GPR 搭載ソリ牽引観測結果

観測結果を図 7 に示す。GPR により知床横断道路 5.5km を 100m 毎に積雪深を観測することが出来た。山間部に入るにつれ積雪深は増し、特に 19km 地点では測深棒が届かない最大の積雪があり、GPR により 489cm と

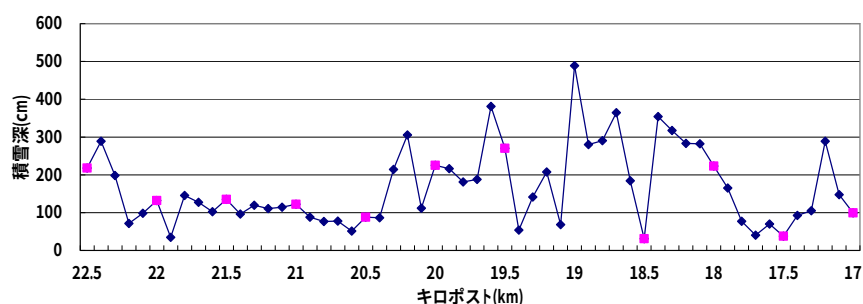


図 7 GPR 搭載ソリ牽引観測結果

予測することが出来た。最小の積雪深は 18.5km 地点であった。

(2) 空中信号取得観測結果

空中信号減算による解析の結果、地面信号以外に積雪内部からの信号が得られた。断面観測の密度変化 0.118g/cm^3 を捉えたが、ほとんど密度変化の無い層からも強い信号を捉えた。これは今回断面観測において含水の影響を考慮していないため、含水層が得られている可能性が考えられる。

7. 考察

(1) 知床横断道路未除雪区間観測結果

19km 地点と 18.5km 地点において最大積雪深と最小積雪深が観測された。これは知床半島に南東風と降雪が影響したことが考えられる。気象庁のウトロ地点でのアメダスデータによると、3月7日と3月14日に強い南東風と共に降雪があったことがわかる。この影響が 19km 地点においては南東方向のすぐ傍の標高差のある斜面からの積雪が多く堆積し、18.5km 地点においては付近に標高差があまり無い地点のため雪が吹き払われたと考えられる。

(2) 知床峠積雪観測年度比較

2005 年～2009 年に行った知床峠横断道路上の実測積雪深観測結果を図 8 に示す。更に同地点数の結果が得られた 22.5km～20km 地点での平均積雪深を比較したものを図 9 に示す。今年度の積雪深は 153cm であり、2006 年から比較すると 2008 年が 81cm であり最も積雪が少ない年であった。

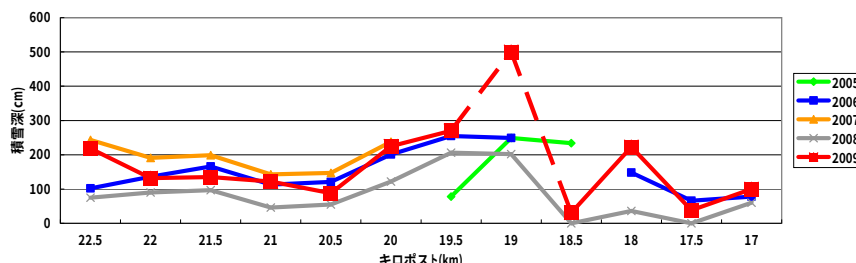


図 8 知床横断道路実測積雪深観測結果

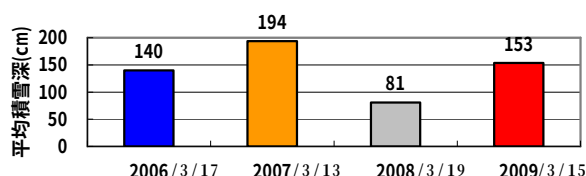


図 9 知床横断道路の平均積雪深(20～22.5km)年度比較

8. まとめ

(1) 知床横断道路未除雪区間積雪観測

- ・ GPR 観測により 100m 毎の連続した積雪深を得た。それにより地点ごとの積雪傾向を知ることが出来た。
- ・ 測深棒では測定不可能な深い積雪深(400cm 以上)を予想することが出来た。
- ・ 実測積雪深を 2005 年～2009 年で比較すると 2008 年が 100cm 以下で最も積雪が少ない年であった

(2) 空中信号取得観測

- ・ 画像解析を行うと積雪内部の密度変化(0.118g/cm^3)の信号を得ることが出来た。

参考文献

- 木下陽介・佐藤研吾・高橋修平・小杉知史(2008):地中探査レーダーによる積雪観測 (4)-知床峠の積雪観測-, 寒地技術論文・報告集 Vol.24,116.
- 松岡健一(2005):16.4 地中探査レーダ, 雪と氷の事典, 674-678
- 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 0E-9, No5, 377-381.