

考古学および雪氷学における地中レーダ探査法

酒井 英男¹⁾・田中 謙次²⁾・Dean Goodman³⁾

1. はじめに

地中レーダ(GPR: Ground Penetrating Radar)探査は様々な分野で利用されているが、最近では考古学における活用もめざましい。遺跡では、探査後に発掘調査が引き続いて行われることも多く、結果を検証できるという特徴がある。1992-97年にかけては、文部省科学研究費・重点領域研究(代表:西村 康)として、電磁気の探査手法の遺跡調査への適用について研究が進められた。本稿では、こうした流れの中で、考古学研究グループの協力を得て実施したGPR探査を報告する。

また、アイスレーダが知られる様に、GPR探査は雪氷学の調査においても有効な手段である。雪氷は、氷、水と空気を構成要素とする媒体であり、電磁波の伝播特性を理論的に検討し易い。第3章では、雪氷の浅部構造の調査としてのGPR探査の可能性にも触れる。

1.1 遺跡探査

考古学では、人間活動の痕跡を発掘調査により探り、歴史を構築する。地下に残された歴史的な情報を収集する直接的な手段として発掘調査があり、考古学における探査の意義は、地下の遺構等の様子を事前に知っておくことである。発掘は繰り返しのきかない実験という表現があるが、探査結果から発掘調査の手順や計画を立てることができれば意義が大きい。

探査で対象とする地下に埋没している遺構は浅

い領域であることから、弾性波探査より、電磁気の手法による探査(電磁気探査)が活用されている。探査手法は電気、磁気、電磁法からなり、GPR探査は、MHzの周波数領域における電磁法探査とも言える。遺跡の電磁気探査は、Clark (1990)が良くまとめており、また、軽部(1997)や西村(1998)は、遺跡探査の意義を詳しく考察している。

遺跡におけるGPR探査については、最近、Conyers and Goodman(1997)が、その研究史から方法論、実際例をまとめている。

1.2 遺跡における地中レーダ探査

遺跡では、遺構や遺物と周囲との誘電率の違いがGPR探査の対象となるので、空洞遺構や金属の遺物は顕著な反射構造として認められる。また、遺構の土壌と周囲土壌との間に空隙率や含水率等の違いがあれば探査が有効となる。電磁波の減衰は媒体の土質に依存するが、考古学では数10cmから5m程度の深度を対象とすることが多い。

装置とともに、探査結果の解析方法の改良も進んでいる。通常のプロファイル解析に加えて、複数の測線から三次元データを作製し、CTスキャンの様にスライス断面を用いる解析が最近の主流である。また、三次元のイメージングも検討されている。

反射物があった際に、その深度を精度良く見積ることが重要である。送信アンテナと受信アンテナの距離を徐々に遠ざけながら、レーダ波の走時から伝播速度を調べて深度を測定する手法が一般に用いられている。本稿の探査では、両アンテナを

1) 富山大学理学部地球科学科:

〒930-0855 富山県富山市五福3190

2) 株式会社田中地質コンサルタント:

〒915-0082 福井県武生市市高2-324-7

3) University of Miami, Geophysical Archaeometry Laboratory:

〒929-2226 石川県鹿島郡中島町横田148

キーワード: 地中レーダ探査, 古墳, 窠跡, 積雪水量, 化石氷体

互いに離していくCMPテスト(Common-midpoint test)により、深度の検討を行った。

埋没した遺構・遺物に対するGPR探査の有効性について、Conyers and Goodman (1997)は従来の研究成果を検討して分類を試みている。GPR探査が非常に有効(Excellent)に作用すると示されたのは、次の対象である。

- (1) 溝や壕、古墳の石室等の空洞
- (2) 金属製の遺物
- (3) 窯跡等の焼成遺構

以下では、これらのGPR探査が有用と考えられる遺構・遺物について、国内での探査例を紹介する。

2. 遺跡における地中レーダ探査

2.1 古墳の探査

日本におけるGPR探査の遺跡への初期の応用研究として、Imai *et al.* (1987)の研究を挙げることができる。同グループは、群馬県・榛名山の6世紀における噴火の際に、降下軽石により一瞬で埋まった子持村の遺跡調査を10年以上にわたって行っている(Tohge *et al.*, 1998)。第1図は、軽石で埋没した古墳を示唆するプロファイルである。この日本のポンペイと称される子持村の遺跡では、竪穴式住居の跡なども探査で明らかにされており、GPR探査の有効性が検討された典型的な遺構となっている。

最近では、日本各地の古墳において内部構造の解明を目的に、GPR探査が多く行われ、石室や石棺墓等に対応する結果が報告されている。Goodman *et al.* (1999)は、宮崎県の西都原古墳においてGPR探査の三次元イメージングを試み、古墳の

主体部において、中央の石室が傾斜している構造を明らかにしている。

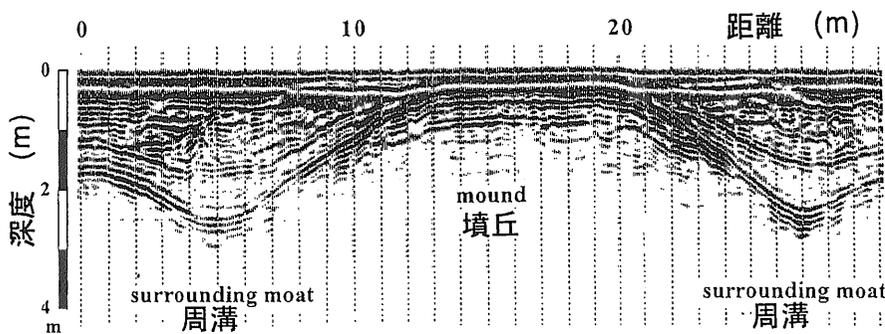
2.2 岐阜県養老町の象鼻山1号古墳における探査

富山大学考古学教室と養老町教育委員会による発掘調査の前にGPR探査を行った。

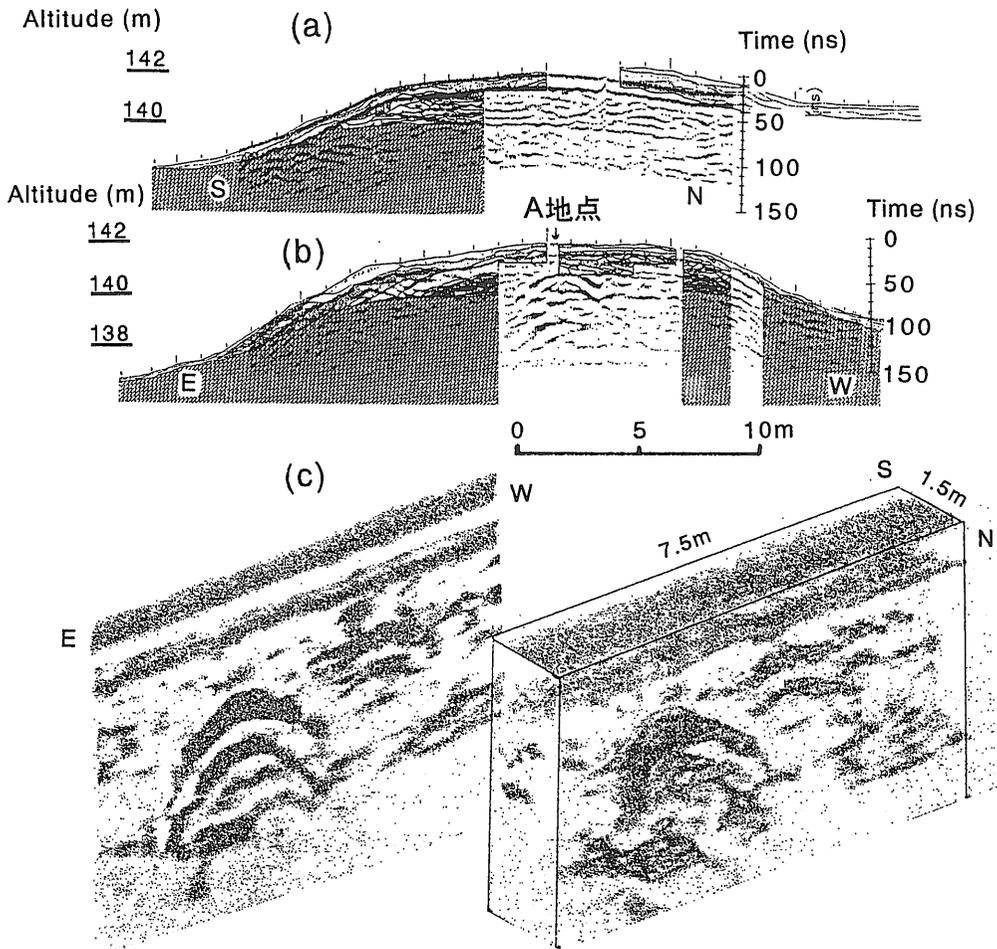
第2図は古墳全体を通したGPR探査で得たプロファイルと、トレンチから確認された地質層序を重ねている。東西断面(b図)では、標高140.8mのA地点に強い双曲線状のパターンラインが現われたが、南北断面(a図)では異常構造は明確に認められなかった。

異常パターンの周辺で、東西走向の測線を10cm間隔に16本設定して探査し、3次元プロットのソフト「スライサ」を用いて解析した。第2図(c)の3次元プロファイルでは、前面の図は16枚の断面図から作成されている。最も強い反射が得られた双曲線パターンは嶺状に続き、遺物の連続性を示している。後面の図は、前面のプロファイルを壁に影を投影する手法(Shadow Pattern)で表しており、全ての断面図を重ね合わせたイメージ図が得られる。この投影図でも、遺物の反射は双曲線状の反射として現れている。

双曲線状の連続するパターンラインは、金属製の埋設管による反応と類似した特徴を有しており、双曲線の頂部に南北走向の線状の埋蔵物(遺物)が存在する可能性が考えられた。CMPテストで推定したレーダ波の伝搬速度(0.073m/ns)を用いて双曲線パターンを解析すると、埋蔵物が直径40cmの物体である条件で最も高い相関が得られ、深度は約1.3mと計算された。また、フラックスゲート磁力計による磁気探査では、強いGPR反射が認められた地域で磁気異常が得られ、異常源が鉄製品で



第1図
子持村の軽石で埋没した古墳のGPR探査プロファイル(Tohge *et al.*, 1998)。



第2図 象鼻山1号古墳における全体を通したGPR探査(周波数200MHz)で得たプロファイル。(a)南北断面図。(b)東西断面図。(c)3次元プロファイル。

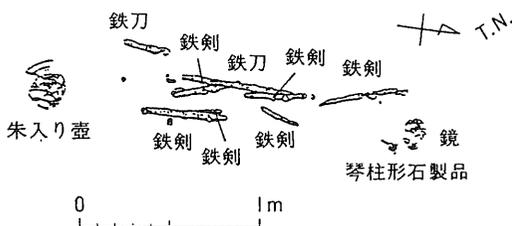
あることを示唆していた。

発掘調査では、墓坑(棺を納める穴、幅6.7m・長さ約2.2m・深さ0.35m)の上面は深度1m付近、底面は深度1.3m付近であることが判った。墓坑の壁や底には石や木による施設はなく、墓坑を作る

土層と墓坑を埋めた土層に違いが殆どなかった。また墓坑底面に据えた棺は木製であり、わずかな痕跡を残してほとんど腐朽していた。これらの理由で、GPR探査の結果に墓坑の上面に対応する顕著な反射が認められなかったと考えられる。

棺内には鉄刀2本、鉄剣5本、青銅製鏡1面、石製品2点、土器1点からなる副葬品を納めていたが、これらは墓坑の底面に南北走向に近い方向を向いて、幅50cm程度の範囲に横たわっていた(第3図)。探査で検出した異常は、墓坑・棺・副葬品の中で、副葬品をとらえたものであると考えられる。

探査で見積った遺物までの深度の1.3mは、副葬品が見つかった位置と良く一致した。鉄製の刀



第3図 墓坑棺内の底面で認められた副葬品の配置。

の刀身の幅は5cm以下であり、他の遺物も幅は狭いものであった。GPR探査では電磁波の反射が相互作用して、数10cmの幅を持つ細長い一つの遺物であるかのように見えたと考えられる。

GPR探査の有効な利用には、レーダ波の伝搬速度を見積る精度を高めること、密な測定から探査結果を3次元で解析することの有用性が認識された。古墳を対象としているが、象鼻山1号古墳での探査は第1章で示した様に、GPRで顕著な反応が期待できる金属製遺物を捉えた研究例でもある(酒井ほか, 1998)。

発掘調査から出土した土器は、古墳の年代が3世紀末頃であることを示し、この種の前方後方墳として全国的に最古級の可能性を持つことが明らかとなった。また埋設施設と副葬品の調査から、同時代の濃尾平野におけるトップクラスの規模・内容をもつと判明した。魏志倭人伝には3世紀中頃に、邪馬台国と戦争する力を持った有力な狗奴国が存在したと記録されているが、象鼻山1号古墳に葬られた方は、狗奴国の王か、その次世代の狗奴国王

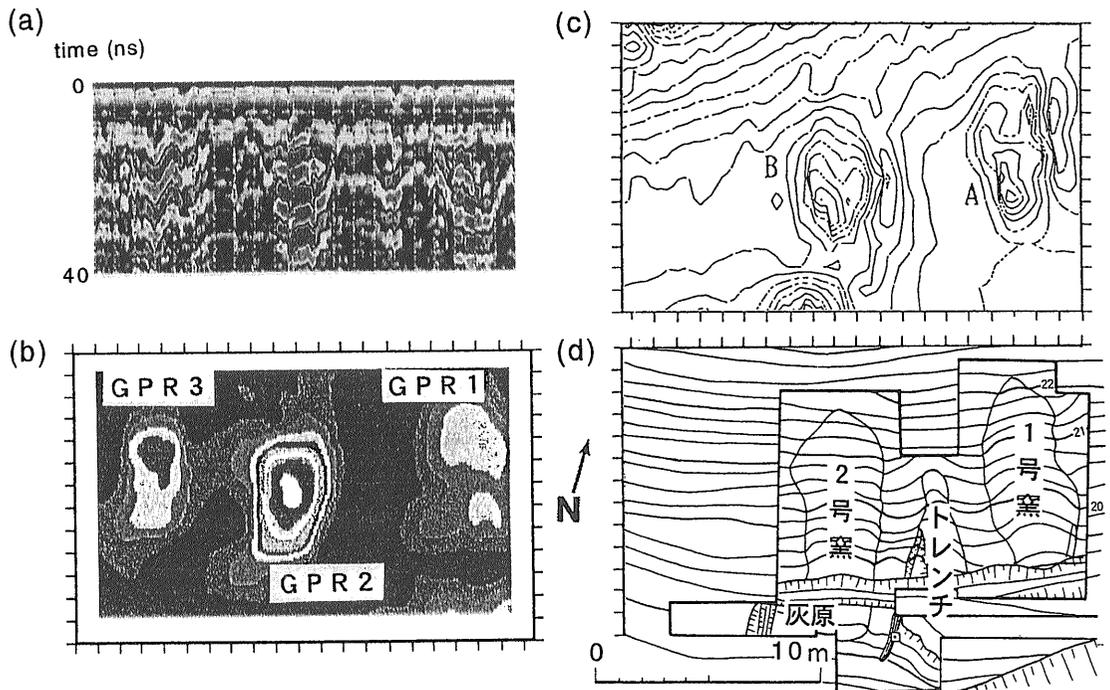
あるいはその王族であった可能性も考えられている(宇野, 1998)。

2.3 窯跡における探査

窯跡等の被熱遺構では、焼土が周囲土壌より磁化が強い(熱残留磁化と高い帯磁率による誘導磁化)領域となるので、磁気探査が有効な手法となっている。また、焼成により土壌の誘電率や導電率も変化するので、GPR探査も焼土遺構を捉えることができる。

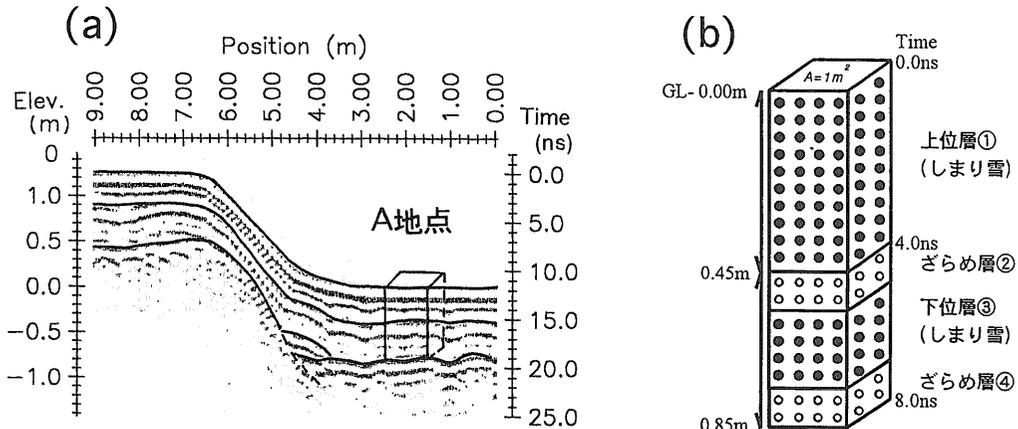
第4図は、能登半島の珠洲市における大島古窯の遺跡において、発掘調査の前に磁気探査と地中レーダ探査を併用した結果である(酒井ほか, 1993; Conyers and Goodman, 1997)。

左の図(a)は、GPR探査で顕著な反射が認められた測線でのプロファイルを示している。GPR探査は300MHzアンテナを使用した。図(b)は、1m間隔の平行な14測線のプロファイルから3次元のデータセットを作製し、16-20nsでタイムスライス(Time slice)した水平断面図である。右の図(c)に



第4図 大島遺跡におけるGPR探査と磁気探査の結果。

- (a) GPR探査のプロファイル, (b) タイムスライス(16-20ns)の図
(c) 全磁気探査で得た分布, (d) 発掘調査結果。



第5図 (a) 積雪でのGPR探査のプロファイル。(b) A地点のトレンチで得た積雪構造。

は、プロトン磁力計で求めた全磁力の分布を示す。GPR探査結果で認められる3箇所異常のうち、1と2の領域は磁気異常の領域と一致しているが、3の領域では磁気異常が現われていない。

発掘調査から、1と2の領域において、磁気異常で示唆した範囲と10cmオーダーの違いで窯跡が見つかった。窯体の幅は4mと日本で最大級の登り窯であり、遺物調査から14世紀の使用と分かった。

GPR探査にのみ異常が示された地域は未発掘であるが注目値する。探査結果から解釈すると、窯跡とは違う遺構との考えの他に、作成中に中止した窯であった可能性もある。つまり、窯は作られたものの未使用で加熱されておらず、熱残留磁化の獲得等の磁気特性の変化は起きなかったが、誘電率には違いが生じたものと考えられる。GPR探査は加熱を受けた遺構で確かに有用であり、また独立な磁気探査との併用で遺構の使用状況も議論できることが分かった。

3. 地中レーダ探査による雪氷の堆積構造および積雪水量の研究

雪氷の構造は、氷、空気、水の要素から構成され、GPR探査結果を理論的に考察し易い。積雪層では、探査により水の影響や帯水層が検出できる。また、南極等においては、雪上車や航空機に搭載したGPR機器による深層氷の調査も行われており、不純物層や氷の物性の違いによる層構造が検討されている。ここでは、雪氷の浅層構造を対

象とした調査を報告する。

3.1 積雪水量の研究

谷や盆地に積った積雪の融解で生じる積雪水量を精度良く把握することは、潜在的な地下水量の推定、融雪水が原因となる斜面崩壊等への対策を考える際に有用な情報になる。GPR探査により積雪構造を調べるとともに、積雪水量を評価する手法を考えた。探査は225～900 MHzの周波数にて行った。

レーダ波の伝播速度は媒体の比誘電率の平方根に反比例するが、積雪中でのレーダ波速度は、氷・空気・水から構成される積雪の氷の割合(氷量率 f_i)と称す)に依存して、通常0.168m/ns～0.30m/nsの間で変化する。速度が0.168m/nsより遅い値は融雪を意味する。含水率が0の乾いた積雪でのレーダ波速度 (V m/ns) は以下の様に表される。

$$V = C / (1 + f_i (\sqrt{K_i} - 1)) \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

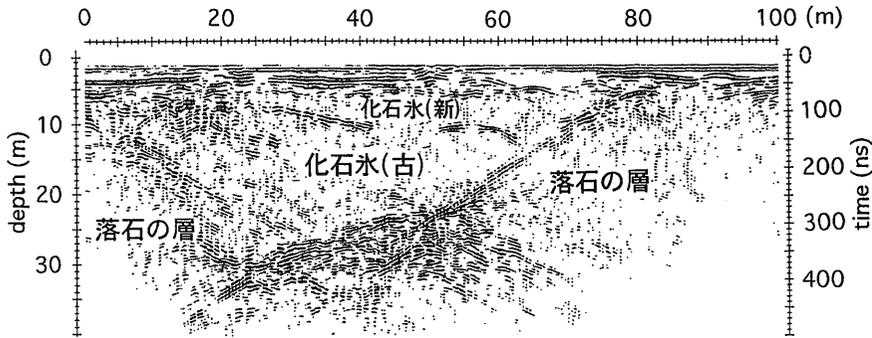
C : 光速度 (0.3m/ns)

K_i : 氷の比誘電率 (3.2 ; Annan et al., 1994)

GPR探査でレーダ波速度を求めれば、式(1)から氷量率 (f_i) が算出できる。水の体積は氷の93%なので、単位体積の積雪より生じる水(積雪水係数と称す: W) は、以下の様になる。

$$W = 0.93 \cdot f_i \dots \dots \dots \text{式(2)}$$

第5図左のa図は、段差のある地域の積雪を対象に、長さ9mの測線で実施したGPR探査のプロファイルを示している。A地点でトレンチを掘った



第6図
内蔵助雪渓で得たGPR
探査のプロファイル例。

結果、探査で推定された積雪層の厚さ(85cm)は実測値と良く合った。また、プロフィールの底面と表層の間に強い反射面が現われ、探査から積雪層は2層構造と推定されたが、トレンチにより反射面にざらめ雪の層が認められ(第5図のb図)、探査結果との対応は良かった。

この積雪層における平均的なレーダ波の伝播速度は0.210m/nsとなり、式(1)から、積雪水係数は0.474と得られた。A地点の85cm高の積雪から単位面積(m²)当りに予想される積雪水は403ℓとなる。次に積雪層を、ざらめ層で分かれる2層構造として検討すると(金属棒を埋めて測定)、レーダ波速度は上位層で0.224m/ns、下位層では0.210m/nsと得られ、A地点の単位面積当りの積雪水量は、上位層180ℓ、下位層202ℓとなり、合計水量は382ℓと推定された。

実際に、A地点の4つの部位から雪試料を採取して溶かして、単位面積(m²)あたりの積雪水量に換算すると、合計したA地点の積雪水量は387.2ℓとなり、GPR探査による推定値と1.3-3.8%の誤差で一致した。

積雪水量の非破壊調査に、地中レーダ探査が有効であることが示された。広域調査の場合には、平行な複数の測線で探査を行えば3次元分析で積雪水量を見積ることができる。精度の良い調査には、降雪がピークを迎えた頃から雪解け時期までの探査が望まれ(田中ほか, 1998)、調査解析法についてさらに研究を進めたいと考えている。

3.2 立山内蔵助雪渓の化石氷体の探査

北アルプス・立山山麓の標高2800m付近に位置する内蔵助雪渓は、日本でも有数の雪渓であり、各種の調査が実施されている。氷体中の植物片の¹⁴C

年代から、縄文期に遡る時代が推定され、内蔵助雪渓は日本最古の化石氷体と考えられている(樋口, 1990)。同地域では、10年以上前に山本ほか(1986)によりGPR探査が行われている。

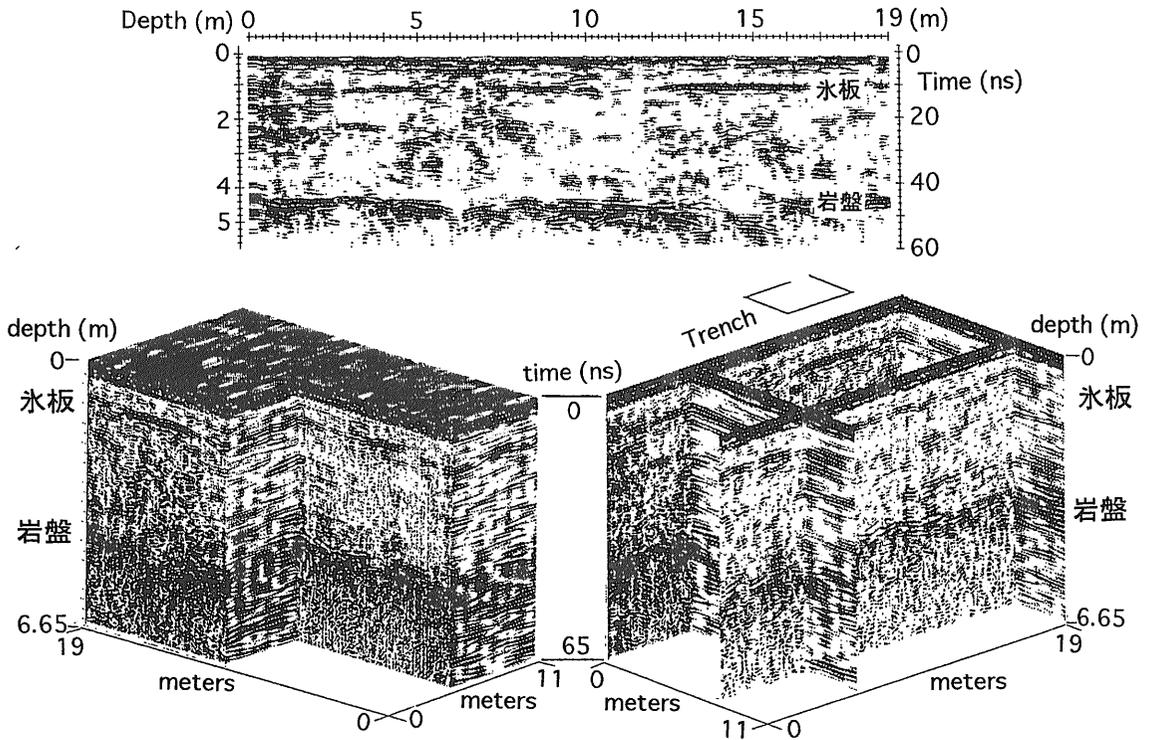
第6図は、内蔵助雪渓において一昨秋に実施したGPR探査(225MHzアンテナ)のプロファイルである。二層に分かれる構造が現れ、雪氷学的な研究と対比すると、深度30m近傍の基盤上の下部層は、縄文期の化石氷体の層と考えられる。上部には1963年以降に新しく化石氷体となった領域があり、また450MHzアンテナで検討すると厚さ4~5mには、春までに貯った新雪の領域も認められた。

3.3 立山室堂平の積雪層の探査

高度の高い山岳地での継続的な雪氷の調査は気候変動の指標を与える。GPR探査により、積雪量と含まれる氷板の数や厚さ等の内部構造を探ることは、暖かい時期と寒い時期の積雪の分類にも役立つと考えられ、非常に意義がある。

立山・黒部の春のアルペンルートで知られている、立山室堂平の雪の大谷の近傍で昨年4月にGPR探査を実施した。室堂平における積雪は、富山市を流れる常願寺川の水源となっており、積雪水量の調査からも興味を持たれる。

探査は、アンテナ周波数450MHzにて、19m長の測線を1m間隔に11本設定して行った。第7図の上に示すプロフィールの様に、積雪深約4m内に複数の反射面が認められた。深度1.2m付近での反射面は、かなり連続性が良い。下には、三次元プロットとして結果を表現した。同地域でトレンチ調査が行われた結果、深度1.2m付近のGPR反射は同深度に一樣に分布する氷板によるものと判明した。



第7図 立山室堂平の積雪層を対象としたGPR探査の代表的なプロファイルと3次元表示。

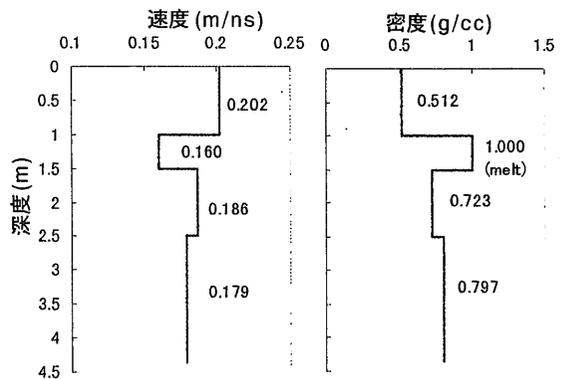
第8図の左には、トレンチの深度1m、1.5mおよび2.5mに埋めた金属製管によるGPR反射から得たレーダ波速度の深さ変化を示している。右は速度から推定した雪の密度の変化である。下位の積雪層は上位より圧縮されており、雪の密度も大きくなっている。

深度1～1.5mの層のレーダ波速度は0.16m/nsであり、3.1節で示した様に、水の存在が示唆される。同層は密度も大きく、深度1.2mに分布する氷板の近傍に水が貯留しているためと考えられた。トレンチ調査の結果はこれと調和的であり、同層が帯水層になっていることを示していた。

また、第7図のGPRプロファイルには上から下へつながる構造が見られる。これは融雪水の“水みち”を示すものと考えられる。

4. おわりに

GPR探査では、精度良い解析に深度の情報は不可欠である。非破壊のCMPテストが一般的であるが、磁気探査では磁気特性の測定により解析精度



第8図 立山室堂平の積雪層におけるレーダ波速度と雪の密度の深度分布。

が向上している様に、GPR探査においても、ボーリングやピット等で得られる試料の誘電率を精度良く測定する方法の開発が望まれる。

遺跡でのGPR探査は、Conyers and Goodman (1997) が有効性を検討しているものの、まだ探査例は多くなく、様々な対象に試みる段階にある。探査の際には、電気探査や独立な物性を扱う磁気探査も同時に行って比較検討することが、結果の解

積に非常に有意義であり、望まれる。

雪氷を対象とするGPR探査では様々な研究が考えられる。本稿では、積雪水量の非破壊調査に有効であることを示した。継続観測による雪氷構造の変化や不純物層（黄砂など）の調査として、GPR探査は、環境変動の研究にも貢献できると考えている。

謝 辞：

著者ら（酒井，田中）は，故Anthony Clark博士に遺跡探査の指導を賜った。また雪氷でのGPR探査では，富山大学・川田邦夫助教授と立山カルデラ砂防博物館・飯田肇氏に協力を頂いて研究を進めている。

参考文献

- Annan, A. P., Cosway, S.W. and Sigurdsson, S. (1994) : GPR for snow pack water content, 5th Int. Conf. on GPR, Canada.
 Clark, A. (1990) : Seeing beneath the soil - prospecting methods in archaeology-, B.T. Batsford Ltd, London, pp.176.
 Conyers, L.B. and Goodman, D. (1997) : Ground-penetrating radar, An introduction for archaeologists, AltaMira Press, pp.232.
 Goodman, D., Nishimura Y., Hiromichi, H. and Okita, M. (1999) : GPR amplitude rendering of the Saitobaru burial mound #13, Leric Foundation, Rome, Italy (in press).
 樋口敬二 (1990) : 日本最古の化石氷体 (北アルプス内蔵助沢) の構

造と形成に関する研究, 平成元年度科学研究費研究成果報告書, pp.181.

Imai, T., Sakayama, T. and Kanemori, T. (1987) : Use of ground-probing radar and resistivity surveys for archaeological investigations. Geophysics, 52, 137-150.

軽部文雄 (1997) : 国土の開発と遺跡保存のための物理探査, 物理探査, 50, 555-577.

西村 康 (1998) : 遺跡探査による地下のイメージング, 物理探査の可視化技術, 地質と調査, 第2号, 土木春秋社, 15-20.

酒井英男・小林 剛・山田剛士・田中保士 (1993) : 石川県珠洲市大島遺跡における登り窯の磁気探査, 『珠洲大島窯』, 富山大学考古学研究, 6, 67-75.

酒井英男・小島信人・宇野隆夫・田中保士・アダムオニール・上坂麻子・佐藤 朗 (1998) : 岐阜県養老町象鼻山1号前方後方墳の電磁気探査-地下レーダ探査と高密度電気探査-『象鼻山1号古墳』, 富山大学考古学研究室編, 真陽社, 53-64.

田中謙次・Adam O' Neill・酒井英男 (1998) : 地下レーダ探査による融雪水量の評価, 第33回地盤工学研究発表会, 1189-1190.

Tohge, M., Karube, F., Kobayashi, M., Tanaka, A. and Ishii, K. (1998) : The use of ground penetrating radar to map an ancient village buried by volcanic eruptions, J. Applied Geophysics, 40, 49-58.

宇野隆夫 (1998) : 象鼻山1号古墳の発掘調査の成果と考察, 『象鼻山1号古墳』, 富山大学考古学研究室編, 86-95, 真陽社.

山本勝弘・飯田 肇・高原浩志・吉田 稔・長谷川浩 (1986) : インパルスレーダーによる内蔵助雪溪の内部構造調査, 雪氷, 48, 1-9.

SAKAI Hideo, TANAKA Kenji, GOODMAN Dean (1999) : Use of Ground Penetrating Radar Methods in Archaeological and Glaciological Investigations.

<受付: 1999年4月1日>

通商産業省 工業技術院 地質調査所 最新地質図発表会

日時: 1999年7月30日 (金)

展示: 9:30-16:30 説明会: 12:00-13:00 (入場無料)

場所: 地質調査所 研究本館 正面玄関ロビー (茨城県つくば市)

地質調査所では昨年9月以降に新しく出版された地質図類の発表会を行います。地質図類は、5万分の1地質図幅6地域、20万分の1地質図幅「村上」「金沢」、鉱物資源図「関東甲信越」、重力図「帯広」「旭川」のほか、日本列島地温勾配図、日本列島重力図、中国モウス砂漠水理地質図などがあります。

平易な説明文のほか昼の時間帯には著者がポスターセッション形式で内容について説明いたしますので、行政関係の方など地質を専門としない方もどうぞおいでください。これらの地質図を購入することもできます。また、当日は工業技術院の統一公開日ですので他の各研究所も見学できます。

問い合わせ先: 地質調査所広報係 電話: 0298-54-3520 ファックス: 0298-54-3504
 ホームページ: <http://www.gsj.go.jp/HomePageJP.html>

交通:

- ・東京駅八重洲南口から、常磐高速バスつくばセンター行き (12-15分間隔), 並木大橋下車 徒歩12分
- ・JR常磐線荒川沖駅東口から関東鉄道バス筑波大学中央行き, 並木2丁目下車 徒歩5分
- ・常磐自動車道桜土浦ICから5分