

# 地中レーダ探査法の雪氷学分野での利用

酒井英男<sup>1)</sup>、中埜貴元<sup>2)</sup>、泉吉紀<sup>3)</sup>、野村成宏<sup>4)</sup>、浦泰宏<sup>5)</sup>、田中謙次<sup>4)</sup>

## 1. はじめに

積雪や氷層の内部を、掘ったりせずに非破壊で調べる方法として地中レーダ（GPR: Grand penetrating radar）探査がある。雪氷学分野でのGPRの導入は氷原の厚さ調査への利用から始まり、南極の氷床調査において有用性が示された。従来、雪氷の浅層の調査にはあまり利用されていなかったが、富山大学では、探査方法やデータ解析を改良しながら、雪氷浅層でのGPRによる研究を進めてきた。

本稿では、GPR探査を富山県立山地域の雪氷と北海道の凍土の調査に適用した研究を報告する。立山地域では、立山カルデラ砂防博物館屋上、室堂平、雪の大谷、内蔵助雪渓の積雪を対象とした。研究では、以下のGPR探査の特長にも着目した。

- (1) 非破壊にて繰り返し調査ができ、積雪内の時間変化も研究できる。
- (2) 断面観測等のスポットデータを広範囲に広げられる。広域調査から融積雪水量のシミュレーション（水資源の推定）も可能となる。

## 2. 立山カルデラ砂防博物館での積雪の研究

博物館（標高約470m）の積雪を研究した。屋上に探査範囲6x11（m）を設けて、長さ11mの測線を間隔1mで設定した。2月の2日-20日の期間に、各日の午前中に探査を行い（図1（a））、その後、断面観測を実施した。探査には、Sensors & Software社の

pulse EKKO 1000を用いた。

図1（b）に示す2月6日の探査結果（各測線のデータを統合した3次元図）には、氷板や、しまり雪とざらめ雪の層が確認できた。使用した電波の周波数（～1GHz）では、雪質の詳細な違いまでは読みとれないが、各層の判別は十分可能であった。

図1（c）の2月14日（快晴）の探査結果には、積雪層内に水みち（水径）が形成されて、融雪が進む過程も認められた。水みちの発達と融雪を検討できる貴重な結果になったが、これはGPRの、非破壊で繰り返し調査できる利点により可能になった成果である。

図1（d）は、屋上の積雪深について各日の探査と実測値を比較している。横軸は断面観測による深度、縦軸は探査で得た深度を示している。探査データは全範囲の平均値である。図の各点のプロットはほぼ直線上に分布し、GPRで得た積雪の深度は実測値と良く合っていた。

GPRの有効性が示されたが、このような非破壊調査をゾンデ棒等によるスポット観測と併用することで、広域の積雪を精度良く調査できる。

## 3. 雪の大谷での積雪層の研究

立山の“雪の大谷”において、5月に見学コース（図2）に沿った測線（140m長）を設けて雪の壁を探査した（泉他、2009）。結果の探査断面図には基盤の上の6mを越える積雪内に氷板の層が5層認めら

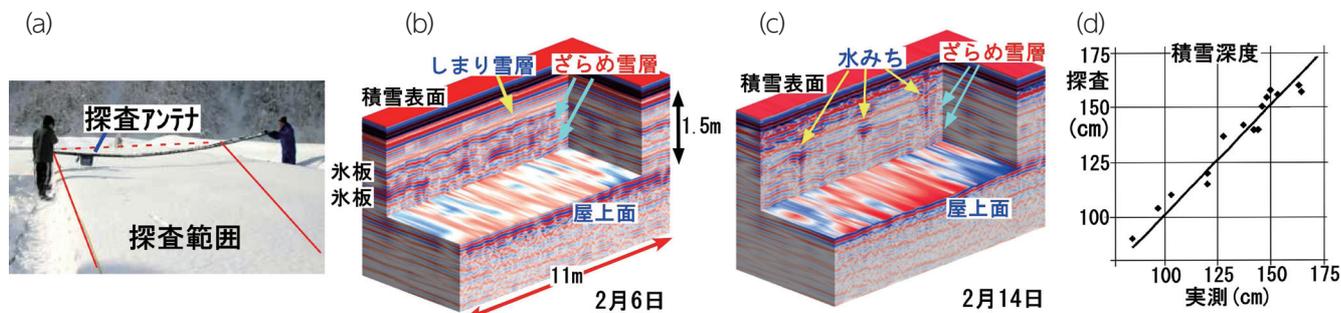


図1. (a) 立山カルデラ博物館屋上での積雪のGPR探査, (b) 探査結果 (2/6), (c) 探査結果 (2/14), (d) 探査結果と断面観測による積雪深の比較.

1) 富山大学, 2) 国土地理院, 3) サレジオ工業高等専門学校, 4) 株式会社田中地質コンサルタント, 5) 元富山大学

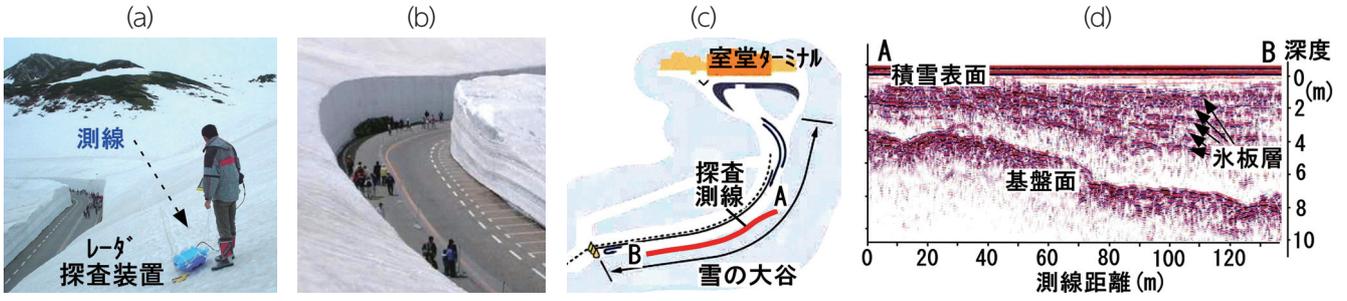


図2. 雪の大谷での雪の壁の探査.

れた。これは、この年の積雪期に5回の暖かい時期があったことを示している。

各氷板の間隔は積雪が深い場所ほど広い傾向がみられる。雪の大谷では、吹き溜まりになっているため、積雪量は降雪量に比例せず、積雪量の調査では注意が必要であった。後述の室堂平で得た同時期の積雪と比較すると、雪の大谷では、確かに氷板の間隔は積雪が深い場所ほど広がる傾向が認められた。

GPR探査で積雪構造が可視化でき、吹き溜まりの影響を実証できた。

#### 4. 山岳地域-室堂平の積雪の研究

山岳地域における融雪期の積雪の研究として、2007年の5-7月に室堂平（標高約2450m）においてGPR探査を行った（泉他、2009）。図3 (a) の地域に約150×150 (m) の探査範囲を設けて、そこに12本の測線をD-GPSにより設定した。図中の◎地点を探査の基準点として探査を行った。

図3 (b) には、基準点を通る測線における各月

の探査結果を比べている。基準点付近の積雪深は、5月の結果（上図）では約7mあり、そして表面から1mと2m地点に氷板層（破線）の反応が認められた。6月時点（中図）では、積雪深は約4.5mに減り、5月にあった氷板層はほぼ消えていた。7月には、積雪深は約2mまで減少した（下図）。

また雪氷中での電磁波の伝搬速度を求めると、5月は0.187m/ns、6月0.177m/ns、7月0.166m/nsと徐々に低下しており、これは、積雪層内に融雪水が蓄積されていることを示していた。

GPR探査により基盤面の反応が明瞭に得られ、積雪深が推定できたので、各月の積雪深の分布図（図3 (c)）を作成した。基準点から北約50m地点で積雪深は最も深く、その位置は変わらなかった。また平均積雪深は、5月（5.3m）、6月（3.3m）、7月（1.6m）と減少した。

GPR探査で得られた広範囲の積雪深と氷板数や厚さ等の構造は、気候変動の研究も含めて各方面で有益な情報となる。

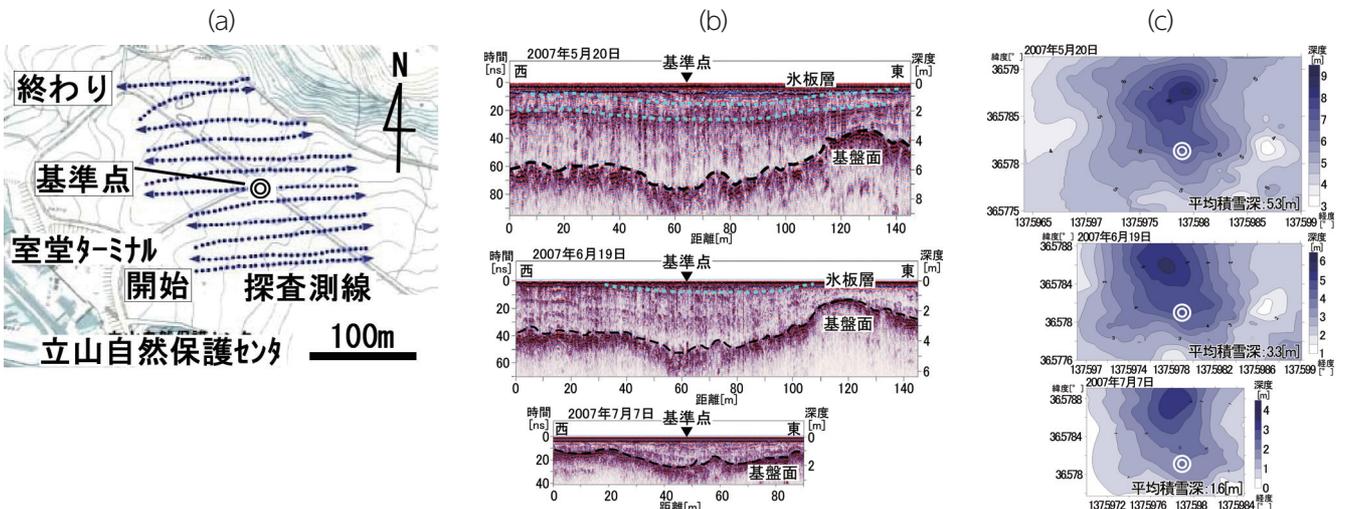


図3. (a) 探査範囲と測線 (◎：基準点) . (b) 室堂平での基準測線上の探査結果 (上：5月、中：6月、下：7月) (c) 室堂平での5-7月の積雪深分布 (◎は基準点)

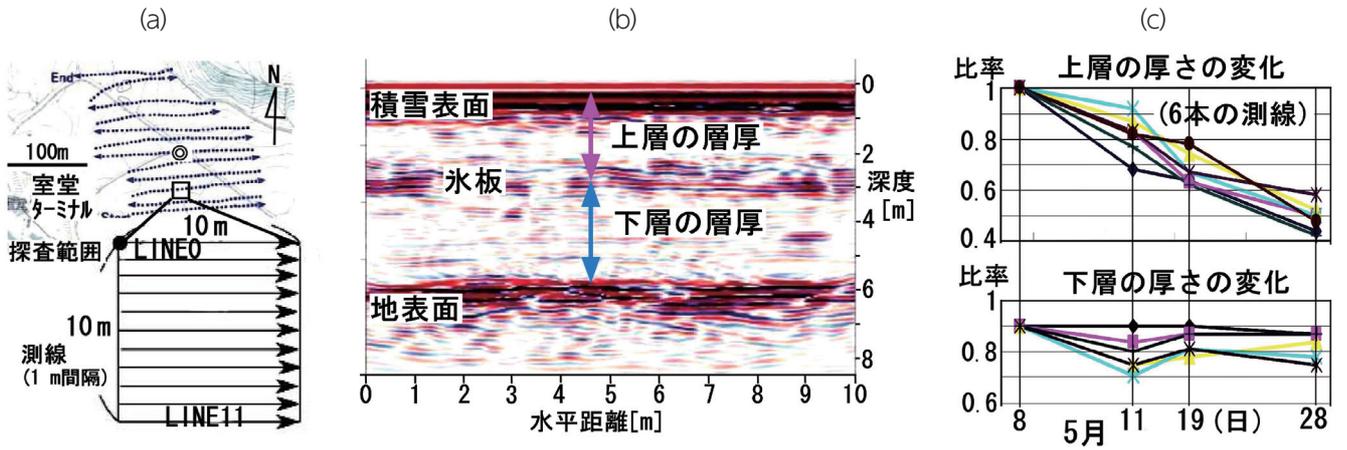


図4. 室堂での融雪の研究 (a) 定点探査の地点と範囲, (b) 5月8日の探査結果, (c) 上層と下層の層厚の変化.

#### 4. 1. 融雪過程の研究

GPR探査は非破壊であり、積雪構造の時間変化を研究できる。図4 (a) に示す地点に10m四方の範囲を設けて、融雪の進行を研究した。探査は5月8、15、19、28日に実施した。図4 (b) は5月8日の探査例であるが、積雪深は6mあり、氷板層（深度3m）を境界に上下層に分けられた。代表的な6本の測線について、5月8日のデータを基に、上下層の層厚の変化を求めた所（図4 (c)）、以下の特徴が得られた。

氷板より上層は日が経つと減っているが、下層は、上層の層厚が半分になるまであまり減っていない。融雪は最初、氷板より上層で水みちの発達と共に進み、その後、氷板が壊れてから下層の融雪が始まっていた。

従来、融雪は上層から進むと考えられていたものの、観測はできなかった。GPRにより積雪内での変化が可視化でき、初めて氷板が関係する融雪過程が検証された。氷板と水の挙動のGPRによる調査は、融雪期の災害要因の研究にもつながり、今後の発展が期待される。

#### 5. 立山の内蔵助雪渓での調査

GPR探査では誘電率が対象であるが、比誘電率の違いにより雪水中の水は検知し易く、また土や礫も見つけ易い。

日本最古の弥生時代（約1700年前、C14年代）の化石氷体が残る内蔵助雪渓において、我々は雪渓構造の探査を、1997年と2005年に行っている（酒井他,1999,2006; 中埜他,2007,2010; Sakai et al.,2006）。

図5は、2005年9月16-17日（表層が融けた時期）

に実施した結果であり、断面図では、25m深度までの雪渓内に、礫層や帯水層、越年性雪渓、氷河水層が確認できた。内蔵助雪渓は、上部の越年生雪渓（フィルン層）と下部の化石氷体で構成され、深さ5 m付近に不整合があることが現地での調査で示唆されていたが、GPR探査でも深さ5-7 m付近に不整合面が検出されている。

またフィルン層は雪渓の中央部から西側で厚く、雪渓下の基盤地形は、やや東西に伸びたお椀型を呈した。雪渓は最大約23 mの層厚で、全体の体積は

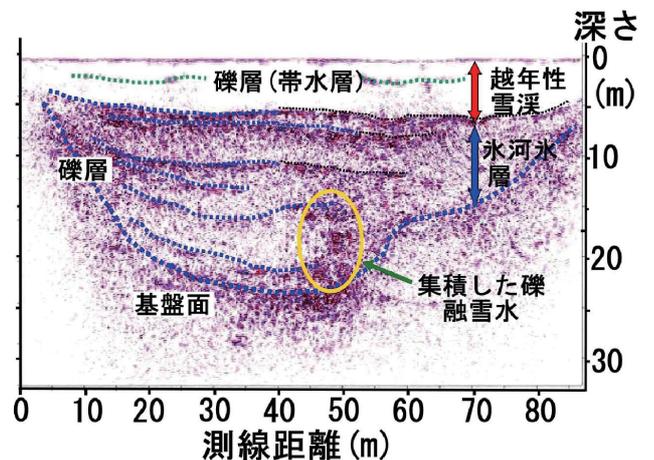


図5. 立山の内蔵助雪渓におけるGPR探査の結果

約136000 m<sup>3</sup>と見積もられた。

また、内蔵助雪渓での1997年と2005年の探査結果について、1983年に行われた調査（山本他,1986）と比較して雪渓の厚さの変化を検討した。その結果、1983-2005年の22年間に、厚さが最大約8m減少した可能性が示された（酒井他,2006;中埜他,2010; Sakai et al., 2006）。

中埜他（2016）では、これらの研究により雪氷学会の最優秀発表賞を受賞している。その後、福井他（2018）は、1983年と2016年の探査結果を比較して、33年間で3mほど薄くなったと報告している。

1983年から2016年までに、内蔵助雪渓では4回のGPR探査が行われた。それらの探査において、測線の位置は厳密には一致していない。また、各探査の結果において、氷体下部の岩盤の反射は非常に明瞭とは言えないので、氷体の厚さの読み取りには誤差が含まれている。

以上のことから、氷体の変化についての検討は容易ではないが、酒井他（2006）等で示唆した内蔵助雪渓の化石氷体の厚さが減少していることは、確実のようである。今後も継続的な調査が望まれる。

## 6. 雪氷に関する自然災害の研究

雪氷が関わる災害として融雪期の土砂災害の研究も重要である。また寒冷地での凍土の被害も多い。



図6. 北見工業大学での凍土のGPR探査.

近年は山岳地域において、凍結により緩んだ堆積土が融雪期に起こす土砂災害が、砂防・地盤工学の研究課題となっている。地震による雪崩と斜面崩壊の複合災害も知られる。また、火山噴火の噴出物による融雪泥流の研究も重要になっている（Sakai & Inokuchi,2003; 酒井他,2004, 村重他,2015）。

以下では、凍土のGPR探査及び融雪期の地震による土砂災害についてGPR探査を行った結果を紹介する。

### 6. 1. 凍土の調査

北見工業大学の凍土研究施設において、鈴木輝之先生のご協力を頂いて、凍結面のGPR探査を行った（図6）。GPRでは、凍土層は弱反射の領域となった。更に、複数測線の結果を統合して、凍結面を三次元の断面図で表現できた。図6の下図は最大凍結期（2月）のものであるが、深度約0.8mに凍結面が明瞭に現れた。

GPR探査は凍土の可視化に有効で、また繰り返し探査により、凍土の発達も追えることが判明した（Nakano and Sakai,2008）。

### 6. 2. 積雪地域での地震による斜面崩壊

GPR探査では土中の雪氷も調査できる。

積雪期に斜面崩壊が発生すると、崩壊した土砂は雪を巻き込んで被害も大きくなる。また土砂中の雪が融水となり地盤の緩みや陥没を起こす二次災害も懸念される。従来、土砂に取り込まれた雪の影響は殆ど研究されていなかった。

2011年3月に長野県北部地震が発生した図7。震源から約9km離れた新潟県津南町三箇辰ノ口地区では、地震動に誘発されて大規模な雪を巻き込む土砂崩壊が生じた。図7（b）に示す崩壊地（130m×130m）では、雪が混入した土砂が流出し、国道353号線を埋塞した（上石他,2012）。

地震から5ヶ月後の8月に、GPR探査を図7（b）の場所において、100MHzアンテナで行い、土砂中の雪を調査した。図8には、探査の様子と探査結果を示している。解析では、CMP調査（Annan & Cosway,1992）で得た伝搬速度0.06m/nsを使用した。また、測線上の高度をD-GPSで測定して、探査結果に地形補正を施した。

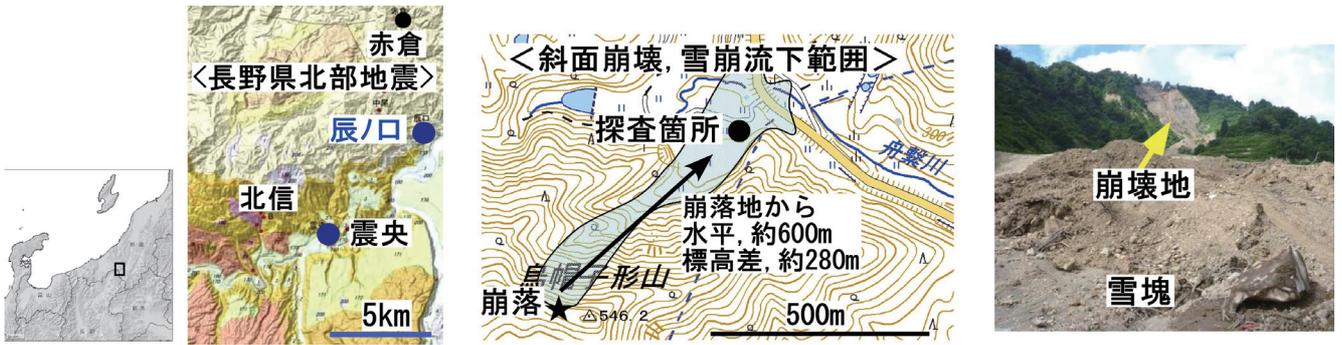


図7. (a) 長野県北部地震と津南町辰ノ口地区, (b) 辰ノ口地区での土砂崩壊, (c) 土砂崩壊地.

(1) 2011年8月の探査の結果例（断面図）を図8に示す。測線距離14-24mの地中に雪を示す強い反射が捉えられていた。これは、崩壊の雪崩で土砂中に混入した雪の5ヶ月後に残っている雪塊の反応であった。

(2) その後、地震から1年7ヶ月後の2012年10月に工事現場で掘削が行われて、図9上に示す様に、地表から約4.2mの深度において厚さ約1mの雪塊が検出された。雪の状態は圧縮されて氷状になっていた。

それから1ヶ月後の11月に、掘削場所の近傍において約40m長の測線を設けてGPR探査を行った。図9下図の探査結果の断面図には、距離22m、深度2.5-3mに明確な反応が得られ、土砂内に残る厚さ1mを超える雪を示していた。

津南町では、当時の年間の平均気温は約10.5℃

であった。最高気温が34℃を超える日もあったが、上述の様に崩壊した土砂内に取り込まれた雪は越年して残っていた。その理由として、以下のことが考えられる。

- ① 土砂で雪が圧縮されて、滞留した空気の断熱効果により、雪の温度は約0℃で安定していた。
- ② 堆積土砂は水分を多く含んでいたため、水の断熱作用によって地中の温度は外気温の影響を受け難かった。

この研究で示された様に、崩壊土砂の中にとじ込められた雪はその条件によっては一年半後も残っている。その残雪の融雪による水で土砂は弱層となつて、二次土石流の発生や地盤沈下につながる可能性がある。土砂内に残る雪を非破壊で調べるGPR探査は、こうした災害を防ぐ上でも有用である。

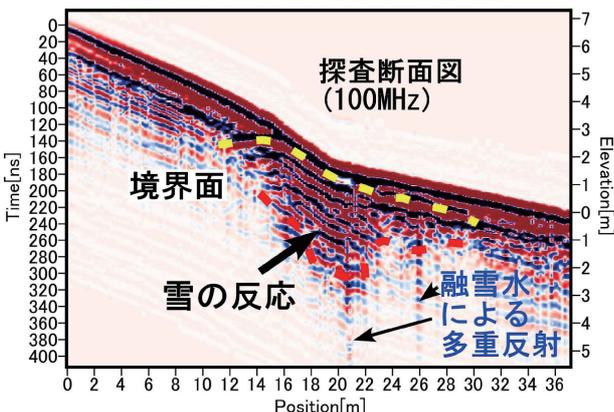


図8. 2011年の探査状況と探査結果.

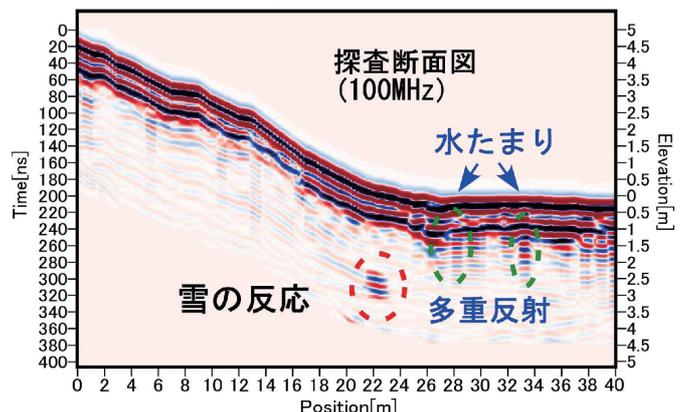


図9. 2012年に見つかった土中の雪と探査結果.

## 7. おわりに

地中レーダ (GPR) 探査による雪氷の浅層での研究として、富山県の立山カルデラ砂防博物館屋上、立山の室堂平、雪の大谷、内蔵助雪渓での積雪と北海道の凍土の調査を紹介した。

GPR探査の、非破壊で対象を繰り返して調査できる特長により、積雪構造の時間変化も研究でき、断面観測等のスポットデータを広範囲に広げられることなど、雪氷浅層のGPR探査は有効であった。

長野県北部地震 (2011年3月) の際、震源から約9km離れた新潟県津南町で斜面崩壊が起き、積雪を巻き込む土石流被害が生じた。同地域でのGPR探査の実施により、土砂内の数m深度に残る雪は崩壊の1年7-8ヶ月後にも確認された。その融雪による崩壊の対策でも土砂中の雪のGPRによるモニタは有用となる。

立山カルデラにおいても崩壊土に残る雪や凍土が、地滑り・土砂崩壊の原因になる可能性がある。その様な災害の対策においてもGPR探査は役立つと考えられる。

GPR探査では、アンテナを壁面に当てることで、横からの調査も行える (泉・酒井,2014)。雪氷学分野でもいろいろな新たな探査の対象も考えられるので、皆様にも利用をご提案頂ければと思う。富山大学の研究グループは、GPR装置を所有し、研究では基本の電磁気学を踏まえて装置・解析法を改良できる利点がある。今後もこれを強みとして、GPR探査の雪氷での研究を進める予定でいる。

## 謝辞

研究では、飯田肇氏 (立山カルデラ砂防博物館)、上石勲氏 (防災科学技術研究所)、鈴木輝之先生 (元・北見工業大学教授) にお世話になった。

## 参考文献

Annan, A. P. and Cosway, S. W. (1992) : Ground penetrating radar survey design, Processing of the symposium on the application of geophysicist to engineering and environmental problems, 329-352.  
 福井幸太郎・飯田肇・小坂共栄 (2018) : 飛騨山脈で新たに見出された現存氷河とその特性, 地理学評論, 91-1, 43-61.

泉吉紀・酒井英男・石坂雅昭・阿部修 (2009) : 積雪構造の地中レーダによる研究-人工積雪でのモデル実験, 寒地技術論文・報告集, 25, 88-91.  
 泉吉紀・酒井英男・飯田肇 (2009) : 地中レーダによる立山地域の積雪構造の研究-室堂と雪の大谷において-, 寒地技術論文・報告集, 25, 83-87.  
 泉吉紀・酒井英男 (2014) : 壁面からの地中レーダ探査による遺構内部構造の研究, 情報考古学, 20, 1-7.  
 Izumi, Y., H. Sakai and I. Kamiishi (2015) : Detection of buried snowpack in landslide sediments using ground penetrating radar, J. Natural Disaster Sci., 36, 55-665.  
 上石勲・堤大三・宮田秀介・藤田正治・酒井英男 (2014) : 融雪型火山泥流発生機構解明のための高熱岩石による融雪実験とモデル計算, 寒地技術論文・報告集, 29, 34-37.  
 村重慧輝・堤大三・宮田秀介・藤田正治・酒井英男・上石勲 (2015) : 火山泥流発生機構解明のための高温砂礫による融雪に関する実験的研究, 砂防学会誌, 第67巻, 3-10  
 中埜貴元・酒井英男・鈴木輝之・飯田肇 (2006) : 凍土における地中レーダ探査法と高密度電気探査法の適用研究, 立山カルデラ研究紀要, 第7号, 立山カルデラ砂防博物館, 37-42.  
 中埜貴元・酒井英男・飯田肇 (2007) : 内蔵助雪渓における地中レーダ探査報告 (2005年調査), 立山カルデラ研究紀要, 8, 立山カルデラ砂防博物館, 5-10.  
 Nakano, T. and H. Sakai (2008) : Application of ground penetrating radar in the study of frozen soil, Bull. Glaciological Research, 25, 27-35.  
 中埜貴元・酒井英男・飯田肇 (2010) : 地中レーダによる立山内蔵助雪渓の体積と層厚変化量の推定, 雪氷, 72, 23-34.  
 酒井英男・田中謙次, D. Goodman (1999a) : 考古学および雪氷学におけるGPR探査法, 地質ニュース, 537, 6-23.  
 酒井英男・川田邦夫・田中謙次・飯田肇 (1999b) : GPR探査による雪氷の堆積構造および積雪水量の研究, 寒地技術論文・報告集, 15, 26-30.  
 Sakai, H. and T. Inokuchi (2003) : Rockmagnetic study on the debris avalanche deposits of

Bandai Volcano -debris at 1888 eruption and Okinajima debris-, J. Japan Landslide Society, vol.40, 22-31.

Sakai, H., Y. Ura, T. Nakano, H. Iida and K. Muroi (2006) : Study on the internal structure of Kuranosuke snow patch in the central Japan by ground penetrating radar survey, Bull. Glaciological Research, 23, 77-84.

酒井英男・浦泰宏・中埜貴元・岸田徹・飯田肇・室井克則 (2006) :富山県立山地域における雪氷の構造の地中レーダ探査法による研究-内蔵助雪渓での調査-,立山カルデラ研究紀要,7,立山カルデラ砂防博物館, 23-30.

酒井英男 (2012) :焼岳の火砕流起源の堆積物と融雪泥流の証拠の調査 (第2章),堤大三・酒井英男・上石勲編:融雪型火山泥流の発生機構解明とその防災への適応に関する事業報告書,北陸建設弘済会,pp.22.

酒井英男・澤田豊明・畚野匡・井口隆 (2004) :磁化特性を用いた火山堆積物の定置温度の推定と分類,防災科学技術研究所研究報告,第65号, 163-171.

酒井英男 (2023) : 雪氷学分野での地球電磁気研究の利用,日本雪工学会誌, 39.1, 9-11.

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渓の内部構造調査, 雪氷,48,1-9.