

地中レーダによる新潟県十日町市松代における 泥火山の浅部構造調査

横田 俊之¹⁾・尾西 恭亮²⁾・真田 佳典³⁾

1. はじめに

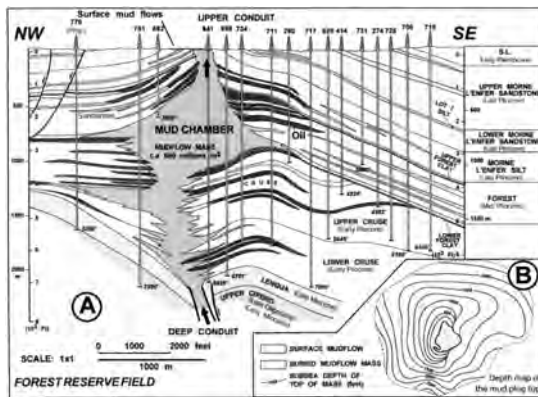
皆さんは、泥火山をご存知でしょうか？ それでは、地中レーダ (Ground Penetrating Radar = GPR) 探査は？ このお話は、泥火山の浅部構造を地中レーダで調査したという、少し珍しい (マニアックな?) お話です。泥火山も地中レーダも誰でも知っているというものではありませんので、本題に入る前に簡単にそれぞれを説明します。GPR探査の詳細については、物理探査ハンドブック (物理探査学会, 1998) をご参照下さい。続いて、新潟県十日町市松代の室野地区の泥火山の特徴について簡単にまとめます。それらをふまえて、室野地区で実施したGPR探査結果を紹介することにします。

2. 泥火山について

泥火山とはどのようなものでしょうか？ 新版『地学事典』 (地学団体研究会, 1996) によると、“でいかざん”, “どろかざん” 両方の見出しとともに説明があるという少し不思議なことになっています。でいかざんの方では、『水を多量に含む粘土が、地下から脱出するガスによって吹き飛ばされてガス噴出孔のまわりのできる円錐形の丘。ガスは火山性起源の場合もあれば、メタンガスのように火山と関係なく含油層から由来したものもある。』と説明され、どろかざんの方では『異常な高間隙水圧をもった泥が泥ダイアピルとして上昇し、陸上に噴出したもの。 (一部省略) 泥火山の活動はしばしば激しく噴出量も多い。ガスを伴って噴出することが多く、地下の硬い岩石や礫を岩塊としてもち上げてくることが知られている。』と説明しています。両者の説明のニュアンスは若干違いますが、地下に

高い間隙水圧をもった泥水が存在し、それが地表まで上昇してきて、泥の小丘を形成したものと考えることができそうです。

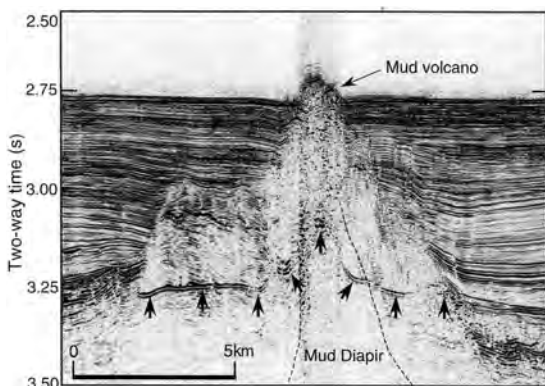
世界中には数多くの泥火山がありますが、中央アジアのアゼルバイジャンには特に多くの泥火山があることが知られています。この地域の泥火山は、世界的に有名なバクー油田に起因する異常高圧層の存在と関連が深いことが知られています (Bredehoeft *et al.*, 1988)。Azerbaijan International というWEB site (<http://www.azer.com>) の2003年の情報 (http://www.azer.com/aiweb/categories/magazine/ai112_folder/112_articles/112_mud_volcano.html) によると、地球上に存在する泥火山は700ほどで、そのうち300はアゼルバイジャン東部およびカスピ海中



第1図 トリニダード島の泥火山の概念図 (Deville *et al.*, 2003より引用)。(A) 垂直断面。泥火山は、深部のパイプ状構造、マッドチャンバー、頂上の噴出部で形成されている。マッドチャンバーは粘土層内に選択的に形成される。(B) マッドチャンバー頂部の深度マップ。マッドチャンバー頂部は円錐状の形状をしている。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門
2) 京都大学
3) 京都大学 (現在, 独立行政法人 海洋研究開発機構)

キーワード: 地中レーダ, 泥火山, 三次元構造調査

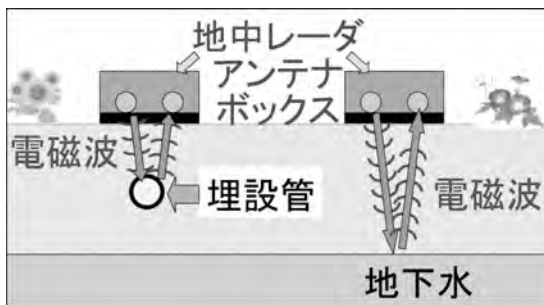


第2図 熊野海盆の海底泥火山での地震探査結果 (Baba and Yamada, 2004より引用)。中央白抜き部分が泥火山の泥ダイアピル。矢印で示してあるのは、ガスハイドレートの存在と関連が深い海底擬似反射面 (BSR=Bottom Simulating Reflector)。

にあるそうです。中米のバルバドス島からベネズエラ北部にかけても多くの泥火山があります。その中にある、トリニダード島の泥火山では多くの井戸が掘られ、その結果から、泥火山の地下の形がモデル化されています (第1図, Deville *et al.*, 2003)。

わが国では、北海道の新冠の泥火山 (千木良・田中, 1997) や、九州南部 (Ujiié, 2000) および熊野海盆 (Baba and Yamada, 2004; 中村ほか, 2006) の海の泥火山が知られています。海の泥火山は、海底の堆積物を押しつけて地下深部から上がってきて、海底で形状が保たれるため、地震探査でその形状をきれいにとらえることができます (第2図)。

泥火山は時々われわれの生活に被害を与え、防災という観点から注目されることがあります。2001年アゼルバイジャンのバクー市郊外では、泥火山がいきなり“噴火”し10-20mの炎を上げました。最近では、2006年のインドネシア、シドアルジョの泥噴出事故が知られています (<http://mudflow-sidoarjo.110mb.com/index.htm>)。これは、地中の異常高圧層から泥水が大量に噴出し、噴出した泥によって、村が埋まってしまったという大きな事故です。泥の噴出量は、当初一日5万m³程度だったのが、時間がたつごとに増え続け、2007年夏の段階では一日10万m³もの量が噴出し続けるというたいへんな事態になっています。わが国では、北陸急行 (ほくほく線) の鍋立山トンネル掘削時の掘削障害がよく知られています。このトンネル



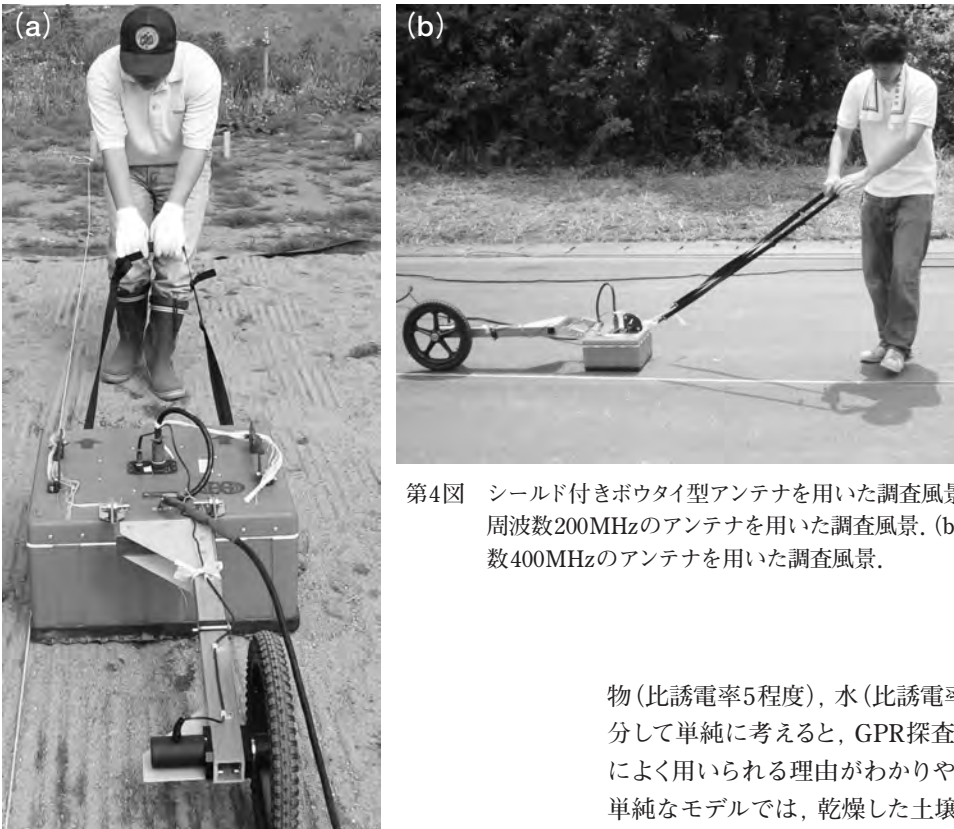
第3図 地中レーダ探査概念図。アンテナボックス内の送信アンテナから発信された電磁波が、埋設管や地下水水面から反射し、アンテナボックス内の受信アンテナで受信される。

は膨潤性の堆積軟岩が大きな地圧で押し出してくるため難工事の連続で、全掘削に3年の中断を含めて21年かかったことで知られています。この膨潤性の堆積軟岩は泥火山と関係があるといわれています (千木良・田中, 1997; 新谷・田中, 2005)。

3. GPR探査について

GPR探査とは、地面の中に高周波数 (数十MHz～数GHz程度) の電磁波を送り、地層の境目や、地下に埋まっている物体にぶつかり、反射された電磁波を観測して、地面の中を調べる物理探査法です (第3図)。地面の中に電磁波を送り込むためには、GPRアンテナと呼ばれる装置を使います。GPRアンテナは、地中に電磁波を効率的に送り込むようにさまざまな工夫がなされていますが、中心部は金属の棒やボウタイ型をした金属板に電気を流す仕組みになっています。シールド付きボウタイ型アンテナを用いたデータ取得風景を第4図に示します。

電磁波は誘電率 (ϵ)、導電率 (σ) もしくは透磁率 (μ) という電磁氣的性質が異なる物質の境界で反射します。ここでは、海水など導電率が極端に大きい場合は除いて説明を行います。その場合は、導電率 (σ) は電磁波速度 (v) にはほとんど関係せず、GPR調査に用いられる周波数帯域では、電磁波速度を以下のように書くことができます。なお通常は、誘電率や透磁率がそのまま用いられることは少なく、真空中の誘電率 (ϵ_0) や透磁率 (μ_0) との比である、比誘電率 (ϵ_r) もしくは比透磁率 (μ_r) の形で用いられます。



第4図 シールド付きボウタイ型アンテナを用いた調査風景. (a) 中心周波数200MHzのアンテナを用いた調査風景. (b) 中心周波数400MHzのアンテナを用いた調査風景.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1)$$

(1) 式中, c は電磁波が真空中を伝わる速さ(光速と同じ $3.0 \times 10^8 \text{m/s}$) を表します.

表層部を構成する土壌, 岩石, 水などは一般に非磁性物質(正確には常磁性および反磁性物質)と呼ばれる, 磁石に付かない物質がほとんどです. そのような非磁性物質の比透磁率 (μ_r) は $0.9999 \sim 1.02$ 程度の値となります. 従って, 強磁性物質である鉄, コバルト, ニッケルなどの埋設物などが無いとすれば, 比透磁率 (μ_r) はほとんど1に近くなり, 無視することが可能です. そのため, (1) 式は,

$$v \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)'$$

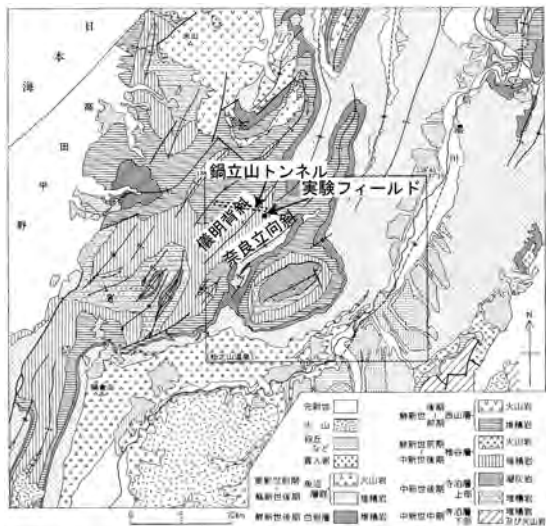
と書き換えることができ, GPR探査では主として物質の誘電率の違いを見ることとなります. 地表付近の物質の比誘電率を考える場合, 空気(比誘電率1), 鈹

物(比誘電率5程度), 水(比誘電率81)の三種類に区分して単純に考えると, GPR探査が土壌水分率探査によく用いられる理由がわかりやすくなります. この単純なモデルでは, 乾燥した土壌は鈹物と空気の混合物であり, 土壌の水分率が上昇するということは, 鈹物粒子の間にあった比誘電率1の空気が比誘電率81の水で置きかえられるのですから, 全体としての比誘電率が大きく上昇することとなるためです.

導電率(σ)は, GPR探査においては, 電磁波の減衰に関係します. 電磁波の減衰率(α :単位はdB/m)を式で表すと, 以下のようになります.

$$\alpha = 1.64 \sigma \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \times 10^3 \quad (2)$$

GPR調査では, 送受信アンテナ間距離を固定し, 測線にそって調査を行う, GPRプロファイル探査が一般的に行われます. この調査を実施すると, 地下にある電磁波反射面を比較的簡単に調査することができます. 電磁波反射面の位置は, 比誘電率が異なる二つの地層の境界を示していますが, 比誘電率の値そのものはGPRプロファイル探査ではわかりません. そこで, 比誘電率を計測するためには, 送受信アンテナの距離を変化させながら調査を行う, ワイドアングルGPR探査を行う必要があります.



第5図 実験フィールド周辺の広域地質外略図(竹内ほか, 2000に一部加筆).

4. 地中レーダを用いた室野泥火山調査

調査地域の新潟県十日町市松代地域は新潟堆積盆地の南部に位置し, 新第三紀~第四紀の堆積岩が広く分布しており, 北東-南西方向に軸を持つ褶曲構造が繰り返し発達する(第5図)という特徴を持っています(竹内ほか, 2000).

今回GPRデータ取得を行った室野泥火山は, 先述の鍋立山トンネルの南方約500mにあり, 十日町市室野集落の西北西約1kmに位置します. この泥火山は, 深さ4m以上, 直径30mの陥没構造を持ち, その中に泥火山噴出物が充填されている(新谷・田中, 2005)と報告されています(第6図). 今でもガスや泥水を噴出している箇所がいくつかあり(第7図), 泥火山の噴出孔から出てくる地下水は, 石炭片を含んだ泥水で, 導電率が1.5S/m(比抵抗に直すと0.6Ωm程度)以上と非常に高いという特徴を持っています(新谷・田中, 2004). このように導電率の高い地下水の存在は, (2)式からもわかる通り, 電磁波を急激に減衰させる特徴を持っているため, GPR探査で調査可



第6図 室野泥火山地下構造概念図(新谷・田中, 2005より引用).



第7図 室野泥火山噴出孔の写真.



第8図 三次元GPR測線. 南西-北東, 北西-南東, 西-東の三方向の測線をまとめ, それぞれA方向, B方向, C方向とする. 電磁波高減衰領域をハッチで示す. 泥水噴出の位置は田中ほか(2005)による.

能な深度が浅くなります. そのため, 浅部に導電率が高い地層がある場合にはGPR探査は実施しないことが普通です. しかし, 室野泥火山の周辺では, 地下を下記のように大きく3つにゾーン分けすることができ, それぞれがGPR探査で特徴的な記録として分類可能だと考えたため, このフィールドでGPR探査を実施することとしました. その3つのゾーンとは, 1. 地表まで続く噴出経路(ベント)などの存在により, 表層付近まで導電率が高い地下水が上昇しているゾーン, 2. 泥火山噴出物が表層部に比較的厚く堆積しているゾーン, 3. 黒色泥岩などの噴出泥以外の堆積物が浅部から分布しているゾーンです.

それぞれのゾーンで期待されるGPR記録は以下の通りです.

- ゾーン1: ほとんど反射が見られない.
- ゾーン2: 表土と泥火山噴出物との境界だけに強反射が見られ, それ以深にはほとんど反射が見られない.
- ゾーン3: 比較的深部まで反射が見られる.

室野泥火山の周辺は, 現在自動車練習場として使用されており, 自動車道路の部分は, アスファルト舗装がなされています. それ以外の部分は, 未舗装であり, 起伏や植生があるためGPR探査には不向きであるため, 舗装道路の部分に限定して探査を行いました. 使用したGPRアンテナの中心周波数は200 MHzです. GPR探査にあたっては, プロファイル探査

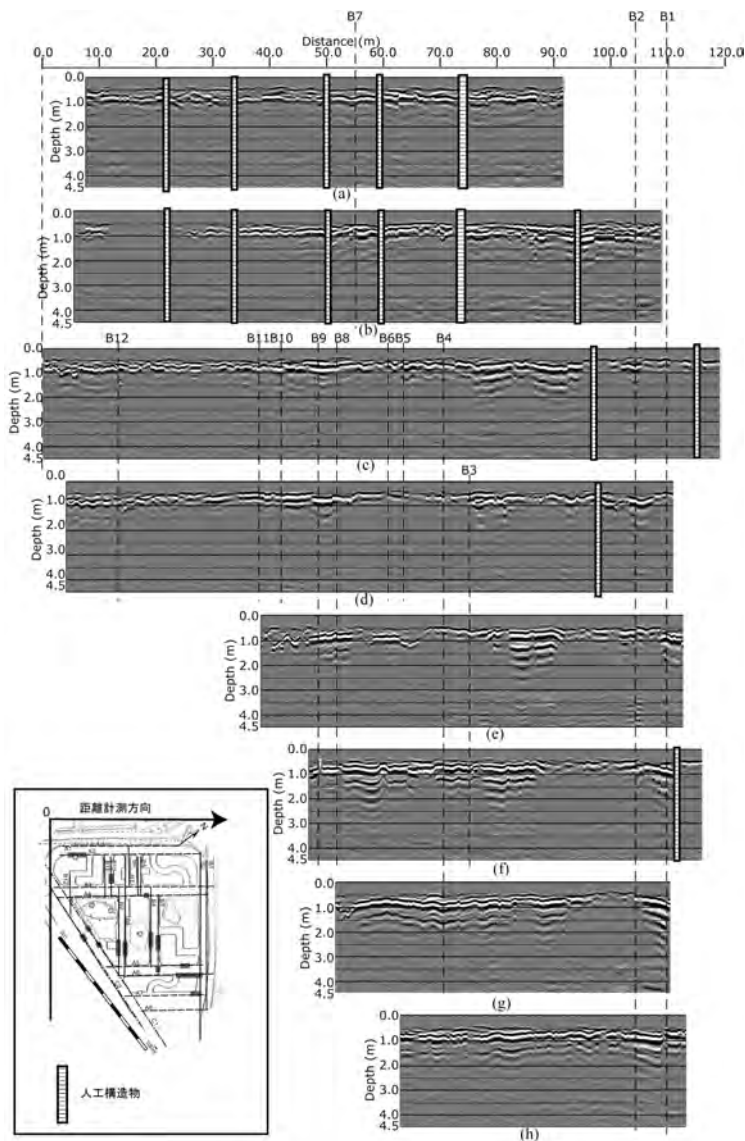
で広域を面的に探査し(三次元探査), ワイドアングル探査でいくつかの測線下の比誘電率分布を求めるとともに, 詳細な構造探査を行いました(二次元探査). この論文では, 三次元的に実施したGPRプロファイル探査結果だけを紹介します. 探査測線を第8図に示します. なお第8図には, 田中ほか(2005)を参考に, ガス, 地下水, 石油に伴って泥水が定期的に噴出している地点を記入しています. また, 今回のGPRプロファイル探査結果で判明した, 電磁波の高減衰ゾーンも同時に示しています. 第8図からわかる通りに, 実験フィールドの道路は主として, 南西-北東, 北西-南東, 西-東, の三方向から成り立っています. 本論文ではそれぞれを, A方向(南西-北東), B方向(北西-南東), C方向(西-東)とまとめて取り扱うこととします. 最終的には, A方向8本, B方向12本, C方向2本の合計22本の測線で調査を行いました.

取得したデータに, (1)ゼロタイム補正, (2)振幅回復処理, (3)直接波除去, (4)クラッターノイズ除去, (5)送受信アンテナ距離補正のためのNMO補正, (6)キルヒホップ型時間マイグレーション, (7)時間-深度変換からなる通常のGPRプロファイルデータ処理を行い, 深度断面を作成しました.

第9図から第11図に調査結果を示します. 第9図はA方向測線, 第10図はB方向測線, 第11図はC方向測線での調査結果です. 地表に側溝や金網など人工物がある箇所では, データ処理結果にノイズが多くなるため, ハッチの網掛けをしてデータを表示しないようにしてあります.

それぞれの結果を見ると, ほとんど電磁波の反射が見られないゾーンがところどころに見受けられることがわかります. このゾーンは, 先程ゾーン1と区分した, 地表付近まで導電率が高い地下水が上昇している領域だと解釈することができます. このゾーン1を第8図の実験フィールドの地図上にハッチで示しました. 実験フィールドの北東部分にその多くが分布していることがわかります. また, その分布は全体として, 北東から南西方向へのトレンドを持っているように見られます. その方向は, この地域全体の褶曲構造の軸方向と一致しており, 極浅部の構造も広域の応力分布に支配されている可能性も考えられます.

一方で, ゾーン2とゾーン3に関しては, 明確に分けるのが難しい結果となりました. その理由は, 比較的多くの箇所で見られる, 深部に向かって周波数が低



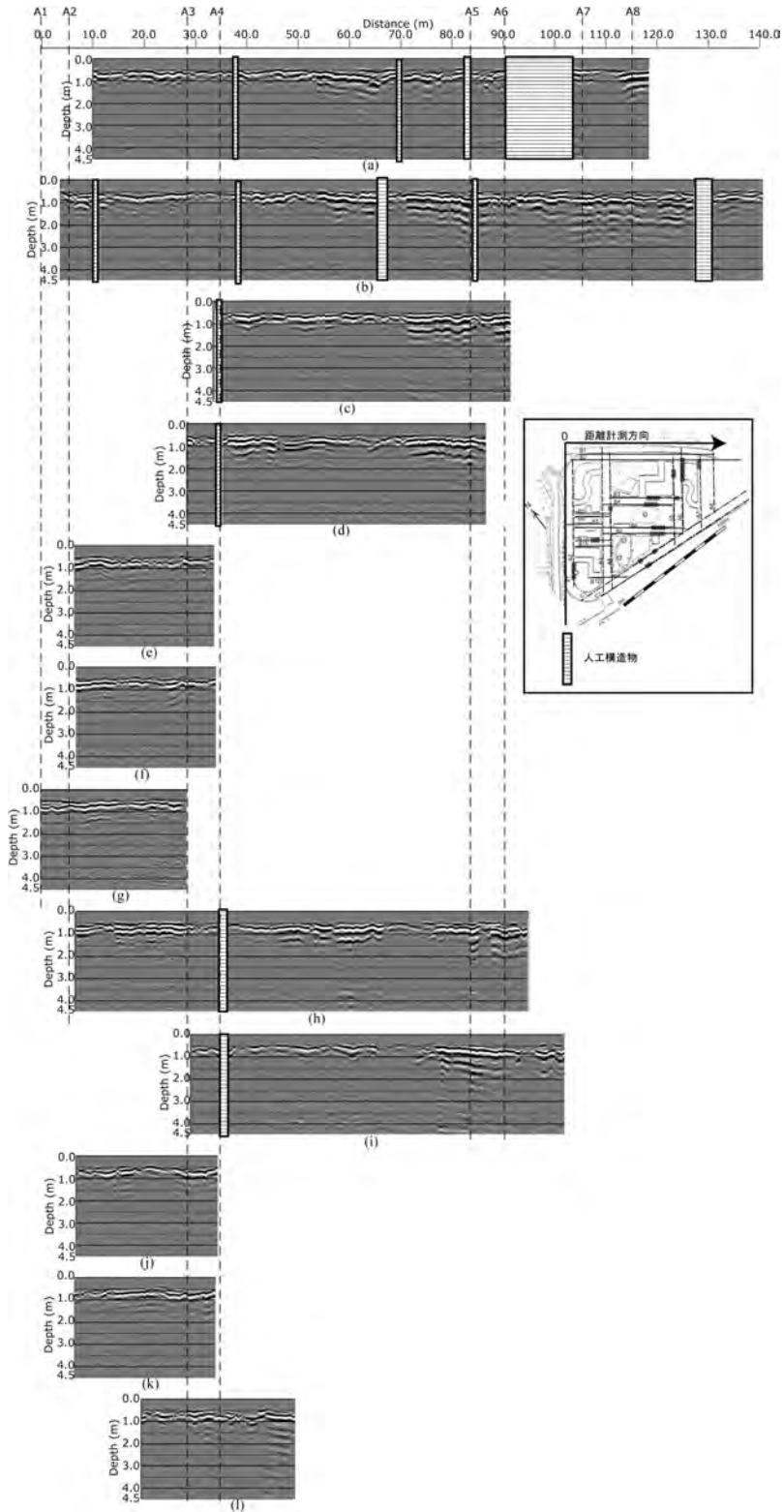
第9図 南西-北東方向(A方向)のGPRプロファイル深度断面。

くなる特徴的な反射波の解釈が難しいためです。その領域では、見かけ上深部からの反射波が返ってきているように見え、一見ゾーン3の黒色泥岩などの噴出泥以外の堆積物が堆積しているゾーンとして解釈できるように見えます。ところが実際は、電磁波が地下を何度も往復するために観測される多重反射波である可能性も高く、その場合には、浅部にある泥火山噴出物で反射した反射波が表土中を往復していると解釈するのが適切であるため、ゾーン2の泥火山噴出物が表層近くから堆積しているゾーンと解釈すること

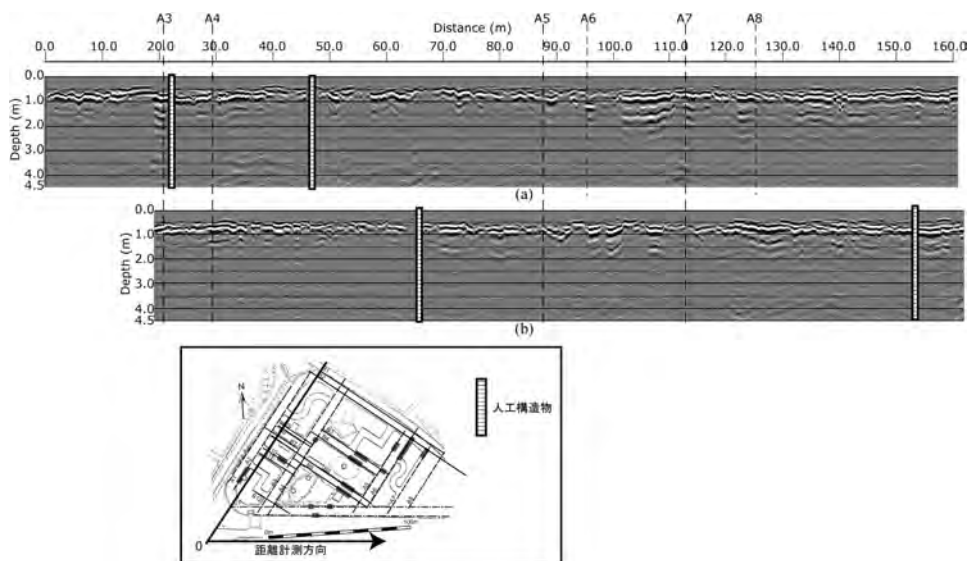
となります。

5. おわりに

この論文では、新潟県十日町市松代の室野地区にある泥火山の浅部構造探査にGPRを用いた調査例を紹介しました。この泥火山では導電率が高い地下水が噴出しているため、地下水が地表付近まで噴出している領域は電磁波の高減衰ゾーンとしてとらえることができました。その高減衰ゾーンの分布は、北東



第10図 北西-南東方向(B方向)のGPRプロフィール深度断面.



第11図 西-東方向(C方向)のGPRプロファイル深度断面。

から南西方向へのトレンドを持っており、この地域の広域な褶曲構造の軸方向と一致する結果が得られました。

謝辞：本研究を行うにあたっては、山口大学理学部化学地球科学科の田中和広教授から松代地区の泥火山に関して様々な情報を教えていただくとともに多くの助言をいただきました。東京大学大学院新領域創成科学研究科の徳永朋祥准教授には地質や地下水流動に関する多くの助言をいただきました。産業技術総合研究所地圏資源環境研究分野の森田澄人氏には泥火山に関する様々な情報を教えていただきました。今回実験を行ったフィールドの所有者、早稲田大学にはデータ取得を快く許可いただきました。ここに記載して、感謝の意を表します。

参 考 文 献

Baba, K. and Yamada, Y. (2004) : BSRs and associated reflections as an indicator of gas hydrate and free gas accumulation: An example of accretionary prism and forearc basin system along the Nankai Trough, off Central Japan, *Resource Geology*, 54, 11-24.
 Bredehoeft, J. D., Djevanshir, R. D. and Belitz, K.R. (1988) : Lateral fluid flow in a compacting sand-shale sequence, south Caspian Sea, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 72, 416-424.
 物理探査学会 (1998) : 物理探査ハンドブック・第7章『地中レーダ』, 399-421.

地学団体研究会 (1996) : 新版『地学事典』, 平凡社, 1443p.
 千木良雅弘・田中和広 (1997) : 北海道南部の泥火山の構造的特徴と活動履歴, *地質学雑誌*, 103, 781-791.
 Deville, E., Battani, A., Gribouard, R., Guerlais, S., Herbin, J. P., Houzay, J. P., Muller, C. and Prinzhofer, A. (2003) : The origin and processes of mud volcanism: new insights from Trinidad: in Van Rensbergen, P., Hillis, P. R., Maltman, A. J., and Prinzhofer, A. Eds., *Subsurface Sediment Mobilization, Special Publication*, 216, Geological Society, London, 475-490.
 中村恭之・森田澄人・芦 寿一郎 (2006) : 熊野海盆の泥火山における3次元反射法イメージング, 日本地球惑星科学連合2006年大会予稿集 (CD-ROM), G228-004.
 新谷俊一・田中和広 (2004) : 新潟県東頸城郡松代町に分布する泥火山噴出物の起源, *日本応用地質学会研究発表会講演論文集*, 397-400.
 新谷俊一・田中和広 (2005) : 新潟県十日町市松代に分布する泥火山の地質, *自然災害科学*, 24, 49-58.
 竹内圭史・吉川敏之・釜井俊孝 (2000) : 松之山温泉の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 76p.
 田中 学・青柳恭平・田中和広 (2005) : 新潟県十日町市松代における泥火山の噴出特性, *日本応用地質学会研究発表会講演論文集*, 179-182.
 Ujiie, Y. (2000) : Mud diapirs observed in two piston cores from the landward slope of the northern Kyukyu Trench, northwestern Pacific Ocean, *Marine Geology*, 163, 149-167.

YOKOTA Toshiyuki, ONISHI Kyosuke and SANADA Yoshinori (2008) : Geophysical explorations of shallow structure of mud volcano using a Ground Penetrating Radar system in Matsudai, Tokamachi City, Niigata Japan.

< 受付 : 2008年2月22日 >