

立山カルデラ内のどじょう池の地中レーダ探査

酒井英男¹⁾、中埜貴元¹⁾、澤田豊明²⁾、野村成宏¹⁾、堀井雅恵³⁾、飯田 肇⁴⁾、國香正稔⁴⁾

1. はじめに

本稿では、立山カルデラ内のどじょう池において、池の底の構造、堆積物の厚さおよび堆積状況を、水面から地中レーダ探査により研究した結果を報告する。

立山カルデラは立山連峰を構成する弥陀ヶ原に隣接した、東西約6.5km、南北約4.5kmの楕円形の火山性窪地である。1858年(安政5年)2月26日、カルデラ南端にそびえた大鳶山と小鳶山が地震による揺れで大きく崩れ落ちた。この“鳶崩れ”の大崩壊を誘発した飛越地震は、国内有数の活断層である跡津川断層沿いの直下型地震(地震マグニチュード7.1)と推定されている(東京大学出版会、1991)。“鳶崩れ”に伴う崩壊土砂量は4.1億m³と見積もられ(町田、1962)、カルデラ内にも膨大な崩壊土砂が貯まっていると考えられている(藤井、1997)。

立山カルデラは富山平野を流れる常願寺川の源流部でもある。同地域から流出する土砂による災害が過去に幾度も繰り返され、それを防ぐべく国や県の砂防事業が進められてきた。現在も存在する多量の不安定土砂について、その3次元的分布および残存堆積量を精度良く把握することは、立山カルデラの形成・災害史、今後の砂防事業を考える際に必要な基本情報であるが、従来、研究は十分に行われていない。我々は、カルデラ内に蓄積された“鳶崩れ”起源の崩壊土砂の堆積状況を検討するため、電磁気探査の方法による研究調査を進めてきた(酒井他、2000など)。

図1と図2に示すカルデラ内のどじょう池(長径200m、短径130m)は、古文書・古絵図によれば、鳶崩れの際に、現在の湯川が堰き止められてできたとされる。堰止湖としての形成説は有力であるものの不明な点も多く、調査の必要性は謳われてきたが、現地への機器搬入は容易で無いこともあり、調査は進んでいなかった。今回、水上からどじょう池の内部を比較的コンパクトな機器である地中レーダ装置を用いて調べ

ることを考え、方法を改良しながら調査を実施した結果を報告する。新たな研究、有効な調査法の開発が本研究の第一目的である。

どじょう池が鳶崩れにより形成されたとすると、その後140年間は大きな攪乱はなく、池は周囲からの崩壊物流入により小さく浅くなっていると考えられる。池底の構造を明らかにし、堆積物の状態と堆積速度を知ることは、どじょう池のカルデラ内における水文地形的な役割を考える上でも重要である。

地中レーダによる探査は、数回の事前調査を行った後で、2001年10月19-21日に実施した。

2. 探査の概要

2-1. 地中レーダ探査

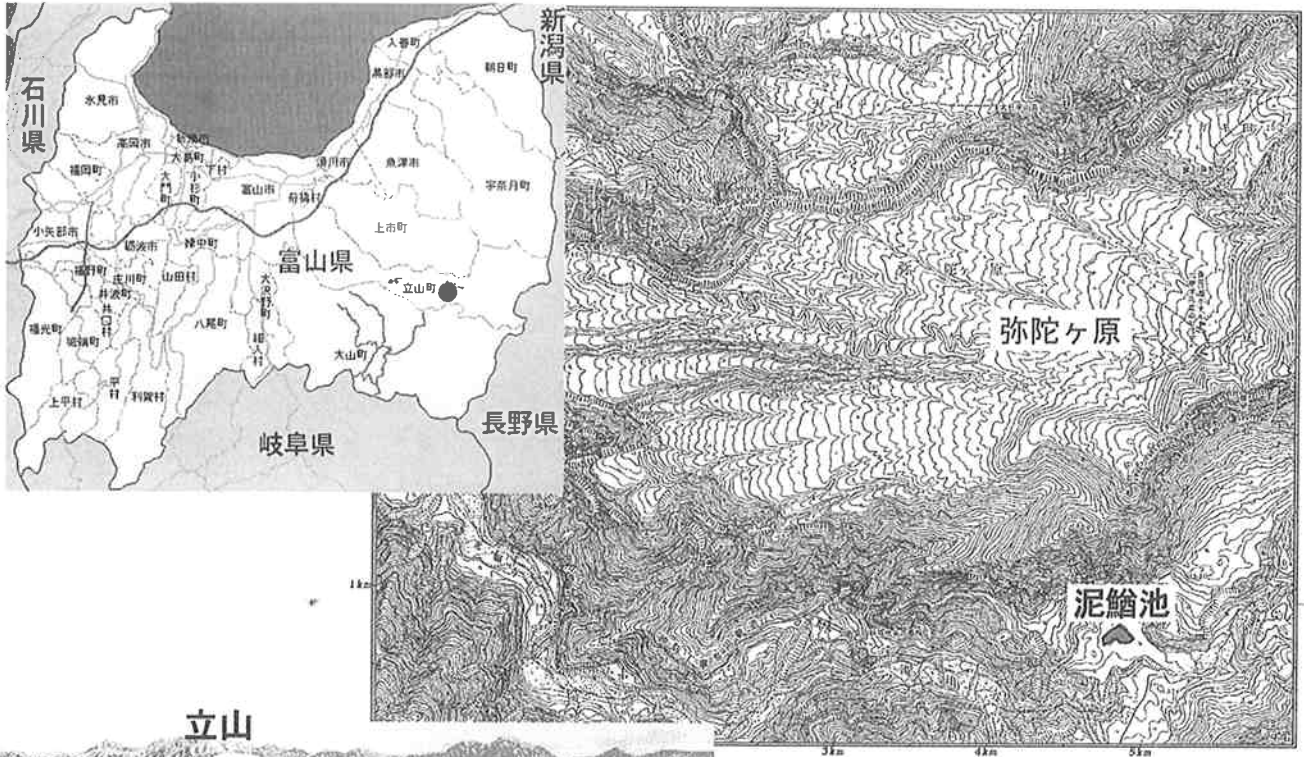
地中レーダ探査は、電磁波の地中における反射、透過、屈折現象を用いて地下の構造を調べる研究手法である(Annan and Cosway, 1992; Clark, 1990)。装置は送信と受信アンテナを有しており、探査は、送信アンテナから地中に放射した電磁波が、地下の電磁気物性の不連続面で反射、透過、屈折を繰り返して地表に戻ってきた一部の電磁波を受信して行う(図3)。この反射・伝播時間および反射波の強度を記録し、並べて解析することで、地下の断面図イメージを表示できる。

本研究では、装置としてカナダ Sensor & Software 社製の pulse EKKO IV 機種を用いた(図3)。同装置のアンテナは細長い板状形状であり、また送信と受信アンテナが別々になっている。用いるアンテナの周波数により探査できる深度は異なるが、今回は水上からの探査のため、ボートに設置可能な長さ90cmのアンテナ(幅12cm、厚さ2cm、周波数100MHz)を使用した。

2-2. 探査と探査測線

水上での探査はゴムボートにレーダ装置を搭載して行った。事前調査により池周囲のポイントを設定して杭をうち、杭の間を探査の測線として水に浮かぶロー

¹⁾富山大学理学部、²⁾京都大学防災研究所、³⁾海洋科学技術センター、⁴⁾立山カルデラ砂防博物館



立山カルデラ



上空から見た泥鱒池



泥鱒池

図1 どじょう池の位置

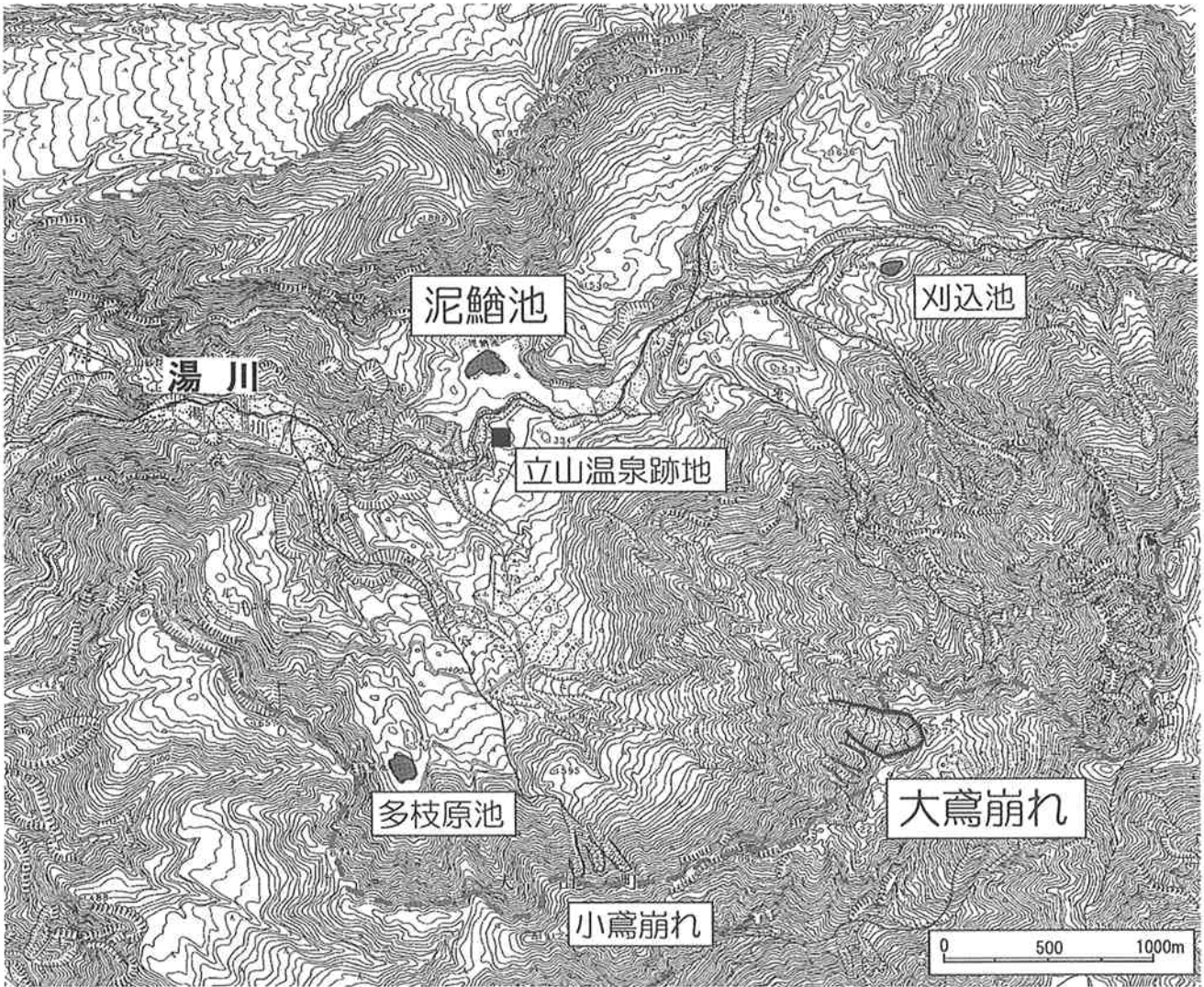


図2 どじょう池周辺の地形図

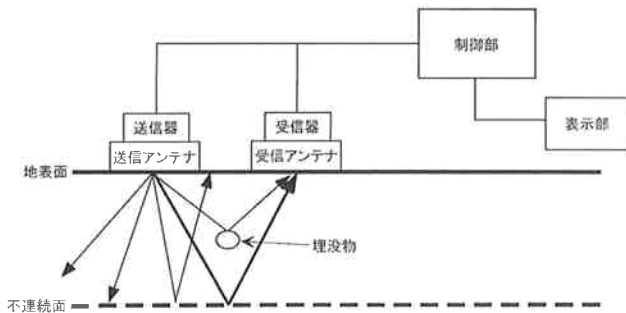


図3 探査装置(上)と地中レーダ探査の原理

プを張った。そしてゴムボートに乗り、ロープを手繰り寄せて移動しながら探査を実施した。杭の間に張ったロープには50cm間隔の印がつけてあり、探査の測定間隔も50cmに設定した。

調査方法を検討した結果、ゴムボートを2台用意して1台に測定者が装置を持って乗り、もう1台に乗った補助者がボートを牽引する方式が最も適していた(図4)。

探査の測線は、池の水上において5本(Line E1, Line 0, Line W1, Line W2, Line W3)を、図5に示す位置に設けた。また、池の岸側にも4本の測線を設けて、陸域での探査も実施した(図5)。

水上からの調査では、地中レーダ波の伝播速度は、水の比誘電率に大きく依存する。今回は、水の比誘電率を一般的な81の値とし、伝搬速度 $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$ (c : 光速、 ϵ_r 誘電率)で計算される0.034m/nsの速度を使用して、測定結果の解析にあたった(物理探査学会、1998; 酒井ほか、1999)。

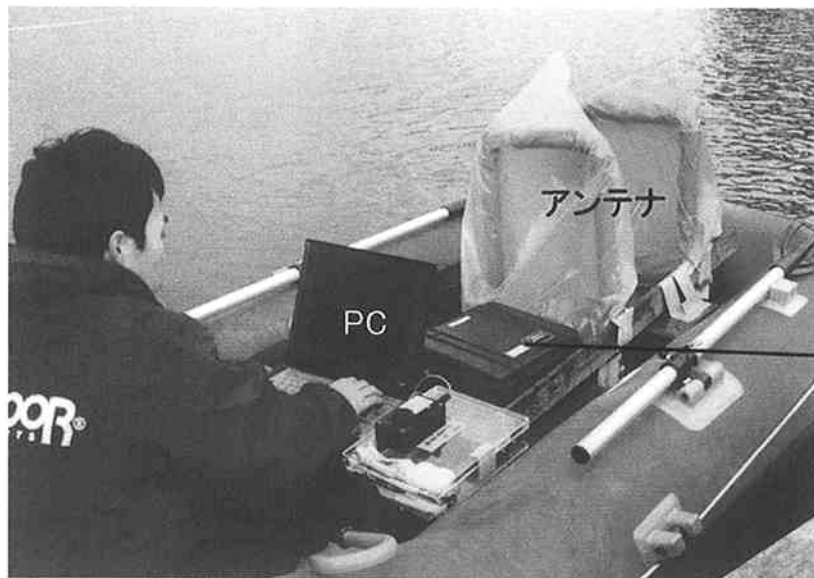


図4 どじょう池の水上での探査風景

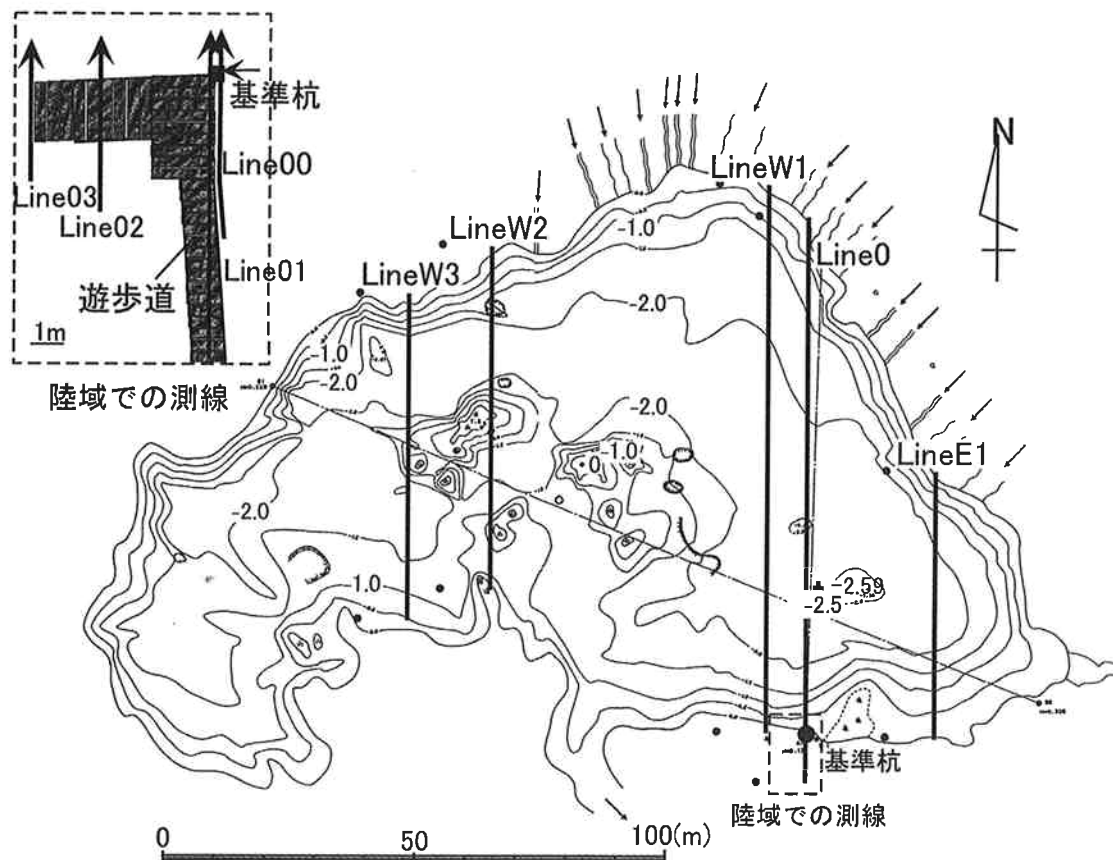


図5 どじょう池の等水深線図および探査測線の位置図

3. 探査結果と考察

各測線における結果を述べる。

3-1. Line 0

探査結果は図6の上の示した。探査で推定された池の底はお碗型の地形を示している。底には成層となった堆積物が認められる。その下の乱れた反応は、池が形成された当時の崩積土と考えられるが、水中土中でのレーダ波の減衰により、崩積土の深部の構造までは捉えていなかった。

この測線において、池の形成後に蓄積した堆積物の厚さは、最大で約1.3mと読みとれる。堆積期間が1858年の飛越地震後の142年間とすると、年間平均の堆積速度は約9.1mmと見積もられた。

どじょう池では、池底に棒を挿す簡便な測定により等水深線図が描かれている(立山カルデラ砂防博物館、1998)。同図を基にした底面地形と比較すると、探査結果と概略は良く合っており、地中レーダ探査はさらに詳細な構造を表わしている。

3-2. Line E1

探査結果(図6下)には、お碗型の底面構造が認められる。この測線において崩壊土の上位の堆積物は最大

1mの厚さと読みとれ、崩壊後の堆積速度は約7mm/yrと求められる。

3-3. Line W1

探査結果は図7の上図に示している。測線Line0の結果と同様に、お碗型の底面構造が認められた。堆積物の最大層厚は約1.2mであり、堆積速度は約8.4mm/yrと見積もられる。

測線上の水平距離40~70mの地域において、堆積物の下の、池の形成当時の崩積土が示す地中レーダの反応がかなり乱れている。また、水平距離の58.5m地点の底に、長さ70cm程度の突起状の反応が見られる。探査時には確認できなかったが、この領域には流木などが鉛直に突き刺さっているのではと考えられる。

3-4. Line W2

探査結果(図7の下図)に示された同測線における池底の地形は複雑であり、また他の測線に比べて水深が浅いことがわかる。また、山側(N側)の方が水深は深い傾向にある。

測線のS側では、池底の堆積物を示す反応は乱れており、成層する堆積構造の反応は、N側へ50m離れた地点から山側へ向かう斜面にだけ認められる。この斜

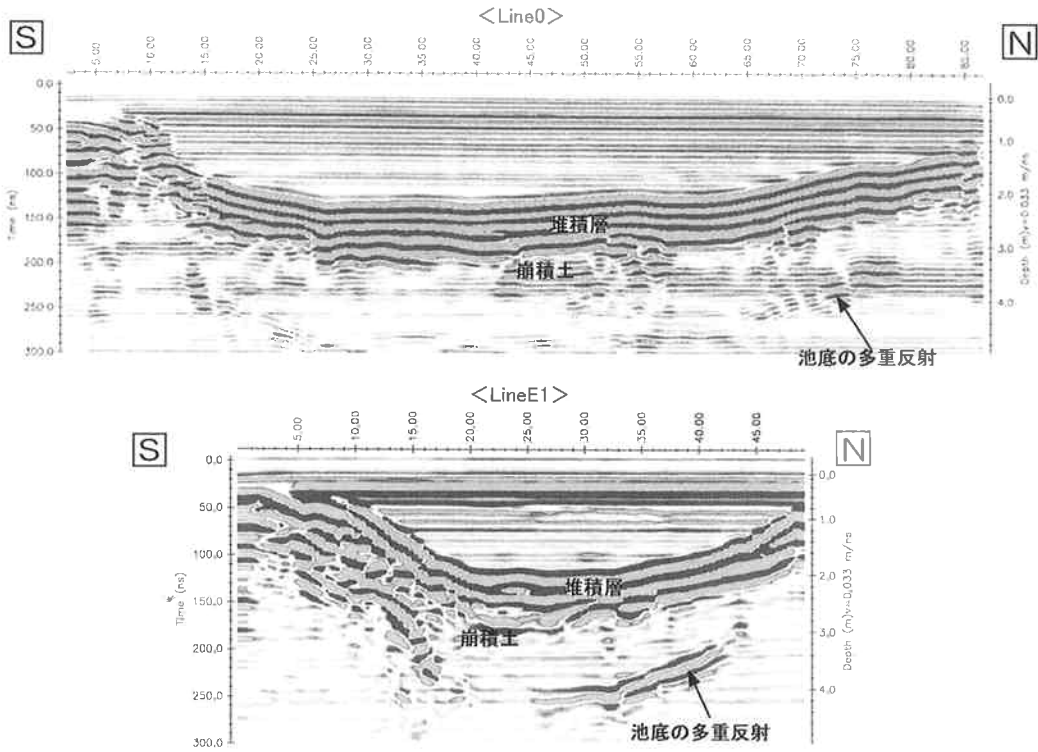


図6 どじょう池の探査結果. 上: Line 0, 下: Line E1. 断面図は、横:縦=1:5で示した

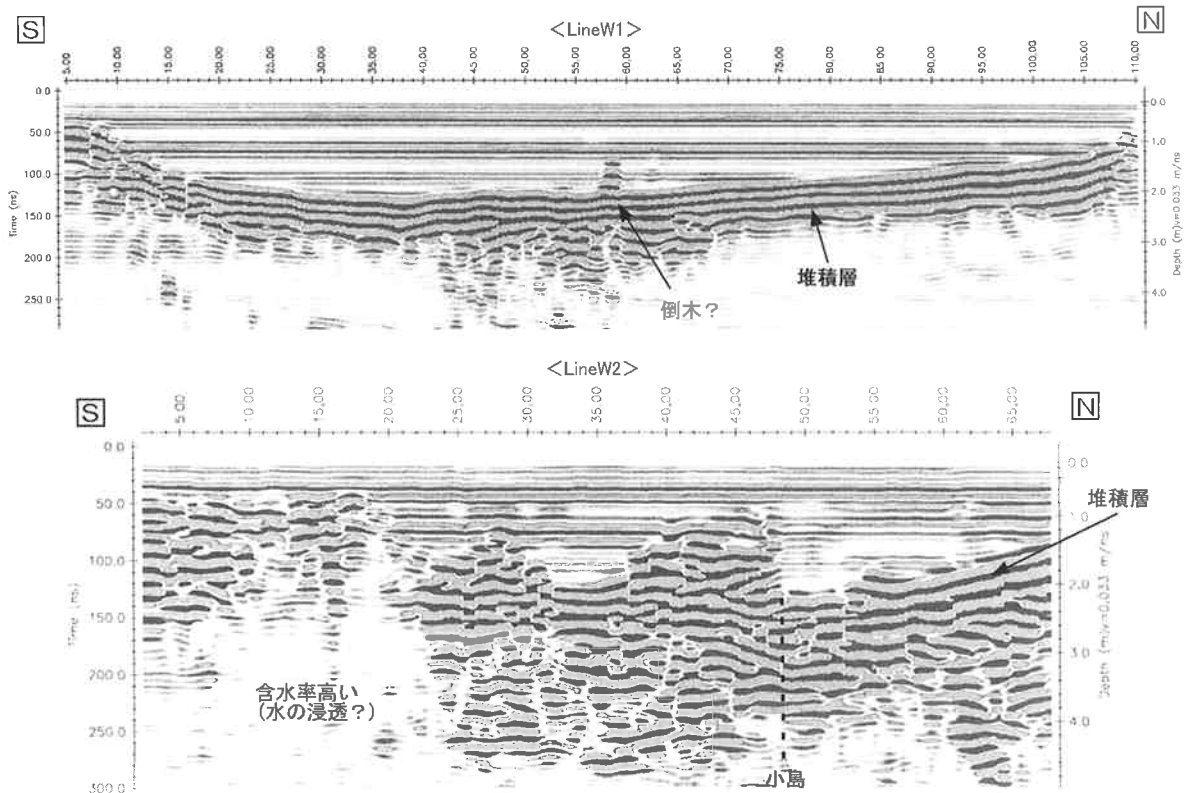


図7 どじょう池の探査結果. 上: Line W1, 下: Line W2. 断面図は、横:縦=1:5で示した

面を形成している堆積物は、山側からの流入物と考えられる。成層と乱れた構造の境界にあたる48m地点の崖状の構造については、この近くには小島が陸上に露出しており、それが池底へ続く地形を捉えた反応と考えられる。

測線上の10~20mの領域ではレーダ反応は弱いが、

この領域の堆積土の含水率が高いことが原因として考えられる。今後検討するべき課題であるが、同領域では地下へ水が染み出している可能性も考えられる。

3-5. Line W3

探査結果は図8に示した。池の東側の測線(Line 0, E1, W1)の様な堆積物を示す連続したレーダ反応は

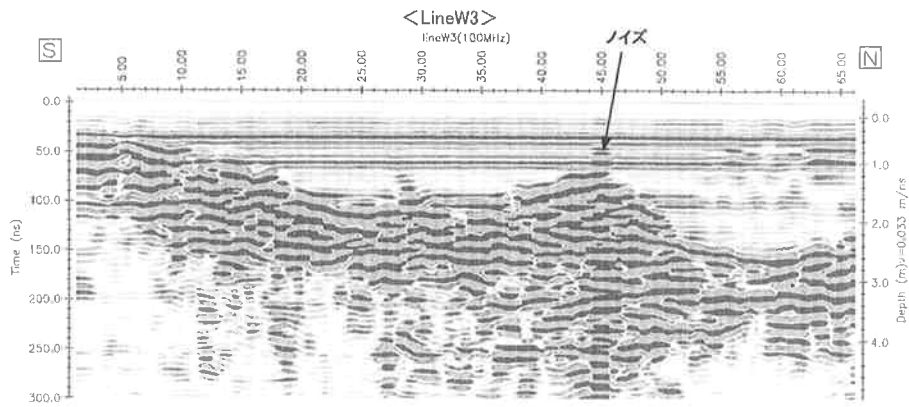


図8 どじょう池の探査結果。上：Line W3。断面図は、横：縦＝1：5で示した

明確でなく、池底には崩積土が分布していると考えられる。測線の45m地点よりN(山)側において水深が深くなっている傾向は、Line W2の結果と同様である。

3-6. 池近傍の陸域での調査

次に、池に接する陸域に設けた4本の測線における探査について述べる。図9は探査結果を示している。

Line 0を陸域へ延ばした遊歩道上に設けた測線(図5)では、-13m付近から、N側(池の側)へ緩やかに傾斜する反応が見られる。距離-7mと-4m付近の地点で、傾斜が急になっている。これらの急傾斜の領域は、過去の岸の位置に対応すると考えられる。

遊歩道の脇を走る測線の探査では、図の距離-1mの地点で池側への明確な落ち込みがあり、これは過去に岸であった領域と当時の池底を捉えていると考えられる。Line 0から西へ6m地点と12m地点に設定した測線においても、深さ1~2m付近に、過去の池底を示す境界面が認められた。

4. まとめ

どじょう池における地中レーダ探査により、以下の成果が得られた。

(1) 水上での調査

探査結果には、池底の構造が明確に表れていた。池の東側では、お碗型の底構造が示されたが、西側では調査結果が示す底地形は複雑であった。

また、底より下の堆積物の状況も数m深度まで解析でき、どじょう池が形成された当時(1858年)の崩壊土の面と、それ以降に池に貯まった堆積物との境界面が捉えられた。堆積物は、東側にはかなりの厚さで貯まっているが、西側の底の堆積物は少なかった。池の堆積物が1858年以降に貯まったとして計算すると、東側の

堆積速度は年間で7~9mmと見積もられる。以上のどじょう池における堆積物の分布は、現在の流入河川が池の北東側に集中していることと調和的であり、池の形成後の殆どの期間において、水文状況は変わっていないと判断できる。

探査結果をまとめると、どじょう池は形成後、池の北東部から堆積物が流入しており、堆積物は主に池の東側に堆積し、南側の中央部から流出したと考えられる。池の西側には殆ど堆積物は供給されておらず、複雑な底地形は1858年の鳶崩れにより形成された当時の地形を留めていると考えられる。図10は、この様子を示している。

(2) 陸上域の調査

池の近傍でのレーダ探査により、過去のどじょう池の底面が捉えられた。形成された当時のどじょう池は現在より広く、年々狭くなっていると思われる。遊歩道の付近では、形成当時の池は、現在より南側へ14m程度も広がったと考えられる。

今後、調査を池の周囲で綿密に行うことにより、鳶崩れでできた、どじょう池の当時の規模を復元できる。また、代表的な場所で堆積物および、底の崩壊土壌を掘削調査することが望まれる。鳶崩れの当時を探る化石としての池の堆積物と、それにより保護された下部の崩壊土の物性研究を、レーダ探査と併せて行うことにより、鳶崩れ及びどじょう池の形成に関する、非常に重要な情報が期待できる。

(3) 今後の調査の課題

水上でボートに載せた地中レーダ装置を駆使する探査により、池の底部構造、水深の分布を、非破壊で詳細に調べることができるとわかった。さらに同研究方法は、池底の堆積物の構造調査にも有効と判明した。

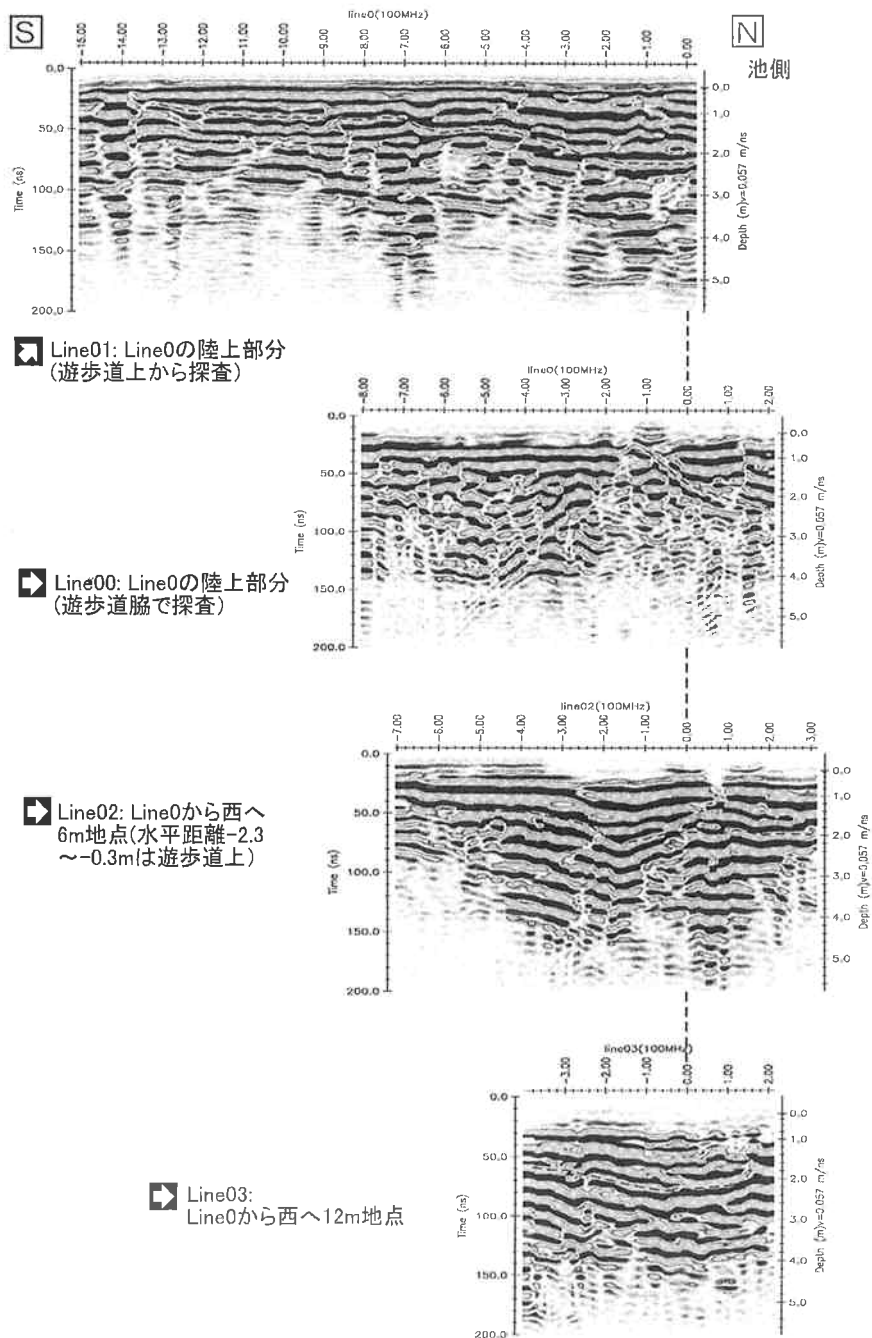


図9 どじょう池の陸上領域に設定した測線での探査結果。横：縦=1：1で示した

今回はボートの大きさに制限されたが、より低い周波数のレーダアンテナを利用することで、池底の堆積物を深部まで検討できる。今後も、調査方法を改良しながら研究を進めたいと考えている。

また池の周囲の陸域において、どじょう池が形成後に縮小してきた状況を、堆積物と下位の崩積土を対象としたボーリング調査と、低周波数アンテナを用いたレーダ探査により探ることも重要と考える。

地中レーダ探査は誘電率の変化を見ており、池の底だけでなく水中の物性変化の検討手段ともなる。例え

ば季節変動による水温の変化も研究対象となる。温度分布の断面をリアルタイムで観察できれば、従来にない研究として有意義であろう。また図11の様に、水中浮遊物も誘電率を通して調査できる可能性もある。定期的に珪藻や藻などの水中での生物活動の変移を非破壊で観測する手法を開発すれば、生体環境の研究にもつながると考える。

レーダ探査による水中のモニタリングは、ダム湖や池、湖、河川における環境調査の手段ともなり、新たな試みとして、今後、取り組みたいと考えている。

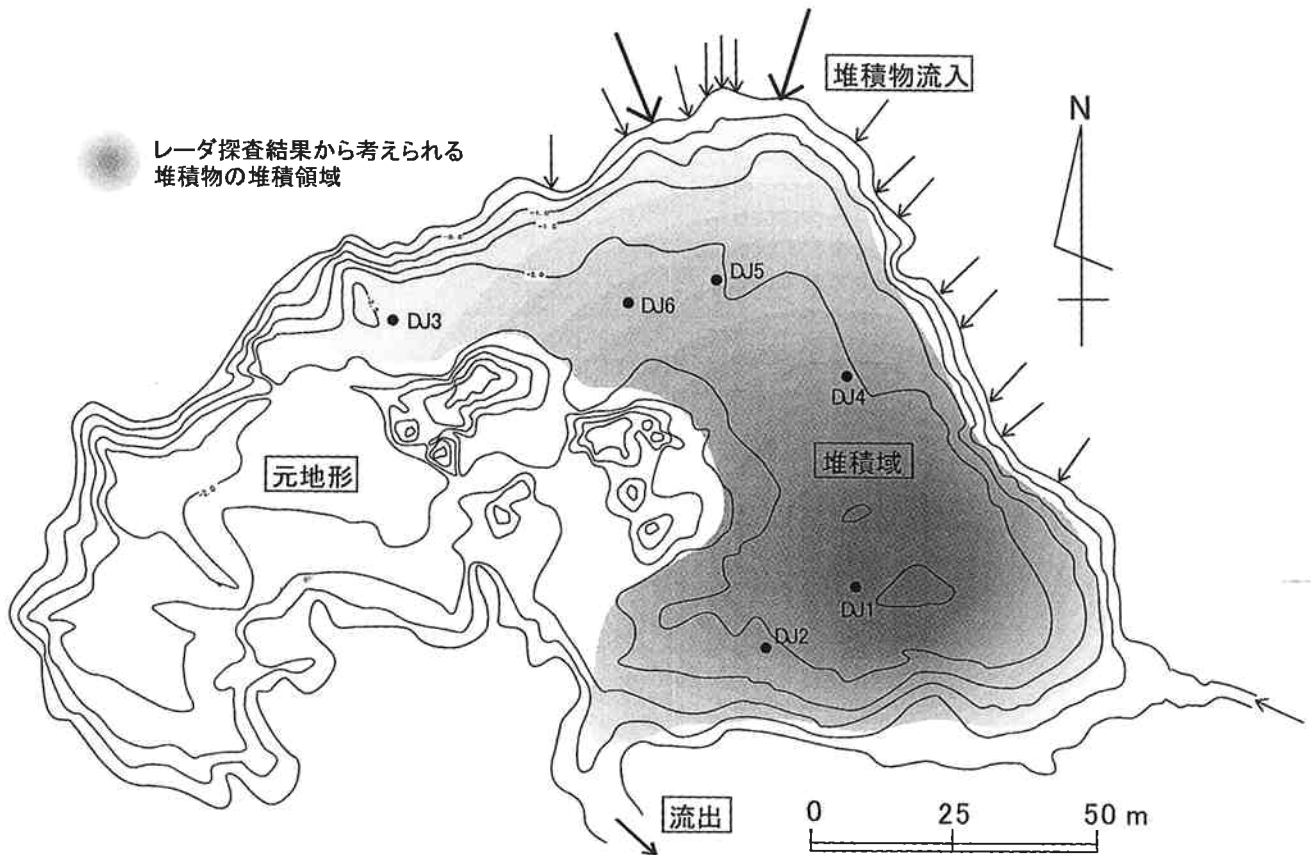


図10 レーダ探査から推測される堆積物の領域を灰色で示した。色が濃いほど厚く堆積していることを表している。

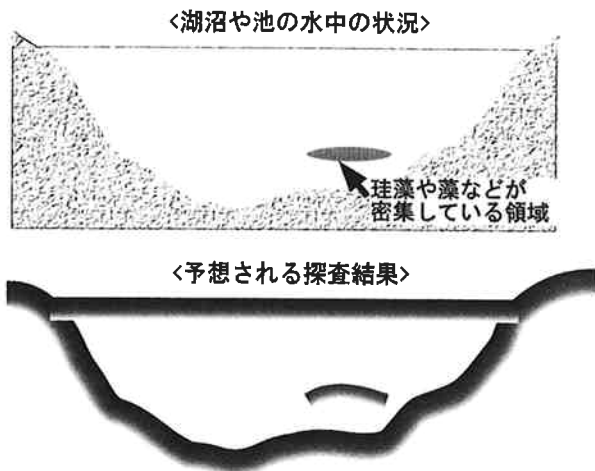


図11 レーダ探査による水中浮遊物の調査の模式図

参考文献

Annan, A.P. and Cosway, S.W. (1992): Ground penetrating radar survey design, Annual Meeting of SAGEEP, 1-12.

物理探査学会(1998): 物理探査ハンドブック, pp 1336.

Clark A. (1990): Seeing beneath the soil -prospecting methods in archaeology -, B.T. Blastford Ltd, London, pp 176.

藤井昭二(1997): 立山侵食カルデラの形成と崩壊, 砂防学会誌, 49, 3-8.

町田洋 (1962): 荒廃河川における侵食過程-常願寺川の場合-, 地理評, 35巻, 157-174.

酒井英男・田中謙二・Dean Goodman(1999): 考古学および雪氷学における地中レーダ探査法, 地質ニュース, 537, 16-23.

酒井英男・澤田豊明・飯田肇 (2000): 立山カルデラの電磁気探査, 立山カルデラ研究紀要, 第1号, 9-16.

立山カルデラ砂防博物館(1998): 泥鱒池, 立山カルデラ砂防博物館常設展示総合解説, pp 36.

東京大学出版会(1991): 日本の活断層-分布図と資料, pp 437.

[要 旨]

立山カルデラ内のどじょう池(長径200m、短径130m)において、池の水上から地中レーダ探査を実施した。ボート内に機器を設置する等の工夫を施して探査を行った結果、池の底の構造、堆積物の厚さおよび堆積状況の研究が行えた。どじょう池は1858年の鳶崩れに伴う崩壊に伴い、湯川が堰き止められてできたとされ、その地下構造は大崩壊を探り、当時を復元する際にも重要な情報となる。また、今回開発した地中レーダ探査法による水中の調査は、ダム湖や池、湖、河川における環境調査やモニタリングとしても新たな手法となると期待される。