

# 立山カルデラの電磁気探査

酒井 英男<sup>1)</sup>、澤田 豊明<sup>2)</sup>、飯田 肇<sup>3)</sup>

## 1. はじめに

立山カルデラは、常願寺川の源流部の上新川郡大山町有峰地内および中新川郡立山町芦峯寺地内に位置し、立山連峰を構成する弥陀ヶ原に隣接した地域にあたる東西約6.5km、南北約4.5kmの楕円形の窪地である。同地域は、過去に幾度も流出土砂による災害を繰り返し、現在でもなお多量の不安定土砂が存在している。

1858年（安政5年）2月26日の飛越地震の際に、立

山カルデラ南縁に位置する大鳶山と小鳶山が大きく崩れ落ちて“鳶崩れ”の大崩壊が生じた。飛越地震は跡津川断層沿いに生じた直下型地震で、推定マグニチュードは7.1である。鳶崩れによる崩壊土砂の堆積量として、町田（1962）は、4.1億m<sup>3</sup>という膨大な見積り値を報告している。しかしながら、不安定土砂の3次元的分布（残積土砂の量及び堆積構造）の探査は現在までに系統的に行われておらず、明確になっていないのが現

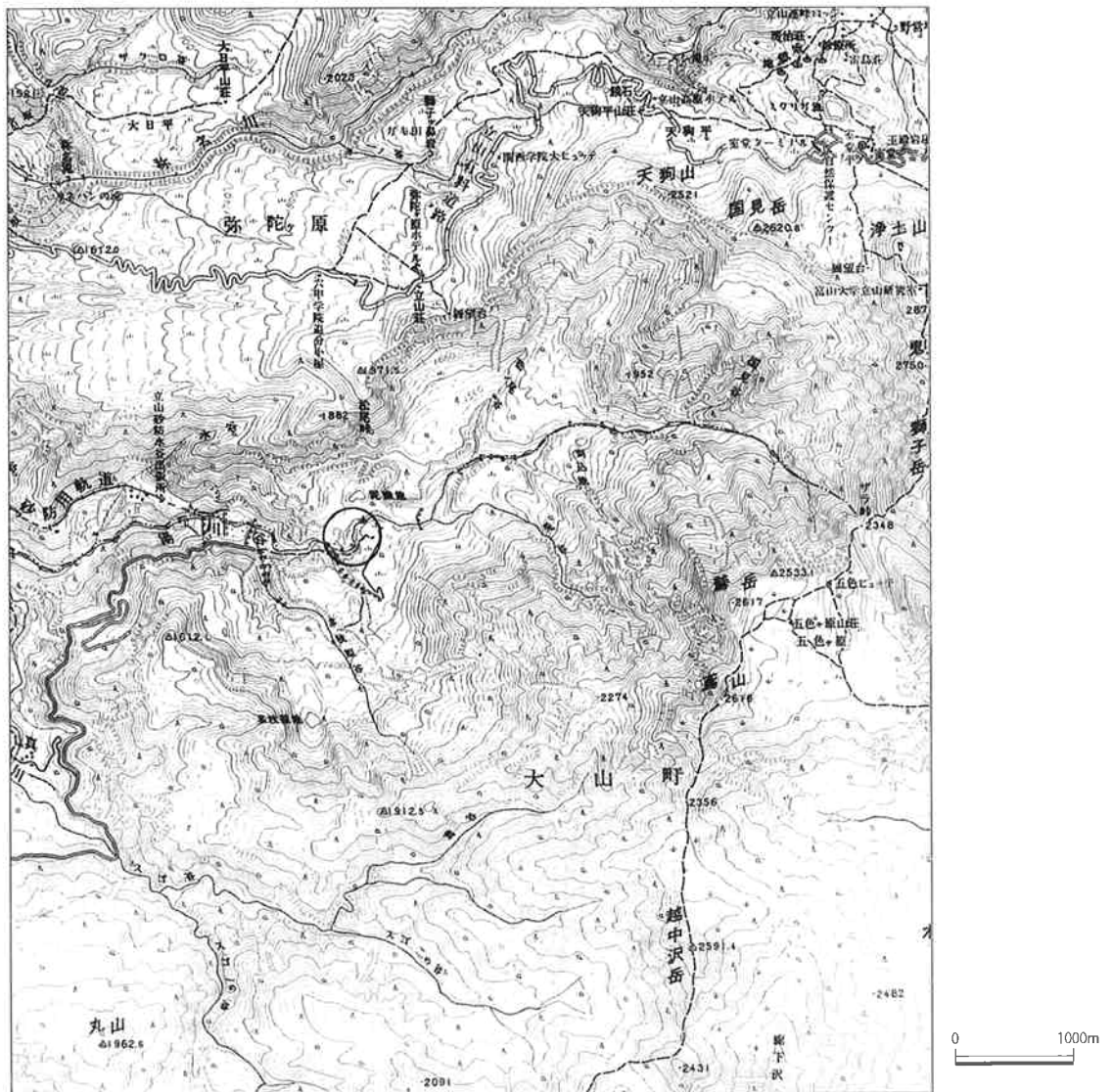


図1 調査位置を示す(○印調査地点)(国土地理院発行2.5万分の1地形図「立山」を使用)

<sup>1)</sup>富山大学理学部、<sup>2)</sup>京都大学防災研究所、<sup>3)</sup>立山カルデラ砂防博物館

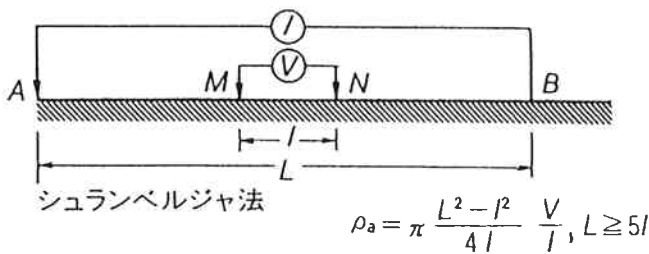


図2 電気探査で使したシュランベルジャー法の電極配置

A、Bは電流電極、M、Nは電位電極である。

A-B間隔(L)はM-N間隔(l)の5倍以上に設定して、様々なL、lの組合せの測定データを集めて解析を行なう。

状である。そこで今回、鳶崩れによる立山カルデラ内における崩壊土砂の堆積構造を物理探査、特に電磁気探査により検討することを試みたのでここに報告する。

図1に調査地域を示す。本調査では、複数の探査手法を適用して手法の有用性を探ることを目的としており、探査地点もこの目的により選出した。

以下ではまず、利用した電磁気探査の調査手法と装置を概説する。山岳地での使用を考慮し、機動性に富む装置による探査を目指して実施した。ついで探査結果について述べる。

## 2. 調査手法

### 2-1 電気探査

電気探査は人工電流を地下に流して地下の電気比抵抗の分布を探る手法であり、比抵抗の違いから地下の構造が推定できる。探査に用いる4本の電極（電流電極2本、電位電極2本）の配置パターンにより適用対象が異なる。今回は、鳶崩れによる崩壊土砂の堆積構造を探るために、垂直探査が効率よく行えるシュランベルジャー法を用いた。これは、固定した電位電極の中心に電流電極を対称的に順次拡大する調査法である(図2)。また調査地域は礫が多かったので接地を良くするために、電流電極に塩水を浸透する手法も利用した。探査は、中国製DZ-D2装置を使用して、立山カルデラ内にある立山温泉跡地の周辺の道路で行った。

### 2-2 地下レーダ探査

(Ground Penetrating Radar: GPR\*)

地下レーダ探査は、電磁波が地中での反射・屈折・透過などの物理現象を起こすことを利用して地下構造を探査する。送信アンテナから地下に放射された電磁波は、地層境界などの電気的性質の異なる面で反射・

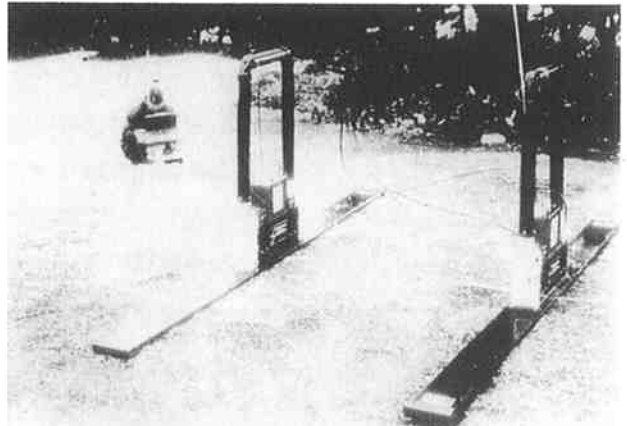
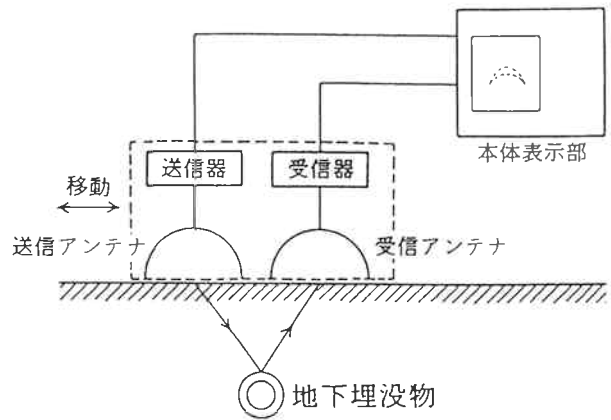


図3 地下レーダ探査法の原理と写真

屈折しながら、地表の受信アンテナに到達する。受信アンテナで得られた電磁波のパターンから地下構造が推定できる(図3)。地すべり地帯では、すべり面(亀裂)や破碎帯の分布調査が行え、測線上の連続測定から垂直断面図が得られる。また断面図の集合体から一定深度のデータを解析した平面図も作成できる(物理探査, 1998)。

日本では送信部と受信部(センサー部)がまとめられ台車に納められたタイプのレーダ装置が普及しているが、地形の起伏や樹木等の障害物に対応しづらく、調査地域が限られる難点があった。今回はセンサー部がスキー板の形状をしたPULSE EKKO 2型および4型装置を利用した。同装置の送信アンテナと受信アンテナは軽量の分離式であり、アンテナ間隔や測定間隔を自由に選定でき斜面や軟弱な地盤にも適用可能である。また、ダイナミックレンジ155db、タイムウィンド32~2048ns、スタッキング1~2048の機能を持ち、探査深度に応じたアンテナが交換できる。探査によりリアルタイムに地下構造を調べて、地盤高を入力するとトポグラフィ断面も検討できる(酒井ほか, 1999)。

\*: 最近では、地中レーダ探査と訳すことが多い。本稿では地下レーダ探査の用語を用いている。

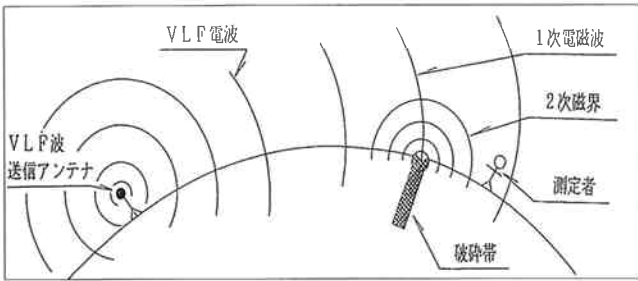


図4 WADI測定器による電磁法探査の概要

表1 地下の構成物質の電気比抵抗とMT探査で推定される深度を示す

| 媒体   | 比抵抗値( $\Omega \cdot m$ ) | 探査深度(m) |
|------|--------------------------|---------|
| 花崗岩  | $>5,000$                 | $>300$  |
| 粘土   | 10~100                   | 15~40   |
| 氷河堆積 | 100~2,000                | 40~200  |
| 飲料水  | 50~200                   | 30~60   |
| 塩水   | 1~10                     | 4~15    |

2-3 電磁法探査

自然または人工の電磁波の約 1 kHz~100kHzを、VLF (Very Low Frequency) 帯域とよんでいる。この波長の長い波は長距離を伝播しても減衰度は小さく、出力が大きな発信源では1000km離れた地域でも十分に受信できる。この電磁波を用いて地下構造を探る手法

を電磁法探査と言う(酒井ほか, 1994)。

空間を伝わる電磁波は地下にも浸透する。その際、地下に電気比抵抗が周囲と不調和な領域(低比抵抗や高比抵抗)があると、一次電磁場が不調和領域に電流を誘導し、この誘導電流が地表で観測される二次磁場に振幅と位相の異常を生じる。この異常の解析から地下の電気比抵抗が推定できる。探査法は、電場と磁場をともに利用するMT(マグネトテルリク)法と磁場だけの解析によるEM法に分かれるが、今回用いたWADI測定器(ABEM社)によるEM法は磁場だけを利用し電極を埋めないで、効率良く電気比抵抗の相対変化が調査できる。図4にWADI測定器によるEM法探査の概要を示す。VLF帯域の電磁波を一次送信波源としており、地下に生ずる渦電流が作る二次電磁場の、特に磁場との振幅比と位相比を測定して地下の電気比抵抗の構造を推定する。探査深度は数10mである。

結果は二次磁界の同相部と離相部として出力した。同相部の垂直/水平振幅比が大きい垂直成分が卓越する場所は低比抵抗体の存在が考えられる。同時測定で得られる離相部は正確な位置からズレを生じることがあるので、予察的に利用するにとどめた。表1には、参考に地下の構成物質の電気比抵抗とVLF-MT(EM)探査で推定される深度を示す。

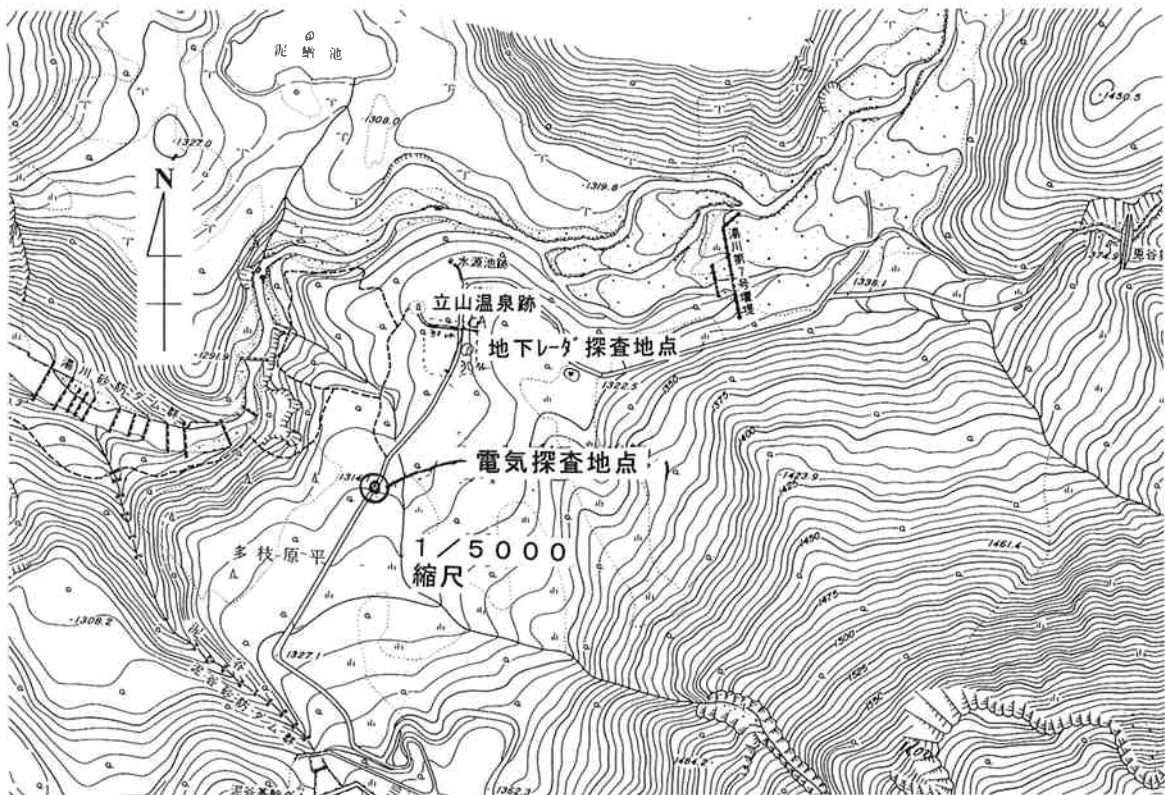


図5 電気探査を実施した地域

表2 シュランベルジャー法による垂直電気探査で得た測定データ  
右端に解析による見かけ比抵抗値を示す

| a(m)=AB/2 | b(m)=MN/2 | SP(mV) | V1(mV)  | I1(mA) | V2(mV)  | I2(mA) | Vave(mV) | Iave(mA) | k=pi*a^2/b | rho a(cohm-m) |
|-----------|-----------|--------|---------|--------|---------|--------|----------|----------|------------|---------------|
| 1         | 0.25      |        | 7129.50 | 294.86 | 7324.30 | 299.53 | 7226.90  | 297.20   | 12.57      | 305.58        |
| 2         | 0.25      |        | 1223.90 | 206.68 | 1240.60 | 209.42 | 1232.25  | 208.05   | 50.27      | 297.72        |
| 5         | 0.25      |        | 140.45  | 195.72 | 146.01  | 203.33 | 143.23   | 199.53   | 314.16     | 225.52        |
| 7         | 0.25      |        | 110.27  | 292.70 | 114.34  | 303.46 | 112.31   | 298.08   | 615.75     | 231.99        |
| 10        | 0.25      |        | 29.32   | 153.01 | 30.04   | 156.75 | 29.68    | 154.88   | 1256.64    | 240.81        |
| 10        | 0.5       |        | 57.33   | 164.56 | 56.90   | 165.35 | 57.12    | 164.96   | 628.32     | 217.55        |
| 12        | 0.5       |        | 40.18   | 165.75 | 43.11   | 177.90 | 41.65    | 171.83   | 904.78     | 219.29        |
| 15        | 0.5       |        | 29.93   | 190.46 | 29.89   | 190.07 | 29.91    | 190.27   | 1413.72    | 222.24        |
| 20        | 0.5       |        | 11.03   | 122.97 | 11.00   | 122.39 | 11.02    | 122.68   | 2513.27    | 225.66        |
| 25        | 0.5       |        | 6.85    | 126.57 | 6.96    | 128.34 | 6.91     | 127.46   | 3926.99    | 212.75        |
| 30        | 0.5       |        | 3.53    | 96.06  | 3.61    | 98.37  | 3.57     | 97.22    | 5654.87    | 207.66        |
| 30        | 1.5       |        | 9.74    | 101.56 | 9.73    | 101.53 | 9.74     | 101.55   | 1884.96    | 180.71        |
| 40        | 1.5       |        | 7.37    | 153.45 | 7.39    | 153.88 | 7.38     | 153.67   | 3351.03    | 160.94        |
| 50        | 1.5       |        | 4.42    | 172.66 | 4.41    | 171.09 | 4.42     | 171.88   | 5235.99    | 134.50        |
| 75        | 1.5       |        | 1.31    | 178.95 | 1.31    | 179.01 | 1.31     | 178.98   | 11780.97   | 86.23         |
| 75        | 3         |        | 2.79    | 181.33 | 2.99    | 181.50 | 2.89     | 181.42   | 5890.49    | 93.84         |
| 75        | 5         |        | 4.76    | 181.41 | 4.71    | 181.28 | 4.74     | 181.35   | 3534.29    | 92.28         |
| 100       | 5         |        | 0.43    | 65.75  | 0.44    | 66.06  | 0.44     | 65.91    | 6283.19    | 41.47         |
| 100       | 10        |        | 0.85    | 66.78  | 0.85    | 66.75  | 0.85     | 66.77    | 3141.59    | 40.00         |
| 150       | 10        |        | 0.39    | 115.18 | 0.39    | 116.07 | 0.39     | 115.63   | 7068.58    | 23.84         |
| 200       | 10        |        | 0.14    | 82.74  | 0.15    | 84.51  | 0.15     | 83.63    | 12566.37   | 21.79         |

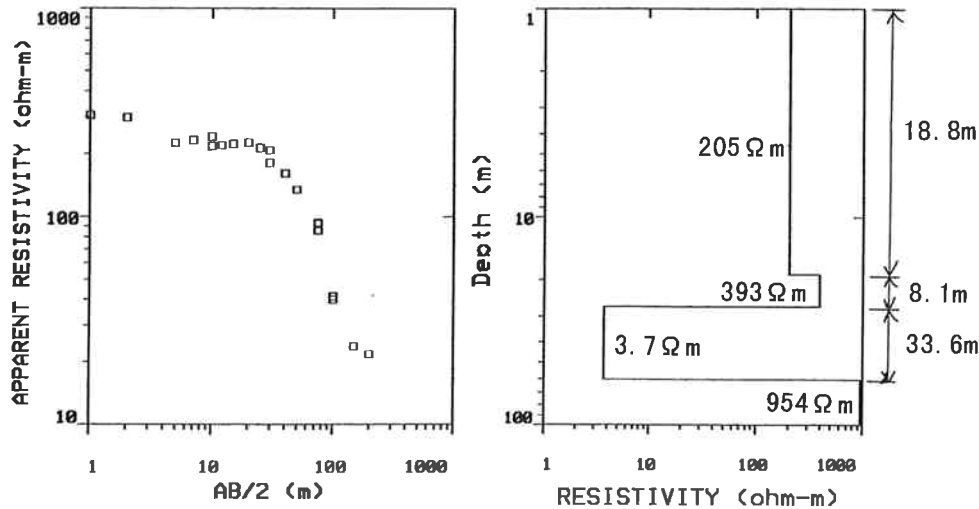


図6 探査結果を両対数グラフで示している

- (a) 見掛け比抵抗(apparent resistivity)を横軸に電流電極の間隔を等分したAB/2を取り示した
- (b) 電気比抵抗の深度分布図

### 3. 探査結果

#### 3-1 電気探査

シュランベルジャー法による垂直電気探査は、立山カルデラ内にある立山温泉跡地(標高は約1311m)か

ら南南西に約200m離れた地域(標高約1314m)の道路上で行った(図5)。電流電極の間隔は道路の直線部が限られたために最大400mまで延ばして実施した。表2には探査で得た測定データを示している。

図6に探査結果である電気比抵抗の深度依存を両対数グラフで示した。図6(a)の見掛比抵抗 (apparent resistivity) の分布では、横軸のAB/2は電流電極の間隔を等分した値を示す。図(a)の見掛比抵抗から図(b)に示す電気比抵抗の深度分布図が求められる。図(b)の深度分布を見ると、地表から深さ18.8m、26.9m、60.5mの地点に電気比抵抗の異なる境界が認められる。

上部の3層の電気比抵抗は低い。特に深さ26.9~60.5mの層には $3.7\text{ohm}\cdot\text{m}$ という低比抵抗層が存在する。この低比抵抗は、塩水地盤で良く認められる低い値である。その下位の、地表面から60.5mより深い領域において、 $954\text{ohm}\cdot\text{m}$ という高い電気比抵抗の層に変わっている。この高い電気比抵抗の領域は、基盤の存在を示唆する。

探査結果を解釈すると、地表より60.5mより下位に基盤の層があり、その上位に低い電気比抵抗を示す層が存在し、それらを2層の堆積層 (地表~深さ18.8m

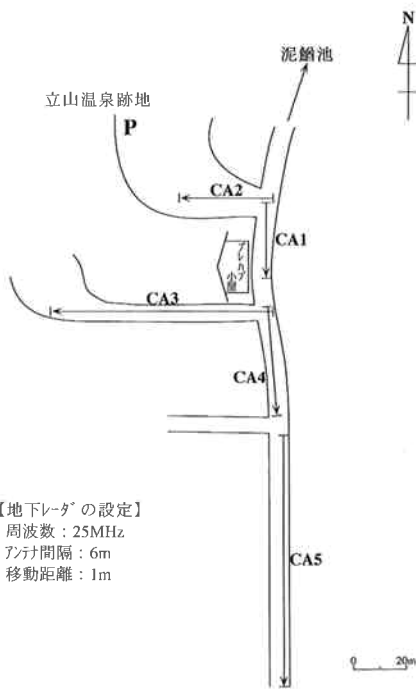
の層と18.8~26.9mの層) が覆う、4層からなる堆積構造が推定される。

調査地点は礫に覆われており、電極の接地にはかなり注意を払った。同地域の接地抵抗を考えると硫酸銅電極を用いることが今後の調査では望まれる。

### 3-2. 地下レーダ探査

地下レーダ探査は図7に示す立山温泉跡地の付近において、5本の測線 (CA1~CA5) で実施した。各測線は長さが30m~100mであり、探査条件は周波数25MHz、アンテナ間隔6m、移動距離1mに設定した。探査結果を図8(a)~(e)に示す。図(a)と(b)の南北走向の測線では右側が東方位に、図(c)、(d)と(e)の東西走向の測線の右側が南に対応する。

東西走向の測線について検討する。測線CA2 (図(a)) では、10m地点の深さ8m付近と30m地点の深さ6m付近を頂点とした凸型の反射ラインが認められる。測



【地下レーダの設定】  
周波数：25MHz  
アンテナ間隔：6m  
移動距離：1m

図7 地下レーダ探査を実施した立山温泉跡地の付近と探査測線

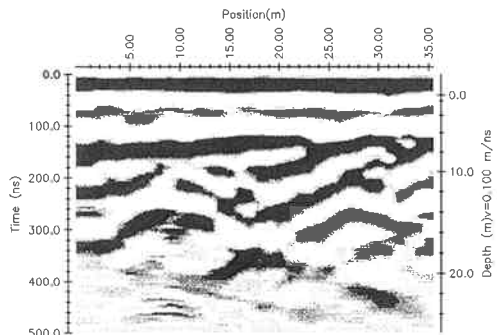


図8 東西測線の探査結果 (a)：測線CA2の結果

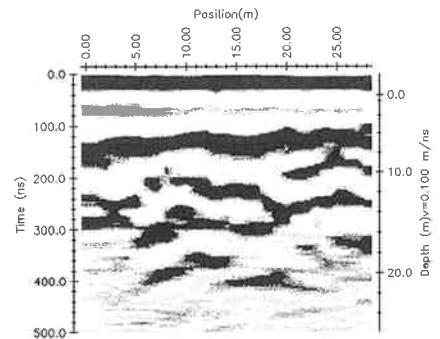


図8 南北測線の探査結果 (c)：測線CA1の結果

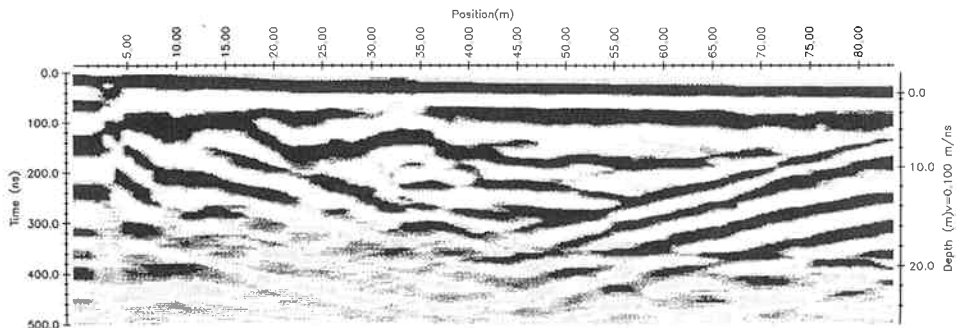


図8 東西測線の探査結果 (b)：測線CA3の結果

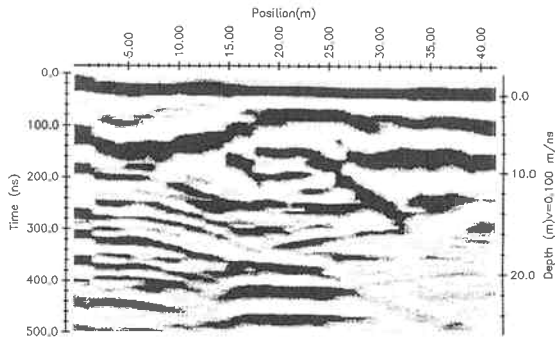


図8 南北測線の探査結果 (d)：測線CA4の結果

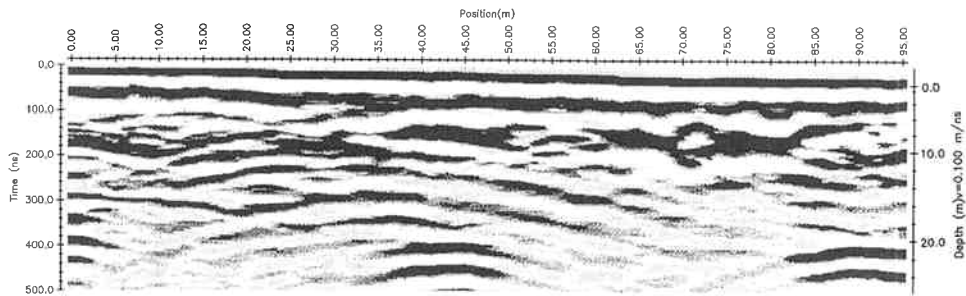


図8 南北測線の探査結果 (e)：測線CA5の結果

線CA 3 (図(b))にも15m地点の深さ4 m付近と、35m地点の深さ6 m付近において、頂点を持つ凸型の反射ラインが現われている。両測線で認められた2ヶ所の凸型反射ラインはつながっており、幅30mを越える大きな堆積構造の存在を示唆している。

南北走向の測線について検討する。測線CA 1 (図(c))では、11mと25m地点の深さ8 m付近を頂点として、凸型の反射ラインが下部まで続いている。測線CA 4 (図(d))では、20m地点の深さ6 m付近を頂点とする凸型の反射ラインがある。測線CA 5 (図(e))では狭い範囲の異常はないものの、堆積構造の激しい凹凸が多く認められる。深さ約20m以深に一定間隔で現われた反射は装置の特性かも知れず、今後の検討課題である。図(c)、(d)、(e)と順を追って、南北方向の堆積構造を追跡することが可能である。

今回の地下レーダ探査の結果で、もう一つの顕著な

点として、全ての結果に共通して深さ14~20m付近で反射の異常が消失していることが挙げられる。この結果は電気探査から得た、堆積層第一層(地表~深さ18.8m)と第二層(深さ18.8~26.9m)の境界に相当する。

地下レーダ探査により、堆積層の第一層における複雑な堆積構造を捉えることができた結論する。

### 3-3 電磁法(VLF-EM法)の探査結果

WADI装置によるVLF-EM法の探査は、立山カルデラ中央の立山温泉跡付近を流下する湯川の右岸と左岸の平坦面(図9)に2本の測線を取り、測点間隔を5 mとして行った。図10には探査地域の周辺の模式地質断面図を示す。図11と12には探査結果を、ABEM社の解析プログラム「sector」を用いて垂直断面の地電流密度分布として図化した。図のグレイスケールでは、濃

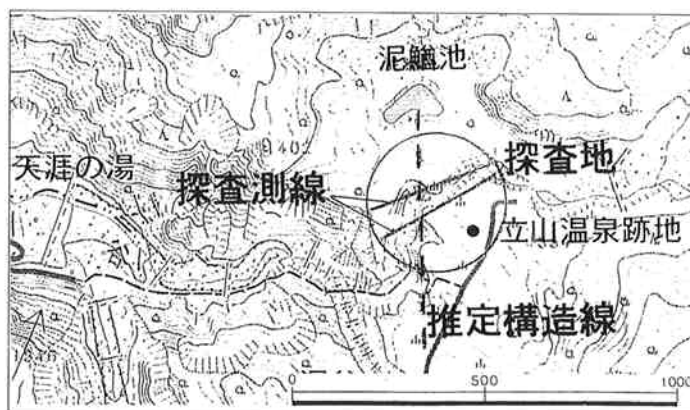
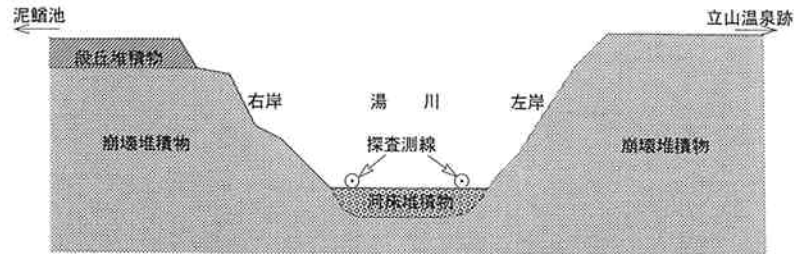


図9 WADI装置によるVLF-EM法の探査位置図



河床堆積物…湯川の河床に分布する数mの巨礫を混入した礫～砂礫層で、層厚は約10m程度と見られる。  
 段丘堆積物…泥鱈池がある平坦面や立山温泉跡地の平坦面に薄く(層厚は1m程度)分布する。この地層の底面付近には砂層～礫混じり砂層が見られる。この層の堆積は流速の比較的小さい時のものと考えられ、安政5年の「鳶崩れ」による堰き止め湖との関連が予想され、段丘の形成もこの時期よりあとの過去150年間に形成されたものといえる。  
 崩壊堆積物…探査付近一帯から西方にかけて分布する。この地層の大半は鳶崩れによる堆積物と考えられ、数十mの巨礫を含みマトリックスは主に粘性土(一部砂質土)からなる固結度の低い地層である。

図10 探査地域の周辺の模式地質断面図を示す

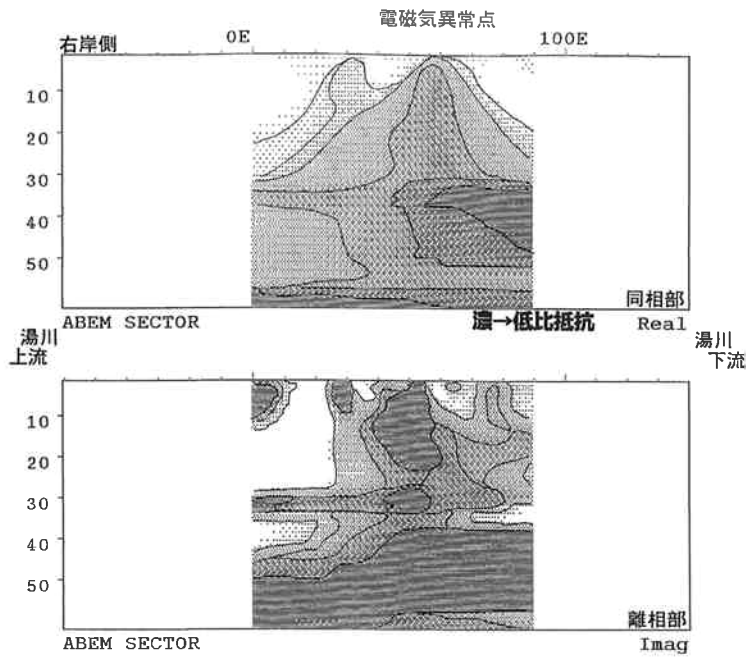


図11 EM法で求めた地電流密度の分布(右岸側)  
 上は同相部で下は離相部を示す

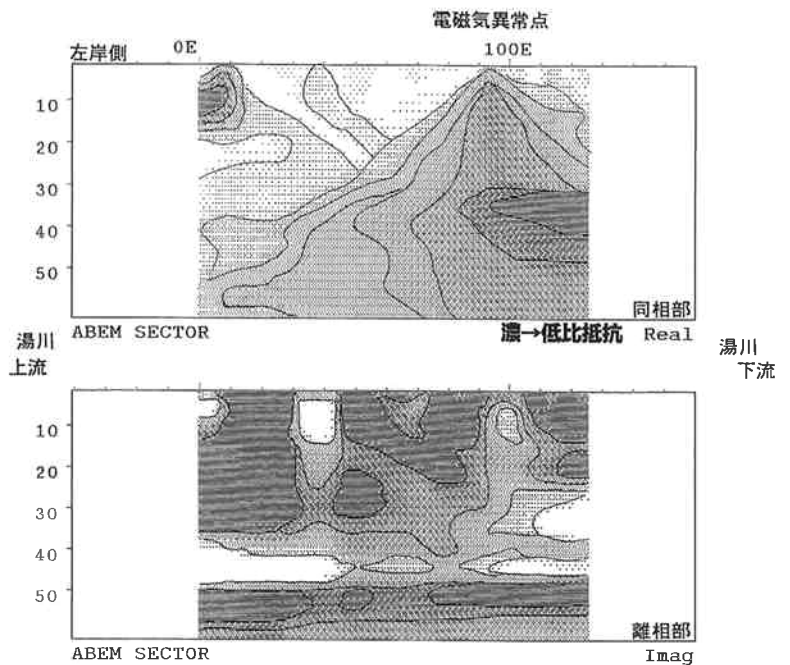


図12 EM法で求めた地電流密度の分布(左岸側)  
 上は同相部で下は離相部を示す

い（黒い）ほど地電流密度が大きく、電気比抵抗が低いことを表わす。図上には同相部を下には離相部の解析図を示し、解釈には同相成分を優先した。

湯川の右岸と左岸で同様な地電流密度分布が得られた。下流方向（図の右側）の地下深部から、低比抵抗帯（濃い部分）が地表部まで延びており、山型の低比抵抗帯を形成している。一般に低比抵抗の地層には、①地下水で飽和した地層、②断層破碎帯、③熱水変質帯、④金属鉱物を含む地盤、⑤新第三紀の海成層などがある。今回検出された低比抵抗帯として①、②、③が考えられる。①に関しては、温泉水の噴出や湯川の水の流入など、②では跡津川断層や茂住断層に伴う小断層や破碎帯の存在、③では、探査地域が立山火山の過去の熱水変質作用により変質帯を形成していること、などが考えられる。今後の検討課題である。

各測線の低比抵抗帯の頂上部を結ぶとほぼ南北の方向性をもつ構造線が引け、地形的なりニアメントとよく一致する。これは跡津川断層の方向（北東－南西）と合わず、断層線では無いかも知れないが、「電磁気異常」、「リニアメント」、「温泉」等の条件を併せると、地殻構造の何らかの変状が予想される。同探査では基盤深度まで到達していないが、深度30～40m付近に見られる地電流密度の水平な分布は、地層構成の相違により形成されている可能性が高い。

#### 4. おわりに

電気探査を、立山カルデラ内にある立山温泉跡地から南南西に約200m離れた地域の道路上でシュランベルジャー法により実施した結果、調査地域の崩壊土砂の堆積層の厚さは約60.5mと求められた。

この地表より60.5m深度に位置する基盤の上位には低い電気比抵抗を示す厚さ33.6mの層が存在し、さら

に上位に2層の堆積層がのる堆積構造が推定された。

地下レーダ調査では、地表に近い堆積層の構造を捉えることができた。電気探査の結果よりも詳細な構造が認められており、これは崩壊に伴う堆積状況を示唆していると考えられる。

VLF-EM法の探査による電気比抵抗の二次元分布調査において、比抵抗の異常点が確定された。探査で認められた低比抵抗帯は、地下水で飽和した地層、断層破碎帯、熱水変質帯の可能性もある。

これらの電磁気探査の各手法の有効性が示され、今後同手法により立山カルデラ内の更に詳細な地下探査を行うことが望まれる。その際、不安定土砂の層厚の推定に適する解析深度の深いELF-MT法やCSA-MT法や表面波探査等を併用すること、重要な部分では調査ボーリングにより試料を採取して岩石物性を検討することも望ましい。

#### 謝辞

調査にあたり、田中保士氏、黒沢尚美氏、山本松男氏、矢野亨氏にお世話になった。

#### 参考文献

- 物理探査学会，物理探査ハンドブック，1998。  
 町田 洋，荒廃河川における侵食過程－常願寺川の場合－，地理学評論，35，157－174，1962。  
 酒井英男，小田博之，山田剛士，城地琴博，田中保士，活断層トレンチ調査地点近傍の電磁気探査－柳ヶ瀬断層および阿寺断層系萩原断層の事例－，活断層研究，12，65－71，1994  
 酒井英男，D. Goodman，田中謙次，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，537，16－23，1999

#### [要 旨]

立山カルデラで発生した鳶崩れによる崩壊土砂の堆積量を推定するため、立山温泉跡地周辺において、電気探査をシュランベルジャー法により実施した。その結果、地表より60.5mより下位に基盤の層があり、その上位に低い電気比抵抗の基盤上層、さらに上位に2層の堆積層（地表～18.8mの層と18.8～26.9mの層）がのる3層からなる堆積構造が推定された。また、地下レーダ調査でも、崩壊に伴う堆積状況を示唆する堆積層第一層における複雑な堆積構造を捉えることができた。さらにVLF-EM法の探査でも、電気比抵抗の異常点が確定された。低比抵抗帯は地下水で飽和した地層、断層破碎帯、熱水変質帯の可能性もある。

本調査で電磁気探査手法の有効性が示されたので、今後とも立山カルデラでの更に詳細な地下探査を行なうことが望まれる。