

## スタッキング電気探査装置の開発と阿蘇火口 周辺における電気探査について

田中 良和・江頭 庸夫・中村 貞美  
須藤 靖明・増田 秀晴

### DEVELOPMENT OF A STACKING RESISTIVITY SOUNDING INSTRUMENT AND THE APPLICATION TO RESISTIVITY SOUNDINGS IN THE VICINITY OF THE CRATER OF NAKADAKE, ASO VOLCANO

By *Yoshikazu TANAKA, Tsuneo ETO, Sadami NAKAMURA, Yasuaki SUDO*  
and *Hideharu MASUDA*

#### Synopsis

A new type resistivity sounding instrument composed of analogue stacking integrators was developed. Despite of its compactness and portability, it has very high resolution. Using this device, resistivity sounding surveys were carried out by means of the Schlumberger vertical sounding method at Kusasenri region and in the vicinity of the crater of Nakadake, in autumn 1980.

Following results were obtained. Kusasenri is formed three layers. The surface is composed of fine volcanic ashes, the 2nd layer is piled scoriae and the western and southern part of the lowest layer is formed of the high resistive Kusasenri lava locks. The very low resistivities at the aged crater of Nakadake (Sunasenri) suggest these regions are composed of scoriae and volcanic ashes. While the high resistive layers found at Umanose and Western slope out of the crater, represent the existence of lava sheets.

#### 1. ま え が き

火山活動の盛衰に伴う地温変化は地下の電気伝導度に変化を与える。従って熱変化が比較的著しいと思われる火口周辺で定期的に地下電気伝導度の観測を実施すれば、熱の変動や物質の移動を把握できる可能性がある。この種の観測に先立ち、火口周辺の電気構造を概査しておく事が必要である。筆者等は1979年第一次計画として基礎調査を桜島、黒神河原において実施した。表層 100 m 深の探査により、昭和溶岩流の層厚が明瞭に求められることはすでに報告した<sup>1)</sup>。

この論文では第2次計画として阿蘇火口周辺の電気探査を実施したのでこの結果について報告する。また今回、スタッキングによる S/N 改善法をとり入れた極めて小型軽量の電気探査装置が筆者の一人、田中により試作された。この装置を“電探一号”と称する。運用の結果、非常に良い特性を得たので装置についての説明をはじめにのせる。

#### 2. “電探一号”について

交番矩形電流を大地に通電したときの受信電界は Fig. 1 に示した様に信号に雑音が重なったものとなる。Schlumberger 法では遷移部を除き定常部の振幅を読む。S/N が良いときは各種の方法で振幅を読むこ

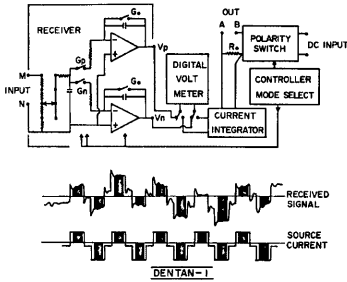


Fig. 1. Block diagram of the resistivity sounding instrument composed analogue stacking integration method.

とができるが、雑音が大きくなると一波ずつを比較したり、平均強度を読みとる方法では誤差が大きくなる。しかし、信号源は人工電流であるから、周期、位相ともに既知であり、信号波のみ同相に重ね合わせることができる。一般に  $N$  回の重ね合わせにより  $\sqrt{N}$  程度で  $S/N$  が改善されるから、100 回のスタックを行えば一桁の精度向上が期待される。逆に従来と同じ解読精度でよければ送信電流を  $1/10$  にしてもよい。つまり同種の接地電極を用いるものとするれば供給電圧を  $1/10$  に下げることが可能で一次電池が極めて小さくて済む。足場の悪い山岳地帯の調査では機材重量を軽減することが作業能率向上に直結するため大変重要である。“電探一号”のブロック図を Fig. 1 に示した。

この装置の計測原理を簡単に説明すれば、(i) 送信部から与えられるゲート信号に従って、大地に正方向の電流を通电している期間は正の積分器に信号を蓄え、負の期間は負の積分器に積算する。(ii) 計測終了時点でその差を読みとると、雑音分は両積分器に同等に作用しているため消去される。信号分は両積分器に異符号で積分されているため 2 倍振幅として現われる。(iii) 積分器のオフセットを打消すために次の計測サイクルで積分器を交換する。(iv) 前回の差を求め 4 で割ればオフセットも除去された正しい振幅が得られる。(v) 送信電流強度は標準抵抗間に生じた電位差を全く同じ方法で計測する。

### 回路図についての説明

- ① スタート SW が押されると F8 モノマルチが約 2 秒間の G3 パルスを作り出す。G3 は送信電流および受信電界強度測定用積分器の零セットとして用いる。また後縁で F7 はリセットされ、HALT SW が押されていない限り CO カウンターは内部 ck でカウントを開始する。G3 の立上りは FR フリップフロップを反転させ、積分器を反転して使用する様作用する。また F9 をクレーアしてサイクルカウンター C1, C2 を計数可能にする。
- ② 水晶発振による 1 MHz を  $2^{14}$  分周して 61 Hz が作られる。3 Hz の電流出力モードではこれが基準 ck となるが 0.3 Hz のときは更に 10 分周した 6.1 Hz が基準 ck となる。
- ③ CO は通常 “9” にリセットされている。カウント “0” で、F1 フリップフロップは反転し、H となった側の F3 又は F4 モノマルチがサイリスター点弧パルスを生じる。TR1 が常時 on であるから送信電流が流れはじめる。カウント “2” で F5 ゲートは on となり、FR の状態により G1 又は G2 が on となる。G1 および G2 は正負いずれの積分器に電流を蓄積するかの制御に用いる。カウント “7” で F5 は off となり計測ゲートは閉じる。カウント “8” で F2 モノマルチは短パルスを生じ TR1 は瞬時 off となり SCR 電流を遮断する。これで送信の半サイクルは終了する。
- ④ 次の半サイクルは F1 が反転することにより、前とは逆ベアーの SCR が点弧され逆向きの電流が送信される。また積分ゲート G1, 2 も前とは異なる積分器を用いる様に送り出される。G1~G3 のゲートパルスは積分器と送信器が共通アースを有しないからフォトカプラーにより絶縁して結合している。

- ⑤ F1の2番ピンQの下立りはC1をインCREMENTする。C1, C2 サイクルカウンターの内容が10又は100になればF7はonとなり、COを“9”リセットするため送信サイクルは停止する。
- ⑥ この状態で HALT 表示がつくから積分器出力をデジタルテスターにて電流、電界ともに読取り記憶する。
- ⑦ この値のままでは積分アンプのオフセット値が不明であるから、もう一度スタート SW をおして反転計測をやる。すると次はFRが反転するため積分器を交換して計測してくれる。読取った結果はおおよそ前の値とは異符号で値は似ているはずである。両者の差をとり積分定数を掛ければ正しい電圧が求まる。
- ⑧ 積分器のアッテネーターは適当な値としてあるので較正を要する。
- ⑨ SCR につながる 2kΩ の抵抗は高接地抵抗の場合にも SCR 電流が安定であるためのダミーである。使用電圧が高いときは発熱量が大きいので外付けとし、5 mA 程度流れる様にしておけばよい。
- ⑩ 出力短絡保護として FL フリップフロップを設け、過大電流が生じた場合 TR1 を off にして電流を遮断している。リセット SW を押すことで復帰できる。
- ⑪ 電源は、コントローラー部に単2、6ケを用いる。また2組の積分器は単2、2ケをインバーターで昇圧し、安定化して用いる。
- ⑫ これらコントローラー、2組の積分器電源、デジタルメーターの4種の電源は独立で、共通アースが存在しないことに留意する。またコントローラー部の図面でアース記号が用いてあるがこれも外部ケースに接続できないから注意する。送信用電池を除けば 33×11×22 cm のケースに容易に収納でき非常に小型・軽量である。

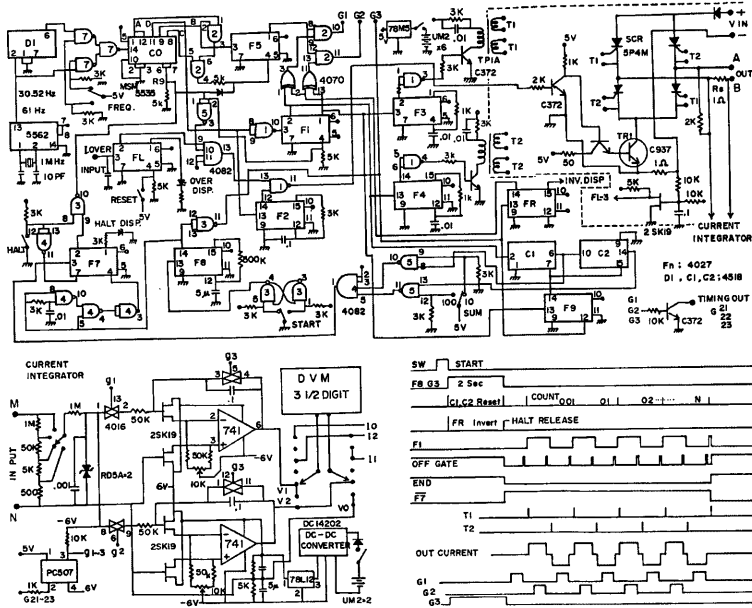


Fig. 2. Wiring circuit diagram of the resistivity sounding instrument, "DENTAN-1".

### 3. 草千里浜の浅層電気探査

草千里浜は烏帽子岳 (Fig. 5) の北々西に出来た側火山の火口跡である。直径約 1 km あり中央部には高さ約 30 m の南北にのびる小丘を有している。これを境にして東部、西部に浅い凹地を有し、通常は水を溜めている。この様な地形が電氣的構造としてどの様に現われるかは大変興味があった。地形的には高低が少なく、表層は火山灰で覆われているため電気探査は比較的容易と思われた。この様な理由で1980年秋、“電探一号”を用いて草千里浜一帯の電気探査を実施した。Schlumberger 垂直探査法を用いて、水平成層構造を仮定して解析した。数値解法として牛島<sup>2)</sup>の方法や、Koefoedの自動直接積分法<sup>3)</sup>も一部併用したが、層が薄い場合や、次層との比が大きい場合には収束性が悪くなるので、多くは標準2層解析曲線と小野の補助曲線を用いる方法によった<sup>4)</sup>。

測点配置は Fig. 4 (a) に示す。Fig. 4 (a) の測点番号1～7は精査のため少し密な展開をして地形条件の許す範囲で長く測線をとった。他の測点はこれらの間を補間する目的で、測点間隔は約 150 m とし、1/2 AB が10, 20, 30, 40, 50, 70, 100 m に限った Schlumberger 垂直探査法を展開した。

見掛け抵抗曲線の数例を Fig. 3 に示した。解析にあたっては層数はなるべく少なくして近似できる様留意したが、層数をいくらするかは自由度があり解はユニークには求まらない。解析結果は柱状図として Fig. 4 (b) に掲げた。27, 28の測点は同じ地点を中心として測線を東西、南北に展開したもので両者良く一致している。

柱状図をみると草千里浜は、ごく表層を除けば3層で近似できることが判る。15 m 以浅にみられる 280  $\Omega$ m 以上の層は主として火山灰の層である。その下部には数 10 m にわたり 100～200  $\Omega$ m の中間層が存在する。抵抗値が低いことからみて保水性のよいスコリア層と思われる。下部層はこの層より 1.5～20 倍抵抗が大きくなる。数 100  $\Omega$ m の層は火山灰であるのか、良く破砕された溶岩であるのかは判らないが、1 k $\Omega$ m を越える層は自破砕溶岩とみて良い。

100 m 以浅でこの高比抵抗層が出現した箇所を図示すれば Fig. 4 (c) の如くとなる。また測点11, 12, 26 では 100 m 深さにおいても中間層のままで高比抵抗層は見出されなかった。これらは図に破線で囲んで示した。

松本<sup>5)</sup>によれば、草千里浜火口は二重火口で烏帽子岳形成後、大活動して烏帽子岳本来の火口を破壊し、おおよそ現在見られる外まわりの形状を作り出した。その後内側の火口が中心より少し東側に寄った所で噴火したものである。そしてこの活動に於て西方に溶岩を流出している。

これらのことを念頭において今回の調査結果をみると、Fig. 4 (c) に示した草千里浜西部から南部やや内

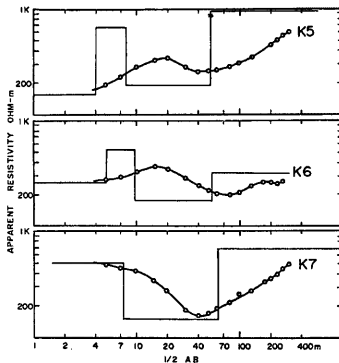


Fig. 3. Apparent resistivity curves and their interpretations at stations K5, K6 and K7.

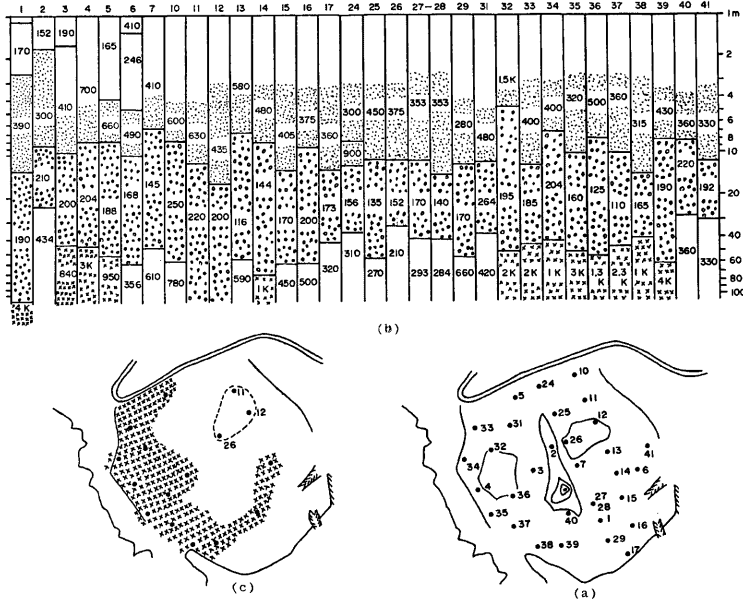


Fig. 4. Locations of the sounding points at Kusasenri (a) and the electrical interpretations (b). The closed area in the left map shows the lowest layers which have very high resistivity (c).

側にかけてみられる 1 kΩm 以上の高比抵抗体は後期活動の火口から流出した草千里溶岩を示しているものと結論できる。また現在の東凹地よりやや北に位置する高比抵抗の認められない地域が火口中心を示すものと思われる。

#### 4. 阿蘇中岳火口周辺の電気探査

阿蘇中岳は阿蘇火山中央火口丘の中で最も古くから現在に至るまで活動を続けていて、中岳火口周辺の地下構造は極めて複雑であることが予想される。今回調査を行なった目的は、活火山の動的状態を電気抵抗の変化として観測するのに先立って、火口周辺の電気的構造を把握しておくことにあった。従って測線は密にらずに火口周辺の、状態の異なる多くの場所を選んだため系統的な解釈はできない。測線位置図を Fig. 5 に示した。

見掛け抵抗は各測線でかなりの違いを示す。解析上、層数を幾らに選ぶかで結果が大幅に変わってくるから、本節では見掛け抵抗曲線と構造図を合わせて Fig. 6 に示した。

以下個別的に若干の説明を加える。

**馬ノ背：UM** 1 m 未満に 200 Ωm 層が求まっている。この層は無視してもよいが、次層に続く溶岩の窪みに、近年の噴出火山灰が堆積したものである。第 2 層の 4 kΩm 層は比較的新鮮な割れ目の少ない溶岩層と思われる。総じてこの測線は高抵抗で、地質的にはスコリアと溶岩流の互層であることから数 100 Ωm の層もこれらを反映しているものと思われる。吉川等の地震波探査によれば<sup>9)</sup> 約 40 m の深さまで 1.5 km/s.

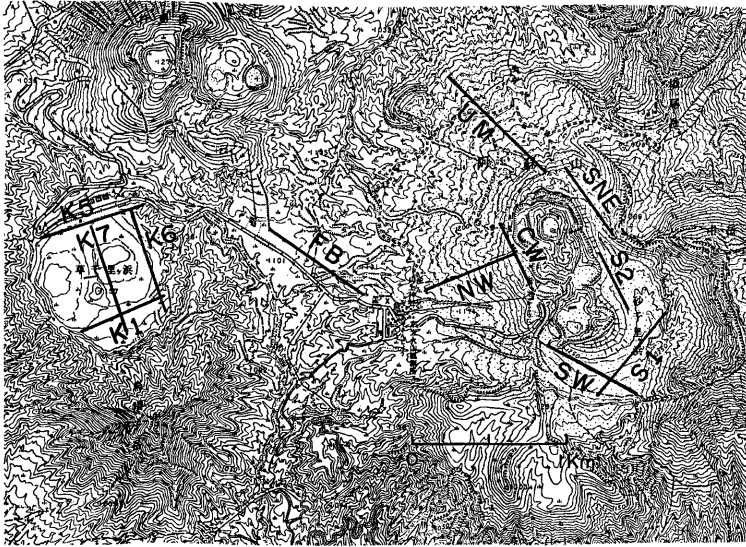


Fig. 5. Locations of the sounding stations.

120 m 深までは 2.3~2.4 km/s が求められている。それ以深に 3.5 km/s のやや高速度の層を求めているが電気探査ではむしろ低比抵抗層となっている。これは自破碎溶岩流の間を極めて良導伝性のスコリア等が充填されていると考えれば必ずしも矛盾する結果ではない。しかしこの下層部は草千里や古坊中に較べて極めて抵抗値が低いのが特徴であり、温度が高い可能性がある。

**中岳西斜面：NW** 表層はやや風化した溶岩の比抵抗値を示す。この層は直接目視されるが厚さは今回の測定で 1 m 程度と求められた。その下 10 m 深までは火山灰混りのスコリア層と思われる。そして 20 m 程の厚さの溶岩層となり、それ以深は再びスコリア層が現われている。170 m と 200 m の測点間に高抵抗層を思わせる層が見られる。電極周辺部のアノマリーにより生じている可能性もあり、強くは主張できないにしても、溶岩層が互層に入っていることは中岳活動の歴史からみて充分考えうることである。また地震波速度をみると<sup>6)</sup> 30 m 以浅が 1.5 km/s, 100 m 深まで 2.1 km/s, 100 m 深で X 層と称されるやや速い層が見出されている。この層の上層境界深度が上述の高抵抗層に良く一致することは興味深い。

**古坊中：FB** 表層は火山灰に覆われているが予想外に比抵抗は高く風化した溶岩流が 1 m 程ある様に見える。第 2 層はスコリア層とみなせる。8.5 m 深から再び風化した溶岩流と思われる高比抵抗層がみられる。

**火口西縁：CW** 現在の中岳火口西側縁は幾多の噴火活動で出来た火口壁と火口壁の間に位置する。表層に及ぶまで低比抵抗であるのが特徴である。この様な特徴は **SNE** にも見られる。これは近年の活動による噴出物が表層にかなり堆積していて、それらが電解質なためと推定される。

通常砂千里と呼ばれる **SW, S1, S2** はいずれも抵抗値は低く火山灰とスコリアの互層をなしているものと判断される。

以上、中岳の火口活動の経過からみて当然ではあるが、火口周辺は極めて非一様な構造をしている。旧火口内に堆積している火山灰、スコリア層は比抵抗が小さい。これは堆積物が電解質なためと思われる。同様

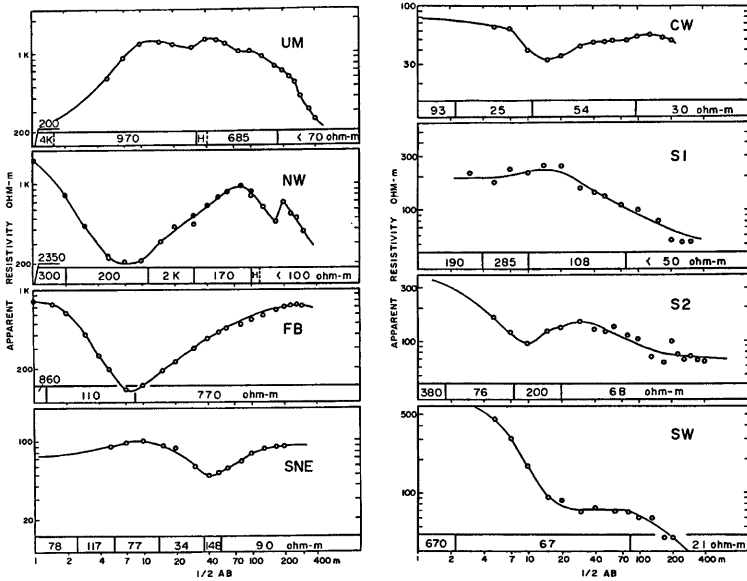


Fig. 6. Apparent resistivity curves and their interpretations in the vicinity of the crater of Nakadake.

の層が下部層程，低比抵抗であるのは温度が高いためと思われる。馬ノ背では溶岩流層が卓越し，比抵抗は高い。中岳西斜面ではスコリア層がかなり存在し，導電性がかなり良い等の知見が得られた。

定常的な電気伝導度の観測を実施しようとすれば，Dipole-dipole 電極配置に依存することになる。今回の観測結果により以下の知見が得られる。(1)火口部でかなりの電流が深部へ短絡し，減衰が大きくなる。(2)火口周辺の低比抵抗層の原因が熱でなく化学物質の影響だとすれば浅層では降雨により著しく変動を受ける可能性がある。

これらのことに留意して電極配置を決定しなくてはならない。

## 5. おわりに

この調査は文部省自然災害特別研究「噴火災害の特質と Hazard Map の作製およびそれによる噴火災害の予測に関する研究」——代表下鶴大輔——の一部として実施したものである。調査計画にあたり桜島火山観測所の加茂幸介教授，京大物理学部火山研究施設の久保寺章教授には貴重な御意見を戴いた。調査にあたっては火山研究施設の菊池茂智助手，当時大学院生であった黒田徹氏をはじめ技官の方々に大変お世話になった。資料解析に際しては同施設小野博助助手に有意義な議論をして戴いた。地質学的な知見についてはすべて熊大松本幡郎教授に御指導を戴いた。記して深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 江頭庸夫・田中良和・植木貞人：電気探査（比抵抗法）による溶岩流層厚の調査，第17回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集，1980. pp. 699-700,

- 2) 牛島恵輔・牛島和夫：水平多層構造に対する RS 曲線の計算，物理探鉱，第30巻第1号，1977，pp. 1—11.
- 3) Koefoed, O: *Geosounding Principles, 1, Resistivity Sounding Measurements*, Elsevier, 1979.
- 4) 志村 馨：電気探査法，昭見堂，1977.
- 5) 松本幡郎：阿蘇の地形・地質，阿蘇国立公園学術調査報告書，(熊本県) 1977.
- 6) 吉川宗治・加茂幸介・狐崎長琅：阿蘇火山中岳火口周辺における地震探査，火山，第2集，4，1959，pp. 20-32.