

## 樽前山の自然電位測定

宮村 淳一\*1・田島 義美\*2・山内 義敬\*3・田村 憲次\*4

Self-Potential Measurement in Tarumae Volcano

Jun'ichi MIYAMURA, Yoshimi TAJIMA, Yoshiaki YAMAUCHI and Kenji TAMURA

(Received February 14, 1994; Accepted December 5, 1994)

To determine the current geothermal status of the Tarumae Volcano, we conducted measurements of its self-potentials. We observed a positive anomaly amounting to about +300mV on and around the lava dome in the crater at the summit, together with a large negative anomaly amounting to in excess of -1800mV, which we observed on the eastern flank of the somma.

The strong correlation between the negative anomaly of the self-potential and the topographic elevation observed at the eastern flank of the somma may have been caused by the topographical flow of groundwater.

The distribution of the positive anomaly corresponds almost completely to the geothermal region which has developed on and around the lava dome. An electrokinetic coupling effect due to the upwelling of the heated groundwater is a convincing interpretation of this anomaly. The depth of the electric current source is 420m  $\pm$  100m beneath the crater, as calculated based on a simple point-source model.

The present study indicates that the measurement of self-potentials can be a very effective technique for attaining a clearer understanding of the geothermal status of the Tarumae Volcano.

### § 1. はじめに

樽前山(標高1,041m)は西南北海道東端部に位置する支笏カルデラの南東壁に噴出した複式の活火山である。樽前山は、2千数百年の長い休止期の後、1667年に大規模な軽石噴火をおこして以来活動期に入り、現在までに大小70回を越える噴火記録を残している。最近では、1978年5月14日に山頂部の溶岩円頂丘南東麓に位置するA火口から少量の火山灰を噴出するごく小規模な水蒸気爆発を発生し、以後1981年2月までの間にたびたび山腹まで降灰をもたらす活動があった。

樽前山周辺の地形図をFig. 1に示す。樽前山の北東斜面には7合目ヒュッテ(HT, 665m)があり、ここから山頂部へ登山道がのびている。山頂部には東山(H

Y, 1,024m)を含む最大径約1.5kmのほぼ円形の外輪山とそれに囲まれる比較的平坦な火口原がある。火口原内には低い中央火口丘(CC, 976m)とその火口を塞ぐように1909年の活動で生成された溶岩円頂丘(ドーム)が存在している。このドームにはその後の度重なる噴火活動により北東-南西方向および北西-南東方向に多数の亀裂が生じ、これらの亀裂上にはいくつかの爆裂火口も生じた。現在、ドーム周辺ではこれらの亀裂群を中心として活発な噴気活動が続いている。火口原内に現存する主な噴気・地熱地帯については苫小牧測候所が年3回の定期現地観測を実施している。Fig. 1に現地観測地点の位置をA~Nの記号で示す。

最近、火山の熱的狀態を把握する試みとして、自然電位(Self-Potential, 以下SPと略す)の測定が行われるようになり、火山地域における熱的構造や熱水系のダイナミックな状況を知る上でSP測定はきわめて有効な手法であることが分かってきた。

そこで、現在も活発な地熱活動を続ける樽前山において、その熱的狀態を把握することを目的として火口原内を中心にSP測定を行った。その結果、火山地域として特徴的な観測事実が得られたので、若干の考察を加えながら以下に報告する。

- \*1 苫小牧測候所, Tomakomai Weather Station
- \*2 札幌管区気象台, Sapporo District Meteorological Observatory
- \*3 釧路地方気象台, Kushiro Local Meteorological Observatory
- \*4 室蘭地方気象台, Muroran Local Meteorological Observatory

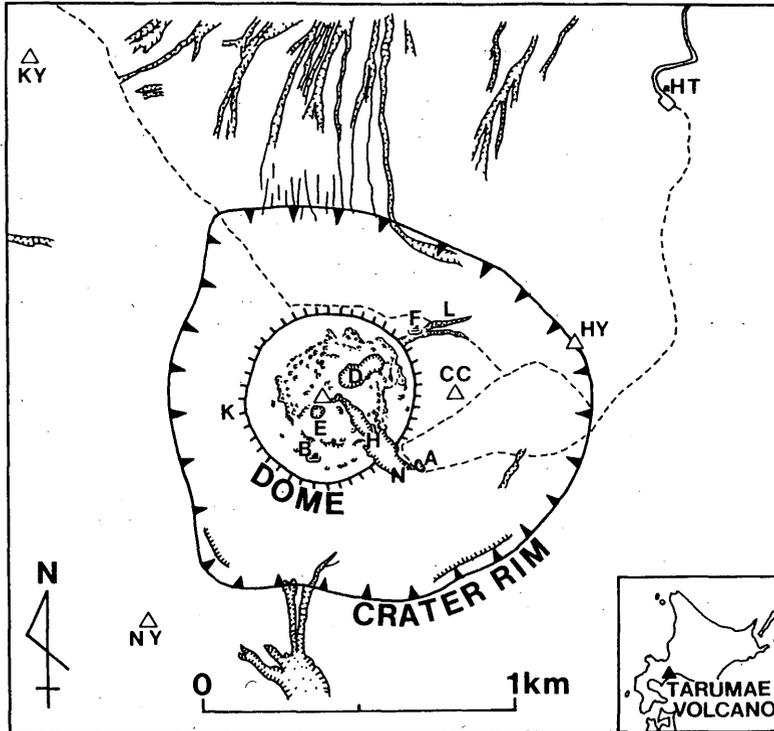


Fig.1 Topographic map of the area in and around the Tarumae Volcano. The letters A, B, D, E, F, H, K, L, and N indicate the locations of fumaroles and geothermal areas where the personnel from Tomakomai Weather Station make periodic spot observations. HY indicates Higashiyama, NY Nishiyama, CC the central cone, KY Kitayama, and HT the Nanagoume (Seventh Stage) Hut. The broken lines represent climbing routes.

## § 2. 火山地域におけるSP測定とその意義

多孔質媒質である岩石中の空隙内を水が流動する場合、固-液界面に生じる電気二重層が原因で水の流れに連動した電流が流れ、その結果として電位差（流動電位）が生じる（たとえば、石戸，1981）。この流動電位は界面動電現象と呼ばれる多孔質媒質中の流れに一般的な現象である。地熱地帯では地下に高温の熱水対流が発生しており、その上昇流が正電荷の流れの方向に運ぶために、熱水の上昇域ではSPは正異常を示すことが多い。火山地域においても、地熱活動が活発な火口周辺では地下に熱水対流が発生している可能性が高く、同様なSPの正異常が期待される。

渡辺（1985）は、三宅島で1983年の噴火に伴って生じた割れ目を横断するSP測定を行い、割れ目を中心に対称形をなす300mVに達する正異常を観測した。西田ほか（1991）は有珠山、北海道駒ヶ岳、三宅島でSP測定

を行い、火口原内の高温地域を中心とした火口原規模（1～2 km）の範囲で数100mVにおよぶ正異常を観測した。また、石戸ほか（1992）は、1989年から伊豆大島でSPの繰り返し測定を行い、1986年11月～1988年1月に噴火があった三原山火口周辺に3 km以上の広がりを持つ300mV程度の正異常が存在し、それが1991年に入ってから急速に小さくなったことを示した。これらの観測事実は、いずれも火山体下に存在する熱源（たとえば噴火に伴う貫入マグマ）に起因する熱水対流の様子をSP分布によって捉え得ることを示すものである。

鍵山ほか（1991）は、1990年11月に噴火活動を開始し溶岩ドーム・火砕流の発生を伴う活発な活動を続ける雲仙岳で行った地下の電気抵抗構造調査の結果に基づいてマグマの上昇過程を考察し、1991年5月の溶岩ドーム出現までの噴火初期段階で見られた一連の活動の推移（火山性微動発生→低温水蒸気・熱泥噴出→マグマ水蒸気爆発）では、マグマ起源の高温ガスと雲仙岳の地下に広く

分布する帯水層の接触により生成された熱水の挙動が重要な役割を果たしていたと推論した。

以上のことは、活動的な火山の熱的構造や火山活動に伴う熱異常の進行過程を知るためには、地下における熱水系の挙動を把握することが重要であり、熱水系の時間的・空間的な振る舞いに関する情報を提供するSP測定は、そのきわめて有力な手法であることを示している。

### § 3. SP測定およびその結果

今回のSP測定には、非分極性の銅-硫酸銅電極、シールド線および入力インピーダンス1MΩの電位差計を使用した。測定方法は、2個の電極を1組として用い、固定電極と移動電極が交互に入れ換わる方式を採用した。測定間隔は約100mである。

一般に、SP測定では電極の接地状態によって思わぬ大きな誤差を招くことがある。しかし、今回の各測点はいずれも深さ10cm程度で十分な湿りがあり、電極の接地状態は良好であった。また、軽石・植物体・噴気孔付近の硫黄昇華物などはSP測定値に影響を与える可能性が

あるので、できる限りそれらを避けるように測点を選び、場合によっては数10cm掘削して電極を接地した。

さらに、SP測定ではデータの再現性の悪さがしばしば問題になる。そこで、測定誤差を評価するために東側外輪山上の2測点について約22時間の間隔において電極再設置による測定を行った。両者の差は3mVと非常に小さかった。今回の調査目的から考えると、この程度の差は後述する測定結果にまったく影響を与えない。

なお、今回の調査では、SPの連続測定装置を手配できなかったため、磁気嵐などによる地電流の時間変化の影響を評価するための固定点における連続測定を行っていない。

今回の調査は、SP分布の時間変化の有無を評価することも目的のひとつとし、SP測定は約1年の間隔において1992年8～9月と1993年9月の2回行った。以下に測定内容とその結果について記述する。

#### 3.1 1992年の測定

1992年は8月6～7日に最初の測定を行った。測定結果を整理したところ、火口原内の詳細なSP分布を把握

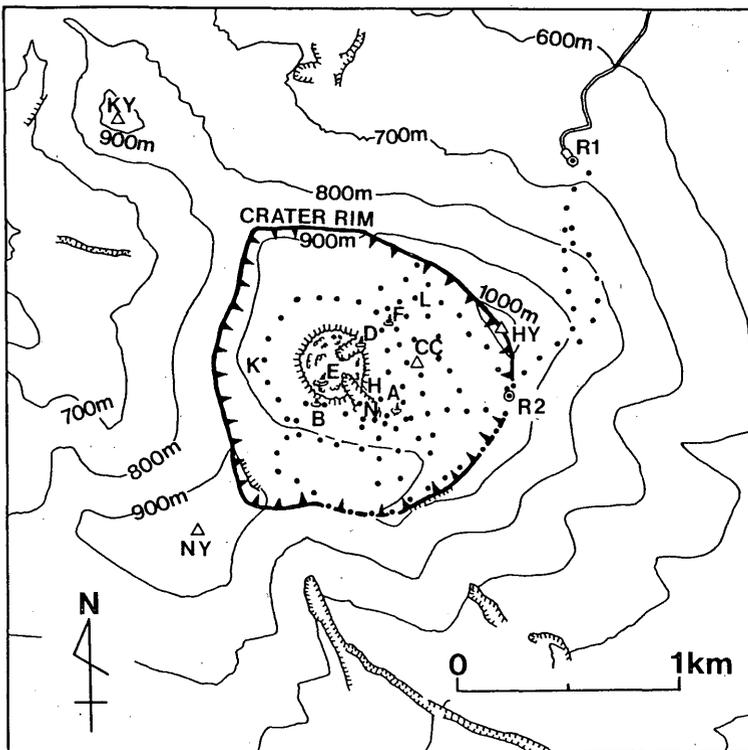


Fig.2 Distribution of survey points for self-potentials in 1992. Solid lines represent topographic contour lines, which are located at intervals of 100 meters. R1 represents the reference point for self-potential mapping. R2 represents the other reference point for measurement within the crater at the summit.

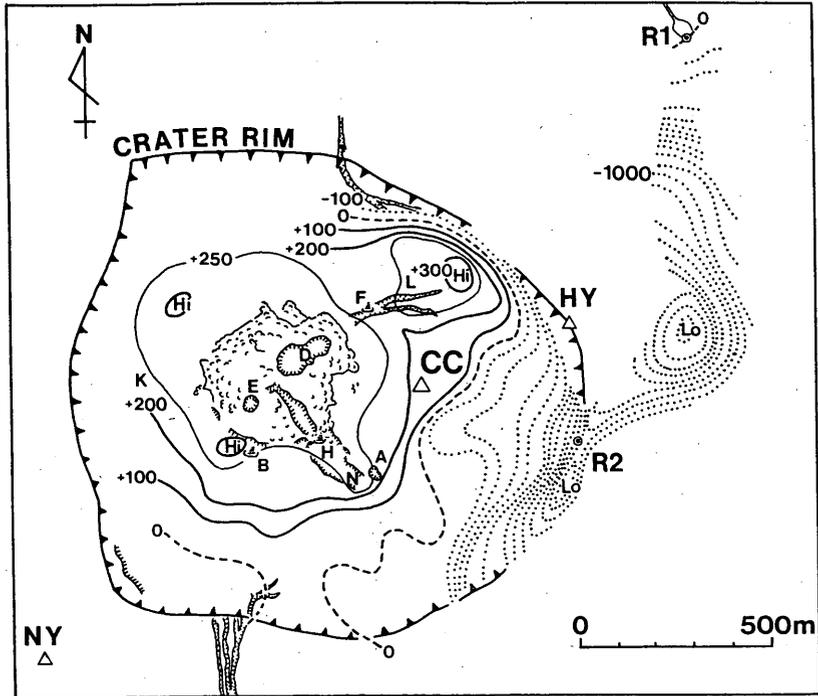


Fig.3 Contour map of the distribution of self-potentials in 1992. Contours are located at intervals of 100mV. Thick solid lines represent positive anomalies, dotted lines represent negative anomalies, and dashed lines represent zero. Thin solid lines represent the +250mV equi-potential contour. "Hi" and "Lo" denote the centers of the positive and negative anomalies.

するためには測点数がやや不足していたことが分かり、9月7日に補充測定を行った。Fig. 2に全体の測定分布を示す。測点数は、8月78点、9月33点の合計111点である。

測定は、樽前山北東斜面にある7目ヒュッテの登山口を第1基準点(R1)として出発し、東山を巻くようにしてのびる登山道沿いを東側外輪山上まで進めた。火口原内の測定は、東側外輪山上に第2基準点(R2)を設け、交互に入れ換えて使用する2個の電極とは別の電極をR2にあらかじめ接地・固定しておき、R2を出発して最後に再びR2へ戻るループ状の測線により測定した。8月の測定では、ドームを時計回りに一周するループを作り、さらに南東亀裂(B)およびA火口(A)の周辺と北東亀裂下部噴気孔(F)および北東火口原変色域(L)の周辺で測点が密になるように測線を蛇行させた。9月の測定では、R2を出発してドームの南側斜面を進み、南西噴気孔群(B)から南側火口原を反時計回りに回って南側外輪山上を通り、R2に戻るループを作った。また、R2からR1方向に登山道を下がる測線での測定も行った。

8月の測定ループは測点数64点で、ループの閉合誤差は-20.8mVと安定した結果が得られた。一方、9月の測定ループは測点数28点で、ループの閉合誤差は+144mVと8月の測定に比べてかなり大きかった。これは、測定途中で機器にトラブルが生じたため4測点で電極再接地を行ったことに関係した可能性もあるが、はっきりとした原因は分からない。また、8月と9月の測定でR2付近の重複する7測点について測定値を比較したところ、-24~+7mVの差が生じていた。前述のように、今回の調査では固定点における連続測定を行っていないので、この差が磁気嵐などに起因する地電流の時間変化によるものか測定誤差によるものか判断することはできない。しかし、後で示すSP分布の全体としての規模(-1855mV~+335mV)に比べるとこれらの差はごく小さいことから、測定データの解析結果に大きな影響を与えないものと判断して、SPマッピングでは両データを同時に使用した。

SPマッピングは、まず、全測定値をR1を基準(ゼロ)とした相対値に換算し、さらに、各ループの閉合誤

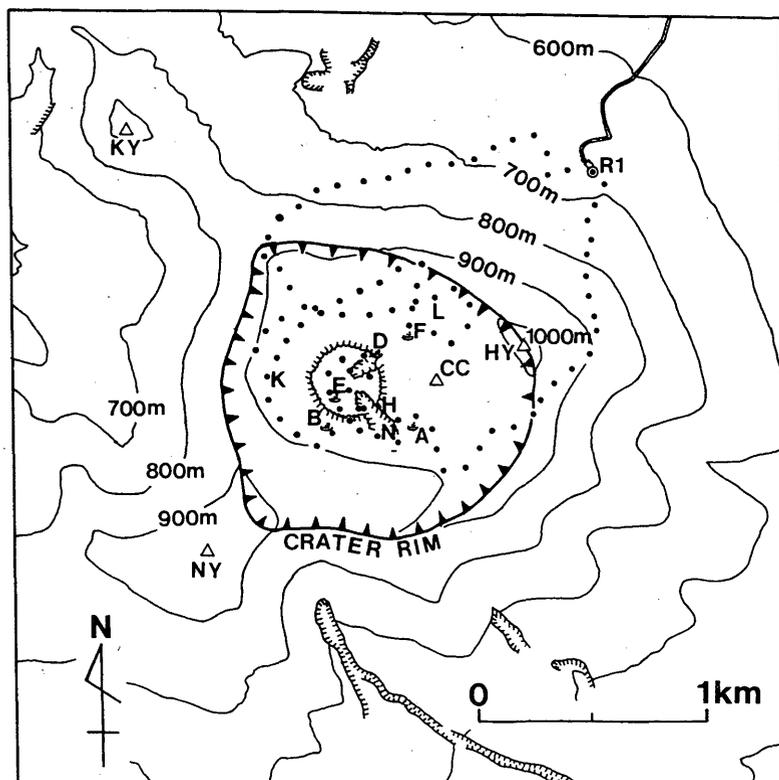


Fig.4 Distribution of survey points for self-potential in 1993. Solid lines represent topographic contour lines, which are located at intervals of 100 meters. R1 represents the reference point for self-potential mapping.

差については測定開始からの経過時間により補正し、8月と9月の重複測点については両者の単純平均値を採用し、それぞれの値を地図上にプロットし、コンターを引き作成した。

得られたSP分布のコンターマップをFig. 3に示す。コンターは実線が正異常、点線が負異常、破線がゼロ線をそれぞれ表し、コンターの間隔は100mVである。ただし、ドーム周辺の分布を詳しく見るために+250mVのコンターを特別に細い実線で示した。

得られたSP分布に見られる特徴として、正異常と負異常が大きく2つの領域に分かれて分布していることが挙げられる。正異常は、全般的にはドームを中心に直径約1kmのほぼ円形に分布しており、その範囲は火口原全体の西側約4分の3の領域にまで広がっているが、一部はドームから北東側の外輪山まで約400mの範囲にも広がっていて、その中心部における規模は+300mVを越えていることが分かった。1992年の測定ではドーム上での測定を行っていないために、ドーム上にこれを上回る

規模の大きな正異常が存在するのかどうかについては分からない。一方、負異常は中央火口丘(CC)の東側火口原内および外輪山上、さらには外輪山の外側にまで広く分布している。とくに、外輪山のピークである東山(HY)の約300m東側にある登山道には-1800mVを越える顕著な負異常の中心が存在している。また、外輪山上ではR2の南側に隣接する地形の高まり部分にも-1200mVを越えるもうひとつの負異常の中心が存在している。

### 3.2 1993年の測定

1993年の測定は、1992年の解析結果の補完とドーム上のSP分布を把握するために、9月6～7日に行った。Fig. 4に測点分布を示す。測定は1992年と同様に、樽前山北東斜面にある7合目ヒュッテの登山口を基準点(R1)とした。R1には交互に入れ換えて使用する2個の電極とは別の電極をあらかじめ接地・固定しておき、R1を出発して東側外輪山上までは登山道に沿って進めた。火口原内では、測点配置が1992年の測定で確認され

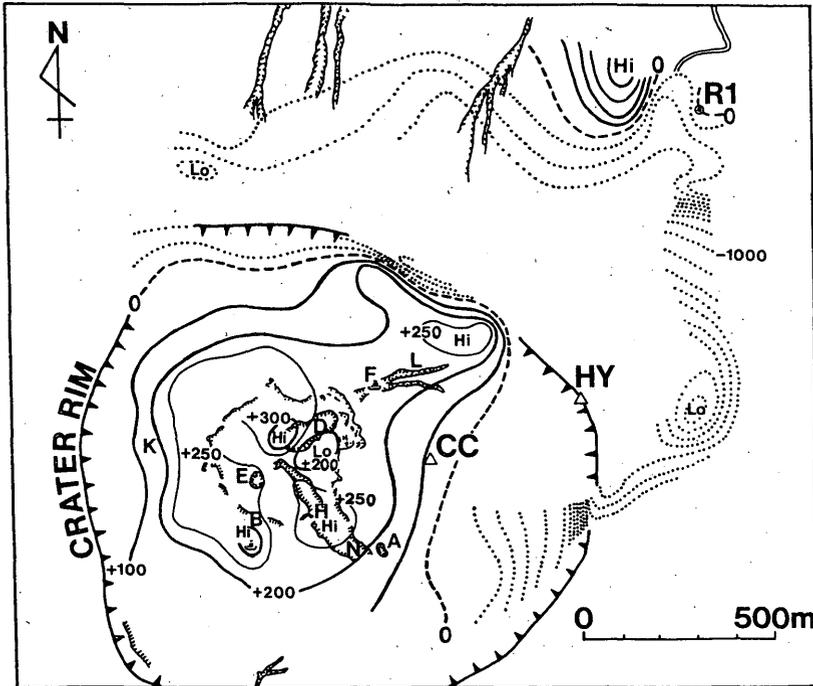


Fig.5 Contour map of the distribution of self-potentials in 1993. Lines indicate the same contours as those indicated in Fig.3.

た正異常の分布をできるだけ網羅するように随所で測線を蛇行させた。また、1992年の測定結果から正異常の領域に含まれると推定されたドーム上のSP分布も把握する必要があると判断して、南東亀裂(H)と南西噴気孔群(B)の中間地点にあたるドーム南側斜面からドーム上へ測線をのびさせた。ただし、ドーム上には北東噴気口(D)や南西噴気口(E)といった爆裂火口を含む亀裂群が存在するなど、ドーム自体の急峻な地形のため測線の設定に大きな制約を受けた。ドーム上の測定後、測線はドーム周辺を時計回りに進め、北東火口原変色域(L)を含むドーム北側の火口原では8の字を描くようにした。さらに測線は火口原から北山(KY)へ向かう登山道に沿って進め、北西側外輪山を越えた地点から7合目ヒュッテの方向に外輪山北側斜面を斜行させて、最終的にはR1でループを閉じた。したがって、1993年の測線は全体がひとつの大きなループを構成していることになる。

1993年の測定ループは測点数92点で、ループの閉合誤差は+38.8mVとなり、1992年8月の測定と同程度の安定した結果が得られた。SPマッピングにおける基準点およびデータ処理の手順は、1992年の場合に従った。得られたSP分布のコンターマップをFig.5に示す。図中に示したコンターの種類等はFig.3と同じである。

得られたSP分布のうち、1992年の測定と重複する火口原内および外輪山東側斜面については1992年とほぼ同様な分布を示した。注目される火口原内の正異常についてはその広がりや規模に大きな変化は認められない。ただし、ドーム北東側の火口原に分布する正異常の規模は中心部で+260mVを越える程度で、1992年よりもやや小さくなっている。

1993年の測定で新たにSP分布が把握できた範囲はドーム上と外輪山北側斜面である。ドーム上では北東噴気口(D)の南側を除くほとんどの範囲が+200mV以上の正異常となっており、火口原内の正異常はドームを中心として分布していることが明らかになった。正異常の中心は北東噴気口(D)の西側にあり、その規模は+385mVを越えている。また、+250mV以上の領域は南西噴気口(E)から南西噴気孔群(B)にかけてと南東亀裂周辺(H, N)に分布しており、これらの領域はドーム上に存在する亀裂群の位置と合致する。

一方、外輪山北側斜面では、広い範囲で負異常が分布しているが、東側斜面のように顕著な負異常の中心は存在しない。ただし、7合目ヒュッテ(R1)の西北西側約300mには400mVを越える正異常が存在している。しかし、この領域には地熱異常の兆候や隣接する周辺斜面

との地質の相違は認められない。この正異常の原因については資料不足のため今のところ不明であるが、改めて調査する予定である。

#### § 4. 考察

一般に、火山地帯で測定されたSP値には熱水対流による電位のほか、地形効果による電位や局所的な地質の影響など様々な要因による電位がすべて含まれている。これらのうち、熱水対流による電位と地形効果による電位のふたつが大部分を占めているものと考えられる。

1992年と1993年の測定で得られた各測点のSP値および地形標高をドーム中心からの水平距離に対してプロットした図をそれぞれFig. 6 (a), (b)に示す。測点位置の区別を容易にするため、調査範囲を6つの領域に分割して、領域毎にシンボルを変えてプロットしてある。この図から認められるSP分布の特徴として、

①外輪山上および外側斜面の地形標高が比較的大きく変化する範囲(水平距離700~1,400m)では、標高の変化に関連してSP値が複雑な分布を示す

②比較的水平な地形を示す火口原内(水平距離700m以内)にはドームを中心とした正異常が分布するの2点が挙げられる。以下では、これらの特徴について順に考察を行う。

##### 4.1 地形標高と相関する負異常

1992年と1993年の測定で得られた外輪山上および外側斜面における各測点のSP値と地形標高の関係をFig. 7に示す。Fig. 6と同様に測点位置によりシンボルを変えてプロットしてある。この図から、標高920m以下の外輪山東側斜面(三角)とそれ以外の領域(ひし形、逆三角)のSP分布には明瞭な相違が認められる。すなわち、前者では地形標高とSP値の間に明瞭な相関が認められ、地形標高が高くなるほどSP値が系統的に小さくなっている。これに対して、後者は地形標高とSP値の間にそのような相関は認められず、複雑な分布を示している。

地形標高に負の相関を示すSP分布は、地形に沿って高所から低所に向かう地下水の流れが存在し、それに伴って発生する流動電位を反映した結果として説明することができる。Ishido (1989)によると、均質媒質中の地下水流による流動電位 $\phi$ は基準点との地形標高差 $\Delta h$ と比例関係にあり、

$$\phi_i = \phi_0 - \alpha \cdot \Delta h \quad (1)$$

として表される。ここで、 $\phi_0$ は基準点における電位、 $\alpha$ は標高差に対するSP値の変化率である。Fig. 7で(1)式が成立すると考えられる標高920m以下の外輪山東

側側面の測点(三角)について、測定年毎に係数 $\alpha$ を求めると、1992年が7.2mV/m、1993年が7.7mV/mとなった。これらの値は伊豆大島の約1mV/m(石戸ほか、1992)に比べるとほぼ1桁大きい。樽前山に匹敵する大きな値が観測された例として、北海道屈斜路カルデラの10mV/mやアラスカAdak島のAdagdak火山(海拔500m以上で10mV/m)の報告がある(Ishido, 1989; Corwin and Hoover, 1979)。SP分布に対する地形標高の影響は表層地質の空隙率、地形の傾斜、降水量等に依存すると考えられている。樽前山の場合、外輪山外側斜面には大量の軽石が分布しており、空隙率の高い多孔質媒質が地下水の流れを大きくしている可能性が考えられる。また、1992年と1993年の値がほぼ等しいことは、地下水流がかなり安定していることを示唆している。

なお、Fig. 7において外輪山上(ひし形)や外輪山北側斜面(逆三角)の測点は、外輪山東側側面(三角)のような地形標高と相関のあるSP分布を示していない。調査資料が不足しているため、現時点でこれを解釈することは難しいが、地形との相関関係が単純ではないことは外輪山外側斜面下での地下水の流れがかなり複雑な状況にあり、場所によって大きく異なっていることを示唆している。

##### 4.2 熱水対流による正異常

§ 2ですでに述べたように、熱水対流の上昇域でSP正異常が観測されたという報告はこれまでに数多くある。それ故、SP分布と地熱分布の対応を調べることは正異常の原因を推論する上で重要である。しかし、苫小牧測候所が定期的に行っている現地観測は、ドームの急峻な地形により温度測定地点が制約されるため、その観測結果から樽前山の熱的狀態(とくに地熱分布)を把握するための十分な情報を得ることができない。

そこで、航空機を利用した地表面温度のリモートセンシングのデータを利用することが適当であると判断した。Fig. 8は、国土地理院(1984)が空中赤外熱映像撮影に基づいて作成した樽前山の地表面温度分布図から高温分布を抜き出して作成した図である。横縞部分は地表面温度が9℃以上、黒色部分は13℃以上の高温部分をそれぞれ表している。Fig. 8に表現されている高温部分は、いずれも現在知られている地熱地帯をカバーしていること、最近佐藤ほか(1993)が行ったドーム壁面の表面温度分布の調査結果とほぼ一致していることから、Fig. 8は今回のSP測定時におけるドーム周辺の地熱分布を適確に表現しているものと判断した。

Fig. 3やFig. 5のSP分布とFig. 8の地熱分布を比較すると、SPの正異常領域と高温部分が空間的に対応

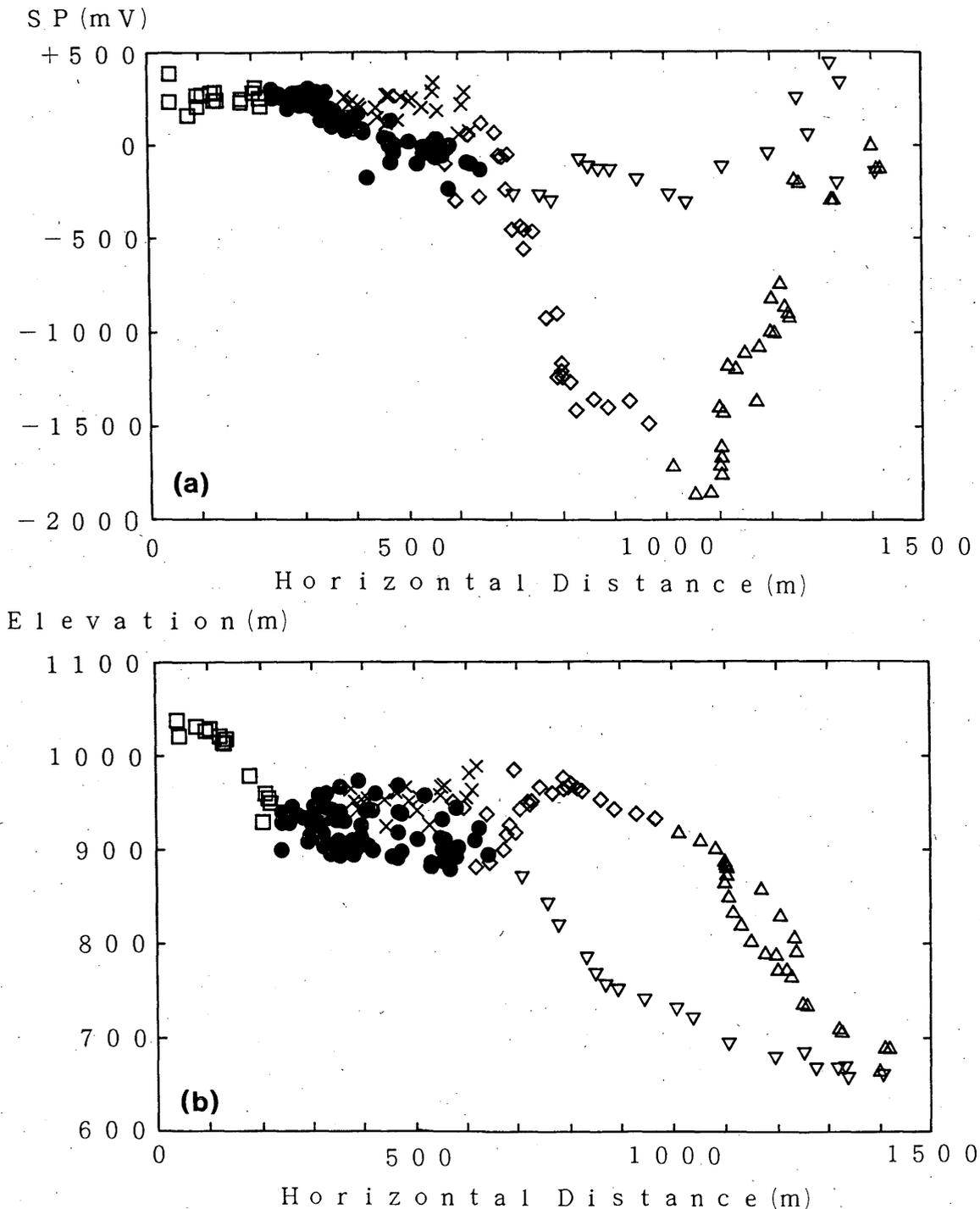


Fig.6(a) Distribution of self-potentials for the horizontal distance from the center of the lava dome.

(b) Elevation distribution for the horizontal distance from the center of the lava dome.

Squares denote data for the survey point located at the lava dome, crosses data for the point in the area of the northeastern crater, solid circles data for the point in the crater, triangles data for the point on the eastern flank of the somma, rhombuses data for the points on and near the rim of the crater, and inverted triangles data for the point on the northern flank of the somma.

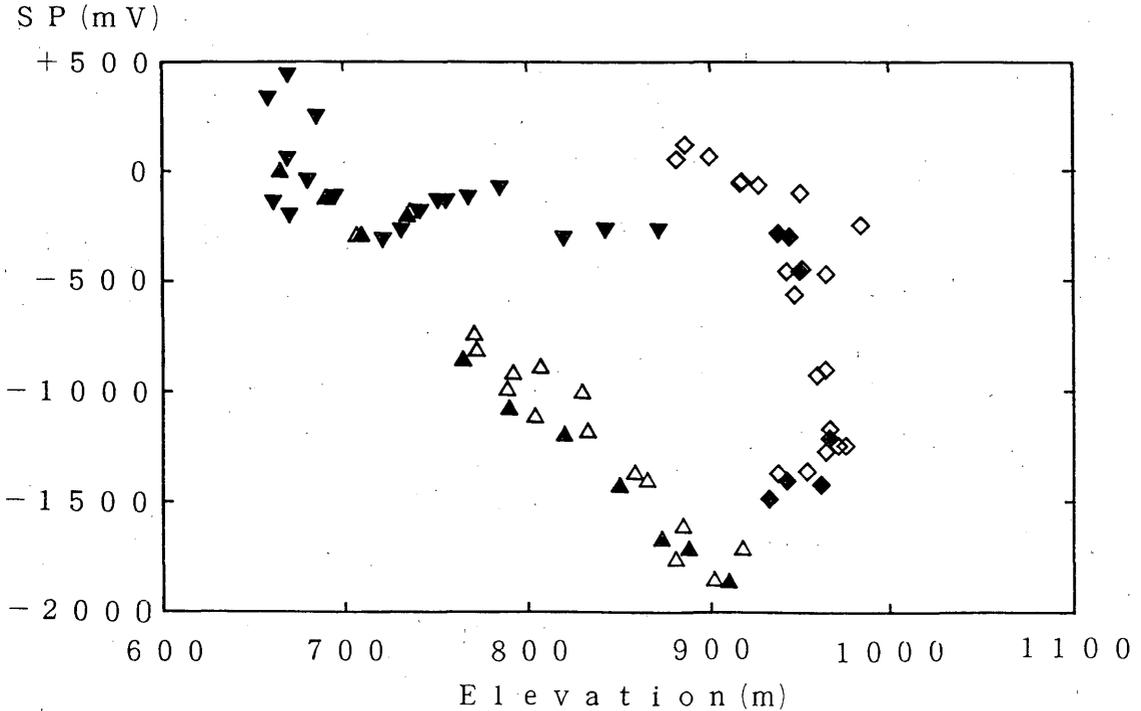


Fig.7 Relationship between self-potentials and the elevation of the surveyed points. Triangles denote data for the survey point located on the eastern flank of the somma, rhombuses data for the point on and near the rim of the crater, and inverted triangles data for the point on the northern flank of the somma. The data-observed in 1992 is indicated by open symbols, while that for 1993 is indicated by solid symbols.

していることが分かる。とくに、Fig. 5とFig. 8のドーム上における両者の対応は非常に良い。ドーム上の高温部分には爆裂火口を含む発達した亀裂群が存在しており、現在の地熱活動はこれらの亀裂群で活発に行われている。

以上の観測事実から推論すると、ドーム直下にはこれら亀裂群に向かって上昇する熱水対流が存在しており、この熱水対流による流動電位をドームを中心として分布するSP正異常の主な原因として考えることが最も妥当である。

SP正異常の原因を熱水対流による流動電位として考えると、簡単なモデル計算から電流源の深さを見積もることができる(たとえば、橋本ほか, 1993; 石戸, 1991)。半無限均質媒質内の深さDに点電流源が存在する場合、地表面上においてその点電流源の真上の地点から水平距離Rの地点におけるSP値 $\phi(R)$ は、

$$\phi(R) = \frac{A}{(R^2 + D^2)^{1/2}}, \quad A = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \quad (2)$$

で表される。ここで、Iは電流源の強さ、 $\rho$ は比抵抗である。橋本ほか(1993)によると、熱水対流によって運

ばれた正の電荷は、媒質の界面動電係数が急激に変化する領域(たとえば熱水が水蒸気に転移する場所)に集中するため、そこには正の電流源が形成される。この考えに従うと、ここで仮定した点電流源は熱水対流の上昇到達地点を意味することになる。

(2)式による理論値と測定値を比較することにより点電流源の深さDを見積もる。(2)式により今回の測定で得られたSP分布を評価するためには、4.1で述べた地形の影響を考慮する必要がある。しかし、Fig. 6を見るとドーム中心からの水平距離が約700m以内の火口原内の地形はドームを除いて比較的平坦である。そこで、今回は地形効果を補正する必要が低いと考えられる火口原内の測点データのみを使用した。また、点電流源の真上の位置を今回の測定データから正確に求めることはできないが、SP正異常がドームを中心に同心円状に分布していることから、今回はドームの中心に点電流源の位置を仮定した。さらに、ドーム自体は火口原よりも標高で100m以上高く、地質(比抵抗構造)も異なると予想されるので、ドーム上の測点データ(四角)は使用しないことにした。また、Fig. 3やFig. 5からドームを中心

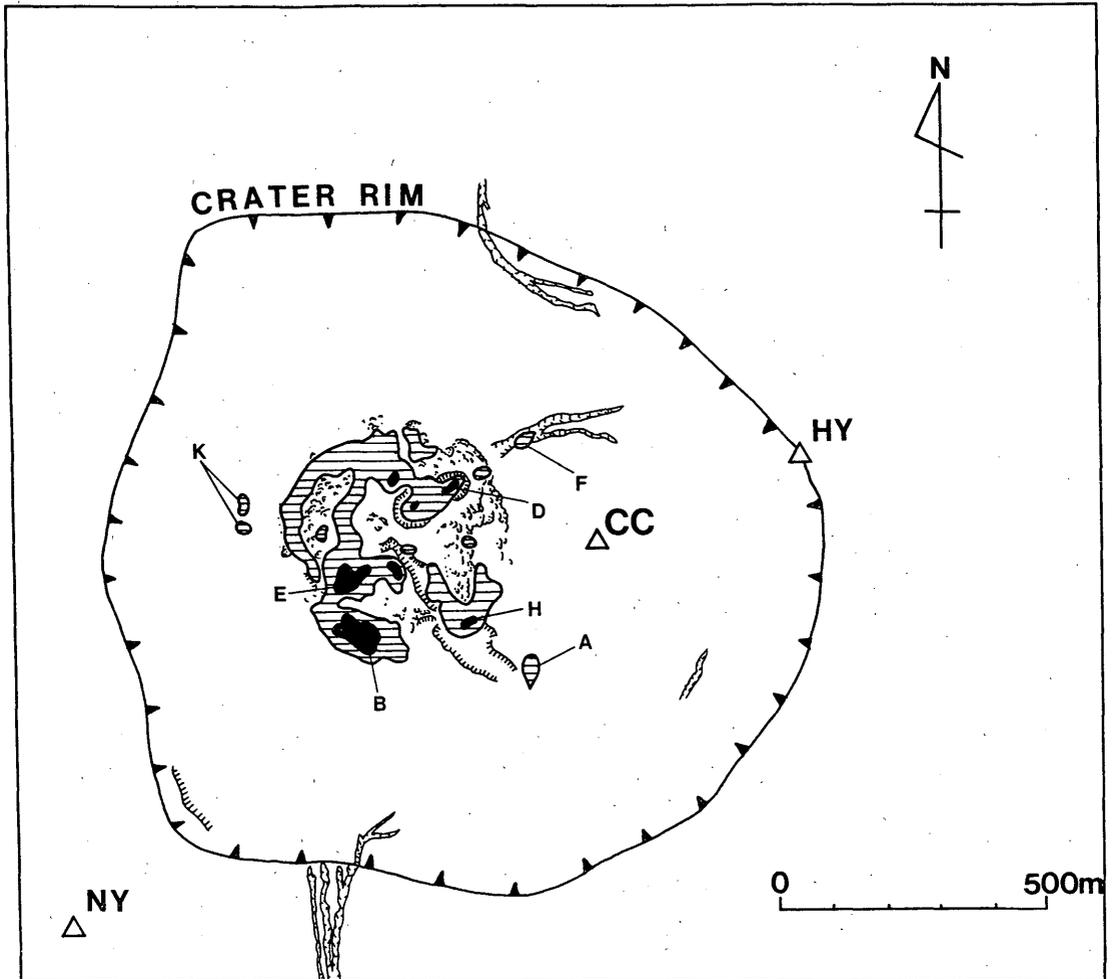


Fig.8 Surface temperature distribution in the crater at the summit of the Tarumae volcano. Lateral striped areas represent a geothermal area exceeding 9°C. Solid areas represent a geothermal area exceeding 13°C (Revised by the Geographical Survey Institute, 1984).

として同心円状に分布する正異常とはまったく異なる分布を示す北東火口原の測点データ（十字）についても使用しなかった。

データとして使用したSP値はR1を基準点とする相対値（すなわち、電位差）なので、(2)式にシフト定数項Cを導入する必要がある。

$$\phi(R) = \frac{A}{(R^2 + D^2)^{1/2}} + C \quad (3)$$

(3)式の未知パラメータはA, C, Dの3つで、 $\phi(R)$ とは非線形の関係にある。ここで、Dにあらかじめ適当な値を与えてDを一定とすると、(3)式は次のような線形結合に書き換えられる。

$$\phi(R) = A \cdot X + C \quad (4)$$

ただし、 $X = 1 / (R^2 + D^2)^{1/2}$ である。(4)式から線形最小自乗法により与えたDに対する最適解A, Cを求め、これをいろいろなDに対して行い、その中でSP値の標準偏差が最小となるA, C, Dを最終的な最適解として採用した。

使用した火口原内の測点データは1992年が52個、1993年が33個である（ただし、全体の分布から大きく外れる2個を除いてある）。しかし、測定年毎に最適解を求めると、データ数がやや少ないために解の標準誤差が大きくなり、安定した解が得られなかった。Fig.3とFig.5を比較すると火口原内のSP分布に時間変化がほとんどないことから、今回は両年のデータ85個を同時に使用した。最終的に得られた最適解は $A = 562560 \pm 7$ 、 $C =$

S P (m V)

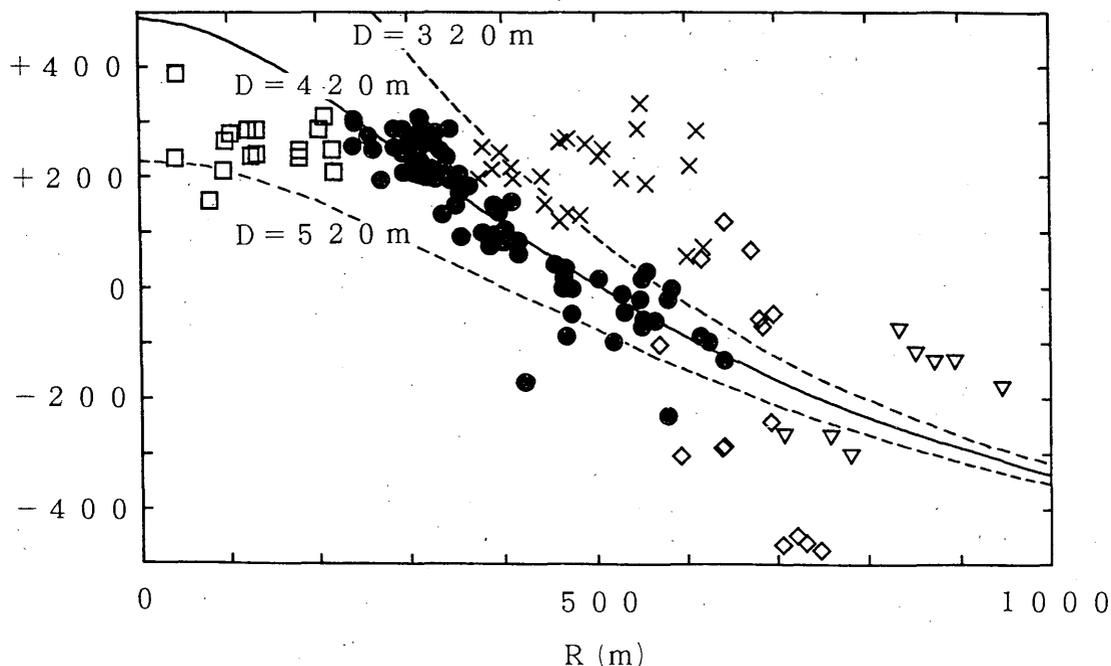


Fig. 9 Distribution of the self-potential  $\phi(R)$  with horizontal distance  $R$  from the center of the lava dome. Self-potential data at each survey point is plotted using the same symbols as are used for Fig. 6. The solid line represents the theoretical curve obtained by equation (3) for a point electric current source depth of 420m. The dashed lines represent theoretical curves for source depths of 320m and 520m.

$-854 \pm 437$ ,  $D = 420\text{m} \pm 100\text{m}$ , SP値の標準偏差は42 mVである。Fig. 9には最適解A, C, Dを(3)式に代入して得られる理論曲線を測定で得られたSP分布とともに示す。深さDの見積もりに使用した火口原内の85測点の平均標高は923mであるから、点電流源は火口原直下の海拔500m付近に存在することになる。今回求められた点電流源の深さは伊豆大島の600m(石戸, 1991)に比べると浅いが、雲仙岳の200m(橋本ほか, 1993)よりは深い。

なお、Fig. 9で北東火口原の測点(十字)が示すSP分布は同じ火口原内の測点(黒丸)のSP分布とは明らかに異なっており、理論曲線からも大きくはずれている。したがって、火口原下420mに置いた点電流源とは別の電流源が北東火口原下に存在すると考えられる。北東火口原のSP正異常の広がりや規模から、極浅い部分に規模の小さい点電流源を置くと定性的に説明できる。北東火口原に分布するこの正異常領域は、苫小牧測候所が現地観測を行っている北東火口原変色域(I)よりもさらに外輪山側へ向かった領域にあたる。しかし、Fig. 8

を見る限り北東火口原の正異常領域には顕著な地熱異常は認められない。この観測事実は、地表まで出現できずに地下に潜在している地熱異常をSP正異常として表現している可能性を示唆するものとして注目される。このことから、火山地域の地熱異常を総合的に把握するためには、航空機からのリモートセンシングを含めた地表面における地熱の直接測定のみならず、SP測定を同時に実施することが重要になると考える。

##### § 5. まとめ

樽前山の熱的状态を把握する目的で火口原を含む広い範囲でSP測定を実施した。その結果、山頂火口原内のドームとその周辺にはSP正異常が存在すること、その正異常は火口原内の地熱分布やドーム上亀裂群の存在と空間的によく一致していること、外輪山東側斜面には地形標高と相関のあるSP負異常が存在することが分かった。また、山頂部にみられるSP正異常や外輪山東側斜面にみられる負異常には1992年から1993年の1年間で大きな時間変化は認められなかった。

今回得られた観測事実から、ドームを中心として火口原内に分布する正異常の主な原因は、ドーム直下に存在する熱水対流による流動電位であると推定された。また、簡単なモデル計算により、SP正異常の電流源の深さ（熱水対流の上昇到達点）を見積もると、火口原下420m（海拔約500m）と求まった。

今回の調査で、樽前山のドーム周辺に見られる地熱活動を把握する上でSP測定は有効な手法のひとつであることが確認できた。今後は、SP正異常分布と火山活動に起因する熱異常の時間的・空間的な対応を確認するために、繰り返し測定を行っていく予定である。

#### 謝 辞

今回の調査を進めるにあたり、北海道大学理学部の西田泰典教授には多くの有益な御助言を頂きました。北海道立地下資源調査所の岡崎紀俊氏には観測器材の準備に便宜を図って頂きました。奈良地方気象台の黒磯章夫氏と査読者には論文を改善する上で極めて有益な御指摘を頂きました。とくに、査読者にはモデル計算の方法について御教示頂きました。編集担当官の気象庁地震火山部藤井幹雄氏には何かとお世話になりました。これらの方々にはここに記して深く感謝致します。

#### 参考文献

- 石戸経士 (1981) : 地熱水対流に伴う流動電位——地熱地域における自然電位異常の1つのメカニズムとして——, 日本地熱学会誌, 3, 87-100.
- 石戸経士 (1991) : 自然電位から推定される火山地域の地下流体流動, CA研究会論文集, 86-93.
- 石戸経士・菊地恒夫・杉原光彦・高倉伸一・矢野雄策・中尾信典・小川康雄・当舎利行 (1992) : 火山活動に伴う地電位変動——伊豆大島の場合——, 地球惑星科学関連学会1992年合同大会共通セッション・シンポジウム予稿集, 374 p.
- 鍵山恒臣・増谷文雄・歌田久司・松尾綱道・清水洋・馬越孝道 (1991) : ELF-VLF MTおよび遠望観測から推定される雲仙火山のマグマ上昇過程, 日本火山学会講演予稿集1991年度秋季大会, 25 p.
- 国土地理院 (1984) : 火山基本図1/5000, 樽前山.
- 佐藤徹・柳沼秀之・志賀透・新谷二郎・中塚征司 (1993) : 樽前山山頂ドームおよび火口原の温度分布, 験震時報, 56, 9-15.
- 西田泰典・松島喜雄 (1991) : 活動的火山における自然電位比較測定, 日本火山学会講演予稿集1991年度秋季大会, 106 p.
- 橋本武志・田中良和・増田秀晴・歌田久司・鍵山恒臣・増谷文雄 (1993) : 自然電位観測から推定される雲仙岳の地下熱水対流, 地球惑星科学関連学会1993年合同大会予稿集, 291 p.
- 渡辺秀文 (1985) : 三宅島の1983年噴火割れ目に伴う自然電位分布異常とその変化, 昭和59年度科学研究費補助金自然災害特別研究(1) 研究成果報告書(研究代表者 岡田弘)「火山体の物理的場の比較研究による噴火災害予測」, 82-83.
- CORWIN, R.F. and D.B. HOOVER (1979) : The Self-potential Method in Geothermal Exploration, Geophysics, 44, 226-245.
- ISHIDO, T. (1989) : Self-potential Generation by Subsurface Water Flow Through Electrokinetic Coupling, Detection of Subsurface Flow Phenomena, Lecture Notes in Earth Sciences, 27, 121-131.