

草津白根山における地磁気全磁力・自然電位観測

小池哲司¹・菅沼一成²・上杉忠孝¹・藤井郁子¹
高橋博¹・池田清³・熊坂信之¹・大川隆志¹
大和田毅¹・徳本哲男¹

1：気象庁地磁気観測所

2：気象庁地震火山部

3：気象庁地磁気観測所鹿屋出張所

Observation of Geomagnetic Total Force and Self-potential at Kusatsu-Shirane Volcano

T.Koike¹, I.Suganuma², T.Uesugi¹, I.Fujii¹
H.Takahashi¹, K.Ikeda³, N.Kumasaka¹, T.Ookawa¹
T.Oowada¹, T.Tokumoto¹

1:Kakioka Magnetic Observatory, JMA

2:Seismological and Volcanological Department, JMA

3:Kanoya Magnetic Observatory, JMA

1. はじめに

草津白根山では、これまで電磁気・地震・重力・GPS・火山ガス・水質・地質など様々な方面から観測と研究が行われ、火山活動の解明が進められてきた。地震の調査からは、火山性地震・微動の震源が水釜下に集中していることが示され、流体やガスの関与が推測されている（井田ほか，1989; Fujita et al., 1995; 及川ほか，1996）。1989～1992年の群発地震時には、湯釜の温度上昇に加えて山頂部での全磁力が顕著に変化し、群発地震の震源域とほぼ一致する場所で熱消磁が起こったと解釈された（山崎ほか，1992）。また、白根山の浅部比抵抗は全般的に低く、特に湯釜・水釜下から北東側にかけて著しい低比抵抗領域があるとされている（桂ほか，1996）。これらに加えて、白根山に多数存在する噴気地帯の性質、火口湖や麓の温泉の性質などから、草津白根山には大規模な熱水系が形成され火山活動と密接に関わっているとする説がある（Ohba et al., 2000; 大場，2001）。

地下の熱的状态や熱水系を解明する有力な手段として、電磁気学的手法が挙げられる。

岩石磁化が温度依存性や圧力依存性を持つことから、火山体内部で温度や圧力が変動すると熱消磁現象や圧磁現象を通じて地表で磁場変動が観測されることがある（Johnston, 1997）。これらの変化は比較的ゆっくりとしたもので、表面現象ではわからない火山体内部の状態を捉えるのに適しており、地磁気観測から火山活動をモニターする試みが多数行われている（例えば Sasai et al., 2002）。一方で、地温により地殻表層部の磁化が変化し、全磁力の局所的な年周変化を生じてい

るとする報告があり (Utada et al., 2000; 小嶋ほか, 1996), 火山性の磁場変化を検出する際のノイズとなる可能性が示唆された。

火山の熱水系の検出には, 自然電位が重要な役割を果たしてきた (例えば Hashimoto et al., 1995)。これは界面動電現象による流動電位を利用したもので, 多くの場合は岩石のゼータ電位が負であるため, 山頂から山麓への定常的な地下水の移動に熱水活動による上昇流が加わり, 山頂で正の電位異常が出現すると考えられてきた。最近になり, 正のゼータ電位を持つ火山の報告 (Hase et al., 2003) や, Rapid Fluid Disruption による電位異常のメカニズムの提唱 (Johnston et al., 2001) など, 火山における自然電位観測は事例の蓄積に伴って新しい展開を見せつつある。

気象庁地磁気観測所では草津白根山の火山活動の解明を目指し, 最近の活動の中心となっている湯釜周辺に注目して, 1976 年から全磁力観測を続けている。当初は繰り返し観測を行っていたが, その後連続観測点を追加し, 現在は 20 点の繰り返し点と 3 点の連続点の観測網を維持している (気象庁地磁気観測所, 2003)。1994 年には, 熱水系の検出を目的として白根山で自然電位観測も行った (山崎ほか, 1997)。

全磁力観測では, 1982 ~ 1983 年の噴火時に小規模な熱消磁と見られる変化を捉え (Ohchi et al., 1987) 前述したように 1989 ~ 1992 年の群発地震時には地下での大規模な熱消磁と見られる変化を検出した (山崎ほか, 1992)。草津白根山の構成岩石は安山岩あるいはデイサイトのため比較的磁化が弱い, 不利な状況下でも熱的な変動を捉えることができることを示した。1992 年以降は顕著な変化はなく静穏に推移しているが, 1995 年ごろにわずかに変化の傾向が変わった可能性もある (気象庁地磁気観測所, 2002)。

自然電位観測では, 湯釜を中心とする山頂部に顕著な電位異常はなく, それまで知られていた多くの活動的火山とは際立った違いを示した。山崎ほか (1997) は, 白根山は全般的に低比抵抗のため電位異常が形成されにくいと推測している。一方, 芳ヶ平の南方面に約 300mV の正の異常が見られ, 原因は不明とされた。

今回の集中総合観測において, 我々は湯釜周辺の火山活動の調査と観測精度の向上を目的として, (1)全磁力繰り返し観測, (2)全磁力と地温の連続観測, (3)自然電位観測, の 3 種類の観測と解析を行った。(1)は白根山の長期的な地磁気変化の傾向を捉えることを目的としたもので, 1976 年以来, 継続してきた観測である。(2)は, 火山性磁場変動の検出精度を上げるため, 草津白根山の連続観測点に見られる局所的な年周変化の原因を突き止めることを目指し, 特に地温との関係に注目したものである。(3)では 1994 年の結果を受けて, 10 年間の変化の有無や, 草津白根山の自然電位分布と熱水系の関係を解明することを目的として, より広範囲な探査を行った。さらに他機関の観測や異なる時期の観測と比較できるようにするために, 一部の測線で代表的な 2 種類の測定方法を並行して行い, 測定方法による違いを検証した。

2. 地磁気全磁力観測

2.1 観測の概要

今回の集中総合観測では, 地磁気全磁力繰り返し観測及び連続観測から最近の火山活動を把握することに加え, 連続観測点に見られる年周変化の原因究明を目的とした, 連続観測点における地中温度の測定並びに磁場傾度測量も行った。第 1 図に地磁気全磁力繰り返し観測点及び連続観

測点の配置を示す．繰り返し観測と磁場傾度測量は，2003年10月6日～9日に実施した．

繰り返し観測点は，白根山山頂部を中心に観測点の増設・見直しにより現在 No.1～21 の 20 点（No.18 は廃止）が設置してある．観測は携帯型プロトン磁力計（G-856，ジオメトリックス社製）を使用して，センサーを地上 2.0m に設置，10 秒間隔で 5 分間の測定を行い，正分を挟む 5 個を平均し，毎分値 5 個を得た．さらに，草津白根山の南方約 60km に位置する東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所の同時刻の全磁力毎分値を引き，5 分間の残差を平均した．

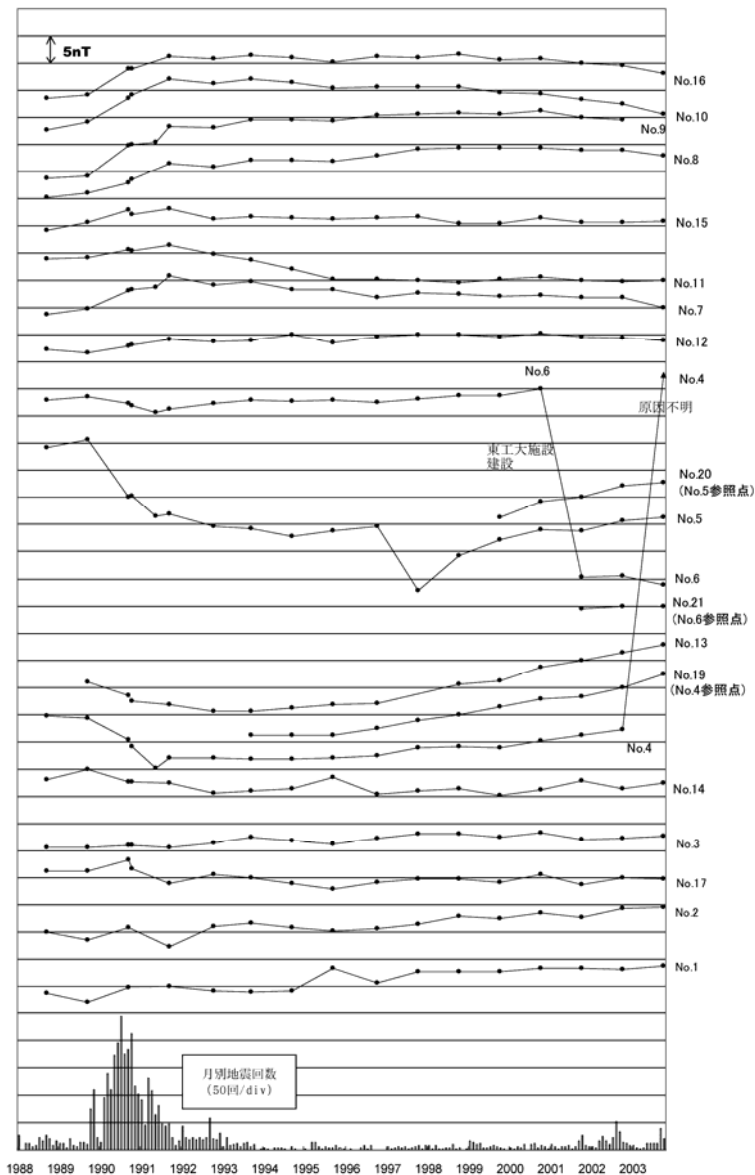


第 1 図 地磁気全磁力繰り返し観測点及び連続観測点の配置図

第 2 図に 1988 年～2003 年までの全磁力繰り返し観測結果を月別地震回数と共に示す．1989 年～1992 年の群発地震活動以降の地磁気全磁力値の変動は，湯釜周辺の南側(観測点 No.4, 13, 19)で漸増，北側(観測点 No.7, 10, 11)で漸減を示しており全体的には緩やかな帯磁傾向にあると考えられる．1996 年ごろを境に観測点 No.13, 19 で増加傾向が顕著となり，No.7, 11 で減少傾向から横ばいとなっている．1996 年 2 月には湯釜火口で小規模な活動があったと推察されている(東京工業大学，1996)．なお，2003 年 10 月に観測点 No.4 の観測値にギャップが見られるが，これは同時期に No.4 に近い連続観測点 P 点で電源トラブルにより計測が停止していることから，観測点近くへ落雷があった可能性が高い．観測点 No.5 の 1997 年の 10 数 nT の変化は地形変化または落雷の影響と思われる．観測点 No.6 に見られる 2001 年の約 35 nT のギャップは，近くに来た構造物によるものである．

連続観測点は，湯釜火口をほぼ南北に挟む P, Q 及び R 点の 3 観測点である(第 1 図)．観測は P 点で 1 分間隔，Q, R 点は電源(太陽電池とバッテリーにより供給)及び記録容量に制約があるため 5 分間隔で計測している．2001 年 10 月からは，Q, R 点の本体部(地表)の温度を，2002 年 10 月からは地中温度を測定するために温度計を本体部，地下 0.5m，地下 1.0m に設置し 30 分間隔で測定を行っている．

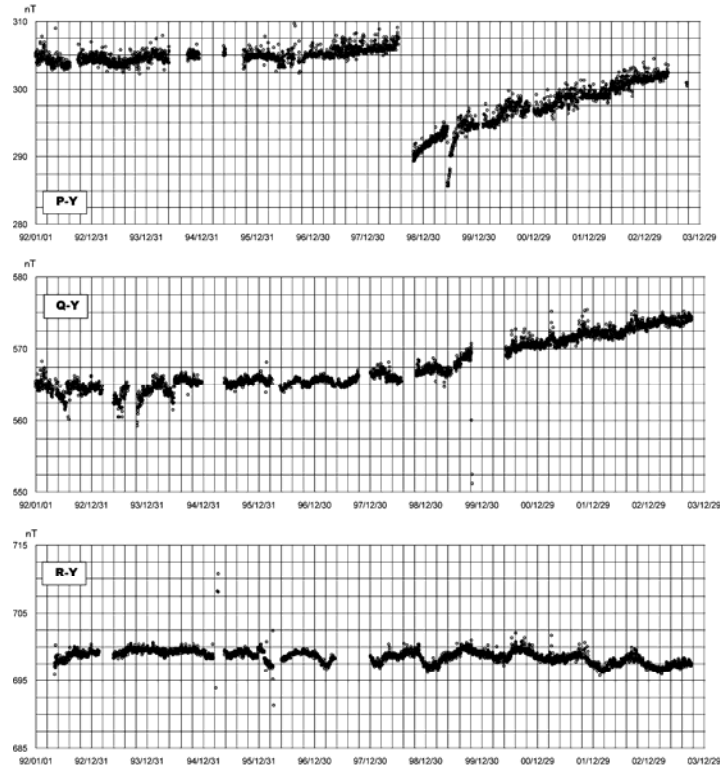
第 3 図に 1992 年からの 3 連続観測点と八ヶ岳地球電磁気観測所の全磁力値との差の日平均値を示す．Q 点では 1997 年頃から増加傾向を，R 点では横ばいあるいはやや減少の傾向を示しており，繰り返し観測の結果と調和的である．図を見ると，P, Q, R 点と八ヶ岳の全磁力差には年周



第 2 図 全磁力繰り返し観測結果と月別地震回数

変化のあることがわかる。しかも，Q と R 点は約 1km と狭い範囲にあるにも関わらず，年周変化の振幅と位相が大きく異なっている。同様の局所的な年周変化は阿蘇山や霧島でも知られており，火山活動による変化と誤解したり，繰り返し観測にとっての誤差となる可能性がある。なお，P 点では 1998 年 7 月～10 月と 1999 年 5 月に落雷によるギャップがあり，1998 年 10 月以降の増加には落雷の影響からの回復変動が含まれていると思われるので以後の解析には使用しなかった。

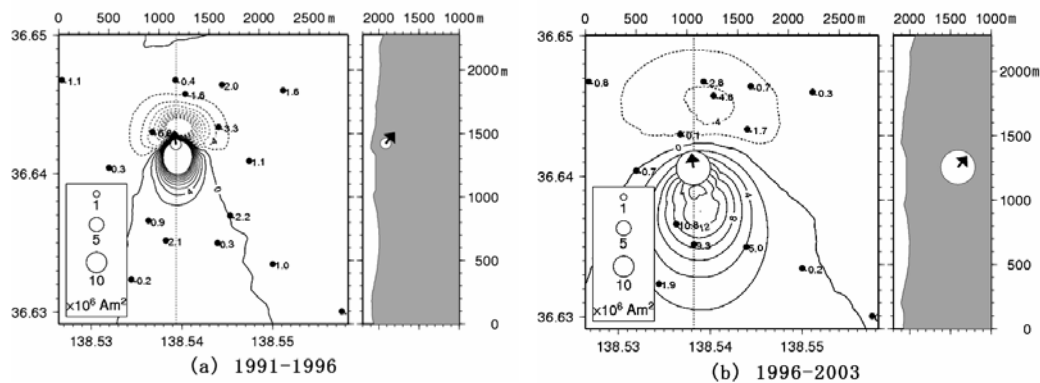
また，Q，R 点では，観測点周辺の磁場環境を調べるため，地上 2m の水平方向の磁場傾度測量を行った。測量範囲は，Q 点をほぼ中心に 12m × 12m の範囲を 1m 間隔のメッシュで 169 点，R 点をほぼ中心に 12m × 10m の範囲を 1m 間隔のメッシュで 143 点である。各点で 2 回測定を行いその平均値からそれぞれの連続観測点のデータを用い自然変化分を除去した。



第 3 図 各全磁力連続観測点と八ヶ岳地球電磁気観測所(Y)の差の日平均値

2.2 データ解析及び結果

1991 年以降の繰り返し観測で得られた各観測点の変化分が、地下の熱活動を反映した消磁 / 帯磁によるものと仮定し、これらの変化を説明する最適な磁気ダイポールの位置と大きさを求めた (第 4 図). 図中白丸の面積は磁気ダイポールの大きさに比例するように表示し、矢印はモーメントの向きを表しているが、周辺の地磁気の方



第 4 図 全磁力繰り返し観測結果より求めた磁気ダイポールの計算結果
(解析には国土地理院発行の「数値地図 10mメッシュ (火山標高)」を使用)

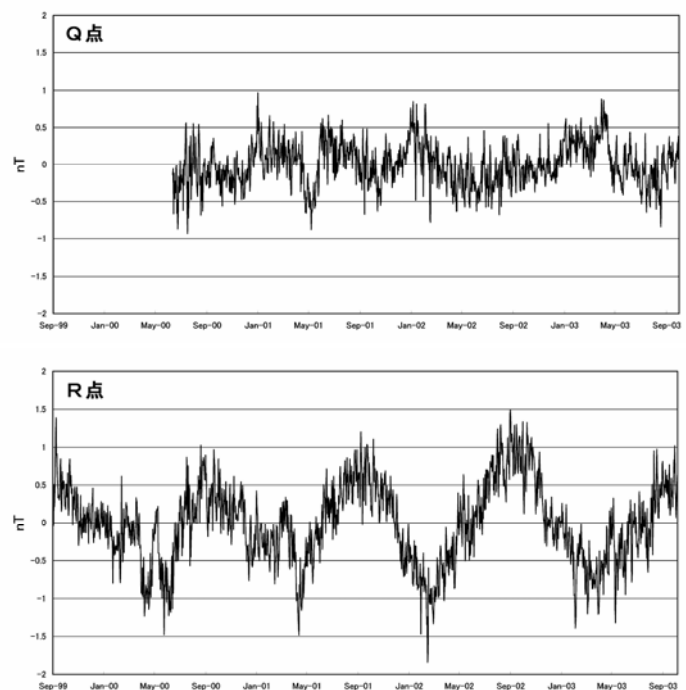
トの向きを表しているが、周辺の地磁気の方

13, 19 の変化傾向が変わった 1996 年を境に, (a)1991 ~ 1996 年までと(b)1996 年 ~ 2003 年までの期間に分け, それぞれの期間の線形トレンドから求めた各観測点の変動量を用いた. (a)では湯釜の東約 300mの地下 100mで $2.9 \times 10^6[\text{Am}^2]$ の帯磁, (b)では湯釜の南南東約 300mの地下約 600mで $2.8 \times 10^7[\text{Am}^2]$ の帯磁と求めた. (a)については, かなり浅いところに磁気ダイポールが求めたが, 観測値とのフィットは悪く計算結果の信頼性は低い. 山崎ほか(1992)は(a)に先行する 1989 年 9 月から 1991 年 9 月までの活動期における全磁力変化に対応した磁気ダイポールが水釜のほぼ直下約 900mで $5.3 \times 10^7[\text{Am}^2]$ の消磁であると推測しており, 今回の結果はほぼ同じ領域で帯磁が進行していることを示している.

次に, 火山活動に伴う変動を抽出するにはノイズとなる連続観測点の年周変化の原因を, 解析手法, 観測点の地中温度, 水平磁場環境の 3 つに分けて検証した.

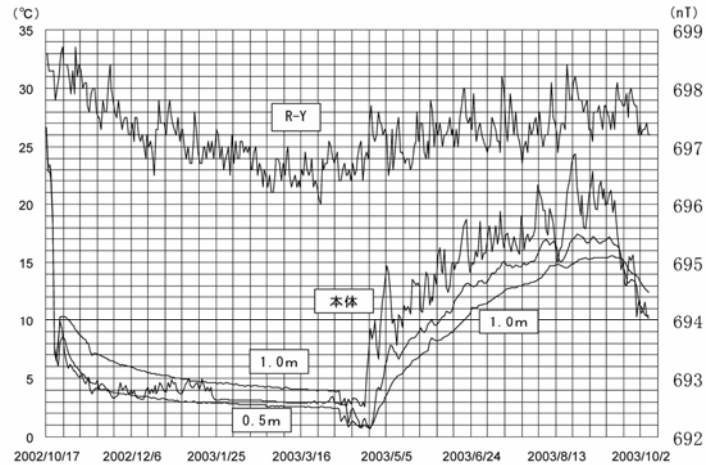
第 3 図は 2 地点の全磁力の単純差であったことから, 年周変化が観測点付近の地殻磁化の違いに伴う見かけ上の差である可能性があった. そこで, 地殻磁化に加え, 2 地点間の変動に振幅差や位相差があっても対応できる確率差分法(藤井, 2004)を使って, 永年変化や電離圏・磁気圏起源の変動など火山活動と関係の無い広域の変動をより良く取り除くことを試みた. 第 5 図に 1999 年 10 月 ~ 2003 年 11 月の Q, R 点の全磁力毎時値から八ヶ岳地球電磁気観測所の全磁力値と柿岡の地磁気 3 成分値(南北, 東西, 鉛直)と関連する成分を取り除いた残差を示す. フィルター係数の算出には Q 点で 2000 年 8 月 ~ 2003 年 7 月を, R 点で 1999 年 8 月 ~ 2003 年 7 月の期間を使用し, 係数値は期間によって変わらないとした. 残差振幅は 1nT 程度で磁気嵐などの短周期成分については除去されているが, 年周変化は第 3 図と同程度に残っている. 従って, Q, R 点の年周変化は解析手法による見かけの変動ではない.

Utada et al.(2000)は, 地温により地殻表層部の磁化が変化し, 全磁力の局所的な年周変化を生じているとの報告をしている. 第 6 図に年周変化の顕著な R 点の地表(本体部), 地下 0.5m, 地下 1.0 mの温度及び全磁力の八ヶ岳地球電磁気観測所との単純差の日平均値を示す. 期間は 2002 年 10 月 ~ 2003 年 10 月までである. 温度変化は, 秋から冬にかけて緩やかに低下し, 完全に雪に覆われた 1 月 ~ 3 月は安定して, 4 月上旬の雪解け後に再び上昇している. 雪に覆われている期間以外の一日の温度変化は, 地表で 10 以上となっていたが地下 1mでは 0.1 以下で, 地温では短周期変化が急速に減衰している. なお, Q 点も同様な変化を示していた. 全磁力変化と比較すると, 全磁力の年周変化はサインカーブ状であ

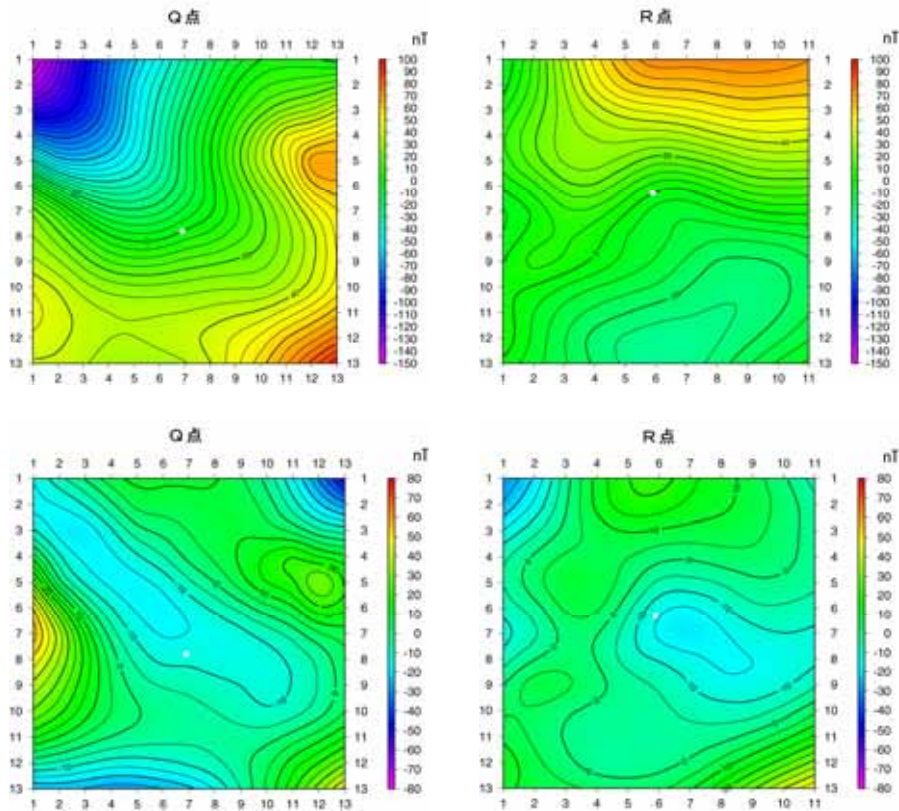


第 5 図 確率差分法を用いた連続観測点 Q, R 点の全磁力変化

るのに対し、温度は冬季では比較的一定で春から秋には大きく変化している．全磁力の年周変化をサインカーブで近似して除去してみたが、残差に夏と冬の差がある変化は見られなかった．また年周変化の大きい R 点について、確率差分法で処理した全磁力と各温度との相関係数を、両者の位相のずれを考慮し温度のデータを-25 日~25 日まで1日ずつずらして求めたところ、位相差 0 日の相関が最も高く 0.6 前後であった．ここで求められた相関係数が、温度と全磁力の年周変化の関係を示したのを見極めるには、さらに外気温やプロトン磁力計検出部温度などの観測データが必要と考える．



第 6 図 連続観測点 R 点の各温度と全磁力の八ヶ岳地球電磁気観測所(Y)との差の日平均値



第 7 図 連続観測点 Q, R 点の地上 2m における水平磁場傾度分布図
(上段が各連続点との差より求めた分布図, 下段が長波長成分を除去した分布図)

最後に、Q、R 点の地上 2 m の水平磁場傾度分布を示す（第 7 図上段）。中央付近の白丸が連続観測点で、連続観測点の値を差し引きコンター間隔を 5 nT で示してある。Q 点は R 点より磁場傾度が大きい。両者の傾向の違いとして、連続観測点を挟み Q 点は北西側でマイナス、南側でプラスの領域となっているのに対し、R 点はこれとはほぼ逆の北側でプラス、南側でマイナスとなっている。これら長波長の変化は地下数 m 以深に原因があると思われる。一方、地下温度変化により地中の磁化強度が変化し、その結果として地表での全磁力に年周変化が起こるとすると、それは地下浅部の影響のほうが強いと考えられる。従ってこれは短波長の変化が重要となる。Q、R 点の磁場傾度分布から長波長成分（一次成分）を除去し、残りの短波長成分を第 7 図下段に示す。Q、R 点周辺の短波長の磁場傾度に大きな違いは無い。

2.3 考察

全磁力繰り返し観測結果（第 2 図）を見ると、1996 年ごろにその変化傾向の変わったのが見える。1996 年を境に磁気ダイポールを計算した結果、(a)1991 年～1996 年と (b)1996 年～2003 年ではどちらも 1989 年～1991 年と磁気ダイポールはほぼ同じ領域に求められた（第 4 図）。しかし (a) は (b) に比べ非常に小さいことからこの期間は地下の熱はほとんど放出されず、1996 年ごろから放熱が開始したと考える。東京工業大学（1996）は、1996 年 2 月に湯釜火口で小規模な活動があったことを推察しており、この頃に地下に蓄熱されていた熱の放出が開始したことが推測できる。1996 年以降の全磁力繰り返し観測は、この地下での放熱（冷却）を示しているものとする。

連続観測点 Q、R で見られる年周変化は、R 点の方が Q 点より振幅が大きく、位相にも差がある。この性質は、八ヶ岳との単純差、八ヶ岳と柿岡を参照した確率差分法の残差においても変わらなかった。そのため、観測点での地殻磁化による見かけの変動ではなく、また、八ヶ岳の全磁力と柿岡の磁場 3 成分と相関がある変動でもないと言える。

Q、R 測点で計測した地温は、夏期はサインカーブ状、冬期は積雪のため変化がほとんどないという特徴的な変化パターンをしており、全磁力の年周変化のサインカーブ状の変化パターンと食い違っている。また、観測点周辺の短波長の磁気異常は Q、R 点で差がない。これらから、Utada et al.（2000）が提案した地温による地殻表層部の磁化の変化では、容易に Q、R 点の年周変化は説明できない。

年周変化の原因について残る可能性は、積雪の影響を受けない気温あるいはプロトン磁力計検出部の温度変化、柿岡と八ヶ岳の外部磁場起源の年周変化の差、などが考えられる。

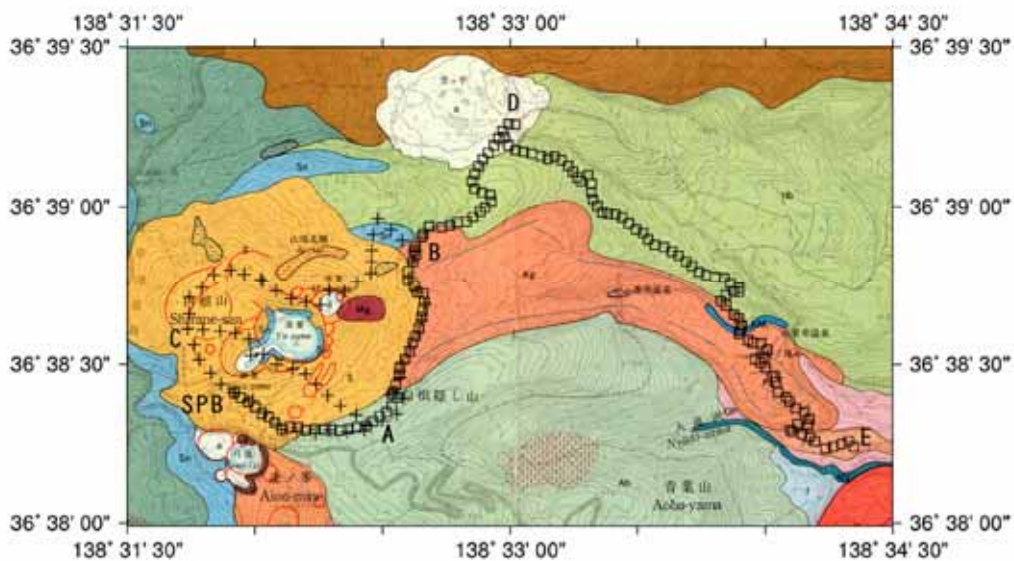
3．自然電位観測

3.1 観測の概要

今回の観測の目的は 湯釜、水釜を含む白根山山頂部の熱水系の現在の状態を知ること、1994 年の測定結果（山崎ほか、1997）と比較し 10 年間の電位分布の変化を見ること、 探査範囲を広げるため芳ヶ平ヒュッテから草津市街に至る登山道沿いの電位分布を明らかにすることである。

これらの目的のため、2003 年 10 月 7 日～9 日に 3 つの測線で自然電位観測を行った。第 8 図に測定場所を示す。測定点は地質図（地質調査所、1983）に重ねて表示している。図中の SPB は、今回の集中総合観測で自然電位観測を行った参加機関（東京工業大学、北海道大学）のデー

夕を接続するために設けた共通基準点である．また，A～C は当所の全磁力繰り返し観測点が近傍にある点で，1994 年の観測ルートを特定する点でもある．



第 8 図 自然電位測定点地図（+が尺取法， が全電位法）
 （地質調査所（1983）草津白根山火山地質図に表示，背景の色は地質を示す）

目的の ， として，SPB から A，B，C を経て SPB に戻る閉のルートと，C から湯釜と酒釜の間を通り A に至るルートで測定を実施した（第 8 図の+）．測定点の総数はそれぞれ 55 点と 15 点である．これらは山崎ほか（1997）の Line1 の一部と Line2 及び Line3 にあたる．測定方法は 1994 年と同様，非分極性電極である銅・硫酸銅電極のペアを交互に移動させる尺取法で，測定スパンは概ね 100m，電位測定には高入力抵抗のデジタルテスターを用いた．各測定点では，表土を除いた約 1m 間隔の 3 ケ所で測定を行い，平均値をその点の測定値とした．3 ケ所の測定値が大きくばらついた場合には測定回数を増やして，異常値を取り除くようにした．また，各測線で最初と最後に銅・硫酸銅電極ペアのオフセットを測定し，線形補間を用いて観測値を補正した．

目的の については，SPB から A，B，D（芳ヶ平ヒュッテ）を経て大沢川とほぼ平行にある登山道沿いに下った E までのルート（第 8 図の ）で測定を行った．測定点の総数は 145 点である．この測線では，将来的に他機関が観測した結果と合わせて草津白根山の広域的な自然電位分布を求められるようにすることを考慮して，多くの機関で使われている全電位法を採用し，銅・硫酸銅電極のペアを用いた．基準電極は温度変化による測定誤差を避けるため 20cm ほど埋設し，移動電極を 50m 毎に 0 m～500m まで移動させて，尺取法と同様，各測定点で原則として 3 ケ所の測定を行い異常値を取り除いた平均値を測定値とした．電極ペアのオフセットは 500m ごとに測定し，線形補間を用いて観測値を補正した．また，SPB から B までは約 1 時間後に尺取法による測定をほぼ同じルートに辿って行っており，2 手法の観測結果を比較してデータを接続できるようにした．

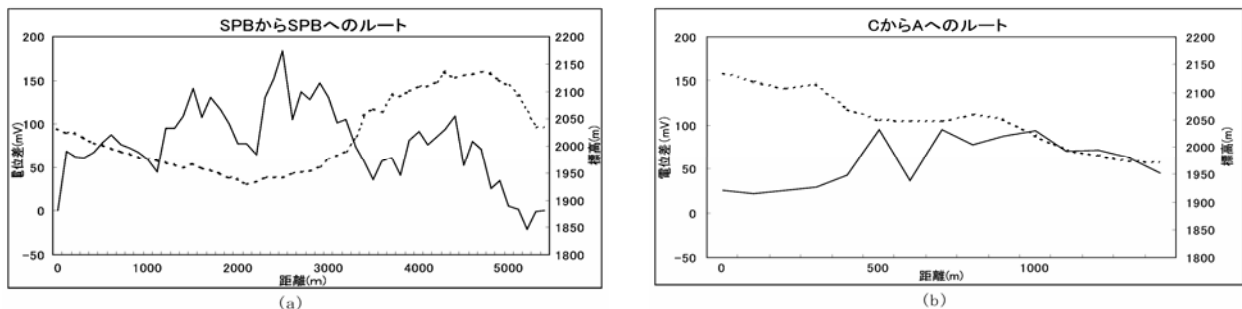
各測定点の緯度・経度は携帯型 GPS 受信機で測定し，標高は測定した緯度・経度から国土地理院発行の「数値地図 10m メッシュ（火山標高）」を用いて求めた．

なお、測定を実施した3日間及び前日の天気は、曇りまたは晴れで雨は降らなかった。

3.2 データ解析及び結果

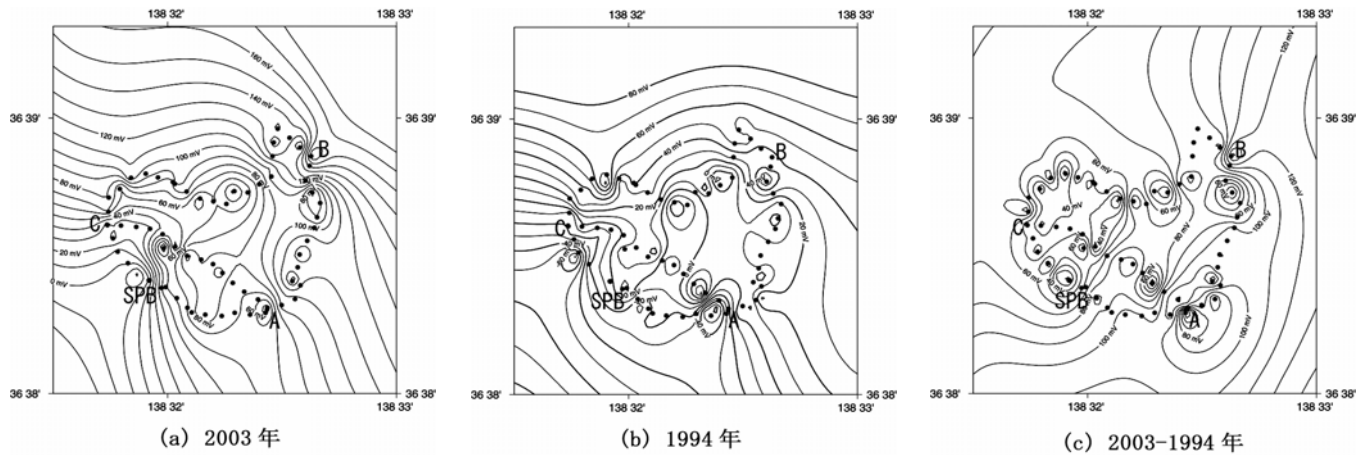
各測定点での異常値の除去は、以下のように行った。まず、尺取法と全電位法の全測定点において、それぞれ3個以上の測定値の平均値を求め、平均値と測定値の残差を求めた。次に、全体の残差の標準偏差 2.84mV を算出し、残差が正規分布に従うと仮定して標準偏差の99%信頼限界を推定したところ 7.3mV となった。そこで、残差振幅が 7.3mV を超えるものを異常値として除去し、平均値を再度計算した。異常値の数は、尺取法で1個(総数 266 個)、全電位法で8個(総数 522 個)であった。

第9図に(a)SPBからA、B、Cを経てSPBに戻る閉のルートと(b)Cから湯釜と涵釜の間を通りAに至るルートについて、尺取法で測定したSPBを基準とした電位を示す(実線)。SPBからSPBに戻る閉の測線ルートであれば、一周した前後のSPBでの測定値は同じになるはずだが、今回の測定では-78mVの違いが出た。この違いは電極設置のずれや電極電位の不安定性などによる測定誤差として扱い、SPBでの測定値が0になるように-78mVを均等に各測定点へ補正してある。Cから湯釜と涵釜の間を通りAに至るルートでは、SPBからSPBに戻る閉のルートで得られた補正後の測定値が正しいとして、CとAの電位をこれにあわせる補正を行った。標高(破線)と電位の関係では明瞭な地形効果が見られなかったことから、その補正は行っていない。



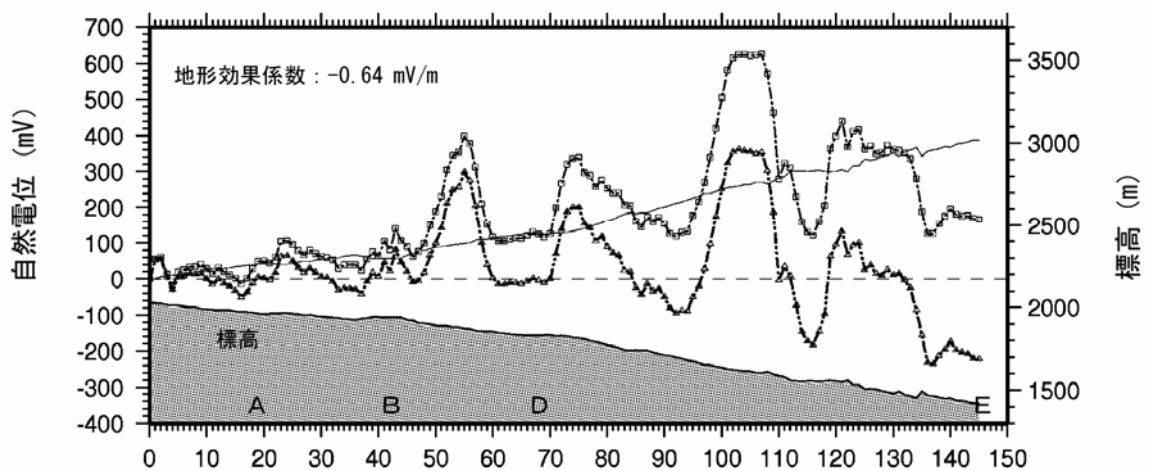
第9図 白根山山頂付近の自然電位測定結果(実線が電位差 mV, 破線が標高 m)

2つの測線の結果から推定した白根山山頂部付近の電位分布を第10図(a)に示す。コンター間隔は10mVである。分布図を見ると全て正の電位となっており、北または北東部に行くにつれて正の電位が高くなっている。また涵釜付近の電位勾配が強いのが見られる。湯釜、水釜付近には特に電位の異常は見られない。湯釜の北東部の噴気地帯で周囲より40~50mV高くなっている。今回の結果と1994年の結果を比較するため、1994年の測定値から今回とほぼ同じ地点で測定された測定値を抜き出し、これを今回の基準点であるSPBに置き直した電位分布を第10図(b)に、また今回と1994年の差(a-b)を第10図(c)に示す。1994年の電位分布を見ると涵釜、湯釜、水釜付近には電位の異常は見られず、A及びC付近に周囲よりも-50~-70mV低い負の異常が見られる。これについて山崎ほか(1997)は、地形との因果関係も薄く、異常の理由がわからないとしている。2003年と1994年の差の電位分布を見ると、全ての地域で電位は増加している。これは2003年の測定結果が全てSPBに対して正の電位であるためと考える。1994年の測定に比べ電位勾配が強くなったところは、A付近、涵釜付近及びB付近で、正の電位勾配が強くなっている。湯釜、水釜付近では、電位勾配に大きな変化は無い。



第 10 図 白根山山頂付近の自然電位分布図

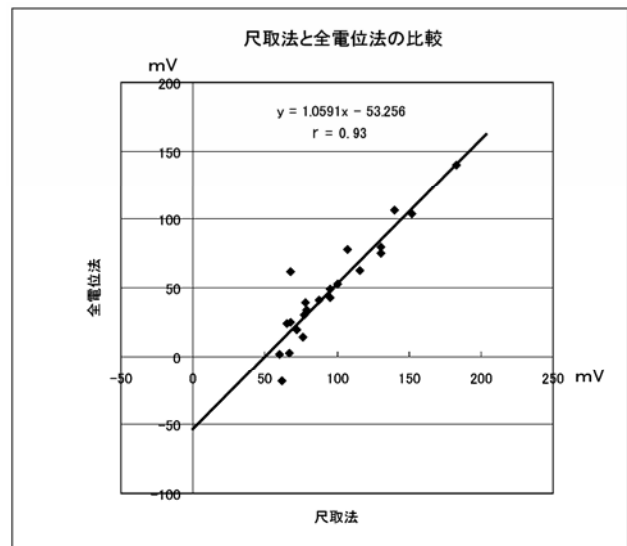
次に、SPB から A、B、D（芳ヶ平ヒュッテ）を経て大沢川とほぼ平行にある登山道沿いに下った E までのルートの測定結果を第 11 図に示す。SPB を基準とした電位 () は SPB～B（測点 0～44）では標高（網掛）と概ね負相関しながら推移するが、B～E では標高とは関係のない変動が見られる。変動の振幅を求めるため、電位と標高の相関が良い SPB～B までの区間から地形効果の係数を求めた。計算は測線の起点から 1 測点ずつ電位と標高の値を増やしていき、それぞれの場合の地形効果の係数と誤差を求め、誤差が極小値となるときにの係数を採用した。その結果 -0.64mV/m となった。この係数を用いて地形効果を補正した結果が である。大きな電位異常は B 以降に集中しており、 100mV 以上の正の異常となっている測定点は、 $46\sim 60(+300\text{mV})$ 、 $70\sim 84(+220\text{mV})$ 、 $94\sim 110(+360\text{mV})$ 及び $119\sim 132(+140\text{mV})$ で、負の異常は $112\sim 118(-180\text{mV})$ と $132\sim 145(-230\text{mV})$ である。この内、測点 $46\sim 60$ で見られる $+300\text{mV}$ の正の異常は、山崎ほか（1997）が報告した芳ヶ平付近の $+300\text{mV}$ を超える正の異常と同じ場所である。その他の異常は、今回初めて測定を行った地域にある。



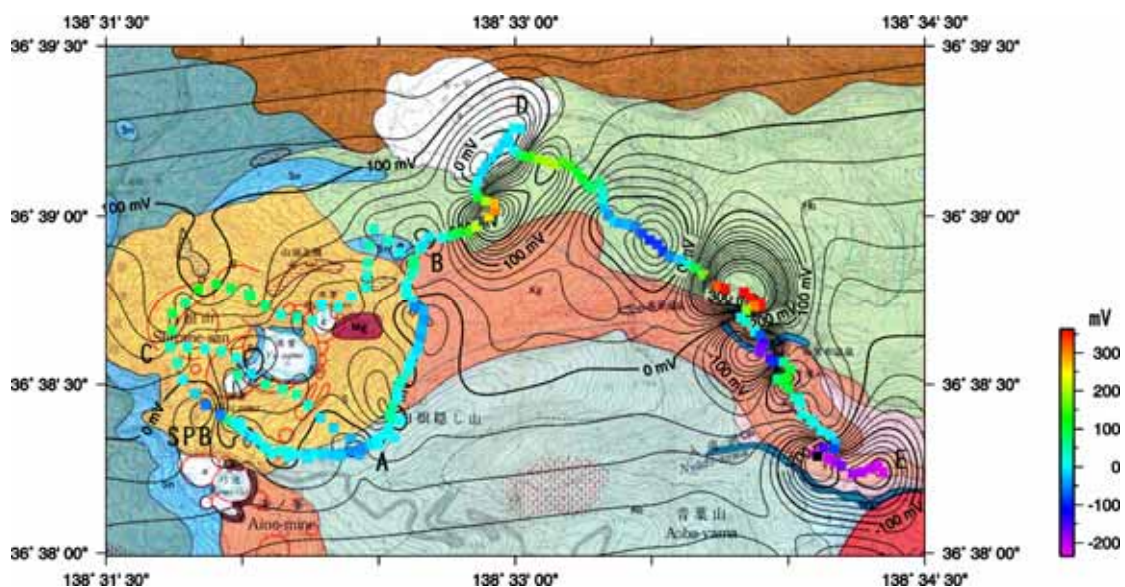
第 11 図 全電位法による測定点 SPB から E までの結果

(が測定結果，実線が各測定点における地形効果補正量， が地形効果補正後)

今回実施した尺取法及び全電位法の測定値を用い、広範囲の電位分布を見ることにした。そのため尺取法と全電位法による測定値を同列に扱うことができるかを確認した。SPB～Bまでの測線で、尺取法と全電位法の測定値を比較した(第12図)。ただし、全電位法と尺取法の測定スパンがそれぞれ50mと100mなので、両測定法で同じ測定点のデータを抽出して、尺取法の値に対する全電位法の値をプロットした。両データとも地形効果の補正は行っていない。2手法の電位分布を直線近似すると(実線)、相関係数は0.93となり両者は概ね比例関係にあることがわかる。ただし、尺取法の測定値は全電位法より大きく、両者間には-53mVのオフセットがある。第12図で尺取法と全電位法の値が大きく異なっている測定点は主に第11図の測点番号4～18に相当している。尺取法ではSPBに対して全て正電位であることも考えあわせると、オフセットは手法の違いを表すというよりも尺取法の特定の区間の違いを示しているのかもしれない。



第12図の結果を踏まえ、-53mVのオフセット分だけ尺取法による測定値を補正し、全電位法の測定値とあわせて広域的な電位分布図を作成した(第13図)。地形効果は、全電位法で求めた地形効果係数(-0.64mV/m)を使って補正した。第13図では、20mV間隔の電位差コンターを地質図(地質調査所、1983)に重ねて表示している。湯釜、水釜を含む白根火砕丘には100mVを超える大きな電位異常は見られず、北東から東側の平兵衛溶岩や香草溶岩地域に顕著な異常が見られることがわかる。



第13図 草津白根山の自然電位分布図(地形効果補正済み)
(地質調査所(1983)草津白根山火山地質図に表示、背景の色は地質を示す)

3.3 考察

前節までの結果から今回の探査地域の電位分布の特徴は、(1)火山活動の盛んな山頂部では大きな電位異常がなく、表面活動のない北東部や東部で大きな異常があらわれる、(2)北東部と東部の大きな異常は地質と関係あるものと関係ないものに分けられ、顕著な正の異常は地質境界から離れている、の2点が挙げられる。

第1の点は山崎ほか(1997)と調和的であり、1994年と2003年で同傾向であるということから、この地域の基本的な特徴であることが推測される。山頂部に熱水や噴気地帯が存在しないと考えるべく、物性的な要因のため山頂部では電位異常が検出しにくいのだと思われる。

自然電位のパラメータにはゼータ電位や比抵抗がある。ゼータ電位については、地形効果係数が -0.64mV/m であることから、探査地域では負の値と考えられる。一般にpHが小さいとゼータ電位が小さくなるが(Ishido and Mizutani, 1981)、草津白根山一帯は水質が強酸性で湯釜が $\text{pH} = 1.1$ 、D~Eの登山道沿いの香草温泉と常布温泉がそれぞれ $\text{pH} = 1.5$ 、と3.6、大沢川が $\text{pH} = 3.0$ といずれも強酸性を示すため(地質調査所, 1983)、強酸性であることだけで地域による電位の違いを説明することは難しい。Ohba et al. (2000)によれば、水質からみて湯釜、香草温泉、常布温泉の温泉水は共通の供給源を持つが、仮に山頂部から東側の温泉への流路があるとする、下流ほど天水の混入などで徐々にpHが上がりゼータ電位が高くなる可能性はある。いずれにせよ、確認するためには測線沿いのゼータ電位やpHの測定が必要である。

一方、比抵抗に注目すると、全体が低比抵抗(10 m以下)で、やや高めの比抵抗(数100 m)を示すのは本白根山付近であるが、それも深部になると10 m以下と低くなる(桂ほか, 1996)。一般には低比抵抗ほど電位が生じにくいので、火山礫や火山灰など低比抵抗物質が分厚く積もった山頂部では、地下に熱水活動による電流源が存在しても地表では検出しにくいことが推測される。北東部では、溶岩に覆われてやや高比抵抗であることに加えて、極端な低比抵抗帯(1 m以下)が山頂部に比べて浅いという報告もあり(桂ほか, 1996)、地表で異常電位を観測しやすい可能性がある。

第2の点に関して、地質境界と電位の変化が重なっているのは、芳ヶ平ヒュッテ付近の沖積層における0電位、香草泥流での -180mV の負の異常、入道沢付近の -230mV の負の異常である。地質境界と関係のない異常は平兵衛溶岩地帯に見られ、芳ヶ平ヒュッテの南約500mを中心とした $+300\text{mV}$ の正の異常、芳ヶ平ヒュッテの東側の $+220\text{mV}$ の正の異常、香草温泉の約600m東にある $+360\text{mV}$ の正の異常が主なものである。この内、芳ヶ平の沖積層を挟んだ2つの正異常は一続きのものと思われる。

表層地質と関連のない正の異常は、今回得られた電位分布の中でも顕著なものであるが、原因を特定するには至っていない。芳ヶ平周辺の異常は、地形的には笹やぶに覆われた平坦な尾根にあり、周囲に噴気は無い。今回、東側の登山道まで探査範囲を広げたことで、異常域が山崎ほか(1997)の推測よりも東まで広がっていることがわかった。熱的活動や桂ほか(1996)が指摘した極端な低比抵抗帯との関連について、詳細な比抵抗構造探査や磁気探査が有効と思われる。

香草温泉の約600m東にある正の異常は、振幅の大きさに加えて、数百mのうちに急激に電位が変わっており、浅いところに原因があると推測される。この周辺の地形は笹やぶに覆われた下り坂で、周囲には噴気などは見あたらなかった。

4. 結論

今回当所が実施した地磁気全磁力，自然電位観測の結果は以下のとおりである．

- (1)1989年9月から1991年9月までの火山活動期に消磁した位置とほぼ同じ領域で，1991年以降徐々に帯磁（冷却）（第4図）が進行している．
- (2)1996年2月に湯釜火口で小規模な活動があったと推察された時期に全磁力の変化傾向が変わったと推察される．
- (3)連続観測点R点で見られる年周変化の原因は，観測点周辺磁場環境や地中温度の変化からは説明できなかった．
- (4)今回も白根山山頂部には正の電位異常が見られず，1994年と同傾向であるということから，この地域の基本的な特徴であることが推測される．
- (5)芳ヶ平ヒュッテから草津温泉へ下る登山道沿いの自然電位は，正負の電位異常域のあることがわかった．同領域の比抵抗構造探査や磁気探査との比較が必要である．

謝辞

地磁気全磁力観測にあたっては，東京工業大学草津白根火山観測所のテレメータ施設の利用及び測定データの送付等でお世話になり，厚く感謝します．東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所には快くデータ提供をしていただいております，お礼申し上げます．

また自然電位の観測方法について，東京工業大学小川教授及び北海道大学橋本助教授にご指導をいただいたことを申し添えます．

引用文献

地質調査所（1983）草津白根火山地質図．

藤井郁子（2004）確率差分法を用いた火山性全磁力変動の抽出手法．地磁気観測所テクニカルレポート，2，1，1-15．

Fujita, E., Y. Ida, and J. Oikawa (1995) Eigen oscillation of a fluid sphere and source mechanism of harmonic volcanic tremor. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 69, 365-378.

Hase, H., T. Ishido, S. Takakura, K. Sato, and Y. Tanaka (2003) z-potential measurement of volcanic rocks from Aso caldera. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 2210, doi:10.1029/2003GL018694.

Hashimoto, T., and Y. Tanaka (1995) A large self-potential anomaly on Unzen volcano, Shimabara peninsula, Kyushu island, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 191-194.

井田喜明・長田昇・沢田宗久・小山悦郎・鍵山恒臣（1989）地震研究所彙報，64，325-345．

Johnston, M. J. S. (1997) Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity. *Surv. Geophys.*, 18, 441-475.

Johnston, M. J. S., J.D. Byerlee, and D. Lockner (2001) Rapid fluid disruption: A source for self-potential anomalies on volcanoes. *J. Geophys. Res.*, 106, 4327-4335.

桂郁雄・川東慶子・Djedi S. Widarto・西村進・茂木透・下泉政志・西田潤一・楠建一郎・鈴木浩一・藤光康宏・城森明・山本哲也・山崎明・田口陽介（1996）草津白根山でのCSMTおよびTDEM探査．第3回草津白根山の集中総合観測報告書，61-72，1996．

- 気象庁地磁気観測所 (2002) 火山噴火予知連絡会会報, 79, 82-84 .
- 気象庁地磁気観測所 (2003) 火山噴火予知連絡会会報, 84, 3-7 .
- Ohba, T., J. Hirabayashi, and K. Nogami (2000) D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of water in the crater lake at Kusatsu-Shirane volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 97, 329-346.
- 大場武 (2001) 草津白根山の火山熱水系 . 京都大学防災研究所研究集会報告書「火山の浅部構造と火山流体」, 161-168 .
- Ohchi, K. (1987) Observation of the geomagnetic total force at Kusatsu-Shirane Volcano. *Mem. Kakioka Mag. Obs.*, 22, 1-9.
- 及川純・井田喜明・行田紀也・辻浩・長田昇・山本圭吾・藤田英輔・羽生毅・山岡耕春・奥田隆志・金島聡 (1996) 草津白根山における火山性地震・微動の稠密観測 . 第3回草津白根山の集中総合観測報告書, 13-26 .
- 小嶋美都子・大和田毅・外谷健 (1996) 火山地帯における地磁気地点差の季節変動の原因についての一考察 . 地磁気観測所技術報告, 35, 64-76 .
- Sasai, Y., M. Uyeshima, J. Zlotnicki, H. Utada, T. Kagiya, T. Hashimoto, Y. Takahashi (2002) Magnetic and electric field observations during the 2000 activity of Miyake-jima volcano, Central Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 203, 769-777.
- 東京工業大学 (1996) 火山噴火予知連絡会会報, 65, 29-32 .
- Utada, H., M. Neki, and T. Kagiya (2000) A study of annual variations in the geomagnetic total intensity with special attention to detecting volcanomagnetic signals. *Earth Planets Space*, 52, 91-103.
- 山崎明・熊坂信之・上田義浩 (1997) 草津白根山における自然電位測定 . 地磁気観測所技術報告, 36, 22-32 .
- 山崎明・中禮正明・角村悟・中島新三郎 (1992) 草津白根山における全磁力変化の解析 : 1990年の顕著な全磁力変化と熱消磁モデル . 地磁気観測所要報, 24, 2, 53-66 .