

ロングバレーカルデラ地域の地磁気全磁力差に見られる年周変化について

橋本武志^{*}・田中良和^{**}・Malcolm J. S. Johnston^{***}
宇津木充^{**}・笹井洋一^{****}・坂中伸也^{*****}

^{*}北海道大学大学院理学研究科 ^{**}京都大学大学院理学研究科 ^{***}米国地質調査所
^{****}東京都総務局 ^{*****}秋田大学工学資源学部

要 旨

米国ロングバレーカルデラにおいて 1999 年から 2001 年にかけて地磁気全磁力の連続観測を実施した。観測された全磁力単純差には顕著な年周変化が認められた。原因として、地下数 m 程度の地中温度変化に伴う岩石の磁化変化が有力であることが明らかにされ、1 次元熱拡散モデルに基づいて補正を行った。更に、地磁気 3 成分を用いた外部起源擾乱の補正を行い、地殻活動起源の異常磁場変動の検出を試みた。

キーワード: 地磁気, ロングバレーカルデラ, 温度, 年周変化

1. はじめに

ロングバレーカルデラ(LVC)は合衆国カリフォルニア中東部にあるシエラネバダ山地の東端、モノ湖の南約 20 km、オウエンズ谷の北端に位置する。周辺地域は過去 300 万年にわたる火山活動で形成されているが、南北 17 km、東西 32 km の長円形のカルデラ形成は 76 万年前とされている。近年の噴火は 500-600 年前に、モノ湖から LVC 西端に至る火口列群で発生している。LVC では 1970 年前半に地質、地球物理、地球化学、水文的な研究が数多くなされ、高温岩体地熱発電も行われている。合衆国地質調査所(USGS)では、従来より地殻・火山活動に伴う地磁気変化を検出すべく、カリフォルニア州の 13 地点にプロトン磁力計を設置して常時観測を行っており、この中の 3 台が LVC に置かれていた。1980 年 5 月には LVC 南部で 4 回の M6 を超える群発地震が発生し、中央火口丘(再生ドーム)の隆起が観測され、マグマ活動に起因することが指摘された。1989 年には LVC での地殻変動が加速されたが 2000 年の時点では停滞している。Mueller et al. (1991) と Mueller and Johnston (1998) は 1990 年前後の

地殻変動の高まりに対応して若干の磁場変化を提示し、高密度磁場観測の必要性を提唱した。1998 年から 3 年間、日米科学協力事業により USGS との共同で、Table 1 に示す LVC の 10 地点 11 観測点にプロトン磁力計を設置した(観測点 PLV にはごく近接した場所にもうひとつの磁気点 PL2 がある)。また、2001 年から 3 年間、「火山活動に伴う電磁場の発生機構—阿蘇とロングバレーの比較研究—」と題しての共同研究が認められ、磁場観測や自然電位測定を行っている。

観測期間中の特筆すべき地震は 1999 年 10 月 16 日 9 時 46 分(UT)に発生した Hector Mine (34.6°N, 116.3°W, Mw=7.1) 地震である。このイベントに関連すると思われる磁場変化として直ちに識別できるものは見られないうが、断層運動に伴う応力磁気効果は理論上も比較的小さいことが予想されるので、注意深い解析を必要とする。この場合、単純に 2 地点の全磁力差を求めるだけでは不十分で、磁場変化の成分依存性、local な電磁誘導効果なども考慮する必要がある。加えて、地表に分布する溶岩や軽石、火山砕屑物の温度変化に至るまで洞察を深める必要がある。

第 1 段階として、全磁力の日平均値について観測地

点相互の差を求めたところ、明瞭な年周変化の存在が明らかになった。全磁力差に年周的な変化の存在する

ことは既に日本でも知られていて、桜島南部の古里、

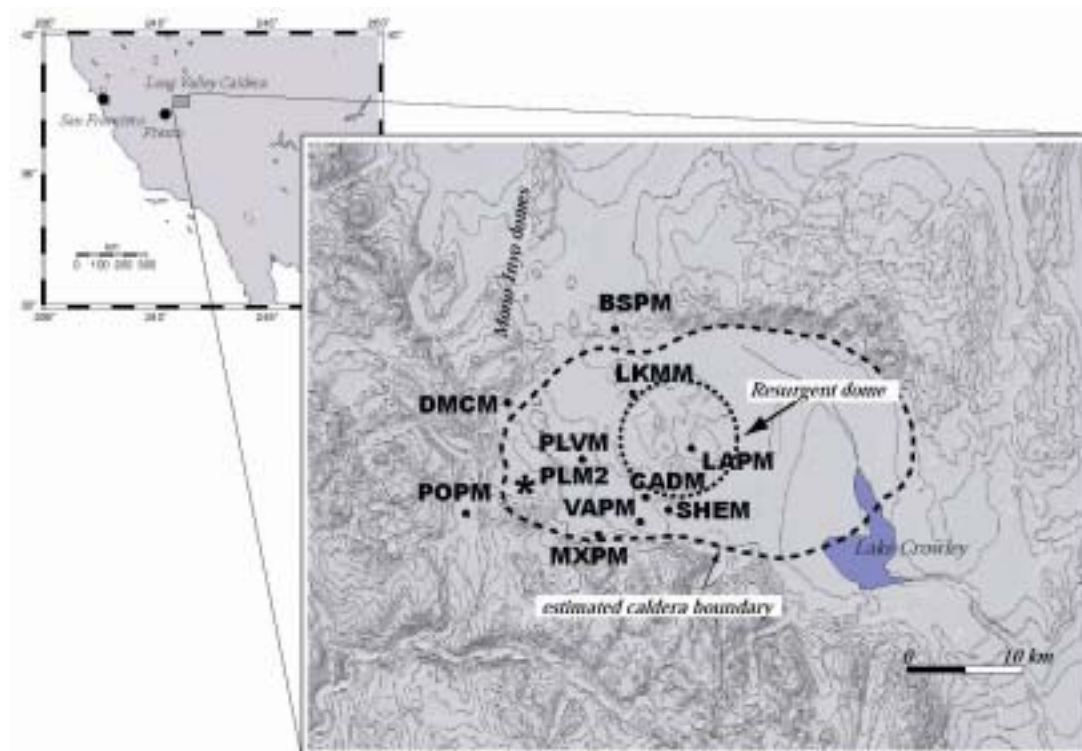


Fig. 1 Topography of Long Valley Caldera and locations of geomagnetic stations. Broken line indicates a geologically-estimated caldera boundary.

Table 1 Latitudes, longitudes and altitudes of the magnetic stations shown in figure 1. Coordinating system is WGS84.

Station Name	Site Name	Latitude	Longitude	altitude (m)
BSPM	Big Springs	N37°45'40.2"	W118°56'40.0"	2254
CADM	Casa Diablo	N37°38'37.4"	W118°55'02.1"	2247
DMCM	Dead man's Creek	N37°42'35.1"	W119°02'31.4"	2523
LAPM	Little Antelope	N37°40'39.7"	W118°52'30.6"	2227
LKMM	Lookout Mountain	N37°42'59.4"	W118°55'43.1"	2254
MXPM	Motocross	N37°37'02.7"	W118°57'35.2"	2509
PLVM, PLM2	Philips	N37°40'12.6"	W118°58'29.9"	2598
POPM	Devils Post Pile	N37°37'56.4"	W119°04'46.9"	2338
SDEM	Sherwin	N37°38'06.5"	W118°53'46.8"	2193
VAPM	Valentine	N37°37'36.8"	W118°55'19.7"	2273

阿蘇の杵島岳等に報告がある。Utada et al. (2000) は、霧島新燃岳と伊豆大島での例をもとに、こうした年周変化の原因が地表近くの火山岩の誘導磁化や残留磁化の温度特性によることを指摘している。

本稿では、我々のLVCでの磁場観測をレビューすると共に、1次元熱拡散モデルに基づく年周変化の除去と地磁気3成分補正を試み、観測期間内の異常変化の有無について検討する。

2. 観測結果

1999年1月から2001年の9月までの期間について、観測点LKMを基準とした各観測点の日平均値(毎10分サンプリング)の単純差をFig. 1にプロットした。観測点CAD, MTX, DMCについては、1年以上の連続データが取得できていないのでここでは取り扱わない。年周変化には観測点毎に振幅の違いが認められ、およそ0.5~2.5 nTの範囲にある (Table 2)。また、年周変化

の位相には、冬期に極大を示す観測点 (SHE, VAN, POP, PL2) と、冬期に極小を示す観測点 (PLV, BSP, LAP) があり、観測点毎に位相が若干異なっていることが見て取れる。

一般に、数 10 km 程度までの距離にある 2 地点間の全磁力単純差の変動 $\Delta F(t)$ は、以下のような成分の和として表現できる。

$$\Delta F(t) = \Delta F_L(t) + \Delta F_T(t) + \Delta F_R(t) \quad (1)$$

ここで、 ΔF_L は、火山噴火や断層運動などの地殻活動に起因する local な変動、 ΔF_T は日照や降雨などによる地表面にごく近いところの温度変化に起因する成分、 ΔF_R は、ここで考えている 2 地点に対しては一樣と見做せる regional な磁場変動 (地球外部起源磁場や永年

変動など) に関連する成分である。各成分の物理的根拠は次のとおりである。

ΔF_L : 火山活動等による局所的な温度異常に伴う岩石の熱消帯磁現象 (e.g. Tanaka, 1993)。応力集中に伴うピエゾ磁気効果 (e.g. Sasai, 1991)。磁化物体の移動・化学変化など。

ΔF_T : 地中温度の日変化・年周変化に伴う岩石の熱消帯磁 (Utada et al., 2000)。観測装置の温度特性。

ΔF_R : 伏角および偏角の異なる 2 地点に、一樣な磁場変動が重畳した場合に全磁力に対する影響が異なる効果 (Tanaka et al., 1978; Davis et al., 1979)。

本稿の主旨は、この地域における ΔF_L を検出するために、 ΔF_T および ΔF_R を除去することにある。

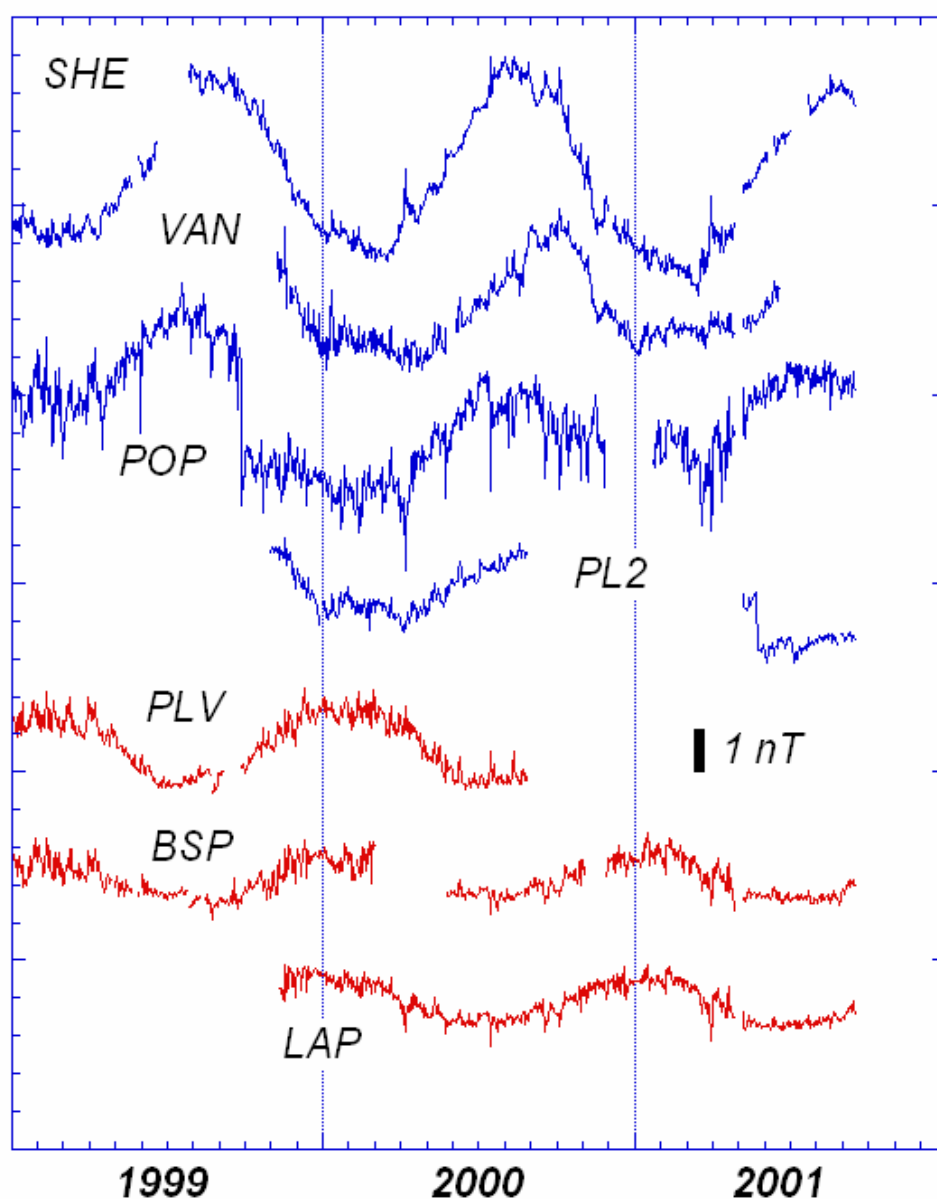


Fig. 2 Variations of geomagnetic difference in total force referred to LKM. Daily values averaged over 10-min sampling data are plotted.

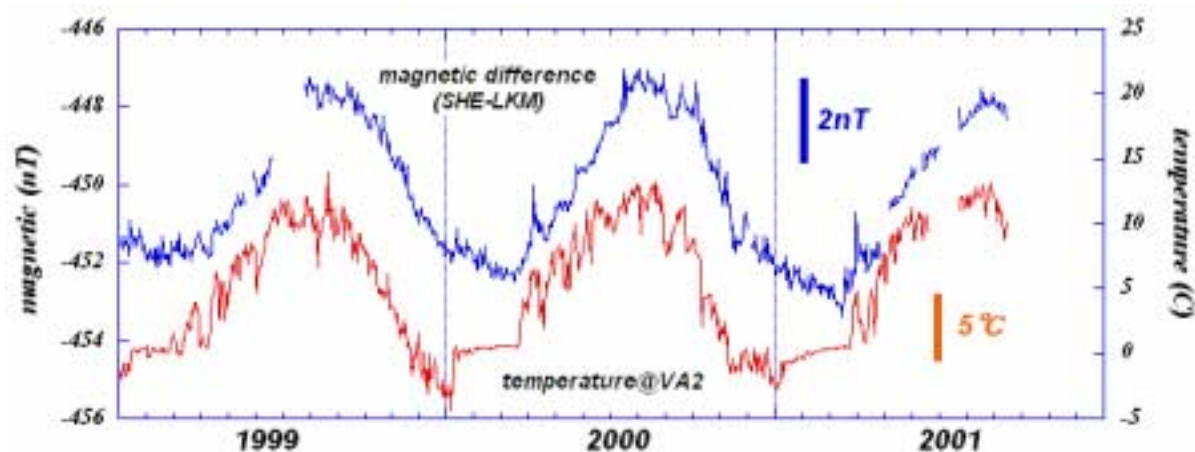


Fig. 3 Daily mean geomagnetic (difference of the total force between SHE and LKM) and ground temperature plots since Jan. 1991 to Sep. 2001.

3. 温度相関の磁場変動

地磁気と温度の変化を比較するため、観測点 VAN における地中温度をこの地域の代表的な変化として Fig. 2 に示す。ここで、示した温度は、観測点 VAN の観測壕（地表面下約 1 m 深さ）内で測定された日平均値である。測定しているのはデータ壕内に設置された収録装置の表面温度であるが、観測壕近傍の平均的な温度変化を反映していると考えてよい。ロングバレー地域では、冬期に地面が雪で覆われるため、1 月から 3 月頃にかけて、地温は 0 °C 付近で安定するのが特徴である。各観測点における LKM との全磁力差 (Fig. 2) と地中温度 (Fig. 3) の比較から、バンドパスフィルターと相互相関の手法を用いて年周変化成分の位相差と振幅を求め、Table 2 に示す。

Table 2. Summary of phase and amplitude variation. Negative amplitude indicates that the polarity is reversed.

	Amplitude of F (nT)	Time lag (day)
SHE	2.4	30
VAN	1.4	50
POP	1.5	10
PL2	0.8	25
PLV	-1.5	10
BSP	-0.8	5
LAP	-0.7	0

年周変化成分には、積雪期を除いて両者に高い相関が認められる。また、温度の方が磁場に対して位相が先行している。これらの事実は、地中温度変化に伴う熱消帯磁説、すなわち地表面近くの岩石磁化分布の不均質によって生じた局所的磁気異常が、地中温度の変

化に伴って消長するというメカニズムを支持しているように思える。Utada et al. (2000) らは、岩石の熱消磁実験によって常温付近の小さな温度範囲で磁化（主として残留磁化）が数%～数 10% 変化することを確認め、伊豆大島や霧島で観測された年周変化をこれによって説明している。ロングバレー地域の全磁力差年周変化の振幅も、彼らの例と同程度であるから、年周変化の原因としては同じメカニズムである可能性は十分にある。逆に、他に原因となり得る現象としては、観測装置の温度特性と、広域的磁場の年周変化があるが、これらはいずれも可能性が低い。まず、前者については、我々が全磁力測定に用いているプロトン磁力計の原理から考えて、センサーそのものの温度変化は計測値にほとんど影響しないはずである。核磁気共鳴の周波数を計測するために用いている水晶発振器の温度特性から期待される磁場値への影響は、 $-5 \sim 30$ °C の温度範囲で 0.1 nT 程度である。また、我々の計測器は観測壕内に置かれているので、装置の温度変化は観測壕のそれとほとんど同じであると見做せる。従って、装置の温度特性が影響していると考え、観測された磁場と温度に大きな位相のずれが生じているという事実に矛盾する。後者については、3 成分補正の章で後に示すように、この地域を含む米国南西部の広域的な地磁気変動に顕著な年周変化成分は認められないことから否定される。

以上のことから、ロングバレーカルデラ地域の全磁力差にみられる年周変化成分の起源としては、地表付近の岩石の温度変化に伴う熱消帯磁がもっとも有力であると考えられる。本稿では、まず作業仮説としてこれを採用し、1 次元の熱拡散モデルに基づく計算結果、およびその他の観測結果からその妥当性を検討することにする。

3.1 1次元の熱拡散方程式

鉛直1次元で発熱と移流がない場合の熱拡散を考える。熱拡散係数を κ 、温度を T とすると、方程式は以下の如くである。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

この方程式の解は誤差関数（またはその補関数）となる。

$$\frac{T(z, t) - T_s}{T_0 - T_s} = \text{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \quad (3)$$

$$\frac{T(z, t) - T_0}{T_s - T_0} = \text{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \quad (4)$$

ここで、 T_s は境界条件（地表面温度）、 T_0 は観測地点での初期温度値である。

式(3)および(4)は、時刻 $t=0$ において表面温度（境界条件）が T_0 から T_s にステップ状の変化をした場合の応答を表している。時刻 $t=0$ におけるこの変化が、時刻 $t=t$ において、

$$(T_s - T_0) \text{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \quad (5)$$

に相当する温度変化をもたらすことになる。 T_s が時間と共に変化する場合は、図のように連続したステップ状の変化とみなすことで同様の取り扱いができる。

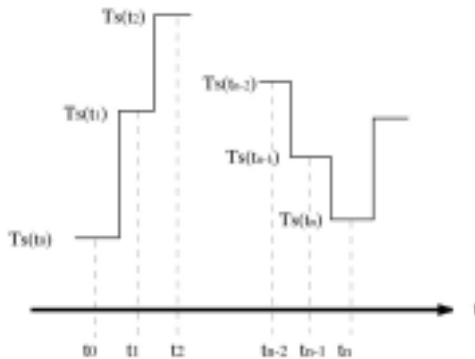


Fig. 4 Temperature as a varying boundary condition expressed as a sequence of stepwise changes.

すなわち、時刻 $t=t_n$ における温度 $T(t)$ は、それ以前に発生した連続するステップソースの重ね合わせとして表現できる。つまり、

$$\begin{aligned} T(t) = & T_0 + (T_s(t_1) - T_s(t_0)) \text{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa(t_n - t_0)}}\right) \\ & + (T_s(t_2) - T_s(t_1)) \text{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa(t_n - t_1)}}\right) + \dots \\ & \dots + (T_s(t_{n-1}) - T_s(t_{n-2})) \text{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa(t_n - t_{n-2})}}\right) \end{aligned}$$

$$+ (T_s(t_n) - T_s(t_{n-1})) \text{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa(t_n - t_{n-1})}}\right) \quad (6)$$

である。

ロングバレーで観測された地中温度データに(6)式を適用してみる。まず、一定の熱拡散率を仮定して様々な深さでの温度応答を計算してみる。ここでは、熱拡散率を $0.1 \text{ (m}^2/\text{day)}$ と仮定する($1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ に相当)。これは、岩石の熱拡散率としては一般的な値である(Stacy, 1969)。

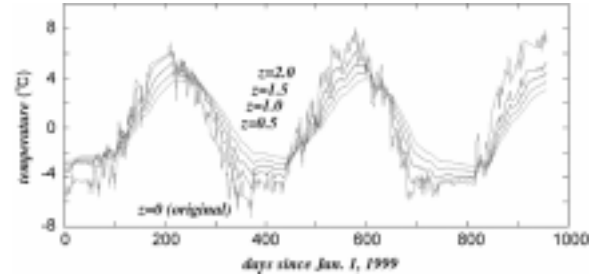


Fig. 5 Temperature variations at depths of 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 m calculated by a 1-D thermal diffusion theory. κ is assumed as $0.1 \text{ (m}^2/\text{day)}$. Horizontal axis indicates the days since Jan. 1, 1999.

Fig. 5 をみると、深度が大きくなるにつれて短周期成分が相対的に抑制されるとともに、年周変化に時間遅れが生じていることがわかる。さらに、全磁力差の年周変化成分が、温度変化に比例していると仮定し、以下の式で表せるものとする。

$$dF_{\text{annual}} = \frac{1}{c} T(z, \kappa) \quad (7)$$

ここで、 T は式(6)から計算される地中温度、 c は定数である。

Table 3 Parameters obtained from 1D thermal diffusion model which give the best fit to annual variations at each station. The thermal diffusion coefficient is assumed $0.1 \text{ m}^2/\text{day}$. Negative values indicate that the polarity is reversed. The rightmost column shows calculated amplitudes of ground temperature at equivalent depths d .

	Equivalent depth d (m)	C (nT/deg)	ΔT at $z=d$ (deg)
SHE	1.5	2.0	4.2
VAN	3.8	3.8	2.1
POP	0.5	3.5	5.7
PL2	1.0	4.5	4.9
PLV	0.5	-5.0	4.9
BSP	0.2	-10.0	6.2
LAP	0.1	-12.0	6.4

Fig. 2 に示した各観測点における年周変化にフィットするパラメータの一覧を Table 3 にまとめる。ただし、ここで示した等価深度は、温度観測点の深度からの相対値と考えるべきものである。以上の手順によって推定した年周変化成分を除去した残差を Fig. 6 に示す。

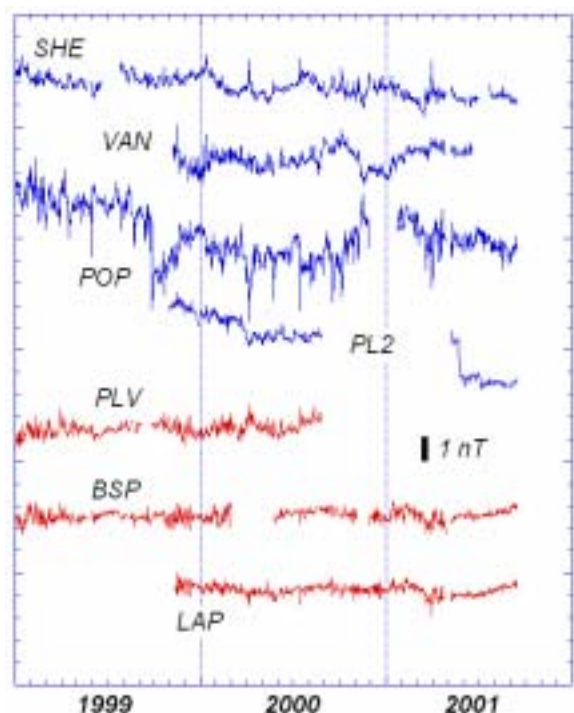


Fig. 6 Geomagnetic difference after removal of annual variation assuming the 1D thermal diffusion.

冬(1~3月)の積雪期では、一部の観測点(SHE, VAN, POP)で温度と全磁力差が異なる傾動を示しているため、完全に年周変動が取り除かれてはいないが、主要な部分は除去できている。各観測点で測定された地中温度データを用いて補正を行うことができれば、より正確に年周変化の除去ができるものと思われる。

我々の観測した年周変化が地下浅部で不均質に分布した磁化物体の温度変化によるものだとすれば、その等価深度は Table 3 に示したように、高々5 m 程度であることがわかった。この程度の深度にある磁化の不均質によって生じる地表面(センサーの高さ)の磁気異常の特徴的スケールは数 m であると考えられるので、各観測点の磁場センサー周辺で全磁力のマッピングを行えば、センサー付近の局所的磁気異常と年周変化の特徴に何らかの関係が見出せるであろう。このような予想から、我々は2001年8月に、センサーを中心とした10×10 mの領域で1 mグリッドの全磁力マッピングを実施した。この時期は、年周変化が極大もしくは極小の付近である。マッピングの結果を Fig. 6 に示す。ここで示した全磁力分布から短波長の磁気異常を取り出すために、次の式で定義される1次面による近似を

行う。Fig. 8 は、それを差し引いた結果を示している。

$$\Delta F(x, y) = \Delta F_{local} + ax + by + c \quad (8)$$

ここで、a, b, c は定数である。さて、Fig. 8 を見ると、SHE と POP では短波長の磁気異常が強く、逆に BSP と LAP では小さいことがわかる。また、全磁力差の基準点とした LKM の磁気異常は BSP や LAP に比べるとやや大きいものの、磁気異常としては小さい部類に属する。これらのことから、局所的磁気異常の大きな地点では、年周変化の振幅も大きい傾向があるといえる。ただし、磁気異常の原因となっている磁化物体(岩石)の温度-磁化特性は地点によってさまざまであるため、ここでみた磁気異常の強さがそのまま年周変化の振幅に比例するわけではないことに注意が必要である。ここでは、大傾向として両者に相関が認められることを指摘しておくにとどめ、観測された年周変化の振幅が、温度変化で説明可能なオーダーであるかどうか注目しよう。センサー近傍の磁気異常の強さは、例えば SHE ではおよそ 100 nT である。Utada et al. (2000)が行った岩石実験の結果によれば、常温付近の5%程度の温度変化でも、数%以上の磁化変化が生じる場合がある。100 nT オーダーの磁気異常の原因となっている岩石が、同程度の磁化特性をもっているならば、全磁力差に数 nT の年周変化を起こしても不思議ではない。逆に、BSP や LAP の磁気異常はせいぜい数 nT のオーダーであるので、この地点の磁気異常が1 nT 近くの年周変化を起こすとは考えにくい。従って、BSP と LAP に見られる年周変化は、基準点に用いた LKM の年周変化が逆位相で現れたものと考えられる。

年周変化の極性については、磁場センサーが局所的磁気異常の正負いずれに位置しているかによって決定されるはずである。しかし、ここで示した結果は必ずしもそれに従ってはいないように見える。Fig. 8 に示した磁気異常は、年周変化パターンの極大もしくは極小の状態が表現されていると思われるが、このパターンが年間を通じて維持されその強度のみが変化するか、それともこのパターンの一部だけが年周変化をきたすのかは、自明のことではない。従って、ある時点の磁気異常パターンのみから年周変化の極性を予測することは実際には難しいと思われる。

ここまでの解析から、ロングバレーカルデラの各地で観測された全磁力差の年周変化は、主として地中温度の年周変化に伴う局所的磁気異常の年周変化であると考えるのが妥当である。

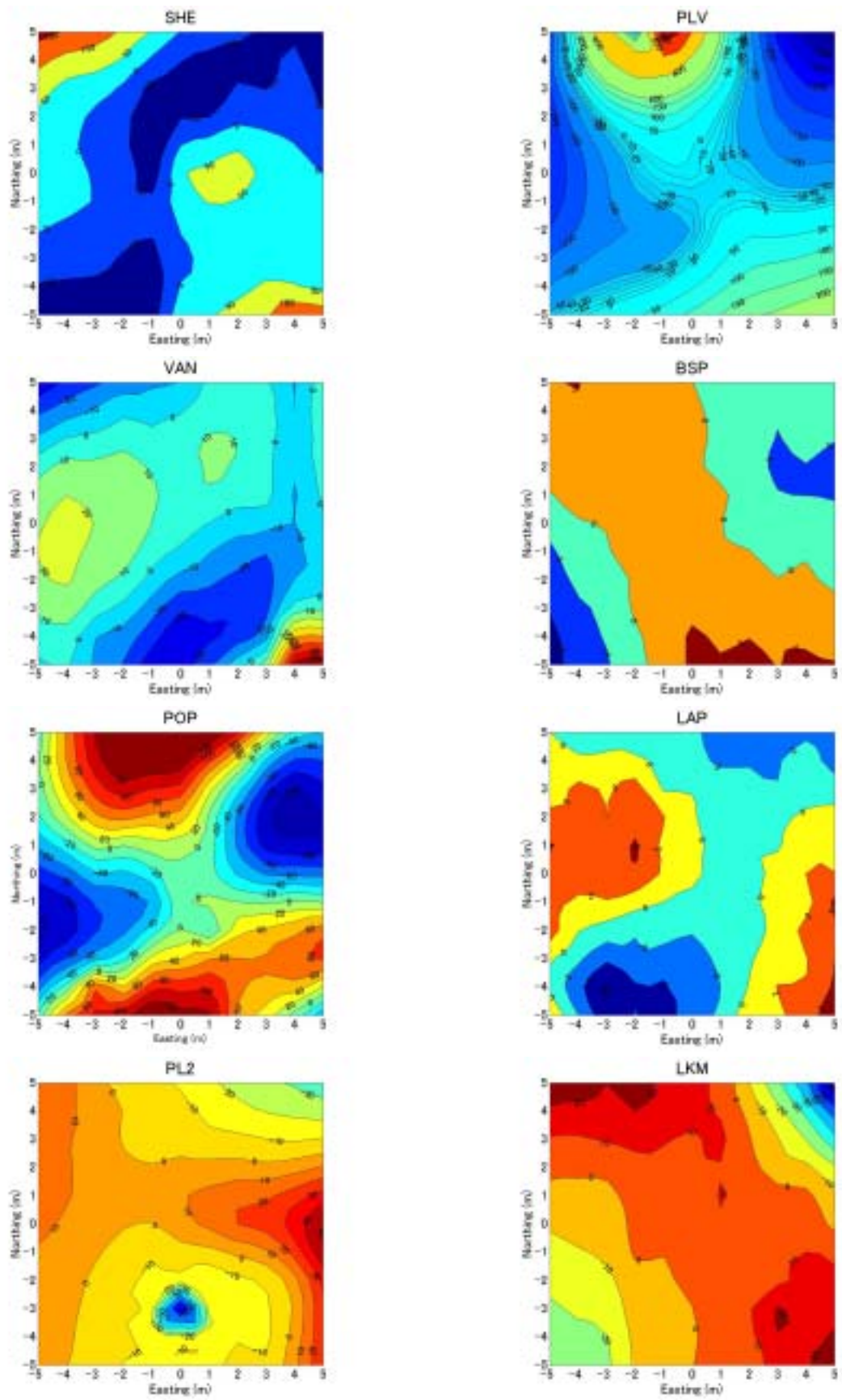


Fig. 8 Local magnetic anomalies around the geomagnetic stations.

3.2 短周期成分の吟味

年周変化よりも短周期の成分について考察を進めるため、観測点 SHE を例に磁場と地温の波形を比較してみる。前節で年周変化の除去を施した全磁力差 (Fig. 5) と、VAN 観測点の温度データから、周期 50 日より短周期の成分を抽出してプロットしてみると Fig. 9 の如くである。両者の間には、Fig. 10 に示した相関図からも読み取れるように、弱いながらも依然として相関が認められる。

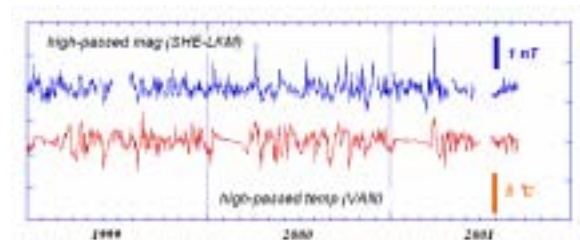


Fig. 9 Comparison of magnetic and temperature variations after high-pass filtering.

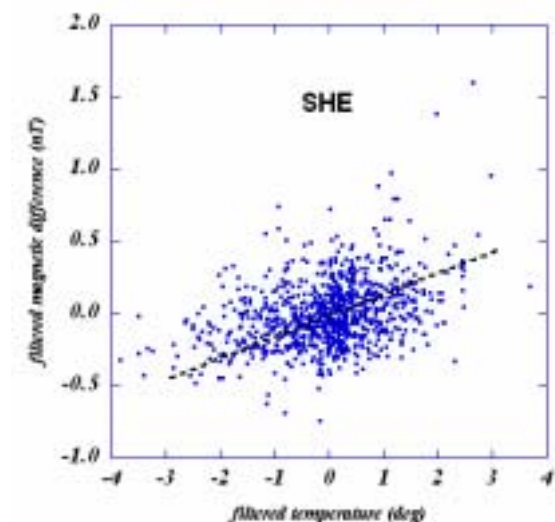


Fig. 10 Correlation plot between filtered temperature and magnetic difference. Some outliers plotted in the upper part of the figure are due to geomagnetic storms as will be discussed in the later section.

1 ヶ月程度の周期帯における温度変化と磁場変化の位相差は、日平均値で見ると限り無視できる程度であって、年周変化の位相差とは明らかに異なっている。このことから、2 つの可能性を指摘できる。ひとつは、年周変化の原因と考えられる磁化不均質の等価深度 (SHE の場合、1.5 m) よりも浅い部分にも、別の磁化不均質があり、温度変化を生じている可能性である。すなわち、SHE の場合には、地表面に極めて近い部分と、やや深い部分にそれぞれ磁化の不均質があり、前者は位相差の小さな変動を、後者は位相差の大きな変動の源となっているというものである。今ひとつは、原因と

なる磁化不均質は単一の深度にあるが、熱伝達の機構が二つある可能性である。この場合、例えば年周変化をもたらす機構は気温変動の下方への熱伝導であり、短周期の変動は降雨の浸透などに伴う熱の輸送が担っていると考えると、両者の位相差の違いを説明できる可能性がある。

極めて地表に近い部分の温度変化が影響しているのだとすると、その効果は日変化として捉えられるはずであろう。Fig. 11 に、地中温度と全磁力差を 10 分値でプロットしたものを示す。ここで、全磁力差は 3 時間の移動平均をとって平滑化したものである。温度の日変化が大きな 8 月で見ると、全磁力差には 1 日周期の温度変化にほぼコヒーレントな変動が含まれているように見える。一方、地表が雪で覆われて地温がほとんど変化しない 3 月期を見ると、全磁力差の変化の様子は 8 月期とはかなり異なっていることがわかる。3 月の変化にはほとんど温度日変化の寄与はないと考えられるので、全磁力差に現れた変動は主として地球外部磁場変動に起因するものと推定される。積雪期以外では、こうした変動に加えて、温度変化の効果が重畳されているものと思われる。積雪期の変化を利用して外部磁場起源の影響を推定すれば、両者を効果的に分離することができるはずである。ただし、8 月期の全磁力差に本当に地温の日変化成分が含まれているかどうかは、3 成分の磁場データと比較して慎重に検討する必要がある。これについては今後の課題とし、ここでは、温度に対する位相差の小さな全磁力差変動の原因として、地表面に極めて近い部分の温度変化の寄与がある可能性が高いことを指摘しておくにとどめる。

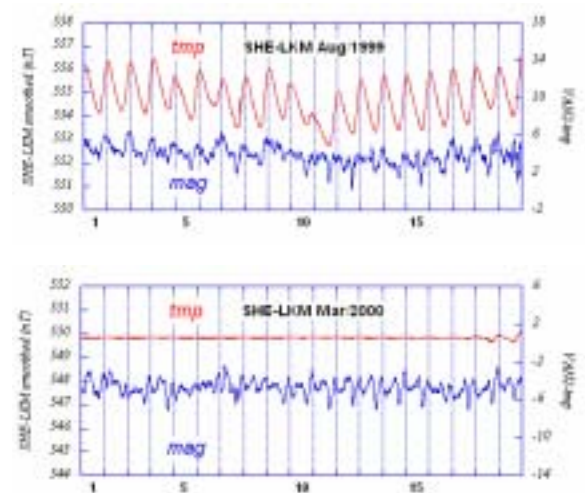


Fig. 11 Comparison between ground temperature and geomagnetic difference during the periods of Aug. 1-19, 1999 (upper panel) and of Mar. 1-19, 2000 (lower panel).

Utada et al. (2000)は、常温付近では、岩石の磁化は大きな緩和時定数を持つので、日変化のような短周期の

変動には応答性が悪く、磁場への影響は小さいとしている。しかし、これはあくまで相対的な問題であり、ブロッキング温度の低い磁化成分が含まれていれば短周期の変化に対しても磁化の応答はあり得るはずである。Utada et al. (2000)の実験は、緩和時定数とブロッキング温度の関係性を利用して、150 における 10 分間の熱消磁によって 40 における 1 ヶ月の熱消磁を等価的に実現したものである。SHE の岩石が本当に短い緩和時定数を有するものであるならば、より直接的な熱消磁実験によって磁化の日変化を実証できることになる。これもまた今後の課題としたい。

4. 外部起源磁場変動の補正

ここまでの処理によって、全磁力差に含まれる年周変化成分が主として温度変化に起因するものであることが示され、その除去が試みられた。しかし、式(1)に示したように、残差にはさらに regional な磁場変動の寄与 (ΔF_R) が含まれている。電離層や磁気圏起源の磁場変動は数 10 km のスケールに対しては一樣であると見做せる。また、地球内部起源の永年変動にも regional なものがある。一般に、異なる 2 地点における地磁気の伏角・偏角は異なっており、地磁気ベクトルは平行ではない。従って、一樣な変動磁場が印加されても、全磁力に対する影響は微妙に異なり、単純に 2 地点の全磁力差を求めても、その影響が残ってしまう。このことは既に古くから指摘されており、さまざまな補正法が提唱されてきた (例えば、Tanaka et al., 1978; Davis et al., 1979; Davis et al., 1981)。ここに引用した 3 者は、いずれも地磁気ベクトルの 3 成分を用いて化成分を行うものであるが、Davis et al. (1981)の手法は、周波数依存性まで含めたもので、電離層・磁気圏起源の磁場擾乱に対して地球内部の応答から誘導される 2 次磁場をも含めた補正が可能である。前の二者は本質的に同じ手法であり、周波数依存性を仮定しないモデルである。本稿では、比較的取り扱いが簡単な Tanaka et al. (1977)ならびに Davis et al. (1979) の手法を用いて、LVC の全磁力差から regional 磁場変動の影響を除去することを試みる。

3 成分を用いた化成分法の物理的根拠を以下に簡単に説明する。ある地点の全磁力 F は、 X (北向き成分)、 Y (東向き成分)、 Z (下向き成分) を用いて次のように表現される。

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (9)$$

$$\equiv \sqrt{(X_0 + \Delta X)^2 + (Y_0 + \Delta Y)^2 + (Z_0 + \Delta Z)^2}$$

ここで、添字の 0 はその地点の固有磁場を表し、 Δ は

変動分を意味している。変動磁場は固有磁場に比べて十分小さいと見做し、(9)式を Taylor 展開して 2 次以上の項を無視すると式(10)のようになる。

$$F = F_0 + \frac{X_0}{F_0} \Delta X + \frac{Y_0}{F_0} \Delta Y + \frac{Z_0}{F_0} \Delta Z$$

$$\equiv F_0 + (\cos I_0 \cos D_0) \Delta X + (\cos I_0 \sin D_0) \Delta Y + \sin I_0 \Delta Z \quad (10)$$

$$\equiv F_0 + a \Delta X + b \Delta Y + c \Delta Z$$

ここで、 a, b, c は観測点の伏角と偏角によって決まる定数である。従って、異なる 2 地点に一樣な変動磁場が印加された場合の全磁力差は、以下のように変動磁場 3 成分の 1 次結合として表現できる。

$$F_2 - F_1 = (a_2 - a_1) \Delta X + (b_2 - b_1) \Delta Y + (c_2 - c_1) \Delta Z + (F_{20} - F_{10})$$

$$\equiv A \Delta X + B \Delta Y + C \Delta Z + D \quad (11)$$

外部磁場の影響を除去することは、すなわち(11)式において観測値 $F_1, F_2, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ を入力とし、 D の分散が小さくなるように係数 A, B, C を推定する問題に帰着される (Tanaka et al., 1978)。

補正に用いる磁場の参照データとして、Fresno (FRN) 観測所 (地理緯度 N37.10°地理経度 E240.30°) の 3 成分を使う。

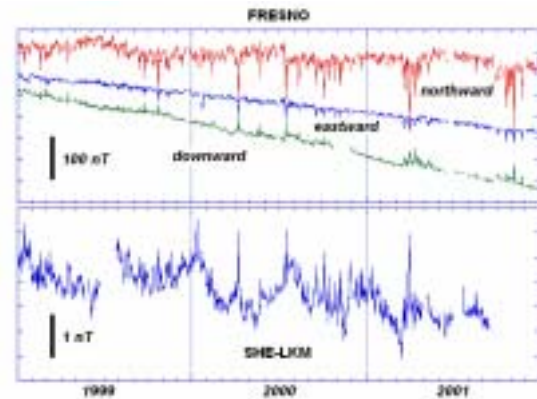


Fig. 12 Geomagnetic variations at Fresno observatory (upper panel) and geomagnetic difference of SHE-LKM after removal of annual temperature variation (lower panel).

Fig. 12 に示したように、FRN の 3 成分と、SHE における年周変化を取り除いた全磁力差を比較すると、明らかに磁気嵐の影響があることがわかる。注意しなければならないのは、磁気嵐の主相に特徴的に見られるスパイクを最小にするように係数を決定すべきではないということである。よく知られたように、外部磁場変動が短周期であればあるほど、それによる地殻の誘導効果が強く現れる。Local な電気伝導度不均質による誘導効果の影響は、 Z 成分に特徴的に現れ、磁場変動の方向と周波数に依存性がある。FRN における Z 成

分にもこの誘導効果が含まれているはずである。さらに、ルーチ的に運営されている地磁気観測所の立地条件とは異なり、火山地帯である LVC では地殻の電気伝導度不均質が強い可能性が高いので、特に 1 日より短周期の成分については local な誘導の効果が強く現れていると思われる。従って、もし日変化のような短周期の変動を効果的に除去するように係数の決定を行うと、数ヶ月以上の長周期変動については 3 成分補正による artifact が生じる危険がある (e.g. Davis et al., 1981; Fig. 6)。このような洞察から、本稿では、日平均値を用いて、磁気嵐の回復相 (特徴的には 10 日程度のタイムスケール) およびそれ以上の長周期変動に注目した係数の推定を行うことにする。例えば、Fig. 13 の A および B で示した変動は、米国中西部の 3 箇所の地磁気観測点 (FRN, TUC, BOU) に共通に見られるもので、LVC 地域程度の空間スケールに対してはほとんど一様であると見做せる。

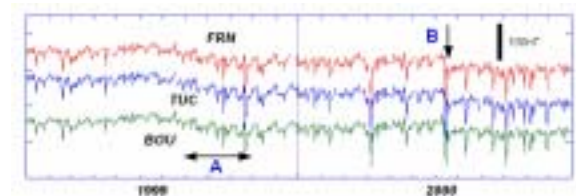


Fig. 13 Comparison of northward components at Fresno (FRN: N37.10, E240.30), Tucson (TUC: N32.25, E249.17), and Boulder (BOU: N40.13, E254.77) geomagnetic observatories. The slow variation during the period A and the rapid change at B are common to all these stations.

このような変動を除去すべく 3 成分補正の係数 A, B および C を推定する。参照点の伏角と偏角が既知の場合、式(10)と(11)より明らかなように、未知数は、補正されるべき観測点の偏角と伏角の 2 つであり、その意味において係数 A, B および C は完全に独立ではない。ここでは、以下のような手順を用いて係数を推定する。

- (i) まず LKM と FRN の全磁力単純差を、FRN の 3 成分を用いて補正する。その際、FRN では 3 成分の絶対値 (偏角と伏角) が確定しているので、補正係数 A, B, C から LKM の偏角と伏角を推定することができる。
- (ii) LVC の他の観測点と LKM との単純差を、FRN の 3 成分を用いて補正する。その際、LKM の偏角と伏角が(i)で推定されているので、各観測点の偏角と伏角が、係数 A, B および C を用いて求められる。係数を推定するにあたっては、各係数の依存関係が互いに矛盾しないという拘束条件のもとに行う。

以上の手順によって観測点ごとの A, B, C を推定し、それによって補正を施した結果を Fig. 14 に示す。3 成

分補正前の Fig. 6 と比較すると、SHE や POP に顕著に見られた磁気嵐の影響は、ほぼ取り除かれていることがわかる。なお、PL2 に関しては、もともと磁気嵐に起因する変動が顕著ではなく、係数を決定する精度がなかったので補正を施さなかった。

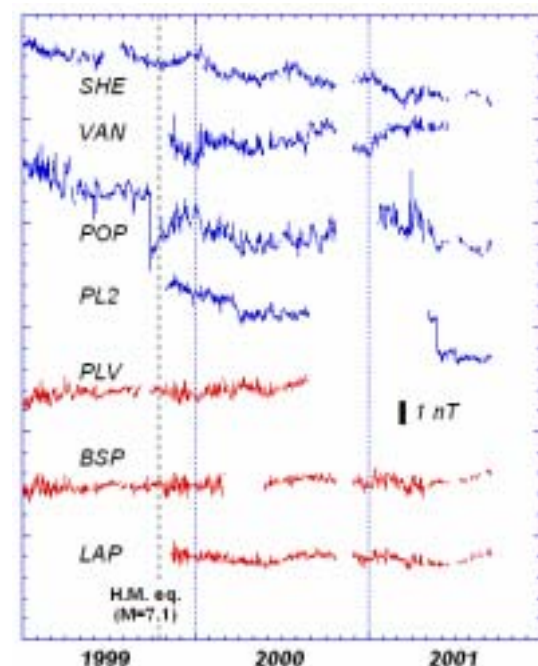


Fig. 14 Geomagnetic differences referred to LKM after 3-component reduction. The broken line indicates the Hector Mine earthquake.

観測点 SHE には、7 月と 12 月にピークを持つ周期的な変動が現れている。この変動は年周変化成分の補正が完全ではないことに起因している。おそらく温度 - 磁化特性の非線形性が原因であろう。Fig. 14 中には破線で Hector Mine 地震の時期を示したが、このイベントに関係すると思われる長期的な傾動変化は認められない。POP では地震の約 1 ヶ月前にステップ状の磁場低下が認められるが、他の観測点では同様の変化は認められず、センサー近傍の擾乱である可能性が否定できない。いくつかの観測点に認められる直線的なトレンドは、再生ドームの隆起など、カルデラ規模の広域の変動の一部を反映している可能性はあるものの、3 成分補正に伴う artifact である可能性も否定できず、現時点での断定は難しい。今後、地殻変動など他の観測量との比較を行うとともに、今回の解析では使用しなかった観測点のデータも援用して変動の空間的パターンからも考察を加えていかねばならない。

最後に、3 成分補正の係数から推定された、各観測点における補正係数および偏角と伏角の一覧を Table 4 に示す。全磁力差の参照点である LKM と比較すると、各観測点の偏角・伏角の偏差は最大で約 2 度であり、

通常の局所的磁気異常としては妥当な範囲であると考えられる。著者らは、今後これらのデータを基礎資料

として、地殻活動起源の長期的異常変動の検出に向けて役立てていくことを目指している。

Table 4 Coefficients of three components reduction and related declinations and inclinations. Coefficients of LKM are those referred to FRN. All the other coefficients are those referred to LKM. The declination and inclination of FRN are the values in January, 2000.

	A	B	C	Declination (deg)	Inclination (deg)
SHE	-0.005	-0.02	0.005	13.3	63.2
VAN	-0.004	0.007	0.001	16.5	62.6
POP	0.02	0.005	-0.01	15.4	61.0
PL2	0.0	0.0	0.0	15.6	62.5
PLV	-0.006	0.0	0.003	15.8	62.9
BSP	0.001	0.004	-0.001	16.0	62.4
LAP	0.004	0.005	-0.003	16.0	62.4
LKM ^{*1}	-0.02	0.002	0.01	15.6	62.5
FRN ^{*2}	-	-	-	14.7	61.3

5. まとめ

LVC で観測された全磁力差には明瞭な温度相関の変動が含まれており、振幅数 nT の年周変化を示す。この年周変化の原因を考察したところ、地下数 m までの地中温度変化に伴う磁化の変化がもっとも有力であることが明らかになった。一次元の熱拡散モデルに基づいて、この年周変化の補正法について検討し、除去を試みた。さらに、FRN 観測所の地磁気 3 成分を用いて外部起源磁場の補正を行った。これらの処理により、地殻活動起源シグナルの検出に向けた S/N 比は 5 倍程度向上したが、1999 年 10 月の Hector Mine 地震に関連すると思われる異常変化は捉えられなかった。しかし、いくつかの観測点に認められる直線的な傾動に関しては、カルデラの活動に関連する変動である可能性も残されており、今後更なる検討を要する。

本研究で得られた知見から以下のことを提言できる。磁場観測と同時にその地点の地中温度を測定しておくことは極めて重要である。精密な繰り返し磁気測量を行うには、磁気点において、事前に約 1 年間、地中温度と磁場観測を行い、両者の関係（位相と振幅）を求める。以後、磁場の連続観測は必要ではなく、地中温度のみ計測しておけば、任意の時点で実施された繰り返し磁場観測値は、実測の温度に基づいて、正確に補正できる。これにより、磁場の連続観測を維持する費用と労力を大幅に軽減することができるであろう。

謝 辞

本研究は、平成 10～12 年度日本学術振興会日米科学

協力事業「ロングバレー・カルデラの電磁気共同観測 代表者：笹井洋一」、および、平成 13～15 年度日本学術振興会日米科学協力事業「火山活動に伴う電磁場の発生機構—阿蘇とロングバレーの比較研究—（代表者：田中良和）」の一部として行ったものである。データの解析にあたっては、京都大学火山研究センター客員研究員の A.W. Hurst 氏から貴重な助言を頂いた。本研究では、Fresno, Boulder, および Tucson 地磁気観測所のデータを使用させて頂いた。これらの観測所と、京都大学理学部附属地磁気世界資料解析センター (WDC-C2) に感謝申し上げる。

参考文献

- Davis, P. M., Stacy, F. D., Zablocki, C. J., and Olson, J. V. (1979): Improved signal discrimination in tectonomagnetism: discovery of a volcanomagnetic effect at Kilauea, Hawaii, Phys. Earth Planet. Inter., Vol. 19, pp. 331-336.
- Davis, P. M., Jackson, D. D., Searls, C. A., and McPherron, R. L. (1981): Detection of tectonomagnetic events using multichannel predictive filtering, J. Geophys. Res., Vol. 86, pp. 1731-1737.
- Mueller, R. J., Johnston, M. J. S., and Langbein, J. O. (1991): Possible tectonomagnetic effect observed from mid-1989, to mid-1990, in Long Valley Caldera, California, Geophys. Res. Lett., Vol. 18, pp. 601-604.
- Mueller, R. J. and Johnston, M. J. S. (1998): Review of magnetic field monitoring near active faults and volcanic calderas in California: 1974-1995, Phys. Earth

- Planet. Inter., Vol. 105, pp. 131-144.
- Sasai, Y. (1991): Piezomagnetic Field Associated with the Mogi Model Revisited: Analytic Solution for Finite Spherical Source, J. Geomag., Geoelectr., Vol. 43, pp. 21-64.
- Stacy, F. D. (1969): Physics of the Earth, John Wiley & Sons, Inc., U.S.A., pp. 324.
- Tanaka, Y., Masuda, H., Kawamura, M., Ohchi, K., Kato, S., Baba, H., and Yoshino, T. (1978): Surveys of the geomagnetic total intensity with proton magnetometers on Aso volcano (1977), in Report of Joint Observation of Aso volcano, edited Kubotera, A., pp. 31-39 (in Japanese).
- Utada, H., Neki, M. and Kagiya, T. (2000): A study of annual variations in the geomagnetic total intensity with special attention to detecting volcanomagnetic signals, Earth Planets Space, Vol. 52, pp. 91-103.

On the annual variations in geomagnetic differences observed in Long Valley Caldera, California

Takeshi HASHIMOTO*, Yoshikazu TANAKA**
Malcolm J. S. JOHNSTON***

Mitsuru UTSUGI**, Yoichi SASAI**** and Shin'ya SAKANAKA*****,

*Graduate School of Science, Hokkaido University

**Graduate School of Science, Kyoto University

***United States Geological Survey

****Tokyo Metropolitan Government

*****Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

Synopsis

We deployed some proton magnetometers in Long Valley caldera in order to detect anomalous geomagnetic changes of tectonic or volcanic origin during the period of 1991-2001. Distinct annual variations can be seen in the geomagnetic differences. The most plausible explanation for the annual variation is the re(de)magnetization of shallow rocks due to the temperature change. We made a correction of the annual changes assuming the 1-D thermal diffusion theory. In addition, reduction of external disturbances using three component geomagnetic data has been applied to the records. It is unlikely that there was any anomalous geomagnetic change related to the Hector Mine earthquake (Oct. 16, 1999), which was the most distinct event during the observation period. However, there still remains a possibility that long-term trends represent anomalous changes due to the volcanic activity of the area.

Keywords: geomagnetism, Long Valley Caldera, temperature, annual variation