

雲仙火山における空中磁気測量について

大久保綾子・田中良和*・北田直人*・宇津木充*・清水 洋**・松島 健**

*京都大学大学院理学研究科 地球熱学研究施設火山研究センター

**九州大学大学院理学研究院 地震火山観測研究センター

要 旨

2002 年 9 月 18 日に雲仙科学掘削の一観測項目として、雲仙岳を中心とする空中磁気測量を実施した。雲仙火山では、1990 年 11 月に約 200 年ぶりに噴火活動が始まり、1991 年 5 月には地獄跡火口より溶岩ドームが出現した。噴出した溶岩の多くは、ロープ状に東部斜面に張り付くとともに内性的成長を続けドーム状の平成新山を形成した。山頂近くで磁場の連続や繰り返し観測がなされているが、測点が限られていて十分でない。

そこで本研究の目的は、空中磁気探査により、広域かつ精密な磁気構造を把握すること、噴出した溶岩の冷却過程を調べることにある。ここでは今回得られた空中磁気データを用いて、磁気異常分布を示し、得られた磁気異常を考察する。

キーワード： 空中磁気測量、磁気異常、雲仙火山

1. はじめに

火山岩の磁化は強い温度依存性を示す為、地表における地磁気観測を通して、地下の温度変化を推定することが行われてきた。しかしこのような地上の観測は、磁気点の確保に多大の労力を要するために、多地点の観測が難しく、磁場変化源の位置や形状等を決定する上で情報が欠如する状況にある。このように、一つの噴火サイクルを通しての磁場観測は、従来の地表面に設置された繰り返し磁気測量や連続観測では不十分である。その点、空中磁気測量は広域を短時間に観測できるが、GPS の技術革新前に行われた空中磁気測量からは位置決定が不正確であり、地磁気の時間変化を空間的に正確に求めることが出来なかった。しかし、GPS の技術革新後の現在は、この問題を克服することが可能であり、試みとされているが、未解決であるのが現状である。また火山活動の予測や噴火予知を目指すためには、この問題を必ず解決しなければならない。

そこで上記の問題を解決するために、近年、複数の空中磁気測量から一定期間を隔てた地磁気の時間変化を

空間的に求める、いわゆる空中磁気測量の繰り返し測量実現が目指されている。

この稿では、2002 年 9 月 18 日に雲仙岳を中心とする高密度かつ低高度での空中磁気測量から得られた磁気異常を紹介するとともに、異常源の原因を探る。また今後、雲仙だけにとどまらず、一般的に空中磁気測量の繰り返し測量実現に向けて、どのような解析を行うかの予定を述べる。

2. 雲仙火山

雲仙火山は九州の中部を東北東－西南西の方向に斜断している別府－島原地溝帯の西端に位置している。さらに雲仙火山に発達している地質構造の基幹をなしているものは、その中央部を東西に横断している雲仙地溝とその西端に位置している千々石カルデラと考えられている。雲仙地溝は幅約 8km の溝状の落ち込みで、その北縁は千々石断層であり、またその南縁は布津断層と金浜断層である。この布津・金浜断層は、それぞれ

東西両側から中心部に向かってのびた弧状断層で、高岩山西麓で出会っている。またこの地溝の中には、ほぼ中央部を東西に走る南落ちの別所断層と北落ちの赤松谷断層が連なっていて、南北を二分している。これらのほかに、これらに平行しあるいは斜交する断層も多数認められ、ことに雲仙地溝の中での断裂の発達は著しい。(太田 1984) また雲仙火山岩類は斜長石、角閃石、輝石、黒雲母及び不透明鉱物(ほとんど磁鉄鉱)などの斑晶鉱物および石基よりなる(藤野・種子田)。

近年の噴火活動としては、1990 年 11 月 17 日に地獄跡火口と九十九島火口における水蒸気噴火に始まり、翌年の 2 月の屏風岩火口からの火山灰噴出の後、5 月に地獄跡火口に溶岩ドームが出現した。噴出した溶岩の多くは、ローブ状に東部斜面に張り付くとともに内性的成長を続けドーム状の平成新山を形成した。

2.1. 雲仙火山における空中磁気測量

今期の火山噴火に関連して、1991 年 8 月には、島原半島中部地域の 7500ft 上空における空中磁気測量がなされている。中塚は、1981 年の NEDO の測定結果と比較して 6 km 程度の長波長の磁気異常は見いだせなかったとしている。しかしながら、島原半島中部地域の平均的な磁化強度は 2.9 A/m 程度であることを示した上で、島原地溝に対応するような東西の磁気異常が存在すること、雲仙温泉地域には強い負の磁気異常の存在すること等を明らかにした。

一方、大学合同観測班は 1992 年 12 月に普賢岳を中心としたヘリコプターによる空中電磁・磁気探査を行った(茂木ほか, 1995)。

その後、島原振興局による雲仙溶岩ドームの崩壊危険度予測評価としての空中電磁探査が 2000 年初頭になされている(奥野ほか, 2001)。

今研究の飛行計画は、約 10 年前の 1992 年 12 月に茂木らと実施した領域を覆うように計画した。

3. 観測

3.1 観測の概要

今回の空中磁気測量の観測装置の概念図を Fig.1 に、概要を Table.1 に示す。

今回の飛行には長崎県防災航空隊の「ながさき」を使用した。測定に際しては、ヘリの機体磁気の影響を避けるため、バードをヘリから 20m 吊り下げて測定を行った。バード本体は径 40cm、長さ 160cm の塩化ビニール製で、後部に径 80cm の円筒形の尾翼をつけている。

機上装置として、磁気勾配を取得する為に、主磁力計は、ジオメトリクス社製の光ポンピング方式の G858 セシウム磁力計をバード内に設置して、10Hz サンプリングで運用し、副磁力計には、オーバーハウザー磁力計 GSM19 のセンサーをバードの上方 10.5m に固定し、信号は機体に引き込んで 5Hz サンプリングで運用した。またアシュテックの GPS をバード内で毎秒モードで運用した。

地上装置として、日変化補正用プロトン磁力計 GSM19 を毎 3 秒モードで運用するとともに、バードの航跡決定の為に、参照 GPS を用いた。バードの航跡は、参照 GPS を用いて、バードに搭載した GPS のシングルモードによる位置に、ディファレンシャルモード補正を行って求めた。

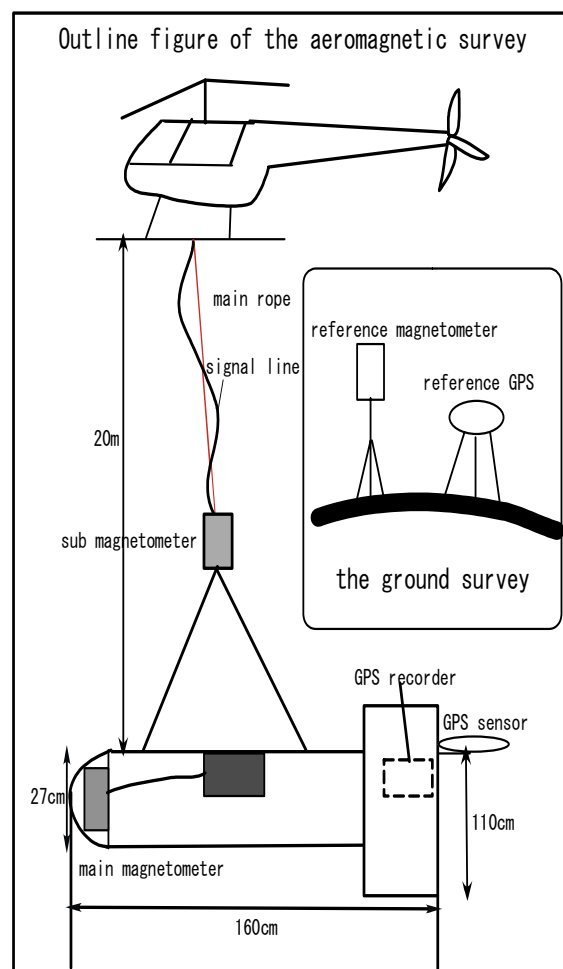


Fig.1 Outline figure of the aeromagnetic survey

Table 1. Specifications and equipment utilized in the aeromagnetic survey

Survey date	September 18, 2002
Survey time	Flight 1 : 9h11m00s-10h14m20s Flight 2 : 11h20m03s-12h40m32s Flight 3 : 14h23m18s-15h55m25s
Range of survey area	Around Unzen volcano Flight 1 : 32° 40.2' N - 32° 48.6' N 130° 10.8' E - 130° 23.4' E Flight 2 : 32° 43.6' N - 32° 48.0' N 130° 14.4' E - 130° 20.4' E Flight 3 : the same as Fight2
Helicopter	「Nagasaki」
Flight altitude	Flight 1 : Flight 2 : about 1000ft Flight 3 : about 500ft
Air base	Shimabara heliport
Positioning	GPS 1Hz
Main magnetometer	光ポンピング方式 G858 セシウム磁力計 10Hz
Sub magnetometer	オーバーハウザー磁力形 GSM195Hz

Iwatoko-Yama, Kusenbu-Dake, Torikabuto-Yama, Mai-Dake, No-Dake, Inao-Yama, Ya-Dake, Kunimi-Dake, Myoken-Dake, respectively.

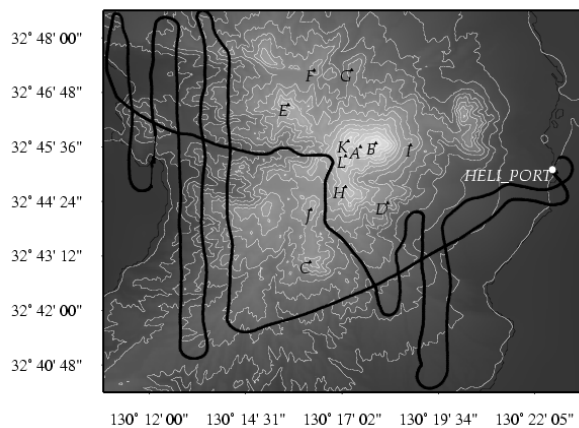


Fig.2 Black spined lines indicate the first flight-path. The white contour shows topographic data of Shimabara peninsula and its contour interval is 100m. A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K and L show Fugen-Dake, Heisei-Sinzan, Takaiwa-Yama,

3.2 飛行航跡について

飛行は、島原市南の船泊ヘリポート (Fig.2 の右端) を給油基地として、3回に分けて実施された。

まずフライト1では、布津断層・千々石断層及び金浜断層を横切った。これは断層に関する2次元磁気構造を解析し、NAKATSUKA(1994)等と照合することを目的とする為である。また飛行対地高度は500ftを目標として、深江町 (Fig.2 の南下) から仁田峠 (Fig.2 の中央部) を経由して岳沢 (Fig.2 の西向き測線) を下る測線を追加して、次に行われたスパイラル飛行時に欠落する深い谷部分のデータ補間をも目的にしている。

一方、フライト2とフライト3においては、普賢岳を中心にスパイラル飛行とした。同範囲を、対地飛行高度

を変えてカバーした目的は、3次元磁気図作成を視野に置く為である。またスパイラル飛行した理由は、今回使用した「ながさき」では、巡航速度が遅い場合には十分な上昇力が得られず、普賢岳を南北に縦断する飛行コースを選択することは困難であるとされ、普賢岳を中心としたスパイラル状の飛行を行うことで、徐々に高度を稼ぐ為である。このような飛行を行うにはリアルタイムでの GPS 位置決定が不可欠で、ナビゲータは機

内にパーソナル GPS とパソコンを持ち込み、予定コースとのずれを機長に指示することで達成した。フライト2とフライト3の飛行航跡は、Fig. 3 に示したように満足出来るものである。

なお Fig. 2 と Fig. 3 の航跡図に記入されている山岳名は、A：普賢岳、B：平成新山、C：高岩山、D：岩床山、E：九千部岳、F：鳥甲山、G：舞岳、H：野岳、I：稻生山、J：矢岳、K：国見岳、L：妙見岳である。

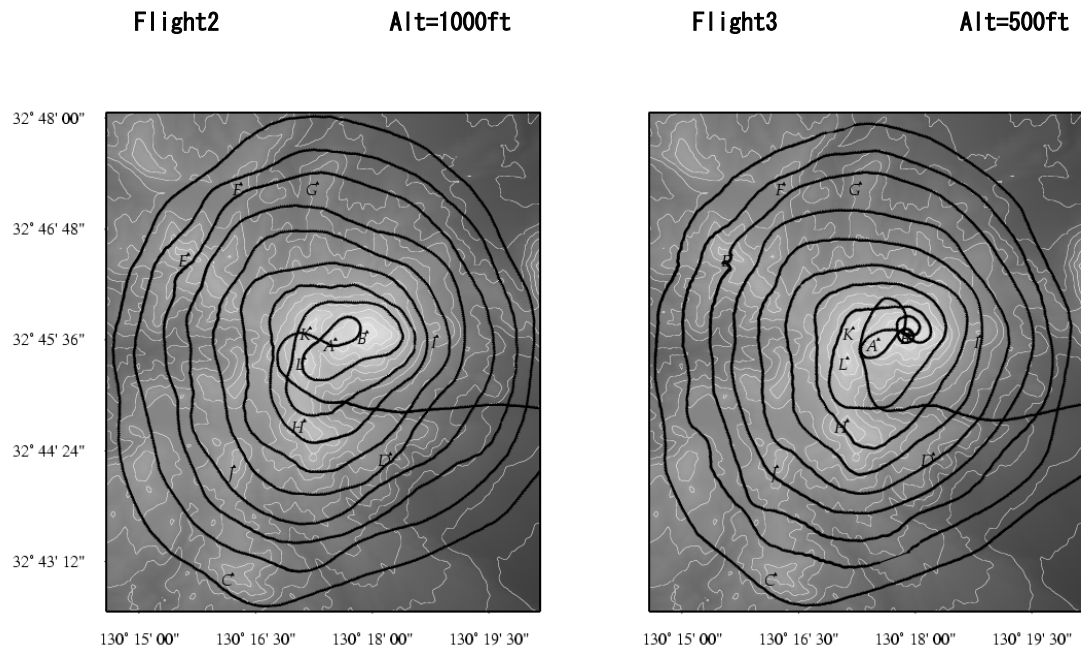


Fig. 3 Black spined lines indicate the flight-path. The left and the right panel show the second and the third survey, respectively. The contour shows topographic data around Unzen volcano and its interval is 100m.

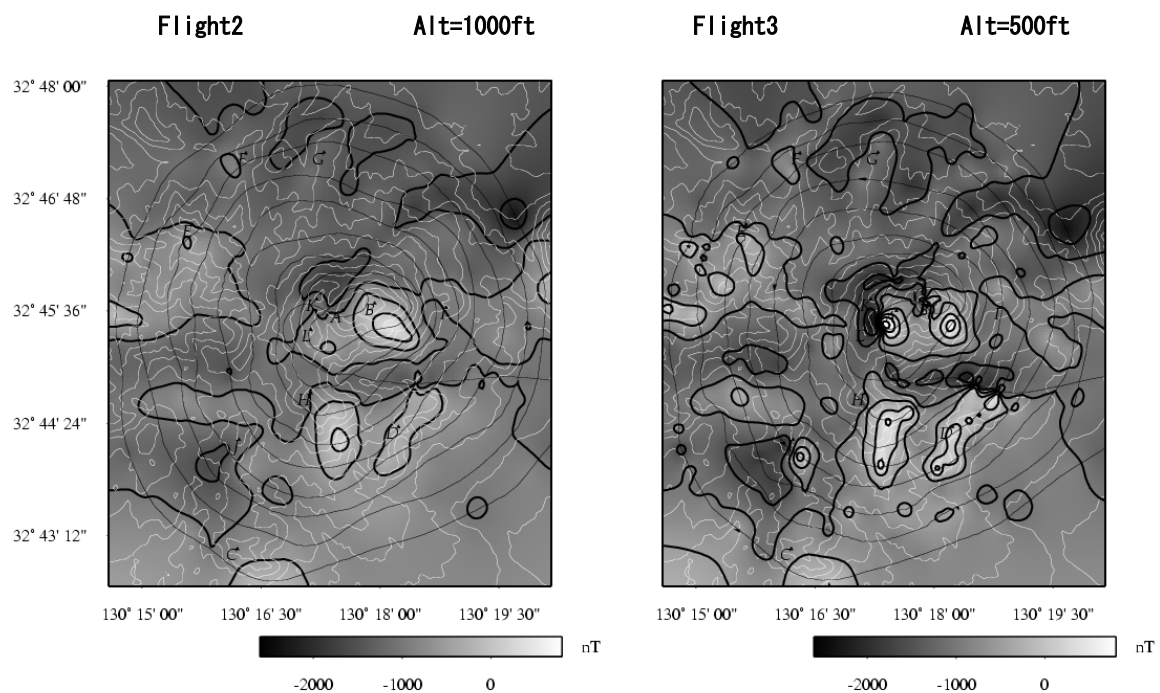


Fig.4 Aeromagnetic anomaly(total force) maps at the elevation of about 1000ft(the left panel) and about 500ft(the right panel) after removing the diurnal magnetic variation from the airborne magnetic measurement. Magnetic contours are in the interval of 500nT. The thin black lines indicate the flight-path and the white contours show topographic data around Unzen volcano.

4. 地磁気日変化の補正

地磁気は、空間的变化に加え、時間的にも変動する。空中磁気測量で問題となる日変化の原因は、電離層での熱対流現象に起因するものが大半で、 S_q や潮汐現象に対応した太陰日変化もわずかに含まれる。今回の空中磁気測量からは、地磁気の空間変化だけを問題にしているので、時間変化成分は観測値から取り除く必要がある。そこで今研究の日変化補正は、眉山治山ダムサイトに設けたリファレンス点での磁場値との単純差で行った。飛行ルートに沿った日変化補正済み磁気異常図を Fig. 4 に示す。

普賢岳南東稜線部 (Fig. 4 の中央やや右) と、野岳、岩床山に正の異常が見られ、磁化の強いことが分かる。また、雲仙地獄地域 (Fig. 4 の左下) , および千本木から礫石原 (Fig. 4 の右上から上部) は負異常であり、磁化の弱いことが見て取れる。

5. 地形補正

フライトから得られた磁場値は、地形の起伏による影響を強く受けており、深部構造を知るには地形効果を取り除く必要がある。そこで Nakatsuka(1981) と Grauch(1987) の手法を組み合わせることで、この領域の平均的な大地の磁化を見積もり、地形補正を行う。つまり, Okuma et al. (1994) 等の手法と同様, Fig. 5 に示すように、地形を一定深度までの四角柱に分割し、全ての角柱(磁化強度は等しい)が各観測点に作る磁場の総和を求めた後、それを観測磁気異常から差し引くことで地形の影響を取り除く。今回の解析では、この角柱のディメンジョンを、 $NS=50m$, $EW=50m$, 角柱の下面深度を海拔下一律 $5km$ とし、標高データは、陸域では国土地理院の $50m$ メッシュ数値地図を用い、海域では産総研の海底地形数値地図を用いている。また地球磁場および磁化ベクトルは現在の地球磁場と方向が一致するものとし、伏角と偏角は各々 46.5° $N6^\circ W$ とする。

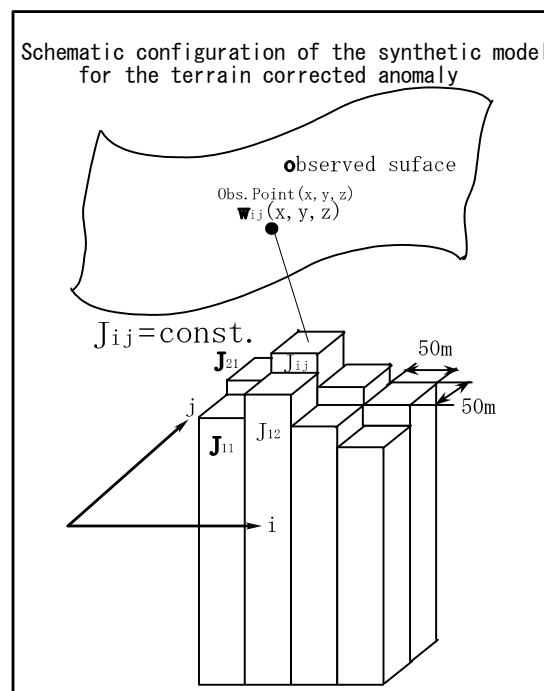


Fig. 5 Outline figure of the synthetic model for the terrain corrected anomaly.

5.1. 地形補正の結果

Grauch(1987) と Nakatsuka(1981) の方法により、今回計算した結果はフライト 2、3 について、それぞれ 3.0 、 2.9 A/m の平均磁化である。1992 年の飛行 (茂木ほか, 1995) に対しては、ほぼ同一の領域であるのも関わらず、 $5.1A/m$ が求められていて一致しない。観測値から、この結果を差し引いた磁気残差を Fig. 6 (Fig. 8) に示した。Fig. 6 の磁気異常レンジは、全体の磁気残差の平均を 0 としており、後の Fig. 8 とレンジが異なるが、等価なものである。Fig. 4 と比べて、残差は小さくなっているものの、正負の磁気異常の中心などはあまり変わらない。

普賢岳南東尾根の正異常や、赤松谷沿いの負の異常が顕著である。また、普賢岳の北部や北東部には、山頂部から流れ下るような形の磁気異常が見られる。雲仙火山の度重なる崩落や、火砕流、溶岩流の累積した構造であることを示唆しているように見える。

Fig. 4, Fig. 6 および Fig. 8 の全ての磁気異常図は観

測面での異常であり、この観測面は相違なる高さをもつ。その為、この高度差から磁気異常分布図は歪を受け

る(牧野ほか, 1993)為、およその異常であることに注意されたい。

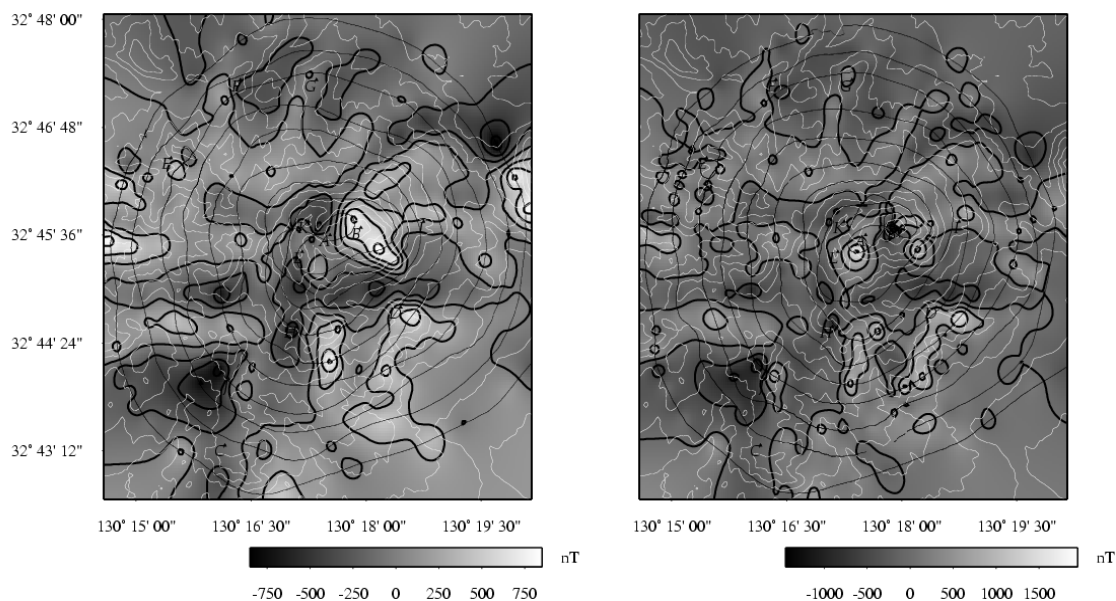


Fig.6 Residual anomalies (terrain corrected anomalies) after subtracting the effect of terrain magnetization from the observed magnetic anomalies. Contour interval is 250nT and 500nT, respectively.

6. 考察

雲仙普賢岳上空の磁気測量は、1992 年 12 月 23 日になされ、磁化構造の概要が明らかにされている。茂木ら(1995)によれば、普賢岳、国見、妙見、野岳、眉山等を中心に強い正磁気異常が分布し、普賢岳の北から北東側に大きく広がっている。野岳の正異常地域は東側に広がっているが国見、妙見の磁気異常は山頂付近に集中している。さらに、簡単な磁気インバージョンによれば、普賢岳近傍から国見岳、眉山周辺、赤松谷上流部では 7A/m に達する、といったことが報告されている。

今回の磁気異常の解析からは、観測面での磁気異常図である為、前章で述べたように観測面の高度差から磁気異常分布図は歪を受け、上述の事実確認が困難な状況にある。また地形相関について茂木らは調査地域

の平均磁化を 5.1A/m と見積もっているが、今回は約 3A/m と算出された。不一致の理由は今後検討する必要があるが、いくつかの磁化強度を仮定した磁気残差図を参照することで、各山体の磁化強度を評価できる。以下に、山体磁化を 1 A/m(Fig. 7)、3 A/m(Fig. 8)、5 A/m(Fig. 9)と仮定して地形補正を行った磁気残差図を示す。

Fig. 7 を見れば、標高の高い山体の南側に正の異常、北側に負の異常が対で存在して、山体部の磁化はより強いことを伺わせる。

Fig. 8 負の異常が顕著になる。雲仙火山の高所から放射状に流下する形状をした負異常、赤松谷に沿って東西に負の異常が見える。

Fig. 9 では、全体に負の異常が卓越し、山体部についても南側が負、北側で正異常となるから全体としての磁化は、5A/m より小さいことは明らかである。

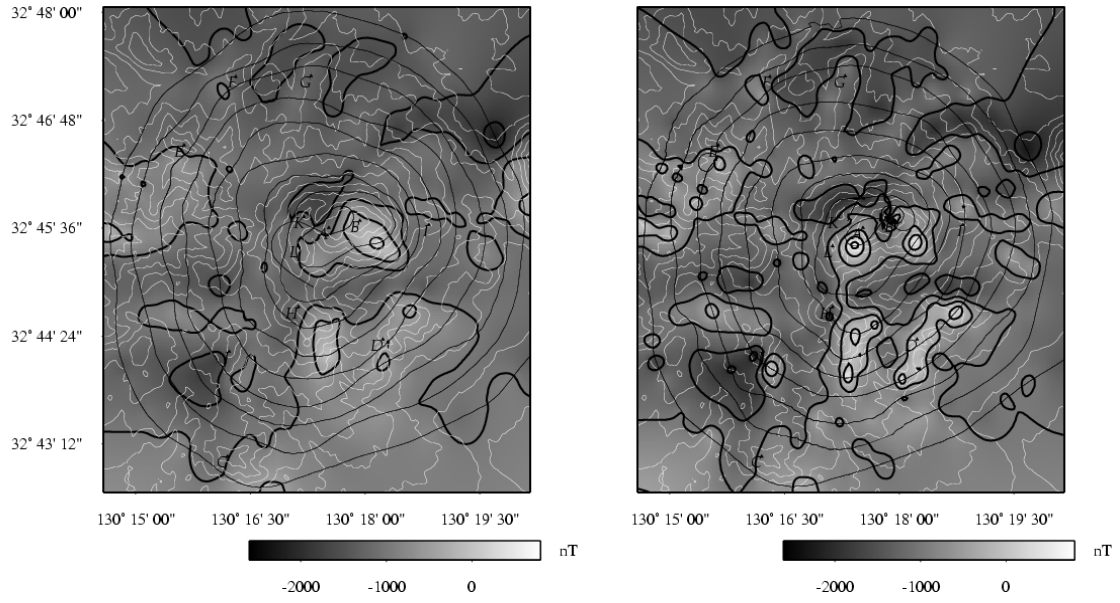


Fig.7 Residual anomalies (terrain corrected anomalies) when the terrain magnetization is assumed homogeneous 1.0A/m.

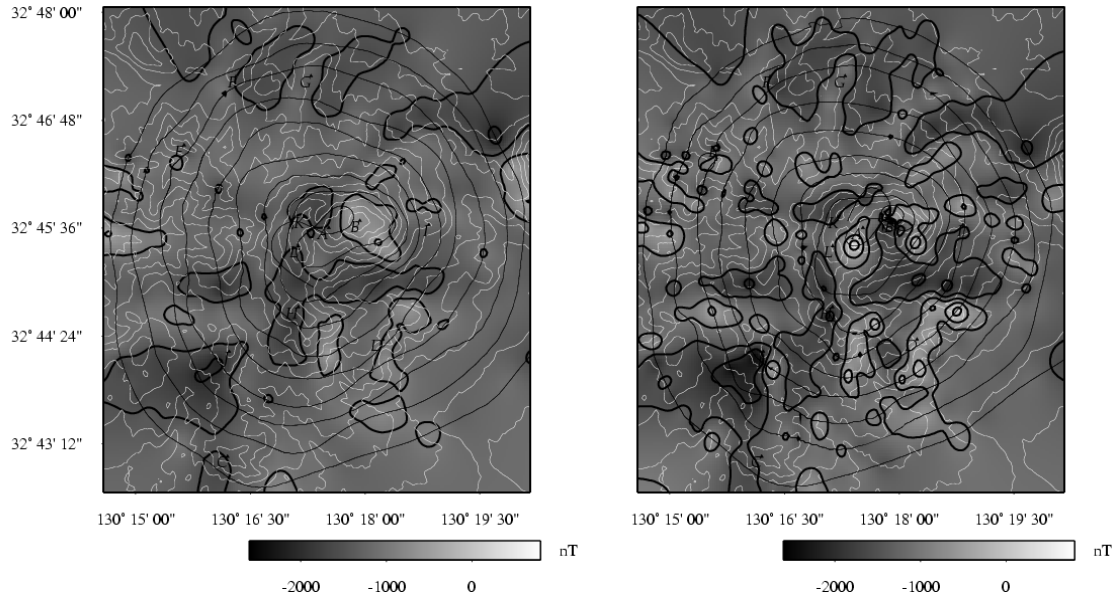


Fig.8 Residual anomalies (terrain corrected anomalies) when the terrain magnetization is assumed homogeneous 2.9A/m and 3.0A/m, respectively. The terrain magnetization was estimated in a sense of statistical average.

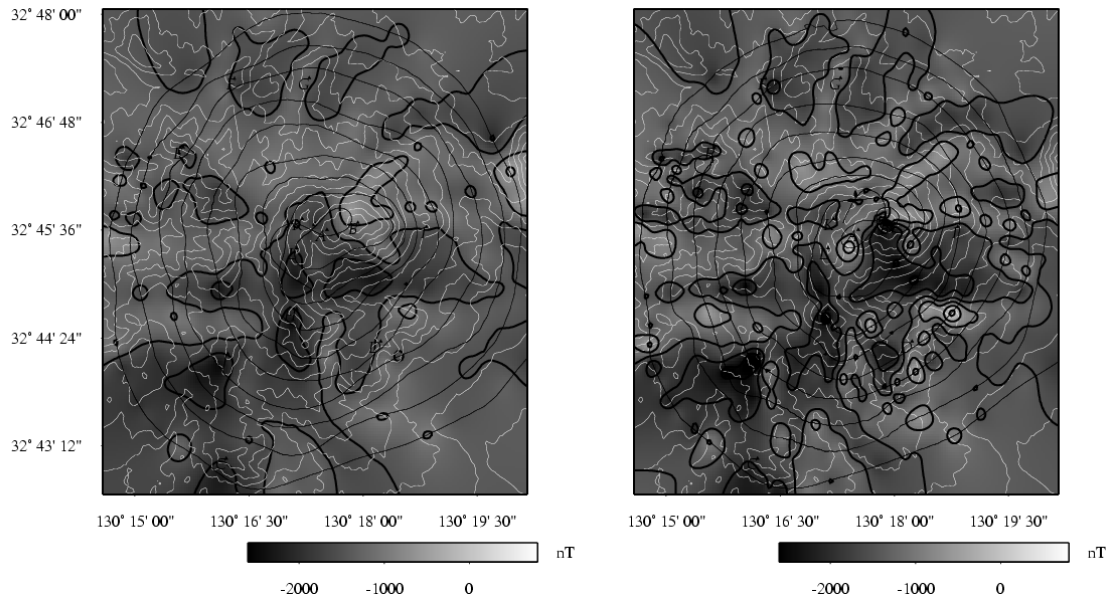


Fig.9 Residual anomalies (terrain corrected anomalies) when the terrain magnetization is assumed homogeneous 5.0A/m.

7. おわりに

この稿では、2002 年 9 月に実施された雲仙岳を中心とする空中磁気測量から磁気異常を報告した。

火山活動の予測や噴火予知という社会的に強い要請に応える為には、一つの噴火サイクルを通じての地磁気観測が、空間的に時間変化として把握できなければならない。すなわち、空中磁気測量の繰り返し測量実現に向けて、磁気異常分布および地下の磁化構造の解析技術革新を行う必要がある。

そこで今後は、まず繰り返し測量から得られた磁気異常分布を同じ高度で比較できるように、任意の高度における高精度な磁場分布を求めるモデルを構築する予定である。

謝 辞

この観測は長崎県防災航空飛行隊の献身的な協力支援の下に、防災ヘリコプター「ながさき」を使用させて頂きました。また数度に及ぶ予備飛行に対して、九州大学の松尾助手はじめ、実飛行に際して地上観測を九州大学地震火山観測研究センターの方々に支援していただきました。ここに感謝の意を表します。また観測に用いたセシウム磁力計を快くお貸し下さいました、東京大学理学研究科の濱野洋三教授に深甚の謝意を表し

ます。

企 画：田中良和・北田直人・清水 洋・松島 健
予備飛行調査：田中良和・北田直人・清水 洋・松島 健・松尾のり道

観測参加者：田中良和・北田直人・清水 洋・松島

健・大久保綾子・九州大学学生

記録整理・解析：大久保綾子・宇津木充

本 報 告 執 筆：大久保綾子・田中良和

参考文献

- 奥野孝晴・斉藤基生・池田和隆・佐藤徹(2001): 空中物理探査を利用した雲仙溶岩ドームの崩壊危険度予測評価, 地質調査所月報, 第 52 巻, 第 2/3 号, pp. 113-124
- 藤野敏雄・種子田定勝(1980): 雲仙火山岩類の岩石学的特徴, 九大理研報, 第 13 巻, 2 号, pp. 111-119
- 牧野雅彦・中塚正・森尻理恵・大久保泰邦・大熊茂雄・本蔵義守(1993): 相違なる高さにおいて観測された磁力値から磁気異常の三次元分布を求めること, 物理探査学会第 88 回学術講演会論文集, pp. 502-507
- 茂木透ほか(1995): 空中電磁法・全磁力測定による雲仙普賢岳及び眉山の地下構造, 火山, 第 40 巻, 4 号, pp. 263-276
- Nakatsuka, T. (1994): Aeromagnetic anomalies over the area of Unzen volcano, J. Geomag. Geoelectr., Vol. 46, pp. 529-540.
- Nakatsuka(1981): Reduction of Magnetic Anomalies

to and from an Arbitrary Surface., Vol. 34, No.5, pp.334-340.	Okuma et al.(1994): Magnetization intensity mapping in and around Izu-Oshima volcano, Japan, J. Geomag. Geoelectr., Vol. 46, pp.541-556.
Grauch(1987): A new variable magnetization terrain correction method for aeromagnetic data, Geophysics, Vol. 52, pp.94-107.	

Aeromagnetic survey over Unzen Volcano

Ayako OKUBO, Yoshikazu TANAKA*, Naoto KITADA*, Mitsuru UTSUGI*,
Hiroshi SHIMIZU**, and Takeshi MATSUSHIMA**

*Depart. of Geophysics, Kyoto University, Japan

**Faculty of Science, Kyushu University, Japan

Synopsis

We conducted helicopter-borne magnetic surveys over Unzen Volcano, southwestern Japan on September 18, 2002 in order to investigate the subsurface structure of Unzen graben and the cooling process of the lava dome formed in the latest eruption spanning between 1991 and 1995.

Unzen volcano started a phreatic eruption in November, 1990 at summit craters after a quiescence of 198 years. After intensive ash ejection in February 1991, a lava dome appeared at the eastern neighbor of the previous peak of Mt. Fugen in May, 1991. The lava dome, named Heiseishinzan, gradually grew on the eastern flank of Mt. Fugen and yielded frequent pyroclastic flows until the surface activity ended in 1995.

The survey consists of three flights of 1 hour for each. The first flight covers an area over Futsu, Chijiwa, and Kanahama faults, the major normal faults that form Unzen graben system. The second and the third flights cover the summit area of Unzen volcano with spiral trajectories at altitudes of 1000 and 500 ft, respectively. The spacing between the survey lines is about 500 m. Geomagnetic total field was recorded by an optical pumping magnetometer (GEOMETRICS) and an Overhauser proton magnetometer (GEM) installed in and over the sensor bird, which is suspended with a wire of 20 m long under the airframe. The sampling intervals of these magnetometers are 0.1 sec and 0.5 sec, respectively. While real time navigation was achieved by a portable GPS receiver with a PC monitor, precise positioning data of the sensor bird was obtained by the differential GPS technique with a time resolution of 1 sec.

Diurnal magnetic variations of extra-terrestrial origin were removed by subtracting the total field data recorded at a temporal station nearby. As a next step, we estimated the effect of surface topography using a statistical correlation method (Grauch, 1987) in order to model a deeper magnetic structure. In the present study, we propose a plausible model of magnetic structure beneath Unzen volcano.

Main features of the magnetic map are positive anomalies on the summit area of the volcano (Heiseishinzan lava dome and Mt. Fugen) and a negative anomaly on Unzen hot-spring area.

Keywords: helicopter-borne magnetic surveys, magnetic anomaly, Unzen volcano