

ヘリボーン空中磁気探査から推定される
雲仙西部地域の磁化強度分布

大久保綾子*・田中良和**・鍵山恒臣**・宇津木充**・神田 径*

(2006年4月13日受付, 2006年5月12日受理)

Magnetization Intensity Distribution in the Western Unzen Region, Kyushu, Japan,
Inferred from a Helicopter-borne Aeromagnetic SurveyAyako OKUBO*, Yoshikazu TANAKA**, Tsuneomi KAGIYAMA**,
Mitsuru UTSUGI** and Wataru KANDA*

A helicopter-borne, aeromagnetic survey was performed in October 2004 over the western Unzen region, Kyushu, Japan. The survey was flown at an altitude of about 1100 m above sea level along north-south survey lines and east-west tie lines, spaced 500 m and 1000 m apart, respectively. The observed aeromagnetic anomalies were reduced onto a constant surface of 1500 m above sea level. Then, a magnetization intensity distribution was estimated, assuming that it varies only laterally. The characteristics of the magnetization intensity distribution are summarized as follows; (1) The hydrothermally altered areas of Unzen hot spring, Ii-Dake, Shimo-Dake, and Kami-Dake show magnetization lows, which indicates that high temperature fluids associated with hydrothermal activities reduce the rock magnetization. These fluids are likely to migrate through E-W trending faults developed inside the Unzen graben. (2) Magnetization lows lie outside of the Unzen graben, corresponding to debris flow deposits and pyroclastic-flow deposits of the Older Unzen (500–150 ka). In contrast, magnetization highs are distributed in the northern part region of Azuma-Dake and Hachimaki-Yama and around Takaiwa-Yama, where the lava of the Older Unzen (500–300 ka) is exposed. (3) Magnetization lows, corresponding to fan deposits of the Older Unzen (500–300 ka), are distributed along the Chijiwa fault.

Key words: aeromagnetic survey, western Unzen region, magnetization intensity distribution, hydrothermal alterations

1. はじめに

火山活動と関連する熱構造・地質情報を明らかにすることを目的として、ヘリコプターを用いた空中磁気探査が近年多くの火山で行われている。例えば、Okuma *et al.* (1994) は、伊豆大島の精密な空中磁気データから磁化強度分布を求め、火山岩の熱水変質、マグマ溜りによる熱消磁の可能性を示唆した。海外においてもまた、Finn and Morgan (2002) が高分解能空中磁気データ解析・解

釈から、Yellowstone 地域の熱水活動に伴う火山岩の地質・熱変質状態を明らかにしている。

雲仙火山は、島原半島中央部に位置し、雲仙地溝と呼ばれる東西に横断する正断層帯で切断され、中心部ほど深く沈降している。従って、雲仙火山は、地溝帯の断層運動による沈降と火山噴火による成長を経ながら発達してきた火山である。このため、古期雲仙前期 (50–30 万年前) の噴出物は地溝の外側にまで分布しているが、古期

* 〒891-1419 鹿児島市桜島横山町 1722-19
京都大学防災研究所附属火山活動研究センター
Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Sakurajima-Yokoyama, Kagoshima 891-1419, Japan.

** 〒869-1404 熊本県阿蘇郡南阿蘇村
京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター

Aso Volcanological Laboratory, Graduate School of Science, Kyoto University, Kumamoto 869-1404, Japan.

Corresponding author: Ayako Okubo
e-mail: ayako@svo.dpri.kyoto-u.ac.jp

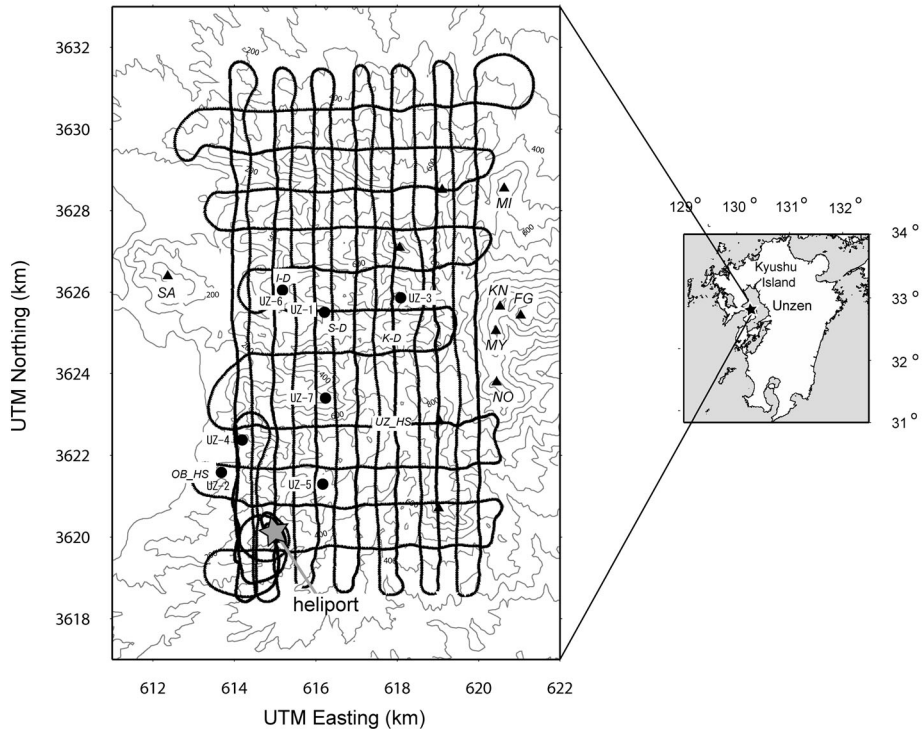


Fig. 1. Topographic map of the western Unzen region. The x and y axes indicate the Easting and Northing coordinates of the UTM zone 52 (central meridian=129 degrees E), respectively. Contour interval is 50 m. The DEM data with 50 m mesh (Geographical Survey Institute, 1999) was employed to produce this map. Bold lines indicate track-line paths of the aeromagnetic survey. Solid circles labeled as UZ-1 to -7 show the locations of drilling sites (NEDO, 1988; Fig. 4). I-D: Ii-Dake; S-D: Shimo-Dake; K-D: Kami-Dake; UZ-HS: Unzen hot spring; OB-HS: Obama hot spring; FG: Fugendake; MI: Maidake; KN: Kunimidake; MY: Myo-kendake; NO: Nodake; SA: Saruba-Yama. See also Fig. 4.

雲仙後期 (30-15 万年前) の噴出物は概して地溝帯の内側に堆積し, 新期雲仙 (15-0 万年前) の噴出物は, 雲仙東部地域に限られる (星住・他, 2002; Fig. 2)。また, 地表に見られる変質帯は, 雲仙温泉周辺ほか, 雲仙西部地域の下岳周辺, 上岳周辺および小浜温泉周辺に分布している (NEDO, 1988)。

雲仙火山における空中磁気探査は, 雲仙火山全域を覆うものとして, Nakatsuka (1994) の海拔高度 2,300 m のデータがある。このデータを用いて, Okubo *et al.* (2006) は, 先雲仙, 古期雲仙および新期雲仙の平均磁化をそれぞれ 1, 4.5 および 1 A/m と推定し, NEDO の地熱掘削井データと照合して雲仙地溝の大局的な磁化構造を求めた。その結果, 西部地域では, 地熱活動に伴う変質地域に対応する弱磁化が雲仙温泉, 下岳, 上岳の周辺に分布していることが明らかになった。この他, 普賢岳周辺 (Okubo *et al.*, 2005), 雲仙東部地域 (茂木・他, 1995) で低高度調査が実施され, 平成新山・国見・妙見・野岳の

低磁化や新焼・千本木・岩床・赤松谷溶岩の強磁化など詳細な磁化分布を明らかにしている。

本研究では, Nakatsuka (1994) の高高度なデータからは把握できなかった雲仙西部地域の詳細な磁化分布を推定するため, Fig. 1 に示す雲仙西部地域の概ね南北 14 km×東西 7 km の範囲の磁気測量を行った。

2. 探査概要

探査飛行の概要を Table 1 および Fig. 3 に示す。調査は, 雲仙西部地域を対象として, 南北の主測線 (間隔 500 m) と東西の交差測線 (間隔 1,000 m) 上を海拔高度平均 1,100 m で, 宇津木・他 (2005) と同様に, ヘリコプターを用いたバード吊り下げ方式により行った。このとき, Geometrics 社 G858 セシウム磁力計のセンサー 2 つをバードの上下に配置し, 0.1 秒間隔で全磁力を測定した。なお, 機体磁気の影響を避けるために第 1 センサーは機体から 40 m 下に, また第 2 センサーを 45 m 下に吊り下

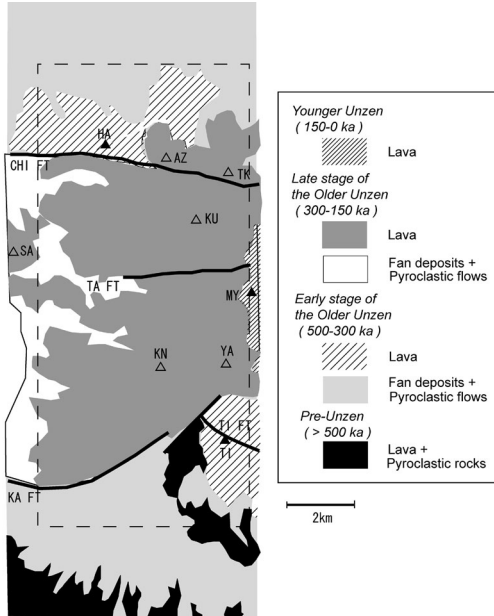


Fig. 2. Simplified geological map of the western Unzen region based on Hoshizumi *et al.* (2002). Major faults are taken from the Research Group for Active Faults of Japan (1991). The area bounded by broken lines indicates the study area.

げた。また、飛行コースに対しては、Garmin社のハンディGPSを用いてヘリコプターを誘導したが、バードの正確な位置は、地上とバード内に設置されたGPS (Leica SR520)を用いたディファレンシャル処理により求めた。磁力計の時刻は、フライト前後にGPS時計で管理された外部磁場信号によって校正している。

上下のセンサーで磁場勾配が求められ、解析された磁気構造の検証に用いることを当初目的としていたが、両センサーのデータから、ほぼ同じ磁気異常の空間分布が得られたため、以下の解析では、機体磁気の影響のより小さい第2センサーのデータを使用した。

3. データ処理

データ処理は、次の1)–3)の手順で行った。以下の解析では、磁化方向を現在の地球磁場の方向(西偏6度、伏角46.5度)と仮定している。

1) IGRF 磁気異常残差 (Fig. 4 (a))

まず、主として地球外部に起源する観測時の地磁気の日変化補正を行った。フライトを行った時間(午後1時40分～5時24分)の地磁気変化は40 nT以下であるため、小浜町のヘリポートに仮設した地上観測のリファレ

ンス点との差をとることで補正した。次に地球内部起源の地磁気主磁場成分を除去するために、各観測点におけるIGRF2000残差処理(Nakatsuka, 2003)を行い、観測面の下方に等価磁気異常を仮定する方法(牧野・他, 1993)に基づいて、海拔高度1,500 m面上のIGRF磁気異常残差を求めた。ここで、1,500 mは、東側と西側の標高差に注意し、3)のインバージョンの際の解の安定性を考慮した結果である。

2) 地形補正済み磁気異常 (Fig. 4 (b))

地形補正を行う目的として2つの側面がある。ひとつは、Fig. 4 (a)の分布に含まれる、地形起伏の作る磁気異常の影響を取り除くことで、インバージョンの際の解の安定性を図ることであり、もうひとつは、観測領域の平均磁化を求めることである。そこで、地表から海拔下1,200 mまでの磁化強度が一様であるとする地形モデルを仮定し、このモデルが作る磁気異常をFig. 4 (a)のIGRF残差磁気異常から差し引いた。この時、Grauch (1987)による相関法を用いて観測領域の平均磁化を計算したところ、4.0 A/mであった。次に、Fig. 4 (a)では磁気構造以外のより深部のソースによる影響が含まれているため、2元1次回帰分析(Nakatsuka, 2003)を用いて、1次傾向面(linear trend)を除去した上で、Fig. 4 (b)の地形補正済み磁気異常を求めた。ここで、東西、南北方向の独立変数に対する回帰係数はそれぞれ-19.0 nT/kmおよび-11.03 nT/kmであった。

3) 磁化強度図 (Fig. 5)

Fig. 4 (b)の地形補正済み磁気異常分布を説明するような磁化強度分布を、インバージョンによる磁化強度マッピング法(例えば、Okuma *et al.*, 1994)を適用して求めた。インバージョンに際しては、観測領域の縁辺部に現れるエッジ効果を避けるため、解析範囲を観測領域より広く(南北各1.5 km、東西各1.6 km)とり、200 mメッシュで解析を行った。Fig. 5は、インバージョンにより得られた分布に、地形補正の際に影響を除いた平均磁化4.0 A/mを加えた磁化強度分布図である。Fig. 5のモデルから計算された磁気異常と、Fig. 4 (b)の観測に基づく磁気異常との残差のRMSは3.8 nTであった。

4. 磁化強度分布の特徴と議論

今回の解析から得られた平均磁化値4.0 A/mは、Nakatsuka (1994)の雲仙全域の平均磁化2.9 A/mより大きくOkubo *et al.* (2006)が推定した古期雲仙の磁化強度4.5 A/mより小さい値である。雲仙の岩石磁気的研究としては、Tanaka *et al.* (2004)などがあり、その他においても多くの試料の自然残留磁化強度が測定されている(田中・私信; 岩崎, 2001)。それらによると、古期雲仙地

Table 1. Outline of the helicopter-borne aeromagnetic survey in the western Unzen region, Kyushu, Japan.

Survey date	October 13, 2004
Survey area	Fig. 1
Helicopter	Nakanihon Air Service AS350B3 type
Mean flight altitude	1100 m ASL
Survey lines	North-South direction (interval : 500m)
Traverse lines	East-West direction (interval : 1000m)
Positioning	Leica SR520 (sampling interval : 1.0 s)
Reference station	Obama-cho, Nagasaki Prefecture
Magnetometer utilized in this aeromagnetic survey	GEOMETRICS Inc. G-858 2 Optical pumping (sampling interval : 0.1 s)
Magnetometer utilized for monitoring of diurnal variation	GEM systems. Inc. GSM-19 Overhauser (sampling interval : 3.0 s)

域では、 $3.0\text{--}9.0\text{ A/m}$ の範囲にほぼ収まるため、平均磁化値 4.0 A/m は妥当と言える。

一般に、磁化強度分布と表層の地質には対応が見られる場合が多い。例えば、火山岩の種類にもよるが、地熱変質を受けた地域では、熱水活動によって、岩石中の磁性鉱物が失われることで、磁化が弱くなる（例えば、Finn and Morgan, 2002）。また扇状地地形では、溶岩と比較して相対的に弱磁化である火砕流・土石流が集積するため、低磁化域となる傾向がある（例えば、Okubo *et al.*, 2005）。

以下、磁気構造モデルの平均磁化値 (4 A/m) を基準として、低磁化域および高磁化域を定義し、得られた磁化強度分布をしてみる (Fig. 5)。 (1) 雲仙地溝内部では、(a) 高磁化域が分布しているが、(b) 雲仙温泉周辺 (c) 飯岳から下岳を経て上岳に至る地域周辺は、局所的な低磁化域となっている。Okubo *et al.* (2006) との大きな相違点としては、(d) 千々石断層沿いに顕著な低磁化域が分布する点が挙げられる。 (2) 地溝外部の磁化分布は、(e) 千々石断層北側、(f) 金浜・高岩山断層南側ともに $3\text{--}4.5\text{ A/m}$ を示している。各地域の特徴と解釈を以下に述べる。

4-1 地溝内部

(a) 高磁化域: $4\text{--}6\text{ A/m}$ の高磁化域が地溝内部に広く分布している。Okubo *et al.* (2006) の結果では、 $3\text{--}4$

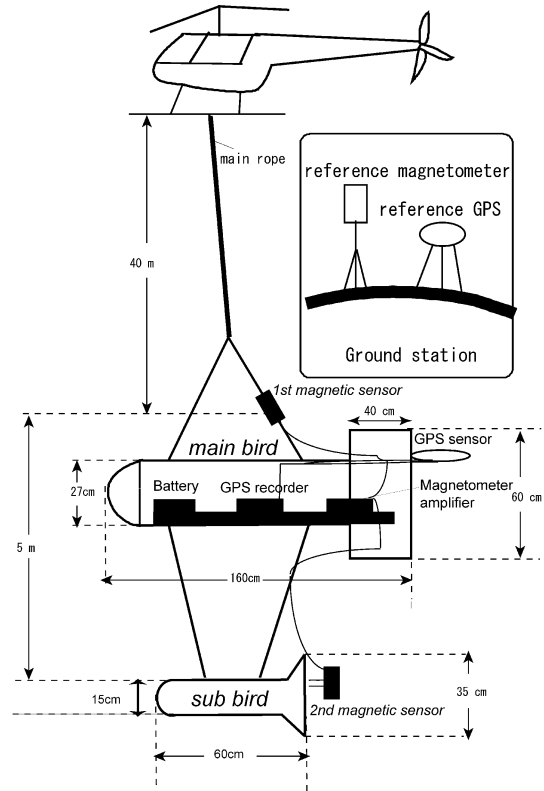


Fig. 3. Schematic diagram of the survey equipment utilized in this helicopter-borne aeromagnetic survey.

A/m 程度であったが、今回の結果では分解能が向上したため、それより $1.5\text{--}2.5\text{ A/m}$ 強い値が得られ、磁化強度のコントラストがより明瞭となった。星住・他 (2002) によると、古期雲仙の溶岩流は雲仙西部地域の地溝内部に厚く分布している。従って、この高磁化域は古期雲仙の溶岩流を反映したものと推定できる。

(b) 雲仙温泉周辺: 矢岳の西から南側にかけての雲仙温泉周辺地域において、顕著な低磁化域 (3 A/m 以下) が分布する。NEDO (1988) によると、雲仙温泉周辺は極めて活発な噴気活動を伴う地熱変質帯であり、中心部は白色珪化変質帯、その外周には白色粘土化変質帯が広がっている。また、鍵山・他 (1992) による島原半島浅部の電気伝導度調査からは、電気伝導度の高い領域がこの周辺に広がっている。これらのことから、熱水変質が広範囲に及んでいる事が唆される。

(c) 飯岳・下岳・上岳: 飯岳 (UZ-6) から下岳 (UZ-1) を経て UZ-3 南部の上岳にいたる地域に、低磁化域 ($3\text{--}4\text{ A/m}$) が存在する。これらの地域の低磁化の原因とし

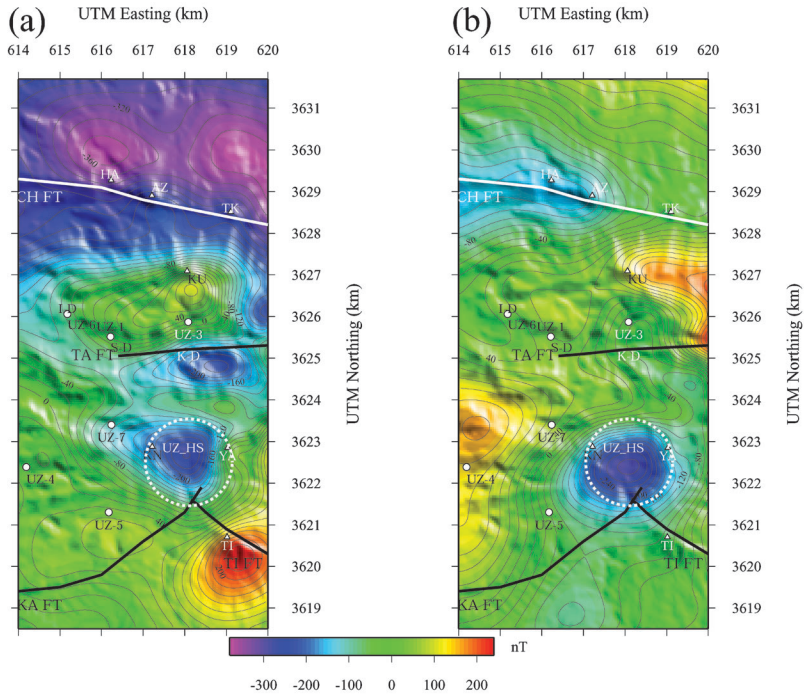


Fig. 4. (a) Total magnetic intensity anomalies (IGRF residuals) of the western Unzen region upward continued to the altitude of 1500 m ASL. Contour interval is 20 nT. (b) Terrain-corrected magnetic anomalies of the western Unzen region at the altitude of 1500 m ASL. Contour interval is 20 nT. Solid lines indicate normal faults, and Unzen hot spring is shown as a broken line after Hoshizumi *et al.* (2002) and the Research Group for Active Faults of Japan (1991). Illumination indicates topographic undulations. TK: Torikabuto-Yama; KU: Kusenbudake; YA: Yadake; TI: Takaiwa-Yama; AZ: Azumadake; HA: Hachimaki-Yama; CH FT: Chijiwa fault; TA FT: Take fault; KA FT: Kanahama fault; TI FT: Takaiwayama fault. See also Fig. 1.

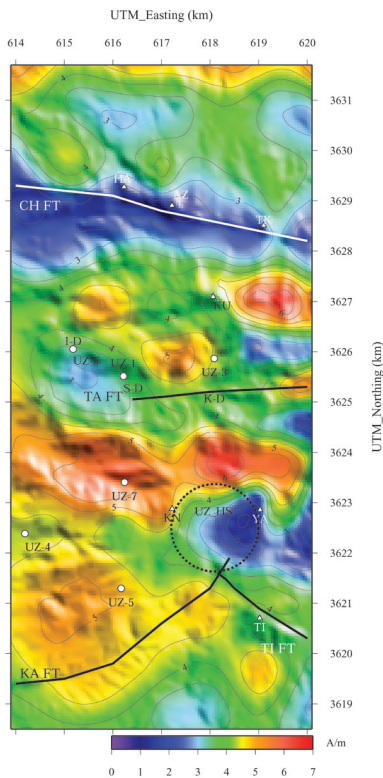


Fig. 5. Result of the magnetization intensity mapping. The terrain-corrected anomalies (Fig. 4 (b)) were used as the input data of inversion. The mean magnetization of 4.0 A/m calculated from the terrain correction was added to the result. Illumination indicates topographic undulations. Contour interval is 0.5 A/m. See also Fig. 4.

ては、熱水変質が考えられる。この根拠としては、ボーリングデータや、MT データ(鍵山・他, 2002)が挙げられる。すなわち、地熱掘削井のデータ(NEDO, 1988)によれば、海面下 800 m 付近での孔底温度は 200~250 度と高く、掘削コアの分析からも地熱変質が確認されている。また、MT 観測(鍵山・他, 2002)によれば、猿葉山、飯岳付近から東に伸びる領域の浅部でのコンダクタンスが 400~700 S と求められている。これは島原半島の平均的な値(250~300 S)より高く、熱水変質が広がっていると考えられている。また、この飯岳-下岳-上岳に至る低磁化域は岳断層(活断層研究会, 1991)と対応しており、断層系を通して、熱(水)が上昇することで岩石が変質を受け、弱磁性を示している可能性が示唆される。さらに、飯岳・下岳周辺に関しては、低位扇状地(活断層研究会, 1991)と対応しており、熱磁気による弱磁性の原因に加えて、堆積した火砕流・土石流もまた、弱磁性に関与していると考えられる。

(d) 千々石断層沿い: 千々石断層沿いに、2-3 A/m の顕著な低磁化域が分布する。この地域には地熱変質は見られず、九千部岳の噴火による噴出物が堆積しているほか、古期雲仙(50-15 万年前)の火山からの土石流や土砂崩れによる固形物が集積し、扇状地形を形成している(活断層研究会, 1991)。従って、これらの堆積物の分布が弱磁性の原因と考えられる。

4-2 地溝外部

(e) 千々石断層北側: 概ね 3-4 A/m の低磁化域が分布する。この領域もまた、地熱変質は見られず、古期雲仙火山前期(50-30 万年前)に、地溝の外にまで供給された火砕流や土石流の堆積物に対応している(星住・他, 2002)。そのため、ここでも同様に、火砕流や土石流起源の堆積物が弱磁化を引き起こしていると考えられる。

一方、4 A/m よりやや大きい高磁化域が吾妻岳・鉢巻山の北部一帯に認められる。この高磁化強度域は、Fig. 2 に示す地溝の外側に露出している古期雲仙前期(50-30 万年前)の溶岩の分布と対応が良い。

(f) 金浜・高岩山断層の南側: 概ね 3-4.5 A/m を示している。星住・他(2002)によると、高岩山断層の南側には、先雲仙火山岩類を覆って高岩山の溶岩流(50-30 万年前)が分布している。吾妻岳・鉢巻山の北部一帯に分布する古期雲仙火山前期(50-30 万年前)の溶岩とほぼ同じ磁化強度値を示していることから、ここでも同様に、古期雲仙火山前期(50-30 万年前)の噴出物が強磁化の原因となっていると考えられる。

5. おわりに

雲仙西部地域における局所的な磁化分布を推定するた

め、2004 年 10 月にヘリコプターによる空中磁気探査を実施した。その結果、従来の調査結果に比べて、より詳細な磁化構造の特徴が明瞭となった。本研究の成果は、以下のようにまとめられる。矢岳の西から南側にかけての雲仙温泉周辺で、また飯岳から下岳・上岳にいたる地域で低磁化が認められた。これらの地域は、岩石が熱水活動により熱変質を受けた地域と考えられる。一方、地熱兆候のない千々石断層の北側にも低磁化域が分布している。この地域は、地溝の外側に流出した古期雲仙火山前期(50-30 万年前)の堆積物が覆っている地域であり、これらの堆積物が弱磁性の原因と考えられる。既存の解析結果ではわからなかった新たな知見として、地溝内部において、千々石断層沿いに低磁化域が分布しており、土石流・火砕流が集積する扇状地形と対応していると考えられる。また、千々石断層の北側および高岩山断層の南側の古期雲仙前期(50-30 万年前)の溶岩が露出している地域では、強磁化であることが明らかとなった。

謝 辞

調査の実施にあたり、京都大学の北田直人博士、井上寛之氏にご協力頂き、バードの位置決定において、京都大学の倉敬宏助教教授にご協力頂いた。高知大学の田中秀文教授と熊本大学の渋谷秀敏教授には、雲仙古地磁気試料の NRM のデータを頂いた。また、京都大学の石原和弘教授には、原稿の改善でお世話になった。経費の一部は、平成 16 年度科学技術振興調整費「雲仙火山: 科学掘削による噴火機構とマグマ活動解明のための国際共同研究」(代表者: 宇都浩三博士)、科学研究費補助金特定領域研究「火山爆発のダイナミクス」計画研究課題 A 01 班「火山爆発の発生場と発生過程」(No. 14080205, 代表者: 田中良和教授)および 21 世紀 COE プログラム「災害学理の究明と防災学の構築」(No. 14219301, 代表者: 河田恵昭教授)の支援を得た。大熊茂雄博士(産業技術総合研究所)と西田泰典博士(北海道大学名誉教授)の 2 人の査読者には、適切なご指摘をいただき、原稿の改善に役立った。

以上の諸氏および関係諸機関に感謝の意を表す。

引用文献

- Finn, A. C. and Morgan, L. A. (2002) High-Resolution aeromagnetic mapping of volcanic terrain, Yellowstone National Park. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **115**, 207-231.
- Grauch, V. J. S. (1987) A new variable-magnetization terrain correction method for aeromagnetic data. *Geophysics*, **52**, 94-107.
- 星住英夫・宇都浩三・松本哲一・徐 勝・栗原 新・

- 角井朝昭 (2002) 雲仙火山の形成史—山麓掘削と組織的放射年代測定の成果. 月刊地球, **24**, 828–834.
- 岩崎祐樹 (2001) 雲仙地域の古地磁気および 0–5 Ma の日本の古地磁気永年変化の研究. 熊本大学修士論文.
- 鍵山恒臣・歌田久司・増谷文雄・山本哲也・村上英記・田中良和・増田秀晴・橋本武志・本蔵義守・三品正明・松尾のり道・清水 洋 (1992) 雲仙火山の MT 観測とそれによって推定されるマグマの上昇過程. 平成 3 年度科学研究費研究成果報告書 (代表者: 太田一也 (九州大学理学部)), 73–86.
- 鍵山恒臣・橋本武志・Wahyu Srigumoto・神田 径・田中良和・宇津木充 (2002) 電磁気観測から推定される雲仙火山におけるマグマと水の相互作用. 月刊地球, **24**, 858–865.
- 活断層研究会 (1991) 新編日本の活断層—分布図と資料. 東京大学出版会, 437 p.
- 国土地理院 (1999) 数値地図 50 m メッシュ (標高). 日本—Ⅲ, CD-ROM 版.
- 牧野雅彦・中塚 正・森尻理恵・大久保泰邦・本蔵義守・大熊茂雄 (1993) 相異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 回学術講演会講演論文集, **88**, 502–507.
- 茂木 透・田中良和・森川剛夫・日下部和宏・棚橋道郎・中塚 正・田中耕平・歌田久司 (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, **40**, 263–276.
- Nakatsuka, T. (1994) Aeromagnetic anomalies over the area of Unzendake volcano. *J. Geomag. Geoelectr.*, **46**, 529–540.
- Nakatsuka, T. (2003) Library software for geophysical data processing and representation. *Geological Survey Japan Openfile Report*, no. 400, 86 p.
- NEDO: 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1988) 地熱開発促進調査報告書 No. 15 雲仙西部地域. 1060 p.
- Okubo, A., Tanaka, Y., Utsugi, M., Kitada, N., Shimizu, H. and Matsushima T. (2005) Magnetization intensity mapping on Unzen Volcano, Japan, determined from high-resolution, low-altitude helicopter-borne aeromagnetic survey. *Earth Planets Space*, **57**, 743–753.
- Okubo, A., Nakatsuka, T., Tanaka, Y., Kagiya T. and Utsugi, M. (2006) Aeromagnetic constraints on the sub-surface structure of the Unzen Graben, Kyushu, Japan. *Earth Planets Space*, **58**, 23–31.
- Okuma, S., Makino, M. and Nakatsuka T. (1994) Magnetization intensity mapping in and around Izu-Oshima Volcano, Japan. *J. Geomag. Geoelectr.*, **46**, 541–556.
- Tanaka, H., Hoshizumi, H. Iwasaki, Y. and Shibuya, H. (2004) Applications of paleomagnetism in the volcanic field: a case study of the Unzen Volcano, Japan. *Earth Planets Space*, **56**, 635–647.
- 宇津木充・田中良和・鍵山恒臣・井上寛之 (2005) 九重火山における高密度空中磁気観測. 科学研究費特定領域研究 (領域番号 422) 「火山爆発のダイナミクス」平成 16 年度研究成果報告書 (代表者: 井田喜明 (兵庫県立大学教授)), 77–83.

(編集担当 小川康雄)