

中国地方の第四紀火山・大山における簡易地磁気伏角測量

宇都智史

京都大学大学院理学研究科

要 旨

第四紀火山・大山（鳥取県）において、伏角計（dip circle）を用いた地磁気伏角の簡易測量を行なった。山体の帯磁による標高の増加に伴う伏角変化が確認できた他、山体中心部の溶岩円頂丘・弥山の麓で、伏角が減少することが分かった。過去に行なわれた全磁力測定結果（宮腰他，1985）では、この伏角が減少する付近で全磁力異常値の正負が反転しており、二つの成分の空間分布に対応が見られた。これらの地磁気異常は地下の構造（山体下に潜在する小規模カルデラ？）に起因する可能性がある。

キーワード： 大山火山、地磁気伏角、伏角計、小規模カルデラ、地磁気異常

1. 序

大山火山は中国地方第一の高峰として鳥取県西部に位置し、東西約 35km、南北約 30km、総体積 120km³を超える大型の第四紀複成火山である。大山火山の活動は更新世中期以降に始まり、少なくとも 2 万年前以降まで続いたが、現在は活発な火山活動は見られない。その活動期間の前半には、少なくとも 7 枚の厚い溶岩流を流出するとともに広大な裾野を形成する溝口凝灰角礫岩を堆積させた。後半には 1～数万年おきに多量かつ多数の火砕物を噴出し、弥山（1711m）を始めいくつかの溶岩円頂丘を形成した（赤木，1973；津久井，1984）。その形成過程については不明な点が多く、大規模なカルデラを裏付ける事実は現在のところ確認されていないが、直径数 km の小規模なカルデラが弥山の下に存在する可能性が指摘されている（津久井，1984；宮腰・他，1985）。

日本海海岸線と並行するように分布する山陰地方の地震活動（佃他，1972）の帯沿いに大山火山は位置するが、山体下及びその周辺はほとんど地震活動が見られない地震の空白域でもある（西田他，1998）。2000 年鳥取県西部地震（M7.3）は大山火山の西方

で発生した（Fig. 1a）。その余震分布が、孝霊山から擬宝珠山へと連なる大山の側火山列と並行するのは大変興味深い。また、地震発生後には、山体下を避けるように大山の南東側で余震活動が誘発されている（西田・安藤，2002）。

山陰地方においては Miyakoshi and Suzuki（1978）を先駆として、地震発生域と地殻電気比抵抗構造との関連を明らかにするため、広帯域 MT 法（例えば、塩崎他，1999a；笠谷他，2002；Oshiman et al., 2003 など）やネットワーク MT 法（塩崎他，1998，1999b）による調査が進められ、地殻内流体の存在を示唆する低比抵抗領域が地震発生域近傍で検出されている（大志万，2002）。

地震空白域としての大山火山においても、2000 年から 2002 年にかけて鳥取大学工学部と京都大学防災研究所を中心に、山体を南北に縦断する約 30km の測線上で広帯域 MT 探査が実施された（塩崎他，2003）。ほぼ東西方向の走向を仮定した 2 次元構造解析の結果、大山の山体を挟む 2 観測点間の地下 5～15km 付近に 10Ωm 程度の低比抵抗領域が見出された（宇都他，2003）。これは、恐らく電氣的に良導体であると考えられるマグマ溜りを想定する深度としても妥当であるが、定かではない。

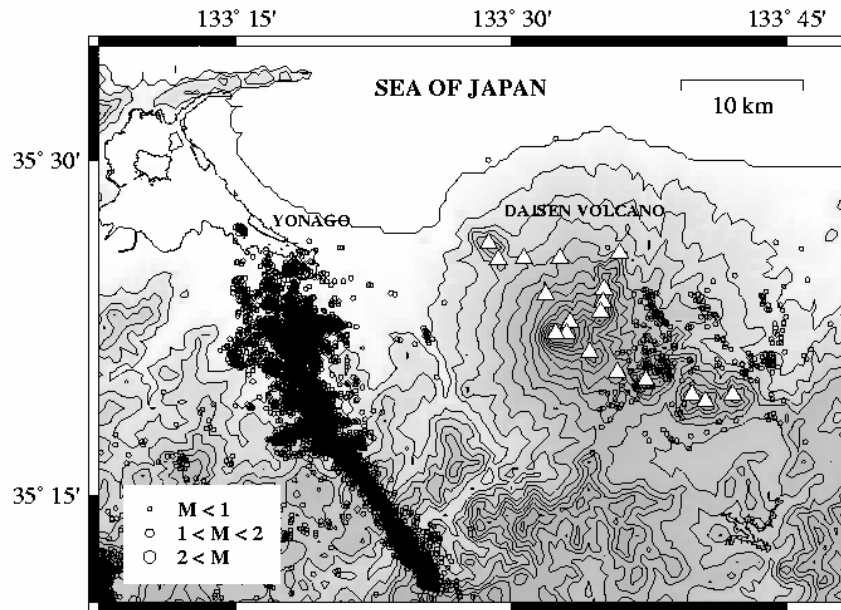


Fig. 1a Open circles indicate seismicity around Daisen volcano in 2000, the aftershocks of the 2000 Western Tottori earthquake ($M=7.3$) in the southern area of Yonago. The hypocenter data are from Tottori Observatory, RCEP. Seismicity is inactive around Daisen volcano. Distribution of the parasitic volcanoes, mainly lava domes (open triangles), is almost parallel with the aftershock distribution.

電磁探査においては、static shift や galvanic distortion など、浅部構造の不均質すなわち 3 次元性による影響は無視できないものであり、それらを考慮する際に表層の地質背景は確実に押さえておかねばならない。特に激しい変質・変形を受けてきた火山地域などでは、取得データの解釈を誤る恐れがある。

今回測定した地磁気三成分の一つである伏角は、火山体上では山体の帯磁により顕著な変化を示し、標高が増加するほど大きくなる。例えば、浅間山（水上, 1937）では 49° から 53° 、三原山（Rikitake, 1951）では 46° から 56° という大きな変化を示し、今回用いたような古典的な伏角計（dip circle）でも検出可能な範囲である。大山火山では既に宮腰他（1985）による全磁力の地表測定が行われており、その結果から山体中心ともいべき溶岩円頂丘・弥山の下に直径数 km の小規模カルデラ存在の可能性を示唆している。そして、全磁力異常値の正負が反転する付近（元谷）は、2001 年に広帯域 MT 観測点が設置された所でもある。山体を挟む二つの観測点は僅か約 3km しか離れていないにも拘らず、1 秒以降の長周期帯において、南北の電場と東西の磁場により求められる成分の探査曲線の傾向が異なるという観測事実がある。

以上の事を踏まえ、大山火山山体とその周辺の帯

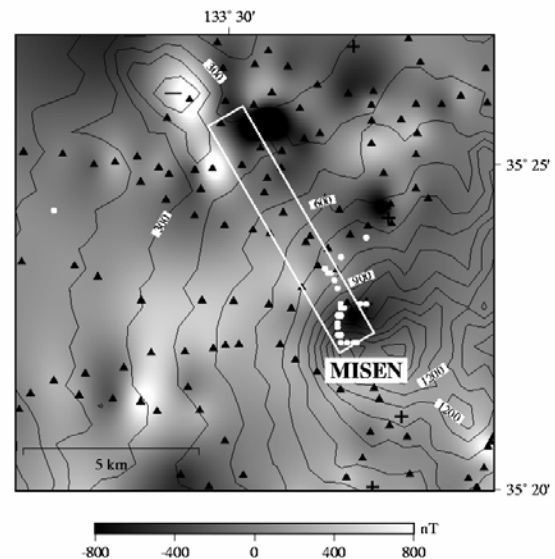


Fig. 1b Measurement sites of the geomagnetic inclination (white circle), the total intensity (Miyakoshi et al., 1985, solid triangle) and MT (bold cross). The geomagnetic total intensity anomaly is expressed with gradation. A white rectangle corresponds to the inclination survey area in Fig. 3.

磁状況を調査し、比較的浅部の地下構造（具体的には弥山下に潜伏している可能性のある小規模カルデラの縁辺部）に関する情報を得る事が、本調査の目

的である。これは大山火山の電気比抵抗構造の研究を今後進めていく上で、有益な資料となり得ると考えている。また、本調査は、最少の人員（一名）と最少の装備でいかに調査を行なうか、という事の模索でもある。

2. 測定器械及び方法

伏角の測定にはアナログな伏角計を用いた（Photo 1）。その構造は極めて単純であり、磁針と磁針支持枠、支持台とから成り、磁針は水平面及び鉛直面内において自由に回転する事が出来る。16～18 世紀の古典的測定は全てこの伏角計によって行なわれている。

本調査で用いられた伏角計は、防災研究所工作室において製作した。磁針には室内理科実験用のものを流用し、支持枠及び支持台は真鍮製である。支持台の回転軸は三脚への取付が可能のように加工されている。測定時には目盛の読取を容易にするため、



Photo 1 The dip circle used in this study.

Table 1 Localities of measurement site and the geomagnetic inclination.

#	latitude	longitude	alt. (m)	Inclination (deg)								average
2	35 ° 23 ' 35.2 "	133 ° 32 ' 4.4 "	834	48	48	49	51	50	48	48	50	49.0
4	35 ° 22 ' 48.6 "	133 ° 32 ' 9.7 "	1226	50	50	49	49	50	49	50	50	49.6
5	35 ° 22 ' 14.8 "	133 ° 32 ' 19.4 "	1690	51	52	52	52	51	52	53	52	51.9
6	35 ° 22 ' 17.0 "	133 ° 32 ' 7.6 "	1617	51	53	53	53	51	53	53	53	52.5
8	35 ° 22 ' 52.5 "	133 ° 32 ' 6.5 "	1175	47	49	49	49	48	48	50	49	48.6
9	35 ° 23 ' 20.0 "	133 ° 31 ' 53.6 "	828	51	49	49	49	50	49	49	51	49.6
10	35 ° 24 ' 17.6 "	133 ° 26 ' 42.9 "	151	51	51	49	49	50	50	49	49	49.8
12	35 ° 23 ' 20.1 "	133 ° 31 ' 53.2 "	849	50	49	48	48	50	49	48	49	48.9
13	35 ° 23 ' 12.4 "	133 ° 31 ' 57.9 "	944	48	48	49	49	48	48	50	49	48.6
14	35 ° 23 ' 5.6 "	133 ° 32 ' 1.6 "	990	48	48	50	49	48	47	49	49	48.5
15	35 ° 22 ' 53.1 "	133 ° 32 ' 6.7 "	1179	49	49	51	50	50	51	51	51	50.3
16	35 ° 22 ' 48.4 "	133 ° 32 ' 6.5 "	1263	50	50	51	51	49	49	52	51	50.4
17a	35 ° 22 ' 16.0 "	133 ° 32 ' 24.0 "	1718	53	54	54	54	52	52	54	54	53.4
17b	35 ° 22 ' 16.0 "	133 ° 32 ' 24.0 "	1718	52	52	52	52	52	52	53	53	52.3
17c	35 ° 22 ' 15.7 "	133 ° 32 ' 23.0 "	1706	53	53	53	53	53	52	55	54	53.3
19	35 ° 22 ' 17.0 "	133 ° 32 ' 7.5 "	1625	52	52	52	52	52	52	53	53	52.3
20	35 ° 22 ' 22.2 "	133 ° 32 ' 5.8 "	1623	52	53	52	52	51	51	54	53	52.3
21	35 ° 22 ' 24.1 "	133 ° 32 ' 3.9 "	1614	53	53	51	50	51	51	51	51	51.4
22	35 ° 22 ' 29.4 "	133 ° 32 ' 3.0 "	1542	50	50	53	52	51	51	52	52	51.4
23	35 ° 22 ' 34.4 "	133 ° 32 ' 3.5 "	1451	52	51	49	49	51	51	50	50	50.4
24	35 ° 22 ' 39.1 "	133 ° 32 ' 3.5 "	1391	49	49	52	51	52	51	51	51	50.8
25	35 ° 22 ' 47.1 "	133 ° 32 ' 6.3 "	1270	52	51	49	48	50	50	50	50	50.0
26	35 ° 22 ' 49.8 "	133 ° 32 ' 33.6 "	1060	49	48	48	48	49	48	48	47	48.1
27	35 ° 22 ' 52.9 "	133 ° 32 ' 31.5 "	1045	50	49	48	47	49	49	47	48	48.4

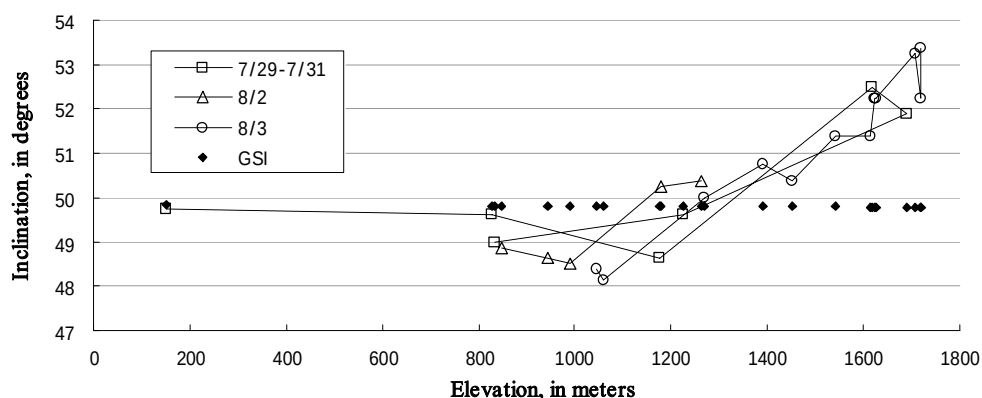


Fig. 2 Plot of the inclination vs. elevation. Different open symbols ($\square$, $\triangle$, $\circ$) represent measured data, and solid diamonds represent approximation calculated from the geomagnetic survey data (2000) in whole Japan by GSI (Geophysical Survey Institute). The GSI values can be considered as standard geomagnetic inclination in absence of the geomagnetic anomaly caused by the Daisen volcano edifice.

透明な目盛盤（全円分度器）の裏面に市販のミラーシートを貼り、風除けとして磁針支持枠には透明なアクリル板のケースを被せた。また、支持台上には簡易水準器が取り付けられており、これにより水平面を合わせた。

近年の伏角の測定には GSI 型磁気儀や DI メーターなどの精密測器が用いられるのが普通であるが、今回このような簡易な器械を用いたのは、前述のように一般に火山体上では伏角が“度”のオーダーで大きく変化するため、大体の傾向の検出が期待できたからである。また、人手を懸けずに峻険な大山山中を徒歩により連日調査するには、器械は軽量で単純、なおかつ電力の供給が不要であるものが望ましかった、という現実的な理由もある。

測定手順は次のようである。すなわち、目盛盤を垂直にして支持台を水平面で回転させ、磁針が垂直に立つ位置を求める。この位置から更に 90° 支持台を回した時に磁針が水平となす角度が伏角である。しかし、この場合の測定値には幾つかの誤差が含まれており、次の 6 つが考えられる。

- ①磁針の回転軸と目盛盤中心のずれ
- ②支持枠が水平でない
- ③目盛盤が垂直でない
- ④目盛の読取誤差
- ⑤磁針の形状の軸と磁石としての軸の不一致
- ⑥磁針の重心と回転軸の不一致

目盛盤及び支持台を回転軸周りに 180° 反転させた各々の場合で、磁針の両端の目盛を読み取ることに、1 測点において計 8 つの値を得、今回はこ

の単純な平均値をその場の伏角値とした。なお、目盛盤の目盛は 0.5° 刻みであるが、 0.5° 以上は繰り上げて目盛の読みは 1° までとした。以上により①から③の器械誤差と、充分ではないが④の目盛読取誤差については減じられたと考えている。⑤については磁針の磁化を反転させて、⑥については磁針を裏返して、それぞれ同様の測定を行いその誤差を除去する必要がある。しかし、伏角計の磁針の回転軸と軸受部分は、磁針が滑らかに回転するように微調整を要するうえ、支持枠からの磁針の取り外しを繰り返す事によって調査期間中に軸部が損傷する恐れがあるため、これらの作業は避けた。⑤及び⑥に因る誤差についての補正は行っていないが、磁気異常の要因となる物が周囲に無い状況で幾つかの地点で測定を行い、後述の国土地理院による近似式より求めたその場の伏角値と比較して、度のオーダーで違わなかった事を確認している。

3. 調査結果

2004 年 7 月 29 日から 8 月 3 日にかけて、主に火山体中心部の溶岩円頂丘・弥山上の夏山登山道沿いに伏角測量を行った。また、山体の影響を受けない標準的な伏角値を確認するため、山体より約 10km 北西に離れた地点（鳥取県西伯郡大山町大谷）においても測定を行なった。台風 10 号の接近による悪天候のため、調査期間の半分は待機状態であり、得られた測点数は約 30 点程度であった。測定点の座標、測定値の一覧を Table 1 に示す。測定点座標はハンディ GPS により得たものである。

Fig.2 は各測定点の標高に対する伏角の値をプロ

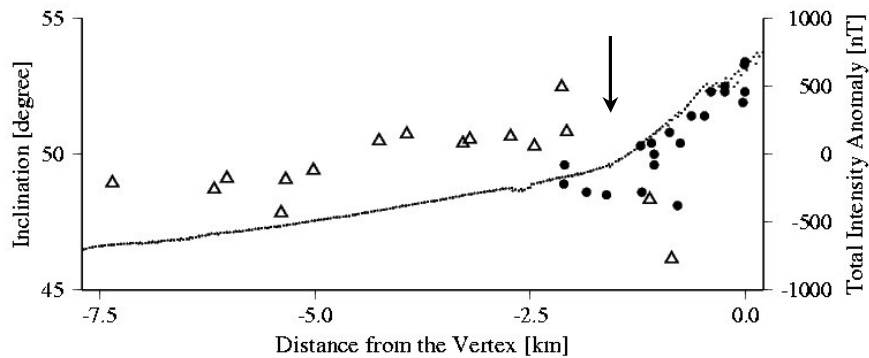


Fig.3 Comparison between the inclination (solid circle) and total intensity anomalies (Miyakoshi et al., 1985, open triangle) distribution along “Natsuyama-tozando” path on Daisen volcano. The topography is described with dot line. An arrow indicates the point at which gradient of the slope changes remarkably.

ットしたものである。頂上にある鉄筋構造の非難小屋や風力発電設備の近傍で測った値は、全体の傾向より明らかに外れるので除いてある。GSI 値は国土地理院による全国の磁気測量結果（2000 年値）を用いた近似式から計算された伏角値であり、大山火山の帯磁による地磁気への影響が無い場合の標準的な値と考えてよく、大山火山周辺では 49.8° となる。なお、この計算には国土地理院ホームページ上の地磁気計算プログラムを利用した。

Fig.2 より、標高 1000m 付近より山頂までは、標高の増加に伴い伏角が大きくなっていくという、火山体一般に見られる変化が確認できる。その変化の幅は約 4° である。更に、標高 800–1000m 付近においては標準値よりも伏角は小さくなる傾向がある。

4. 考察

得られた結果について注目すべき点は、標高 800 ~ 1000m 付近で伏角が標準値よりも小さくなる事であろう。これらの減少傾向は、Fig.2 に示したように 8 月 2 日と 3 日の 2 日間の調査で見出されたものであり、一時的な器械の不具合などではなく、この場所の地磁気異常を示すものであると考えられる。Fig.3 は大山夏山登山道に沿う空間分布プロファイルである。プロファイルの位置は Fig.1b の白線枠内に示されている。大山火山は標高約 800m までは海岸から平均勾配 $2.5^{\circ} \sim 3.0^{\circ}$ の緩傾斜を成すが、これより上では平均勾配 30° の急斜面であり、この傾斜の変換点 (Fig.3 中の矢印の位置) は主に火山砕屑物から成る山麓と溶岩から成る山体中心部との境界に対応している (津久井, 1984)。伏角が減少する傾向が見られたのはこの傾斜変換点近傍においてであり、この事は何らかの因果関係を示唆するものであ

る。

さらに宮腰・他 (1985) による全磁力異常値も合わせて Fig.3 にプロットした。なお、この異常値は、大山より東へ約 60km 離れた鳥取微小地震観測所 (当時) の同時刻の全磁力連続観測データを基準値として、時間変化の補正を行なったものである。全磁力異常分布についても、前述の傾斜変換点において全磁力異常値が山頂へ向けて正から負へと転じている。宮腰・他 (1985) により指摘されているように、小規模カルデラの北側縁辺部がこの近傍に存在し、磁気異常の原因となっている可能性があるだろう。

この磁気異常の詳細について議論し得るほどには、得られたデータは質・量ともに充分ではない。しかし、今回は諸事情によりその利点を活かしきれなかったが、本論のような簡易な器械・手段によっても何某かの異常を捉えることは出来るようである。今後は測点分布の面的展開に努め、伏角及び全磁力異常分布に現れた、大山火山の傾斜変換点付近の磁気異常について再検討する予定である。

謝 辞

本調査で用いた伏角計の製作には、地震予知研究センター技術補佐員・松尾成光氏に多大な御助力を頂きました。ありがとうございました。

防災研究所工作室・三浦勉氏、巨大災害研究センター・川方裕則助手、地震予知研究センター (現・地震防災研究部門)・吉村令慧助手には、有意義な御助言を頂きました。調査の現地では、大山頂上非難小屋管理人の渡辺一夫氏、著者鳥取大学在学時以来の親友・渡辺友範氏には宿泊等の面で、大変御世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 赤木三郎 (1973) : 大山火山の地質, 財団法人日本自然保護協会調査報告, 45, 9-32.
- 宇都智史・塩崎一郎・大志万直人・笠谷貴史・吉村令慧・鍵山恒臣・橋本武志 (2003) : 大山火山の電気比抵抗構造, 第 114 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会講演予稿集, C22-09.
- 大志万直人 (2002) : 西日本の電気伝導度構造, 月刊地球, 号外, 38, 82-90.
- 笠谷貴史・大志万直人・塩崎一郎・中尾節郎・矢部征・近藤和男・藤田安良・宇都智史・吉田賢一 (2002) : 兵庫県北部域での地殻比抵抗構造, 京都大学防災研究所年報, 45, B, 571-576.
- 塩崎一郎・西垣俊宏・山口高広・村上英記・大志万直人・上嶋誠・山口覚・歌田久司・西田良平・住友則彦 (1998) : 中国地方におけるネットワーク MT 法観測, 東京大学地震研究所彙報, 73, 3/4, 319-344.
- 塩崎一郎・大志万直人・藤原茂樹・福本隆史・西垣俊宏・矢部征・住友則彦 (1999a) : MT 法を用いた山陰地方東部の深部比抵抗構造探査の概要, 京都大学防災研究所年報, 42, B-1, 189-201.
- 塩崎一郎・西垣俊宏・大志万直人・村上英記・上嶋誠・山口覚・歌田久司・住友則彦 (1999b) : ネットワーク MT 法観測から得られた中国地方東部の電気比抵抗構造(序報), 鳥取大学工学部研究報告, 30, 1, 49-60.
- 塩崎一郎・宇都智史・大志万直人・鍵山恒臣 (2003) : 中国地方の第四紀火山の深部比抵抗構造に関する研究, 東京大学地震研究所広報, 40, 2-7.
- 津久井雅志 (1984) : 大山火山の地質, 地質学雑誌, 90, 643-658.
- 佃為成・中尾節郎・岸本兆方 (1976) : 鳥取地方の最近の地震活動について, 京都大学防災研究所年報, 19, B-1, 1-12.
- 豊島吉則 (1973) : 大山火山の地質, 財団法人日本自然保護協会調査報告, 45, 43-54.
- 西田良平・中尾節郎・石賀崇・西上欽也 (1998) : 鳥取県東部及びその周辺の地震活動について, 京都大学防災研究所年報, 41, B-1, 1-9.
- 西田良平・安藤和也 (2002) : 山陰地方の地震活動, 月刊地球号外, 38, 136-143.
- 水上武 (1937) : 浅間火山に於ける磁気(伏角)測量, 地震, 第 9 卷, 第 11 号, 479-491.
- 宮腰潤一郎・西田良平・岡田昭明・中川一郎 (1985) : 大山火山形成過程の地球物理的手法による研究, 昭和 59 年度文部省科学研究補助金(一般研究 C)研究成果報告書.
- 力武常次 (1972) : 地球電磁気学, 岩波書店, 472pp.
- 力武常次・山崎良雄・田中秀文 (1978) : 地球物理学実験と演習, 学術出版センター, 178pp.
- Miyakoshi, J. and A. Suzuki (1978): Geomagnetic Induction Study of Seismically Active Fault along the Southwestern Coast of the Sea of Japan, J.Geomag. Geoelectr., 30, 549-560.
- Oshiman, N., K. Aizawa and I. Shiozaki (2003): Deep crustal resistivity structure in and around the focal area of the 2000 Tottori-ken seibu earthquake, Japan, IUGG2003, JSA. 10/30 P/D-005.
- Rikitake, T. (1951): The Distribution of Magnetic Dip in Ooshima(Oo-sima) Island and Change that Accompanied the Eruption of Volcano Nihara, 1950, Bull. Earthq. Res. Inst., 29, 161-181.
- Rikitake, T. and Y. Honkura (1985): Solid Earth Geomagnetism, TERRAPUB, Tokyo, 384pp.

**Simple Measurements of the Geomagnetic Inclination on Daisen Volcano,
a Quaternary Volcano in the Chugoku Region, Southwestern Japan**

Tomofumi UTO

Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

Daisen volcano, a vast Quaternary composite volcano is situated in western Tottori prefecture, southwest Japan. I carried out measurements of the geomagnetic inclination on the volcano, to be more exact, Misen lava dome. It is suggested that a small-scale caldera submerges under the lava dome (Tsukui, 1984), and the total intensity data of the geomagnetic field also implied the existence (Miyakoshi et al., 1985). Simple dip circle was used for measurements of the inclination. It is very handy and light, and in need of no electric supply. I tried whether the resultant geomagnetic anomaly of the caldera can be found out with the equipment.

Keywords: Daisen volcano, geomagnetic inclination, dip circle, small-scale caldera, geomagnetic anomaly