



Title	地下構造からみたカルデラの分類 : 三宅島2000年噴火に関連して
Author(s)	横山, 泉; YOKOYAMA, Izumi
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 65, 157-166
Issue Date	2002-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.65.157
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14310
Type	departmental bulletin paper
File Information	65_p157-166.pdf



地下構造からみたカルデラの分類 ——三宅島 2000 年噴火に関連して——

横山 泉*

(2001 年 12 月 20 日受理)

Classification of Calderas Based upon Subsurface Structure with Relation to the 2000 Miyakejima Eruption

Izumi YOKOYAMA

(Received December 20, 2001)

Calderas are circular depressions, deep or shallow, in volcanic areas. Originally the term caldera was defined by morphology in the 19th century. According to increasing knowledge, we should reexamine and modify the definition. Once the present author proposed the classification of volcanic structures based upon gravity anomalies, high anomaly type caldera, non anomaly or stratovolcanoes, and low anomaly type caldera. In the present paper, calderas are classified in high anomaly type, "morphological caldera", and low anomaly type. The calderas of high gravity anomaly type generally originated from basaltic magmas such as Hawaiian volcanoes and Izu-Ooshima volcano. Those of low gravity anomaly type originated from silicic magmas accompanied with a large amount of pyroclastic material such as Krakatau and Aira calderas. On the other hand, morphological calderas don't manifest any gravity anomalies and probably may have been formed by surface or shallow volcanic activities.

The gravity anomalies on Miyakejima volcano obtained in 1963 are newly analyzed to examine the subsurface structure of the volcano island previous to the 2000 collapse of its summit crater. Its density structure proves to be not locally anomalous expressing undulations of the basements. This means that the summit crater was not a structural caldera but a morphological caldera. The 2000 Miyakejima eruption caused collapses of the summit crater in a short time. This may have originated from lateral intrusions or downward retreats of magmas.

Fernandia volcano, Galapagos Islands has a caldera, probably of high gravity anomaly type, and the 1968 eruption caused an additional collapse at its bottom. In comparison with Fernandia volcano, we may say that Miyakejima volcano may be at the beginning of formation of a new caldera of high gravity anomaly type.

*現住所：〒186-0002 東京都国立市東1-17-7-1304, e-mail: iyokoya@aol.com

I. はじめに

“カルデラ”の定義は明瞭でない。一般に、火山地域にある円形凹地を言う。スペイン語の語源によれば、平たい鍋状よりはむしろ深鍋状であるが、これは凹地の周壁の勾配が急であることを意味している。この急勾配な周壁がその形成機構に関係している場合もあり、形成後の長年月の間の浸食・崩落の結果である場合もある。一般に後者が多い。また、直径2 kmより大きいものをカルデラ、小さいものを火口と定義することもある。カルデラとは、元来、このように地形から定義されたものである。かつて火山の分類定義に“死火山”なるものがあったが、火山現象についての知見が進んだ結果、現在では使われていない。カルデラについても、その後の新しい知見によってその定義が修飾されてしかるべきである。

1940年代には、各々の特徴をもつカルデラの固有名詞で分類されていた。Williams (1941)によれば、クラカタウ型、キラウエア型、カトマイ型およびグレンコウ型に大別された。他に、爆発カルデラが定義され、当時、バイアス・カルデラはこれに属するかもしれないとされた。このように、火山の固有名詞が付くのは学問の初期のことであろう。グレンコウ (Glencoe) は英国スコットランドにある12 km×8 kmの第三紀のカルデラである

かつて筆者は火山地域の構造を重力異常からみて、高重力異常型カルデラ、固有の重力異常なし、すなわち成層火山、低重力異常型カルデラと3つの型に分類した。ここで、高重力異常型カルデラはグレンコウ型、ハワイ型を含み、低重力異常型カルデラはクラカタウ型、バイアス型を含む。今回これとは別に、カルデラを分類して、高重力異常型カルデラ、**地形だけのカルデラ**、低重力異常型カルデラ、なる3つの型を提唱する。“地形だけのカルデラ”とは地形あるいは表層地質だけのカルデラであり、固有の重力異常、すなわち、固有の構造を示さないものである。この場合、直径2 km以下の凹地を火口と称するのも定義の一方法であろう。ただし、やや大きい火口では、それを埋める噴出物により低重力異常を伴うものもある。この種のカルデラは浅い起源の火山活動によって形成されたものであろう。

2000年に噴火した三宅島火山には、従来から桑木平カルデラなるものが言われていた。これは地表地質、地形によるもので、構造に基づくものではない。すなわち、“地形だけのカルデラ”である。2000年噴火に際して、ほとんど噴出物を伴わないで、山頂火口が約300 m陥没した。この陥没のメカニズムについては議論のあるところであるが、将来、なんらかのメカニズムによって、この陥没孔は玄武岩質マグマによって充たされて、いずれ高重力異常型カルデラが形成されるものと考えられる。

本論の対象とするところは主として高重力異常型カルデラであるが、順序として、先ず低重力異常型カルデラについて論ずる。

II. 低重力異常型カルデラ

世界で高重力異常型カルデラは少ないので、従来、カルデラに関する議論の多くは低重力異常

型カルデラについてなされてきた。これは、珪長質マグマの火山で、大量の火砕流の噴出の結果形成されるカルデラである。その代表として挙げられるのがスンダ海峡のクラカタウ火山である。この火山の1883年の大噴火によって、海底に5 km×7 kmの凹みが生じた。これは近代科学によって観察された大事件であった——2000年三宅島の山頂陥没もこれに匹敵する事件であろう。Williams (1941)は周辺諸島の陸上調査の結果、火砕流噴出物（主として軽石）に較べて、旧山体を構成していた石質岩片が非常に少ないことから、旧山体はマグマ溜まりへ崩落したであろうと主張した。筆者に言わせれば、元来、火山噴出物の量の評価は誤差が大きく桁数が精々であろう。いわんや、周辺諸島の調査だけでは論拠にならない。更に、マグマ溜まりを安易に山体の直下に設定することも理解できない。Yokoyama (1981)は1883年噴火に伴った津波、空気波を論じて、その爆発力を強調した。この問題はマグマ溜まりの位置、形状、機能に関係するもので、決着はついていないと筆者は考える。

III. 高重力異常型カルデラ

かつてグレンコウ型カルデラと称されたものが高重力異常型カルデラである。グレンコウ火山よりも隣接するマル (Mull) 火山の方がよく調査されているので、ここではマル火山を代表とする。Richey (1948, Fig. 26, 初版は1935年)によるマル火山の復元図をFig. 1に示す。グラノファアイアー (酸性半深成岩) に玄武岩溶岩が貫入している。その貫入機構には全く触れられていない。現在、その表層部 (Fig. 1のほぼ上半分) は削剝により除去されている。その後、McQuillin and Tuson (1965)はスコットランドの第三紀に属するカルデラ地域の重力異常を調べた。ラム、スカイ、マル、アードナムルチャン、アランの5つの地域である。ラムおよびマル・カルデラについて記せば、

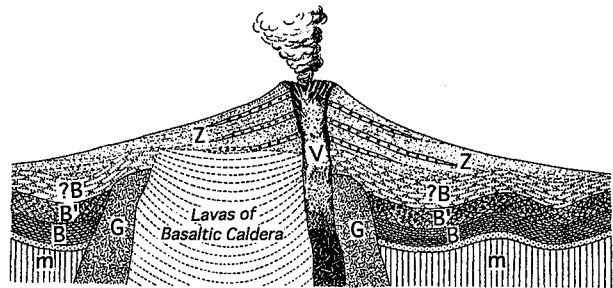


Fig. 1. Reconstruction of Mull volcano, in section, during the early acid explosive phase. B, B', ?B: Tertiary lavas of Mull basaltic volcano, Z: supposed ashes and rhyolitic lavas of cone-volcano, both were removed by denudation. V: early explosion-vent, due to an acid magma (after Richey, 1948, Fig. 26).

	最大ブーゲ異常 (mgal),	残差異常値 (mgal)
ラム	76.3	65~70
マル	71.7	50~55

と高異常が顕著である。McQuillin and Tuson (1965)は、その原因となる異常質量は地表近くにあり、塩基性あるいは超塩基性の高密度岩石が16~24 kmの厚さにあるであろうとしている。

定性的に Fig. 1 を支持する結果である。他方、Troll et al. (2000) はラム・カルデラの形成を論じながら、上記の重力異常を全く顧慮していない。

久野 (1955) は箱根カルデラについて、その形成は旧期、新期の 2 回にわたり起こったとした。そして周辺に旧期のカルデラ噴出物の量が少ないので、これをグレンコー型とした。このことはその時点では止むを得ない判断であったであろう。周辺に噴出物が発見されない火山性凹地をグレンコー型カルデラとするのは、もう一つの条件、すなわち、高重力異常の条件を満たしていない。その後、大磯丘陵付近で噴出物が認められたので、1976 年版では、“環状割れ目型カルデラ”，すなわち、環状割れ目に沿って山体が陥没したとしている。横山・他 (2002) は、カルデラ内の多数のボーリング結果と重力異常とを組み合わせる議論して、箱根カルデラの基盤は陥没していないと結論した。

高重力異常型の日本の陸上で確認されている唯一の例は伊豆大島のカルデラである。その残差異常は約 7 mgal である。Yokoyama (1969) はその地下構造として地表下約 1 km まで高密度の溶岩の堆積を仮定した。一色・他 (1963) はカルデラ内、北縁部の約 300 m 深の試錐コアを調べて、カルデラは約 1500 年前に約 160 m 沈降したと結論したが、この型のカルデラは後述のフェルナンデス火山、ハワイ火山の例のように、陥没、堆積を繰り返して形成されることが考えられる。

前述のように、Williams (1941) の言うキラウエア型とは典型的な高重力異常型である。もっとも、ハワイ火山で高重力異常を確認したのは 1963 年である。キラウエア火山の活動に伴うマグマの噴出や環流の機構は高重力異常型カルデラの形成の議論に示唆を与える。Walker (1988) はキラウエア、マウナロア、クーラウの 3 カルデラを議論して、マグマ溜まりの下方に mafic あるいは ultramafic な貫入、集積があり、その荷重によって上部火山体が沈降してカルデラが生ずるという説を出している。

Yokoyama and Suparto (1970) がバリ島のバトール (Batur) カルデラで重力測定を行い、約 8 mgal の高異常の傾向のあることを認めた。将来、その確認が必要である。

McCall (1963) はケニアのリフト・バレーにある直径約 10 km のメネンガイ (Menengai) カルデラの形成を議論して、高重力異常を確認して、これをグレンコー型とした。また、その南にあるススワ (Suswa) の山頂に二重のカルデラがあり、両者共にグレンコー型であるとしている。

村上・石原 (1985) は 1984 年に小笠原島弧北部で、青ヶ島カルデラ、北ベヨネーズ・カルデラ、スミス・カルデラの 3 つの海底カルデラを発見した。そして、これらのすべてが高重力異常型カルデラであることを確認した。

村上 (1997) は明神海丘カルデラ (北ベヨネーズ・カルデラと同じ) の構造を詳論して、その形成機構としては、陥没モデルよりも爆発による山体の破壊モデルを採っている。

湯浅 (1995) は明神海丘を調査して、全体が軽石からなる火砕丘ではなく、下部は溶岩あるいは溶岩ドームであるとした。この溶岩塊が先にあると、その後で大量の軽石が噴出して海丘を形成したと考えた。

植田・他 (2001) は明神礁カルデラ (北ベヨネーズ・カルデラと同じ) の構造を論じて、これ

は陥没によって形成されたものであるとして、その高重力異常の起源として火山体の基底付近まで上昇したマグマ溜まりを推定している。

このように、高重力異常型の海底カルデラが少なからず存在することが明らかになり、その形成機構の議論は興味あるところである。

世界の陸上では高重力異常型カルデラの例は多くはないが、海底カルデラをも加えて、低重力異常型カルデラと対比することによって、両者の構造および成因がより明らかになり、大規模火山活動の理解が進むであろう。

IV. 地形だけのカルデラ

2000年噴火に際して三宅島は短時間のうちに約300m陥没したが、これがカルデラ形成につながるか、否かを論ずる前に、まず、2000年噴火以前の三宅島の重力構造を考える。次いで、1968年に同じような陥没を生じた高重力異常型カルデラのフェルナンデス火山と比較検討する。

1. 三宅島の重力異常

三宅島における重力測定は、1963年に横山・岡田(1964)が61点で実施している。彼等の得たブーゲ異常値をIGSN 71系に変換した分布をFig. 2に示す。ここで、地殻構造を論ずる手法で、補正密度を 2.67 g/cm^3 、重力の鉛直勾配を 0.3086 mgal/m として、地形補正を施していない。横山・岡田(1964)はこのこの結果から、三宅島火山は高重力型、低重力型のいずれのカルデラでもないとして、立ち入った議論を控えた。

その後、駒沢(1990)は1989年に測点を増して重力を測定した。補正密度の決定には、これを段階的に変えてブーゲ異常図を作成して、地形と相関するような短波長の不自然なコンターが消えるものを選び、 1.8 g/cm^3 と決めた。ただし、後述のように、補正密度を 2.2 g/cm^3 ととっても、地形との相関は低いので、その判定の基準がはっきりしない。駒沢(1990)は補正密度を 1.8 および 2.2 g/cm^3 として、更に陸域の地

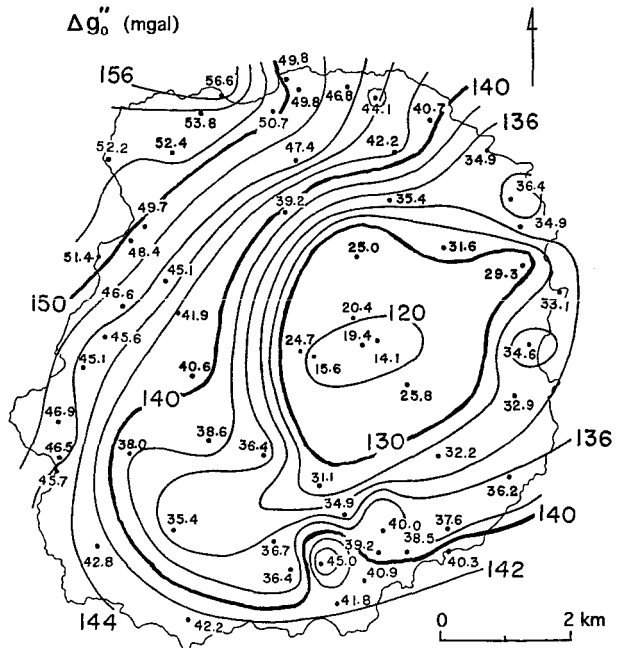


Fig. 2. A preliminary results of the 1963 gravity survey on Miyakejima volcano by Yokoyama and Okada (1964). Bouguer gravity anomalies with correction density 2.67 g/cm^3 and without topographic corrections.

形補正を加えた、 1.8 g/cm^3 と仮定したときのブーゲ異常図を Fig. 3 に示す。そして、これを解析した結果、雄山からその西方域にかけて山体の基部が高密度(火山の芯)になっているとした。上記の両測定が2000年三宅島噴火の山頂火口の陥没以前、すなわち、1990年以前のもので、重複している測点も多い。他方、1980年以來、火山活動に伴う重力変化を検出する目的で、海岸一周道路沿い、および“鉢巻き”(中腹)林道沿いの水準点で高精度の重力測定が繰り返されてきた。重力変化の解釈に際しては、火山の重力構造が基礎となるであろう。

2000年噴火によって山頂火口が約300m沈下した結果をうけて、改めてその噴火前の地下構造を議論して置くことの必要を感じた。そこで筆者は噴火前のブーゲ異常値を再計算した。2001年8月の時点で、火口拡大によって失われた重力の数は7点である。筆者は前記測定の重力点の他に、海岸沿いおよび“鉢巻き”林道の精密重力測定点(19点)をも加えて解析した。最終的な重力点は81点である。

補正密度は次によって決めた。高度 H なる測点の重力値 g_H とブーゲ異常値 $\Delta g''$ との関に次の式が成り立つ：

$$g_H + \delta_i - \gamma = \Delta g'' - H(\delta g / \delta H - 2\pi\rho G) \quad (1)$$

ここで、 δ_i は地形補正值、 γ は標準重力値、 $\delta g / \delta H$ は重力の鉛直勾配、 $2\pi\rho GH$ はブーゲ補正值を示す。この関係を Fig. 4 に図示

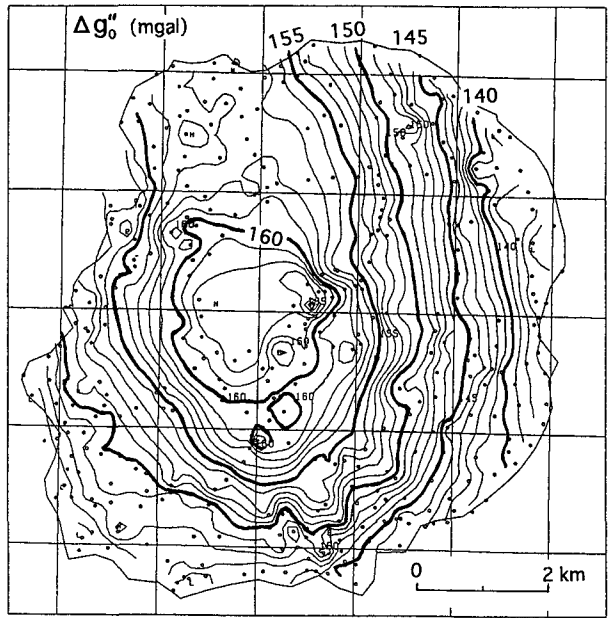


Fig. 3. A distribution of Bouguer gravity anomalies on Miyakejima volcano obtained by Komazawa (1990) using correction density 1.8 g/cm^3 and adding topographic corrections for the land.

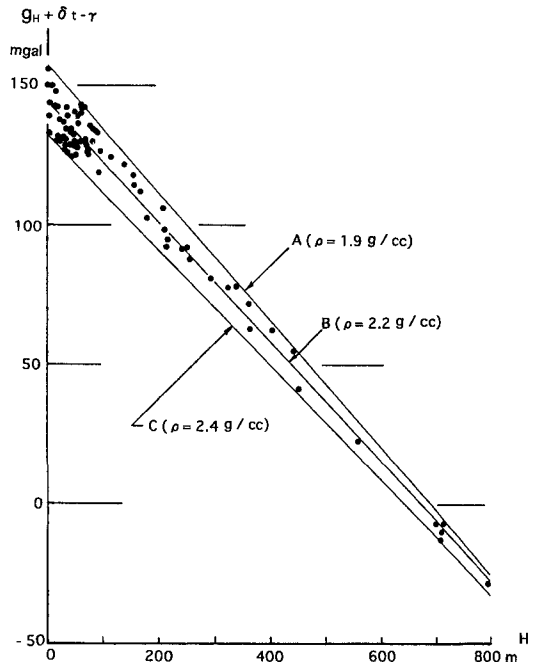


Fig. 4. Determination of the correction density using formula (1) in the text. B line is obtained by the least square fitting.

する。ただし、 $\Delta g''$ については、この地域で平均的なものを考えて、高度 H によらないとする。これより、最小自乗法によって Fig. 4 の測定値の高度 H に対する勾配を求めると、 0.2164 mgal/m を得る。補正計算にはこの値を用いるが、今、鉛直勾配として標準値 0.3086 mgal/m をとれば、補正密度は 2.2 g/cm^3 となる。地形補正の算出には、この値を用いた。

地形補正には、陸上の地形の他に、水路部の $1/50,000$ 海底地形図第 6364 号により、三宅島の海岸から約 14 km 沖までの海底地形の効果を求めた。これより遠方の地形の効果は小さい。地形補正値の最大値は雄山の 1940 年新山の頂上で 17 mgal である。

先ず、海岸沿いの精密重力点 (18 点) だけを用いて、補正密度を 2.2 g/cm^3 としてブーゲ異常の分布を求めると、Fig. 5 のようになる。この場合、高度が低いので、補正密度のとり方には余り影響されない。また、これらの重力点では地形補正値は比較的に小さい ($1\sim 2 \text{ mgal}$) ので省略してある。Fig. 5 は三宅島の地域異常 (regional anomaly) を示すもので、三宅島火山の局所異常 (local anomaly) は Fig. 5 に重畳するものである。全ての重力点の値を用いたブーゲ異常の分布を Fig. 6 に示す。図中の破線は 2000 年 9 月現在の山頂陥没口の縁を示す。

Fig. 6 に示されるブーゲ異常の分布を見るに、三宅島全域が $135\sim 155 \text{ mgal}$ の高異常で、北西に向かって大きくなっている。この重力異常分布は植田・他 (2001) によって得られた三宅島周辺海域の重力分布と調和的である。なお、地域的には三宅島から東へ、海溝に向かってブーゲ異常は増大する。三宅島内では、 5 mgal 間隔の等異常線が閉じる、あるいは、著しく湾曲するような顕著な異常はない。一色 (1960) によれば、三宅島では湯が島層群類似の異質岩片が見い出され、このような岩石が伊豆七島諸火山の基盤をなしていると考えられる。三宅島のブーゲ異常は

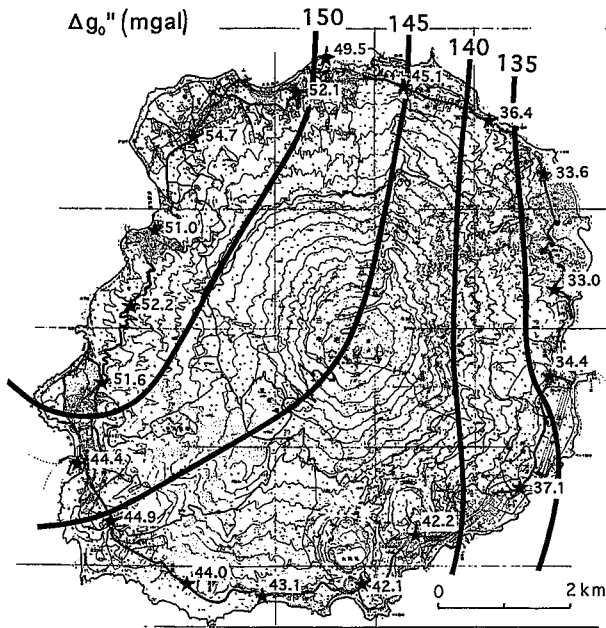


Fig. 5. Bouguer gravity anomalies on Miyakejima volcano reduced only from the gravity points along the coasts. Topographic correction are not added: At these points, they are small ranging from 1 to 2 mgal.

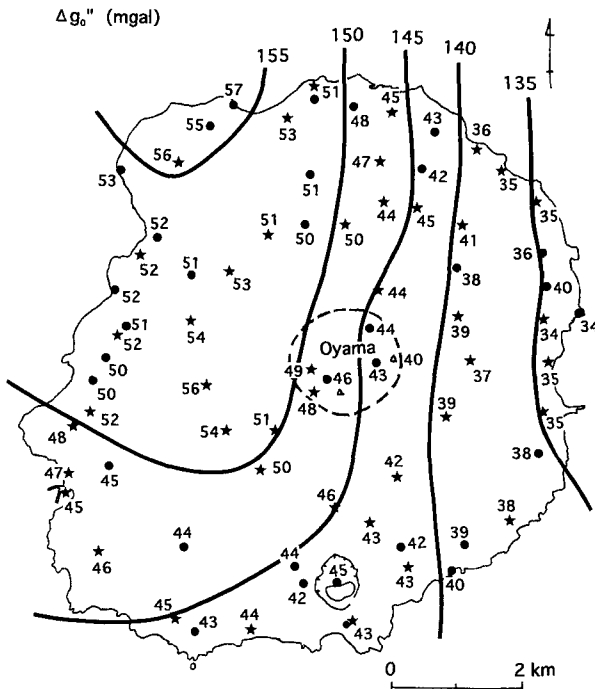


Fig. 6. Bouguer gravity anomalies on Miyakejima volcano corrected for topographies to a distance of approx. 14km from the coasts. Correction density is assumed to be 2.2 g/cm³. A broken line indicates the rim of circular collapses as of September 2000.

基盤の起伏に対応しているのであろう。湯が島層群は伊豆半島や伊豆大島の基盤であり、それらにおけるブーゲ異常の背景値は各々70~80および140~150 mgalである。三宅島の東西の重力差は概略15 mgalである。これを基盤の深さの差とみなし、密度差を0.4 g/cm³とすれば、北東部が浅く、東部へ深くなっていて、その差は約880 mとなる。ただし、現在、三宅島の基盤の深さは未知である。三宅島のカルデラについて、一色(1960)は山頂、標高約700 m付近にある1.8 km×1.6 kmの火口は、いわゆる火口にしては大きすぎるので、一種のカルデラ(八丁平カルデラ)と考えた方がよいであろうとした。茅原・他(1973)は上記に加えて、主として地形から、標高約350 m付近に直径約4 kmの桑木平カルデラがあるとしている。三宅島のブーゲ異常の分布(Fig. 6)には、桑木平カルデラ、山頂火口(八丁平カルデラ)に対応するものはない。これら2つのカルデラの地下構造には地球物理学的特徴がないので、冒頭に記した筆者の分類によれば、“地形だけのカルデラ”と称すべきであろう。

2. 三宅島の火口陥没とフェルナンデス・カルデラ底の陥没

三宅島の2000年山頂火口の陥没の類似現象として、1968年ガラパゴス諸島フェルナンデス火山で起きたカルデラ底の陥没がある。この火山島においては重力異常は求められていないが、高異常と考えられる。すなわち、高重力異常型カルデラである。これら両者のイベントを比較対比すると、Table 1のようになる。なお、1968年フェルナンデス活動のデータはSimkin and Howard(1970)およびFilson et al.(1975)による。

この比較対比によって、2000年三宅島の火口陥没は1968年フェルナンデス・カルデラ底の陥没と同様な原因、すなわち地下マグマが側方あるいは深所へ移動したため、支えを失って落ちたと考えられる。ただし、後者の規模が格段に大きく、付随した現象も異常に大規模であった。すなわち、2000年三宅島の山頂火口の陥没は高重力異常型カルデラ形成の最初のステップとみなされる。高田(2001)は陥没のメカニズムとして、マグマ供給系の重力崩壊なるモデルを議論している。

今後、あるいは、長年月の間に陥没孔の底を mafic な溶岩が埋める、あるいは、mafic なマグマが底を押し上げ、次第に浅くなる。結果として地表では高重力異常を伴うカルデラが形成されるのであろう。

V. ま と め

カルデラの定義を地下の密度構造の観点から考え、その基準として重力ブーゲ異常をとり、高重力異常型、地形だけ、低重力異常型の3種に大別した。

伊豆大島には高重力異常型のカルデラがある。同じく玄武岩質マグマの三宅島にもこの種のカルデラの形成される可能性はある。筆者らはかつて三宅島の重力測定を実施したが、今回改めて噴火以前の重力異常を考察した。その結果、固有の異常はなく、現在の三宅島にカルデラが存在するとすれば、それは浅い起源の火山活動によって形成された地形だけのカルデラであろう。

2000年三宅島噴火は極めて特異な現象を呈した。すなわち、現在まで構造的にカルデラでなかった山頂に、殆ど噴出物を伴わず新たに陥没が生じた。1968年のフェルナンデス火山のカルデラ底の陥没の例からみても、その陥没の原因はマグマの側方への貫入か、深部への環流であろう。これは、今後の活動の繰り返しの後に、高重力異常型のカルデラが形成される発端となる可能性を示唆するものと考えられる。

なお、三宅島火山の従来への噴火に際して観測された三宅島全体の傾動(例えば横山・前川, 1984)が2000年噴火では観測されなかったことは2000年噴火の特異性と関係あるかも知れない。

謝辞 1963年三宅島の重力測定を共に行なった岡田弘志氏に改めて謝意を表します。宮崎 努氏から三宅島における水準測定の成果を、前川徳光氏から三宅島の精密重力測定の成果をご教示頂いた。両氏に厚く御礼申し上げます。海域の重力分布および海図を提供頂いた水路部当事者に

Table 1. Comparison of the collapses between the Miyakejima crater and the Fernandes caldera.

	フェルナンデス (1968)	三宅島 (2000)
地 形	山頂カルデラ: 7km×5km	山頂火口: 1.5kmφ
陥 没	11 June, 300m カルデラ底の南東部	8 July, 山頂火口 Nov.: 1.6 kmφ, 0.22 km深
容 積	1 ~ 2 km ³	0.6 km ³
継続期間	約9日間ステップ状	数分以内
噴火活動	11 June 激甚な爆発 気圧波を伴う	8 July 小水蒸気爆発
地震活動	June 12~25活発 (含16M5級) June 15最大M5.4	8 July噴火と同時にM5.1 この他は顕著でない
マグマの移動	21 May, 山腹噴火により 溶岩流出~0.1 km ³	26 June, 1.2 km沖で小規模 海底噴火, 容積は未知

感謝致します。

この報文は、1962年十勝岳噴火の観測以来、観測および研究の面で多くの接点のあった本谷義信氏の定年退職を記念して呈上するものである。

文 献

- 茅原一也・青木 滋・八木健三・新藤静夫, 1973. 三宅島火山に関する新知見(要旨), 火山, **18**, 102-103.
- Filson, J., T. Simkin and L.K. Leu, 1973. Seismicity of a caldera collapse: Galapagos Islands 1968, *J. Geophys. Res.*, **78**, 8591-8622.
- 一色直記, 1960. 5万分の1地質図「三宅島」および同説明書, 地質調査所, 85 pp.
- 一色直記・中村一明・早川正己・平沢 清・行武 毅・荒井 綏・岩崎文嗣, 1963. 試錐結果からみた伊豆大島火山のカルデラの構造, 火山, **8**, 61-106.
- 駒沢正夫, 1990. 三宅島の重力分布, 物理探査学会第82回講演会予稿, 222-226.
- 久野 久, 1955. 火山及び火山岩(第2版は1976), 岩波書店, 283 pp.
- McCall, G.J.H., 1963. Classification of calderas: 'Krakatoan' and 'Glencoe' types, *Nature*, **197**, 136-138.
- McQuillin, R. and J.T. Tuson, 1968. An interpretation from gravity measurements of the sizes of some British Tertiary granites, *Proc. Geol. Soc.*, **1621**, 59-60.
- 村上文敏, 1997. 伊豆・小笠原弧北部域の明神海丘における海底カルデラの形成機構, 地学雑誌, **106**, 70-86.
- 村上文敏・石原丈実, 1985. 小笠原島弧北部で発見された海底カルデラ, 地球, **7**, 639-645.
- Richey, J. E., 1948. British Reg. Geol. Scotland: the Tertiary volcanic districts, Edinburgh, 106pp.
- Simkin, T. and K.A. Howard, 1970. Caldera collapse in the Galapagos Islands, 1968. *Science*, **169**, 429-437.
- 高田亮, 2001. 玄武岩質火山成長に伴うカルデラ形成-重力崩壊モデル-, 地学雑誌, **110**, 245-256.
- Troll, V.T., C.H. Emeleus and C.H. Donaldson, 2000. Caldera formation in the Rum Central Igneous Complex, Scotland, *Bull. Volcanol.*, **62**, 301-317.
- 植田義夫・加藤幸弘・三宅島西方海域調査班, 2001. 三宅島西方, 群発地震発生海域の地殻構造と銭州海嶺北部のテクトニクス, 水路部研究報告, **37**, 37-56.
- 植田義夫・小野寺建英・大谷康弘・鈴木 晃, 2001. 明神礁カルデラの構造とその火山学的解釈, 火山, **46**, 175-185.
- Walker, G.P.L., 1988. Three Hawaiian calderas: An origin through loading by shallow intrusions? *J. Geophys. Res.*, **93**, 14773-14784.
- Williams, H., 1941. Calderas and their origin, *California Univ. Publ., Dept. Geol. Sci. Bull.*, **25**, 239-346.
- Yokoyama, I., 1969. The subsurface structure of Oosima volcano, Izu, *J. Phys. Earth*, **17**, 55-68.
- Yokoyama, I., 1981. A geophysical interpretation of the 1883 Krakatau eruption, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **9**, 359-378.
- 横山 泉・岡田弘志, 1964. LaCoste & Romberg 重力計による三宅島における重力測定, 北大地球物理学研究報告, **12**, 91-98.
- Yokoyama, I. and S. Suparto, 1970. Volcanological survey of Indonesian volcanoes. Part 5. A gravity survey on and around Batur caldera, Bali, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **48**, 317-329.
- 横山 泉・前川徳光, 1984. 1983年三宅島噴火にともなった地殻変動と重力変化, 火山, **29**, S130-S140.
- 横山 泉・棚田俊収・萬年一剛, 2002. 箱根火山の基盤構造, 神奈川県温泉地学研究所報告, **33**, 1-10.
- 湯浅真人, 「しんかい2000」による海底軽石火山の観察: 明神海丘潜航調査, 火山, **40**, 277-284.