

2.3 霧島火山群における重力探査

2.3.1 はじめに

霧島火山は九州南部に位置する第四紀の火山群で、有史以来、新燃岳や御鉢火山において噴火の記録が残されている(井村・小林, 1991; 筒井・他, 2005)。近年では新燃岳において 2008 年 8 月に噴火活動を再開し、2011 年 1 月には本格的なマグマ噴火に至った。これらの噴火活動に先立つ 2005 年から 2007 年にかけて新燃岳浅部での局所的な膨張が検出され、2011 年 1 月マグマ噴火のおよそ 1 年前から深部でのマグマ蓄積を示唆する膨張、噴火に伴う同所での急激な収縮が捉えられるなど、マグマ供給系の理解の上でも活動監視・評価の上でも重要な知見が得られた(福井, 2008; 今給黎・大脇, 2011; 高木・他, 投稿中)。一方、深部マグマ溜まりから地表へ至るマグマ上昇過程や経路に関する情報が乏しく、また、繰り返し発生していた小規模噴火から 2011 年 1 月 26 日、27 日の爆発的噴火へ移行する契機が何であったのかの理解も進んでいない。

地下でのマグマ活動や噴火活動は常に周辺媒質との相互作用の下に成り立っている。マグマ上昇の駆動力として周辺媒質とマグマとの密度差により生じる浮力が重要とされ、さらにマグマ中の揮発性成分の溶解度は封圧によって規制される。このため、これら密度差や封圧を制約する地下の密度構造は、マグマの蓄積、上昇過程から噴火様式の多様性に至るまで強く影響を与えていると考えられる。また、今回の活動では GPS や傾斜計などの地殻変動観測において重要な知見が得られた。これらの観測量から変動源の情報を抽出するには、地下媒質の力学的物性の情報が必要である。従って、地下構造を解明することは、単に地下を構成する媒質の物性の情報を抽出するだけでなく、マグマ活動、噴火活動へ与える影響の解明や変動源パラメータ推定の高精度化のために重要である。

霧島火山や周辺地域の地下構造に関しては地熱開発に伴う地表・坑井での地質調査や物理探査が行われ(新エネルギー総合開発機構(NEDO), 1983; 御幸・他, 1995)、火山学的見地からは特に 1990 年代に精力的な調査が行われた(例えば、筒井・他, 1996; 三ヶ田, 1996; 鍵山・他, 1996; 西, 1997; Yamamoto and Ida, 1997)。重力探査に関しては、とりわけ霧島火山周辺のカルデラに関する知見が多く得られている。瀬谷・小川(1971)では、霧島火山群北西の加久藤盆地にて探査を行い、加久藤カルデラに対応する重力異常を明らかにした。田島・荒牧(1980)は加久藤カルデラの東方の小林盆地にてより規模の大きい負の重力異常を発見し、小林カルデラの存在を提唱した。さらに小林・他(1995)では霧島火山群南西方に明瞭な負の重力異常を検出し、地形的には判別しがたい伏在する安楽カルデラの可能性を提唱した。また、霧島火山群南東方では四万十累層群の露出に対応した正の重力異常が認められている。一方、霧島火山群を対象とする探査はその地形的制約から多くなく、小林・他(1995)は韓国岳から獅子戸岳、新燃岳、中岳を縦走するルートで調査を行ったが明瞭な異常は検出されなかった。

本研究では、有史以来噴火を繰り返しており、気象庁、気象研究所にて地殻変動観測を実施してきた新燃岳および御鉢火山を含む高千穂峰周辺を対象に重力探査を実施した。気象研究所では実地形や地下不均質構造の効果を導入した有限要素法による地殻変動源推定手法の開発を進めており、今回の探査の結果を活用することにより、地殻変動源パラメータ推定の高精度化も目指している。

ここでは、まず地下密度解析を進めていく上で基礎資料となる坑井コアの密度について、新エネルギー総合開発機構(1983)を再コンパイルし特徴をとりまとめる。続いて、新燃岳、高千穂峰を中心に実施した重力探査の概要を記した後、小林・他(1995)による広域的探査データとの併合処理によって得られた重力異常の特徴を示す。

なお、観測地域である新燃岳とその周辺の地形は 2011 年 1 月の噴火により大きく改変された。ここに記すデータはこれら噴火前に取得されたものであることを付記する。また、本報告に掲載する平面図は解析に用いた数値地図や重ねて示す図面の範囲に合わせるために東京測地系で作成した。ただし、重力測定点の座標リストにて日本測地系 2000、東京測地系の値を併記している。

2.3.2 地質層序と物性

2.3.2.1 地質層序

南部九州地域の地質学的基盤は西南日本外帯の秩父累帯および四万十累帯の付加体堆積物から成り、これを不整合に覆って主に鮮新世以降の陸上噴出の火山岩類が広く分布している（例えば、町田・他, 2001）。霧島火山地域については、地表踏査の他に、主に西麓にて地熱開発のための坑井が多数掘削され地質層序が編まれている（新エネルギー総合開発機構, 1983; 井村, 1994; 御幸, 1995; 井村・小林, 2001）。基盤岩は、白亜紀の四万十累層群北帯の砂岩、泥岩を主とする堆積岩であり、霧島火山群南東方で地表に露出している一方（Fig. 2.3.1b）、西麓では地熱調査井の海水準下 1,074.3 m 以深で認められる（Fig. 2.3.2）。その上位は、鮮新世末期または更新世初期以降の火山噴出物および湖性層から成る。霧島火山群北西域に鮮新世後期の肥薩火山岩類が広く分布し、地表では確認されていない更新世初期の溶結凝灰岩（霧島溶結凝灰岩）が坑井の海水準下数 100 m で確認されている。その上位には更新世中期の加久藤火山岩類およびそれと指交関係にある湖性層（加久藤層群）が分布する。霧島火山周辺には大規模火砕流堆積物が少なくとも 3 枚認められる（小林火砕流, 下門火砕流, 加久藤火砕流）。井村 (1994) などでは、更新世後期（およそ 30 万年前）の加久藤火砕流堆積物より上位を霧島火山の噴出物と位置付け、さらに火山地形の保存状況と侵食の程度によって古期霧島火山と新期霧島火山に分類している。なお、この古期、新期の区分は、Fig. 2.3.1b に示した井村・小林 (2001) による区分とは異なっていることに注意を要する。井村・小林 (2001) では、現在地表で見られる新しい火山体とそれらにほとんど覆われてしまった古期火山岩類をそれぞれ新期霧島火山、古期霧島火山としており、井村 (1994) の古期、新期を含めた霧島火山が井村・小林 (2001) の新期霧島火山におおよそ対応すると考えられる。ここでは井村 (1994) に従い、これを簡略化した地質層序を Table 2.3.1 に示した。

Table 2.3.1 Stratigraphic sequence around Kirishima volcano (after Imura, 1994) and average wet density of rock samples (from NEDO, 1983).

Geological Time			Formation	Wet Density [g/cm ³] (NEDO, 1983)		
Quaternary	Holocene	100Ka -	Kirishima Volcano	Younger Volcano Group	2.48 ± 0.19	
		300Ka - 150Ka		Older Volcano Group		
	Pleistocene	300Ka	Kakuto Ignimbrite		/	
		350Ka?	Shimokado Ignimbrite			
		500Ka - 400Ka	Kobayashi Ignimbrite			
		1Ma - 0.8Ma	Kakuto Volcanic Rocks	Kakuto Group		2.44 ± 0.19
		1.5Ma	Kirishima Welded Tuff			2.45 ± 0.07
Neogene	Pliocene	3Ma - 2Ma	Hisatsu Volcanic Rocks		/	
Cretaceous			Shimanto Supergroup		2.64 ± 0.04	

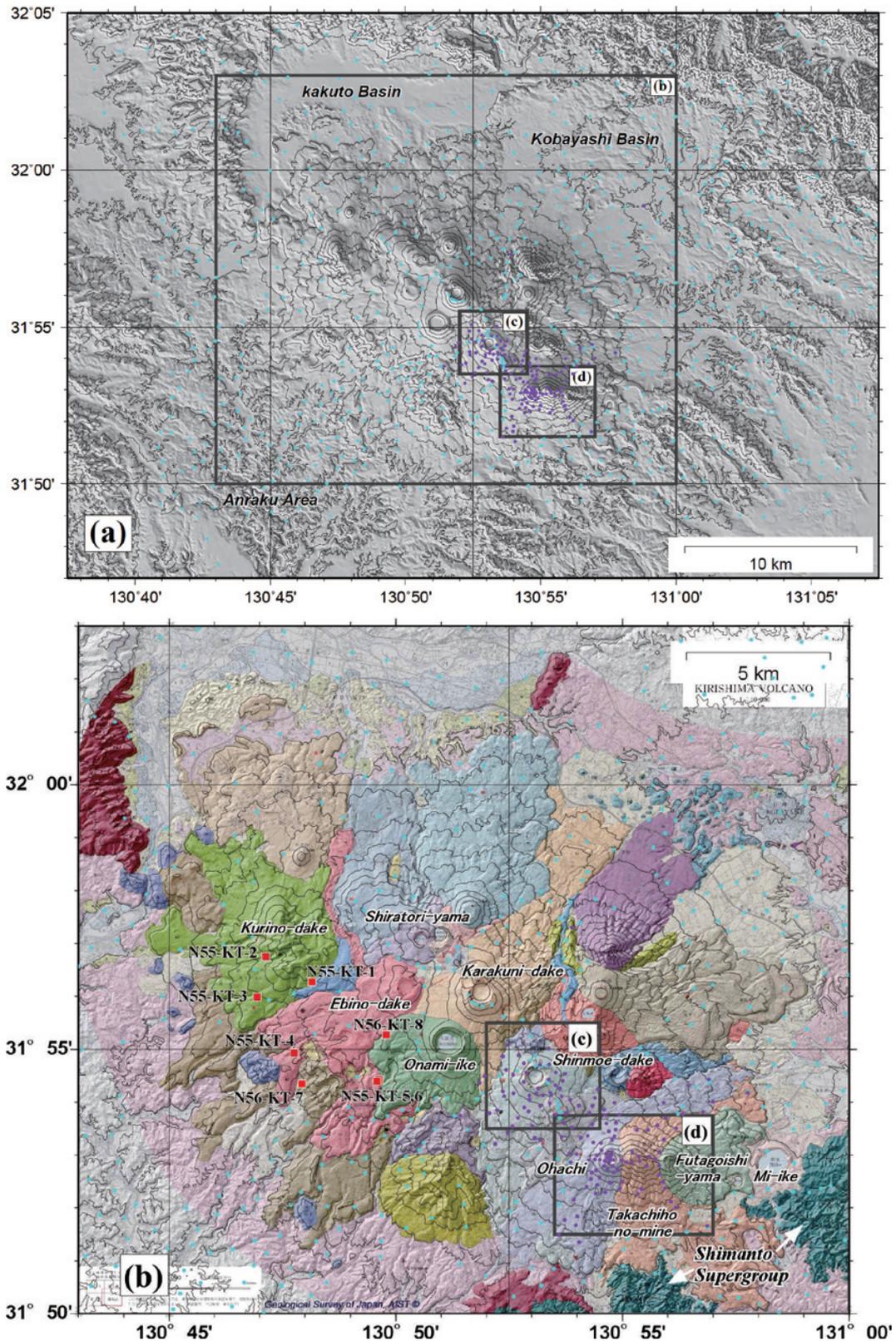


Fig. 2.3.1 (a) Topographic map of around the Kirishima volcanoes showing gravity observation sites (purple dots represent observations from this study and light blue dots represent observations by Kobayashi et al. (1995)). (b) Geologic map of the area outlined in (a) by Imura and Kobayashi (2001). Red squares are locations of boreholes drilled by NEDO (1983). Rectangles (c) and (d) are regions for which Bouguer density was estimated by the F–H relation.

2.3.2.2 坑井コア試料の物性

霧島火山群西麓の大霧地域には地熱開発のための坑井が多数掘削されており、地熱開発促進調査などでは坑井コア試料も採取されている。重力データを用いた地下密度解析の基礎資料となるため、ここでは、新エネルギー総合開発機構 (1983)の「栗野・手洗地域」にて取得された坑井コア試料について、上記の層序に対比して密度の特徴を取りまとめる。なお、御幸 (1995)に記載された本地域の層序区分はほぼ井村 (1994)と同様であるが、若干の差異が認められる。御幸 (1995)にて霧島溶結凝灰岩類より上位、古期霧島火山より下位に分類された火山岩類、および堆積岩類についてもそれぞれ井村 (1994)の加久藤火山岩類、加久藤層群に加えた。また、古期霧島火山に分類される溶岩に挟まれて高原砂礫層が層厚 5~10 m 程度で分布するが、ここでは古期霧島火山に区分した。

これらの坑井位置は Fig. 2.3.1b に■で示し、坑井毎の湿潤密度と空隙率との深度分布を、Fig. 2.3.2 におおよそ北西-南東方向の順になるように並べて表示した。霧島火山は N56-KT-7 を除くすべての坑井で地表から 300 m 以上の厚さで分布している。その下位に加久藤火山岩類・加久藤層群が最大 1,200 m 以上の厚さですべての坑井で分布する。霧島溶結凝灰岩類は、N55-KT-4 の海水準下 638.20 m 以深、N56-KT-7 の海水準下 645.70 m から 1074.30 m で認められる。四万十累層群に達しているのは、N56-KT-7 のみであり、海水準下 1,074.30 m 以深で砂岩、粘板岩が確認されている。これらの深度分布図では、一見して密度と空隙率との負の相関が明瞭であり、層準に関わらず第一近似的には空隙率が有効密度を決めていると考えられる。

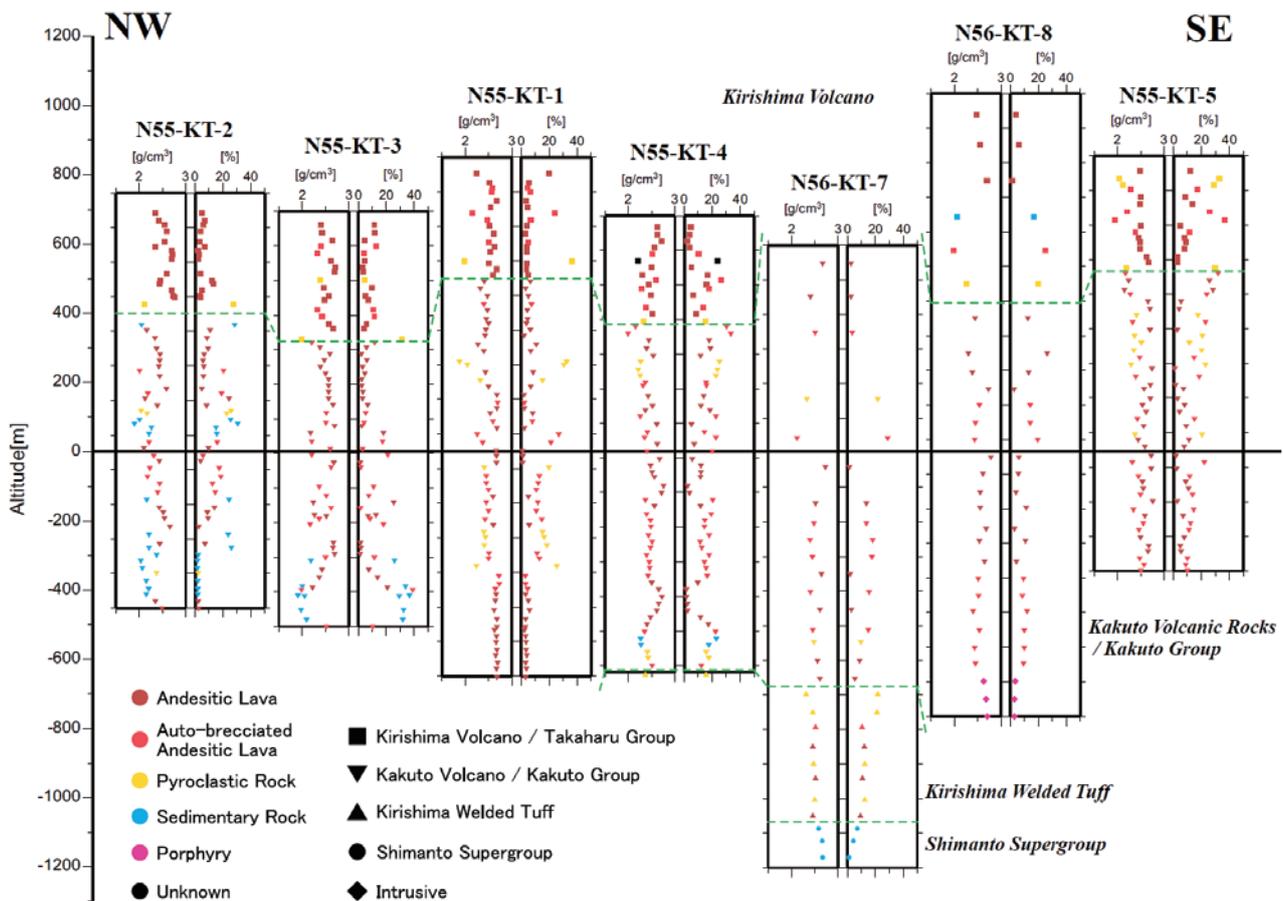


Fig. 2.3.2 Wet density and porosity section for boreholes shown in Fig. 2.3.1(b) (NEDO, 1983).

Fig. 2.3.3 の左側には層準毎の湿潤密度の頻度分布を、右側には最上位の霧島火山およびその下位の加久藤火山岩類の岩相毎の頻度を示す。霧島火山および加久藤火山岩類の岩相として、どちらも安山岩溶岩およびその自破砕部が卓越し、これに火山砕屑岩、堆積岩が少量加わる。密度は、どちらも安山岩溶岩、自破砕溶岩、火山砕屑岩、堆積岩へ向けて小さくなる。これら層準の平均密度はそれぞれ 2.48 g/cm^3 、 2.44 g/cm^3 であり、岩相と同様に明瞭な差異は認められない。霧島溶結凝灰岩類の平均密度も 2.45 g/cm^3 であり、上位の霧島火山、加久藤火山岩類と差異が見られない。四万十累層群の試料数は3つのみであるが、地質学的基盤として予想されるようにその平均密度は 2.64 g/cm^3 と鮮新統以浅よりも大きい。これらのことから、この区分に従った場合、鮮新統以浅の火山岩では岩相とともに密度には大きな差異は認められず、最も顕著な差が生じるのは四万十累層群とその上位との境界部であると考えられる。なお、N56-KT-8 の最深部で認められた貫入岩の平均密度も 2.67 g/cm^3 と大きい。なおこれらの平均密度は Table 2.3.1 の右側に記している。

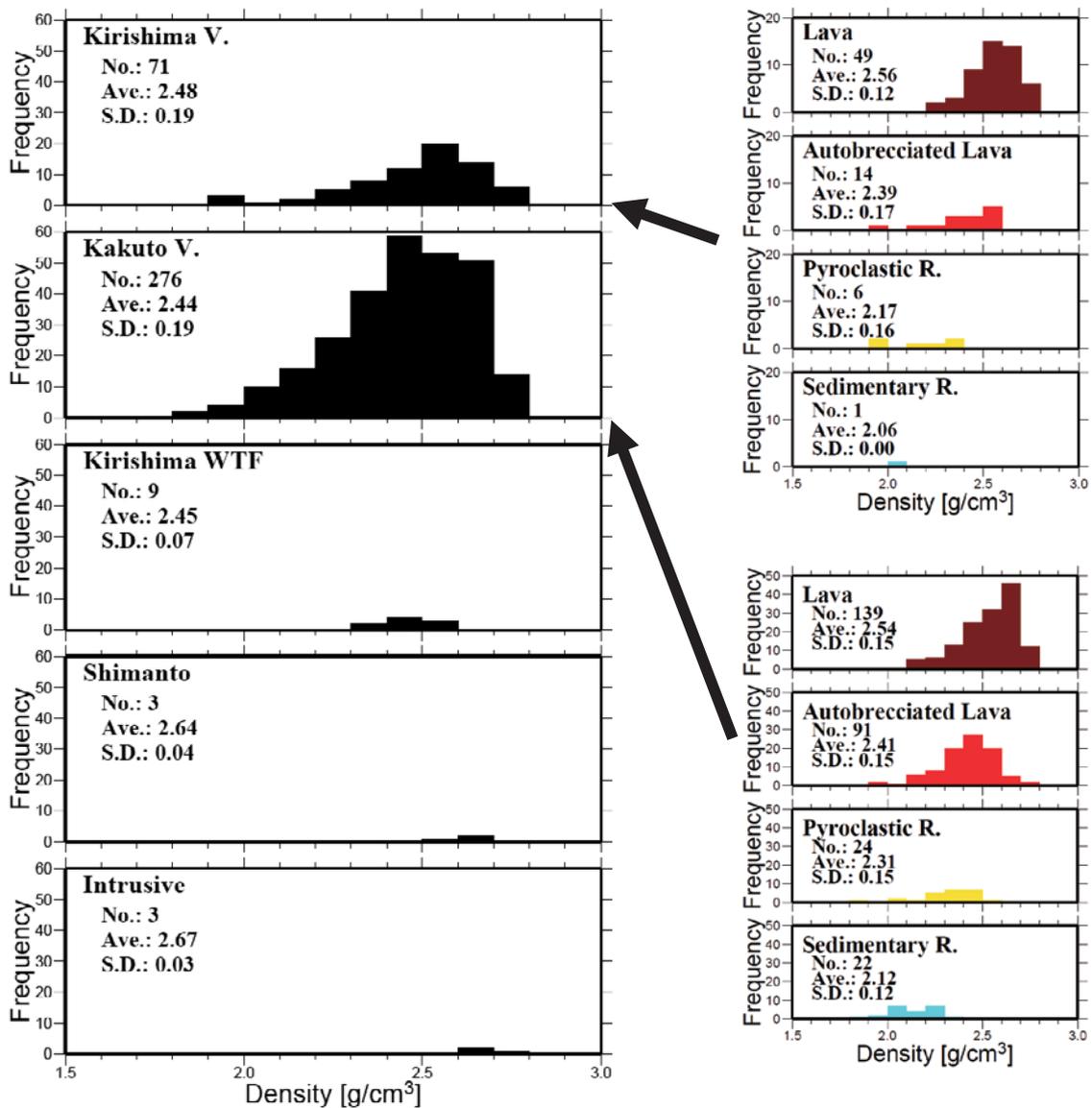


Fig. 2.3.3 (left) Histograms of wet density of core samples for stratigraphic units shown in Table 2.3.1 and Fig. 2.3.2. (right) Histograms of wet density for each lithology within the Kirishima volcano unit (Takaharu Group) and the Kakuto volcanic rocks (Kakuto Group). Compiled from dataset of NEDO (1983).

2.3.3 観測

重力観測は 2004 年 9 月から 2009 年 12 月にかけて計 5 回にわたり、新燃岳および御鉢火山を含む高千穂峰周辺を重点的に実施した (Fig. 2.3.1 の紫●)。以下に、これらの観測で行った位置決定および重力測定の概要について記す。

2.3.3.1 位置決定

重力異常データから地下の密度構造を推定するためには、その位置精度が重要である。特に高さ方向の精度が直接重力データの精度に影響を与え、仮に測定データに 1 mgal の精度を要求するならば高さ精度はおよそ 3 m 以内に収めなければならない。今回の観測では状況に応じて、1) GPS 干渉測位、2) ハンディ GPS 単独測位、3) 三角点、独立標高点、によって位置決定を行っている。それぞれの精度は異なることから、位置決定方法を下記に記し、決定した座標をその方法とともに Table 2.3.2 にまとめた。

GPS 干渉測位による決定

霧島火山の活動モニタリングのために気象庁および気象研究所によって GPS 連続・繰り返し観測点が設置されている (福井, 2008)。これらの観測点脇で重力測定を行った場合は GPS 干渉測位により GPS 観測点座標を決定し、そこから重力測定点座標に変換した。GPS 観測点座標決定のためには、日本測地系 2000 における測地成果が得られている国土地理院電子基準点 021087 (都城 2) を基準とした基線解析を行った。基線解析結果には気象の影響による年周変化が生じるため、2004 年 7 月から 2006 年 6 月までの 2 年間の結果を平均して GPS 観測点の座標とした。WGS84 系で求めた座標から、国土地理院による「日本のジオイド 2000」Ver. 5 を用いてジオイド高を算出し、標高に引き直した。さらに GPS 支柱、ボルトの高さ補正、必要に応じて偏心を行い GPS アンテナ座標から重力測定点座標へ変換した。重力測定点の座標については、標高に関しては数 10 cm 程度の精度で決定されていると考えられる。このように決定された観測点には Table 2.3.2 の Positioning にて GPS と付している。また対応する GPS 観測点コードは福井 (2008) に従い、Remarks に記載した。

ハンディ GPS 単独測位による決定

ハンディ GPS による単独測位では特に上下方向でときに 10 m を超える誤差を含んでおり、測定値をそのまま重力測定位置として用いることはできない。ここでは、水平位置はハンディ GPS による測位結果を利用し、この水平位置に対応する標高を数値地図から与えることにした。国土地理院数値地図「火山基本図 (10m メッシュ)」の領域に含まれる観測点はこれを、範囲外の観測点は数値地図「50m メッシュ」を用いた。

これらの数値地図の高さ精度を見積もるために、数十 cm の精度で決定されていると考えられる上述の GPS 干渉測位から決定された重力観測点の標高と数値地図の標高とを比較した。この結果、観測値に対する 10m メッシュ数値地図標高の差は平均-0.9 m、標準偏差 1.6 m、最大 4.3 m であった。最も差が大きかった場所は御鉢火口縁の観測点である。一方、50 m メッシュ数値地図に関しては、平均-2.4 m、標準偏差 5.7 m で、最大差は 18.6 m に達する場合も見られた。これらの観測点については Table 2.3.2 の Positioning では Handy と記し、用いた数値地図に応じて Topo10 または Topo50 と記した。

三角点、独立標高点

三角点で測定されたデータは、国土地理院による測量成果による座標を用い、Table 2.3.2 の Positioning には TRI と記した。独立標高点については水平位置はハンディ GPS による値を用い、標高のみ 2 万 5,000 分の 1 地形図に記載された値を用いた。これについては Spot Height と記している。

2.3.3.2 重力測定

測定に用いた重力計は、2004年9月、2006年12月、2007年6月が Scintrex 社製 CG3M (#9608454)、2009年3月および12月が Scintrex 社製 CG5 (#300500033) である。高千穂峰南東麓の御池小学校に設置された気象庁連続 GPS 観測点 GJ01 脇を毎日の重力測定の起点とし、同起点を M001 と命名した。

起点に用いている M001 での絶対重力値は本探査実施前には決定されておらず、2台の重力計のスケール定数もこれまで決定されていなかった。また、小林・他 (1995)による既存データと併合解析するために、同研究にて基点に使用された東大霧島火山観測所水準点 (KVO) との接続が必要である。そこで絶対重力値が既知の鹿児島一等重力点 (KGS-GS)、始良重力基準点 (AIR-FGS)、東京大学地震研究所霧島火山観測所 (KVO) と M001 とを結ぶ往復測量により重力計スケール検定を行うとともに、絶対重力値との接続を行った。なお、KGS-GS および AIR-FGS についてはそれぞれ国土地理院による 979,471.200 mgal (JGSN96)、979,431.455 mgal (2001年9月測定) の値を用いた。一方、KVO については小林・他 (1995)によって決定された 979,222.54 mgal を用いた。これは IGSN75 系の既知点から接続されたものである。同一時期に同一の重力系に対して決定することが望ましいと考えられるが、1 mgal 程度の精度で議論する探査目的には十分と考え上述の処理を行った。CG3M (#9608454) については 2006年12月、CG5 (#300500033) については 2009年12月に検定測量を実施し、スケール定数としてそれぞれ 1.00142、1.00004 の値を得た。スケール検定後の同検定測線上での両重力計による差は最大で 0.017 mgal であった。絶対重力値が未知であった M001 に関しては、両者の差が 0.011 mgal であり、これらの平均 979,373.148 mgal を同点の絶対重力値として採用した。

探査のための観測は、M001 を起点とし当日のうちに閉環測量あるいは往復測量を閉じる形で実施した。上記のスケール補正、閉環、往復測量によるドリフト補正の他に、潮汐補正を施している。小林・他 (1995)に記載されている KVO での値および異常と判断された2点のデータを取り除き、計 144 点の新たな重力値を Table 2.3.3 にまとめる。

2.3.4 ブーゲー異常

2.3.4.1 重力補正

今回の測定データは小林・他 (1995)によるデータ (Fig. 2.3.1 の水色●) とともに、ブーゲー補正処理を行った。ブーゲー異常 g^{Boug} は以下のように表現される：

$$g^{Boug} = g^{obs} - \gamma + \beta h + (-Bc^{unit} + Tc^{unit}) \rho^{Boug} + Ac$$

ここで、 g^{obs} 、 γ 、 β 、 h 、 Bc^{unit} 、 Tc^{unit} 、 ρ^{Boug} 、 Ac はそれぞれ重力観測値、正規重力値、正規重力鉛直勾配、観測点標高、単位密度当たりのブーゲー補正量、単位密度当たりの地形補正量、補正密度 (ブーゲー密度) および気圧補正量である。正規重力 γ は測地基準系 1980 (Moritz, 1984) に従い、正規重力鉛直勾配 β は 0.3086 mgal/m を使用した。なお、鉛直勾配に正規重力による値を用いているため、得られるブーゲー異常は観測点標高での station Bouguer anomaly である (萩原, 1981)。ブーゲー補正には、萩原 (1975)による球殻を用いた球面補正を半径 80 km の範囲について実施した。地形補正についてもブーゲー補正と同じ領域に対して球面補正を実施した。地形データを角柱要素で近似し、野崎 (1981)で行われているように、観測点からの距離に応じて角柱要素の高度を下げる形で地球の曲率の影響を反映させた。また、山本 (1984) は測定点近傍の地形データの精度が地形補正の精度を高める上で極めて重要であることを指摘している。特に今回のように急峻な山体を対象とした探査においては出来る限り精密な地形データを使用することが望ましい。霧島火山では国土地理院より白鳥山、韓国岳、大浪池、新燃岳、高千穂峰西側等を含む領域で 10 m メッシュの地形データが刊行されており、2.3.3.1 で確認したように 50 m メッシュデータより精度が高いと考えられる。そこで広域的には 50 m メッシュデータを使用し、10 m メッシュデータが刊行されている領域については 50 m メッシュデータの中にこれを組み込む形で地形補正を実施した。

2.3.4.2 ブーゲー密度

重力データによる霧島火山地域の地下の平均的密度の推定は多くの先行研究により試みられており、それらは小林・他 (1995)にまとめられている。これを見ると、推定される密度はその推定法や領域によって 2.0 から 2.428 g/m³ と幅が大きい。本研究においても、複数の領域について F-H 法 (Parasnis, 1979) による推定を行った (Table 2.3.4)。なお、この方法では、ブーゲー異常と地形との相関がないことを仮定しており、仮に正の相関がある場合にはブーゲー密度として現実と較べ大きな値が、負の相関がある場合には小さな値が推定される (例えば、高倉・花岡, 1988)。そこで、広域的なブーゲー異常と地形との相関を軽減するために対象地域を細分化した Fukao et al. (1981)による方法も併せて実施した。

対象全領域 (Fig. 2.3.1a の領域) およびそれより若干狭い地質図の領域 (Fig. 2.3.1b) に対して F-H 法を用いた場合、それぞれ 2.49 g/cm³, 2.55 g/cm³ と先行研究より大きめの値が推定された。領域(a)については、鮮新世以降のコア試料の平均密度に近い。これら領域(a), (b)について、領域を分割した場合をそれぞれ Fig. 2.3.4 および Fig. 2.3.5 に示す。

なお、領域の分割数を増やす程、1 領域内のデータ数が減ることから、ここでは最低 5 データが含まれる領域のみを用いることとし、それぞれの図の(b)に全領域数に対する使用した領域数、全データ数に対する使用データ数の割合を示した。大局的にはどちらの場合でも分割数を上げるにつれて推定密度が小さくなった。このことは、村田 (1990)

Table 2.3.4 Bouguer densities estimated by the F-H relation (Parasnis, 1979). Each region is shown in Fig. 2.3.1.

Region	# of Data	Density [g/cm ³]
(a) All	977	2.49
(b) Geological Map	629	2.55
(c) Shinmoe-dake	63	2.24
(d) Takachiho-no-mine	87	1.95

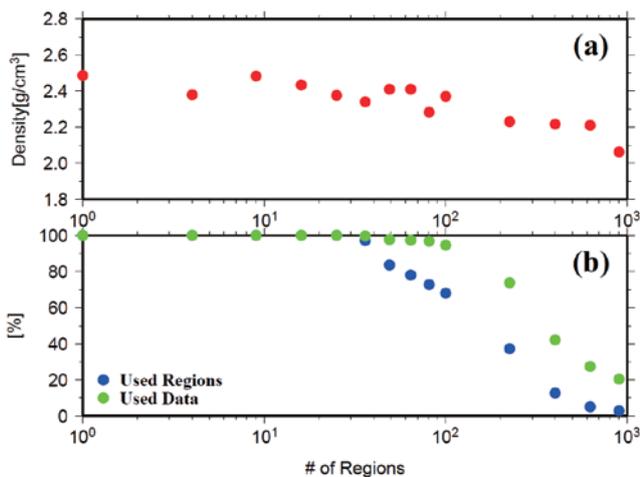


Fig. 2.3.4 Estimated Bouguer densities for region (a) in Fig. 2.3.1 by the method of Fukao et al. (1981). (a) Estimated density versus the number of divisions of the target region (a). (b) Proportions of regions used (blue) and data used (green) in the Bouguer density calculations.

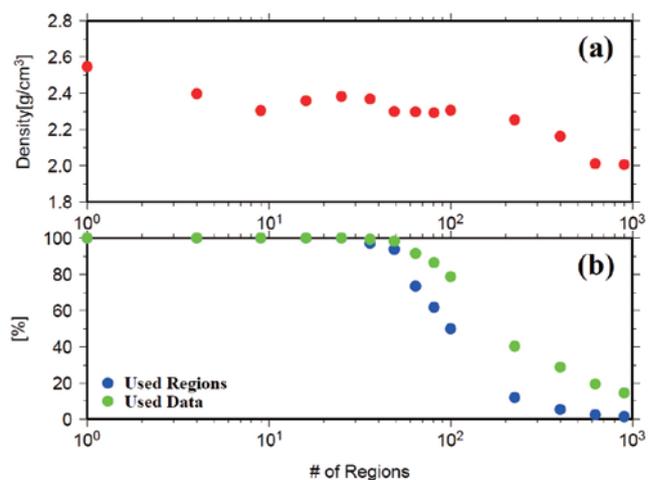


Fig. 2.3.5 Estimated Bouguer densities for region (b) in Fig. 2.3.1 by the method of Fukao et al. (1981). Notation is the same as in Fig. 2.3.4.

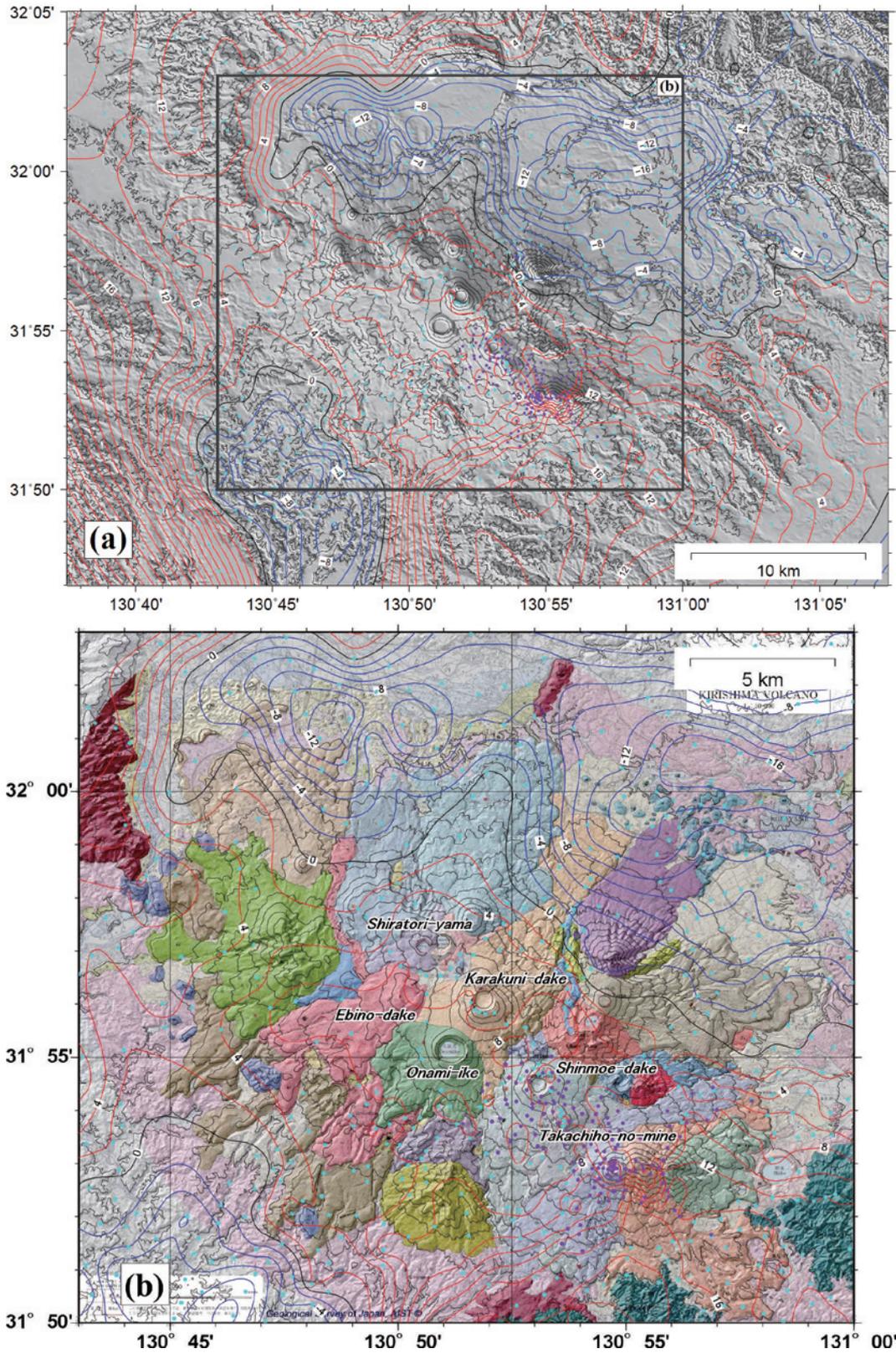


Fig. 2.3.6 Bouguer anomaly map around Kirishima volcano group, relative to a Bouguer density of 2.3 g/cm^3 . Contour interval is 2 mgal. Red and blue contours indicate positive and negative anomalies, respectively. Other details are the same as in Fig. 2.3.1.

にて Fukao et al. (1981)の方法や ABIC 最小化法を用いた場合と同様の傾向であり、広域的にはブーゲー異常と地形との間に正の相関があると考えられる。ただし、領域の取り方によって推定密度の値や分割による低下の仕方が異なる結果が得られた。領域(a)では分割前の 2.49 g/cm^3 から分割数を上げるに従い、密度の増減を繰り返しながら徐々に低下していく。これに対し領域(b)では、分割前の 2.55 g/cm^3 から 9 分割での 2.3 g/cm^3 まで分割数に従い低下し、その後分割数 100 程度までおよそ 2.3 g/cm^3 で安定する。また、新燃岳 (Fig. 2.3.1 の領域(c)) および高千穂峰 (領域(d)) のみを対象とした F-H 法を実施した場合、それぞれ 2.24 g/cm^3 および 1.95 g/cm^3 と広域での推定より小さい値が得られた。これらのことから、地域ごとに平均密度は大きく変化すると想像され、平均的密度を一意に決定することは容易ではない。ここでは、領域(b)での Fukao et al. (1981)の方法にて領域分割中、比較的安定して得られた 2.3 g/cm^3 に対して作成したブーゲー異常図を示すことにする (Fig. 2.3.6)。なお、ここではコンター間隔 2 mgal にて作成した。このコンター間隔は、**2.3.3.1** で議論した測定点の位置決定精度の観点からは、GPS 干渉測位や三角点、GPS 単独測位で 10 m メッシュ数値地図を用いて標高を決定した領域は問題ないと考えられるが、 50 m メッシュで標高を決定した領域では精度に満たない場合もあり得ると思われる。

なお、 10 m メッシュ地形データを組み込んで地形補正を行った今回の結果は、 50 m メッシュ地形データのみで実施した場合と較べて、最大で 1.5 mgal の差が生じた。ただし、必ずしも地形の急峻な地域で差が大きいわけではなく、御鉢火山や新燃岳火口縁でのブーゲー異常の差は高々 0.3 mgal 程度であった。大きな差が生じた地域はむしろ 50 m メッシュデータのうち十分な精度を有していない地域に相当すると思われる。

2.3.5 考察

2.3.5.1 広域的特徴

すでに先行研究 (瀬谷・小川, 1971; 田島・荒牧, 1980; 小林・他, 1995) にて指摘されているように霧島火山群周辺を含めた広域的なスケールでは以下のような特徴が認められる。すなわち、霧島火山群北西の加久藤盆地、北東の小林盆地、南西の安楽地域における負の異常で、それぞれ加久藤カルデラ、小林カルデラ、安楽カルデラとされたものである。補正密度を 2.3 g/cm^3 とした場合、それぞれ -13 mgal 、 -17 mgal 、 -10 mgal の異常に達する (Fig. 2.3.6)。一方、霧島火山群南方では、東北東-西南西方向に走向を持つ重力の急変帯が存在し、その南方では正の異常が認められる。これは西麓の坑井にて海水準下約 $1,000 \text{ m}$ で確認された地質学的基盤である四万十累層群が南方では地表に露出していることに対応している。この特徴は筒井・他 (1996)による屈折法探査でも認められ、速度基盤が北西に向かい深く、南東方で浅くなっている。

2.3.5.2 高千穂峰

ほぼ重力の急変帯上に位置する高千穂峰では、おおよそ山体に対応する低重力異常が認められる (Fig. 2.3.6)。見やすくするために Fig. 2.3.7 にブーゲー異常から波長 4 km より短波長成分のみを取り出した重力異常図を示す。このような異常が認められた際、不正確な地形データによる地形補正処理による影響も懸念される。しかし、今回は高千穂峰山頂部より西側は 10 m メッシュデータを利用している。また、1) 仮に地形データの情報が 50 m メッシュ程度の分解能、精度しか有しない場合でも、その地形補正量は 10 m メッシュデータを用いた場合と較べ高々 0.3 mgal 程度の差しか生じないこと、2) **2.3.3.1** で記したように、 10 m メッシュデータを使用した場合、御鉢火山の火口縁においても最大で 4.3 m しかずれていないこと、からこの低重力異常は有意と考えられる。高千穂峰領域 ((d)領域) のデータを用いて F-H 法によって推定される密度は 1.95 g/cm^3 であり (Table 2.3.4)、広域データによる F-H 法推定密度や、溶岩の卓越する栗野・手洗地域の坑井コア平均密度よりも顕著に小さく、山体の密度は比較的低いことが推定される。

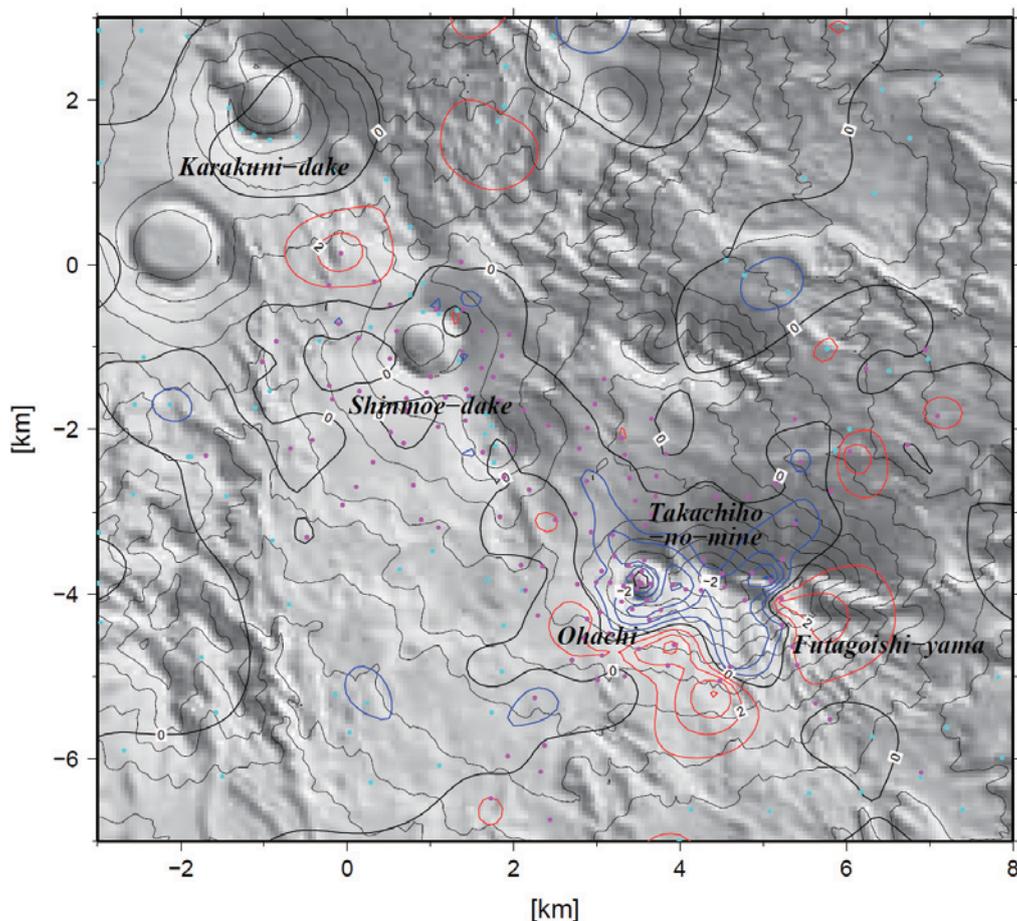


Fig. 2.3.7 Short-wavelength component of the gravity anomaly around Shinmoedake. Contour interval is 1 mgal.

Imura (1992)および井村 (1994) は、霧島火山群の活動履歴に関して「溶岩流出型活動期—静穏期—爆発型活動期」という変遷を指摘し、高千穂峰、御鉢、御池等の霧島南部の火山が活動的であった完新世の活動は、溶岩に対するテフラの比率が高く爆発型活動期に相当することを示している。井ノ上 (1988)によれば、高千穂複合火山は東から西に、二子石火山、古高千穂峰火山、高千穂峰火山、御鉢火山の4つの火山体が重なり合っており、東から西へ向けて若くなる。このうち東端にある二子石火山は22,000年以前には活動は終息していたと推定され、山体は火山砕屑物に対し溶岩が卓越し、同火山源テフラは発見されていない。一方、残りの3火山はすべて完新世に入ってから活動を開始し、どれも東麓にテフラ層を残す火砕噴火を伴いながら山体を成長させている。大局的には二子石火山以外の完新世に活動した西寄りの3火山に対応して負の異常が分布している。さらに御鉢火山に関しては、ほぼ山体部に対応した負の異常が認められる。井ノ上 (1988)によれば、古高千穂峰火山、高千穂峰火山の山体は薄い溶岩流と火山砕屑物による成層構造を成しているのに対し、御鉢火山では、溶岩は麓のみに存在し、山体部は降下火砕物の溶結部と非溶結部の互層で成層火山を形成しており溶岩は全く存在しない。この御鉢火山の低重力異常は火砕噴火によって形成された低密度の山体に起因すると推定される。

2.3.5.3 新燃岳

小林・他 (1995)によれば、韓国岳から獅子戸岳、新燃岳、中岳を縦走するルートでは明瞭な異常は検出されなかった。今回の新燃岳山腹のデータも含め補正密度を 2.3 g/cm^3 とした場合でも、新燃岳と韓国岳との鞍部に 2 mgal 程度の正の異常が認められる以外には顕著な異常は検出されない (Fig. 2.3.7)。

井村・小林 (1991)によれば、新燃岳の主山体は溶岩の累積によって形成されており、その上に完新世に噴出した火山砕屑物による一部溶結した火砕丘が載る。2.3.2 で見たように霧島火山群で溶岩が卓越し、新燃岳でも主山体は溶岩から成るため、顕著な異常が認められないと推定される。ただし、補正密度を 2.3 g/cm^3 として顕著な異常が認められないことや、新燃岳領域（領域(c)）のデータを用いて F-H 法を実施すると 2.24 g/cm^3 となり、どちらもコア試料の平均値 2.48 g/cm^3 より小さいことは表層に分布する火山砕屑物の影響を若干反映しているのかもしれない。また、新燃岳と韓国岳との鞍部の正の異常が認められる場所は、井村・小林 (2001)によれば噴出源不明の霧島火山噴出物が露出する場所に相当する。

2.3.6 まとめ

霧島火山群の地下密度構造の解明を目的として、霧島火山の新燃岳および高千穂峰において重力探査を行った。本探査で得られたデータと小林・他 (1995)による広域的なデータとを併合しブーゲー異常図を作成した。この結果、広域的には先行研究で明らかになってきたカルデラに対応する低重力異常や地質学的基盤露出域に対応する高重力異常が認められた。局所的には御鉢火山を含む高千穂峰において低重力異常が検出された。これは完新世以降の火砕噴火を伴う噴火様式に起因していると推定される。一方、新燃岳については顕著な異常は検出されなかった。これは新燃岳の主山体が溶岩の累積により形成されており、火山群全体と大きな差異が見られないためと考えられる。

(鬼澤真也)

謝辞

国土地理院測地部物理測地課および宇宙測地課の皆様には、始良基準重力点、鹿児島一等重力点における測定のための便宜を図って頂くとともに最新の測量成果の御提供を頂きました。GPS 干渉測位による観測点座標の決定には国土地理院電子基準点のデータを利用致しました。表層地質図には産業技術総合研究所発行の火山地質図を使用させて頂きました。また、本探査は中橋正樹氏、小窪則夫氏のご協力により実施されました。さらに、小林茂樹氏により取りまとめられた広域の重力データを利用することにより、本報告を作成することができました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- Fukao, Y., A. Yamamoto and K. Nozaki, 1981: A method of density determination for gravity correction. *J. Phys. Earth*, **29**, 163-166.
- 福井敬一, 2008: 霧島山における GPS 観測. 気象研究所技術報告, **53**, 144-154.
- 御幸和則, 1995: 鹿児島県霧島地熱地域大霧地熱開発地区の地質学的手法による地熱構造解析. *資源地質*, **45**, 41-52.
- 御幸和則・児玉牧夫・信本亮一, 1995: 霧島地熱地域大霧開発地区の地熱調査とその開発. *資源地質*, **45**, 377-390.
- 萩原幸男, 1975: 通常のブーゲー補正と球面ブーゲー補正. *測地学会誌*, **21**, 16-18.
- 萩原幸男, 1981: ブーゲー・リダクションにおける重力鉛直勾配異常の重要性. *測地学会誌*, **27**, 61-69.
- 今給黎哲郎・大脇温子, 2011: 火山 GPS 統合解析データに基づく霧島山の変動源モデル. *国土地理院時報*, **121**, 183-188.
- Imura, R., 1992: Eruptive history of the Krishima volcano during the past 22,000 years. *Geogr. Rep. Tokyo Metropol. Univ.*, **27**, 73-91.
- 井村隆介, 1994: 霧島火山の地質. *東京大学地震研究所彙報*, **69**, 189-209.

- 井村隆介・小林哲夫, 1991: 霧島火山群新燃岳の最近 300 年間の噴火活動. 火山, **36**, 135-148.
- 井村隆介・小林哲夫, 2001: 霧島火山地質図. 火山地質図 11, 地質調査所.
- 井ノ上幸造, 1988: 霧島火山群高千穂複合火山の噴火活動史. 岩鉱, **83**, 26-41.
- 鍵山恒臣・歌田久司・上嶋 誠・増谷文雄・神田 径・田中良和・増田秀晴・村上英記・塩崎一郎・市来雅啓・行武 毅・茂木 透・網田和宏・大志万直人・三品正明, 1996: 霧島火山群中南東部の比抵抗構造. 火山, **41**, 215-225.
- 小林茂樹・志知龍一・仲西秀人・渡辺秀文・鬼澤真也, 1995: 霧島火山および周辺カルデラにおける緻密重力測定. 東京大学地震研究所彙報, **70**, 103-136.
- 町田 洋・太田陽子・河名俊男・森脇 広・長岡信治(編), 2001: 日本の地形7九州・南西諸島. 東京大学出版, 355pp.
- 三ヶ田 均, 1996: 霧島火山群構造探査データの反射法処理. 火山, **41**, 159-170.
- Moritz, H., 1984: Geodetic reference system 1980. Bull. Geod., **58**, 388-398.
- 村田泰章, 1990: ABIC 最小化法によるブーゲー密度の推定. 地震, **43**, 327-339.
- 西 潔, 1997: 構造探査データを用いた霧島火山体浅部の 3D 速度構造. 火山, **42**, 165-170.
- 野崎京三, 1981: 球面地形補正の計算プログラム. 測地学会誌, **27**, 23-32.
- Parasnis, D.S., 1979: Principles of applied geophysics! Third edition, Chapman and Hall, London, 275pp.
- 瀬谷 清・小川健三, 1971: えびの・吉松地区地震地域の重力異常について. 防災科学技術総合研究報告, **26**, 47-61.
- 新エネルギー総合開発機構, 1983: 地熱開発促進調査報告書No.3栗野・手洗地域.
- 田島広一・荒牧重雄, 1980: 霧島火山周辺の Bouguer 異常. 東京大学地震研究所彙報, **55**, 241-257.
- 高木朗充・福井敬一・鬼澤真也・山本哲也・加藤幸司・近澤 心・藤原健治・坂井孝行, 2011 年霧島山新燃岳噴火前の山頂部地殻変動. 験震時報, 投稿中.
- 高倉伸一・花岡尚之, 1988: G-H 関係とそこから推定される密度の持つ意味. 物理探査, **41**, 316-328.
- 筒井正明・富田克利・小林哲夫, 2005: 霧島・御鉢火山における 2003 年 12 月以降の噴気活動と明治～大正時代の噴火活動. 火山, **50**, 475-489.
- 筒井智樹・他 68 名, 1996: 人工地震探査による霧島火山群の地震波速度構造—はぎとり法による解析—. 火山, **41**, 227-241.
- 山本明彦, 1984: 山岳地域の重力データ処理. 月刊地球, **6**, 373-380.
- Yamamoto, K. and Y. Ida, 1997: Significant P wave attenuation for a specific frequency range beneath Kirishima volcano, Japan. Geophys. Res. Lett., **24**, 1275-1278.

Table 2.3.2 Locations of gravity observation sites..

Site NO.	JGD2000						Tokyo Datum						Altitude [m]	Positioning	Date	Remarks		
	Latitude			Longitude			Latitude			Longitude								
	[deg]	[min]	[sec]	[deg]	[min]	[sec]	[deg]	[min]	[sec]	[deg]	[min]	[sec]						
M001	31	51	52.25	130	56	43.93	31	51	39.76	130	56	52.30	527.29	GPS	2004/9/6	GJ01		
M002	31	54	11.65	130	55	46.42	31	53	59.18	130	55	54.78	752.49	GPS		GC04		
M003	31	54	23.26	130	57	37.16	31	54	10.79	130	57	45.53	337.00	GPS		GJ03		
M004	31	57	30.77	130	53	44.81	31	57	18.31	130	53	53.16	763.28	GPS		GC05		
M005	31	53	13.58	130	53	51.02	31	53	1.11	130	53	59.36	981.03	GPS	2004/9/8	GC01		
M006	31	53	11.85	130	54	18.07	31	52	59.37	130	54	26.41	1157.56	GPS		GT01		
M007	31	53	13.92	130	54	30.16	31	53	1.45	130	54	38.50	1321.42	GPS		GT06F		
M008	31	53	16.10	130	54	37.62	31	53	3.63	130	54	45.96	1354.02	GPS		GT03		
M009	31	53	6.96	130	54	36.21	31	52	54.48	130	54	44.56	1207.14	GPS		GT07		
M010	31	53	5.88	130	54	28.15	31	52	53.41	130	54	36.49	1294.90	GPS		GT02		
M011	31	53	0.10	130	54	38.88	31	52	47.62	130	54	47.23	1338.51	GPS		GT05		
M012	31	53	6.27	130	54	50.52	31	52	53.80	130	54	58.86	1407.68	GPS		GT04		
M013	31	53	10.69	130	55	13.09	31	52	58.22	130	55	21.44	1515.39	GPS		GJ04		
M014	31	54	15.1	130	52	48.6	31	54	2.6	130	52	56.9	1206.8	Handy Topo10		2004/9/9	MS10	
M015	31	54	23.43	130	53	16.12	31	54	10.96	130	53	24.46	1327.61	GPS			GS04	
M016	31	54	28.23	130	52	59.80	31	54	15.76	130	53	8.14	1407.14	GPS			GS05	
M017	31	54	38.27	130	53	14.39	31	54	25.80	130	53	22.72	1404.24	GPS			GS03	
M018	31	54	54.80	130	53	2.36	31	54	42.33	130	53	10.69	1381.98	GPS	GS02			
M019	31	54	46.39	130	52	44.28	31	54	33.92	130	52	52.61	1353.42	GPS	GS01			
M020	31	53	41.3	130	52	19.8	31	53	28.8	130	52	28.1	1007.9	Handy Topo10				
M022	31	53	4.2	130	53	43.1	31	52	51.7	130	53	51.4	965.0	Handy Topo10				
M023	31	53	25.1	130	52	3.2	31	53	12.6	130	52	11.5	859.3	Handy Topo10	2004/9/10	GJ02		
M024	31	53	57.29	130	51	17.15	31	53	44.82	130	51	25.48	939.14	GPS				
M026	31	52	21.8	130	53	47.4	31	52	9.3	130	53	55.7	809.0	Handy Topo10	2006/12/14			
M027	31	51	58.8	130	53	35.1	31	51	46.3	130	53	43.4	723	Handy Topo50				
M028	31	51	33.7	130	53	54.4	31	51	21.2	130	54	2.7	667	Handy Topo50				
M029	31	53	17.8	130	54	23.9	31	53	5.3	130	54	32.2	1217.0	Handy Topo10	2006/12/15			
M030	31	53	9.9	130	54	32.0	31	52	57.4	130	54	40.3	1255.9	Handy Topo10				
M031	31	53	11.6	130	54	36.3	31	52	59.1	130	54	44.6	1248.8	Handy Topo10				
M032	31	53	7.8	130	54	35.1	31	52	55.3	130	54	43.4	1209.1	Handy Topo10				
M033	31	53	6.7	130	54	40.3	31	52	54.2	130	54	48.6	1246.4	Handy Topo10				
M034	31	53	4.7	130	54	34.2	31	52	52.2	130	54	42.5	1243.4	Handy Topo10				
M035	31	52	59.7	130	54	27.1	31	52	47.2	130	54	35.4	1263.9	Handy Topo10				
M036	31	52	56.6	130	54	32.0	31	52	44.1	130	54	40.3	1258.0	Handy Topo10				
M037	31	53	7.2	130	54	22.0	31	52	54.7	130	54	30.3	1215.5	Handy Topo10				
M038	31	53	7.4	130	54	15.5	31	52	54.9	130	54	23.8	1147.5	Handy Topo10				
M039	31	53	6.6	130	54	6.9	31	52	54.1	130	54	15.2	1085.5	Handy Topo10				
M040	31	52	54.3	130	53	48.8	31	52	41.8	130	53	57.1	987.9	Handy Topo10				
M041	31	53	57.6	130	54	28.7	31	53	45.1	130	54	37.0	990.3	Handy Topo10			2006/12/16	
M042	31	53	34.4	130	54	5.9	31	53	21.9	130	54	14.2	1016.1	Handy Topo10				
M043	31	53	26.0	130	54	23.1	31	53	13.5	130	54	31.4	1113.3	Handy Topo10				
M044	31	53	27.0	130	54	13.2	31	53	14.5	130	54	21.5	1054.0	Handy Topo10				
M045	31	53	57.9	130	54	47.4	31	53	45.4	130	54	55.7	975.1	Handy Topo10	2007/6/6			
M046	31	53	49.2	130	54	43.1	31	53	36.7	130	54	51.4	1003.8	Handy Topo10				
M047	31	53	41.2	130	54	42.7	31	53	28.7	130	54	51.0	1034.4	Handy Topo10				
M048	31	53	33.9	130	54	40.9	31	53	21.4	130	54	49.2	1087.3	Handy Topo10				
M049	31	53	29.7	130	54	38.1	31	53	17.2	130	54	46.4	1124.0	Handy Topo10				
M050	31	53	39.4	130	54	33.5	31	53	26.9	130	54	41.8	1048.3	Handy Topo10				
M051	31	53	48.2	130	54	30.7	31	53	35.7	130	54	39.0	1019.3	Handy Topo10				
M052	31	52	38.5	130	54	18.2	31	52	26.0	130	54	26.5	920.2	Handy Topo10	2007/6/7			
M053	31	52	47.1	130	54	21.5	31	52	34.6	130	54	29.8	1007.2	Handy Topo10				
M054	31	52	55.4	130	54	17.1	31	52	42.9	130	54	25.4	1083.6	Handy Topo10				
M055	31	52	52.8	130	54	11.4	31	52	40.3	130	54	19.7	1007.3	Handy Topo10				
M056	31	52	45.3	130	54	9.9	31	52	32.8	130	54	18.2	951.0	Handy Topo10				
M057	31	52	36.7	130	54	4.5	31	52	24.2	130	54	12.8	904.9	Handy Topo10				
M058	31	51	42.2	130	53	27.4	31	51	29.7	130	53	35.7	682	Handy Topo50				
M059	31	51	52.7	130	53	50.1	31	51	40.2	130	53	58.4	724	Handy Topo50				
M060	31	52	3.0	130	53	51.8	31	51	50.5	130	54	0.1	747.3	Handy Topo10				
M061	31	52	52.5	130	54	39.9	31	52	40.0	130	54	48.2	1187.8	Handy Topo10			2007/6/8	
M062	31	52	56.3	130	54	45.0	31	52	43.8	130	54	53.3	1248.0	Handy Topo10				
M063	31	53	4.4	130	54	56.5	31	52	51.9	130	55	4.8	1395.2	Handy Topo10				
M064	31	53	4.1	130	55	3.5	31	52	51.6	130	55	11.8	1436.0	Handy Topo10				
M065	31	53	16.1	130	55	4.6	31	53	3.6	130	55	12.9	1464.5	Handy Topo10				
M066	31	52	41.1	130	54	35.1	31	52	28.6	130	54	43.4	987.0	Handy Topo10	2007/6/9			
M067	31	52	34.5	130	54	48.3	31	52	22.0	130	54	56.6	918.7	Handy Topo10				
M068	31	52	42.7	130	54	51.1	31	52	30.2	130	54	59.4	1011.1	Handy Topo10				
M069	31	52	28.4	130	55	12.1	31	52	15.9	130	55	20.5	903.9	Handy Topo10				
M070	31	52	34.0	130	55	16.8	31	52	21.5	130	55	25.2	1016.9	Handy Topo10				
M071	31	52	30.3	130	54	28.6	31	52	17.8	130	54	36.9	864.9	Handy Topo10				
M072	31	59	3.85	130	58	40.63	31	58	51.41	130	58	49.01	227.91	TRI	2007/6/10	Nagatadaira		

Table 2.3.2 (Continued)

Site NO.	JGD2000						Tokyo Datum						Altitude [m]	Positioning	Date	Remarks			
	Latitude			Longitude			Latitude			Longitude									
	[deg]	[min]	[sec]	[deg]	[min]	[sec]	[deg]	[min]	[sec]	[deg]	[min]	[sec]							
M073	31	54	49.3	130	52	17.8	31	54	36.8	130	52	26.1	1126.0	Handy	Topo10	2007/6/11	GC03		
M074	31	54	56.8	130	52	41.2	31	54	44.3	130	52	49.5	1251.8	Handy	Topo10				
M075	31	55	13.48	130	53	13.73	31	55	1.01	130	53	22.07	1266.49	GPS	Topo10				
M076	31	54	55.1	130	53	14.6	31	54	42.6	130	53	22.9	1334.1	Handy	Topo10				
M077	31	54	46.3	130	53	23.3	31	54	33.8	130	53	31.6	1331.8	Handy	Topo10				
M078	31	54	45.0	130	53	35.8	31	54	32.5	130	53	44.1	1281.9	Handy	Topo10				
M079	31	54	36.6	130	53	32.4	31	54	24.1	130	53	40.7	1285.4	Handy	Topo10				
M080	31	54	31.8	130	53	23.1	31	54	19.3	130	53	31.4	1320.5	Handy	Topo10				
M081	31	54	20.2	130	53	6.7	31	54	7.7	130	53	15.0	1288.5	Handy	Topo10				
M082	31	54	22.2	130	52	58.0	31	54	9.7	130	53	6.3	1328.6	Handy	Topo10				
M083	31	54	35.5	130	52	41.2	31	54	23.0	130	52	49.5	1349.5	Handy	Topo10				
M084	31	53	14.1	130	53	41.2	31	53	1.6	130	53	49.5	1015.6	Handy	Topo10			2007/6/12	Nakadake GJ05
M085	31	53	33.2	130	53	31.5	31	53	20.7	130	53	39.8	1115.8	Handy	Topo10				
M086	31	53	48.7	130	53	33.3	31	53	36.2	130	53	41.6	1205.7	Handy	Topo10				
M087	31	53	58.48	130	53	23.59	31	53	46.01	130	53	31.93	1332.36	TRI	Topo10				
M088	31	54	11.1	130	53	15.7	31	53	58.6	130	53	24.0	1315.4	Handy	Topo10				
M089	31	53	59.84	130	53	37.12	31	53	47.37	130	53	45.45	1324.54	GPS	Topo10				
M090	31	53	43.8	130	53	45.0	31	53	31.3	130	53	53.3	1113.1	Handy	Topo10				
M091	31	53	31.9	130	53	56.7	31	53	19.4	130	54	5.0	1039.0	Handy	Topo10				
M092	31	53	37.7	130	52	19.5	31	53	25.2	130	52	27.8	974.1	Handy	Topo10	2009/3/12			
M093	31	53	45.0	130	52	25.9	31	53	32.5	130	52	34.2	1019.4	Handy	Topo10				
M094	31	53	54.7	130	52	33.6	31	53	42.2	130	52	41.9	1082.3	Handy	Topo10				
M095	31	54	19.9	130	52	48.8	31	54	7.4	130	52	57.1	1244.6	Handy	Topo10				
M096	31	54	22.6	130	52	27.3	31	54	10.1	130	52	35.6	1159.6	Handy	Topo10				
M097	31	54	19.4	130	52	14.9	31	54	6.9	130	52	23.2	1093.8	Handy	Topo10				
M098	31	54	3.4	130	52	5.8	31	53	50.9	130	52	14.1	1010.7	Handy	Topo10				
M099	31	54	0.0	130	51	55.7	31	53	47.5	130	52	4.0	914.7	Handy	Topo10				
M100	31	53	31.9	130	52	55.6	31	53	19.4	130	53	3.9	999.9	Handy	Topo10				
M101	31	53	45.5	130	52	51.9	31	53	33.0	130	53	0.2	1059.9	Handy	Topo10				
M102	31	53	28.9	130	53	3.4	31	53	16.4	130	53	11.7	976.2	Handy	Topo10				
M103	31	53	47.2	130	54	11.3	31	53	34.7	130	54	19.6	999.8	Handy	Topo10			2009/3/14	
M104	31	54	27.3	130	54	19.2	31	54	14.8	130	54	27.5	1012.9	Handy	Topo10				
M105	31	54	17.4	130	54	15.1	31	54	4.9	130	54	23.4	1036.5	Handy	Topo10				
M106	31	54	8.2	130	54	11.6	31	53	55.7	130	54	19.9	1034.8	Handy	Topo10				
M107	31	54	4.1	130	54	27.2	31	53	51.6	130	54	35.5	973.4	Handy	Topo10				
M108	31	54	11.8	130	54	40.8	31	53	59.3	130	54	49.1	964.3	Handy	Topo10				
M109	31	54	6.5	130	52	41.6	31	53	54.0	130	52	49.9	1139.6	Handy	Topo10	2009/3/15			
M110	31	54	8.6	130	53	3.2	31	53	56.1	130	53	11.5	1188.0	Handy	Topo10				
M111	31	54	2.2	130	52	47.4	31	53	49.7	130	52	55.7	1130.3	Handy	Topo10				
M112	31	52	13.2	130	56	2.4	31	52	0.7	130	56	10.8	715	Handy	Topo50	2009/3/16			
M113	31	52	19.6	130	55	55.8	31	52	7.1	130	56	4.2	778	Handy	Topo50				
M114	31	52	34.7	130	55	47.4	31	52	22.2	130	55	55.8	914	Handy	Topo50				
M115	31	52	41.9	130	55	45.2	31	52	29.4	130	55	53.6	1008	Handy	Topo50				
M116	31	52	50.5	130	55	40.5	31	52	38.0	130	55	48.9	1130	Handy	Topo50				
M117	31	53	0.9	130	55	40.1	31	52	48.4	130	55	48.5	1245	Handy	Topo50				
M118	31	53	8.0	130	55	35.3	31	52	55.5	130	55	43.7	1310	Handy	Topo50				
M119	31	53	5.5	130	55	14.3	31	52	53.0	130	55	22.7	1506.9	Handy	Topo10				
M120	31	53	0.2	130	55	23.4	31	52	47.7	130	55	31.8	1403.0	Handy	Topo10				
M121	31	53	11.0	130	55	26.8	31	52	58.5	130	55	35.2	1383	Handy	Topo50				
M122	31	53	16.2	130	55	40.8	31	53	3.7	130	55	49.2	1192	Handy	Topo50				
M123	31	53	30.3	130	55	46.5	31	53	17.8	130	55	54.9	986	Handy	Topo50				
M124	31	53	43.0	130	56	2.9	31	53	30.5	130	56	11.3	798	Handy	Topo50				
M125	31	53	58.6	130	56	11.5	31	53	46.1	130	56	19.9	661	Handy	Topo50				
M126	31	54	1.3	130	56	37.9	31	53	48.8	130	56	46.3	527	Handy	Topo50				
M127	31	54	12.8	130	56	51.6	31	54	0.3	130	56	60.0	483	Handy	Topo50				
M128	31	54	42.4	130	51	49.3	31	54	29.9	130	51	57.6	1063.6	Handy	Topo10	2009/3/17			
M129	31	55	5.7	130	52	34.1	31	54	53.2	130	52	42.4	1181.1	Handy	Topo10				
M130	31	55	17.1	130	52	18.8	31	55	4.6	130	52	27.1	1136.0	Handy	Topo10				
M131	31	55	4.5	130	52	13.2	31	54	52.0	130	52	21.5	1109.4	Handy	Topo10				
M132	31	54	43.5	130	52	26.8	31	54	31.0	130	52	35.1	1199.0	Handy	Topo10				
M133	31	54	24.8	130	52	13.5	31	54	12.3	130	52	21.8	1096.2	Handy	Topo10				
M135	31	54	34.3	130	51	42.8	31	54	21.8	130	51	51.1	976.0	Handy	Topo10				
M136	31	54	38.7	130	56	46.0	31	54	26.2	130	56	54.4	493	Handy	Topo50	2009/12/16			
M137	31	53	54.8	130	55	49.0	31	53	42.3	130	55	57.3	779	Handy	Topo50				
M138	31	53	46.3	130	55	37.9	31	53	33.8	130	55	46.2	881	Handy	Topo50				
M139	31	53	40.9	130	55	25.2	31	53	28.4	130	55	33.6	958	Handy	Topo50				
M140	31	53	41.0	130	55	10.4	31	53	28.5	130	55	18.7	1029.6	Handy	Topo10				
M141	31	54	31.5	130	56	18.8	31	54	19.0	130	56	27.2	598	Handy	Topo50				
M142	31	54	20.6	130	53	17.5	31	54	8.1	130	53	25.8	1317	Handy	Spot Height	2009/12/17			
M143	31	54	28.2	130	53	28.6	31	54	15.7	130	53	36.9	1283.4	Handy	Topo10				
M144	31	54	19.0	130	53	31.4	31	54	6.5	130	53	39.7	1251.5	Handy	Topo10				
M145	31	54	15.1	130	53	42.5	31	54	2.7	130	53	50.8	1198.7	Handy	Topo10				
M146	31	54	9.0	130	53	53.8	31	53	56.5	130	54	2.1	1160.0	Handy	Topo10				
M147	31	54	0.1	130	54	7.9	31	53	47.6	130	54	16.2	1044.2	Handy	Topo10				

Table 2.3.3 Observed gravities, terrain corrections for unit density (T_{unit}) and Bouguer anomalies (Banom) based on a Bouguer density is assumed to be 2.3 g/cm³

Site NO.	Observed Gravity [mgal]	T _{c unit} (2.3 g/cm ³)		Instrument		Date	
		[mgal/(g/cm ³)]	[mgal]	Type	S/N		
M001	979373.15	1.14	15.25	CG3M	9608454	2004/9/6	
M002	979316.03	2.97	7.00	CG3M	9608454		
M003	979406.00	1.33	4.79	CG3M	9608454		
M004	979309.09	2.95	-2.18	CG3M	9608454		
M005	979267.62	2.67	7.78	CG3M	9608454	2004/9/8	
M006	979224.36	4.89	7.24	CG3M	9608454		
M007	979179.14	8.43	5.00	CG3M	9608454		
M008	979169.73	9.24	4.37	CG3M	9608454		
M009	979212.96	6.13	9.33	CG3M	9608454		
M010	979187.11	7.86	6.20	CG3M	9608454		
M011	979172.32	10.04	5.84	CG3M	9608454		
M012	979154.42	10.65	3.96	CG3M	9608454		
M013	979124.32	15.12	7.01	CG3M	9608454		
M014	979217.24	4.03	7.18	CG3M	9608454	2004/9/9	
M015	979187.62	5.02	5.40	CG3M	9608454		
M016	979165.11	7.54	5.51	CG3M	9608454		
M017	979167.87	6.43	4.90	CG3M	9608454		
M018	979174.96	5.61	4.97	CG3M	9608454		
M019	979181.07	5.82	5.66	CG3M	9608454		
M021	979292.35	2.74	11.61	CG3M	9608454		
M022	979271.15	2.52	7.76	CG3M	9608454		2004/9/10
M023	979293.91	2.09	6.59	CG3M	9608454		
M024	979276.00	2.38	5.60	CG3M	9608454		
M026	979305.78	2.21	9.49	CG3M	9608454		
M027	979327.15	1.67	11.79	CG3M	9608454	2006/12/14	
M028	979342.64	1.53	15.71	CG3M	9608454		
M029	979207.42	6.03	5.43	CG3M	9608454		
M030	979200.35	6.34	7.54	CG3M	9608454	2006/12/15	
M031	979202.22	6.50	8.24	CG3M	9608454		
M032	979212.59	6.04	9.17	CG3M	9608454		
M033	979202.24	6.78	8.48	CG3M	9608454		
M034	979203.23	6.52	8.30	CG3M	9608454		
M035	979193.62	7.86	6.24	CG3M	9608454		
M036	979193.73	8.07	5.65	CG3M	9608454		
M037	979208.80	6.09	6.86	CG3M	9608454		
M038	979226.23	4.84	6.93	CG3M	9608454		
M039	979243.44	3.81	8.60	CG3M	9608454		
M040	979267.28	2.77	9.55	CG3M	9608454		
M041	979265.87	2.49	6.60	CG3M	9608454		2006/12/16
M042	979259.45	2.70	6.66	CG3M	9608454		
M043	979233.38	4.16	4.84	CG3M	9608454		
M044	979249.96	3.16	6.47	CG3M	9608454		
M045	979268.80	2.59	6.53	CG3M	9608454	2007/6/6	
M046	979262.76	2.81	7.28	CG3M	9608454		
M047	979254.51	3.23	6.69	CG3M	9608454		
M048	979241.68	3.90	6.82	CG3M	9608454		
M049	979232.46	4.49	6.88	CG3M	9608454		
M050	979251.57	3.16	6.59	CG3M	9608454		
M051	979258.46	2.78	6.24	CG3M	9608454		
M052	979282.72	3.34	12.28	CG3M	9608454		2007/6/7
M053	979258.72	4.45	9.14	CG3M	9608454		
M054	979241.51	4.98	9.21	CG3M	9608454		
M055	979262.11	3.81	10.94	CG3M	9608454		
M056	979275.64	3.15	11.15	CG3M	9608454		
M057	979286.49	2.84	11.67	CG3M	9608454		
M058	979338.42	1.67	14.88	CG3M	9608454		
M059	979329.18	1.68	14.20	CG3M	9608454		
M060	979322.89	1.85	13.08	CG3M	9608454		
M061	979212.37	7.00	6.97	CG3M	9608454	2007/6/8	
M062	979196.97	7.86	6.28	CG3M	9608454		
M063	979157.89	10.60	4.69	CG3M	9608454		
M064	979148.11	12.08	7.01	CG3M	9608454		
M065	979140.37	13.02	7.25	CG3M	9608454		
M066	979266.91	4.55	13.40	CG3M	9608454		
M067	979282.70	4.04	13.64	CG3M	9608454	2007/6/9	
M068	979261.70	5.22	14.82	CG3M	9608454		
M069	979288.03	4.35	16.68	CG3M	9608454		
M070	979255.30	5.41	10.28	CG3M	9608454		
M071	979293.86	3.11	11.32	CG3M	9608454		
M072	979422.46	0.85	-9.28	CG3M	9608454		2007/6/10

Site NO.	Observed Gravity [mgal]	T _{c unit} (2.3 g/cm ³)		Instrument		Date	
		[mgal/(g/cm ³)]	[mgal]	Type	S/N		
M073	979235.94	3.06	5.70	CG3M	9608454	2007/6/11	
M074	979208.36	3.99	6.87	CG3M	9608454		
M075	979206.11	3.75	6.82	CG3M	9608454		
M076	979187.67	4.64	5.24	CG3M	9608454		
M077	979187.62	4.82	5.31	CG3M	9608454		
M078	979199.60	4.40	5.73	CG3M	9608454		
M079	979198.62	4.43	5.75	CG3M	9608454		
M080	979189.75	4.88	5.50	CG3M	9608454		
M081	979196.74	4.81	5.78	CG3M	9608454		
M082	979186.59	5.72	6.21	CG3M	9608454		
M083	979182.39	5.97	6.75	CG3M	9608454		
M084	979259.69	2.82	7.53	CG3M	9608454	2007/6/12	
M085	979236.99	3.47	7.23	CG3M	9608454		
M086	979214.12	4.90	6.44	CG3M	9608454		
M087	979182.60	6.49	5.33	CG3M	9608454		
M088	979189.15	5.51	5.73	CG3M	9608454		
M089	979184.35	6.66	5.78	CG3M	9608454		
M090	979237.83	3.43	7.15	CG3M	9608454		
M091	979256.12	2.72	8.31	CG3M	9608454		
M092	979267.15	2.88	5.78	CG5	300500033		2009/3/12
M093	979257.28	2.83	5.26	CG5	300500033		
M094	979244.33	3.05	5.99	CG5	300500033		
M095	979206.86	4.47	5.77	CG5	300500033		
M096	979227.42	3.60	6.17	CG5	300500033		
M097	979242.56	3.05	6.11	CG5	300500033		
M098	979261.25	2.83	6.97	CG5	300500033		
M099	979282.12	2.45	6.62	CG5	300500033		
M100	979262.54	2.72	6.42	CG5	300500033		
M101	979249.05	3.09	6.24	CG5	300500033		
M102	979267.29	2.77	6.31	CG5	300500033	2009/3/14	
M103	979261.81	2.77	5.43	CG5	300500033		
M104	979261.19	2.66	6.45	CG5	300500033		
M105	979255.88	2.69	6.45	CG5	300500033		
M106	979255.27	2.73	5.77	CG5	300500033		
M107	979270.29	2.57	7.46	CG5	300500033		
M108	979271.55	2.44	6.32	CG5	300500033		
M109	979231.92	3.36	6.22	CG5	300500033		2009/3/15
M110	979220.07	3.87	5.79	CG5	300500033		
M111	979234.00	3.31	6.29	CG5	300500033		
M112	979329.07	2.56	13.78	CG5	300500033	2009/3/16	
M113	979315.64	3.03	14.69	CG5	300500033		
M114	979283.49	4.35	14.04	CG5	300500033		
M115	979260.38	5.61	13.68	CG5	300500033		
M116	979227.46	7.07	10.05	CG5	300500033		
M117	979203.44	8.17	12.76	CG5	300500033		
M118	979179.18	9.35	4.80	CG5	300500033		
M119	979125.65	14.64	5.54	CG5	300500033		
M120	979156.03	11.71	7.13	CG5	300500033		
M121	979160.19	11.27	5.86	CG5	300500033		
M122	979211.71	7.50	7.87	CG5	300500033		
M123	979260.18	4.94	6.23	CG5	300500033		
M124	979306.91	3.23	8.68	CG5	300500033		
M125	979340.26	2.49	11.05	CG5	300500033		
M126	979366.27	2.04	7.54	CG5	300500033		
M127	979377.40	1.68	8.12	CG5	300500033		
M128	979250.15	2.73	6.01	CG5	300500033		2009/3/17
M129	979226.12	3.47	8.17	CG5	300500033		
M130	979237.56	3.59	10.04	CG5	300500033		
M131	979242.56	3.09	8.50	CG5	300500033		
M132	979220.10	3.78	7.19	CG5	300500033		
M133	979242.79	3.05	6.72	CG5	300500033		
M135	979268.83	3.14	7.18	CG5	300500033		
M136	979372.64	1.56	4.65	CG5	300500033	2009/12/16	
M137	979309.26	2.88	6.03	CG5	300500033		
M138	979288.24	3.40	8.17	CG5	300500033		
M139	979269.77	4.02	7.63	CG5	300500033		
M140	979253.25	4.35	6.98	CG5	300500033		
M141	979350.20	1.83	5.34	CG5	300500033		
M142	979190.65	4.88	5.90	CG5	300500033		2009/12/17
M143	979198.75	4.46	5.71	CG5	300500033		
M144	979205.02	4.43	5.34	CG5	300500033		
M145	979217.33	3.98	5.45	CG5	300500033		
M146	979226.24	3.80	5.83	CG5	300500033		
M147	979252.73	2.85	5.70	CG5	300500033		