

うに、中央部に幅約 50 m、長さ 450 m の大きなガリが形成されている。ガリ上流端よりも上部の岩屑斜面は、広い緩斜面である。緩斜面を構成する物質は粗い。大きなガリは、この斜面から土石流を伴って流れ出している。中流部には 5 段の土石流堆積面が認められる。この部分での平均傾斜は、約 16° である。またカルデラ床に流れ込む部分での平均傾斜は約 14° である。

南部の岩屑斜面の平均的な傾斜は 31° であり、2003 年 9 月に撮影された空中写真を判読すると、表面には南東-北西方向に複数の小さなガリが走っている。東部の岩屑斜面に比べて、表面に起伏が少なくなだからであり、表面を構成する物質は細粒である。火口跡を縁取るようにガリが消えているので、岩屑斜面を覆った火山灰の影響でガリ侵食を受けた後、再度、火山灰に被覆されたものと思われる。

なお、南部の岩屑斜面は、中田ほか (2001) による 2000 年 10 月時点での地形分類図では火砕丘と分類されているが、本研究では岩屑斜面に分類した。その理由は、南部の岩屑斜面の最大傾斜方向が火口跡の中心とカルデラ床を結ぶ方向とは一致せず、火口跡が形成されたときの火砕丘とは思われないこと、走向とカルデラ床との境界が東部の岩屑斜面と一致しており、形成時期が東部の岩屑斜面と同時と考えられるからである。

東部の岩屑斜面の、大きなガリの下流端より北側の斜面には大小複数のガリが流れており、岩屑斜面が開析されていることを示している。これらのガリはカルデラ床に流れ込んでいて、沖積錐 (alluvial cone) を形成している。二つの大きな沖積錐で傾斜を図ったところ、北側の沖積錐で 4~8°、南側の沖積錐で 4~7° であった。

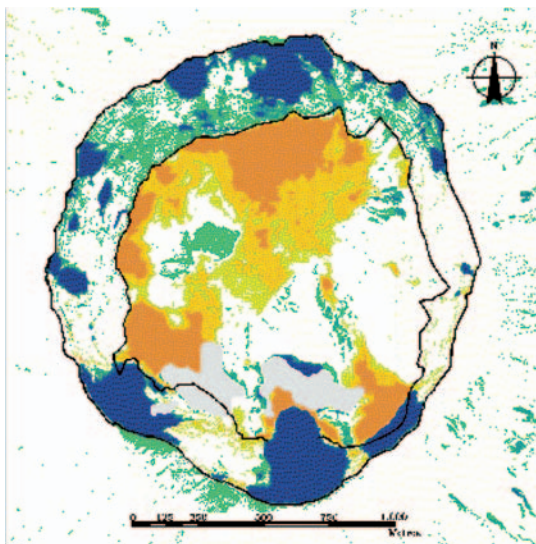


図-4 2001年2月から2003年9月までの標高変化量。単位はメートル。灰色の部分は噴煙のため標高の計測が行えなかった領域を示す。実線で表されているのは、カルデラ壁の上部境界（外側）と下部境界（内側）。

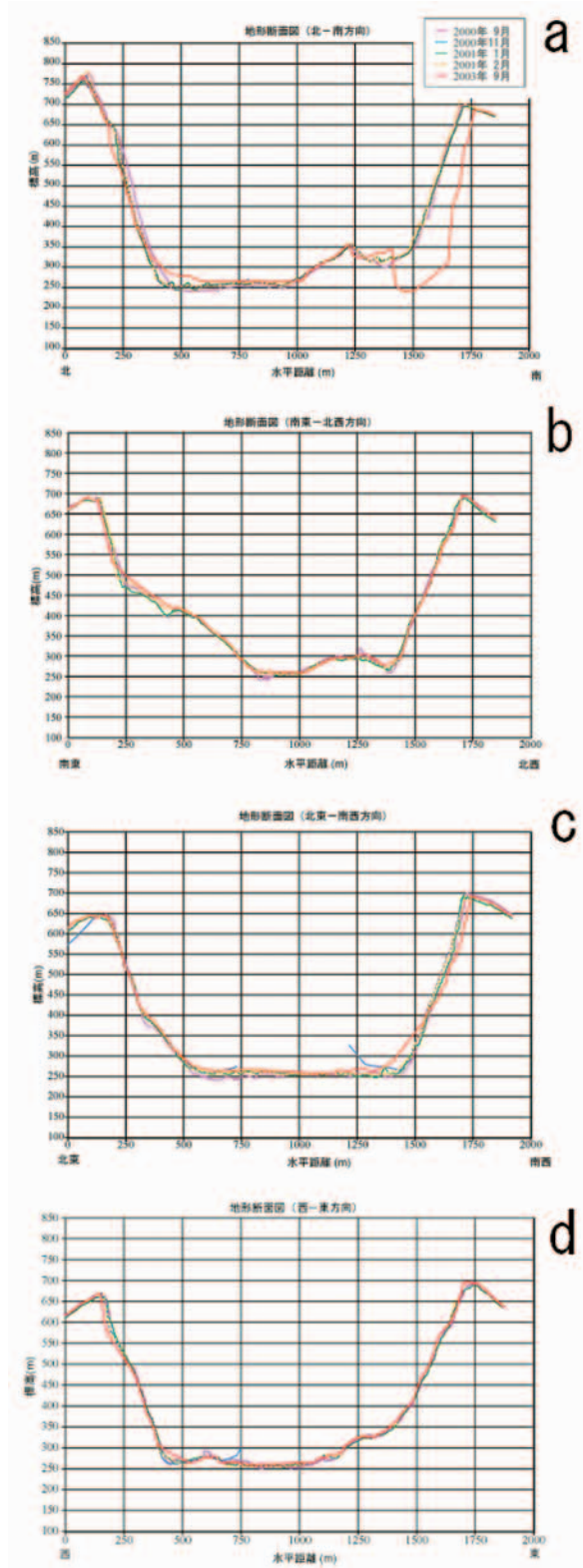


図-5 各時期の DEM より作成した地形断面。

4.3 地形変化とその考察

図-4に、2001年2月から2003年9月までのカルデラ内部の標高変化量を示す。標高変化量は、多時期の差分 DEM から得た。30 m 以上の大幅な標高の上昇は、北側、南東側、南西側で見られた。新旧の地形図を比較すると、

北側、南西側では、小規模な崩落堆積物斜面しかなかった地域に、大規模な崩落による堆積物が貯まったことが判った。カルデラ床では標高が上昇した。すなわち、カルデラ床の南東部では2～10 m、北部では5～30 mの上昇が見られた。北部での上昇が大きいのは、崩落物堆積斜面から流れ込んだ二次堆積物が堆積しているためである。北-南方向の各時期の地形断面図(図-5 a)を見ると、カルデラ底は、2000年11月にはほぼ水平であった。しかし2003年9月にはカルデラ壁が最大で約30 m後退し、カルデラ壁の脚部には崩落物堆積物が堆積している。堆積斜面の高さは最大で50 mに達している。

カルデラ床の西に位置する丘の上では、標高の変化は小さい。丘の北西斜面では標高が3～6 m上昇している。一方、南東斜面では標高が3 m低下している。南東-北西方向の断面図(図-5 b)を見ると、計測期間中に丘とカルデラ壁の間に存在したカルデラ底が埋め立てられたことが分かる。しかし、上部のカルデラ壁に大きな崩壊跡は見当たらない。

カルデラの南西部、東西2つの規模の大きな崩落物堆積斜面の上部のカルデラ壁が、標高約380 mより上部で大きく崩壊していることが判った。北東-南西方向の断面図(図-5 c)から求めた2年間のカルデラ壁後退量は約60 mだった。

火口跡の内部では最大40 mの標高の低下が見られるが、火口跡の外側では大きな地形の変化は確認できない。一方、主火口の周囲では、10～25 mの標高の上昇が見られた。これは主火口の周囲に火砕物が堆積したためと考えられる。

主火口の南半分は2001年2月時点ではカルデラ壁であった。しかし2003年9月までに、カルデラ壁は主火口の部分で東西方向の幅380 mに渡って最大65 m後退している。また、主火口の南端はカルデラ内で最も標高が低下した部分であり、低下量の最大値は309 mだった。

南部の岩屑斜面では、標高の変化はほとんどない。岩屑斜面の下部斜面には線状に狭い範囲で標高が低下している部分が存在するが、ガリの位置に相当することが判った。

南部と東部の岩屑斜面をわける中央部の大きなガリでは、約10 mの谷底上昇が見られた。空中写真の判読によると、この部分はカルデラ壁からの崩落堆積物により埋められている。従って、ガリの谷底上昇は、カルデラ壁崩壊によりガリ上に堆積したか、堆積した土砂が二次的にガリに流入したためと考えられる。カルデラ壁の崩壊は、高さが100 m以上あることが判った。大きなガリより北側の東部の岩屑斜面では地形の変化はほとんど見られない。またカルデラ壁の崩壊もほとんどない。西-東方向の断面図(図-5 d)を見ても各時期の地形に大きな変化はない。

図-6は、2000年噴火以前の火山土地条件図に各時

期のカルデラ外縁を重ねたものである。各時期のDEMから傾斜図を作成し、傾斜が急激に変化する部分をカルデラ外縁と見なした。計測期間中のカルデラ外形の変化はカルデラ壁の崩壊が大部分である。雄山中央火口丘は完全にカルデラに飲み込まれている。2003年9月時点の主火口はカルデラの最南端にあり、2000年噴火以前の中央火口の位置とは一致しない。前述したように、主火口が南側に移動したため、南側のカルデラ壁は大きく後退している。カルデラの北東-北西-南西部は八丁平カルデラを越えて標高700～750 mの線まで拡大している。一方、南東-南側ではカルデラは八丁平カルデラまで達していない。

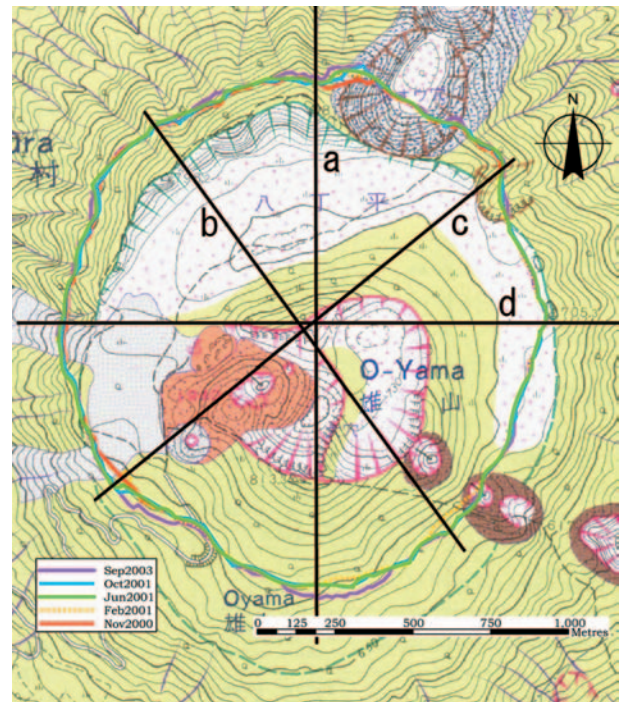


図-6 カルデラ形成以前の地形と各時期のカルデラの関係。図中に引かれた直線は断面図(図-5)の位置(a～d)を示す。

表-4に各時期のカルデラ直径、外周、面積、容積を計測した結果を示す。外周長、および面積の計算にはArcGISを用いた。直径は、最も差し渡しながいと思われる部分の長さをArcGIS上で計測した。カルデラ容積は、噴火前の火山基本図DEMと各時期の差分DEMから計算した。

カルデラ周囲の地形変化の影響を取り除くため、2003年9月のカルデラ外周データからマスクデータを作成し、マスク内の地形変化のみを求めた。2001年2月のデータには、噴煙の影響で火口跡とその西側にデータの欠損がある。この欠損部分には2001年1月に計測したSARデータを当てはめて容積を計算した。2000年11月の計測結果を示していないのは、主火口及びその周辺が噴煙で隠れており、計測不能だったためである。

カルデラの外周と面積は、時間の経過と共に拡大して

いる。カルデラ面積の拡大速度が直線で近似できると仮定すると、その速度は約 2.1ha/yr となる。また、2001 年 2 月から 2003 年 9 月までの容積変化速度が一定であると仮定すると、その変化量は 400 万 m^3 /年となる。

表-4 カルデラ面積、容積の時系列変化。

時期	直径(m)	外周(m)	面積(ha)	容積(億 m^3)
2000年9月	1,621	5,158	186.9	6.04
2000年11月	-	-	-	-
2001年1月	1,651	5,207	188.9	6.11
2001年2月	1,625	5,230	190.1	6.01
2003年9月	1,717	5,338	195.6	6.11

前述したように、2001 年 2 月から 2003 年 9 月までのカルデラ内の主要な地形変化は、主火口の形成とカルデラ壁の崩壊である。そこで、2001 年 2 月から 2003 年 9 月までの主火口の容積変化と、火口部以外の容積変化を調べた。初めに 2003 年 9 月の陰影図から主火口縁および旧火口と主火口を囲む領域をポリゴン化し、主火口を囲むポリゴンの面積とポリゴン内部での容積変化を計算した。また、カルデラ全体の容積変化から、旧火口と主火口を囲む領域内の容積変化を差し引き、カルデラ壁の崩壊によるカルデラの容積変化を調べた。その結果、主火口の面積は 83,600 m^2 であり、上記の期間中に主火口形成によって失われた土砂の体積は、約 860 万 m^3 であった。

一方、主火口と火口跡の領域を除いたカルデラの容積は 170 万 m^3 の増加であった。2001 年 2 月の航空レーザ測量データ取得時には、GPS 基準局を神津島（距離約 35km）に設置している。そのため、GPS 基線長が長く、通常の計測より計測誤差が大きくなっていると考えられる。現地から 21km の距離にある GPS 基準局を用いた航空レーザ測量成果と GPS による実測値の高さ方向のずれは 44cm、標準偏差 76cm との報告（朝日航洋, 2003）もあり、このずれは、本研究で得られた 2 時期のデータのずれとほぼ同じである。そこで、カルデラ面積の測定に誤差はないものと仮定し、2 時期の標高値に 1σ (60cm)、もしくはずれの平均 + 1σ (1 m) のオフセットがあったと仮定すると、オフセットによる容積計測誤差はそれぞれ 117 万 m^3 、196 万 m^3 となる。従って 170 万 m^3 の容積増加は計測の誤差に入るオーダーであり、これだけからカルデラ拡大が継続中であるとはいえない。

5. 雲仙普賢岳の地形解析

5.1 研究の方法

三宅島の場合と同様に、地形分類図を作成するとともに複数時期の標高計測値を用意し、地形分類ごとに標高変化量を求めて地形変化を考察した。

5.2 地形分類

国土交通省雲仙復興事務所が計画して、各航空測量会社が火山活動終了後の 1995 ~ 1999 年に撮影した縮尺 1/8,000 のカラー空中写真（表-5；以下、1995 年写真などという）を判読して、表-6 の凡例に基づく毎年の地形分類図（図-7）を作成した。地形分類図の作成対象地域は、図-8 の黒線で囲んだ水無川本川流域（面積 1.06 km^2 ）、すなわち、おしが谷の合流点よりも上流側の火砕流等堆積面である。最上流端（標高 1,200 m）は平成新山（図-2）の溶岩ドームに位置し、最下流端（標高 200 m）は傾斜 6° の火砕流・土石流堆積面に含まれる。

表-5 地形の標高計測に使用した空中写真

時期	写真番号	モデル数	撮影会社
1995年9月18日	0199~0205	6	㈱パスコ
1996年9月14日	5059~5064	5	大成ジオテック㈱
1997年12月4日	8822~8828	6	中日本航空㈱
1998年10月3日	4028~4033	6	㈱パスコ
1999年10月4日	3422~3427	5	第一復建㈱

表-6 には、地形分類の凡例とともに、空中写真から判読される表面のテクスチャや、空中写真判読と現地調査から得られた地形面の特徴、そして、雲仙復興事務所が作成した地形図（縮尺 1/1,000）の等高線から読み取った卓越する傾斜を記載した。

図-7 の地形分類は、毎年の地形分類図を重ね合わせ、1995 ~ 1999 年を通して地形分類が変化していない場所のみを示したものである。各分類項目を純粋に抽出しようとしたことから、図-7 では更に、各地形分類の外縁から幅 1.5 m 内側を境界とする閉領域を示した。図-7 の地形分類の番号は、表-6 の番号と一致している。

5.3 標高の計測

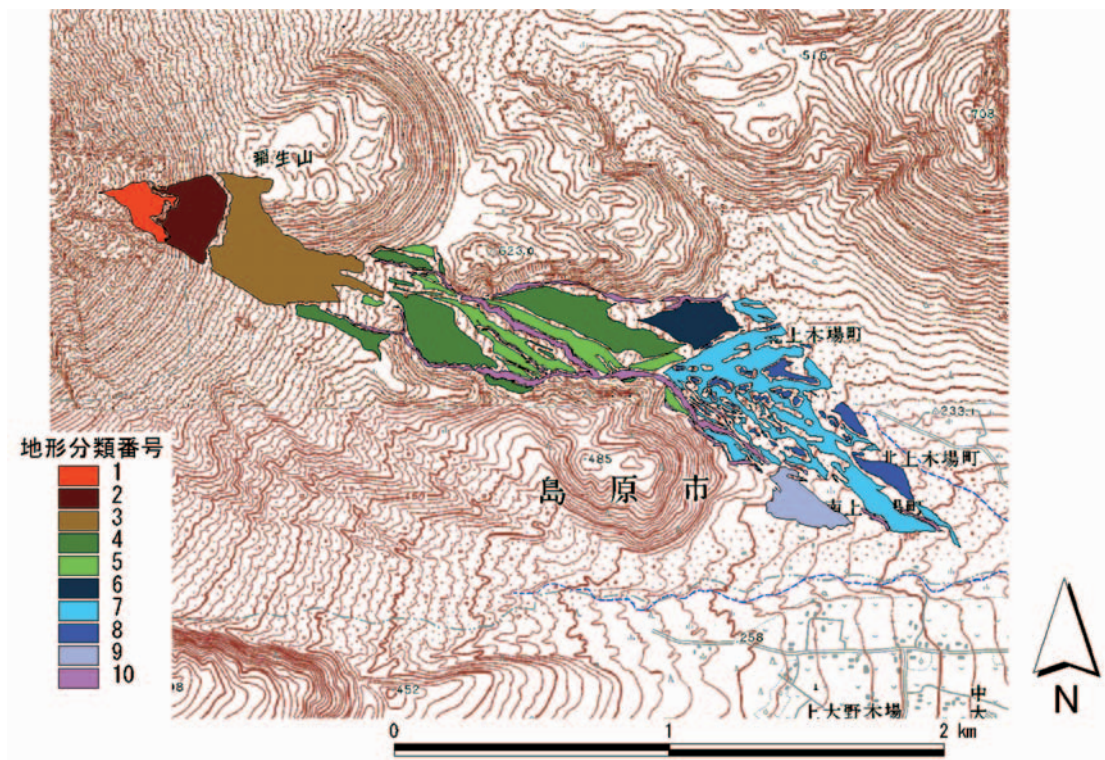
空中写真を正確に標定し、標高を計測して、写真測量の手法で各地形分類の標高の経年変化を調べることとした。

1999 年写真以外の空中写真については、外部標定要素が不明なので、佐藤 (2004) が示す方法で標定した。すなわち、既知の外部標定要素で 1999 年の空中写真を標定し、立体モデルを再現して不動点とみなせる巨礫の隅の三次元座標を事前に測った。そして、このような巨礫の隅を標定点として、1998 年の空中写真に空中三角測量を行い、外部標定要素を算出して標定した。このようにして、1995 年写真まで各年の空中写真を標定することができた。平面座標及び標高の標定誤差は、佐藤 (2004) の 0.2 m が参考となる。

続いて、解析図化機（ケルン社製 DSR14）を用いてオペレータが各年の測定の標高を計測し、図-7 の地形分類ごとに隣接 2 ヶ年の標高変化量を整理した。すなわち、

表一六 雲仙普賢岳・水無川流域の地形分類の凡例

番号	地形分類	地形の特徴	測点の点数
1.	溶岩ドーム	平成新山の第 11 溶岩ドーム(気象庁福岡管区気象台, 1996)の一部	47
2.	崖錐	傾斜 33° の斜面。溶岩ドームからの転石が通過した跡が見られるが、地形分類「10. ガリ」とは連続していない。	108
3.	火砕流堆積面 A	上流側の傾斜 27° ~ 下流側の傾斜 22° の斜面。溶岩ドームからの転石(巨礫)が散在。1997 年写真及びそれ以降の写真では、1995 年写真及びそれ以前の写真と比較して、カラー空中写真で判読可能なほど、植生の繁茂が著しい。以下の他の火砕流堆積面でも同様。	262
4.	火砕流堆積面 B	傾斜 15° の斜面。転石(巨礫)も存在するが、「3. 火砕流堆積面 A」よりは疎らである。	293
5.	火砕流堆積面 C	傾斜 15° の斜面。表面は中砂が卓越する滑らかな地形面。距離が 25 ~ 50 m 程度のガリが、ところどころ地形面を刻み、一部は「10. ガリ」に連続する。	153
6.	火砕流堆積面 D	傾斜 9° の斜面。大~中礫が散在し、粗い地表面である。斜面は北東に面する。	74
7.	火砕流堆積面 E	傾斜 6~9° の斜面。表面は中砂が卓越する滑らかな地形面。一部、土石流堆積物からなる。	288
8.	火砕流堆積面 F	傾斜 6° の斜面。巨礫を中心とし、「7. 火砕流堆積面 E」に対して比高 0.5 ~ 1 m の高まりとして島状に点在する。	77
9.	沖積錐	中~小礫の円礫からなる。	64
10.	ガリ	溪岸からの深さは 1 ~ 10 m, 溪床幅約 5 ~ 15 m 前後。凹型の断面。	101



図一七 水無川本川流域の地形分類図.

図一八のように 100 m 間隔で 34 本の測線, そして各測線については 5 m 間隔で測点を固定した。表一六には, 地形分類ごとの測点の数を併記した。普通は, 一定間隔のグリッド点で標高を計測して DEM を生成するが, このような疎らな測点を設定したのは, オペレータが効率的

に標高を計測することによって, 標高変化量の変化の特徴を地形分類ごとに迅速に見出すためである。

最終的に, 得られた標高の誤差は, 標準偏差で 0.6 m であり, 隣接 2 ヶ年の標高変化量の誤差は, 誤差伝播の法則から 0.8 m と考えられる(佐藤, 2004)。