三宅島・陥没カルデラと雲仙普賢岳・水無川流域における地形変化について

Landform change analysis in a collapsed caldera, Miyakejima Volcano and Mizunashi River watershed, Unzen Volcano

地理地殻活動研究センター　長谷川裕之・佐藤　浩・岩橋純子・吉田幸子
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Hiroyuki HASEGAWA, Hiroshi P. SATO, Junko IWAHASHI and Sachiko YOSHIDA

要　旨

航空レーザ測量と写真測量で計測した数値地形モデル（Digital Elevation Model: DEM）を用いて，三宅島の2001年2月～2003年9月までの陥没カルデラ内の地形変化と，雲仙普賢岳の水無川本川流域の1995年9月～1999年10月までの地形変化を解析した。その結果，火山活動が静穏化すると，著しい地形変化も急速に抑制されるという従来の知見が，差分DEMから得られる標高変化量の解析を通じて裏付けられた。

三宅島では，上記の期間にカルデラの容積が1,000万㎥増加しており，うち860万㎥は主火口（長径は232m，短径は87m）の形成による標高の低下，残りは主に，カルデラ壁の崩壊によることが判った。しかし，この変化量は，カルデラ形成期よりもはるかに少ない。雲仙普賢岳・水無川本川流域では火山活動終了後，地形は直ちに無変化になることが判ったが，より詳細に見ると，表面流出による開析を受けやすいガリにおいては，1997年を境に地形がほとんど無変化となることが判った。

１．はじめに

大きな地形変化を伴う近年の火山活動としては，1990年11月の雲仙普賢岳噴火，2000年3月の有珠山噴火，7月の三宅島・雄山山頂の陥没などがある。活動中と比較して，火山活動が終息すると著しい地形変化も直ちに終息するが（例えばOllier and Brown, 1971），火山活動の終息後の地形変化を実際に高い精度で計測して地形学的に説明した例は少ない。

カルデラ形成期の三宅島山頂の地形変化に関しては，2000年9月28日現在で，カルデラ形成による陥没量（容積）は6億㎥であるが（長谷川ほか，2001），爆発的な噴火が終息した後のカルデラ地形の変化に関してはよく判っていない。

雲仙普賢岳では，火山活動中の著しい地形変化について，例えば長岡（1995）や石川ほか（1996）が写真測量の手法を用いて火砕流堆積物の体積を計測したが，1995年以降の地形変化については，活発なガリ侵食が続いた赤松谷の多くの報告事例（例えば，寺本ほか，2002）や，溶岩ドームの地形変化の報告（例えば佐藤，2004）以外にはあまり無い。

本研究の目的は，写真測量や航空レーザ測量の手法を活用した標高の計測や数値地形モデル（Digital Elevation Model: DEM）の作成，および得られた時系列DEMの解析や空中写真の判読を通じて，三宅島のカルデラの地形変化と雲仙普賢岳・水無川本川流域の変化の詳細を地形学的に説明することを目的としている。このような観点に注目した研究によって，火山地形発達史解明の一助や火山・砂防対策やハザードマップ作成の基礎資料の充実が期待される。

２．研究対象地域

２．１　三宅島

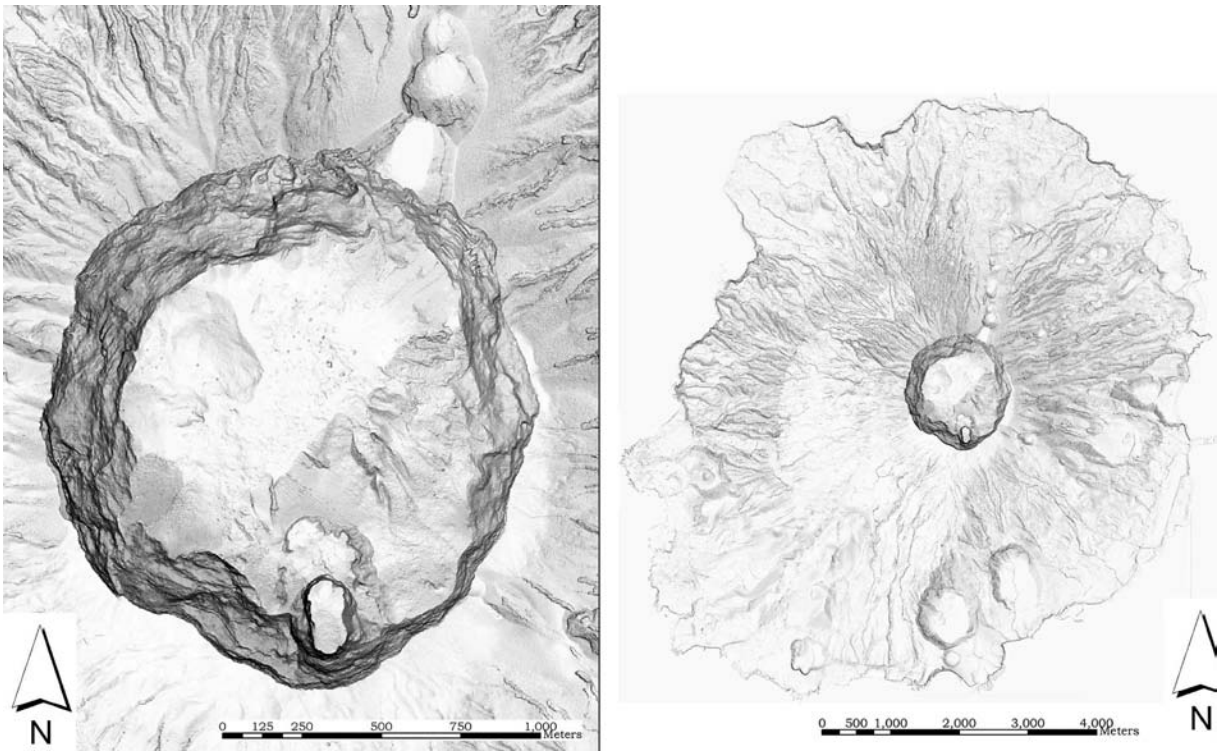
三宅島（図－１）は東京から南へ約180kmの伊豆小笠原弧に位置する面積55.9㎢，直径9kmで，玄武岩質の岩石からなるほぼ円形の第四紀成層火山である（日本の第四紀火山カタログ，1998）。2000年噴火以前には，山頂を中心とした新旧二つのカルデラがあった。標高330m付近に広がる直径4kmの旧期（桑木平）カルデラは7,000年以上前の火山活動により形成されたものと考えられている。また，標高700m付近には，2,500年前に形成されたと考えられている直径1.7kmの新期（八丁平）カルデラが存在する（津久井・鈴木，1998）。

三宅島・雄山は新期カルデラ内部に形成された中央火口丘であり，新期カルデラ面からの高さは120mである。三宅島の噴火は，側火口からの噴火，山腹割れ目噴火，水蒸気爆発，溶岩流，山頂火口からの噴火，火山灰・スコリアなどの放出で特徴づけられる。特に，三宅島には多くの側火口が発達し，山腹割れ目噴火による列状に並んだ火口が確認できる。また海岸近くにはマグマ水蒸気爆発で生じたマールがいくつか確認できる（図－1）。歴史時代の三宅島の噴火は14回（2000年噴火を除く）記録されている（津久井・鈴木，1998）。最近は1940年，1962年，1983年，2000年とほぼ20年周期で噴火が発生している。

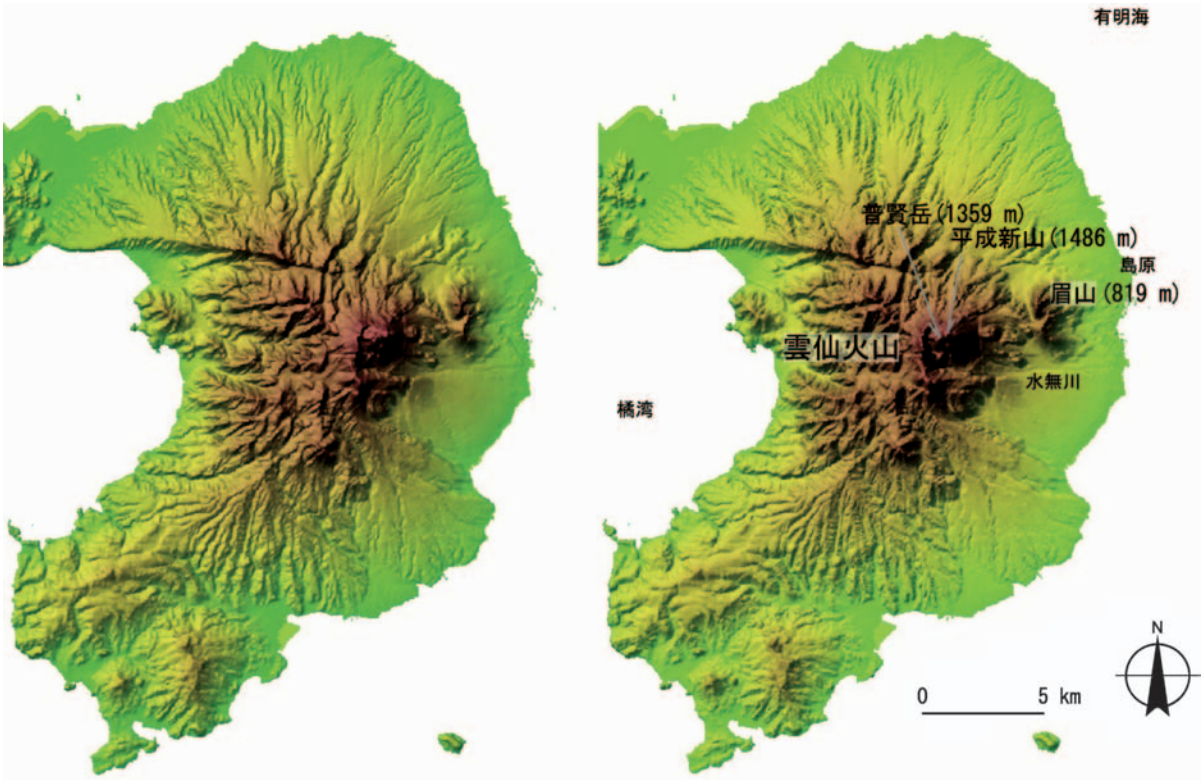
２．２　雲仙火山

雲仙火山（図－２）は，角閃石安山岩～石英安山岩（デイサイト）からなる，広大な火山山麓をもつ複式火山である（太田，1984）。火山体は，鮮新世～更新世中期以前の堆積岩類や火山岩を覆って発達するが，雲仙地溝における平行な正断層群により切断されている。地溝内に沈降埋積した噴出物を考慮すると，その体積は130㎥以上ある（星住・宇都，2000）。地溝内では，噴出中心が

少しずれて，かつ火山錐の形成と崩壊が繰り返されたので，地形からいくつかの噴出中心や火山錐，崩壊跡地を識別することができる（町田，2001）。雲仙普賢岳は，そのような火山錐の１つである



図－１　三宅島の地形（左図：カルデラ内，右図：全体）.



図－２　雲仙火山周辺の地形（立体視可能）.

雲仙火山は，地形的特徴と噴出年代から古期（約50～20万年前）と新期（10万年前以降）に区分される（渡辺・星住，1995）が，歴史時代の噴火は1995年噴火を除くと1663年（古焼溶岩の噴出）と1972年（新焼溶岩の噴出と眉山の山体崩壊）の2回である（太田，1984）。

３．2000年三宅島噴火と1990年雲仙普賢岳噴火

2000年三宅島噴火は，6月27日の海底噴火から開始し，7月8日には雄山山頂で最初の水蒸気爆発が発生し，陥没火口が生じた。山頂火口では，8月下旬まで爆発的噴火が繰り返され，陥没火口が拡大し，カルデラが形成された。SO_2ガスの放出は8月末から活発化し，日量数万tのSO_2が放出された。その後SO_2の放出量は日量3,000t程度にまで低下したが，現在も放出は継続している。観測開始以来続いていた三宅島の収縮を示す地殻変動は，2002年夏頃から停止していたが，2003年6月頃から再び収縮する傾向が続いている（国土地理院，2004）。

1990年雲仙普賢岳噴火は，1990年7月からの微動観測に続き，11月17日に地獄跡火口と九十九島火口から白色の噴煙が初めて観測されてから活発化した。溶岩ドームの出現と成長，溶岩の崩落に伴う火砕流の発生は，1991年6月3日には死者・行方不明者43名を出すまでに規模が大きくなった。また，6月30日にはおしが谷と赤松谷で土石流が発生し，そのまま有明海まで流下した。その後，1995年初頭の火山活動終息まで，火砕流は9,400回以上発生した（気象庁福岡管区気象台，1996）。火山活動中の著しい地形変化については，長岡（1995）が，写真測量により1991年6月3日，6月8日，9月15日の火砕流堆積物の堆積量をそれぞれ，250万㎥，350万㎥，400万㎥と見積もっている。

４．三宅島の地形変化の解析

４．１　使用した航空レーザ測量等データ

解析に使用したグリッドDEMデータと基になる測量データの諸元を表－１に示す。この表に示すように，DEMの解像度は時期や取得機器により異なる。複数時期のDEMに含まれていた，噴煙等に起因する異常標高値については，事前にメディアンフィルタによるノイズ除去処理を行った。また，2001年2月の航空レーザ測量データには，噴煙による広い範囲の欠測部が存在した。このためカルデラ容積計算などを行う際には，当該範囲を2001年1月の航空機SARデータにより補間した。

各時期のDEM（いずれも平面直角座標系第IX系）を重ね合わせたところ，1983年のDEM等に三次元座標のずれが見られた。そこで，2003年9月のDEMを基準に，3時期のDEM（1983年，2000年11月，2001年2月）の三次元座標を補正した。1983年のDEMに関しては，紙地図の火山基本図を参照した。2003年9月のDEMを基準にしたのは，最新のデータであること，航空レーザ測量時のGPS基準局が，三宅島の島内に設置されたものであること，世界測地系に基づいていることによる。2003年9月のDEMと，3時期のDEMに関して，道路の屈曲点や溜池の角，谷壁など火山活動を通じて地形の大きな変化がなく，かつ位置を明瞭に特定できる標定点を10個

表－１　解析に使用したDEM.

データ取得時期	基のデータ	解像度	備考
1983年	空中写真	10ｍ	火山基本図 DEM
2000年9月28日	航空機SAR	5ｍ	山頂部のみ
2000年11月25日～30日	航空レーザ	1ｍ	雲煙による欠測有り
2001年1月16日	航空機SAR	5ｍ	全島
2001年2月9日～12日	航空レーザ	1ｍ	山頂部のみ
2003年8月22日～9月30日	航空レーザ	1ｍ	全島

得られた計測結果を，表－２に示す。標準偏差は，0.6～3.3ｍであった。3時期のDEMは，2003年9月のDEMと異なり，旧来の日本測地系による座標を使用している。3時期のDEMで平面の位置ずれ量がほぼ同じであることから，平面の位置ずれは測地系の違い（すなわち，日本測地系か世界測地系か）に依拠し，各時期のDEM内部の変形は少ないと考えて，平行移動により3時期の平面座標の補正を行った。DEMの標高に関しては，補正せずに元の標高値をそのまま利用している。

2000年9月と2001年1月のDEM（それぞれ日本測地系）はノイズが多く，DEM陰影図の上で標定点を同定し難かった。そこで，表－２を参照して，X方向に-355ｍ，Y方向に+290ｍ，平面座標をずらして利用した。

表－２　2003年9月のDEMを基準にした各時期のDEMのずれ．カッコ内は標準偏差.

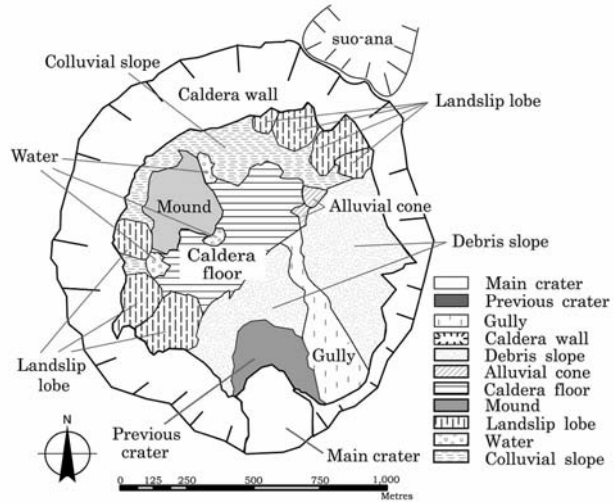
時期	標定点の点数	X座標（m）	Y座標（m）	標高（m）
1983年	6	+292.4 (1.7)	-355.1 (2.5)	+2.8 (3.3)
2000年9月	—	—	—	—
2000年11月	10	+289.8 (1.4)	-355.7 (1.9)	-0.2 (1.0)
2001年1月	—	—	—	—
2001年2月	9	+292.3 (0.8)	-356.0 (2.1)	+0.4 (0.6)

４．２　地形分類

陥没カルデラ内について，2003年9月のDEM陰影図及び同時に撮影された空中写真の判読から，表－３の凡例に基づいて地形分類図を作成した（図－３）。また，後述のように，差分DEMに基づく標高変化量を求めて地

表－３　三宅島・陥没カルデラ内の地形分類の凡例

地形分類	地形の特徴
カルデラ壁（caldera wall）	カルデラ縁とカルデラ底の間にある，比高 100 m 以上の急崖。平均傾斜は 55～70°カルデラ壁上部は明瞭な傾斜変換線で境される。カルデラ壁下部は，東側で岩屑斜面との境界が不明瞭であるが，それ以外では境界は明瞭である。
カルデラ床（caldera floor）	カルデラ内部で，標高が低く（約 260 m）傾斜 3°以下の平坦な地形。この上には，径 2 m～10 m の岩塊が散乱している。これらの岩塊の成因は不明である。
崩落堆積物斜面（landslide slip）	カルデラ壁の一部崩壊に伴って形成された，傾斜 30°前後の斜面。
岩屑斜面（debris slope）	岩屑で形成された傾斜約 30°の斜面。崩落堆積物斜面と区別するのは，土砂の供給源を特定できなかったためである。
沖積錐（alluvial cone）	傾斜 4～7°の斜面。岩屑斜面の下部に連続する。
丘（mound）	カルデラ床からの比高約 50 m の独立した高まり。側面は傾斜 15～20°であり，頂上は平坦である。
ガリ（gully）	崩落堆積物斜面や岩屑斜面の表面を刻み，側壁をもつ溝状の地形。図―３には，規模の大きなガリのみを記載。
主火口（main crater）	火山ガスなどが地表に噴出した場所で，楕円形状にくぼんだ形をしている。
火口跡（previous crater）	過去に火口として活動していたとみられる，楕円形状にくぼんだ地形。



図－３　2003 年 9 月のカルデラ内の地形分類.

形分類ごとに結果を考察した。

カルデラの最外周は，カルデラ壁（caldera wall）になっている。カルデラ壁の比高は北西～西部で 400～440 mと最も高くなり，岩屑斜面が発達している東～南東部で約 115 mと最も低くなっている。

カルデラ北東部には，いくつかの崩落堆積物斜面（landslip lobe）が形成されている。一番東側の崩落堆積物斜面には明瞭なガリ（gully）が存在せず，平均傾斜は 35°である。東から２番目の斜面には３本のガリが平行に走っている。周囲の斜面に比べて構成物質が細粒であり，平均傾斜は 33°である。スオウ穴直下の斜面では，大きなガリが頂部から西に向けて走っている。またこれ以外にも複数の小さなガリが放射状に発達している。この斜面の平均傾斜は 32°である。最も西側にある一番小さな斜面は，構成物質が細粒であり，表面には複数の小さなガリが認められる。この斜面の平均傾斜は約 28°である。このように，崩落堆積物斜面にはガリ侵食の有無があるが，斜面の傾斜との関係は見出せなかった。

カルデラの中心より北西側にはカルデラ床（caldera-floor）がある。後述する丘（mound）の周囲のカルデラ床には３箇所の水たまり（water）が見られる。

カルデラ床の西側には長径約 350 mの丘がある。丘の表面を削るガリは見当たらず，その表面は滑らかである。丘の南西側は，カルデラ壁からの崩落堆積物により部分的に覆われている。この崩落堆積物斜面の平均傾斜は約 22°である。

カルデラの南西部には，東西２つの規模の大きな崩落堆積物斜面がある。東側の斜面は全長（平面距離）約 280 mで，頂部から２本のガリが流れている。斜面の傾斜は下部ほど小さくなり，頂部では 31°，末端部では 12°，平均は 29°である。斜面上部のカルデラ壁には大規模な弧状の崩落跡がある。西側の斜面は全長約 270 mである。表面を構成する物質は粗く，ほとんどガリが刻まれていない。傾斜は，頂部から末端部までほぼ一様（33°）である。

カルデラの南端には主火口（main crater）がある。主火口は南北に長い楕円形であり，長径は 232 m，短径は 87 mで，その周囲は急崖となっている。北端部の急崖の比高は約 100 mである。南側の崖はカルデラ壁と連続している。内部は南から北に向かって緩やかに低くなっている。主火口内の最低標高は 230 mである。主火口の北側にはこれを取り巻くように火口跡（previous crater）がある。主火口と火口跡の比高は 50 ～ 100 mである。火口跡の東西方向の直径は約 200 mであり，その東側境界は明瞭であるが，西側境界は一部が崩壊しており不明瞭である。内部は緩傾斜で，北側中央には火砕丘と考えられる高まりがある。

カルデラの南部と東部には，その末端とカルデラ床との境界が直線的で明瞭（走向：北東－南西方向）な岩屑斜面が広がっており，南部と東部の岩屑斜面を分けるよ