空中写真による雲仙岳の火山防災調査

中筋章人*・向山 栄*・河相祐子*

Disaster Prevention Survey of Unzen Volcano using Aerial Photographs

Akito NAKASUJI*, Sakae MUKOYAMA* and Hiroko KAWAI*

Key words : 火山災害 volcanic disaster, 空中写真判読 photointerpretation, 火砕流 pyroclastic flow, 土石流 debris flow

Abstract

Mt. Unzen, located in Nagasaki Prefecture, erupted first in 17th November 1990, and has been active ever since. During its activity, pyro-clastic flows originated from growth and depression of lava domes and debris flows caused death and severe damage in the populated area.

In this study, since the surveying area is under dangerous condition, there is great difficulty to keep observation sites in the damaged area.

Thus, it is indeed valuable to use remote sensing method for monitoring of active volcanos.

The use of aerial photographs taken at eleven different stages of volcanic activity enabled the easy comparison of geomorphological characteristics and volume calculation of volcanic products.

Such continuous aerial surveying will be effective to estimate investigation of disaster prevention.

1. は し が き

1990年11月に始まる雲仙岳の火山活動や、1991年6月に大噴火したフィリピン共和国のピナツボ火山のように、火砕流を伴う大規模な火山活動が継続している火山では、現地への立入り調査ができない。したがって、活動状況の情報入手は、ヘリコプター等による上空からの観察、周辺部からの地上観察（ピナツボ火山のように規模が大きくなると不可能）、空中写真撮影を主体としたリモートセンシングによる実態把握の3つに限られる。

ここでは、一般的な火山調査の方法を踏まえて、刻々

図-1 調査位置図

* 国際航業株式会社 地質部 Geologic Division, Kokusai Kogyo Co.

表-1 火山災害現象の分類

1. 噴火による一次災害	・溶岩流
	◎火砕流
	・降下火砕物（含噴石）
	・火山ガス
	・空振
2. 噴火に伴う二次災害	・火山泥流（融雪、火口湖水による）
	・岩屑流（山体崩壊による）
	・マグマ水蒸気爆発（海水・地下水による）
3. 噴火後の二次災害	◎土石流（降雨による）
	・山体崩壊・地すべり（地震・降雨による）
	・津波（岩屑流等による）
4. 噴火後の三次災害	・洪水（河川閉塞・決壊による）
	・津波（山体崩壊による）

◎ 雲仙では、火砕流と土石流災害が主体となっている。

と変化する雲仙岳の火山活動（図-1 参照）を対象とし、空中写真の判読や計測を主体とした実態把握とその分析による防災計画のための基礎的な情報の提供方法について述べる。

2. 一般的な火山防災調査の方法

個々の活火山は、過去の活動史、噴火形態、地形条件、土地利用条件など、それぞれに特有な性質を持っている。このため、各火山毎に火山の特性を踏まえた防災計画が必要となるが、わが国では多くの活火山が分布し、かつその周辺部で土地利用の高度化が進んでいる地域が多いため、防災計画は遅々として進まないのが現状である。

しかしながら、雲仙岳の火山活動を契機に各関係機関の防災計画への取り組みが活発化してきた。ここでは、取り扱う火山災害の現象を表-1に、火山防災計画調査の流れを図-2¹⁾に示し、この流れに沿って雲仙岳で実施している防災調査を例にして防災調査の具体的手法について述べる。

3. 雲仙岳の活動と空中写真撮影状況

雲仙岳の活動状況と空中写真撮影状況を取りまとめると、表-2 のようになる。

撮影は、原則として新しい溶岩ドームの出現、大規模火砕流の発生、大規模土石流の発生の直後に実施することとしたが、天候や噴煙の向きの関係で数日～数週間遅れとなることが多かった。

図-2 火山防災計画調査のフロー（文献¹⁾を参考に改変）

表-2 で明らかなように、1991年の2月には噴火状況把握と溶岩ドームの出現予測のために熱映像写真を撮影し、解析したりしたが、1991年6月3日の火砕流災害以後は、大規模な火砕流や土石流が発生する毎に撮影することとした。この間、1991年6月から1993年7月までの約3年間に17回の撮影を数え、ほぼ2か月に1回のペースで空中写真を撮影し続けたこととなる。

4. 空中写真判読による状況把握

空中写真撮影後は、直ちに空中写真判読を行って溶岩ドームの形状、火砕流堆積物や土石流堆積物の分布状況、被災状況などを把握し、1:25,000地形図に移写して「火山災害実績図（ディザスターマップ）」を作成した。これら災害実績図を比較することによって、火山活動に伴う堆積物の時系列的変化、変遷が一目で読み取れる。

火山災害実績図は、1991年6月3日の火砕流災害以後、1993年7月まで計13時期分作成したが、それらの

表-2 雲仙岳の活動と空中写真撮影状況

雲仙岳の活動状況	撮影月日	撮影対象
30年 7月4日 活動開始		
11月17日 雲仙岳で噴火(九十九島火口)		
91年 1月中旬 地獄峠火口西縁に新噴気		
2月12日 普賢岳で噴火(屏風岩火口)	2/25 斜	屏風岩火口周辺
	2/26 熱	屏風岩火口周辺
	3/ 2 垂	
	3/19 垂・斜・熱	屏風岩火口周辺
4月 3日 地獄峠火口内に新しい噴気孔		
5月15日 水無川で土石流発生		
5月20日 地獄峠火口に溶岩ドーム出現(第1ドーム)		
	5/23 斜・熱	溶岩ドーム
5月24日 火砕流発生		
6月 3日 規模の大きな火砕流発生、死者43名、死者行方不明者43名、家屋焼失・倒壊179棟		
	6/ 7 垂・斜	全景、溶岩ドーム、6/3 火砕流跡
6月 8日 地獄峠火口東側斜面で噴火、最大規模の火砕流が発生する		
6月11日 ドーム北側に第2ドーム確認		
6月30日 土石流発生、島原湾に達する		
	8/ 8 垂・斜	全景、溶岩ドーム、6/30 土石流跡
8月11日 火砕流、おしが谷方面へ		
8月12日 噴石を伴った噴火		
8月13日 第3ドーム確認		
9月15日 おしが谷縁由の火砕流発生		
	9/17 第4ドーム確認	
11月24日 第5ドーム確認		
11月27日 火砕流、赤松谷川方面へ		
12月 3日 第6ドーム確認		
92年 1月15日 第5ドームが普賢岳の断崖を超す	1/20 垂・斜	全景、溶岩ドーム、火砕流跡
	2/19 垂	
3月 1日 水無川下流で土石流発生		
3月15日 水無川下流で土石流発生		
3月23日 第7ドーム確認	3/11 垂・斜	全景、溶岩ドーム、土石流跡
	5/10 垂・斜	全景、溶岩ドーム、火砕流跡
雲仙岳の活動状況	撮影月日	撮影対象
6月23日 水無川下流で土石流発生		
8月 8日 赤松谷縁由の火砕流		
8月 8日 家屋焼失・倒壊18棟		
8月 8日 水無川下流で土石流発生、		
~15日 家屋被害 240棟		
8月11日 第8ドーム確認	8/28 垂・斜	全景、溶岩ドーム、火砕流跡
		土石流跡
9月27日 赤松谷、水無川縁由の火砕流		
	10/27 垂・斜	全景、溶岩ドーム、火砕流跡
	11/17 垂	溶岩ドーム、火砕流跡
12月 3日 第9ドーム確認		
12月27日 水無川で土石流発生		
93年 1月13日 水無川で土石流発生		
2月 4日 第10ドーム確認		
	2/13 垂	溶岩ドーム、火砕流跡
3月 9日 水無川縁由の火砕流		
3月20日 第11ドーム確認	4/10 垂	溶岩ドーム、火砕流跡
4月28日 水無川、中尾川、湯江川流域で土石流発生、家屋被害493棟		
~29日 水無川、中尾川流域で土石流		
5月 2日 家屋被害81棟	5/ 3 垂	溶岩ドーム、土石流跡、火砕流跡
	5/15 斜	溶岩ドーム、火砕流跡、土石流跡
5月21日 中尾川縁由の火砕流		
6月13日 水無川流域で土石流発生、		
家屋被害94棟		
6月18日 水無川流域で土石流発生、		
家屋被害250棟	6/21 垂	土石流跡(水無川下流部、中尾川、千本木地区の一部；天候不良)
6月22日 水無川流域で土石流発生、		
家屋被害101棟		
6月23日 中尾川縁由の火砕流、死者1名		
家屋焼失・倒壊137棟		
6月24日 中尾川縁由の火砕流、		
家屋焼失・倒壊40棟		
7月16日 水無川及び中尾川流域で土石流発生、家屋被害147棟	7/23 垂・斜	溶岩ドーム、火砕流跡、土石流跡(水無川流域・中尾川流域)
~17日	7/24 垂

図-3 1993年4月28日～5月2日の災害実績図

すべてを紹介できないため、ごく最近のものとして図-3に1993年5月3日、図-4に1993年7月24日の実績図を紹介する。空中写真判読から読み取った雲仙岳の火山活動と、それに伴う被災状況を段階的に要約²⁾すると次のようになる。

1) 溶岩ドームの出現と水無川本川への火砕流の流下 (1991年5月～7月)

1991年5月20日、地下からのマグマが地表に達し、地獄跡火口の溶岩ドームが姿を現わした。溶岩ドームは成長を続け、東側斜面にせりだし始めた。5月24日には溶岩ドームの崩落を引き金に、高温の火砕物とガスが急速に流下する火砕流が、はじめて確認された。火砕流の流下距離は徐々に伸び、6月3日には北上木場地区へ達し、死者行方不明者43名を出す大災害となった。

梅雨末期の6月30日には、大量の火山灰の影響により赤松谷とおしが谷源頭部の崩壊を起因とする土石流が発生し、水無川を流下して島原湾に達した。

2) おしが谷方面への火砕流流下

(1991年8月～10月)

マグマの噴出口が溶岩によってふさがれると、新たな溶岩ドームを形成する。1991年8月中旬、これまでのドームの北西側に第4ドームが出現し、おしが谷方面への火砕流の流下が始まった。9月15日に発生した火砕流は、おしが谷を経由し、垂木台地を焼いて、大野木場地区に達した。9月18日に撮影した写真から、火砕流の熱雲部がおしが谷を直進し、大野木場小学校付近を直撃した様子を読み取ることができる。

3) 赤松谷方面への火砕流流下

(1991年11月～1992年7月)

1991年11月には第6ドームから赤松谷方面への火砕流の流下が始まった。1992年4月には、出現した第7ドームからの崩落によって発生する火砕流が赤松谷を埋めつくすようになり、6月24日には新たな禁止区域が制定された。

図-4 1993年7月24日の災害実績図

4) 水無川での本格的な土石流災害発生

(1992年8月)

火砕流が赤松谷方面へ集中していたため、火砕流の供給がなくなった水無川本川やおしが谷では、火砕流堆積物上にガリが発達しはじめ、1992年3月からは、この両川を源とする土石流が発生し始めた。3月～7月までは月に2～3回の割で比較的小規模な土石流が発生していたが、8月8日には約31万 m^3 の、続いて8月12日にも約16万 m^3 の大規模土石流が水無川下流部を襲い、約240棟の家屋に被害を与えた。

5) 溶岩ドームの成長と火砕流の頻発

(1992年8月～1993年3月)

この間、第8ドームから第11ドームまで、次々と場所を変えて溶岩ドームの成長→崩落→火砕流の流下というパターンが継続した。

6) 最大規模の土石流発生

(1993年4月～5月)

1993年4月28日～29日、水無川で約95万 m^3 の土砂量と約70 haにおよぶ氾濫面積を持った今回の噴火以来最大規模の土石流が発生した。続いて5月2日にも約30万 m^3 の土石流が追いつちをかけ、中尾川流域で発生した土石流被害も合わせると約570棟の家屋が被災した(図-3参照)。

7) 中尾川方面への火砕流流下と土石流頻発

(1993年5月～7月)

図-4に示すように、5月21日はじめて火砕流が垂木台地を越えて中尾川の千本木地区に達した。いったんルートができると、続々と火砕流が千本木地区へと流下し、特に6月23日には、死者1名、家屋焼失・倒壊137棟という大災害となった。

この間、降雨量が例年以上に多いこともあって、水無

図-5 写真計測作業とその成果

川で土石流が頻発しつづけ、また、中尾川でも海岸まで流下・氾濫が見られた。

5. 写真計測による地形変化量の把握

刻々と変化する溶岩ドームと火砕流堆積物の変化を定量的に把握するために、空中写真測量を用いた計測を行った。特に広大な火砕流堆積物や土石流堆積物を量的に把握するための有効な方法として、東西-南北方向に10 m×10 mのグリッドを設定し、その交点の標高を解析図化機で読み取ることとした。測定点は、水無川で約23万点、中尾川で約20万点にも及ぶ膨大な作業量となったが、一度デジタル化すれば、その後のさまざまな解析に即座に対応できるため、極めて有効な方法である。

計測による地形変化量把握の手順と主な成果品は図-5に示すとおりである。デジタルマップの作成は、現在もなお、新しい空中写真を用いながら作業中であるが、ここでは表-3に示す7時期分の計測結果を用いて解析した結果を紹介する。

1) 任意の縦横断面図の作成

デジタル化したメッシュデータを用いると、計算機によって任意の方向（斜め方向も可能）の縦横断面図を即座に書かせることができ、各時期の重ね合わせもできる。計測精度は、ほぼ1:2,500地形図と同程度（誤差が20 cm以内）に収めることができた。縦横断面図は、特に実地測量ができない地域での防災施設配置計画に活用されたが、1例として水無川の埋積状況を比較したものを図

表-3 計測を実施した空中写真一覧表

	撮影年月日	縮尺	主要活動（計測対象）
1	H. 3. 3. 2	1/15,000	2/12 火口噴火
2	H. 3. 6. 16	1/10,000	6/3, 6/8 火砕流
3	H. 3. 8. 8	1/10,000	6/30 土石流
4	H. 4. 2. 19	1/10,000	9/15 火砕流
5	H. 4. 3. 11	1/10,000	3/1 土石流
6	H. 4. 5. 10	1/10,000	3/15 土石流
7	H. 4. 8. 28	1/10,000	8/8~15 土石流

図-6 水無川の横断比較図

（断面位置は図-7にA断面として示す）

-6に示す。

2) 変動量の集計

各10 mグリッドにおいて、撮影時期の異なる2時期間の標高差を求め、それに100 m²を乗じてやればメッシュ毎の変動量が算出される。一方、空中写真判読によって新しい火砕流の堆積範囲を把握し、その範囲内のメッシュ変動量を集計すれば、火砕流堆積物の堆積量を容易に求めることができる。このようにして計測時期毎に全変動量（地形変化量）を集計したが、ここではある2時期（1992年3月～5月）の堆積厚の変化を100 mメッシュで表示したものを図-7に示す。

3) 鳥瞰図の作成

計測したメッシュデータをCADシステムに入力し、鳥瞰図を作成した。鳥瞰図には、写真判読の情報として、溶岩ドーム、新旧の火砕流堆積物、土石流堆積物などをカラー表示した。これらを連続的に並べることによって火山活動と噴出物の時系列変化が専門外の人々にも一目で理解できるものができる。代表的な活動時期のものを取り出して比べたものを図-8に示す。

6. 土石流発生条件の解析

雲仙岳の水無川で頻発している土石流は、単に降雨量

表-4 おしが谷の降雨量とガリ分布状況

日 時	経過日数 (日)	経過日数 内の 総雨量 (mm)	時間雨量 10mm以上の 回数 (回)	土石流 発生 回数 (回)	1~3m のガリ 本数 (本)	3~5m のガリ 本数 (本)	5m以上 のガリ 本数 (本)
平成4年2月19日	21	143	1	1	115	—	10
平成4年3月11日	60	608	4	3	119	4	7
平成4年5月10日	110	948	11	7	55	65	38

表-5 土石流発生状況と降雨量⁴⁾

No.	年 月 日	規 模 ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	総雨量 (mm)	最大日雨量 (mm)	最大時間雨量 (mm)
1	平成4年3月1日	35	73.5	62.5	32.0
2	3月15日	70 (中) *	150.5	103.0	26.5
3	4月22日	15	54.5	41.0	10.5
4	5月8日	17	78.5	75.0	10.5
5	5月15日	5	34.5	28.5	10.0
6	6月7日	34	60.0	60.0	17.0
7	6月23日	72 (中)	108.5	101.0	18.0
8	7月13日	29	198.0	66.5	14.0
9	8月8日	308 (大)	142.5	138.0	54.5
10	8月12日	159 (大)	94.5	54.5	40.0
11	8月15日	66 (中)	13.5	13.5	7.0
12	9月25日	37	58.0	36.5	20.0
13	9月29日	20	67.0	67	16.0

* 100,000 m^3 以上を大規模土石流
100,000 m^3 ~ 50,000 m^3 を中規模土石流とする。

の要素だけと関連づけて述べることはできない。なぜならば、土石流発生の源となる普賢岳山腹斜面の場の条件が刻々と変化しているからである。そこで、新たな火砕流が堆積した場合、その堆積物の表面が降雨によってどのように変化し、やがて土石流の発生源としての条件をいかに整えていくのかについて、空中写真から得られる

情報を活用して考えていくこととする。

1) 図化機によるガリの判読と計測

各時期の空中写真を判読し、表層の微地形、特にリル・ガリや岩塊の分布状況を把握した。特にガリについては、図化機を用いて幅が3m未満、3~5m、5m以上の3ランクに区分し、それぞれの分布状況を1:5,000地形図上にプロットするとともに、その長さを計測した。

火砕流が頻繁に発生している流域では、ガリが形成されても、すぐに埋積されてしまうため発達状況がわからない。そこで、1991年11月以後、火砕流の発生が赤松谷方面へと変化したことにより、新たな火砕流の供給がなかった「おしが谷」を対象として、ガリの形成過程と降雨量について検討した(表-4)。

ガリの形成に関しては、斜面勾配や集水域との関連も検討したが、あまり関係がないことが明らかになり、降雨量に深くかかわることがわかった。雲仙岳水無川流域でのガリの形成状況と発達過程について要約すると次のようになる。

- ① 火砕流堆積直後であっても、総雨量150mm、時間雨量10mm程度のものが1~2回あれば、小さなガリが密(1~2本/ha)に形成される。
- ② 火砕流堆積後、時間雨量10mm以上の降雨が5回程度あれば、この堆積物を源とした土石流が発生しやすくなる。
- ③ 最初の土石流発生時には、まだ小さなガリが密に分布する状態が続いている。
- ④ 一度、土石流が発生すると、ガリは降雨時毎に拡大

図-7 平成4年3月11日から平成4年5月10日までの堆積厚の変化(60日間)

図-8 鳥かん図による火山噴出物の変遷状況

図-9 おしが谷での土石流発生モデル

の傾向をとる。

- ⑤ その後、降雨量の増加に伴ってガリが拡大（幅と深さ）し、さらに上流部へもガリの先端部が遡上していく。

2) 降雨量と土石流発生状況

火砕流堆積斜面が発生源となって土石流が発生したのは、1992年3月1日が最初である。その後の土石流発生状況と降雨量について、整理して表-5³⁾⁴⁾に示す。表-5から次のことが言えよう。

- ① 3月1日～9月29日まで13回の土石流が発生しているが、10万 m³ 以上の大規模なものは2回発生しており、いずれも時間雨量40 mm 以上である。一方、総雨量は大規模土石流が発生した8月12日の94.5 mm より大きなものが2回あるにもかかわらず、規模は中～小規模である。
- ② ①から土石流の規模は降雨強度（時間雨量の大小）と深く関連していると言えよう。
- ③ 5万 m³ 以上の中規模土石流は3回発生しているが、8月15日を除いて総雨量100 mm 以上、時間雨量はほぼ20 mm 以上で発生している。

- ④ 8月15日を除く全体的な傾向をまとめると次のようになる。

- 大規模土石流（100,000 m³ 以上）
総雨量100 mm 以上、時間雨量40 mm 以上
- 中規模土石流（50,000～100,000 m³）
総雨量100 mm 以上、時間雨量20 mm 以上
- 小規模土石流（50,000 m³ 以下）
総雨量50 mm 以上、時間雨量10 mm 以上

3) 土石流発生モデル

おしが谷で火砕流堆積後、降雨によるガリの形成と土石流の発生までをモデル化して示すと図-9のようになる。火砕流堆積物の供給がなくなった時点で、赤松谷や水無川本川でも類似したモデルで土石流が発生していくものと考えられる。

7. あとがき

土石流災害については、1993年4月28日～29日の大規模土石流に続いて7月まで、水無川・中尾川の両川で多くの土石流災害が発生している。また、島原市背後の眉山でも土石流が頻発し、災害の危険性が増している。このような状況から、土石流の発生条件と規模の予測に関する研究成果が早急に期待されている。

火山防災計画の鍵を握るハザードマップについては、もちろん作成はしているが、刻々と変化する状況に十分対応できるものとはなっていないため、発表を見合わせた。土石流のハザードマップも含めて、今後とも調査研究を継続していきたいと考えている。

未だ火山活動が終息していない状況下で、雲仙岳の火山防災調査について述べること自体、いささか無理があるが、本報告は噴火から2か年分の調査結果をとりまとめたものとして御理解願えれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 国土庁防災局(1992)：火山噴火災害危険区域予測図作成指針，本文153 p.
- 2) 河相祐子・中筋章人・向山栄(1992)：航空写真の判読及び計測による雲仙岳の火山活動状況について，APA, No. 53-12, pp. 107-113.
- 3) 池谷浩・石川芳治(1992)：平成3年雲仙普賢岳噴火に伴う火砕流，土石流被害(第2報)，土木技術資料，Vol. 34, No. 6, pp. 52-59.
- 4) 池谷浩(1993)：雲仙・水無川の土石流発生機構について，新砂防，Vol. 46, No. 2, pp. 15-21.

(1993年8月10日受付，1993年9月22日受理)