

火山灰堆積調査法に関する共同研究報告書

平成 21 年 1 月

独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ火山・土石流チーム

財団法人砂防・地すべり技術センター

朝日航洋株式会社

アジア航測株式会社

株式会社総合防災システム研究所

日本工営株式会社

火山灰堆積調査法に関する共同研究報告書

独立行政法人土木研究所	火山・土石流チーム	上席研究員	田村圭司
	〃	主任研究員	山越隆雄
	〃	交流研究員	松岡 暁
	〃	交流研究員	伊藤洋輔
		前 上席研究員	栗原淳一※1
	〃	前 交流研究員	柳町年輝※2
財団法人砂防・地すべり技術センター		総合防災部部長	安養寺信夫
朝日航洋株式会社	空間情報事業本部	技師長	福田 真
アジア航測株式会社		砂防技術開発室室長	小川紀一郎
株式会社総合防災システム研究所		防災情報技術部長	五代 均
日本工営株式会社	中央研究所総合技術開発部	専門部長	下村幸男

要旨

本報告書は、土木研究所と民間 5 社（財団を含む）との共同研究「火山灰堆積厚調査法に関する共同研究」における平成 17 年度～平成 18 年度の成果をとりまとめたものである。

本研究では、噴火中の火山においても調査員が危険に晒されることなく適用可能で、噴火後の土石流発生危険度評価を行うために十分な精度の情報を得ることができると思われる火山灰堆積厚測定手法を複数考案、検討し、それらの手法の適用可能性を明らかにした。

キーワード：火山灰堆積調査法、リモートセンシング、降灰量計

※1 現 長野県建設部砂防課

※2 現 株式会社 拓和

共同研究参画者一覧（平成 18 年 6 月現在）

<土木研究所>

栗原淳一	独立行政法人土木研究所	火山・土石流チーム	上席研究員
山越隆雄		//	主任研究員
柳町年輝		//	交流研究員

<財団法人砂防・地すべり技術センター>

安養寺信夫	総合防災部	部長
栢木敏仁	総合防災部	課長代理

<朝日航洋株式会社>

福田 真	空間情報事業本部	技師長
秋山幸秀	開発統括部	リモートセンシング室長
公手洋介	計測・コンサルタント部	部長
長嶺 達	計測・コンサルタント部	主任技師
高貫潤一	計測・コンサルタント部	技師
民野孝臣	計測・コンサルタント部	技師
鈴木英夫	計測・コンサルタント部	技師
杵渕 智	航空事業本部	技師
大森康至	空間情報事業本部	技師

<アジア航測株式会社>

小川紀一朗	砂防技術開発室	室長
千葉達朗	総合防災課	主任技師
平川泰之		技師
荒井健一		技師

<株式会社総合防災システム研究所>

五代 均	防災情報技術部	部長
小川達則	防災情報技術部	技師

<日本工営株式会社>

下村幸男	中央研究所総合技術開発部	専門部長
沼尾信二	首都圏事業部統合情報技術部	専門部長
小野寺勝	首都圏事業部統合情報技術部	部長代理
中川和男	首都圏事業部統合情報技術部	課長補佐
田島靖久	首都圏事業部国土保全部	係長
小原大輔	中央研究所総合技術開発部	技師
松本定一	首都圏事業部統合情報技術部	技師

（敬省略、役職は当時の最終役職）

はじめに

平成 16 年 3 月に霧島火山、9 月には浅間山が火山活動を活発化させる等、火山国の日本では、常に火山噴火と隣り合わせにあるといえる。火山噴火に伴う災害は様々な現象があるが、その現象の一つとして、噴火後の降雨によって発生する土石流・泥流がある。1977-78 年に噴火した有珠山で犠牲者が出たほか、桜島や雲仙普賢岳において建物や公共施設などが繰り返し被害を受けた。そのような被害を未然に防ぐためには、噴火発生後に、いち早く土石流等の発生危険度を把握する必要がある。これまでの調査事例から、例えば、富士山宝永噴火では 10cm 以上と言われているように、土石流は火山灰が厚く堆積した溪流において発生する恐れが高いことが分かっており、噴火後には迅速な火山灰堆積厚調査が必要とされている。しかし、従来の方法では、噴火直後の火山に人が接近しなければ堆積厚を把握できなかったことから、火山灰堆積厚を迅速に調査することには限界があった。

一方、リモートセンシング技術、無人化機械技術の分野において、近年目覚ましい技術革新が見られている。それら新技術の火山調査への利活用については、すでに近年の噴火事例において、土木研究所をはじめ各機関によって試みられ始めている。

本共同研究では、民間で開発されたリモートセンシング技術等の新技術を利用した火山灰堆積厚調査手法を検討し、一部の手法については、近年噴火した三宅島や桜島において実際に適用し、その適用可能性についても検討を加えた。また、その他、既存の技術を、火山灰堆積厚を把握する用途に応用する工夫もあわせて行い、その応用方法について机上検討を行った。本共同研究期間中（平成 17 年 4 月～平成 19 年 3 月）に、合計 6 回の検討会を行った。検討会には、気象庁、東京大学地震研究所、国土交通省関東地方整備局利根川水系砂防事務所の専門家を招聘し、その助言も受けつつ検討を進めた。本書は、これらの検討結果をとりまとめたものである。また、共同研究終了後についても、引き続き土木研究所で検討を進めている。平成 20 年 2 月の桜島昭和火口の噴火に際してはここで紹介した技術を一部活用した。これらの現時点までの成果については巻末資料にまとめて示した。

火山噴火後、または、火山噴火が予期される中で現場において本書が参照されることにより、噴火後の火山における火山灰堆積状況の把握が迅速かつ安全に実施され、噴火後に発生する土石流への緊急対応に資することを期待する。

目 次

1 噴火直後の火山灰堆積調査について [砂防・地すべり技術センター]	1
1.1 噴火直後の火山における火山灰堆積調査	1
1.2 火山灰の堆積と土石流発生の関係	3
1.3 火山灰堆積厚の計測に求められる精度と観測点の密度について	12
2 調査方法の詳細	19
各技術の個票	20
2.1 リモートセンシング技術	36
2.1.1 衛星リモートセンシング [日本工営]	36
2.1.2 航空写真 [アジア航測]	50
2.1.3 ハイパースペクトル観測 [朝日航洋]	60
2.1.4 航空レーザー計測 [朝日航洋]	68
2.2 現地計測技術	80
2.2.1 手動計測技術 [日本工営]	80
2.2.2 自動計測技術（既往機器の応用） [総合防災システム研究所]	88
2.2.3 自動計測技術（専用機器） [日本工営]	103
2.3 無人機械 [アジア航測]	143

< 巻末資料 >

- 1 少ない計測データから降灰分布を推定する手法の検討結果
- 2 ALOS「だいち」の火山灰等堆積状況把握への適用可能性検証結果

1 噴火直後の火山灰堆積調査について

1.1 噴火直後の火山における火山灰堆積調査

日本には 108 の活火山が分布しており、1990 年の雲仙普賢岳、2000 年の有珠山や三宅島など、火山噴火による災害が頻発している。砂防えん堤等の整備率が低い現状下において、火山噴火による溶岩流、火山泥流、土石流等の被害を皆無にすることは困難である。したがって、緊急対策を迅速かつ効果的に実施し、被害をできる限り軽減（減災）するためには、リアルタイムハザードマップに基づく被害想定区域の範囲、被害の内容、噴火後の二次的な土砂災害への警戒情報、そして発生が想定される土石流等の的確な規模の推定が重要である。そのような予測、推定を行うためには、噴火活動の推移に対応した調査・観測が必要である¹⁾。特にここでは、火山噴火災害の内、噴火後の降雨によって二次的に発生する土石流に対して緊急的に対応する場合に有用な火山灰の調査手法とその利活用手法の考え方について述べる。

(1) 噴火直後に緊急的に対応するための火山灰の調査手法について

火山噴火によって、火山灰や火砕流堆積物に覆われた山地斜面を流域とする溪流では、その後の降雨によって容易に土石流が発生することが知られており、その傾向は火山灰の堆積厚が増大するとさらに顕著になると言われている。1.2 節に詳述するが、過去に火山灰を大量に噴出した火山噴火の後に発生した土石流の発生状況を調べると、土石流が発生するかどうかの火山灰堆積厚の閾値は、火山によって大きく異なるが、概ね数 cm～数十 cm であると言える。

これまでは噴火後に現地調査を行い、火山灰堆積厚分布図を作成してきたが、噴火中の火山に人が接近する必要があるため危険を伴っていた。2000 年の有珠山噴火の際には、半径 5 km にわたって、飛行制限区域が設定され、地上踏査はもとより、ヘリコプターによる空中調査さえままならない時期が何日間も続いた（図 1.1.1）。

一方、土石流の発生危険度を把握する上で重要な降灰堆積状況は、土砂災害への対応上、一刻も早く欲しいデータである。したがって、噴火開始直後の活動的な火山において、人が火山に接近することなく、降灰堆積状況を迅速かつ安全に把握することが可能な調査手法の開発が必要とされている。

そのような手法として、以下の 3 通りの方法に可能性があると考えられることから、それぞれについて本共同研究では検討を行う。



図 1.1.1 2000 年有珠山噴火時の飛行制限区域（2000 年 4 月 8 日時点）

- ① リモートセンシング利用技術（衛星リモートセンシング、航空レーザ測量など）
- ② 自動観測技術（降灰量計、積雪深計など）
- ③ 無人機械利用技術（無人ヘリなど）

(2) 火山灰堆積厚データの利活用の考え方

得られた火山灰堆積状況の調査結果に基づき、火山灰の堆積厚分布を求める必要がある。面的な分布を得ることが得意なリモートセンシング技術と、点データでしかないが、正確に堆積厚が計測できる自動計測技術等を組み合わせて利用する必要がある。また、少ない計測点データから全体の火山灰堆積厚を推定する手法の利用も行われるべきである。調査の利活用目的は、火山噴火による噴出物の地球科学的な見地からの正確な測定ではなく、緊急的な土石流対策へ活用することにあることから、とにかく噴火開始後、新しいデータが得られる度に、火山灰の堆積厚分布図を更新し、利活用していく必要がある。

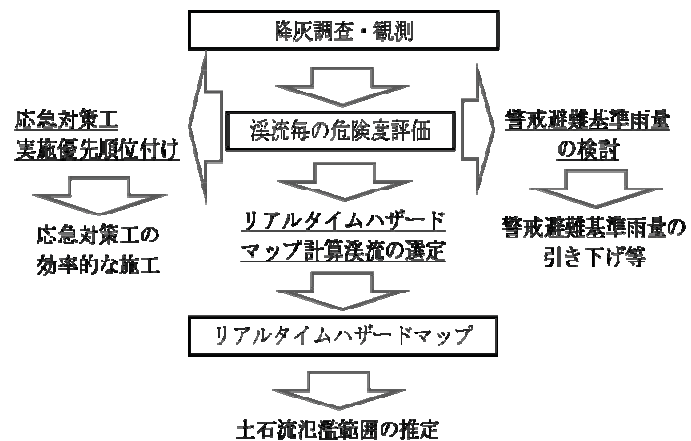


図 1.1.2 火山噴火後の緊急的な対応における降灰調査・観測データの利活用イメージ

（対象現象：二次的に発生する土石流）

火山灰の堆積厚分布は、溪流毎の危険度の相対評価に活用する。火山灰堆積厚の大きい溪流を抽出することによって、流域毎の相対的な危険度評価が可能となり、応急対策工の実施優先順位付け、リアルタイムハザードマップ²⁾計算対象溪流の絞り込み、基準雨量の引き下げの検討等を行うことができる（図 1.1.2）。

また、火山灰の空間的な分布や物性から、想定降雨に対する土石流ハイドログラフを推定するモデルも近年開発されている^{3), 4)}。この手法により、土石流ハイドログラフを精度よく推定できれば、空間的・時間的に精度の高い警戒・避難の実施が可能になるとともに、土石流に対応するための応急仮設構造物の合理的な設計にも資するものと期待される。

参考文献

- 1) 国土交通省砂防部：火山噴火緊急減災対策計画策定ガイドライン（案），2007 年 4 月
- 2) 国土技術政策総合研究所ほか（2006）災害情報を活用した迅速な防災・減災対策に関する技術開発及び推進方策の検討成果，国土交通省総合技術開発プロジェクト成果報告書
- 3) 山越ほか：火山活動の推移に伴う泥流発生規模の推定手法に関する研究，土木技術資料，Vol.49，No.9，pp.60-65，2006
- 4) 朽木敏仁：GIS 上のデータベースと連動した数値シミュレーションシステムの開発，SABO，No.95，pp.11-17，2008

1.2 火山灰の堆積と土石流発生の関係

(1) 斜面火山灰被覆と表層の浸食

火山灰が山地斜面を被覆して土石流が発生しやすくなることは知られているが、その限界となる火山灰堆積厚（閾値）について、この関係を定量的に見いだすには至っていない。いくつかその理由が考えられる。

① 火砕物の化学組成

マグマ起源の火砕物は基本的にマグマ組成に由来する化学組成を保持していると考えられる。とくに水の浸透性に規定する粘土鉱物を形成するAlなどの含有率、斜面上に定置後の鉱物の酸化などによる組成変化が浸透性に与える影響については余り議論されていない。

② 降下火山灰の物性

火砕物は揮発性成分が多いと発泡が進み、より微細に破砕されるため、噴出物の粒度分布においては細粒成分が多く占める。これに対し揮発性成分が少ないと、火砕物は粗くなり噴煙柱の近傍に落下する粒子が多くなる。粒度分布は堆積層の間隙率にも影響するので、透水性が細粒分より上がると考えられる。

③ 斜面水文系の不均一性の問題（空間と時間）

山腹斜面では微細な起伏や0次谷などの地形変化があることや、斜面方位と風向の関係で火山灰は一様に堆積しない。また、植生などの地被状態も火山灰堆積に影響を与える。その結果、リル・ガリー浸食の不均一性が生じる。

火山灰被覆前の表層が均一でないことは、土石流発生条件に差異を与える一因かも知れない。

これらの条件を考慮しつつ、砂防における火山灰堆積厚調査の目的を達成するために、最近の国内における噴火と土石流発生（土砂流出）事例から実用的な土石流発生の判断基準を考えることとする。

(2) 噴火後の土石流発生事例

① 有珠山1977噴火

有珠山の1977-78年噴火によって、大量の火山灰・軽石が噴出して有珠山斜面とおもに東側の広域に堆積した。1977年8月7日の最初の噴火から10日後の8月16日に有珠山南西斜面の泉地区、入江1の沢と床丹川において土石流が発生したのをきっかけに、1981年9月4日までの4年間で合計31回(発生溪流数は1回で複数ある;北海道室蘭土木現業所調査)土石流が発生した(表1.2.1)。とくに1977年10月24日には、洞爺湖温泉に注ぐ西山川と小有珠川などで規模の大きな土石流が発生して、3名の犠牲者を出した。

1977年8月7日から9日にかけて噴煙柱高度10,000m以上に達する4回の大きな噴火が発生したが(第1期)、その後も小規模な水蒸気爆発を繰り返して、1978年10月の小噴火を最後に火砕物噴火は終了した。有珠山周辺の火砕物堆積分布を図1.2.1に示す。山頂外輪山付近には軽石が1m以上堆積したが、山腹ではおおむね20~50cmの範囲であった。

土石流は有珠山山体の溪流以外ではほとんど発生しておらず、土石流が発生した溪流の火砕物堆積厚は概ね20cmが下限となる。ただし、前述のように有珠山斜面に堆積した火砕物は

軽石と火山灰であり、4回の大規模噴火と水蒸気爆発の繰り返しによる、粒径の異なった火砕物の互層という点に注意する必要がある。

表1.2.1 有珠山1977噴火に伴う土石流発生年月日と流出土砂量
(室蘭土木現業所資料より作成)

年	月日	泉	入江1 の沢	床丹川	洞爺湖 温泉1)	西山川	小有珠 川	小有珠 右の沢	カトレ ア川	昭和新 山	昭和川	根岸の 沢	板谷川	道南青 果沢	大平左 の沢	大有珠 川	壮瞥温 泉	源太川	土砂量 小計	
1977	8/16	*	21,810	870	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22,680	
	9/11	*	7,530	1,410	*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,940	
	9/14	*	26,100	2,190	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28,290	
	9/21	*	13,050	1,500	—	—	—	—	—	*	—	—	—	—	—	—	—	—	14,550	
1978	6/12	*	*	—	—	—	—	—	*	*	—	*	*	—	—	—	—	—	*	
	7/7	—	—	—	—	—	—	—	*	*	—	*	—	—	—	—	—	—	*	
	7/13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	*	—	—	—	—	—	*	
	8/14	—	*	—	—	—	—	—	*	*	—	*	—	—	—	—	—	—	*	
	8/16	—	—	—	—	—	—	—	*	*	—	*	—	—	—	—	—	—	*	
	8/21	—	—	—	—	—	—	—	*	*	—	*	—	—	—	—	—	—	*	
	9/26	—	—	—	—	*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	*	
	10/16	—	—	—	48,900	*	*	*	*	*	—	—	*	*	—	—	—	—	48,900	
	10/24	*	—	—	142,300	*	*	*	16,200	10,200	*	*	—	*	*	—	—	—	168,700	
	1979	6/27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	800	—	—	—	800
7/2		800	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	600	1,000	2,500	—	—	4,900	
7/5		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	200	500	—	—	—	700	
7/25		500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	800	700	200	—	—	2,200	
8/1		600	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,000	600	1,300	—	—	3,500	
8/27		*	—	—	—	—	*	—	—	—	—	—	—	—	200	3,500	—	—	3,700	
9/5		500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	500	4,000	8,000	—	—	13,000	
9/30		1,500	—	—	—	—	*	—	—	—	—	—	—	300	1,700	4,000	4,700	—	12,200	
10/19		800	—	—	—	—	*	—	—	—	—	—	—	300	1,000	2,500	5,000	—	9,600	
1980	7/24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	*	—	0	
	8/31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	900	1,000	—	1,900	
	10/21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,000	1,300	—	3,300	
1981	4/24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,800	—	10,800	
	7/21	—	—	—	—	—	—	700	—	—	*	—	—	—	—	2,200	*	*	2,900	
	8/4	—	—	—	—	—	—	4,400	—	—	3,800	—	—	—	—	200	21,600	2,300	32,300	
	8/12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,000	—	1,000	
	8/23	—	—	—	—	—	10,100	38,300	—	—	9,000	—	—	—	—	5,000	39,000	8,000	109,400	
	9/4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	*	0	0	
		31	4,700	68,490	5,970	191,200	0	10,100	43,400	16,200	10,200	12,800	0	0	3,700	10,500	32,300	84,400	10,300	504,260

1) 洞爺湖温泉の土砂流出量は西山川、小有珠川、小有珠右の沢の合計量
*: 発生したが土砂量未調査 "—" は非発生

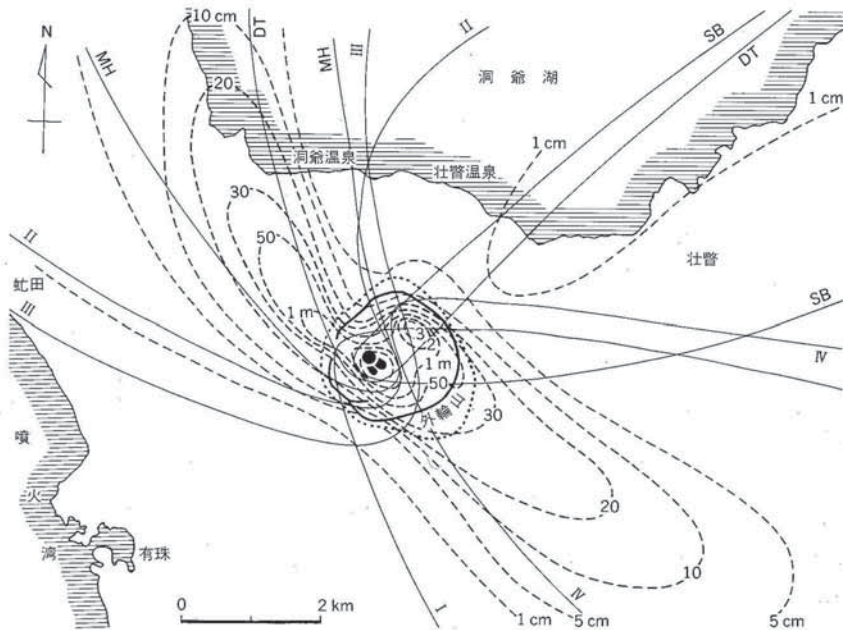


図 2.5 有珠山 1977 年「フラ」降下軽石・火山灰)の分布。実線は各噴火に対応するテフラ (名称は表 2.1 参照) の分布限界。破線は噴出物の積算等層厚線。点線は火山弾・火山岩の分布限界。
Distribution of the 1977 tephra. I ash lines are cumulative thickness contours, and dotted line shows the limit of the distribution of volcanic bombs and bombs.

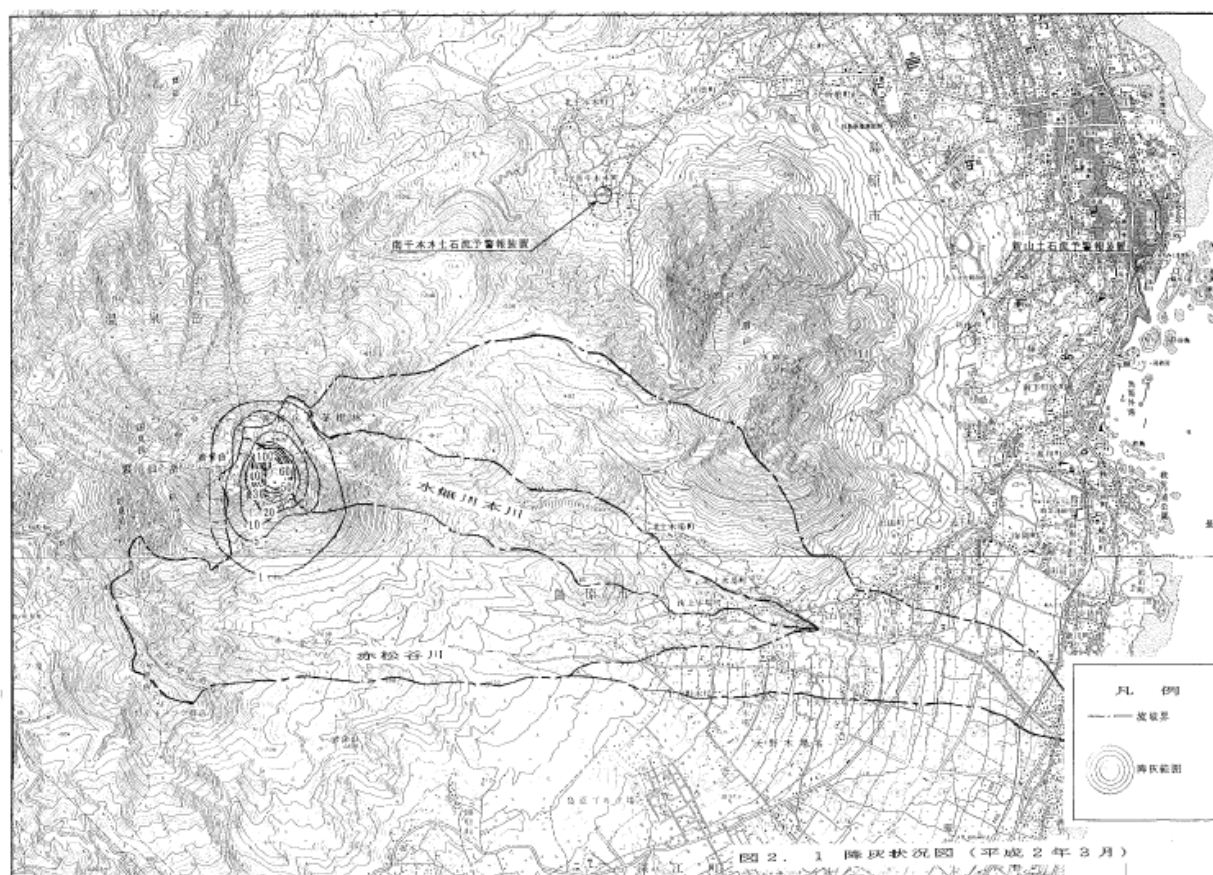
図1.2.1 有珠山1977年噴火による降下火砕物分布 (門村ら, 1988)

② 雲仙普賢岳1990-1995年噴火

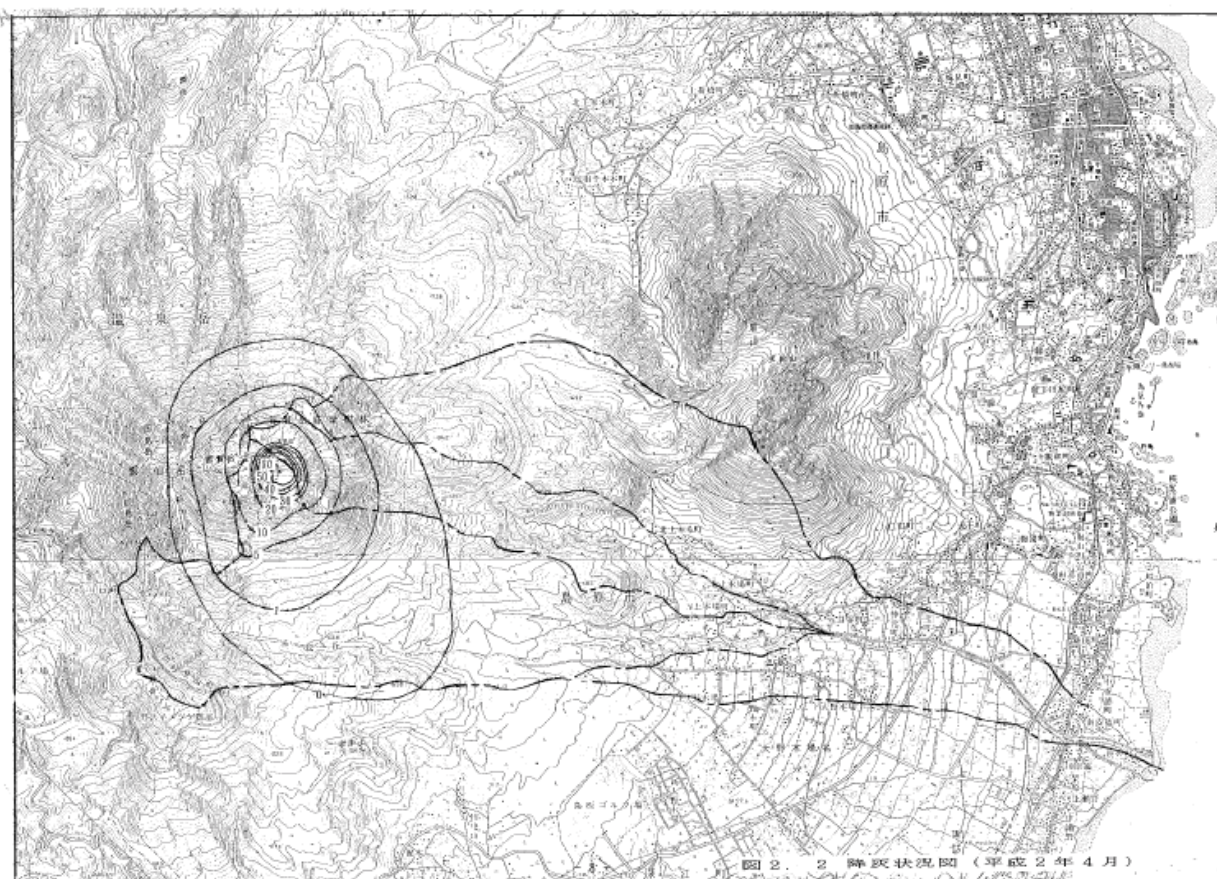
雲仙普賢岳は1990年11月17日に最初の噴火が発生した後、1991年3月29日の噴火によって周辺に火山灰を堆積させた。最初の土石流は同年5月15日に水無川において発生した。その後同月19, 20, 21日にも小規模ながら連続して発生した。5月20日になって山頂に溶岩ドームが出現し、その成長にともなって一部が崩落し、5月24日から火砕流が発生するようになった。同年6月3日, 8日には山麓部に達する火砕流が発生し、溶岩ドームの成長方向の変化に合わせて火砕流流下方向も変わり、水無川, 赤松谷川, おしが谷, 千本木, 湯江川に火砕流堆積物が広く分布した。その結果、火砕流堆積斜面を生産源とする土石流が頻発し、噴火が沈静化した1995年以降も継続して1999年9月までに水無川だけでも44回繰り返し発生した。

1991年6月以降に発生した土石流は、火砕流堆積物の侵食によるものであるもので、それ以前の5月の土石流が火山灰の影響によって発生したとみなせる。図1.2.2に降灰分布図を、表1.2.2に1991年3月と4月の降灰分布と堆積量を示す(水無川災関緊急砂防基本計画調査報告書, 1991)。降灰分布は水無川本川と赤松谷川上流で9割を占め、土石流発生溪流と一致している。ただし、4月の分布では火山灰被覆面積は増加しているが、平均堆積厚は減少している。

マグマの上昇による山体の膨張・変形で表層斜面にゆるみが生じていたことを考慮しても、火山灰堆積厚が5～10cm程度で土石流が発生したことになる。



(1) 雲仙普賢岳の降灰分布 (1991年3月)



(2) 雲仙普賢岳の降灰分布（1991年4月）

図1.2.2 雲仙普賢岳1991年噴火による降灰分布

表 1.2.2 雲仙普賢岳 1991 年噴火による河川別降灰量

河川名	調査年月	降灰面積(m ²)	降灰量(m ³) [面積率]		平均堆積厚(m)
水無川本川	1991 年 3 月	413,000	65,000	0.45	0.16
	1991 年 4 月	1033,000	84,500	0.40	0.08
赤松谷川	1991 年 3 月	532,000	67,000	0.46	0.13
	1991 年 4 月	2460,000	98,000	0.45	0.04
湯江川	1991 年 3 月	88,000	5,000	0.03	0.06
	1991 年 4 月	560,000	10,000	0.05	0.02
残流域	1991 年 3 月	180,000	6,600	0.05	0.04
	1991 年 4 月	1230,000	23,000	0.10	0.02
合 計	1991 年 3 月	1213,000	146,600	1.00	0.12
	1991 年 4 月	5283,000	215,400	1.00	0.04

ちなみに、土石流発生時の最大時間雨量を発生限界雨量として火砕流堆積物の被覆による土石流発生と降雨の関係をまとめると、初期は5～10mm/hrで、徐々に下限値が上がっていることがわかる（図1.2.3）。

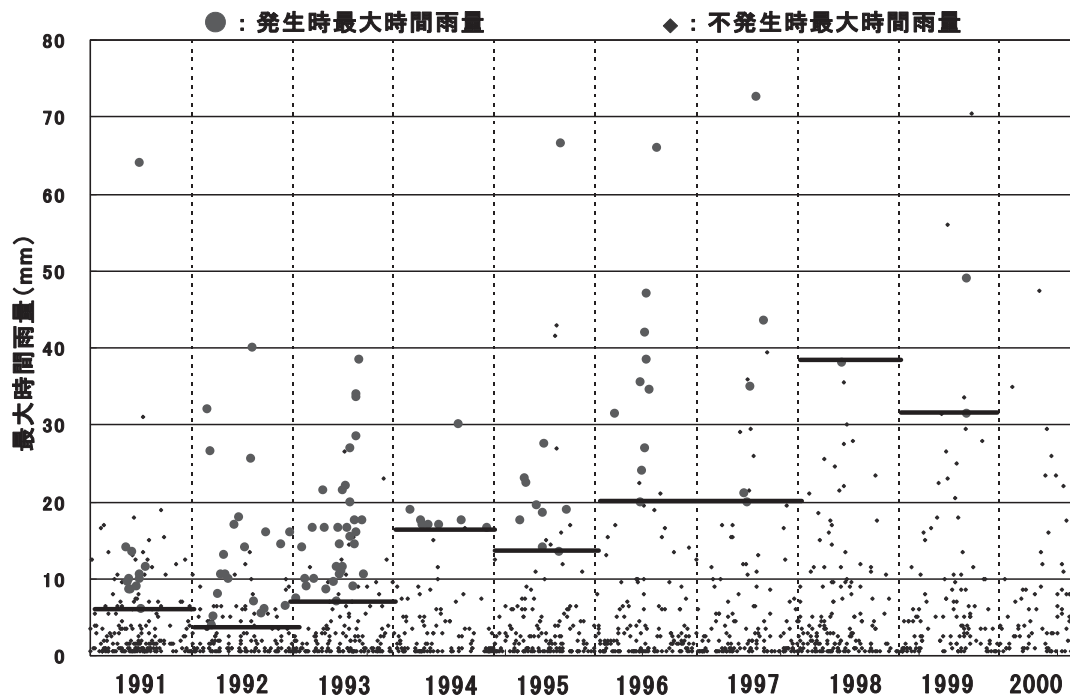


図1.2.3 土石流発生限界雨量の推移

③ 桜島1955以降の断続的噴火

桜島では昭和30年の南岳爆発以来、約50年にわたって断続的な爆発を繰り返す活発な火山活動が継続している。平成4年以降、爆発回数は減少傾向にあるが、南岳斜面を中心に厚く火山灰に覆われている。火口から放出される火山ガスと火山灰堆積の影響により、標高約400m以上の斜面において無植生状態となっていることもあり、斜面侵食が著しく多数のガリーが形成されて土砂生産が激しい。

昭和50年に直轄砂防事業が開始されて以来、建設省大隅工事事務所(現国土交通省大隅河川国道事務所)では土石流調査を継続して実施している。調査は、空中写真判読によるガリーの発達状況やカメラによる土石流の動態観測など多岐にわたっている。

昭和51年から平成15年までの主要河川における土石流発生回数を表1.2.3に示す。期間中、野尻川が485回と圧倒的に多く、次いで有村川、黒神川の順である。年間発生回数を見ると1980年の野尻川において39回が最多であり、次に1985年の33回である。平成6年以降は土石流発生回数が減少傾向にあり、春松川や第一、第二古里川ではその傾向が著しい。

表1.2.3 桜島主要河川における土石流発生回数の推移

年	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	合計	観測年数	平均
河川名	S51	S52	S53	S54	S55	S56	S57	S58	S59	S60	S61	S62	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15			
野尻川	24	22	21	17	23	17	17	25	15	33	18	20	23	29	39	20	24	16	11	10	10	3	10	7	8	8	9	6	485	28	17.3
春松川	6	4	2	4	4	5	1	6	6	16	5	4	2			2	2	3	3	4	1	1	2	0	0	2	0	0	85	26	3.3
持木川	6	10	11	16	10	15	9	13	9	24	7	9	14	7	8	5	8	8	5	5	3	1	2	4	2	2	0	1	214	28	7.6
第二古里川	5	10	4	7	5	0	1	13	7	9	2	4	7			8	6	3	1	2	0	0	1	1	0	0	0	0	96	26	3.7
第一古里川	5	6	4	9	8	7	9	13	4	7	6	6	4	7	9	4	6	6	2	3	2	2	1	0	0	0	0	0	130	28	4.6
有村川	6	11	4	6	5	8	16	18	9	12	12	11	11	11	17	10	13	24	13	16	5	2	7	8	8	3	2	0	268	28	9.6
黒神川	6	11	8	13	9	6	2	16	8	10	8	14	10	13	21	15	14	22	7	12	5	2	8	10	4	2	6	2	264	28	9.4
引ノ平川																													7	6	1.2
合計	58	74	54	72	64	58	55	104	58	111	58	68	71	67	94	64	73	82	42	52	26	11	35	31	24	17	17	9			

降灰量調査はドラム缶を利用して定期的に計測されている。島内7個所の観測地点の年間平均降灰量と土石流発生回数の推移を図1.2.4に示す。降灰量が最多であったのは1985年で、約12,500g/m²/年（乾燥重量）である。その年の土石流発生回数も主要溪流合計が最多であった。このことから、降灰量と土石流発生回数には関係があることが伺える。ちなみに降灰の見かけ密度は1.3～1.6であるので、最大降灰量のあった年の平均堆積厚は19.8～21.3cm/年となる。

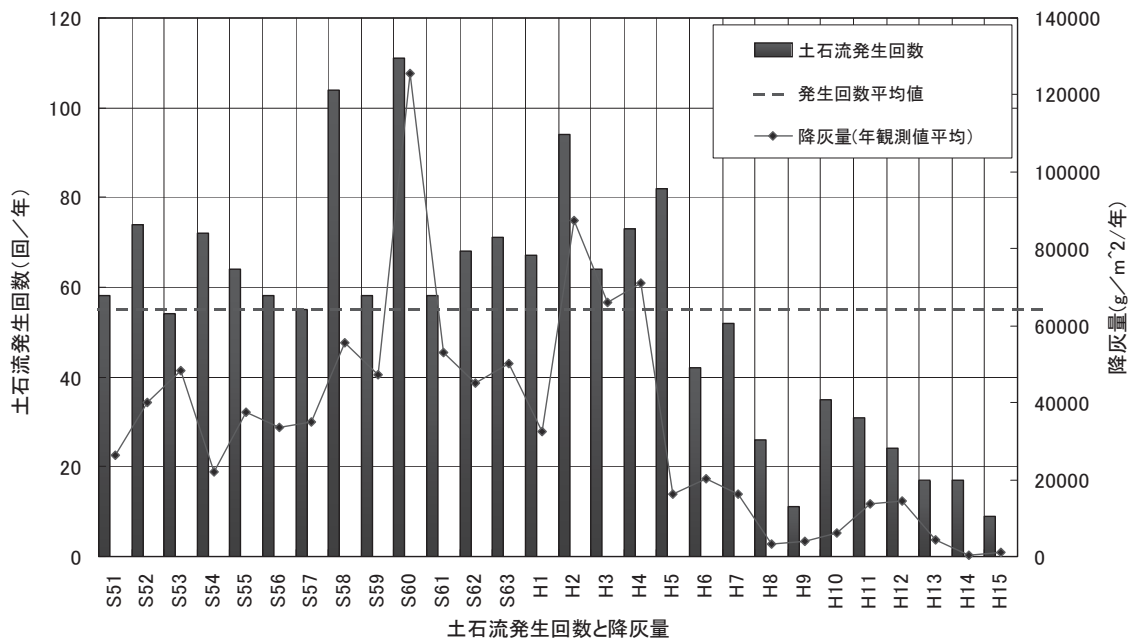


図1.2.4 土石流発生回数と降灰量の推移

爆発回数と降灰量が減少し始めた1993年以前と以降に分けて、降灰量と土石流発生回数の関係を図示した（図1.2.5）。年間降灰量20,000g/m²を境界として土石流発生回数の傾向に違いが見られる。この降灰量を同様に火山灰堆積厚に直すと、2.3～2.5cmとなる。

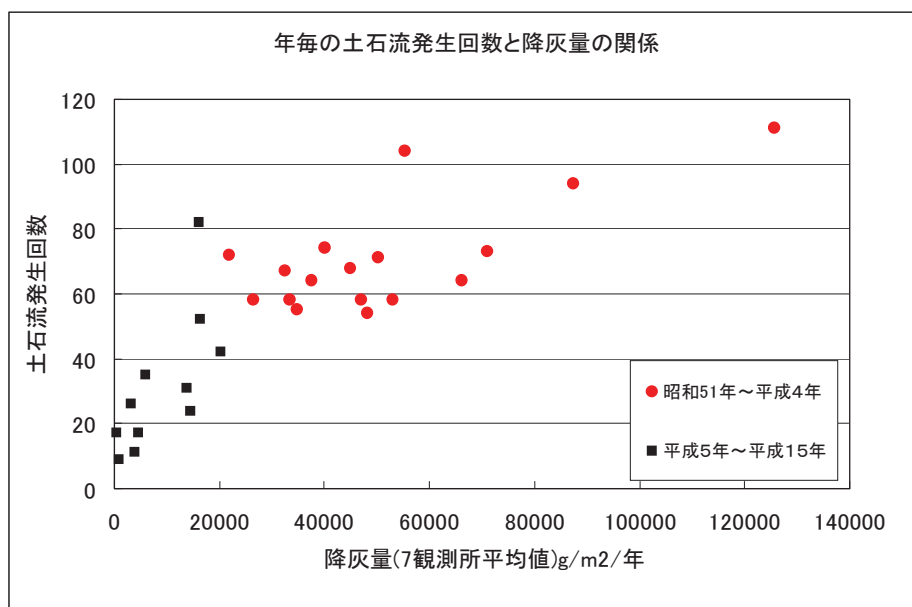


図1.2.5 年間平均降灰量と土石流発生回数の関係（1993年以前と以降）

土石流発生は降灰量のみに依存するのではなく、降雨量にも関係するので、期間中の降雨について調べた。土石流発生は10分間降雨強度と相関があるが、過去の雨量資料は時間雨量のみであるため、便宜的に野尻川観測所における時間雨量5mm以上の降雨発生回数と年間総雨量、参考として鹿児島地方気象台における雨量と土石流発生回数を比較したのが図1.2.6である。降灰量が減少し始めた1994年は鹿児島水害に代表される大雨年であり、土石流発生回数は前年より増えている。その後1999年、2000年に相応の雨量が生じているが、土石流発生回数は減少傾向となっている。このことは降灰の供給が減少した後、土石流発生に影響を残す期間の推定に示唆を与える。

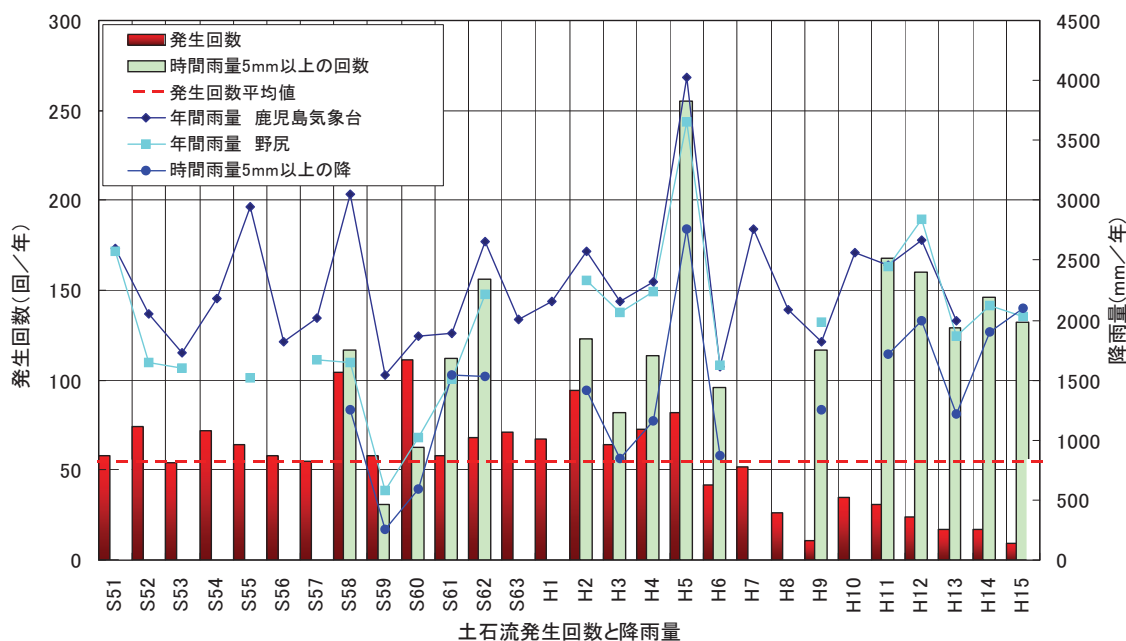


図1.2.6 土石流発生回数と降雨量の推移

④ 三宅島2000年噴火

三宅島は2000年7月8日に雄山山頂から噴火し、それ以降火山灰の噴出をともなう噴火を継続した。とくに8月18日に発生した噴煙高度8,000m以上に達する噴火と、8月29日の火砕流を伴う噴火により、島内に火山灰が堆積した(図1.2.7)。

噴火直後の土石流発生状況を2001年9月までの間の現地調査、ヘリ視察、空中写真判読の結果から、島内227流域(0次谷を含む)のうち224流域について把握した。そして各流域の保全対象上流に設定した基準点をベースに「基準点下流まで土砂が流下した流域」、「基準点下流には流下していないが流域内で土砂移動があった流域」、「土砂移動の見られなかった流域(ただし確認できないだけで、実際には土砂移動のあった可能性も否定できない)」の3つに分類した。

図1.2.7の火山灰堆積等値線図を参考に、各流域内の最大火山灰堆積深を求め、堆積深段階ごとに上記の各分類に該当する流域数を整理したのが図1.2.8である。

土砂移動が発生した流域の割合は、火山灰堆積深が64mm以下では0～8%、64～128mmで53%、128mm以上では85～100%である。このことから火山灰堆積厚が土砂移動発生に関与しており、その限界値は64～128mmの間にあることが示唆される。

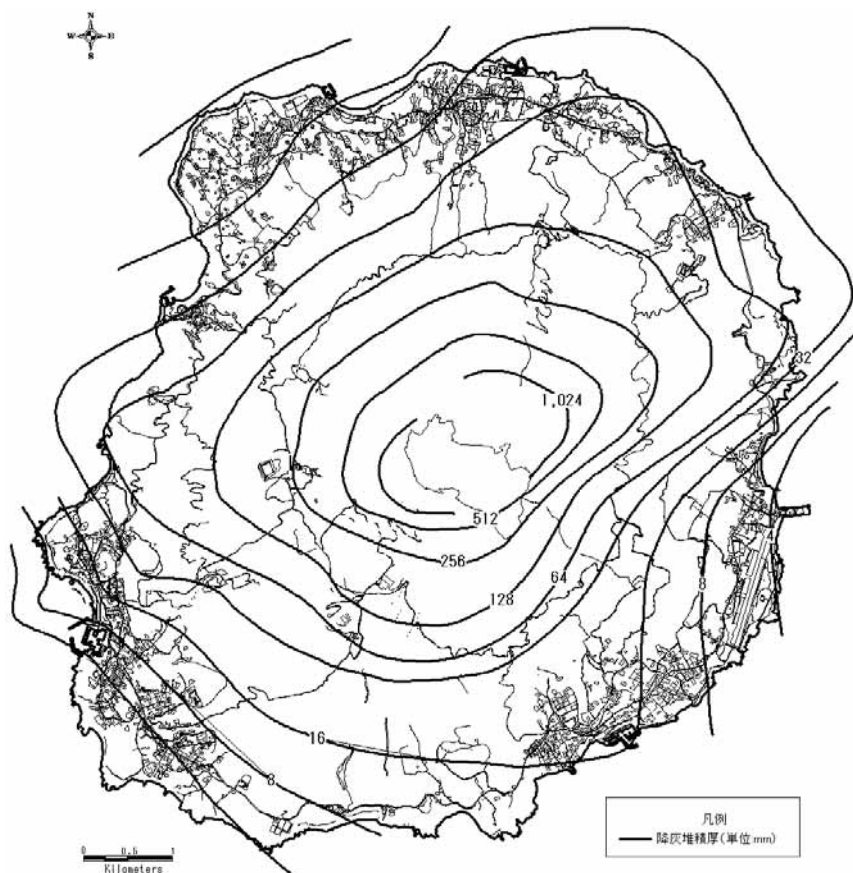


図1.2.7 三宅島2000年7～8月噴火による火山灰等層厚線図

(2000年7月8日～8月30日までに堆積した火山灰の降灰堆積厚；東京大学地震研究所2001.10をもとに作成)

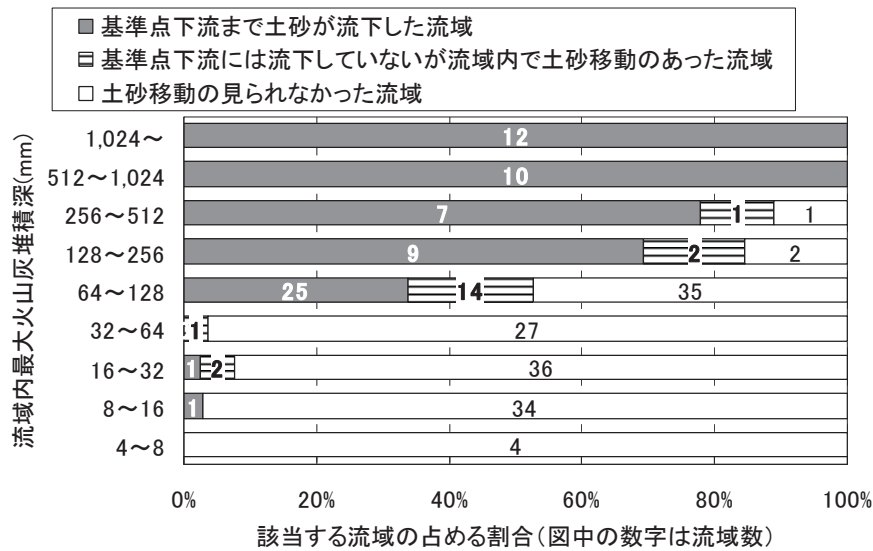


図1.2.8 三宅島2000年噴火後の土砂移動と火山灰堆積厚の関係（平川ら，2002）

引用文献・資料

門村浩・岡田弘・新谷融（1988）；有珠山 その変動と災害，北海道大学図書刊行会

平川泰之・安養寺信夫・鈴木崇・今野雄悟（2002）；三宅島の噴火後の二次泥流発生条件，平成14年度砂防学会研究発表会概要集

(財)砂防・地すべり技術センター（1991）；水無川災関緊急砂防基本計画調査報告書，長崎県島原振興局

(財)砂防・地すべり技術センター（2003）；桜島警戒避難基準雨量検討業務委託報告書，国土交通省大隅河川国道事務所

安養寺信夫（2004）；活火山における侵食地形解析による土砂流出予測に関する研究，北海道大学演習林研究報告，61-1

1.3 火山灰堆積厚の計測に求められる精度と観測点の密度について

(1) 計測の目的

火山噴火によって放出される火山灰や軽石などの火砕物は様々な影響を与える。とくに山地域に堆積した火山灰は、森林など表層植生を破壊して降雨による斜面侵食を助長する。そのため、火山灰被覆斜面や溪流では、土砂移動が頻発して災害をもたらす。

砂防事業における火山灰堆積厚計測は、このような斜面や溪流における土砂災害発生危険度を評価して警戒避難対策の実施に資するとともに、とくに土石流対策計画における計画流出土砂量を予測してハード対策の実施に資することを目的としている。

この目的に合致した計測精度は、次の手順で絞り込む。

a. 降灰後の土石流発生を左右する火山灰堆積厚

火山灰の斜面被覆によって雨水の浸透能が低下し、表流水が発生することで斜面侵食が顕著になる「しきい値」としての火山灰堆積厚とその精度の把握。

b. 各種計測法による現地計測精度

適用可能な火山灰堆積厚計測手法の計測精度の、現地での実用的な計測範囲を把握する。

c. 火山灰堆積厚計測法の実用精度

土石流発生の「しきい値」と現地計測精度の比較により、計測目的に合致した実用的な精度を提案する。

(2) 降灰後の土石流発生を左右する火山灰堆積厚

前節に示した既往噴火時の降灰と土石流発生実績事例から、しきい値を整理した（表 1.3.1）。

火山によってその値が異なるが、前節で述べた火山灰の化学組成や物性の相違が原因であると考えられる。富士山 1707 の堆積厚はおよそ 300 年経過した現在の値であり、斜面等への堆積後の流出や圧密による減少分は考慮されていないので、10cm という値は流出量や圧密の程度を加味して判断する必要がある。その他は最近の噴火事例であり、噴火直後の土石流発生を左右する火山灰堆積厚として取り扱うことが可能である。

統一的なしきい値を設定することは難しそうである。概ね 10～30cm の範囲にあり、数例のみであるが、この値が土石流発生のしきい値と考えられる。三宅島のようにミリメートル単位で算出されている事例もあるが、センチメートル単位が多い。実際の計測現場における風や周辺の地形、樹木、構造物などの影響を考えると、±1cm 程度の範囲で計測できれば、土石流発生の判断には使えそうである。

表 1.3.1 国内主要火山における土石流発生のにきい値

噴火事例	しきい値	降灰分布と土砂移動現象
富士山(1707)	10cm 以上	約 2 週間の噴火期間中に富士山東方の広い範囲に降灰。降灰深 10cm を越えた足柄、丹沢、相模などの地域内の溪流で土砂流出・洪水が頻発した ¹⁾ 。
桜島(1914)	30cm 以上	約 3 日間にわたる爆発的噴火により、大隅半島中部を中心に降灰。とくに高隈山地内の溪流において土石流が 3 年間にわたり頻発。下流の河川においても洪水氾らんが頻発した ²⁾ 。
桜島 (1985～2003)	20kg/m ² /年 (2.3～2.5cm/年)	年間降灰量と土石流発生回数を比較した結果、爆発回数と年間降灰量が減少すると土石流発生回数も減少傾向にあることから、目安としてしきい値を設定した。
有珠山(1977)	10～20cm	範囲内の溪流で土石流・泥流が発生
雲仙普賢岳(1991)	5～20cm	1991 年 3 月噴火で山頂部に堆積した火山灰被覆斜面から土石流が発生。
三宅島(2000)	64～128mm	しきい値以下では土石流発生がみられない

(3) 各種計測法による現地計測精度

これまで本共同研究の中で提案され、実用化の可能性がある火山灰堆積厚計測方法の計測精度をまとめると表 1.3.2 のようである。

表 1.3.2 実用化の可能性がある火山灰堆積厚計測方法の精度

計測方法	計測誤差	適用範囲	問題点
①人力計測 (従来手法)	±0.5cm 程度 (重量計測は ±1g)	噴火前の計測装置設置は範囲が不確定なため限定される。	噴火後には危険範囲内への立ち入り困難
②接触型機器による計測	±1mm 程度 (±1kg)	専用の機器が必要 自動計測可能	重量を量る場合、別途火山灰の密度が必要
③衛星・航空機によるリモートセンシング	撮影高度によるが実用上は ±10cm 程度	降灰の有無 (1mm 以上) は色調等で判断可能 降灰分布範囲の把握は効率的	噴煙・雲では計測不可 衛星軌道によっては即応困難
④非接触型機器による計測	±1cm 程度	既往の水位計や積雪計等との兼用が可能 自動計測加	積雪量との分離が必要 電源・メンテナンスがある程度必要

それぞれの計測手法により精度に相違があるが、実用的にはセンチ単位での計測が可能と判断される。

(4) 火山灰堆積厚計測の実用精度

土石流の発生機構には単純な火山灰堆積厚だけでなく浸透能や粒度などの影響も関係している。実績に基づく土石流発生の目安となるしきい値はセンチ単位で計測できれば良い。また、実用的な計測手法の精度もセンチ単位で可能である。以上の結果から、運用上は $\pm 1\text{cm}$ の計測誤差は許容することを提案する。ただし、研究目標として $\pm 1\text{mm}$ 程度の誤差範囲に収まるよう機器や手法解析をすすめることが課題である。

運用：土石流発生溪流の抽出に使用する → $\pm 1\text{cm}$ の計測誤差は認める

研究：土石流発生しきい値の設定に使用する → $\pm 1\text{mm}$ 程度の誤差になるよう努める

(5) 観測密度の検討

火山灰堆積厚がセンチ単位で計測できることを前提として、溪流単位で土石流発生の可能性を判断するための観測密度について検討する。

ある溪流が、土石流発生のしきい値を超えた可能範囲に入っているかどうかは、観測データに基づいて火山灰等層厚線図を描いて、しきい値以上の範囲に（流域の一部分でも）入っているかどうかを見ればよい。

ここでは実際の噴火事例をもとに、計測範囲と観測点密度（配置）を調べる。想定するのは浅間山や桜島などで発生するブルカノ式噴火で、噴出物量 100万 m^3 以下の中小規模とする。また、土石流危険溪流調査資料から、平均流域面積はおよそ 1km^2 以下であることを前提とする。

対象とした噴火事例は、2004年9月1日の浅間山噴火である（図 1.3.1）。

一般に火山学分野では ϕ スケールで粒径調査が実施されるため火山灰等層厚線図（isopach map）もその結果に基づいて描かれることが多い。図 1.3.1 の資料となった火山灰堆積量は重量計測値であり、これに基づいた等層厚線図は 2^nmm 単位の $2^4, 2^5, 2^7 \cdots \text{mm}$ の堆積厚が表現され、層厚線の堆積厚差は $2^n - 2^{n-1}\text{mm}$ となり、等間隔ではないことに注意が必要である。

このような計測精度を考慮すると、等層厚線図は 1cm 間隔で線が引ければよいと考えられる。

火山灰堆積の分布は、局地的に周辺の構造物の影響を受けることはあるが、概ね火口から遠方ほど薄く堆積する。したがって、噴火直後から噴煙が収まるまでの風向が把握されていれば、火山灰の飛散範囲を絞り込むことができる。分布幅は衛星画像や現地情報などに基づいてその範囲を把握する。風速が強いと火山灰は遠方まで運ばれるが、土石流危険溪流の平均流域面積は 1km^2 以下であり、浅間山の例で考えると、観測点密度 $2\sim 5\text{km}$ で現地の火山灰堆積厚が判れば、実用的には問題がないと考えられる。この場合、火口近傍では層厚線の堆積厚差は $10\sim 20\text{cm}$ となるので、観測密度は 2km 程度、遠方は数センチとなるので、 5km 程度が目安になるであろう。

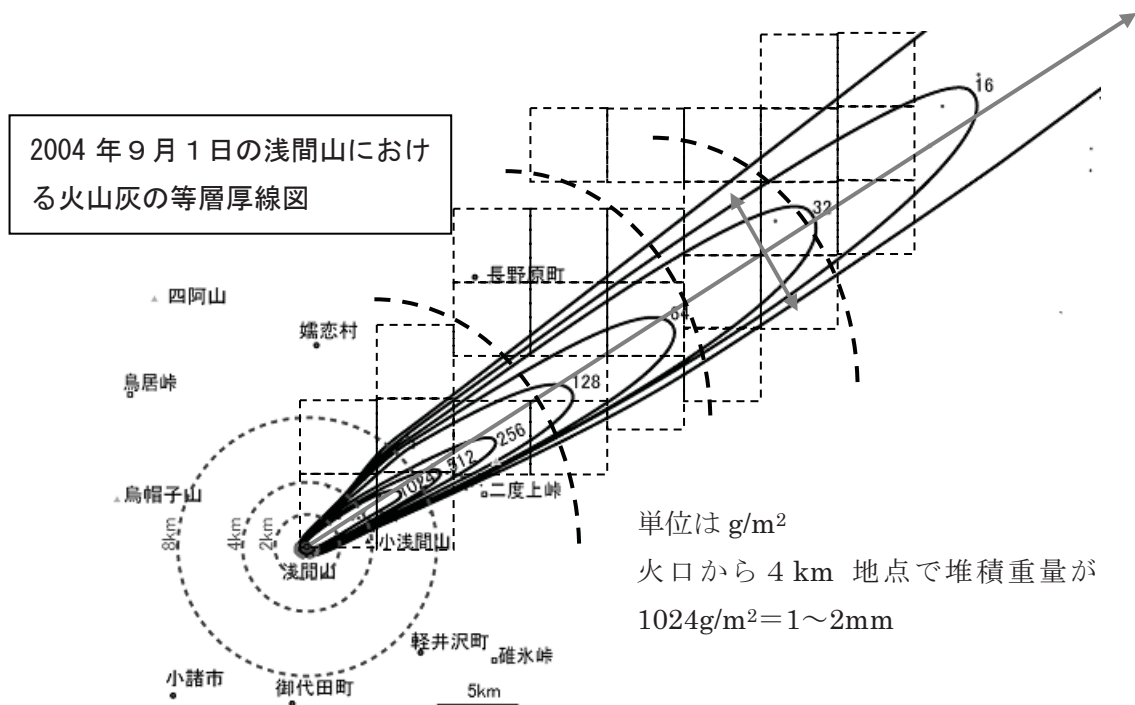


図 1.3.1 浅間山 2004 年 9 月 1 日噴火による降灰分布

(第 2 回火山灰堆積厚調査法研究会資料「噴火直後の降下火山灰調査法とその問題点 北海道駒ヶ岳と浅間山噴火」(東京大学地震研究所) より抜粋)

(6) 土石流発生を判断するための火山灰堆積厚計測運用方法

以上をとりまとめ、降灰に起因する土石流発生の可能性を判断するための、火山灰堆積厚計測の運用方法を提案する。

原則

土石流危険渓流の近傍に観測点があれば、その観測値を用いて直接判断することが可能である。降灰堆積厚 10cm 以上の線が判断できればよいので、遠方の観測点は必要最小限に止めるか、他機関(道路、農地等の管理)の情報を用いる。

事前の観測所設定 (図 1.3.2)

- ① 卓越風方向(ほぼ北東～東南東)に配置する。
- ② 噴火後の立ち入りが難しく、しかも火山灰が 10cm 以上堆積する可能性が高い場所については、火口近くに事前に降灰計を設置しておくことが必要である。
- ③ ただし、電源や道路などのアクセス等の条件に左右される。

観測密度

- ① 火口近傍はできるだけ密に(2km 程度)観測する。
- ② 等層厚線の広がり把握するため、横方向も 2km 程度の間隔で複数観測する必要がある。

- ③ 火口から 10km 以上離れた地点については、5km 程度の間隔で、観測可能な箇所で観測したデータがあれば充分である。

事前に設置した機器による計測→リモセンによる面的な計測→機動観測によるポイントでの計測と段階的に絞り込んで、火山灰の等層厚線図の精度を上げていく方法で運用することを基本とする（図 1.3.3）。

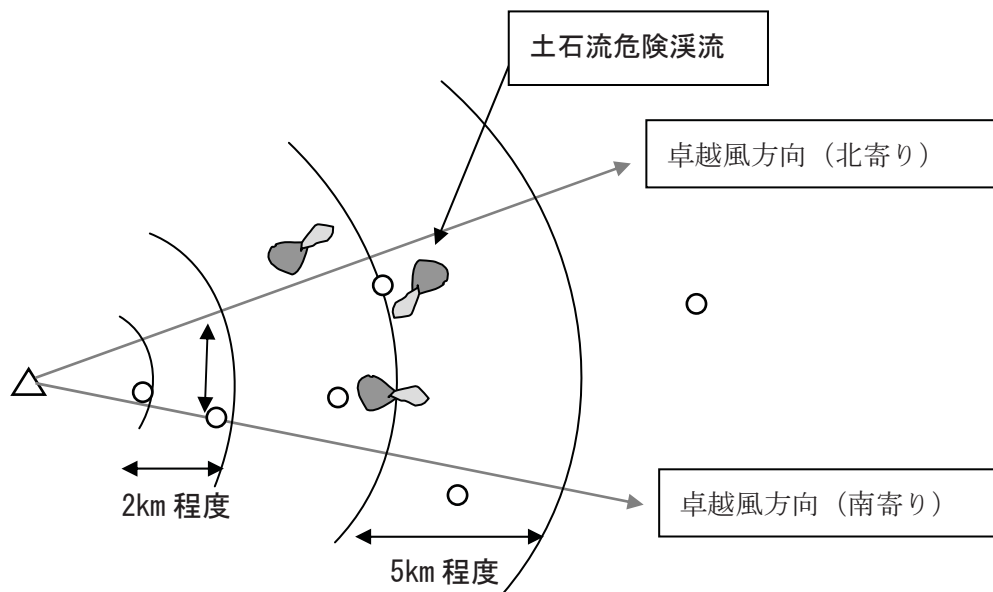


図 1.3.2 火山灰堆積厚観測地点の配置密度のイメージ

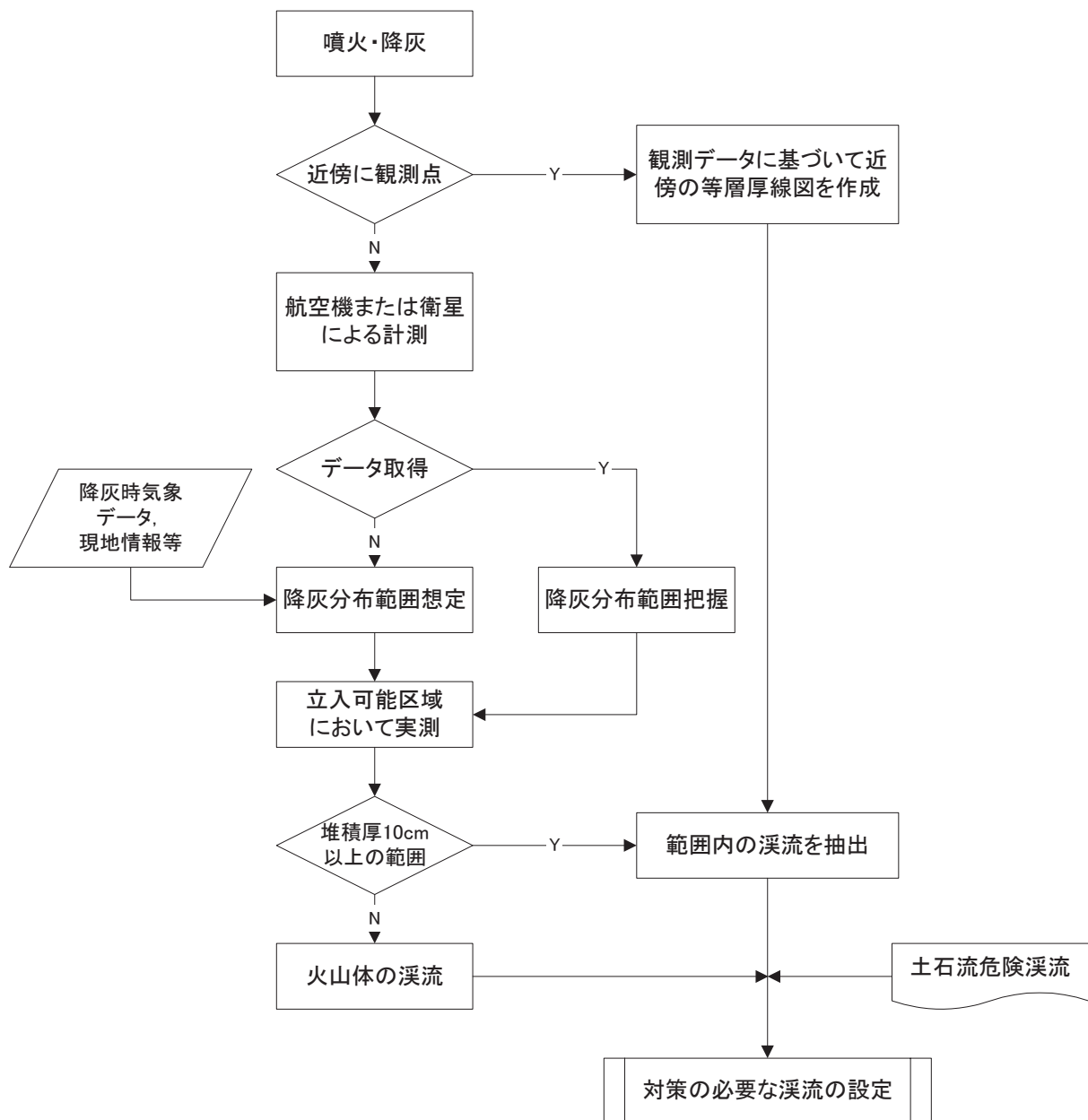


図1.3.3 噴火直後の火山灰堆積厚調査のながれ(案)

1.4 噴火直後の火山における火山灰堆積調査方法について（概要と結論）

ここまで、火山噴火後の降雨により二次的に発生する土石流の発生危険度を評価する上での火山灰堆積調査の必要性や、目的に照らした調査の要求仕様について議論した。

次章からは、共同研究分担者らが個別に検討した結果について詳しく述べる。大別して、リモートセンシング技術、現地計測技術、そして、無人機械について検討を行った。なお、検討結果に基づく、個々の技術に関する検討結果を、技術概要、精度、安全性への留意点等について簡潔に取りまとめた結果を次頁以降に個票として示す。

また、以下、全体的な結論を述べる。

2.1 節に総覧するリモートセンシング技術は、火山灰の面的な広がり把握する上で大変有効であることは今回の共同研究を実施するまでもなく言われていることである。しかし、火山灰堆積厚を 1cm 精度で計測しようとする、残念ながら、現状では、どの技術もそこまでの精度は期待できない。しかし、降灰分布の大小を定性的に判別することはある程度可能であると考えられる。また、航空レーザー計測については、降灰前後の計測データ間で位置合わせを十分に行うことができれば、数 cm 程度の精度を発揮することも可能であり、今回、そのための特殊な対空標識を提案した。

2.2 節に示す現地計測技術については、降下した火山灰の重量を連続的に計測する降灰量計が開発されるとともに、既存の超音波式水位計等の非接触型自動計測機器が火山灰堆積厚計測へ転用可能であることが示された。ただし、電波式と光波式は、状況によって計測できないことがあることも明らかになった。超音波式はもっとも安定した計測成績を示した。これらの計測器は、必要な 1cm 精度の計測も可能である。データ伝送手段さえ確保されていれば、リアルタイムで降灰量を把握することも不可能ではない。ただし、これらの計測器では、点データしか得られないことから、これのみによって面的な分布を求めることができない。そのため、巻末資料に示すような、少ない観測点のデータから降灰分布を大雑把に推定する手法と組み合わせて実施することが望ましい。

最後に、2.3 節には、無人機械の利活用について取りまとめた。無人機械は、センサー等を装備した機体が調査対象物に接近して調査を行えることから、2.1 節にまとめたリモートセンシング技術とは違って、より高精度なデータを得ることが可能である。また、移動可能であることから、ある箇所の地点データだけでなく、ある程度広い範囲の情報を得ることが可能である。ただし、1cm という計測精度は難しいこと、航続可能時間や無線の届く距離の限界から、その活用可能な範囲が限られており、面的に広域に調査を行うことが難しい。現状では、この手法単独で調査を行えるとは言い難い状況である。2.2 節で述べる現地計測結果を面的に補完するようなデータを得るような使い方があり得るかもしれない。

以上より、現状では、ここで紹介するどの技術も、火山噴火後の降雨により二次的に発生する土石流の発生危険度をただちに評価する上で必要な情報を単独で得ることは難しく、個々の技術で得られた情報を総合的に分析することによって、火山灰分布を推定することが必要である。

2 調査方法の詳細

本章では、火山灰堆積厚を測定する技術として研究を行った各技術を示す。
構成として、各技術の概要を記した個票を次頁から示し、2.1 以降に詳細を示す。

■ リモートセンシング技術

- ・ 衛星リモートセンシング (2.1.1 参照)
- ・ 航空写真 (2.1.2 参照)
- ・ ハイパースペクトル観測 (2.1.3 参照)
- ・ 航空レーザー計測 (2.1.4 参照)

■ 現地計測技術

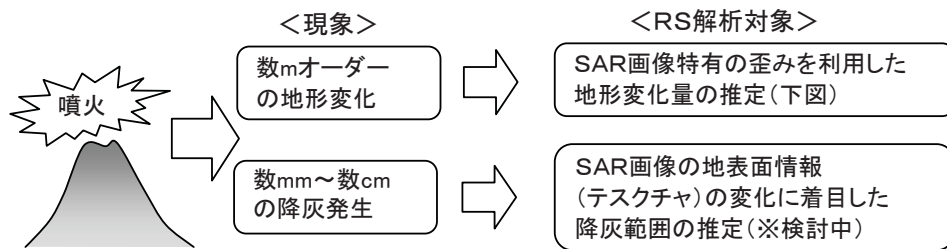
- ・ 手動計測技術 (2.2.1 参照)
- ・ 自動計測技術 (既往機器) (2.2.2 参照)
- ・ 自動計測技術 (専用機器) (2.2.3 参照)

■ 無人機械 (2.3 参照)

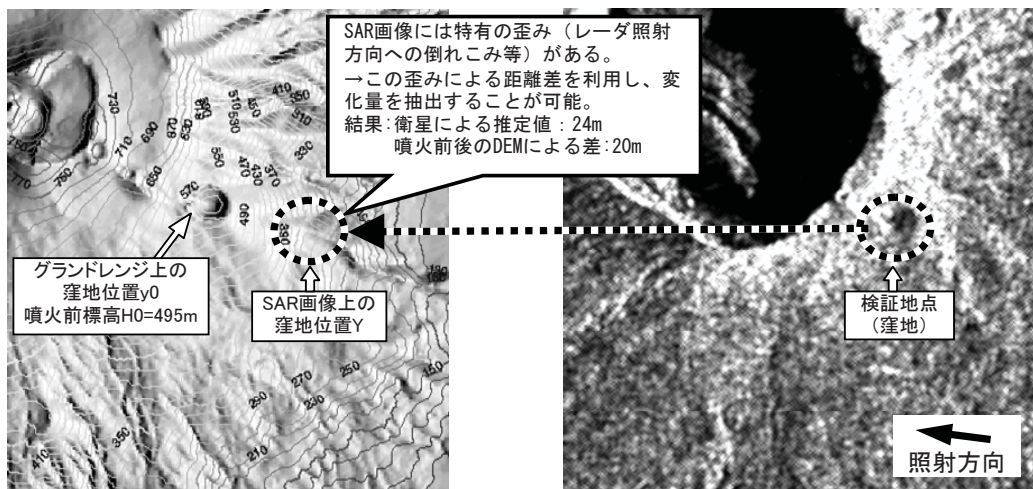
衛星リモートセンシング

～合成開口レーダ画像(衛星SAR)の火山監視への適用技術～

～雲や噴煙がある場合でも観測可能な、全天候型SARデータを用いた
噴火中火山モニタリングの適用技術～



＜図1：衛星SARの火山監視への適用イメージ＞



＜図2：衛星SARによる地形変化量の推定＞

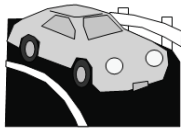
技術の概要

- ・ 雲や噴煙がある場合でも観測可能な全天候型SARデータによる大規模な地形変化量や降灰エリアの推定等を行う技術である。
- ・ 大規模な地形変化や火山灰堆積は、SAR画像特有の歪みを利用した逆推定（元々の地形から想定される歪み量から変化量の推定）を実施する。
- ・ 降灰範囲の推定は、地表面情報の変化（ピクセル輝度の変化）にて判読する。噴火前後の後方散乱強度画像の差分画像を作成し、変化箇所を抽出する。多くの場合、降灰によって地表面粗度が平滑化されるため、後方散乱強度は低下するのでそのような範囲を抽出する。

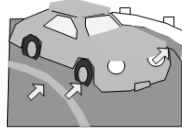
調査実施可能条件

- ・ 衛星によるデータ取得有無による。
- ・ SAR画像は、撮影時の気象条件によらずデータ取得可能（雲や噴煙がある場合でも観測可能）。
- ・ ただし、衛星レーダ照射方向や地形条件により観測が困難なエリアが存在する（計測精度欄に詳述）
- ・ 噴火前の同じオフナディア角からの観測画像があると比較が容易である。

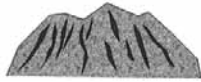
計測精度 (厚さ・面的広がり)	①SAR画像の明暗(後方散乱強度)は地形条件に大きく依存するめ、撮影範囲全体を面的に定量評価することは困難であり、代表点での評価となる。 ②全天候型のSAR画像においても、以下の解析が困難なエリアが存在する。 ・シャドウ、オーバーレイ発生箇所(地表面情報が取得できていない) ・衛星方向を向いた斜面(フォアショートニングの影響が大きく、情報がつぶれてしまう)
1回に調査できる範囲 または箇所数	・広範囲のデータ取得が可能。取得範囲は利用衛星による。 (例) ALOS衛星観測幅: 40～70km(高分解能モード) RADARSAT衛星観測幅: 50km(ファインビームモード) ・ただし、SAR画像の明暗(後方散乱強度)は地形条件に大きく依存するめ、撮影画像範囲全体を面的に定量評価することは困難である。
結果が得られるまでに要する時間	・ALOS標準処理データの場合、注文後3日程度で納品される。 ・災害直後等の画像1シーンであれば、データ入手後に、地形変化量および降灰範囲の推定を2日程度で実施可能である。
安全上の留意点	特になし
事前設置・準備の必要性	特になし(衛星データは定期的を取得されている)
実績	三宅島による解析を実施(手法の開発段階) 桜島における事例分析を実施(手法の適用可能性の検討)
その他	国産衛星(ALOS)のデータ提供開始により、低価格でデータ入手が可能となった(25,000円～)



降灰前



降灰後

降灰前
噴火降灰後
噴火

降灰前後の指標物の「見え方の変化」イメージ



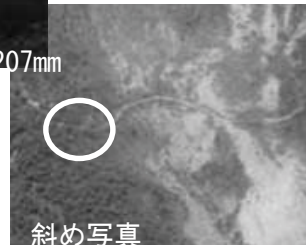
林道の「見た目」で 20～50cm 程度であろうことを推察した。(現地は 20cm)



車輛のタイヤが隠れている割合を、10cm 程度以上・未満の火山灰堆積厚さ判断目安とする



層厚 207mm



斜め写真

道路の「見た目」で 10cm 以上の層厚を認識する。

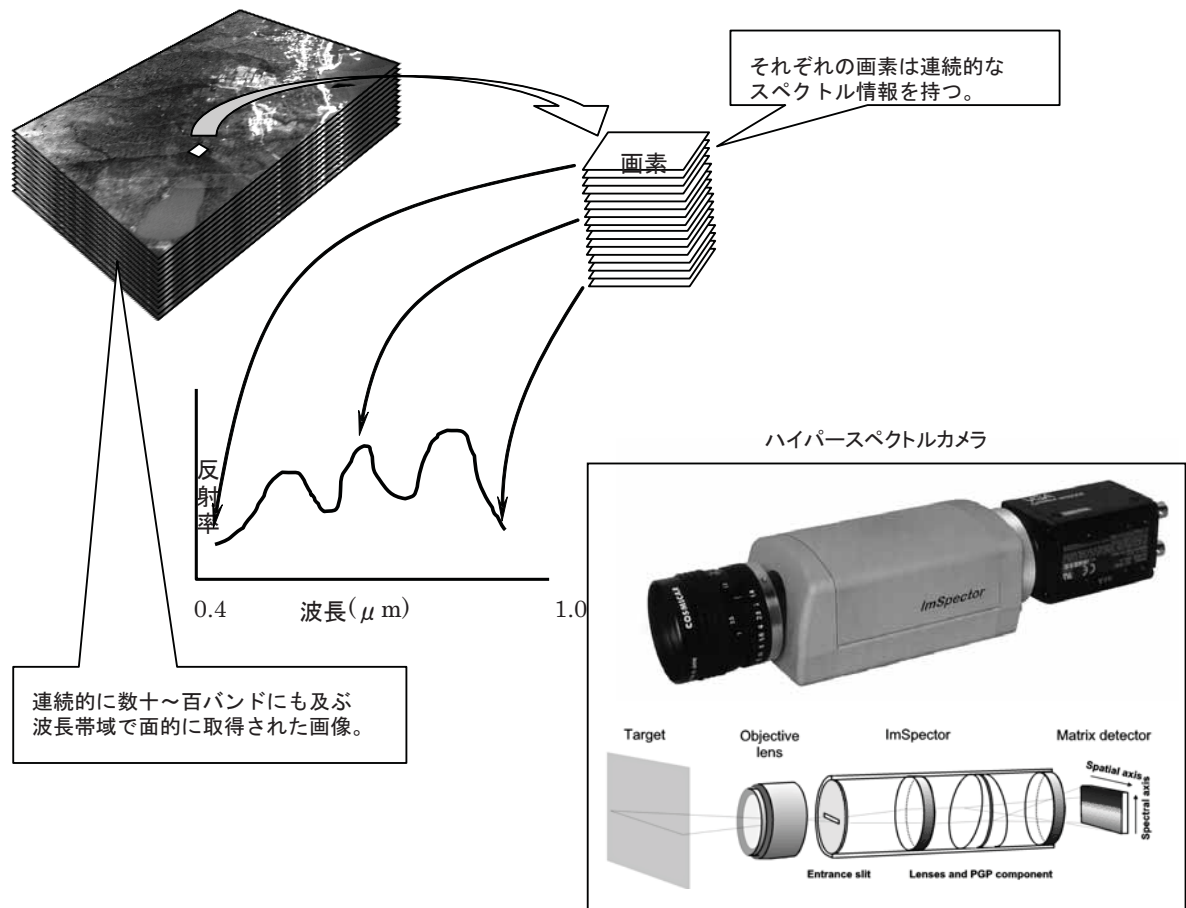
技術の概要

降灰による指標物の「見え方の変化」を利用した降灰状況把握技術。降灰後に撮影した航空写真の画像範囲内に、指標物あるいは目安となるものが含まれている場合、簡易に火山灰堆積厚を判読・推定できる。逆に、あらかじめ活火山地域の特定の場所に指標物あるいは目安となるもの（ランドマーク）を設置しておくことによって、緊急撮影の目標物とすることもできる。指標物としては、例えば植生・建物・車両・道路のセンターライン・ガードレール・歩道の段差・よう壁のブロック・道路標識などが考えられる。

調査実施可能条件

- ・カメラから対象となる地表面までの視程がとれること。
- ・航空機から写真を撮る場合には、航空機が飛行可能であること。
- ・監視カメラの場合は、噴火後も動作可能であること。

計測精度（厚さ・面的 広がり）	厚さ：指標物の大きさと認識・解像度による。 空中から撮影した写真、遠望カメラの画像などから判読すると、数十cm程度が 限界。ITV監視カメラの画像が得られる場合、数cm程度の堆積でも判読は可 能。
1回に調査できる範囲 または箇所数	・調査可能範囲は、ヘリコプターの運航可能範囲と指標物の分布状況に依存す る。 ・写真などの画像を使う場合には画角内、遠望目視であれば視野の範囲内で可 能。
結果が得られるまでに 必要な時間	航空機等から撮影された写真の入手までの時間に左右されるが、写真判読を始 めてから1時間以内には何地点かの火山灰堆積深が把握可能であり、12時間程 度で概略の堆積深分布が把握可能である。
安全上の留意点	・航空機の安全が確保されること。噴煙の状況（量、風向き）で有視界飛行やエ ンジン（吸気口より火山灰の侵入）に影響の恐れがあるので注意を要する。
事前設置・準備 の必要性	事前設置はなくても良いが、あらかじめ活火山地域の特定の場所に指標物ある いは目安となるもの（ランドマーク）を設置しておくことで定量的かつ効率的な結 果の取得が可能になり、目的達成確率も高まる。
実績	なし。 （ただし、通常のヘリコプター調査において機上から目視で判断する場合は、こ の手法によっているということもできる。）
その他	現時点での活用実績はないが、予め火山灰の堆積状況を把握しておくことによ り活用可能な有望な手法と考えられる



技術の概要：

ハイパースペクトルカメラは、調査対象物が反射した光をプリズムと回折格子によって、詳細に分光して記録することが可能なカメラである。10nm 程度の狭い波長帯域で観測した画像を波長的に連続したスペクトル・バンド画像、つまり面的な情報として記録できる。物質によっては、特徴的な吸収・反射スペクトルを示すものがある。火山灰の特徴的な吸収・反射スペクトルを抽出し比較することで、火山灰の分布状況図を作成することができる。

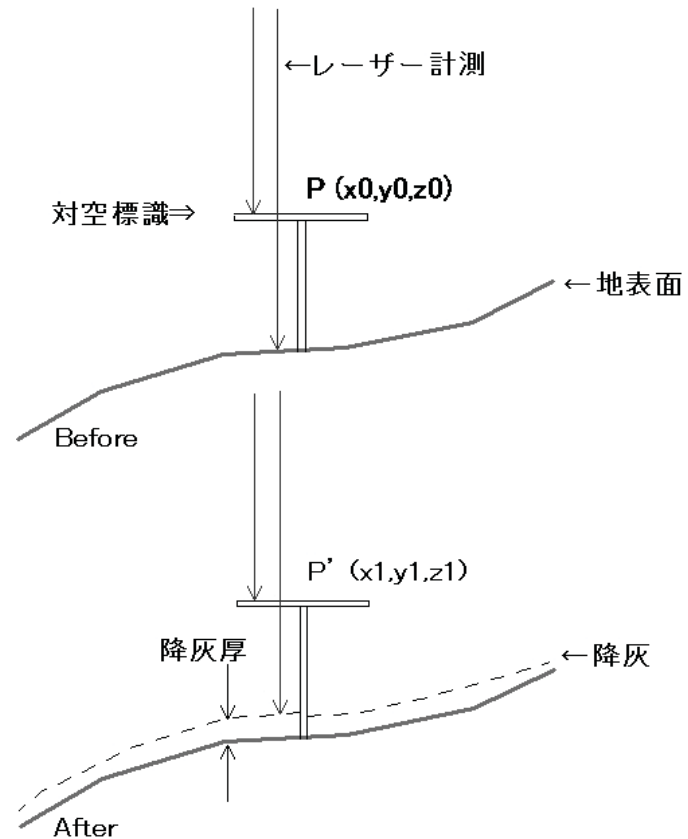
調査実施可能条件

航空機による空中計測（撮影方向：直下）が可能であること。

- ・晴天で十分な日射が必要。
- ・ラインセンサとして画像を取得するため、コース単位の撮影となる。
- ・面的な調査対象の場合は、複数コースの計測となる。
- ・航空レーザーと同時計測することで、正射投影画像を作成可能（地形による画像の歪を補正した高精度な位置情報を持つ画像へ補正）。

計測精度（厚さ・面的 広がり）	火山灰の堆積厚の違いを相対的に分類できる可能性は高いが、絶対的な値を推定することは現時点では困難である。 火山灰の面的な広がり の把握は可能である。
1 回に調査できる範囲 または箇所数	航空機の性能による(分散していなければ、50km ² /日)。
結果が得られるまでに 要する時間	以下の計測設定にて、1日で計測可能な50km ² について、DSM が既に存在すると仮定した場合、解析処理時間は5日程度である。 <データ計測設定条件> ・撮影対地高度:約1,000m ・画像地上解像度:2m ・1コースあたりの計測幅:約350m
安全上の留意点	・航空機の安全飛行が確保されること。 ・地上と機上のデータの整合確認のために現地作業を行う場合は、火山ガス、降下物などに対する安全性が確保されること。
事前設置・準備 の必要性	特になし。
実 績	火口内の温度の計測等、その他の火山活動への適用実績は多数。 たとえば、超多バンド航空機センサー(ARTS、防災科学技術研究所)等。
そ の 他	特になし。

座標 $P(x_0, y_0, z_0)$ を基準にして
変動後の座標 $P'(x_1, y_1, z_1)$ を
同一点として、直下の降灰状況
の比較を行い、降灰厚を把握する。



技術の概要

航空機に搭載したレーザー測距装置と GPS、IMU を統合したシステム（地表などの三次元データを記録する能力を備えたライダーセンサ）を用いて、地殻変動などを補正した上で降灰による変化を精度よく求めるために、標定点として利用する対空標識に使用可能な材質・形状を検討する目的で実験を行った。課題とされていた相対的不動点（標定点）となる対空標識として必要な機能を持たすためには、いくつかの項目に留意すれば可能となる結果を得た。また、ライダーセンサの反射強度を利用して火山灰の性状の違いが検出できないか、火山灰に見立てた試料を計測して検討を行った。その結果、特定の条件下で火山灰の含水比などを推算することが可能と考えられた。

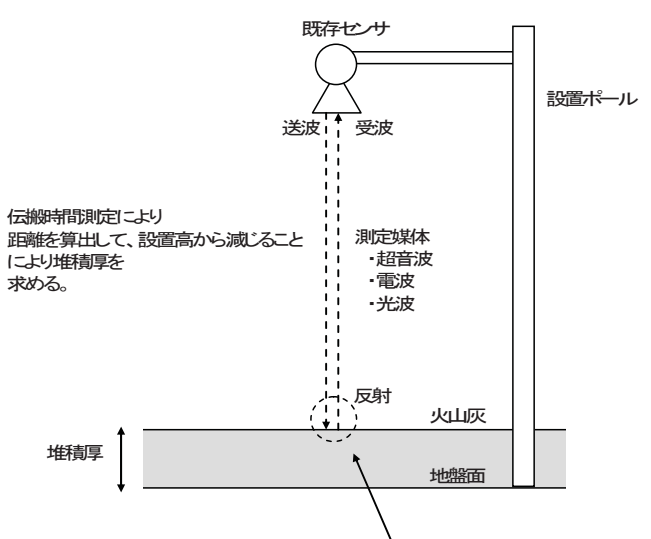
調査実施可能条件

- ・ 航空機による空中計測（直下、斜め）が可能であること。
- ・ 雨天、濃い水蒸気（噴煙含む）内では不可。
- ・ 強風時は正確に測定できない。
- ・ 有視界飛行が行える状態であること（日の出～日の入まで）。
- ・ 対空標識となるものがあること。
- ・ GPS が使用でき、PDOP（衛星配置の良否を示す指標）が小さいこと。

計測精度 (厚さ・面的広がり)	計測時の対地高度が 800m、計測頻度 100kHz (ALTM1033) の場合 *1 コースの計測幅 400m (可変可) *データの地上密度 0.5m (可変可) *レーザー周波数 1064nm ・1 時期の計測(厚さ)精度はcm単位だが、2 時期の相対的精度については格段に向上する。 ・面的な広がりがあるので、計測をオーバーラップさせることにより、計測精度を高める。
1 回に調査できる 範囲または箇所数	航空機(回転翼・固定翼)の性能によるが、対象が分散していなければ 50km ² /日程度。
結果が得られるまでに 要する時間	以下の計測設定にて、1 日で計測可能な 50km² について、解析処理時間は 7 日程度。 緊急時には体制を整え、24～48 時間で対応可能。 ＜データ計測設定条件＞ ・計測時の対地高度が 800m。 ・1 コースあたりの計測幅: 約 400m。
安全上の留意点	・アイセーフによる対地高度保持。 ・火山活動レベル(危険度ランク)による航空機の飛行規制あり。 ・噴煙の状況(量、風向き)で有視界飛行やエンジン(吸気口より火山灰が進入)に影響する可能性あり。 ・対空標識の設置時における作業員の火山ガスの吸入、降下物衝突など。
事前設置・準備 の必要性	・対空標識の設置(精度向上のため)。
実 績	なし(実験のみ)。
そ の 他	特になし。

5	手動計測技術 ～簡易降灰収集容器による火山灰の捕捉・人力回収～
	
技術の概要	本技術は、ポリバケツ、ドラム缶、バケツ、紙コップなどの簡易降灰収集容器を火山の周りに設置し、降灰に際して容器に貯まった降灰を後日、人力により回収し、その堆積降灰量から火山灰堆積厚を観測する方法である。 特徴としては、材料費用が安いこと、通常の巡視とは異なり降灰期間が分かること、降雨などで流されないことなどが挙げられる。 これを噴火の前兆時に降灰収集容器を緊急的に設置して、噴火後回収する観測方法が考えられる。なお、火山活動が活発な地域においては常に降灰収集容器が設置されて定期的に回収・観測が行われている場合もある。
調査実施可能条件	降灰収集容器の設置・撤去には観測者が火山の降灰域に立ち入る必要があるため、噴火による立入制限が発令される前に実施する必要がある。 回収は、噴火直後に行う方が観測精度が良くなるが、立入制限などにより困難な場合には噴火活動が終息した後の規制解除後に行わざるを得ない。

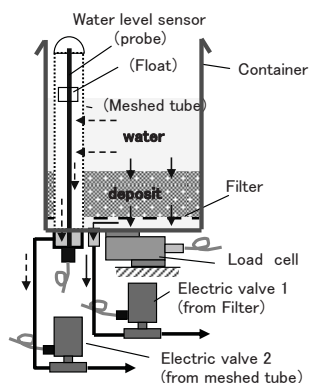
計測精度（厚さ・面的 広がり）	厚さ精度は、実際に降灰を回収するので数mm精度で測定可能であるが、噴火直後に立ち入れない場合は、複数の噴火分をまとめて回収・測定することになるため、噴火毎の厚さ把握は困難である。また、噴火から時間が経つほど風による飛散などで捕捉量に変化する可能性がある。 面的広がりには、設置箇所数に応じて広くなり、面的分布の精度が向上する。
1回に調査できる範囲 または箇所数	事前に設置した範囲・箇所数に応じた計測範囲となる。 ただし広範囲に多地点に設置を行うと精度良く観測可能だが、回収の労力が大きくなる。回収可能範囲は、噴火状況による立入制限や危険状況、降灰による車両走行可能状況などにより大きく左右される。 また、回収を複数のパーティーで同時に実施することにより迅速化を図ることができる。
安全上の留意点	噴火時、立入制限下、または災害の発生が予想される場合は実施できない。
事前設置・準備 の必要性	道路規制や立入制限等の情報収集、降灰収集容器の設置位置の選定、収集容器の確保、噴火前の設置、効率的な回収計画の策定などを行う必要性がある。
実 績	従来から行われている一般的な方法で、有珠山噴火に際しては、大学や関連機関が合同調査を組織し、紙コップや洗面器等の降灰収集容器を約50地点に設置し観測を行った事例がある。 また、桜島（鹿児島県）の様な常時噴火が繰り返している地域では、常時定点観測が行われている。 ＜実績例＞ （1）桜島 ①鹿児島県消防防災課 大きいポリバケツを鹿児島県内全域に59箇所、うち桜島島内14箇所設置し原則月末を採取日として、常時観測を行っている ②大隅河川国道事務所 火口から約2～4kmの距離の範囲に23箇所（詳細は後述）、ドラム缶を設置している。ドラム缶は直径約50cmで、下部1/2～2/3ほど地面に埋めてあり、回収しやすいように中にビニール袋が入れられている。設置高は30～50cmである。また、上部に目の粗い金網が設置してあり、噴石や巨礫が降下した際にその混入を防いでいる。 （2）有珠山（2000年噴火時） ・有珠山噴火火山灰合同調査班 2000年3月31日の噴火開始を受けて、有珠山噴火火山灰合同調査班（日本大学・国立環境研究所・道都大学・東京都立大学（現首都大学東京）・上越教育大学・北海道地質研究所）を組織し、4月1日～4月8日に現地において火山灰調査を行っている。その中で、降灰状況を長期的に観測するための降灰収集容器が、洞爺湖周囲から支笏湖周辺に至る約50地点に設置された。
そ の 他	・収集容器は長期間設置に耐えうる物を選定する ・収集容器は砂等の巻き上げが入らないようにある程度以上の地上高に設置する ・迅速に収集を行えるような工夫が必要

6	既存センサによる火山灰堆積厚計測 ～非接触型水位計の堆積厚測定への応用～
火山灰堆積厚の自動観測を実現するために、積雪深や水位を計測することを目的として開発・実用されている既存センサを応用することについて検討・検証を行った。  伝搬時間測定により 距離を算出して、設置高から減じること により堆積厚を 求める。 既存センサ 送波 受波 設置ポール 測定媒体 ・超音波 ・電波 ・光波 反射 火山灰 地盤面 堆積厚 火山灰でも十分な反射強度を得られるか、既存センサを利用するための検証課題となる。 (既存センサは反射強度が大きい水面や積雪面の測定を対象としており、火山灰を含む土砂面測定についての適用検討事例はこれまでなかった)	
技術の概要：	■目的 火山噴火中においても無人自動・リアルタイム・高精度で火山灰堆積厚を測定するために、既存センサ（積雪深・水位用）の応用を図った。 ■計測原理・特徴 センサから測定媒体（超音波・電波・光波など）を対象物に送波して、反射して受波するまでの時間を測定することにより対象物の高さを求めるものである。 特徴は、対象物に対して非接触で測定できることであり、適切な高さに設置していれば堆積厚の増加に伴ってセンサが埋没することはない。 従来は、積雪深や水位計測では非常に多く用いられており、屋外における長期使用時の精度安定性、耐久性については問題が少ない。 ■検討課題 火山灰堆積厚測定への応用にあたっては、火山灰表面のように微小な凹凸・空隙などが存していても十分な反射強度の取得が可能であることを検証する必要があった。
調査実施可能条件	・ 機器設置時は、比較的重量のある資機材（ポールなど）の搬入が可能な地点 ・ 商用電源、データ伝送手段を確保できる地点 ・ 溶岩流・土石流の流下、火山弾等の直撃を受けにくい地点

計測精度（厚さ・面的 広がり）	■降灰がない状況下で堆積厚を測定した場合 下表の通り、超音波式、光波式は±1～2cm程度である。電波式は堆積厚が薄い場合は精度が低下した。																																																																																				
	<table><tr><th rowspan="2">実際の火山灰堆積厚(cm)</th><th colspan="2">光波</th><th colspan="2">超音波</th><th colspan="2">電波</th></tr><tr><th>計測値(cm)</th><th>誤差(cm)</th><th>計測値(cm)</th><th>誤差(cm)</th><th>計測値(cm)</th><th>誤差(cm)</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td><td>0～1</td><td>0～-1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>2～3</td><td>0～+1</td><td>-1</td><td>-3</td></tr><tr><td>3</td><td>2</td><td>-1</td><td>2～3</td><td>0～-1</td><td>-6</td><td>-9</td></tr><tr><td>4</td><td>3</td><td>-1</td><td>4～5</td><td>0～+1</td><td>-3</td><td>-7</td></tr><tr><td>6</td><td>5</td><td>-1</td><td>5</td><td>-1</td><td>5</td><td>-1</td></tr><tr><td>8</td><td>7</td><td>-1</td><td>8～9</td><td>0～+1</td><td>8</td><td>0</td></tr><tr><td>10</td><td>8</td><td>-2</td><td>9</td><td>-1</td><td>10</td><td>0</td></tr><tr><td>15</td><td>13</td><td>-2</td><td>15</td><td>0</td><td>15</td><td>0</td></tr><tr><td>20</td><td>18</td><td>-2</td><td>21</td><td>1</td><td>20</td><td>0</td></tr></table>		実際の火山灰堆積厚(cm)	光波		超音波		電波		計測値(cm)	誤差(cm)	計測値(cm)	誤差(cm)	計測値(cm)	誤差(cm)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0～1	0～-1	-1	-2	2	1	-1	2～3	0～+1	-1	-3	3	2	-1	2～3	0～-1	-6	-9	4	3	-1	4～5	0～+1	-3	-7	6	5	-1	5	-1	5	-1	8	7	-1	8～9	0～+1	8	0	10	8	-2	9	-1	10	0	15	13	-2	15	0	15	0	20	18	-2	21	1	20	0
	実際の火山灰堆積厚(cm)	光波		超音波		電波																																																																															
		計測値(cm)	誤差(cm)	計測値(cm)	誤差(cm)	計測値(cm)	誤差(cm)																																																																														
	0	0	0	0	0	0	0																																																																														
	1	0	-1	0～1	0～-1	-1	-2																																																																														
	2	1	-1	2～3	0～+1	-1	-3																																																																														
	3	2	-1	2～3	0～-1	-6	-9																																																																														
	4	3	-1	4～5	0～+1	-3	-7																																																																														
	6	5	-1	5	-1	5	-1																																																																														
8	7	-1	8～9	0～+1	8	0																																																																															
10	8	-2	9	-1	10	0																																																																															
15	13	-2	15	0	15	0																																																																															
20	18	-2	21	1	20	0																																																																															
■降灰がある状況下で堆積厚を測定した場合 超音波式、電波式は降灰による測定の影響は見られなかった。 光波式は、数mオーダーの誤差が発生した。																																																																																					
1回に調査できる範囲 または箇所数	一点での計測となるため、火山からの距離、風特性、地形などを考慮して各区域における代表的な堆積厚を示す点を選定する必要がある。そして、これを多点的に配置していくことにより広範囲な面的把握を行うことができる。																																																																																				
安全上の留意点	・設置時には重量のある資機材が必要なため、運搬時には十分注意する必要がある。 ・測定運用時は、無人自動計測でかつ遠隔でデータ確認が可能なため、人的安全を確保できる。																																																																																				
事前設置・準備 の必要性	・当該区域における代表地点の選定 ・商用電源の確保 ・設置・測定スペース（5㎡以上）を確保 ・資機材搬入の可否 ・メンテナンス時のアクセス性																																																																																				
実 績	火山灰堆積厚計測における実績： 北海道開発局管内の鹿部町で赤外線レーザ方式センサを用いた計測事例がある。これは道路の門柱型表示板の柱部分に取り付け計測範囲1～2m程度の区間を設定し計測している。 																																																																																				
そ の 他	・積雪がない地域においては、既存センサを利用して火山灰堆積厚を測定することが可能であることが分かった。 ・積雪がある地域においては、既存センサに加えて気温計・現在天気計を組み合わせ使用することにより、堆積中における火山灰と雪の分離を行う手法を用いることにより実用化できる可能性がある。																																																																																				

自動計測技術（専用機器）

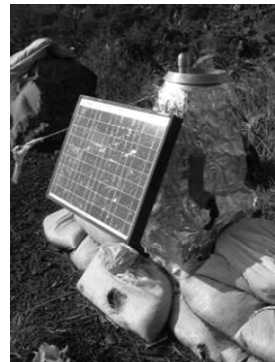
～自動降灰量計による堆積厚自動計測技術～



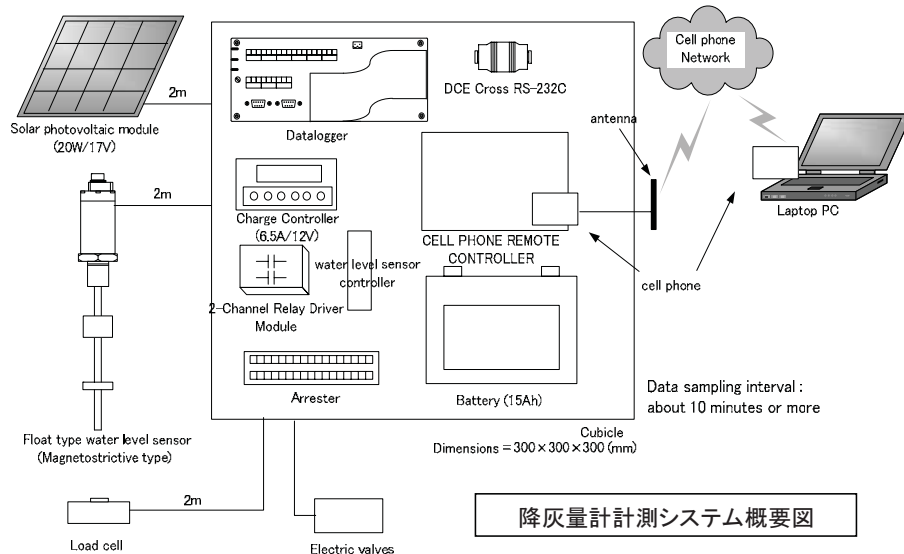
降灰量計構造概要図



設置状況（有村地点）



設置状況（昭和溶岩地点）



降灰量計計測システム概要図

技術の概要

【開発目的】

泥流の生産源となる火山灰の堆積状態（量および質）を把握することは、災害発生の危険度を評価するうえで重要な情報であるが、噴火中および噴火直後に人間が堆積物に接近して状態を調査することは危険性が大きく難しい。そこで、本技術は、人間が危険にさらされることなく火山灰堆積量を計測できること、ならびにポイントデータとして火山灰堆積の量的把握精度の向上を目的として開発したものである。当初に開発した装置はドラム缶タイプは設置の作業性に難があるため、ここでは雨量計タイプの簡易型を開発した。

【計測原理および特徴】

火山灰と雨水の合計重量をステンレス製容器（φ200mm、H300mm）の下部に設けたロードセルにより、同時に合計の体積を容器内に設けた水位計により計測する。計測値から、火山灰粒子の密度と水の密度に基づいて灰と水の各々の重量を分離計算して求める。更に、観測地点周辺に堆積した灰の単位体積重量の値を用いて、灰の重量を灰の厚さに換算できる。

当装置の特徴は、排水機構を備えており、容器底から排水を行い、計測した水位と時間の関係から堆積した灰層の透水係数の測定が可能であること、また上水排水を行うことにより雨水のオーバーフローを回避できるため、降雨量計の役割をもつことである。

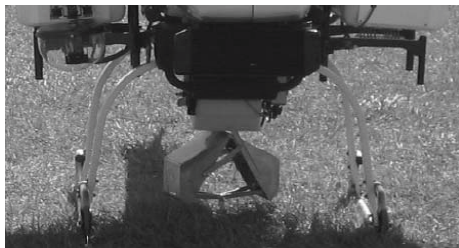
調査実施可能条件

- ・計測の分解能は、±1mm 程度である（桜島での試験設置結果による）
- ・設置地点のジャストポイント計測である。
- ・計測頻度は任意に設定可能（分・秒単位）で、データ記録容量は約 1 年間分である。（10 分間隔計測の場合）

計測精度（厚さ・面的広がり）や計測頻度	・計測の分解能は、±1cm程度である（桜島での試験設置結果による） ・設置地点のジャストポイント計測である。 ・計測頻度は任意に設定可能（分・秒単位）で、データ記録容量は約2年間分である。（10分間隔計測の場合）
1回に調査できる範囲または箇所数	・無人計測によるリアルタイムのデータ伝送が可能であるため、機器を設置した箇所分のデータを1回で把握できる。 ・設置箇所数に制限は無い。
安全上の留意点	・設置に関して、一般的な安全管理（ヘルメット着用等）が必要である。 ・自動計測でき、遠隔地から計測データの回収が可能であることから、火山噴火時の人的被災の可能性は極めて少ない。
事前設置・準備の必要性	・降灰量計製作（約1ヶ月程度）と現地設置作業（1～2日程度）が必要である。 ・現地設置作業項目は以下のとおりである。 ベースプレート設置→太陽電池パネル設置→降灰量計設置→システム調整
実績	【設置・計測実績】 ・桜島の野尻川および黒神川沿いに各1器（ドラム缶式）設置し、現在も継続計測中である。 ・桜島の有村川および昭和溶岩地点に各1器（自動降灰・降雨量計）追加設置し、現在も継続計測中である。 【発表実績】 ・山越ら（2005）：噴火中の火山における火山灰堆積厚調査手法について、平成17年度（社）砂防学会研究発表会概要集, pp.364-365. ・柳町ら（2006）：噴火中の火山における火山灰調査法について（その2）、平成18年度（社）砂防学会研究発表会概要集, pp.464-465. ・Tajima et al. (2008) : Development of an automatic weight measurement system for volcanic ash, IAVCEI General Assembly.
その他	・中小噴火による微小降灰に対応した高精度化を検討、開発中である。 ・リアルタイム火山灰監視システム（自動・降灰降雨量計データ等から即時に降灰量の面的分布を推定するシステム）を開発中である。



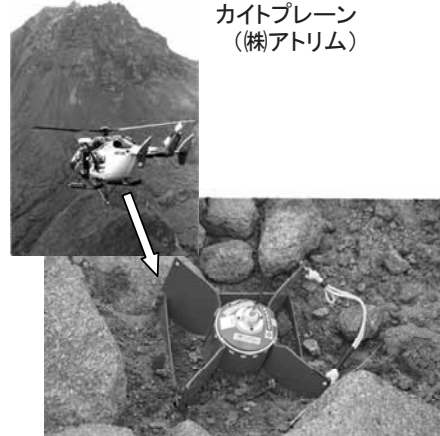
北海道開発局が保有して多くの運用実績を持つ自律航行可能なヘリシステム



北海道開発局が開発した試料採取装置搭載の自律航行型無人ヘリ



カイトプレーン
(株)アトリム



九州大学などが雲仙普賢岳へ投下したペネトレータ

技術の概要：

無人機械の技術を転用することによって、人が立ち入ることが出来ない区域での容器回収や試料採取、画像取得、継続観測などを行う。また、搭載機器として静止画像を取得するカメラのほか、動画映像を取得するビデオ、赤外線カメラ、レーザー計測器、試料採取器、装置投下機能などの選択は可能であり、これらを複数同時に搭載したり、他の機能をもたせたりすることが可能である。危険区域内に人が入らないので、2次災害の回避も含め噴火災害軽減に大きく貢献する。

調査実施可能条件

- ・ 拠点からの距離や視界角度による制約がある場合が多いが、例えば自律航行型無人航空機にはルートのセットをしておくことによって、オペレーターの視界から外れても調査計測が継続できる技術が既に存在する。
- ・ 風速、気象条件によっては飛行及び観測作業が制限される場合がある。

計測精度（厚さ・面的 広がり）	・自律航行型無人航空機の場合は、機体に搭載したGPS センサーが基地局のGPS センサーからの補正信号を受け取ることで、位置の誤差は20cm 以内を確保している。3次元計測を行う際に搭載するレーザ測量機における高さ方向の精度は、最新の機種では10cmの火山灰堆積厚把握が可能なレベルを満たしている。（ただし、搭載する航空機のペイロード重量や架台形状などに拠る場合がある） ・無人航空機から投下した試料測定装置（ペネトレータ）では、2004年の浅間山活動の際に観測プローブ（GPS）によって1cmの山体変形を検出している。実際は、観測精度や機能は搭載するセンサーの精度・種類に依存する。
1回に調査できる範囲 または箇所数	・自律航行型無人航空機：飛行距離の限界は、最新型では半径5km程度まで可能。高さ方向は機体によって制限が異なり、海拔1000mまでのものと2000m程度まで可能なものがある。 ・ペネトレータ：地震計や温度計、GPS、データ送信装置などの搭載実績のあるセンサのほかに、別途示される非接触型計測機器を搭載するなどの改良が必要である。 ・カイトプレーン：燃料の搭載量や充電量などにより異なるが、30分から3時間程度の飛行に限定される。
結果が得られるまでに 必要な時間	・自律航行型ヘリ・・・リアルタイムで映像が得られるものと、作業終了後にその場でデータを吸い上げて確認できるものがある。 ・カイトプレーン・・・作業終了後にその場でデータを吸い上げて確認する。 ・ペネトレータ・・・投下・観測を行った後、現地で回収して持ち帰ってデータを吸い上げて確認するものと、無線通信によりリアルタイムでデータを得られるタイプがある。
安全上の留意点	無人化機械の利点は、遠隔操作によって人間が直接立ち入ることができない場所まで進入し、作業することが可能なことであり、安全性が高い。 自律航行型無人航空機の場合も、搭乗者の危険がなく安全性が高い。基本的にはopen areaでの操縦・使用に制限されているが、通信が途絶した場合でも、GPS で測位しながら自動的に帰還する機能がある。機種によっては、予め設定したウェイポイントによる自律飛行のほかに、地上局における画像モニターを見ながらの臨機応変なマニュアル航行への切り替えも可能である。ペネトレータ投下の際の無人航空機航行・投下も同様である。
事前設置・準備 の必要性	普段からのメンテナンスがあれば準備時間を必要としないことや、可搬性に優れること、光ファイバー通信などの地上局が整備されていればオペレーターが現場に赴く必要がない。 カイトプレーンは、従来の滑走路を使った離陸に加え、操縦者の手から直接離陸することが可能で、建物の屋上や駐車場など、特別な設備のない場所での離着陸が可能である。
実 績	自律航行型無人航空機は、2000年の有珠山噴火観察、2001年の三宅島泥流観測を目的とした事例がある。現在ではさらに機能・性能が向上されつつあり、広い分野での用途が検討されている。北海道開発局事業振興部防災・技術センターでは、自律航行型ヘリに降灰サンプルを収集する機能の搭載を検討して、有珠山2000年噴火時に実証している。 ペネトレータの投下では、1995年10月の雲仙普賢岳活動中に、九州大学や宇宙科学研究所などのグループが約2.5km離れた場所で投下時の衝撃力データなどの観測データ受信に成功している。2004年の浅間山活動の際には、名古屋大学が5ヶ月間1時間ごとに受信局へデータを送り、1cmの山体変形を検出した実績がある。
そ の 他	特になし

2.1 リモートセンシング技術

2.1.1 衛星リモートセンシング

(1) 内容

① 概要

a) 研究目的

実務利用の視点から、合成開口レーダ画像（SAR データ）の噴火中火山への適用性を整理・検討する。

b) 研究概要

噴火直後の情報収集の場面では、衛星画像によるデータ取得に関するニーズが高い。そのため、全天候型 SAR データを用い、降灰エリアの推定等の実務利用可能性を検討する。

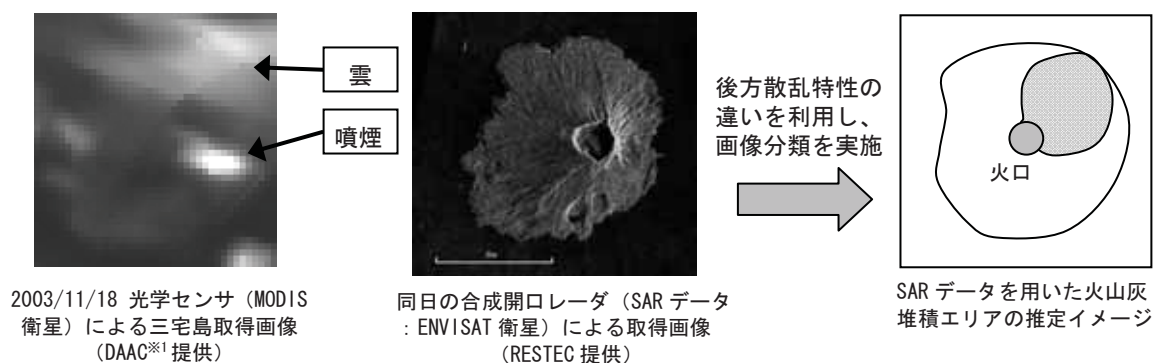


図 2.1.1.1 悪天候時における SAR データを用いた火山灰堆積範囲推定のイメージ

※1 DAAC : Goddard Earth Sciences(GES) Distributed Archive Center

② 基礎検討結果

a) SAR 画像解析の将来計画および既存文献整理

悪天候時でもデータ取得できる SAR データの適用可能性を明らかにすることを目的とし、既存文献の整理を実施し適応事例や問題点を抽出した。

(ア) SAR 衛星打ち上げの現況について

国内の衛星として、2006 年 1 月に JERS-1 / SAR (L バンド合成開口レーダ) の後継機にあたる ALOS / PALSAR (フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ) が打ち上げられ、データ取得・販売を開始している。また、海外の動向として、2007 年 6 月にドイツの Terra SAR-X、2007 年 12 月にカナダの RADARSAT-2 が打ち上げられており、今後のデータ蓄積状況等を確認して解析等に用いることとなる。

(イ) SAR データの論文検索結果

SAR 画像解析の既存文献のレビューとして、以下の論文検索を実施した。

- ・ 対象論文 : 1990 年 (JERS-1 打ち上げ前後) 以降の写真測量学会、RS 学会、砂防学会、土木学会の発表論文、および各論文の参考文献 (孫引き)
- ・ キーワード : SAR、干渉 SAR、能動型レーダ、火山 等
- ・ 検索総数 : 56 件

なお、本研究は実務利用を念頭におくため、後方散乱強度を可視化した SAR 強度画像の解析事例を中心に整理した。

- ・ 今回収集した論文には、火山灰の降灰範囲の推定事例はなかった
- ・ 降灰範囲推定の参考となる研究事例として、地すべり・土石流の抽出事例（7 件）や土地被覆分類の推定事例（10 件）があった。

検索結果の一覧は項末の参考資料に示す。

b) SAR 画像の防災分野への適用性の整理

火山噴火時の実務利用を想定し、SAR データを用いた降灰分布の把握に向けての画像処理方法を、以下の考えのもと検討した。

＜SAR データを火山砂防防災業務で利用するにあたっての認識＞

- ① 火山砂防の防災実務上、求められる縮尺精度は 1/20 万～1/5 万程度である
→実務上どこまで精密な画像前処理（幾何補正等）が必要であるか、検討する
- ② 被害早期把握の防災業務フェーズに応えるため、画像処理はできるだけ簡素化する
→位相情報の利用は、衛星撮影条件や多大な処理時間など制約を受けるため、基本的に後方散乱係数情報（SAR 強度画像）を用いた解析手法の確立を目指す

（ア）SAR 画像の前処理について

SAR 画像の特徴は、ビーム照射方向（レンジ方向）の画素配置は衛星から地表面への距離順で配列される。標高が高いほど衛星と地表の距離は短くなるため、可視化した画像は標高の高い部分が照射側により倒れ込むように観測される。

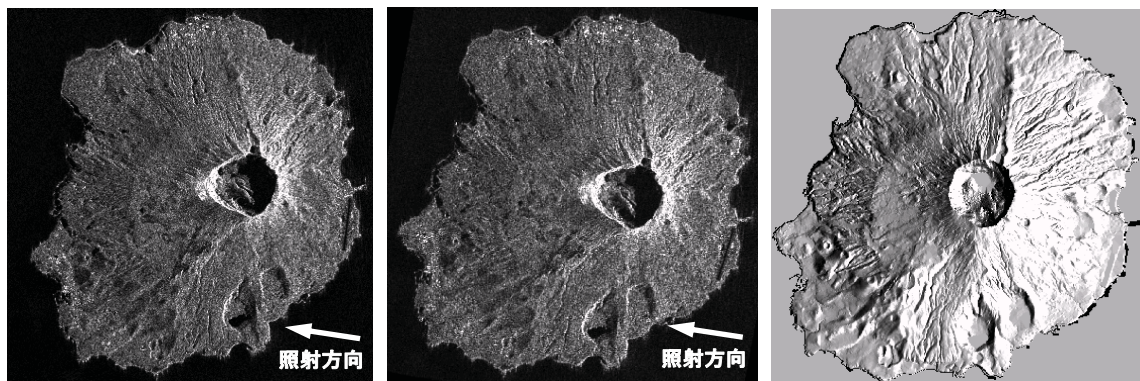


図 2.1.1.2 画像の歪み補正例（RESTEC 提供）

左 : 2000.11.4 に三宅島を観測した RADARSAT SAR 強度画像

中央 : 三宅島の外郭平地部を参照して位置合わせした SAR 強度画像

右 : DEM から作成した歪みのない SAR シミュレート画像

衛星方向への倒れ込み等の補正処理は、DEM を利用して行う（Slant to Ground）。しかし、大規模な火山灰堆積や火口部の形状変化が発生した場合、補正には被災後の DEM が必要となるため、被害の早期把握段階における倒れこみ補正処理の実施は困難であるといえる。

よって実務利用の観点から、SAR 画像の幾何補正は平野部（特に SAR 特有の歪みの少ない低地部分）を基準点として、地形図や SAR シミュレート画像（撮影時の衛星方位角・高度角情報を用いた陰影図とほぼ同等）を参考に簡易補正を実施し、倒れ込み等の SAR 特有の補正は実施しないままでの SAR 画像の利用方法を検討する必要があるといえる。

（イ）降灰による地表面様相の変化抽出について

SAR で取得した画像は、電波の跳ね返りを捉えているため、光学観測と比較して地形や人工建造物の地表面を直感的に示さない場合がある。火山灰堆積後の地表面テクスチャの変化は、直感的には荒地に似ることが想定される。よって、テクスチャの変化の仕方や、火山灰堆積厚との関連性を検討することにより、火山灰堆積エリアを推定できる可能性があるといえる。

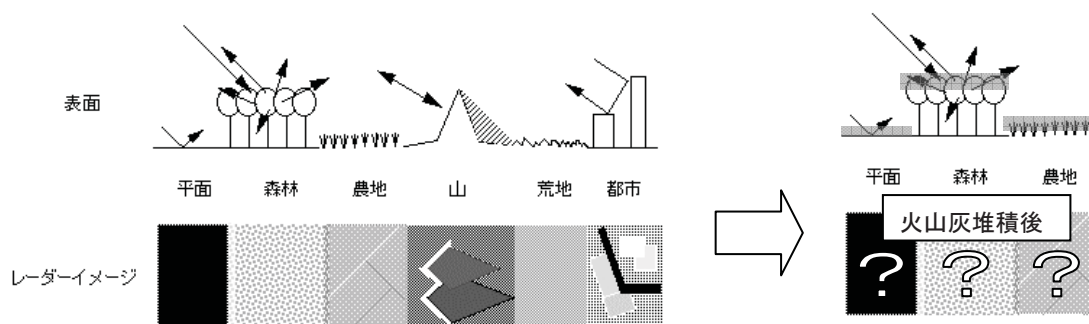


図 2.1.1.3 SAR で観測される地表面情報イメージ

（出典：NASA/JPL's Imaging Radar Program <http://southport.jpl.nasa.gov/> に加筆）

（ウ）（参考）インターフェロメトリ技術の適用について

2 時期の SAR 位相情報を利用したインターフェロメトリ（干渉 SAR）技術は、主に地殻変動や地盤沈下のモニタリングにおいて、広く認知されてきている。しかし、火山灰堆積把握を目的とした場合、以下の理由により適応が困難であることが予想される。

- ・ 降灰前後の変動が地殻変動や地盤沈下に比べて大きく、フリンジ（位相差の 1 回転分）の密度が高くなり画像の相関性が低下する（干渉しにくくなる）
- ・ 山頂ほど傾斜が急となるため、フリンジの密度に加えフォアショートニングやオーバーレイの影響が発生し、画像の相関性が低下する
- ・ 降灰前後で地表面の様相が異なるため、画像の相関性が低下する
- ・ 位相情報の利用は、衛星撮影条件や多大な処理時間など制約を受けるため、被害早期把握を目的とした利用は困難である

※上記により、干渉 SAR を用いた解析は、実務利用の観点から本研究の対象外としている。

c) 画像解析の基礎検討

c)-1 火山灰堆積による表面様相（見え方）の変化の基礎検討

SAR 画像の地表面情報の取得状況（見え方）についてとりまとめた。

（ア）標高および斜面による見え方（画像の明暗）の変化

SAR 画像と 1/2,5000 地形図の比較を図 2.1.1.4 に示す。三宅島全体における SAR 画像の後方散乱強度の傾向は、三宅島東側斜面（衛星方向を向いた斜面）は標高の高まりとともにフォアショートニングが生じ、後方散乱が大きくなり明るくなっている。一方、西側斜面（衛星方向と逆向きの斜面）はセンサ入射角が小さいため、後方散乱が小さくなり暗くなっている。

以上より、標高および傾斜角、斜面方向により後方散乱の違いが現れることが確認できた。

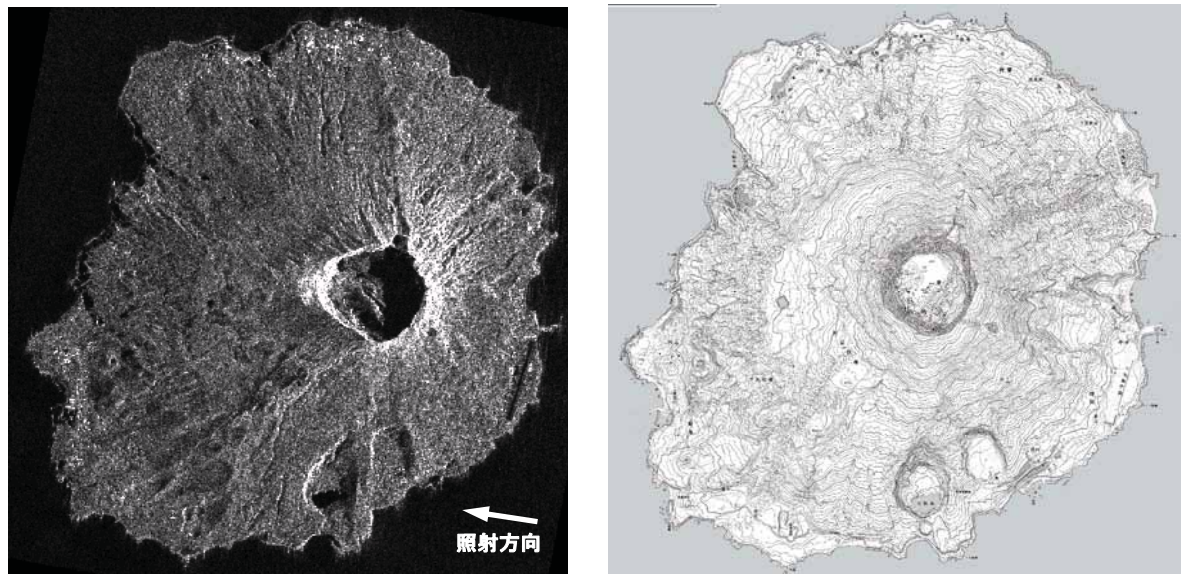
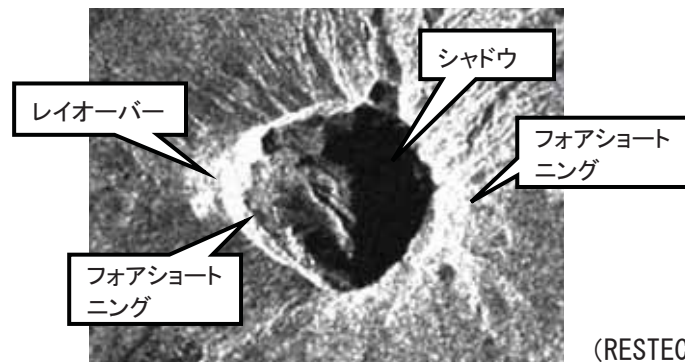
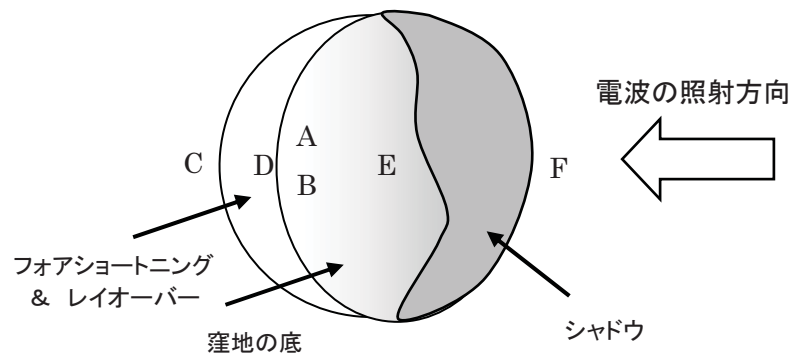
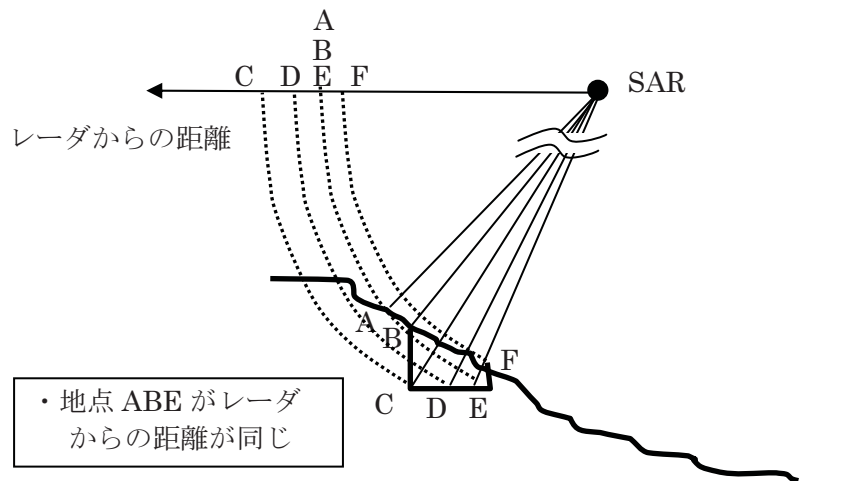


図 2.1.1.4 SAR 画像（2000. 11. 4 撮影 RADARSAT 画像、RESTEC 提供）と
1/25,000 地形図（噴火後修正版：国土地理院作成）との比較

（イ）火口、窪地、ガリー等の見え方

火口及び窪地、ガリーなどの起伏の激しい地形は、SAR 画像特有の歪み（シャドウ、フォアショートニング、オーバーレイ）の影響を受けやすい（図 2.1.1.5）。特にオーバーレイやシャドウ部分は地表面情報を取得できていないため、注意が必要である。



(RESTEC 提供)

- ・ 影（シャドウ） : 電波の反射がない E から F 地域
- ・ フォアショートニング : 窪地の内部のうち、D～C～B 地域は B 地域よりもレーダから遠いため、B 地域が D 地域の位置に倒れて見える
- ・ レイオーバー : D～B 地域は D～A 地域の画像と重なって見える

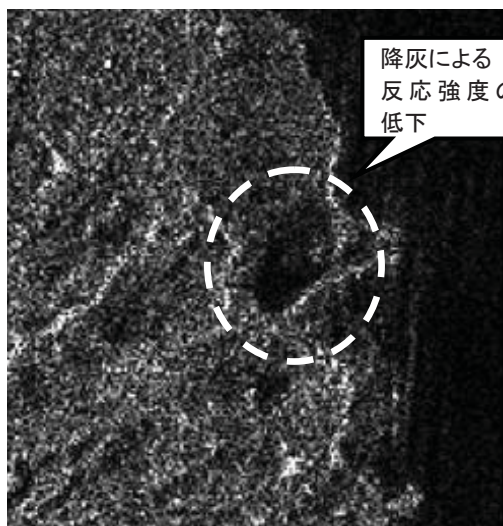
以上より、SAR 画像では窪地全体ではなく、一部分のみ見えることになる。

図 2.1.1.5 窪地の見え方

(ウ) 森林域および降灰による見え方の変化

前述より、フォアショートニング等の影響の少ない平地部分を対象に、森林域と降灰エリアで後方散乱強度の変化がある特徴的な部分を抽出した。

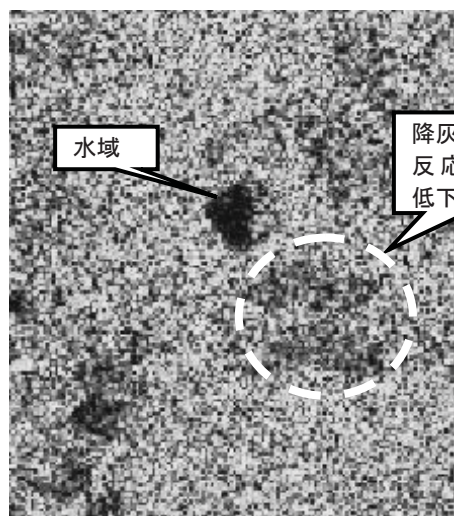
いずれにおいても、降灰により表面が滑らかとなり、後方散乱が低下する（暗くなる）ことが確認できた。



RADARSAT SAR 画像
(2000.11.4、RESTEC 提供)



空中写真
(2000.11.8 国土地理院撮影)



RADARSAT SAR 画像
(2000.11.4、RESTEC 提供)



空中写真
(2000.11.8 国土地理院撮影)

図 2.1.1.6 森林域における降灰の影響例

(エ) その他土地利用による違い

その他、土地利用による後方散乱の違いを図 2.1.1.7 に示す。結果は以下のとおりであり、図 2.1.1.3 に示す一般的な SAR で観測される地表面情報イメージと一致している。

- ・ 森林域は後方散乱強度が大きく、明るく見える
- ・ 人口構造物のうち、空港滑走路等の平地部分は暗く見える。
一方、空港周辺の建物は一部明るく見える（建物の大きさや向きにより異なる）
- ・ 分解能は 6.25m であるが、道路は判読できない

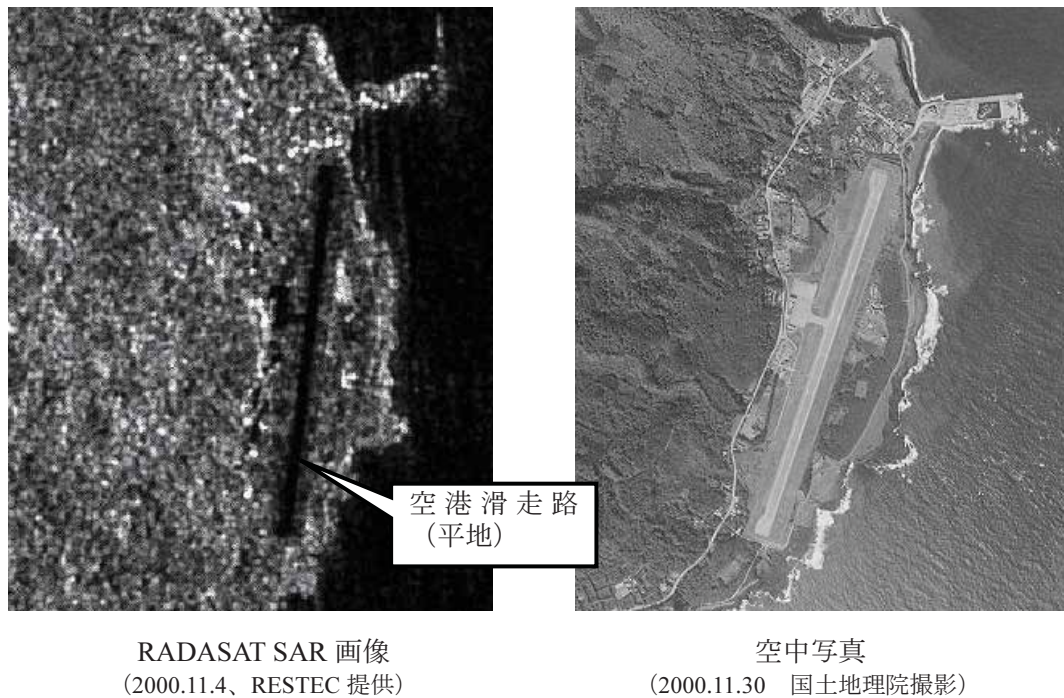


図 2.1.1.7 土地利用状況の取得

c)-2 SAR 画像特有の歪みを利用した火山灰堆積厚の逆推定（案）

SAR 画像特有の歪みを除去した幾何補正は地形変化後の DEM が必要なため、早期の被害概要把握への利用は適さない。そのため、地形変化後の DEM 入手前を想定し、SAR 特有の歪みを除去不可な段階における SAR 画像の利用について検討した。

SAR 特有の歪みとは、SAR 画像のビーム照射方向（レンジ方向）の画素配置が、衛星から地表面への距離順（スラントレンジ）で配列されていることにある。これと実距離平面（グランドレンジ）の関係は、以下のとおり。

グランドレンジ $y=y_0$ の位置に高さ H の点散乱体があると、この散乱体のスラントレンジ上での画像位置は、

$$R = R_H \approx R_0 - H \cos \theta_i$$

となる。

ここで、 R_0 は散乱体の平面位置 $y=y_0$ とアンテナとのスラントレンジ距離 R_H は高さ H の散乱体とアンテナとの距離である。

スラントレンジの距離変数 R を画像座標でのグランドレンジの距離変数 Y に変換すると、

$$R = Y \sin \theta_i$$

となり、 $Y_0=y_0$ として、以下の関係式が導かれる。

$$Y = Y_0 - H \cot \theta_i$$

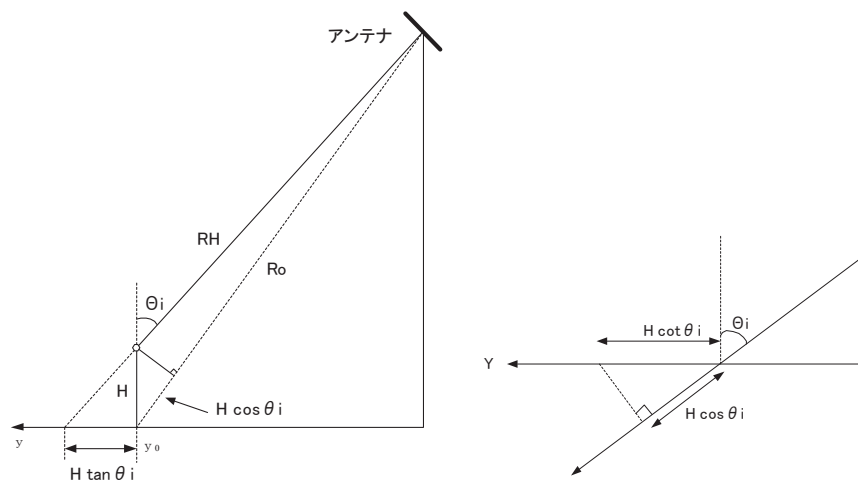


図 2.1.1.8 レンジ方向のジオメトリ（左）および
スラントレンジから画像面グランドレンジへの変換（右）

上記より、SAR 画像からスラントレンジの距離を算出し、さらに地形図等より散乱体のグランドレンジ（位置）が既知となれば、噴火後の散乱体の高さ H を逆推定できる可能性があるといえる。

SAR 画像特有の歪みを利用した、スラントレンジ（レーダー距離軸）とグラントレンジ（実平面距離軸）の比較による火山灰堆積厚の逆推定例を、図 2.1.1.9 に示す。

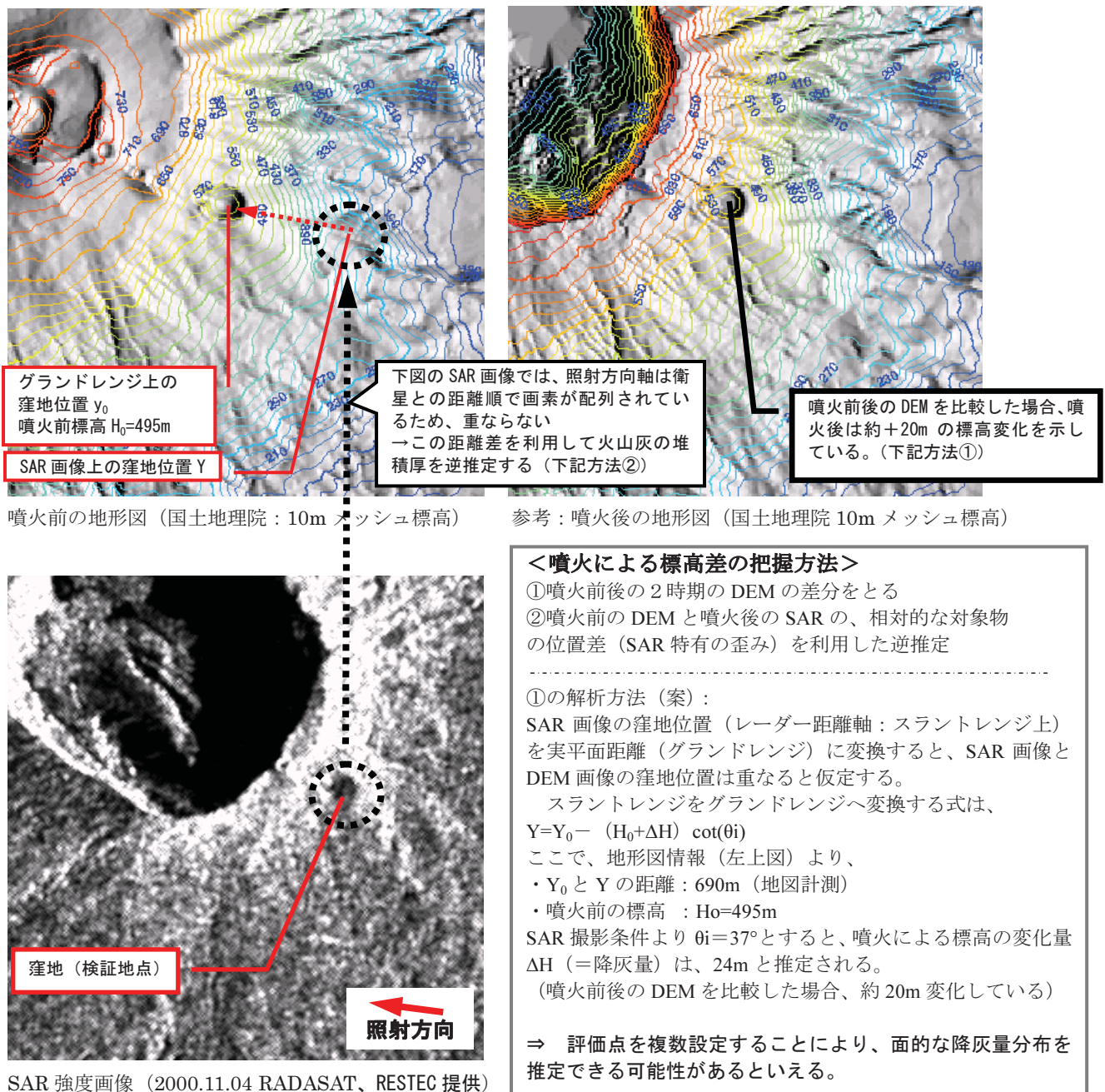


図 2.1.1.9 スラントレンジとグラントレンジの比較による火山灰堆積厚の逆推定例

c)-3 基礎検討結果のとりまとめ

基礎検討の結果は以下のとおり。

◆火山灰エリアの抽出について（テクスチャ解析）

基礎検討により明らかとなった事項は、以下のとおり。

- ・ 標高、勾配等の地形条件が同様な森林域において、降灰の影響により後方散乱が小さくなる（画像が暗くなる）ことが確認できた。
- ・ 一方で、SAR 画像の後方散乱の大小は、衛星撮影方向と地形形状（標高、斜面勾配、斜面方向、地表面の凹凸など）の関係に大きく依存する。
- ・ 上記地形条件による、SAR 画像の特有の現象（フォアショートニング、オーバーレイ、シャドウ等）により解析困難もしくは不可能なエリアが存在する。

今後は、SAR 画像の特徴により解析困難となるエリアの整理および処理方法を検討することが必要である。また、C バンドレーダ画像（RADARSAT）を用いた検討を実施したが、より波長の長い L バンドレーダ（ALOS 衛星）の適応性を検討するとともに、波長の違うレーダ画像の合成利用についても検討することが望ましい。

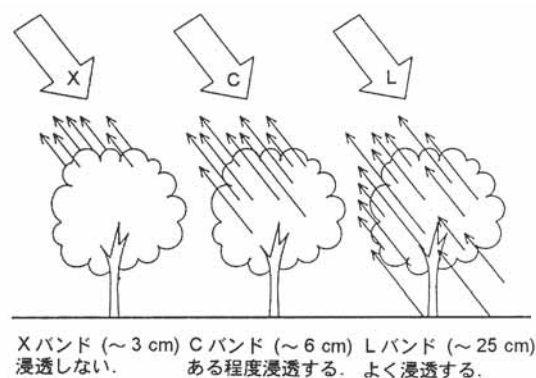


図 2.1.1.10 波長と樹木（葉冠）透過状況の違い

（図出典：合成開口レーダ画像ハンドブック，日本写真測量学会編）

◆SAR 画像特有の歪みを利用した堆積厚の逆推定について

大規模な地形変化が発生した場合の早期の被害概要把握への利用を念頭に、噴火前の DEM と噴火後の SAR の、相対的な対象物の位置差（SAR 特有の歪み）を利用した逆推定方法（案）を提案した。これにより、噴煙や立ち入り規制等で情報が入手困難な火口付近の大規模変化について、早期に情報を入手できる可能性がある。

今後は、幾何補正を含めた精度の検証や対象物ごとの見え方の整理等の適応性評価が必要である。

◆SAR 画像の実務利用イメージ

SAR 画像の実務利用イメージを図 2.1.1.11 に示す。

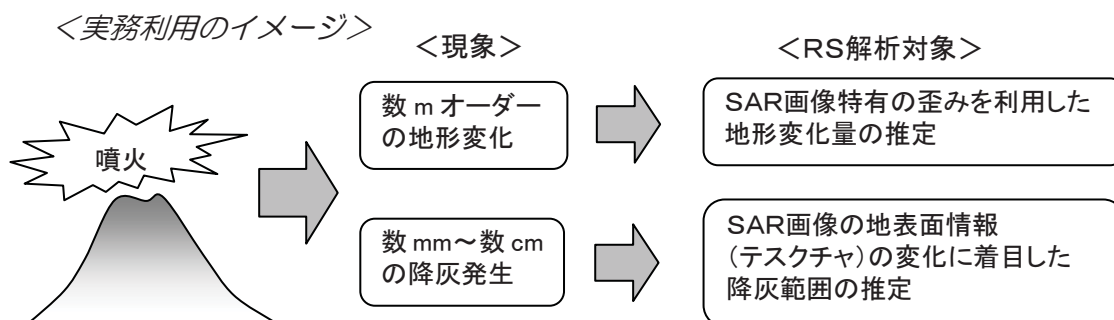


図 2.1.1.11 SAR 画像における実務利用のイメージ

(2) 精度の検討結果

①幾何補正等の画像前処理の精度について

本検討では、被災後の DEM 入手前の段階における地形変化量の調査を想定し、位置補正は以下の簡易的な手順で実施した。

手順 1：倒れこみやレイオーバー等の歪の影響の少ない概ね一定標高となる海岸線を抽出

手順 2：SAR 画像の海岸線と地形図（国土地理院：10m メッシュ標高）を用い、海岸線上に数地点の GCP（地上基準点）を取得し、アフィン変換による SAR 画像の位置補正を実施

上記による SAR 画像の位置補正誤差は RMS 誤差（平均二乗誤差）で 0.5 ピクセル（約 3m 以内）程度におさまった。

なお、参考として火口等のエッジ部分等を GCP として画像全体の幾何補正を試みたが、標高による誤算の増減や方向性の不一致により処理不能であった。このように見た目のみを一致させる処理が必要な場合は、画像をタイル状もしくは標高別に分割する等の前処理が必要となる。

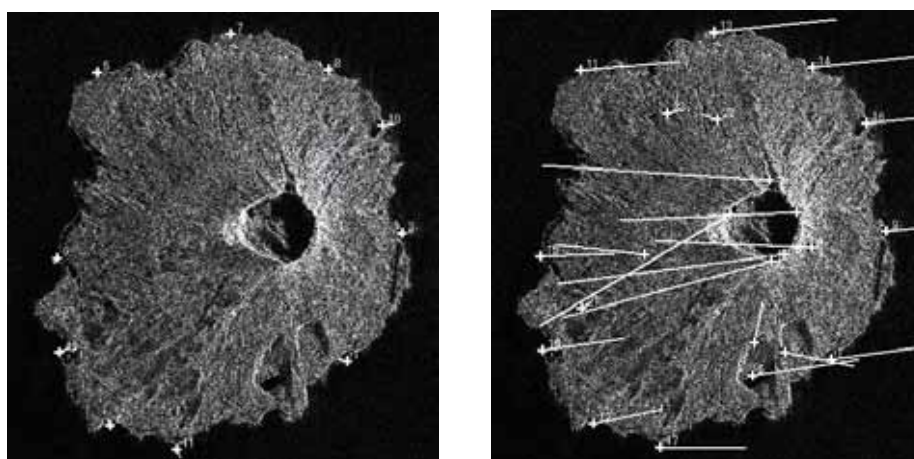


図 2.1.1.12 海岸線(左)および三宅島全体(右)の GCP 取得状況と誤差発生状況

※白点が GCP、白線が誤差の方向及び大きさを示す。（RESTEC 提供）

②地形による後方散乱の補正について

SAR 画像は、斜め上空から電波を照射してレーダからの距離によって地上の画像（照射方向）を作成する。そのため、地表面に起伏がある地域は実際の地表面の水平距離や位置関係が変わることに留意が必要となる。

基本的に地表面情報を取得できないシャドウおよびレイオーバーには、マスク処理もしくは補間処理を行う必要がある。フォアショートニングおよび斜面勾配・斜面方向による後方散乱の変化は、同一条件のエリアのみ評価することが必要である。

これらの影響を除去するため、地形情報等との重ねあわせ解析することは幾何補正の精度上不可能である。そのため、地形図（国土地理院：10m メッシュ標高）や空中写真を参考情報として、レーダ画像の特性を考慮しながら目視判読をおこなう必要がある。

(3) 使用上の留意点

今回の検討で確認できた留意点は以下のとおりである。

- ・ 大規模な地形変化が発生した場合、精密な幾何補正には地形変化後の DEM が必要となり、災害後早期の幾何補正済み SAR 画像の利用は困難である。
- ・ 衛星画像全天候型の SAR 画像においても、解析が困難なエリアが存在することが確認できた。主な解析困難なエリアは以下のとおりであり、衛星の撮影方向や撮影位置について購入時に確認が必要である。

＜解析困難なエリア例＞

- ・ シャドウ、オーバーレイ発生箇所（地表面情報が取得できていない）
- ・ 衛星方向を向いた斜面（フォアショートニングの影響が大きい）、または衛星方向と反対向きの斜面（後方散乱の減少）
- ・ SAR 画像の明暗（後方散乱強度）は地形条件に大きく依存する。そのため、撮影画像範囲全体を面的に定量評価することは困難である。

(4) 今後の課題

今後は、SAR 画像の特徴により解析困難となるエリアの整理および処理方法を検討することが必要である。また、C バンドレーダ画像（RADARSAT）を用いた検討を実施したが、より波長の長い L バンドレーダ（ALOS 衛星）の適応性や複数画像の合成利用についても検討が必要である。

また、他のリモートセンシング技術の検討結果（空中写真、ハイパースペクトル、航空レーザ）との比較検証は、撮影箇所や撮影時期の違いにより実施できなかった。今後は、プラットフォーム間の比較検証を視野にいた観測計画の立案が望まれる。

No.	分野	技術キーワード	文 献 名	資料名	発行年	Vol.	No.	page	衛星名称	使用した衛星画像	位相情報	総論・概要	理論	現地検証データ	備考
1	情報 (センサ工学)	InSAR、大気遅延	干渉型SAR計測に及ぼす湿潤大気遅延効果とOPS水蒸気情報の利用	写真測量とリモートセンシング	1999	38	5	4~19	JERS-1		○		○	○	
2	情報 (センサ工学)	InSAR、大気遅延	干渉SAR大気遅延の静的成分と高層気象観測データとの比較	写真測量とリモートセンシング	2002	41	1	70~84	JERS-1		○		○	○	
3	情報 (センサ工学)	Ph-SAR、土地被覆分類	ニュートリアルネットワークによるポラリメトリックSARデータの分類	日本リモートセンシング学会誌	1997	36	3	13~22	SIR-C		○		○		
4	情報 (センサ工学)	SAR画像再生	バーナールコンビュータを使用したJERS-1合成開口レーダの画像再生とその応用	写真測量とリモートセンシング	1996	35	3	43~50	JERS-1		○		○	○	
5	情報 (センサ工学)	幾何補正	人工衛星搭載SAR取得画像と国土地理院発行数値地図の重ね合わせの検討	日本リモートセンシング学会誌	2003	23	1	44~49	JERS-1 RADARSAT		○		○		
6	情報 (センサ工学)	SAR画像再生	JERS-1およびJERS-2SAR画像のための地上基準点としての孤立コーナー・リフレクタの設定サイトについての一考察	写真測量とリモートセンシング	2001	40	1	15~30	JERS-1 ERS-2		○		○	○	
7	情報 (センサ工学)	土地被覆分類	ラジスキー距離を導入したポラリメトリックSAR画像データの土地被覆分類における特徴ベクトルの拡張	写真測量とリモートセンシング	2002	41	6	14~33	SIR-C		○		○		
8	防災	(総論、WG報告等)	建設・防災へのリモートセンシングの活用に関するワークショップ開催報告	日本リモートセンシング学会誌	2002	22	1	104~111	—		○		○		
9	防災	(総論、WG報告等)	国土防災分野を対象にしたInSARの標準化に向けての検討—国土防災リモートセンシング研究会インタフェロメトリックWG活動報告—	日本リモートセンシング学会誌	2004	24	3	313~319	—		○		○		
10	防災	(総論、WG報告等)	A simple raster-based model for flood inundation simulation	Journal of Hydrology	2000	236	1~2	54~77	(不明)		○		○		
11	防災	(総論、WG報告等)	Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards	ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing	2005	59	4	185~228	(不明)		○		○		
12	防災	InSAR、地震	ERS-1 SAR 強度画像を用いた兵庫県南部地震による建物被害地域抽出	写真測量とリモートセンシング	1998	37	4	57~61	ERS-1		○		○		
13	防災	InSAR、地震	ERS-1/SARのインターフェロメトリによる地形変動抽出可能性の検討	写真測量とリモートセンシング	1997	36	5	59~63	ERS-1		○		○		
14	防災	InSAR、地すべり	Use of InSAR data for landslide monitoring: a case study from southern Italy	IGARSS 2000, Hawaii	2000				ERS-1		○		○		
15	防災	InSAR、DEM作成	干渉SARによる地殻変動検出とDEMの作成	写真測量とリモートセンシング	1997	36	3	71~76	JERS-1		○		○		
16	防災	InSAR、火災	Evaluation of RADARSAT-1 data for identification of burnt areas in Southern Europe	Remote Sensing of Environment	2004	92	3	370~375	RADARSAT		○		○		
17	防災	InSAR、火災	THE 1998 Forest Fires in East Kalimantan (Indonesia): A Quantitative Evaluation Using High Resolution, Multitemporal ERS-2 SAR Images and NOAA-AVHRR Based Data	Remote Sensing of Environment	2000	72	1	64~77	ERS-2		○		○		
18	防災	InSAR、火山	The 1997 eruption of Okmok Volcano, Alaska: a synthesis of remotely sensed imagery	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2003	127	1~2	87~105	ERS, JERS-1, RADARSAT etc		○		○		Okmok火山(アラスカ)
19	防災	InSAR、火山	Accurate measurements of tropospheric effects in volcanic areas from SAR interferometry data: application to Sakurajima volcano (Japan)	Earth and Planetary Science Letters	2003	213	3~4	299~310	ERS-1, ERS-2		○		○		桜島
20	防災	InSAR、火山	Surface height adjustments in pyroclastic-flow deposits observed at Unzen volcano by JERS-1 SAR interferometry	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2003	125	3~4	247~270	JERS-1		○		○		雲仙
21	防災	InSAR、火山	The sensitivity of a volcanic flow model to digital elevation model accuracy: experiments with digitized map contours and interferometric SAR at Ruapehu and Taranaki volcanoes, New Zealand	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2003	119	1~4	89~105	AIRSAR		○		○	○	Ruapehu and Taranaki volcanoes, New Zealand
22	防災	InSAR、火山	Emplacement of volcanic vents and geodynamics of Central Anatolia, Turkey	Journal of Volcanology and Geothermal Research	1998	85	1~4	33~54	ERS		○		○		Central Anatolia, Turkey
23	防災	InSAR、火山	Mapping recent lava flows at Westdahl Volcano, Alaska, using radar and optical satellite imagery	Remote Sensing of Environment	2004	91	3~4	345~353	(不明)		○		○		Westdahl Volcano, Alaska
24	防災	InSAR、火山	Keys to analyze active lahars from Pinatubo on SAR ERS imagery	Remote Sensing of Environment	1997	62	1	20~29	ERS-1		○		○		ピナツボ火山
25	防災	InSAR、火山	Use of multifrequency, multipolarization shuttle imaging radar for volcano mapping in the Kunlun Mountains of Western China	Remote Sensing of Environment	1997	59	2	364~374	SIR-C/X-SAR		○				Kunlun Mountains
26	防災	InSAR、コヒーレンス、地震	Verification of InSAR capability of disaster monitoring - A case study on Chi-chi earthquake in Taiwan	Asian Journal of Geoinformatics	2002	2	3	59~67	ERS-2		○		○		
27	防災	InSAR、コヒーレンス、土石流	Detection of distribution of the 1998 pyroclastic flows at Merapi volcano, central Java, Indonesia using RADARSAT SAR images	Asian Journal of Geoinformatics	2002	2	4	9~18	RADARSAT		○		○		Merapi volcano,

(5) 参考資料

※収集した論文の一覧を以下に示す。

収集論文リスト

分野：情報(センサ工学)、防災、地形・地質・環境、農業の5区分で整理

技術キーワード：総論・WG報告、SAR画像再生、幾何補正・前処理、土地被覆分類、DEM作成、ラフネス、コヒーレンス、スペクトルノイズ、InSAR、大気遅延、地震、地すべり、土石流、火山、火災、モニタリング

No.	分野	技術キーワード	文獻名	出版			使用した衛星画像			理論	現地検証データ	備考
				発行年	Vol.	No.	page	衛星名称	散乱特性	位相情報		
28	防災	InSAR、地すべり	Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique Engineering Geology	2003	68	1~2	3~14	ERS		○		
29	防災	InSAR、地すべり	Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tescina landslide in Italy Engineering Geology	2003	68	1~2	15~30	LISA		○		○
30	防災	InSAR、地すべり	Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy) Engineering Geology	2003	68	1~2	31~51	ERS		○		○
31	防災	InSAR、地すべり	Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France). Comparison with ground-based measurement Remote Sensing of Environment	2003	88	4	468~478	ERS		○		○
32	防災	InSAR、水害	Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing Geomorphology	1998	21	3~4	295~312	JERS-1, ERS-1	○	○		○
33	防災	InSAR、水害	Assessment of flooded areas from ERS-1 PRD data: An application to the 1994 flood in Northern Italy Physics and Chemistry of The Earth	1995	20	5~6	469~474	ERS-1	○	○		○
34	防災	InSAR、水害	Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery Remote Sensing of Environment	2003	85	3	271~281	(不明)	○	○		○
35	防災	地震	1995年兵庫県南部地震での建物被害地域における人工衛星SAR強度画像の特徴 日本建築学会構造系論文集	2001	8	546	55~61	JERS-1 ERS-1	○			○
36	防災	システム	DMSP/OLS夜間可視画像を用いた早期被災地推定システム(EDS)の開発 地域安全学会論文集	2000	11	2	79~86	—		○		
37	地形・地質	(総論、WG報告等)	合成開口レーダSAR画像の地形・地質判読 写真測量とリモートセンシング	1993	32	2	38~41	JERS-1	○	○		○
38	地形・地質	(総論、WG報告等)	ふよう1号SAR画像で見る活断層—韓国南東部、梁山(ヤンサン)断層 写真測量とリモートセンシング	1994	33	3	81~85	JERS-1	○	○		○
39	地形・地質	DEM作成	JERS-1/OPS 画像とRADARSAT/SAR画像による讃岐山脈の構造抽出 四国大学 経営情報研究年報	1998	4		59~64	JERS-1 RADARSAT	○			○
40	地形・地質	InSAR、SAR画像再生	ERS-1/SARインターフェロメトリにおける基線量推定の一方法とその地盤沈下検出への応用 写真測量とリモートセンシング	1999	38	4	59~64	ERS-1		○		○
41	地形・地質	遺跡調査	衛星SARによるエジプト・南サッカラ地区の遺跡検出について 写真測量とリモートセンシング	1998	37	2	23~28	SIR-C	○			○
42	地形・地質	SAR画像再生、スペクトルノイズ	森林地帯を識別したSAR画像に隠れた樹林構造に関する一検討—ユカタン半島北部のランドSAR画像を対象として— 写真測量とリモートセンシング	1997	36	6	54~62	JERS-1	○			○
43	地形・地質	スペクトルノイズ	微少特徴抽出のためのSAR画像のスペクトル低減処理 写真測量とリモートセンシング	1999	38	3	32~43	JERS-1	○			○
44	地形・地質	幾何補正・前処理	幾何歪みの補正依存性を利用したJERS-1/SAR画像の簡易接合 写真測量とリモートセンシング	1997	36	1	39~45	JERS-1	○			○
45	地形・地質	その他	SAR画像に基づいた岐阜北部地質構造の調査及びリアメントの評価 写真測量とリモートセンシング	1991	30	5	29~35	JERS-1	○			○
46	環境	ラフネス	多入射角SARデータによるサロマ湖氷のラフネスと氷厚の推定 日本リモートセンシング学会誌	2002	22	4	415~422	RADARSAT	○			○
47	環境	コヒーレンス、土地被覆分類	JERS-1/SARによる熱帯雨林の伐採モニタリングのためのコヒーレンスの有効性の検討 写真測量とリモートセンシング	2000	39	6	48~55	JERS-1	○	○		○
48	環境	土地被覆分類	乾燥地域におけるJERS-1SARデータの植生型判別能力の評価 写真測量とリモートセンシング	1999	38	4	4~16	JERS-1	○			○
49	農業	PI-SAR、土地被覆分類	水稲生育状況のマイクロ波特性による把握—PI-SARによる鹿児島県干拓地水田の多波長・多偏波解析— 日本リモートセンシング学会誌	2003	23	5	473~490	AIRESAR	○	○		○
50	農業	土地被覆分類、スペクトルノイズ	多時期二周波SARデータによる温帯植生分類 写真測量とリモートセンシング	1997	36	6	4~12	JERS-1 ERS-1	○			○
51	農業	土地被覆分類、モニタリング	NOAA AVHRR NDVI と衛星SARデータからの土地被覆情報を併用した牧草成長モニタリング 写真測量とリモートセンシング	2001	40	1	55~67	JERS-1 ERS-1	○			○
52	農業	土地被覆分類、モニタリング	衛星搭載SARデータによる水稲作付面積の早期推定 写真測量とリモートセンシング	2000	39	4	25~30	JERS-1, ERS-1, RADARSAT	○			○
53	農業	土地被覆分類、モニタリング	RADARSATデータによる水稲作付面積算出手法の開発 日本リモートセンシング学会誌	2003	23	5	458~472	RADARSAT	○			○
54	農業	土地被覆分類、ラフネス、モニタリング	ERS-1 SARデータによる草地管理状況の検知 写真測量とリモートセンシング	1998	37	4	23~33	ERS-1	○			○

2.1.2 航空写真

降灰による指標物の「見え方の変化」を使った土石流発生可能性レベルの設定を行う。降灰後に撮影した航空写真の画像範囲内に、指標物あるいは目安となるものが含まれている場合、簡易に火山灰堆積厚を判読・推定できる。逆に、あらかじめ活火山地域の特定の場所に指標物あるいは目安となるもの（ランドマーク）を設置しておくことによって、緊急撮影の目標物とすることもできる。

実際に、三宅島の1983年と2000年噴火の降灰後の航空写真をもとに「道路のセンターラインや構造物を利用した降灰状況の見え方」から降灰厚さを推定して、火山灰堆積深報告値（アイソパック等）とを検討した結果、上空からの降灰による被覆状況（「見え方の変化」）から火山灰堆積深をある程度推定できることがわかった。本手法は、DMC（Digital Mapping Camera：航空写真用の高解像度デジタルカメラ）や斜め空中写真を利用することによって、さらに現実場面における適用可能性が高まると考えられる。

特に、桜島など山腹にガリーが発達した火山では、ガリーの見え方の変化が指標として使える。源頭部分だけでも見えればよいので、視界さえ良ければ遠望監視でも厚さを推定して土石流発生可能性をある程度は推定できる。

(1) 計測精度

ランドマークの例：火山灰堆積厚の指標として使えるものとして、例えば植生・建物・車両・道路のセンターライン・ガードレール・歩道の段差・よう壁のブロック・道路標識・予め降灰域に設置した何か、などが考えられる。

(2) 安全上の留意点

ヘリコプターや望遠カメラ等を使った肉眼観察によって見える位置について、予めランドマークを設置しておく（あるいはランドマークになるものを選定しておく）ことが必要。

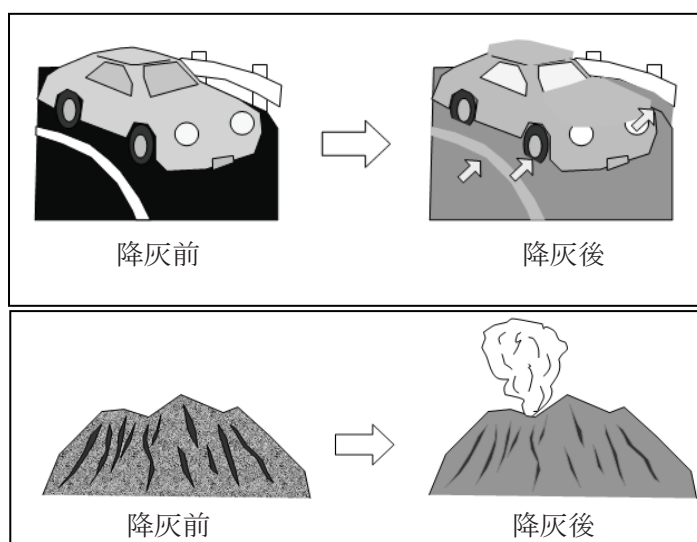


図 2.1.2.1 降灰前後の指標物の「見え方の変化」イメージ

(3) 試行例：三宅島2000年噴火（2000年7月14-15日噴火）

<収集資料>

- 空中写真 : アジア航測(株) 撮影のもの
- 現地調査写真 : アジア航測(株) 独自調査時のもの
- 等層厚線図 : 大学合同観測班地質グループ・地質調査所が作成したものを
2.5 万分の1 地形図上に移写したもの

三宅島 2000 年噴火では、複数回の噴火とそれに対応した降灰が確認されている。ここでは、試行作業であるため、比較的規模の大きな初期の噴火で、かつデータが揃っている 7 月 14-15 日噴火の事例を紹介する。

表 2.1.2.1 三宅島 2000 年噴火における主な降灰と収集データセット

噴火時刻	降灰分布	降灰量	現地調査	等層厚線図	空中写真	衛星写真
7/8 18:43	東	約10万m ³	7/12-15	有り	7/9撮影	7/10
7/14 4:14	北東	約210万m ³	7/16-23	有り	7/22撮影	7/22
8/10 6:30	北東～東	約10万m ³	8/10-14	有り		
8/13 17:30	南					
8/14	南～西			有り		
8/18 17:02	全島	約500万m ³	8/23-26	有り		8/20
8/29	北東	約350万m ³	8/29-30	有り		
9/9		約10万m ³				9/18

a) 試行例 ー三宅島 2000 年噴火ー

7 月 14 日～15 日の雄山山頂の噴火は、7 月 8 日に次ぐ 2 度目の噴火である。水蒸気爆発によって、湿った重い火山灰が北東方向に堆積した。

この噴火では島の外周道路である都道まで 10mm 程度の降灰が確認されている。同日の降灰では泥雨状の降灰となった地域もあり、そうした箇所では堆積した火山灰はモルタル状に固結した。

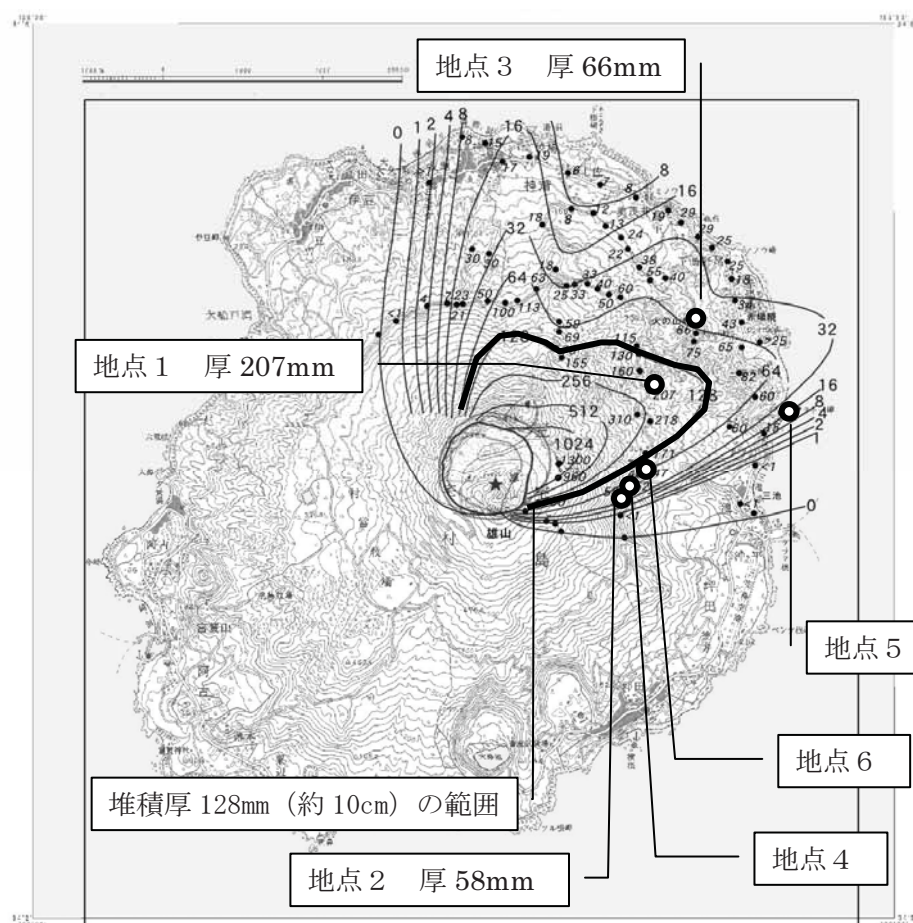


図 2.1.2.2 三宅島 2000 年 7 月 14～15 日の降灰分布（等層厚線図）

出典：大学総合観測班地質グループ・地質調査所作成による図
（東京大学地震研究所 HP, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/nakada/ash.html>）を 1/50,000 地形図に重ねたもの。

b) 現地写真と空中写真

地点 1 (層厚 207mm)

火口の北東約 2.2km で分布主軸上の地点である。現地ではタイヤが半分近く埋まっているような地点でも、上空からは道路形状もはっきりと確認できる。植生は全般に褐色がかっており、現地の樹種を予め把握しておくことによって、降灰後の色調が判断の指標となる可能性がある。



地点 2 (層厚 58mm)

火口の東約 1.5km で降灰分布範囲の境界付近である。分布主軸から離れるに従って植生状況が変化していき、降灰分布範囲の境界付近では、現地においても植生への影響変化が顕著に認められる。



地点3 (層厚 66mm)

分布主軸に近く、地点1から約1km遠ざかった地点。斜め写真からはほとんど降灰状況は確認できないが、垂直写真では、植生の色調の違いにより、降灰量の違いが推定できる可能性がある。





地点 4 (層厚 52mm)



地点 5 (層厚 22mm)



地点 6 (層厚 77mm)

三宅島 2000 年噴火の 7/14～15 降灰後の数地点の堆積厚と、空中写真による見え方を比較した。

空中写真は 10 倍焼き付けしたものを使用。これは、今後活用が期待される DMC（高解像度デジタル航空写真）と同等の画像をイメージしたものである。DMC で撮影することによって、引き延ばし焼き付けの手間や時間が省略され、ダイレクトにこのような高解像度画像を入手できるようになる。



地点 3-①

車輛の埋没状況がわかる。

- ・乗用車（バン？）
- ・ボンネット
- ・バスの車輪

このケースではこれらが隠れていないため、「10cm 程度未満」と推察されるのみであるが、さらに厚く堆積した場合には、隠れ具合により厚さを推定できる可能性がある。

DMC による大縮尺・高精度映像を活用することにより、さらに現実性を増す。



地点 3-②



ビニールハウスの状況の破損（圧破壊）状況がわかる。

ただし予め「そこがビニールハウスである」との認識が無いと難しいかもしれない。

ビニールハウス倒壊時・非倒壊時の堆積厚データを蓄積しておく、堆積厚推定の参考になる。

空中写真とほぼ同時期撮影の現地写真。手前のビニールハウスは泥流により壊滅しているが、奥のものには到達しておらず、火山灰による圧壊である。





2000年8月2日撮影
撮影縮尺： 1:8,000
焼き付け： 10倍伸ばし
スキャン： 400dpi
地点：地獄谷（地点1）
火山灰堆積厚：207mm

決定的な指標はないが、林道の「見た目」で20~50cm程度であろうことは推察できる？

黒い部分は
泥流堆積物

(4) まとめと課題

以上の試行作業結果をまとめると、下記のことが言える。

- ① 通常の空中写真（縮尺 1:8,000 程度）では、降灰深によって植生への影響度合が変化していることは認識できた。このため、**空中写真だけでは定量的な評価は難しいが、現地情報を補完し合うことで、等値線を引く際には有効な情報となる。**ただし、植生への影響度合は、堆積深だけでなく、火山灰の性質（粘着性）や樹種にも大きく依存するため、注意が必要である。
- ② 縮尺 1/8,000 の空中写真を **10 倍焼き付け**したものを用いた場合、**ある程度定量的に火山灰堆積深を推定することができた。**具体的には、車輛（車輪やボンネット）の埋没度合から、火山灰堆積深が 10cm 程度未満であろうことは推定でき、実際の堆積深（66mm）と整合的であった。

今後、DMC（高解像度デジタル航空写真）の普及に伴い、高解像度な画像の入手がより容易に行えるようになる。それをを用いて、上記②のように地物の埋没度合を判読することにより、火山灰堆積深をある程度定量的に推定できると期待される。

（指標となる地物の例）

- ・ 車輛（車輪、ボンネット等）
- ・ ガードレール等の規格が統一された構造物
- ・ その他、住居、擁壁、鳥居等の構造物（ただし、現地の状況に詳しい人からの情報が必要）

今後の課題としては、今回整理したように、過去の火山噴火時の空中写真画像と現地状況および火山灰堆積物をセットでデータベース化しておくのが望ましい。

<引用文献>

大学総合観測班地質グループ・地質調査所作成（2007）：三宅島 2000 年噴火の噴出物の堆積状況，東京大学地震研究所 HP，<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/nakada/ash.html>

2.1.3 ハイパースペクトル観測

(1) 調査目的および概要

噴火活動中の火山周辺における降灰地での火山灰の性状の差異について、リモートセンシング技術を用いて検出可能性を検討することを目的とする。

2003～04年度の共同研究作業においては、テストフィールドとして設定した三宅島のハイパースペクトルデータを航空機により取得した。今回、さらに火山灰の性状に関する情報抽出への適用可能性検討のため、2005年8月に三宅島で現地調査を実施し、地上でのハイパースペクトルデータを取得した。これらの空撮と地上で取得したデータのうち、雄山火口南西部について2種類のハイパースペクトルデータの比較を行い、火山灰性状情報の抽出可能性について検討を行った。

(2) ハイパースペクトルカメラ

ハイパースペクトルセンサとは、空間的な画像取得能力に加えて、被写体の反射光を分光し記録する能力を備えたセンサである。このセンサにより、10nm程度の狭い波長帯域で、波長的に連続した数百にも及ぶ多数のスペクトル・バンド画像データが取得される。

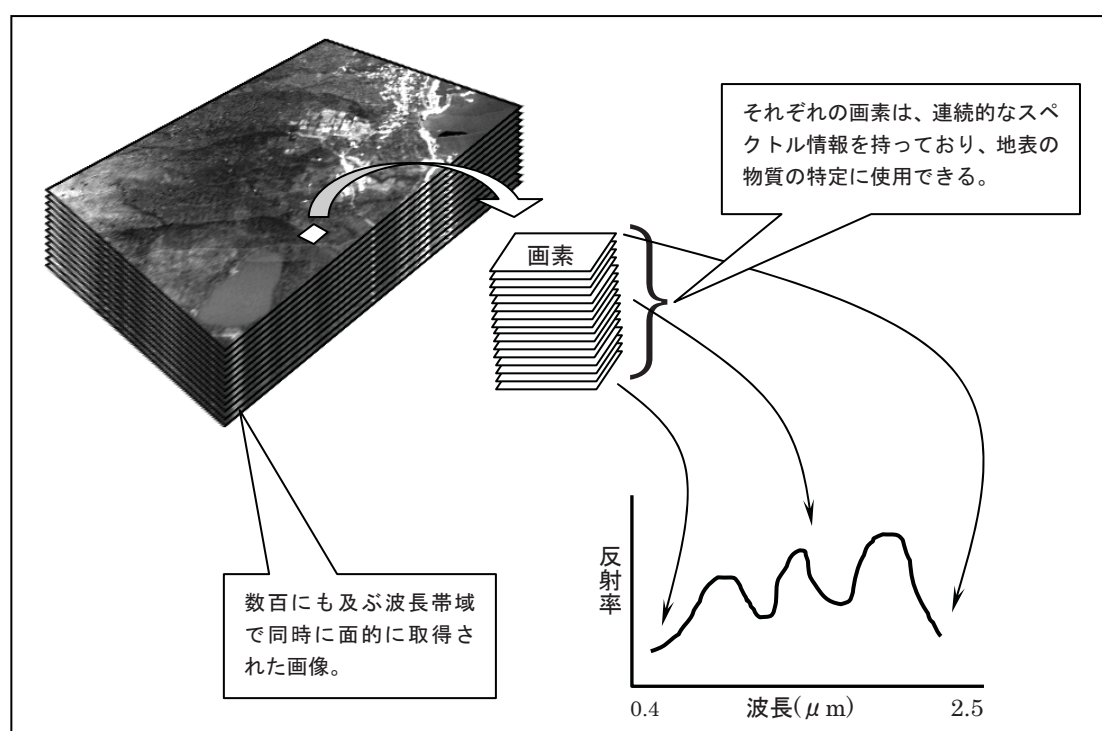


図 2.1.3.1 ハイパースペクトルデータ

取得されたデータは、計測対象物の吸収や反射のスペクトル特性を詳細に記録しているため、この画像のスペクトル情報と、現地調査や室内で取得した特定の物質のスペクトルパターン情報を比較することで、画像中のある特定の植物や鉱物などの物質の分布範囲を抽出して地図化することが可能となる。

本調査で使用したハイパースペクトルカメラの外観および分光方式を図2.1.3.2に示す。

このカメラは、対物レンズの後ろのスリットを通過した光をプリズムと回折格子により分光し、検出器（CCD）により記録する方式となっている。つまり、ラインセンサーとして機能するため、カメラを掃引しながら分光データを記録し、後処理によるデータ再配列で同一波長帯域の平面画像が得られる仕組みとなっている。

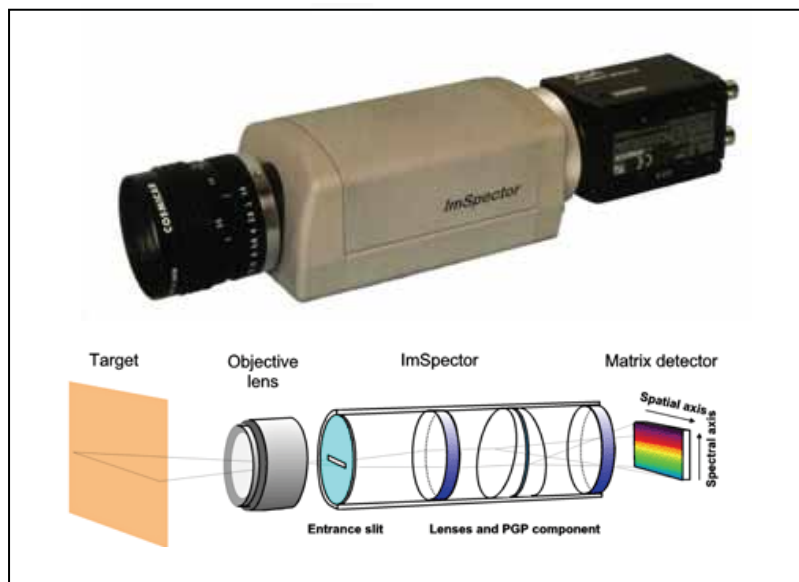


図 2.1.3.2 ImSpectorV10（波長範囲 400～1000nm）

(3) データ計測

ハイパースペクトル画像の計測については、2005年8月30日～9月1日の期間で、テストフィールドに選定した三宅島で現地調査を実施し、地上での観測データを取得した。その際、調査ポイントの選定に当たっては、2003年12月13日～14日に航空機から空中計測したハイパースペクトルデータの解析結果を使用した。

空中計測は、図2.1.3.3に示した飛行コースで実施した。この計測では、航空レーザー計測も同時に行い、図2.1.3.4に示すそれぞれの範囲でハイパースペクトル画像と航空レーザー計測データが得られた。この際の計測条件と、得られたハイパースペクトルデータの仕様を表2.1.3.1に示す。

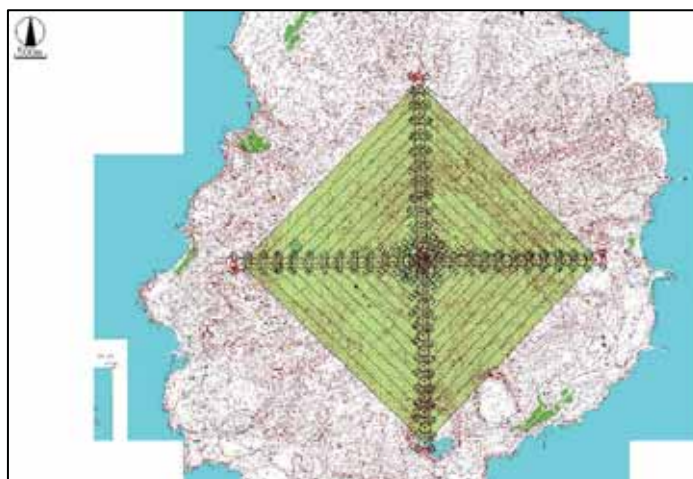


図 2.1.3.3 空中計測コース図（三宅島/2003 年）

表2.1.3.1 空中計測条件（三宅島）

観測実施日	2003 年 12 月 13 日～14 日
ハイパースペクトルカメラ	ImSpectorV10（波長範囲 0.4～1 μ m）
観測条件	・ 計測高度： 800m（コース最高地点基準対地高度） ・ 計測方向： 火口を中心とした4方向 ・ 地上分解能： 2m ・ 量子化ビット数： 8bit



図 2.1.3.4 計測範囲

左：航空レーザー/右：ハイパースペクトル

ここで計測されたハイパースペクトルデータに対して、航空レーザー計測で得られた高さ情報を使用して正射投影変換処理を行った。これにより得られた正射投影画像について、ノイズの影響の少ない0.466～0.898 μ mの波長範囲で、約10nm間隔の43バンドのデータを取り出した。その後、主成分分析によりバンド間の類似成分を除去した上で、K-Mean法^{注1)}でクラスター分類処理を行った。この自動分類結果を用いて、代表的な14の分類項目の範囲からそれぞれ3箇所ずつ、経年変化の影響が少ないと推定される場所を現地調査ポイントとして選定した。図2.1.3.5に選定ポイントを示す。また、同図の右上に自動分類画像の一部分をサンプルとして示す。

上述した選定ポイントについて、2005

年8月30日～9月1日の期間で現地調査を実施した。図2.1.3.6に、現地での調査状況を示す。

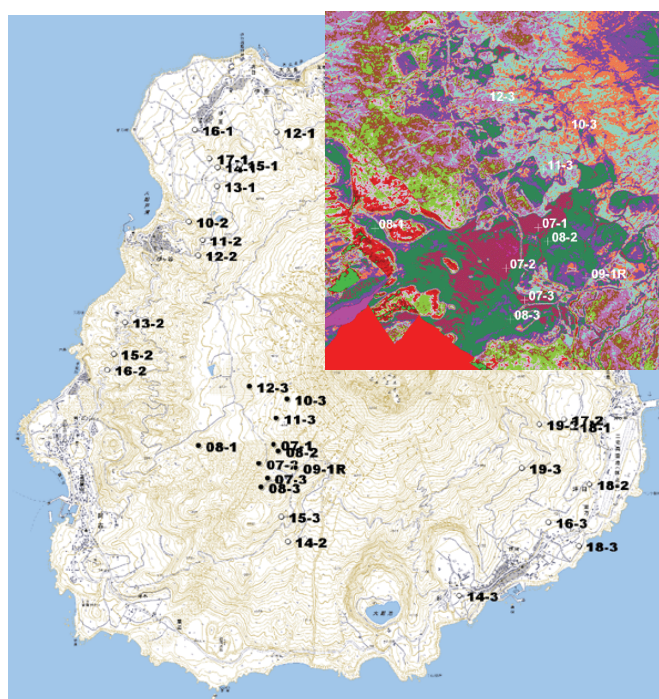


図 2.1.3.5 現地調査実施箇所

（右上枠内は自動分類結果の例）

机上で計画したポイントのうち、現地での確認により空中計測後の土木工事や植生繁茂等の状況変化を受けたポイントを除いて表2.1.3.2に示すポイントを調査した。さらに、それら

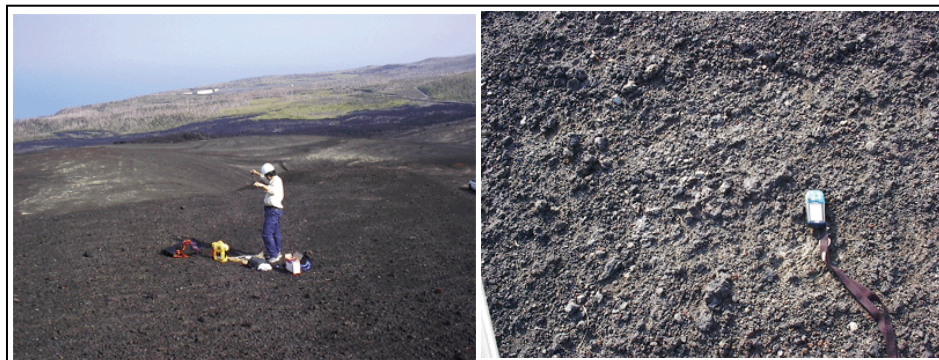


図 2.1.3.6 現地調査実施風景

の調査ポイントのうち、主として植生被覆のないポイントでは、空中計測に使用したカメラを使用して地上でのスペクトルデータ計測を実施した。現地での調査終了後に、計測データから各波長帯域の画像を復元処理し、図2.1.3.7に示すような画像データを抽出した。



図 2.1.3.7 現地観測ハイパースペクトル画像

表2.1.3.2 現地観測箇所一覧

ポイント名	緯度	経度	記載	スペクトル計測
07-1	34° 04' 29.3"	139° 30' 36.2"	アア溶岩(1983 年)+尾根部の表面に 2000 年火山灰・スコリア	○
07-2	34° 04' 21.1"	139° 30' 28.5"	アア溶岩(1983 年)+尾根部の表面に 2000 年火山灰・スコリア	○
07-3	34° 04' 14.8"	139° 30' 33.0"	1983 年スコリア+2000 年噴火スコリア(レキ径 max10cm,ave2cm)	○
08-1	34° 04' 29.0"	139° 29' 57.0"	アア溶岩(1983 年噴火)+ 灌木(本/2m ²)	○
08-2	34° 04' 26.5"	139° 30' 38.5"	2000 年スコリア(レキ径 max2.5cm,ave10cm)・火山灰	○
08-3	34° 04' 10.9"	139° 30' 29.6"	2000 年スコリア(レキ径 max20cm,ave4cm)・火山灰	○
09-1R	34° 04' 19.2"	139° 30' 47.7"	2000 年スコリア(レキ径 max10cm,ave1cm)・火山灰	○
10-2	34° 06' 06.1"	139° 29' 51.8"	高木(H=15m<)の広葉樹密(一部枯死した樹木あり)	
10-3	34° 04' 49.1"	139° 30' 43.1"	全面枯死した広葉樹林(倒木・草本類がみられる)	○
11-2	34° 05' 58.2"	139° 29' 58.9"	高木(H=15m<)の広葉樹疎(若干立ち枯れあり)	
11-3	34° 04' 40.9"	139° 30' 37.4"	全面枯死した広葉樹林(倒木・草本類がみられる)	○
12-1	34° 06' 45.1"	139° 30' 37.5"	高木(H=20m)の広葉樹疎	
12-2	34° 05' 51.7"	139° 29' 56.7"	高木(H=20m)の広葉樹(所々に立枯れ有り)	
12-3	34° 04' 54.6"	139° 30' 23.4"	全面枯死した広葉樹林(倒木がみられ草本類が繁茂する)	○
13-1	34° 06' 21.7"	139° 30' 06.7"	高木(H=20m)の広葉樹疎	
13-2	34° 05' 22.6"	139° 29' 18.8"	高木(H=15m<)の広葉樹疎	
14-1	34° 06' 29.8"	139° 30' 06.7"	高木(H=20m)の常緑広葉樹密	
14-2	34° 03' 47.3"	139° 30' 43.3"	全面枯死した広葉樹林	
14-3	34° 03' 24.1"	139° 32' 12.6"	広葉樹(H=10m)密	
15-1	34° 06' 31.1"	139° 30' 18.2"	高木(H=15m<)の落葉広葉樹疎	
15-2	34° 05' 08.8"	139° 29' 12.8"	高木(H=15m<)の広葉樹疎	
15-3	34° 03' 58.2"	139° 30' 39.9"	全面枯死した広葉樹林(倒木がみられ草本類が繁茂する)	
16-1	34° 06' 45.9"	139° 29' 54.9"	広葉樹林	
16-2	34° 05' 02.0"	139° 29' 09.4"	笹+広葉樹(H=8m)疎	
16-3	34° 03' 55.9"	139° 32' 59.0"	広葉樹(H=15m)密	
17-1	34° 06' 33.6"	139° 30' 02.5"	笹(H=5m)	
17-2	34° 04' 40.5"	139° 33' 07.2"	全面立枯れ+倒木(広葉樹・針葉樹)	
18-1	34° 04' 37.3"	139° 33' 11.4"	全面立枯れ+常緑広葉樹疎・草本類	
18-2	34° 04' 12.2"	139° 33' 20.4"	高木(H=15m<)の広葉樹疎	
18-3	34° 03' 45.6"	139° 33' 14.7"	草本類繁茂	
19-2	34° 04' 38.2"	139° 32' 54.1"	全面立枯れ(針葉樹)	
19-3	34° 04' 19.3"	139° 32' 45.2"	低木(H=5m)の広葉樹林(噴火後に形成か)	

(4) スペクトルデータ解析

空中と地上から取得された両方のハイパースペクトル画像から、現地調査を実施した計測ポイントのスペクトルデータを抽出した。空中計測画像からは現地調査ポイント付近について、その周辺の画素と極端な光量のギャップがないことを確認しつつ、1画素分のスペクトルデータを取り出した。表2.1.3.1に示す通り、空中計測画像の地上解像度は2 mであるため、地上計測画像においてもおおむねその解像度に合わせるように、それぞれの調査ポイントを最も代表と思われる対象物を含む約100画素四方の範囲(10,000画素)の平均スペクトルを抽出した。

図2.1.3.8の上段に空中計測画像から抽出したスペクトルデータを、下段に地上計測画像でのスペクトルデータを示す。これらを比較すると、地上取得スペクトルデータの輝度値の変域が約80～150(画像輝度値)程度なのに対して、空中計測画像のスペクトルデータの変域は最大でも50程度と低いことが分かる。これら輝度値の変域比較のため、図2.1.3.9に調査ポイント07-2の空中計測と地上計測のスペクトルデータを示した。次に、空中計測と地上計測のそれぞれのスペクトルデータについて、各調査ポイント相互のスペクトル類似度のSFF^{注2)}により評価した結果を表2.1.3.3および表2.1.3.4に示す。表中の数字は、それぞれのスペクトルデータ相互の類似度を表している。これらは0～1の値を取り、数値が大きくなるに従い類似度が高いことを示す。つまり、数値が大きければ類似

度が高いため、スペクトル情報からは識別しにくく誤分類が発生しやすいが、逆に数値が小さければスペクトル的に類似度が低く識別・分離しやすいことを示す。表2.1.3.3の空撮画像スペクトルでは、最小値でも0.7以上と、地上取得スペクトルに比べると全体的に類似度が高く、それぞれの調査ポイントのスペクトルが識別しにくいことが読み取れる。一方、地上取得スペクトルでは、調査ポイント07-2と08-3(0.868)および10-3と11-3(0.781)の2通りの組み合わせについて類似度が高いが、それ以外は空撮画像スペクトルに比べて、概ね明瞭に識別できていると思われる。これは先にも述べたが、図2.1.3.9で明らかなように、空撮画像スペクトルの輝度値の変域が地上取得のそれに比べて半分程度しかないことが原因と考えられる。

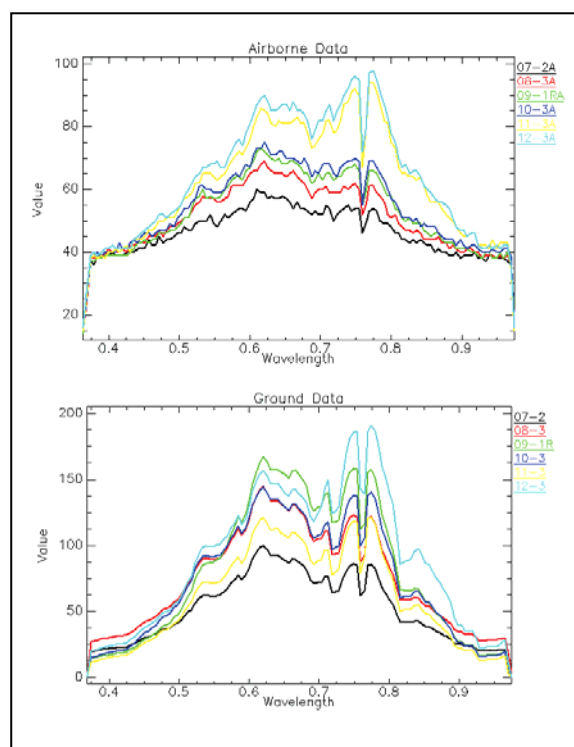


図 2.1.3.8 空中計測（上）および
地上計測（下）スペクトルデータ

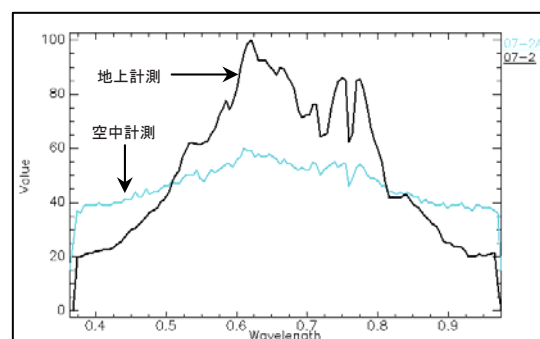


図 2.1.3.9 空中計測と地上計測データの比較

表2.1.3.3 空撮画像におけるスペクトル類似度評価

	07-2	08-3	09-1R	10-3	11-3	12-3
07-2	1.000					
08-3	0.753	1.000				
09-1R	0.763	0.793	1.000			
10-3	0.756	0.812	0.785	1.000		
11-3	0.787	0.792	0.814	0.778	1.000	
12-3	0.762	0.780	0.833	0.775	0.824	1.000

表2.1.3.4 地上取得スペクトルの類似度評価

	07-2	08-3	09-1R	10-3	11-3	12-3
07-2	1.000					
08-3	0.868	1.000				
09-1R	0.514	0.525	1.000			
10-3	0.433	0.393	0.261	1.000		
11-3	0.489	0.421	0.318	0.781	1.000	
12-3	0.462	0.458	0.288	0.532	0.466	1.000

上述の輝度値の変域が狭いという問題を踏まえた上で、現地調査における地上取得スペクトルデータを教師データ（端成分スペクトル）として空撮画像データのSAM分類^{注3）}を試行した。分類結果を図2.1.3.10に示す。画像中のほとんどがP7-2に分類され、残りはP12-3が多勢を占める結果となった。

(5) 解析結果および今後の課題

以上の解析結果から、今回の検討作業で確認したことを以下にまとめる。

現地調査ポイント選定のため空中計測データを使用した、全体的に輝度値の変域が狭い状況であった。現地調査を実施後、地上で取得したスペクトルデータを端成分として、空中計測データのSAM分類を行ったが、端成分への分類には至らなかった。空中計測データについては、輝度値の変域が狭いことにより十分に端成分に分類できていないことが分かった。しかし、図2.1.3.11に示したとおり、空中計測データのクラスタ分類では何らかの地表物質の違いを反映していると思われる結果が得られたため、地上で取得したスペクトルデータのように十分な輝度値の変域が確保

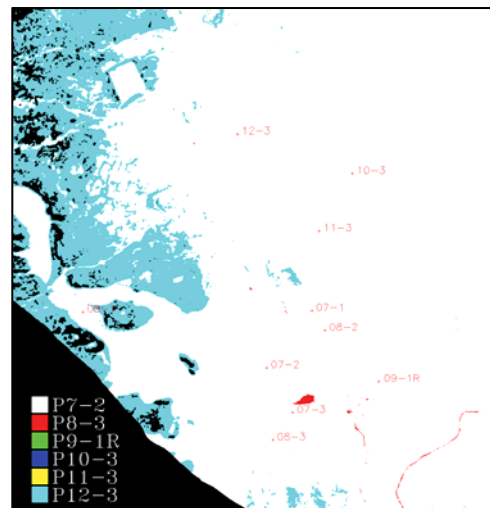


図 2.1.3.10 空中計測画像の SAM 分類結果

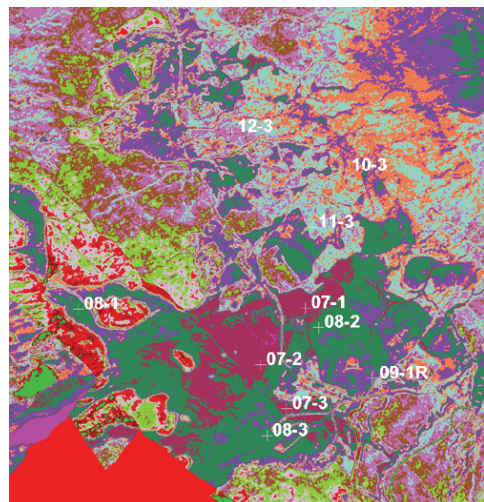


図 2.1.3.11 空中計測画像のクラスタ分類結果

できれば、火山灰の性状判別に関連する何らかの情報を抽出できる可能性があるのではないかと考える。

前記の問題に対する今後の課題としては、空中撮影において十分な輝度値の変域を確保するために、必要な特定物質に絞った撮影設定を決めるといったような撮影手法の高度化や、撮影記録データそのものの広帯域化など、データ計測機材の改良が挙げられる。これらの対策をとることで計測されるデータの品質が向上し、対象物の識別能力が向上すると期待される。また、上記の課題に加えて、火山灰の性状変化とスペクトル変化の関連についての実際的な事例収集と、その分析事例の蓄積も重要であると考ええる。

注 1) K-Mean法

統計的手法を使用して n 次元のデータをクラスタ分析法により分類する手法。データ内に配置するクラスタ数を選択した後、このクラスタ中心数を任意に配置し、さらにスペクトルの分離度が最適化されるまで、繰り返し計算を行う。

注 2) SFF (Spectral Feature Fitting)

スペクトルデータの吸収特性に基づいて画像スペクトルを基準端成分に一致させる方法。基準となる端成分スペクトルと、未知のスペクトルの両方からバックグラウンド成分を除去し、未知のスペクトルに一致するよう基準端成分スペクトルをスケーリングする。次に、基準端成分と未知スペクトル間のバンドごとの最小二乗近似が計算され、二乗平均平方根 (RMS) 誤差の総和を使用して基準スペクトルとの一致度の尺度を算出する。

注 3) SAM分類 (Spectral Angle Mapper)

画像スペクトルを個々のスペクトルと比較する処理を自動的に行う方法。2つのスペクトルをバンド数に等しい次元を持つ空間内のベクターとして扱い、両者の間の「スペクトル角」を計算することで両者の類似度を判定する。

参考文献

ITT Visual Information Solutions社 ENVIオンラインヘルプ

日本リモートセンシング研究会：図解リモートセンシング、p.208、平成8年4月

高木幹夫、下田陽久：画像解析ハンドブック、p.650、平成7年11月

2.1.4 航空レーザー計測

(1) はじめに

航空レーザー計測による多時期のデータから降灰厚を求めることは、2000 年の三宅島噴火をフィールドにした先の研究において行われている。結果として、牛舎の物標を使用することで基準面を補正し、 $\pm 10\text{cm}$ の精度で降灰厚を求めることができた。

その際の課題としては、地殻変動を伴う火山活動における地表面の変化量を求めるためには、相対的不動点（標定点）となる対空標識が必要であることが判明している。

(2) 求められる対空標識の機能

レーザー計測用の対空標識は、空中写真測量で使用される型と種類の平板型が主流である。（図 2.1.4.1 参照）

しかし、平板型であると、降灰した灰そのものが平板面に堆積し、形状が変化することで正確な標高値を得ることができなくなる。

そこで、降灰が堆積しにくい形状・材質を求め、位置の計測精度を確保するのに最適な対空標識の条件についてレーザー計測のパルスモードを用いて検討を行った。

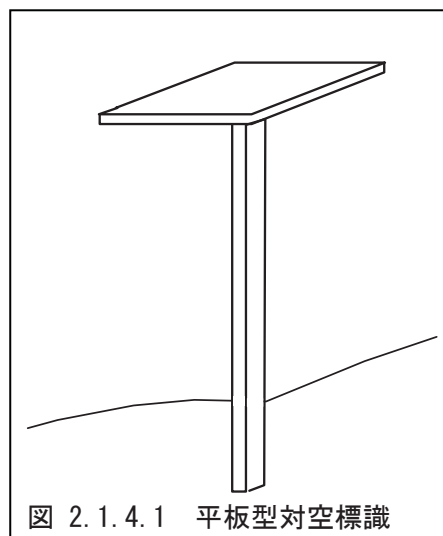


図 2.1.4.1 平板型対空標識

(3) 材質検証実験

2006 年 7 月 27 日、社屋の屋上において異なる網状の素材の平板を設置して反射・透過状況テストを行った結果、形状・材質により反射状況が異なる傾向が得られた。

また、この実験ではファーストパルス、ラストパルスともに分離されなかった。理由は後述する。

実験では長さ 91cm、一辺 1cm の木材を使用して図 2.1.4.2 で示すような枠を作成し、上部に板状の網（網状平板）を設置した。（図 2.1.4.3 設置風景参照）

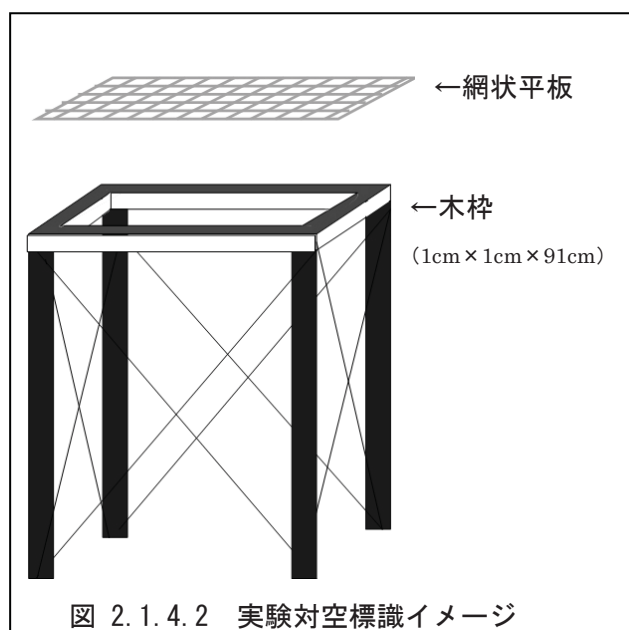


図 2.1.4.2 実験対空標識イメージ



図 2.1.4.3 設置風景

(4) 網の形状・材質による認識し易さ

図 2.1.4.3 に示したように、10 種類の形状・材質の異なる網状平板を設置し、レーザー用対空標識としての認識実験を行った（計測は、ヘリコプターに航空レーザー計測装置を搭載し、対地高度は 500m、計測密度は約 15cm を標準とした）。計測したデータを用い、標高による階層色分けで図 2.1.4.4 に示す対空標識認識画像を作成した。図中の番号は、各網状平板の No.である。地盤から分離できている計測データは、網に反応したことになるので、これを「図 2.1.4.5 対空標識認識点数」として図示した。

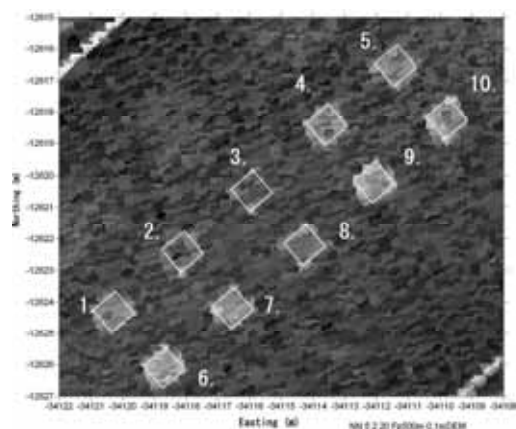


図 2.1.4.4 対空標識認識画像（標高）

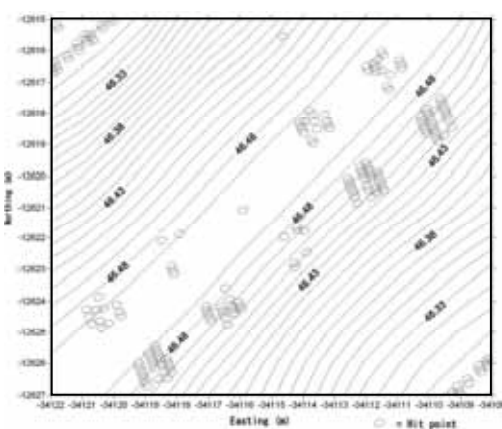


図 2.1.4.5 対空標識認識点数

図 2.1.4.5 にカウントした各対空標識の認識数、また、表 2.1.4.1 に対空標識に使用した網状平板の材質、色、形状、認識数、評価を記した。

表 2.1.4.1 各種対空標識の材質・形状・色による認識数と評価

No	網状平板の名称	材 質	色	直径 (mm)	間隔 (mm)	認識数	評価
1	格子(白)	塩化ビニール	白	3.0	50.0	12	中
2	ポリエチレンネット	ポリエチレン	茶	1.5	100.0	5	低
3	ポリエチレンネット	ポリエチレン	緑	2.0	100.0	1	低
4	繊維ネット	繊維	黒	3.0	50.0	15	中
5	ステンレスネット(10mm 格子)	ステンレス	銀	0.8	10.0	15	中
6	樹脂ネット	樹脂	白	4.0	32.0	26	高
7	網戸用の網	ポリエチレン	青	0.2	1.2	18	高
8	ゴルフネット	ポリエチレン	緑	1.0	16.0	7	中
9	ネット(白)	繊維	白	2.5	45.0	27	高
10	亜鉛ネット(4mm 格子)	亜鉛	銀	0.5	4.9	26	高

表 2.1.4.1 より、網状平板として利用するのに適しているものは、次のように判明した。

- ①色は、明るいほど認識し易い。 白>銀>青>茶>緑>黒 (同材質での比較)
- ②網材の太さが大きい、間隔が細かいほど認識し易い。
- ③材質としては、次の順位で適している。 繊維>樹脂>亜鉛>ステンレス>ポリエチレン

(5) レーザーの反射強度

レーザー計測は、XYZ の三次元データのほかに、反射してきたレーザー光の強度を記録している。ここでは、火山砕屑物の粒度や含水比による違いが反射強度としてどのように出るのかを検証した。火山砕屑物の代わりに市販している鹿沼土を用いて大粒、中粒、小粒、細粒の4種類、それぞれ Dry（自然乾燥状態）、Wet（強制湿潤状態）にした計8種類準備し、対地高度を500m、700m、900mと変えて計測した。

図 2.1.4.6 に「鹿沼土の設置状況」を示す。北西側に自然乾燥させた試料（鹿沼土）を北に行くほど細くなるよう設置し、また東南側にはジョウロを用いた散水により強制的に湿潤状態にした試料（鹿沼土）を同様に配置した。

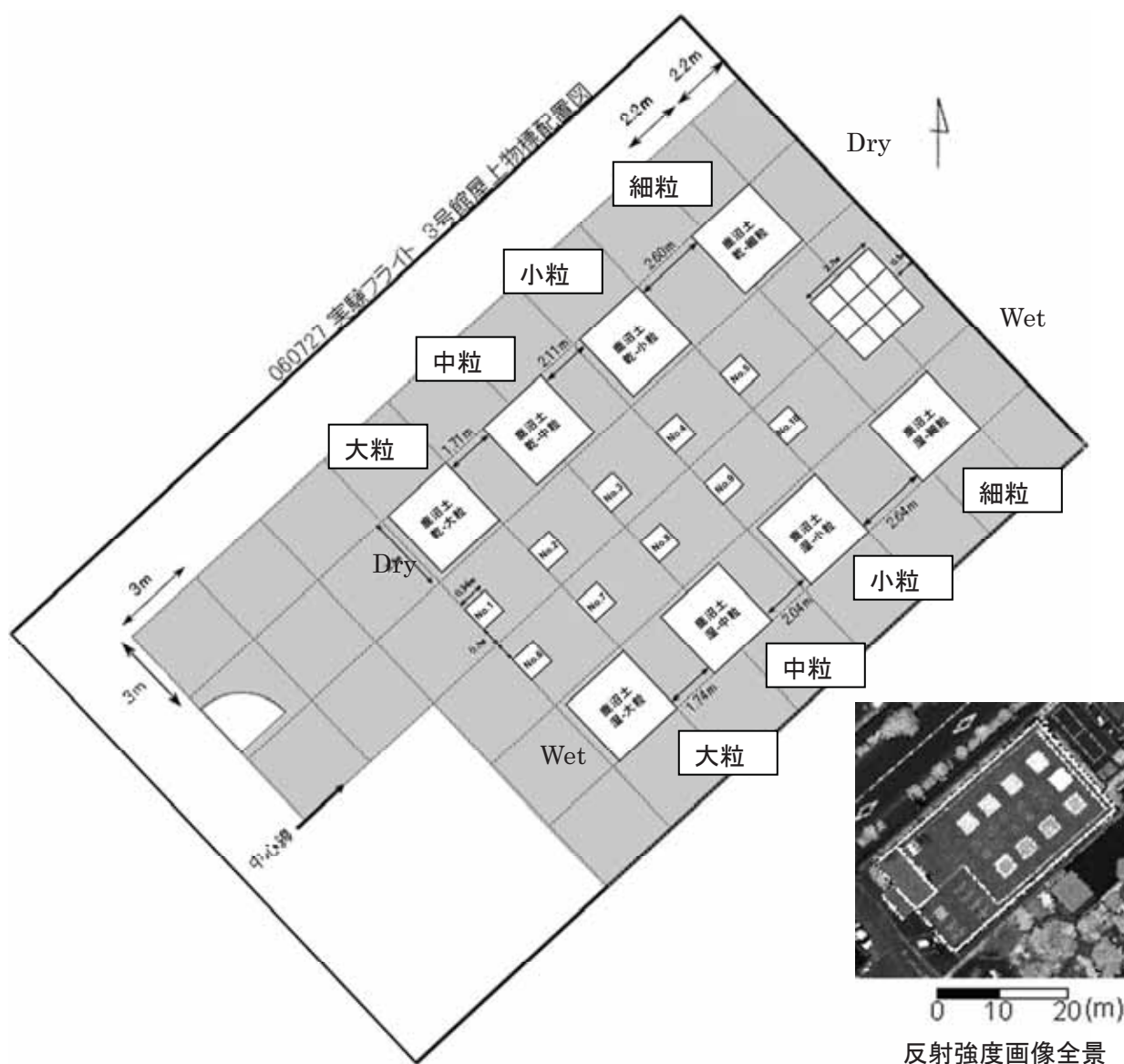


図 2.1.4.6 鹿沼土の設置状況

図 2.1.4.6 の右下には、参照用に反射強度による赤外線域（1064nm）の画像を載せた。

反射強度（Intensity）のデータは、対地高度を500m、700m、900mと変えており、これらと比較するため20cmグリッドデータにしてから8種類×3高度の計24の数値群として計算処理を行った。

1) 鹿沼土の反射強度測定

図 2.1.4.7 に鹿沼土の設置風景を示す。



図 2.1.4.7 鹿沼土の設置風景

各対地高度で計測した反射強度を右図（図 2.1.4.8～10）のように輝度の階層で表現した。対地高度が 500m から 700m に高くなると、相対距離の 2 乗に反比例して輝度が暗くなっている。ただし、対地高度 900m に対しては、減衰が大きいのか相対距離の 2 乗以上に暗いことがわかる。

表 2.1.4.2 より

(500m の往復で 1.0km、203.8)

(700m の往復で 1.4km、103.8)

(900m の往復で 1.8km、44.2)

とすると

$$1.0 \times 1.0 \times 203.8 = 203.8$$

$$1.4 \times 1.4 \times 103.8 = 203.4$$

$$1.8 \times 1.8 \times 44.2 = 143.2 \text{ (約 70\%)}$$

と計算される。

図 2.1.4.8～10 に共通して見えることは、Dry な鹿沼土の方が Wet なものより輝度値が高く、粒度の細粒なものの方が粗粒のものよりも同様に輝度値が高いということである。

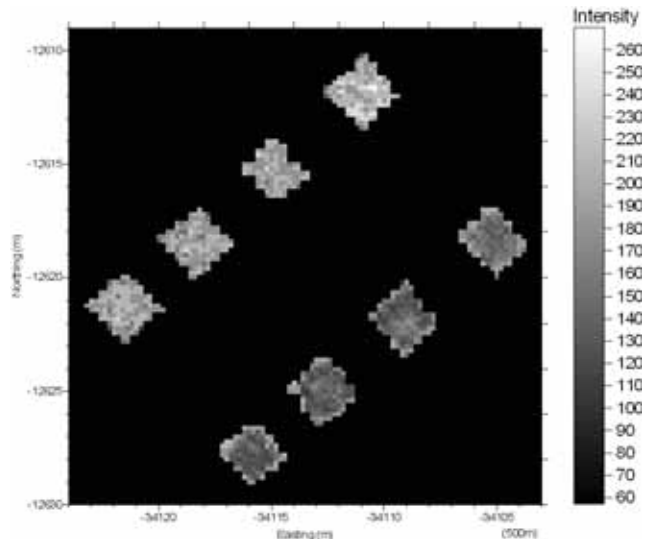


図 2.1.4.8 鹿沼土の反射強度（対地高度 500m）

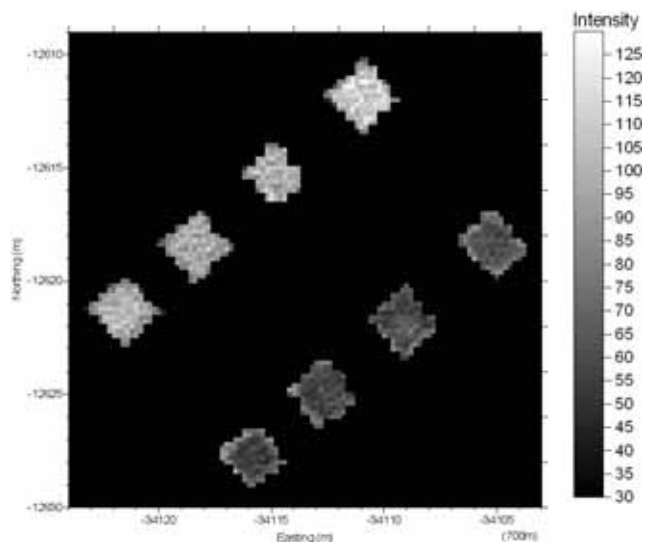


図 2.1.4.9 鹿沼土の反射強度（対地高度 700m）

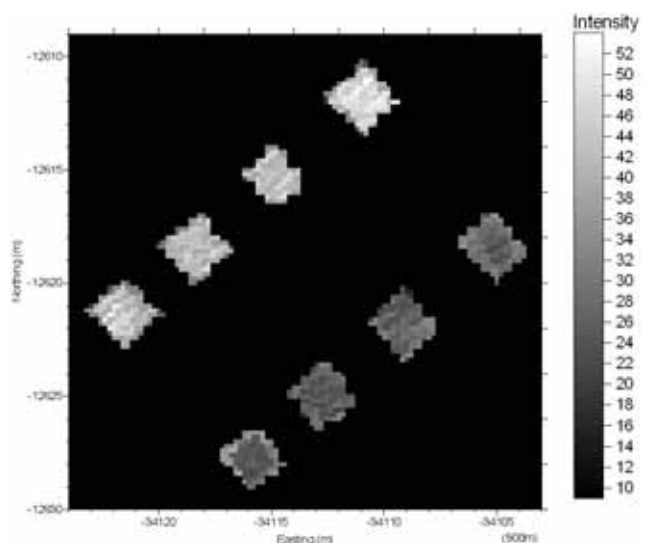


図 2.1.4.10 鹿沼土の反射強度（対地高度 900m）

2) 鹿沼土の反射強度による傾向

得られたデータから試料（鹿沼土）の反射強度の平均値を求めると、表 2.1.4.2 になる。

表 2.1.4.2 鹿沼土の反射強度（Intensity）の平均値

	Dry(自然乾燥状態)			Wet(強制湿潤状態)		
	500m	700m	900m	500m	700m	900m
細粒	203.8	103.8	44.2	160.9	67.0	28.5
小粒	189.6	95.7	41.4	154.1	64.7	27.7
中粒	184.9	91.2	40.1	144.1	61.2	26.1
大粒	190.3	93.8	40.4	153.7	65.6	28.3

可視的に判りやすくするために、縦軸に反射強度（Intensity）、横軸に粒度を置いて各対地高度の平均値を折れ線グラフにした。

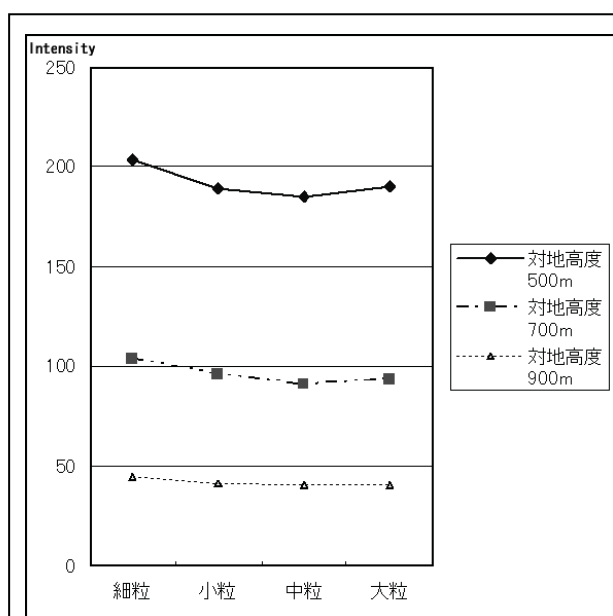


図 2.1.4.11 反射強度と粒度の関係
Dry（乾燥鹿沼土の対地高度別）

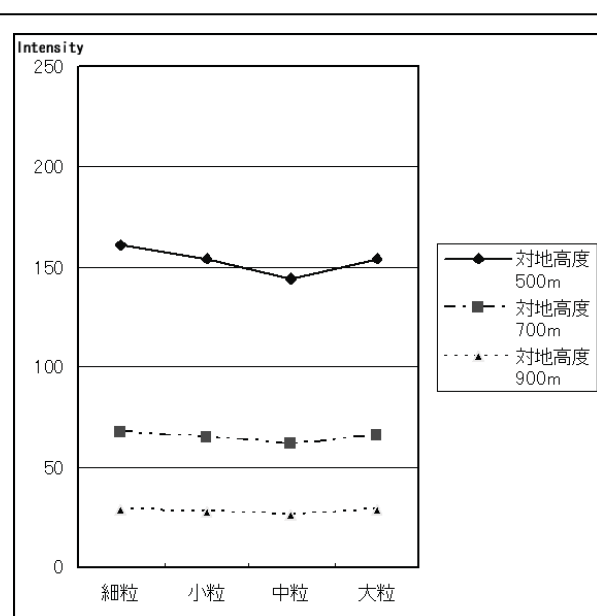


図 2.1.4.12 反射強度と粒度の関係
Wet（湿潤鹿沼土の対地高度別）

図 2.1.4.11 と図 2.1.4.12 から鹿沼土と反射強度の関係として、以下のことが推定される。

- ① 対地高度が高くなると、反射強度は弱くなる。
- ② 湿潤であるほど反射強度は弱くなる。
- ③ 大粒を除き、同じ湿潤状態であれば、粒度が細かいほど反射強度は大きくなる。

以上の傾向を得ることができたが、厳密に調査するには各粒度試料において Dry および Wet の含水比を考慮する必要があるとともに、標本数をさらに増やすことが求められる。

3) 含水比の測定

レーザー計測を行った直後に、自然乾燥状態の試料と強制湿潤させた試料について電子レンジ法で含水比を測定した。得られた各数値を、表 2.1.4.3 に示した。

表 2.1.4.3 試験試料（鹿沼土）の粒径と含水比

	粒 径	含水比(%)	
		Dry(自然乾燥状態)	Wet(強制湿潤状態)
細粒	※	10.67	143.64
小粒	5～2mm 程度	23.06	113.38
中粒	10～5mm 程度	20.46	96.19
大粒	30～15mm 程度	16.72	107.04

※ 細粒試料は、火山灰（三宅島）の粒度構成にほぼ準拠させるように、小粒・中粒・大粒の鹿沼土を破碎して作成した。
粒径及び粒度構成は、右の通り。

・砂（2～0.075mm）	65.8%
・シルト（0.075～0.005mm）	17.0%
・粘土（0.005mm～）	17.2%

表 2.1.4.3 を Dry(自然乾燥状態)・Wet(強制湿潤状態)別に粒径と含水比の関係をグラフ化すると図 2.1.4.13 のようになった。このグラフは各試料の含水状態を表わしている。Wet 場合、強制湿潤状態にするためにジョウロで水を加えた際の加減により 96.19～143.64%と値が隔たっているが、自然乾燥させた Dry の場合は、図からは細粒を除き粒径が粗い方が乾燥し易い傾向があると読み取れる。
なお、細粒については、小粒・中粒・大粒の各試料を破碎して作成した段階で、乾燥化が進んだ可能性が考えられる。

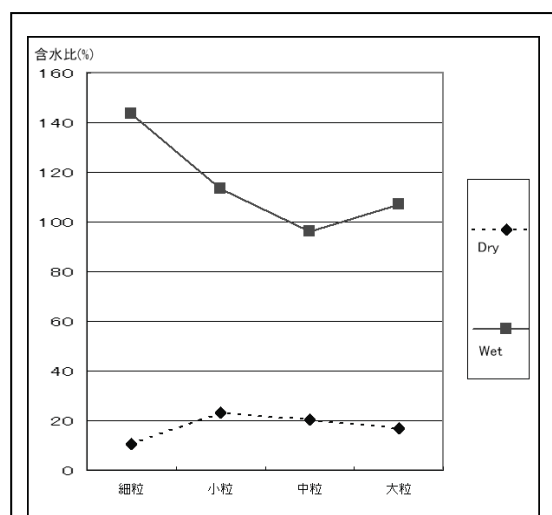


図 2.1.4.13 粒径と含水比

表 2.1.4.4 試験試料と反射強度

4) 含水比と反射強度の関係

表 2.1.4.4 は、自然乾燥状態と強制湿潤状態の試料の粒径と含水比、各対地高度別の反射強度を示したものである。地表から対地高度別反射強度と各試料の含水比をグラフ化して近似曲線式（対数）を求め、式の相関係数 R^2 を計算し、図 2.1.4.14 として表示した。

			対地高度別反射強度 (Intensity)		
鹿沼土		含水比(%)	500m	700m	900m
乾 燥 状 態	細粒	10.67	203.8	103.8	44.2
	小粒	23.06	189.6	95.7	41.4
	中粒	20.46	184.9	91.2	40.1
	大粒	16.72	10.3	93.8	40.4
湿 潤 状 態	細粒	143.64	160.9	67	28.5
	小粒	113.38	154.1	64.7	27.7
	中粒	96.19	144.1	61.2	26.1
	大粒	107.04	153.7	65.6	28.3

これによると、自然乾燥状態と強制湿潤状態の両端データで傾向をみた場合、含水比と反射強度は約 0.9 の高い相関係数で近似式を求めることができた。

図からは「2) 鹿沼土の強度による傾向」②で判明している湿潤になるほど反射強度が弱くなる傾向が確認できるが、詳細に見ると自然乾燥状態の含水比では湿潤になるほど反射強度が弱くなる傾向がよく現れている。しかし、含水比 100%以上の湿潤状態での試料は、逆の反応が現れているようにみえる。このグラフの僅かな傾きが粒径の違いによる反応を示しているのであれば含水比が同等になるように計算補正するか、また試料が同じ含水比であれば粒径の大小を判定できる可能性があることを示唆する。

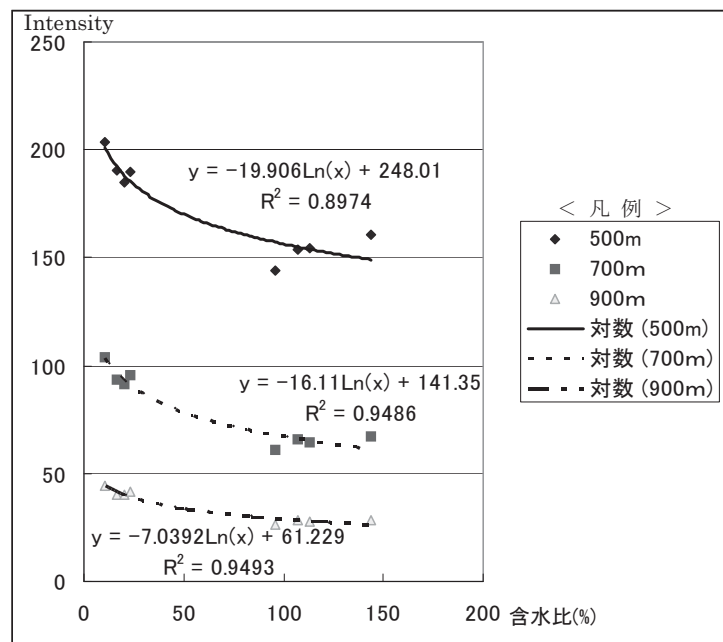


図 2.1.4.14 含水比と対地高度別反射強度の関係

各対地高度における含水比と反射強度の関係の近似式は、

- ・ Y 軸を反射強度
- ・ X 軸を含水比
- ・ R^2 を相関係数

とすると次のようになった。

500m $y = -19.906\text{Ln}(x) + 248.01$ $R^2 = 0.8974$	700m $y = -16.11\text{Ln}(x) + 141.35$ $R^2 = 0.9486$	900m $y = -7.0392\text{Ln}(x) + 61.229$ $R^2 = 0.9493$
--	---	--

結果として、対地高度ごとに計算を行えば、反射強度の違いで含水比を求めることができる。

各図表から鹿沼土の粒径、反射強度、含水比の関係として、以下のことが推定された。

- ① 含水比と反射強度の関係は、高い相関の近似式で表わすことができる。
- ② ①の近似式は、対地高度が一定であることが条件である。
- ③ 粒径の違いによる反射強度にバラツキがあり、分離できる可能性がある。

これらの結果より、高度(距離)などの条件を整える(補正する)ことで、反射強度により火山灰や火山礫の相対的な湿潤状況(含水比)を把握できるものと考えられる。また、湿潤程度が同じ場合には、粒度による違いを検出できる可能性も考えられる。今後の研究で確認したい。

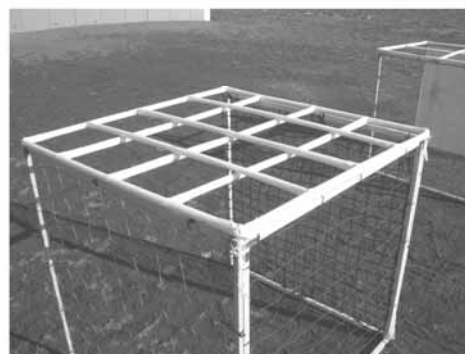
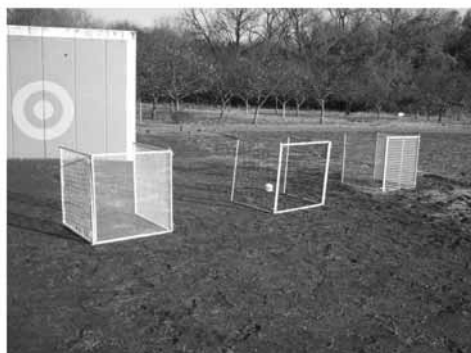
(6) フットプリントを考慮した対空標識実験

フットプリント 0.2mrad にて対地高度 500m の計測では、その直径は地上で約 10cm となる。そこで等倍、2 倍、4 倍の網目間隔を持つ対空標識を作成し、透過状況を調査した。



Distance ; 45 (cm)

$\varnothing = 2$ (cm) , L= 91 (cm) , H = 91 (cm)



Distance ; 22.5 (cm)

$\varnothing = 2$ (cm) , L= 91 (cm) , H = 91 (cm)



Distance ; 11.25 (cm)

$\varnothing = 2$ (cm) , L= 91 (cm) , H = 91 (cm)

2007/01/30 am.

図 2.1.4.15 野外対空標識設置状況

野外実験に使用したフットプリント用の対空標識は、素材が紙で直径 2 cm、間隔はそれぞれ 11.25cm、22.5cm、45cm の 3 種類準備した。

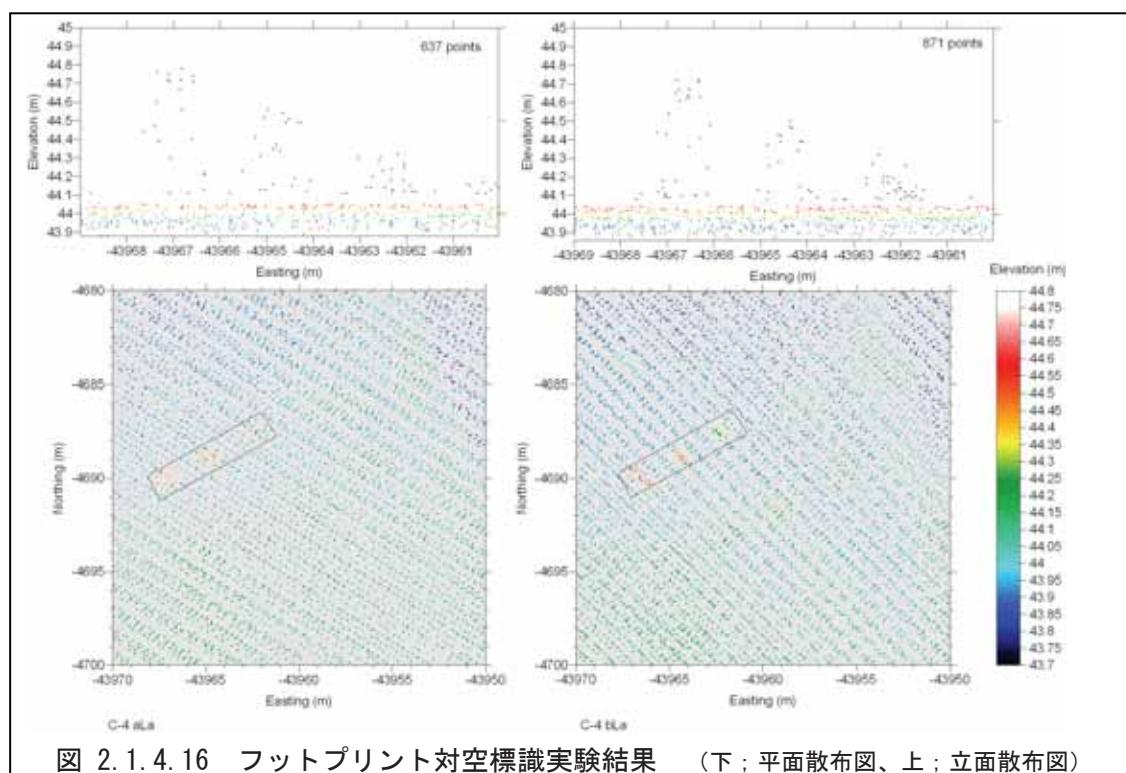


図 2.1.4.16 フットプリント対空標識実験結果 (下; 平面散布図、上; 立面散布図)

実験結果を散布図にすると、図 2.1.4.16 のようになった。立面散布図の左側は間隔 11.25cm のもので、中央は 22.5cm、右側は 45cm の対空標識である。ここで重要なことは、間隔と同じ長さ分、位置が低く計測されていることである。

このことは、網状対空標識の形状の影響で乱反射して計測されるために位置関係が低く算出されていると仮定すると、右図 (図 2.1.4.17) のようなモデルとなる。

図のように、最初に当たって反射していくパルスよりも乱反射を繰り返して返って行くパルスのほうが光量は大きくなっていることが推定された。

そして、多重反射が伴う場合は、網の間隔や地表からの距離がある程度離れていないと、最初の反射パルスと後からくる反射のパルスを (分離せず) 統合したパルスとして認識し、計測距離としてしまう。

この実験から、透過型対空標識の作成にあたっては、以下の点に留意して作成することが重要であると判明した。

- ① 網の形状は、多重反射を起こさない工夫が必要である。
- ② パルスが分離できるような距離 (高度差) で設置する。
- ③ フットプリント形状と網目間隔による作用の効果を考慮する。

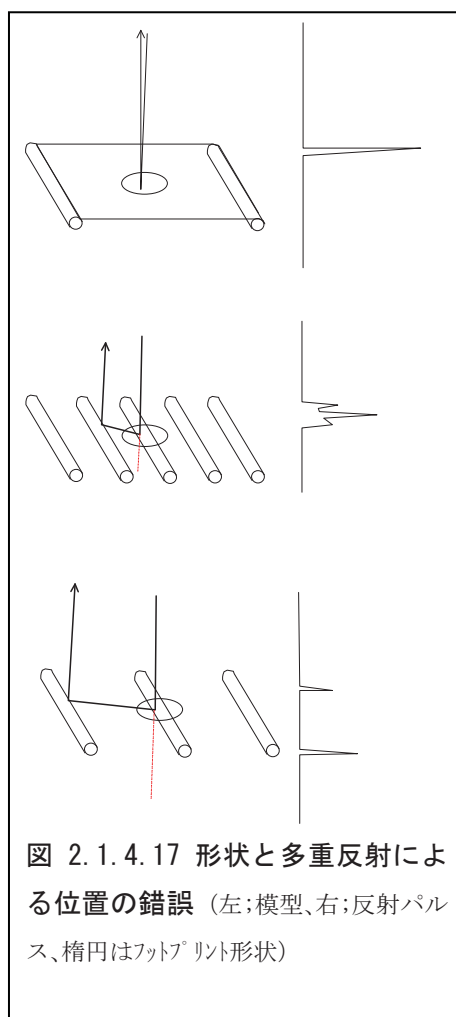


図 2.1.4.17 形状と多重反射による位置の錯誤 (左; 模型、右; 反射パルス、楕円はフットプリント形状)

(7) 既存の構造物を使用した対空標識実験

ここでは、既存の構造物による透過型対空標識実験結果を記す。実験に使用したのは、図 2.1.4.18 に示すブランコの軸パイプである（対地高度 500m、20cm 間隔、ファーストパルス、ラストパルス同時計測。）パイプ（円筒）の各形状の数値は、図中に記す。



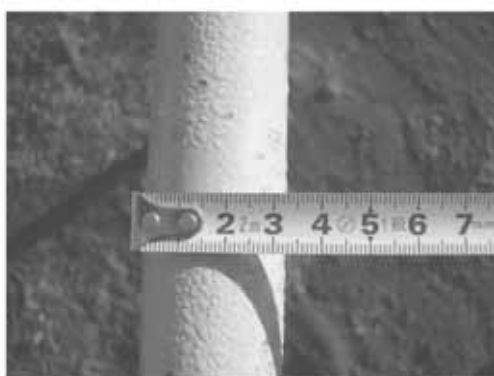
$\varnothing = 8.5 \text{ (cm)}$, $L = 500 \text{ (cm)}$, $H = 250 \text{ (cm)}$



$\varnothing = 3 \text{ (cm)}$, $H = 61 \text{ (cm)}$



$\varnothing = 8.5 \text{ (cm)}$



$\varnothing = 3.3 \text{ (cm)}$



$H = 250 \text{ cm}$

図 2.1.4.18 透過型対空標識として使用した既存構造物（ブランコ）

実験結果を図 2.1.4.19 に「ファーストパルスの立面散布図」、図 2.1.4.20 に「ラストパルスの立面散布図」として示した。

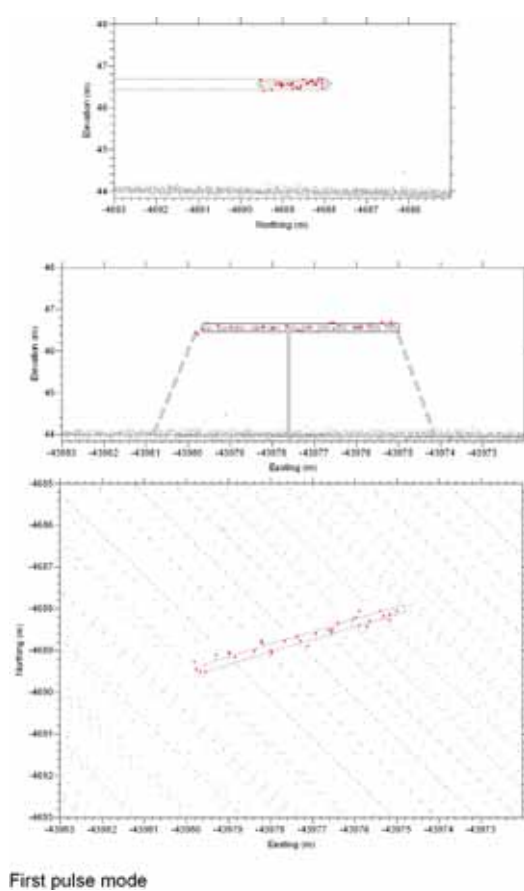


図 2.1.4.19 ファーストパルスの立面散布図

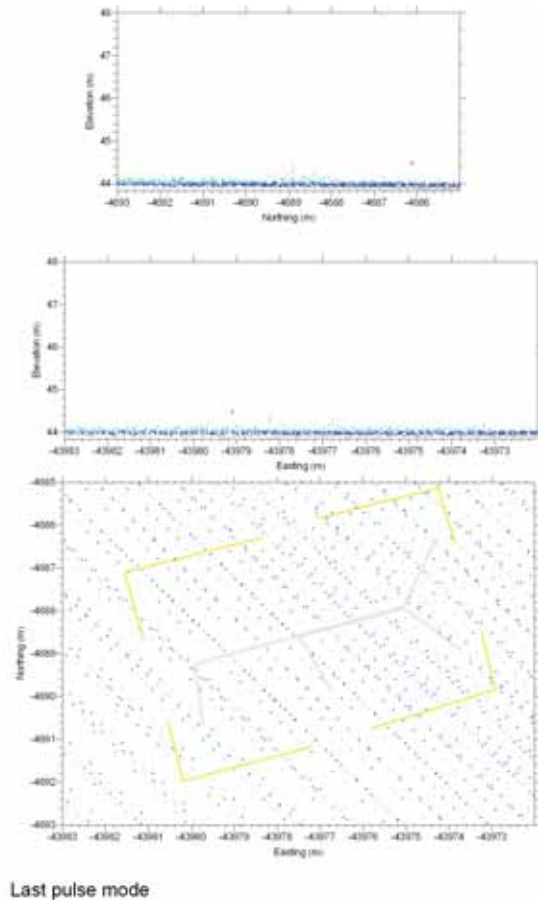


図 2.1.4.20 ラストパルスの立面散布図

立面散布図より、このブランコの場合、回転軸の円筒の直径は 8.5cm であるが、ファーストパルス、ラストパルスがよく分離できていることがわかる。しかし、ブランコの周囲の柵ではファーストパルスは認識できていない。1 点のイレギュラーが存在しているが、これはファーストパルス、ラストパルスとも計測が丁度真芯で捉えたものと考えられる。

この実験から、次の事が確認できた。

- ① ファーストパルスデータとラストパルスデータを精度よく分離するためには、地盤との隔離をとる必要がある。(実験では、対地高度 500m、高さ 2.5m、直径 8.5cm で分離できている)
- ② 高さ 61cm、直径 3cm の柵(鉄棒)などは、ファーストパルスでの認識はできない。
- ③ 斜めおよび垂直に立つ支柱などは、ファーストパルス、ラストパルスとも認識できない。



図 2.1.4.21 ブランコデジタルカメラ画像

(8) まとめ

航空レーザー計測を用いて、降灰厚を効率良く求める目的で試験（実験）を行った結果、次のことがわかった。

①対空標識の留意点

課題とされていた相対的不動点（標定点）となる対空標識として必要な機能を持たすには、以下の項目に留意すれば可能となる。

- ・対空標識の表面の色を白色系にする。または、蛍光塗料などを塗ることにより反射しやすくする。
- ・ファーストパルス、ラストパルスの同一パルスの分離には、網状平板と地盤（地表）との距離を十分にとる。（0.91m未満は、不可。2.5mは、可。樹木調査の経験から約 2.4m以上必要）
- ・実験と異なる高度では、距離に比例して網状平板の形状を変える。
- ・実験と異なる計測密度での利用では、密度間隔に比例して大きさを変える。
- ・多重反射を起こしやすい形状を避ける。
- ・材質は、野外に設置するため耐久性（熱、紫外線、風からの保護）が重要である。

②対空標識の形状

対空標識の形状について、実験では格子型や1ライン軸のパイプで行っている。しかし、1ライン軸の場合、中心座標を求めにくい。実際の利用の際には十字型や米字型などにして精度をあげることができる。

③今後の可能性

火山の造山運動をも考慮したレーザー計測による降灰調査に適し、対空標識として有効な材質と形状が見えてきた。今後は、実際に製作し運用することで生じる不具合に対応し、改良していくことで災害を事前に予測するためのデータ収集手法として利用可能となる。また、火山砕屑物（火山灰・火山礫）の状況・性質を調査するのに、反射強度（Intensity）が利用できる可能性がある。鹿沼土による試験結果より、高度(距離)などの条件を整えることで、反射強度により火山砕屑物の相対的な湿潤状況（含水比）は把握できそうである。また、湿潤程度が同じ場合には、粒度による違いを検出できる可能性もある。調査研究を継続することで、利用可能な手法を確認すべきであると考ええる。

参考文献

- 山越隆雄・笹原克夫・田島靖久・下村幸男・秋山幸秀・井上徹（2005）：噴火中の火山における火山灰堆積厚調査手法について、平成 17 年度砂防学会研究発表会，pp.364－365
- 秋山幸秀(2006)：Air-borne LiDAR による火山調査の応用事例，先端測量技術 No.89・90（合併号），pp.92－103

2.2 現地計測技術

火山灰堆積厚の現地計測技術として、大きく手動計測法と自動計測法があり、自動計測法はさらに既往機器を用いる方法と新たな専用機器を用いる方法とがある。これらは、地上におけるポイントでの計測になるが、その反面、直接的に近い形で火山灰堆積厚を測定するために、他手法に比して高精度であること、天候等に左右されにくいこと、リアルタイム計測への展開が容易なことなどの特徴を期待できる。また、コストの軽減により多点観測を図り面的把握への拡張も可能となる。

本節では、これらの手法について取りまとめを行って適用性等に関する評価を行った。

2.2.1 手動計測技術

降灰を地上に設置するカップ等で受けて堆積厚を計測する方法は、すでに桜島をはじめ各火山で行われている。ここではそれらの事例を収集してレビューとして示す。

(1) 桜島

①鹿児島県消防防災課による計測事例

鹿児島県消防防災課により、鹿児島県内全域に 59 箇所（うち桜島島内 14 箇所）に大型ポリバケツが設置されており、原則月末を採取日として観測を行っている（図 2.2.1.1、図 2.2.1.2）。



図 2.2.1.1 降灰観測容器写真
(左：中身、右：正面)



図 2.2.1.2 降灰観測容器の設置状況全景



②鹿児島気象台による計測事例

鹿児島気象台により、鹿児島市内の市街地にバットを設置（図 2.2.1.3）して、降灰観測を行っている。



図 2.2.1.3 観測に使用しているバット（左）と設置状況全景（右：白丸が設置位置）

③大隅河川国道事務所による計測事例

国土交通省・大隅河川国道事務所により、桜島島内において火口から約2～4kmの距離の範囲に降灰を受けるドラム缶を23箇所設置している(図2.2.1.4)。ドラム缶は直径約50cmで1/2～2/3ほど地面に埋めてあり、中に積もった火山灰を回収しやすいように中にビニール袋が入れられている。受灰高は地面から30～50cmである。

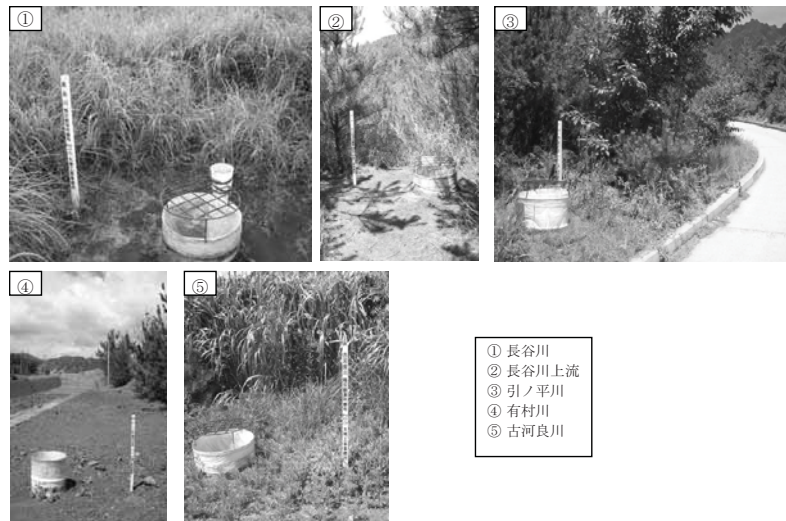


図 2. 2. 1. 4 ドラム缶による降灰観測所地点の現況

(2) 有珠山（2000年噴火時）

①有珠山噴火火山灰合同調査班による計測事例

2000年3月31日の有珠山噴火開始を受けて、有珠山噴火火山灰合同調査班（日本大学・国立環境研究所・道都大学・東京都立大学（現首都大学東京）・上越教育大学・北海道地質研究所）を組織し、4月1日～4月8日に現地において火山灰調査が行われた。まず、降灰状況を長期的に観測するための火山灰トラップを、洞爺湖周囲から支笏湖周辺に至る約50地点に設置した(図2.2.1.5)。また、洞爺湖周辺から支笏湖、札幌に至る地域において約70箇所です一定面積当たりの火山灰堆積量を測定した。

参考として、日大関係者らが得た経験を元に大野がまとめた「簡易火山灰トラップ」設置レシピを図2.2.1.6に示し、問題点として示されている項目を併せて列挙する。

(参考 URL : http://www.geo.chs.nihon-u.ac.jp/home_j/04asama/ash-trap.html)



図 2. 2. 1. 5 火山灰トラップ設置状況¹⁾
(紙コップと洗面器が設置してある)

(<http://www.geo.chs.nihon-u.ac.jp/tchiba/usu/volume.html>)

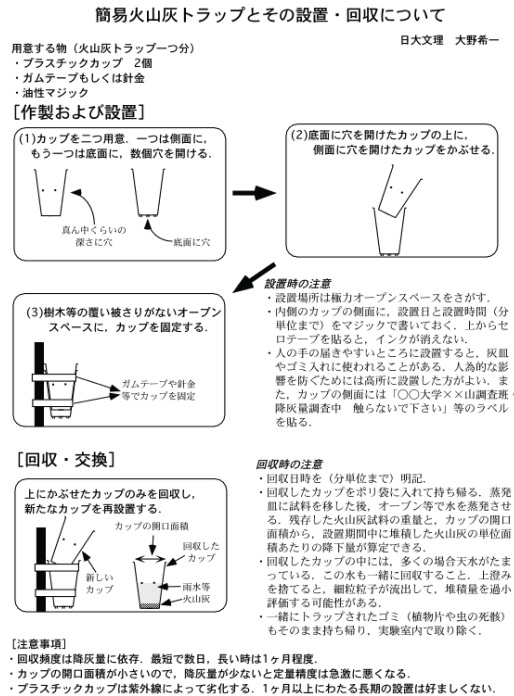


図 2. 2. 1. 7 簡易火山灰トラップ設置レシピの例 ²⁾

【簡易火山灰トラップの問題点】

- ・ カップは開口面積が小さいため、降灰量が少ないと測定誤差が大きくなる
- ・ 粒径の大きなものは測定できない（うまく捕らえられない）
- ・ カップが劣化しやすいため、長期観測には不向き

②総合観測班地質グループ ³⁾

2000年3月31日13時07分からの有珠山噴火を受けて、総合観測班地質グループ（地質調査所、北海道大学、道立地質研究所、道教育旭川分校）が降灰分布と降灰量測定のために降灰調査を行った。（参考 URL : <http://www.gsj.jp/Hokkaido/usu-HP/ash/ash0331V.html>）

(ア)定面積試料採取

- ・ ごみステーションの蓋の上に堆積した降灰を面積測定（49cm×58cm）して採取
- ・ キャンプ場のブロックの上に堆積した降灰を面積測定（13cm×73cm、13cm×79cm、12.5cm×79cm、12.5cm×60.5cm）して4サンプル採取
- ・ 残雪がある場所では、折れ尺などで30cm×30cmの面積を測定した上で、雪の上に堆積した降灰を雪ごとプラスチック製のサンプル袋に採取

(イ)乾燥重量の測定方法

- 大きいホーロー製（425℃以上で金属に接合された磁化又はガラス質の無機コーティング）容器やビーカーに、雪と共に降灰試料を入れ、ホットプレート上で雪を溶かす
- 灰が完全に下に沈むまで、半日程度放置する
- 透明な上澄み部分の水を捨てる
- あらかじめ乾燥重量を測定したビーカーに試料を移す
- 恒温器の中に入れ、105℃で加熱する
- 完全乾燥したら、外に出して冷ます
- ビーカーごと精密はかりで重量を測定する
- ビーカー事態の重量を差し引いて、降灰乾燥重量を求める

※なお、(ア)(イ)のそれぞれの手法において得られた総降灰量の値は、ほとんど同じであり、調査結果は整合的であったと報告されている。

(2) 浅間山（2004年噴火時）

～東京大学地震研究所^{4), 5)}による調査～

2004年9月1日20時02分、浅間山が爆発音とともにマグマ噴火を開始したのを受け、東京大学地震研究所は9月2日未明より噴出物調査を行った。その後もすべての噴火について噴出物分布調査を噴火中から直後（噴火直後の当日ないし翌日）にかけて行った。特に9月後半～10月末は東京大学地震研究所浅間火山観測所に常駐し噴火に備えた。このような継続調査により、噴火毎の火山灰採取に成功した。しかし、いずれの噴火も層厚を計測できるほど火山灰が堆積していなかったため、定面積採取も合わせて行った。

(ア)降灰分布調査方法

集灰器として直径30～40cmのプラスチック製容器（図2.2.1.7）を、山頂火口から半径約4～12kmの北-東-南の方向に計約60個設置した（図2.2.1.8）。以下に調査法を要約した。

- ・集灰器中には粉塵やそれまでの降灰などが風や車により巻き上げられ混入するため、なるべく道路から離れ、上空が開放された地点に設置した
- ・噴火のない時も定期的（2～3日に1回）に容器清掃を行った
- ・粉塵等が混入しやすい地点は適宜廃止し、適切な場所に再設置した
- ・集灰器は降雨や台風の通過後にはすべて掃除した
- ・状況に応じて人工物等の上に堆積した噴出物も採取したほか、数試料については地域住民の方々からも提供してもらった
- ・上空に遮蔽物のない舗装道路、郵便ポスト、自動販売機、橋の欄干、ベンチなどの平滑面を持つ人工構造物上に堆積した火山灰は定面積採取を行った

(イ)データの精度

何度かの噴火に関しては、噴火後1日以内に降雨があったため、やや時間をおいて採取した遠方のデータには、降雨による集積又は流失の誤差が大きいと考えられる。

（袋に石を入れて重石にしている）

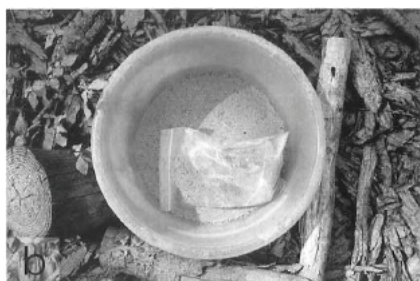


図 2.2.1.7 集灰器として用いた容器の例



図 2.2.1.8 試料回収容器の地点（黒丸）分布

(3) 雌阿寒岳ほか

～産業技術総合研究所らによる調査～

雌阿寒岳や北海道駒ケ岳において、産業技術総合研究所・北海道大学・道立地下資源調査所（現道立地質調査所）・気象庁などにより簡易降灰量計を用いた観測が実施されている。（1996 年 11 月：雌阿寒岳の小噴火、1998 年 10 月；北海道駒ケ岳、1998 年 11 月：雌阿寒岳，図 2.2.1.9）⁶⁾。

（参考 URL：http://www.gsh.pref.hokkaido.jp/topics/meakan2006/meakan2006_kohai.html）

図 2.2.1.10 は、北海道地域火山機動観測班による北海道駒ケ岳の緊急機動観測（平成 8 年 3 月 5 日）⁷⁾時の 1m²当たりの火山灰量を測るためのサンプル採取状況である。

（参考 URL：<http://www.kishou.go.jp/camp/0007.pdf>）



図 2.2.1.9 北海道立地質調査所の定面積
サンプリングの様子⁶⁾



図 2.2.1.10 雪上に堆積した火山灰を
定面積サンプリングしている様子⁷⁾

(4) 海外での事例

①アメリカ地質調査所（USGS）⁹⁾

アメリカ地質調査所（USGS）では、セントヘレンズ火山においてバケツを用いた火山灰採取を行っており、2004 年 10 月 4 日と 11 月 4 日の設置および採取状況が公開されている（図 2.2.1.11）。

（参考 URL：http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/MSH/Images/MSH04/ash_collection_images.html）

(ア)設置条件

写真から判断できる火山灰採取容器設置に適した条件として、以下が挙げられる。

- ・ オープンスペースであること
- ・ 三脚により、地面から約 50cm～100cm の高さを確保すること
- ・ バケツを二重にして、上に重ねたバケツの中身を回収して効率化をはかる



図 2.2.1.11 三脚と二重に重ねたバケツの設置および回収状況⁹⁾

(イ)定面積採取

バケツを用いた採取法のほかに、既存構造物を利用した底面積採取（図 2.2.1.12）や、雪上の火山灰を約 30cm 四方面積で雪ごと採取する方法を用いている（図 2.2.1.13）。



図 2.2.1.12 既存構造物の底面積採取



図 2.2.1.13 雪上火山灰の底面積採取

②アラスカ火山観測所 (AVO) ¹⁰⁾

(ア)火山灰採取方法

比較的固く平滑な既存構造物を利用して定面積採取する(図 2.2.1.14) こととし、雪上に堆積した火山灰を雪と共に定面積採取する(図 2.2.1.15) 方法、および適当な容器を設置し、容器内に溜まった火山灰を回収する(図 2.2.1.16) 方法を採用している。



図 2.2.1.14 固い台の上で火山灰の定面積採取の状況(左)と回収の様子(右)



図 2.2.1.15 雪にパッキングされた火山灰を雪ごと採取している

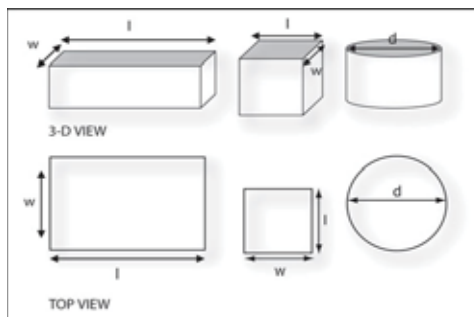


図 2.2.1.16 適切な採取容器の例

(イ)容器設置条件

採取に適した位置条件は以下が挙げられる。

- ・ 上空が開放されている
- ・ 木や障害物から離れている
- ・ 雪ごと採取する場合は、噴火前に雪上がきれいだったことが前提となる

(ウ)火山灰採取時の記録事項と留意事項

- ・ 時間、位置、気象条件(広域・局地的の両方)を記録する
- ・ 構造物を利用した場合は、その材質や面積を記録する
- ・ 採取物はジップロックのようなプラスチック製袋に入れて封をし、袋を二重にする
- ・ その場で堆積厚が測れる場合は、0.5mm 単位程度で測定しておく

(エ)火山灰採取に必要な物品

- ・ プラスチック製の袋、・ 定規、巻尺、折れ尺類、・ 油性ペン(ビニール袋に書くため)
- ・ ヘラ、パテ、ナイフ類、・ 容器、・ 記録用紙

③伊・エトナ火山における半自動サンプリングシステム^{11), 12)}

イタリア・シチリア島のエトナ火山では、2001 年と 2002～03 年に活動頻度が上がって引き続いた火山灰の噴出を受け、半自動サンプリングシステム (Semi-Automatic Ash Collector) を開発している。

(参考 URL1 : <http://www.citiesonvolcanoes4.com/abstracts/numerados/264.doc>)

(参考 URL2 : <http://www.citiesonvolcanoes4.com/abstracts/numerados/273.doc>)

(ア)降灰量測定器の概要

- ・ 降下火山灰は、自動蓋付きの漏斗状容器に流され、小さい開口ボトルに回収される
- ・ ボトルは、シャフトに接続している丸い金属回転板の外側に固定されている
- ・ 16 のボトルを備えた回転板は、機械で位置を操作する
- ・ このシステムは小制御装置で管理され、適したソフトウェアを用いてパソコンでプログラムする
- ・ パラメータは、主に開始日時及び 2 つのボトルの設置時間 (蓋が開いている時間)

(イ)降灰量測定器の構成

火山灰受容器、電子ロードセル、デジタル測定器で構成される。これらは小型ボックスに収納されるため車で容易に運搬可能で、火山灰が降下する任意の地点に設置することができる。

(ウ)データ伝送

電子ロードセルにより採取した火山灰の重量を測定して、デジタル測定器により変換・表示・出力される。測定されたデータは、カタニア (山頂から 22km の地点) にあるデータ回収センターに無線伝送して処理・保存される。

現時点ではまだ試行段階ではあるが、今後、火山灰リアルタイムモニタリングシステムの構築及び火山灰飛散モデルを確立するための入力データの収集が期待される。

④英国メーカーによるフリスビーゲージ¹³⁾

空中の粉塵分析等を目的とした空中浮遊物採集容器がイギリスのメーカーにより販売されており (図 2.2.1.17)、火山灰採取への応用が考えられる。

特徴としては、鳥の衝突防止用の金属枠がついていること、三脚による自立して安定させている。以下にそれぞれの容器の概略諸元を以下に示す。

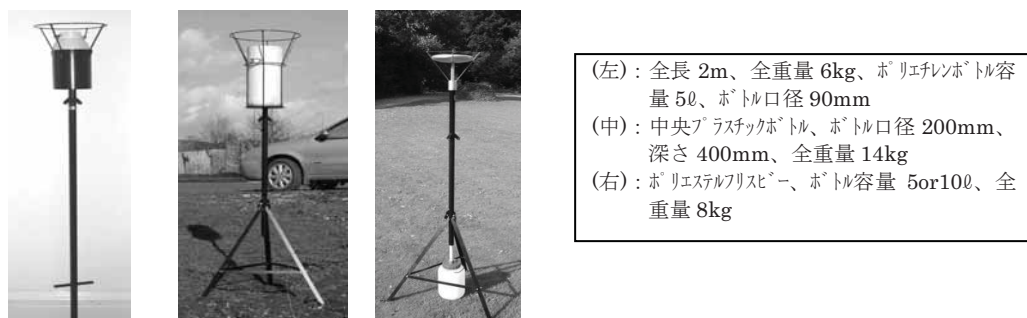


図 2.2.1.17 空中浮遊物採集容器の例 (参考 URL : <http://www.hanby.co.uk/>)

(4) 事例のまとめ

これまでに挙げ主な手動計測の事例を下表に整理した。

表 2.2.1.1 事例別にみる簡易降灰量計の諸元

		桜島	有珠火山	浅間火山	セントヘレンズ	アラスカ火山観測所	気象庁(雨量計)	フリスビー ゲージ
容器	種類	・ポリバケツ ・ドラム缶 ・バット	・紙コップ ・プラスチックコップ ・洗面器	・洗面器	・バケツ	・四角柱 ・円柱	・円柱	・フリスビー ・ボトル
	口径	(70-80)	(7-8)	(30-40)	(30)	凹凸のない容器	—	9-20
	口面積	(240)	(25)	(110)	(100)		—	—
	高さ	(100)	(10)	(10)	(40)		—	40
	設置高	(100)	(100)	(10)	(50-100)		—	200
	耐久性	○	△	○	○	—	○	○
定面積採取	その他	・中に袋を入れる	・台は三脚	・重石を入れる	・バケツを二重 ・三脚	・回収時、袋を二重	・地面に草や ・砂利を敷く	・三脚
	実施	—	○	○	○	○	—	—
	状況	—	・構造物 ・雪上	・構造物	・構造物 ・雪上	・構造物 ・雪上	—	—
	面積	—	50×50 10×80 30×30	30×30 ～ 100×100	30×30	40×40 ～ 50×50	—	—
地点数		ポリバケツ:59地点 ドラム缶:23地点	容器:50地点 定面積:70箇所	60地点	—	—	—	—
周辺状況		・上空開放	・上空開放	・上空開放 ・道路から離れる	・上空開放	・上空開放 ・障害物から離れる	・上空開放 ・吹き溜まりを避ける ・跳ね返りを避ける	—
回収頻度		毎日(バット)	数日～1ヶ月	1～3日	—	—	—	—
使用物品 (特記されている物 品のみを挙げた)			・ガムテープ ・針金 ・油性マジック ・ポリ袋			・プラスチック製の袋 ・定規、巻尺、折れ尺類 ・ヘラ、パテ、ナイフ類 ・油性マジック ・容器 ・記録用紙		

* () 付き数値：具体的な記載はないが、写真から判断した値で、単位はすべて[cm]

* —：記載なしあるいは該当するものがない事例

* 耐久性：相対的な比較による判断

参考文献

- 1) 日本大学文理学部地球システム科学科:有珠山2000年噴火 現地調査速報, 有珠山噴火による降下火山灰量調査(第2報).
<http://www.geo.chs.nihon-u.ac.jp/tchiba/usu/volume.html>
- 2) 日本大学文理学部地球システム科学科: 2004年浅間山噴火(速報), 降灰調査に関するTips.
http://www.geo.chs.nihon-u.ac.jp/home_j/04asama/ash-trap.html
- 3) 総合観測班地質グループ(地質調査所, 北海道大学, 道立地質研究所, 道教育大旭川分校): 有珠火山2000年噴火情報, 2000年3月31日13時07分～の噴火による降灰分布と降灰量.
<http://www.gsj.jp/Hokkaido/usu-HP/ash/ash0331V.html>
- 4) 嶋野岳人・飯田晃子・吉本充宏・安田 敦・中田節也:浅間火山2004年噴火噴出物の岩石学的検討, 火山第50巻, pp.315-332, 2005.
- 5) 吉本充宏・嶋野岳人・中田節也・小山悦郎・辻浩・飯田晃子・黒川将・岡山悠子・野中美雪・金子隆之・星住英夫・石塚吉浩・古川竜太・野上健治・鬼沢真也・新堀賢志・杉本健・長井雅史: 浅間山2004年噴火の噴出物の特徴と降灰量の見積もり, 火山第50巻, pp.519-533, 2005.
- 6) 北海道立地質研究所: 地質トピックス, 降灰調査.
http://www.gsh.pref.hokkaido.jp/topics/meakan2006/meakan2006_kohai.html
- 7) 気象庁広報室編集: 気象庁キャンペーン資料12-7, No.253, 平成12年4月10日.
<http://www.kishou.go.jp/camp/0007.pdf>
- 8) 気象庁: 気象観測の手引き, 平成10年9月.
http://www.kishou.go.jp/known/kansoku_guide/tebiki.pdf
- 9) U.S. Geological Survey: Mount St. Helens, Washington Ash Collection Images 2004 to Current.
http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/MSH/Images/MSH04/ash_collection_images.html
- 10) The Alaska Volcano Observatory: PROCEDURES FOR COLLECTING AND RETURNING ASH SAMPLES FROM MODERN VOLCANIC ERUPTIONS.
<http://www.avo.alaska.edu/ashfall.php>
- 11) D. Andronico, M. Coltelli, G. Conti, A. Cristaldi: A Semi-Automatic Ash Collector, CITIES ON VOLCANOES 4, SYMPOSIUM II: ASH & AEROSOLS.
<http://www.citiesonvolcanoes4.com/abstracts/numerados/264.doc>
- 12) D. Andronico, F. Ferrari, R. Platania, S. Rapisarda: Monitoring the Ash and Fine Lapilli Fallout at Mt. Etna, CITIES ON VOLCANOES 4, SYMPOSIUM II: ASH & AEROSOLS.
<http://www.citiesonvolcanoes4.com/abstracts/numerados/273.doc>
- 13) IAN HANBY - CHARTERED ENGINEER: AIRBORNE DUST MONITORING EQUIPMENT
<http://www.hanby.co.uk/>

2.2.2 自動計測機器（既往機器）

(1) 調査研究の概要

①調査研究の目的

現在、主として積雪深を計測することを目的として開発・実用されている既往の計測機器（以下、センサ）について、火山灰堆積厚計測への応用という観点から具備すべき条件などについての検討を行い、課題の抽出を行う。

②調査研究の内容

調査研究内容は、下記の通りとする。

- a. 火山灰堆積厚計測において具備すべき技術要件を整理し、既存のセンサによる火山灰堆積厚観測手法およびシステム化技術を研究する。
- b. 既存センサを火山灰堆積厚計測に応用する場合の改良点および改良方法を研究する。

(2) 調査研究の詳細

①センサ条件の検討

降灰深を計測する場合の計測条件について検討する。

(a)計測目的

計測目的は、火山灰監視体制に準じて、以下に分類される。

- A リアルタイムの警戒避難体制への情報提供のための計測
- B 堆積後の2次災害発生規模シミュレーションのための計測

(b)計測条件

計測目的に必要なとなる計測条件を整理し、表 2.2.2.1 に示す。

表によれば、計測目的 A、B とともに機器として求められる基本的条件は同様で、リアルタイムの必要性のみが差異となるが、一般的機器はリアルタイム伝送のための外部出力等を具備していることが多いため、特に上記の目的別に機器を区分する必要はない。

表 2.2.2.1 計測機能要件の一覧表

	警戒避難体制への情報提供	2次災害発生シミュレーション
計測対象	火山灰および降雪の堆積厚	同左
測定範囲	0～5m	同左
リアルタイム性	要	不要
観測周期	リアルタイム性を確保するため連続測定	リアルタイム性不要につき隔測測定
計測精度	判定に利用できる精度	同左
分解能	1cm を目標	同左
耐環境性	霧、降雪、強雨、強風時に計測可能	同左
耐腐食性	火山ガスで腐食しないこと	同左
供給電源	溪流の上流部等に設置する場合は、独立電源（太陽電池等）が必要	同左

②既存センサ

一般的に、降灰の発生検出もしくは堆積厚計測を行うための専用センサは存在しないため、積雪深の計測用として実用化されている下記のセンサを火山灰堆積厚計測へ応用することが考えられる。

(a) 距離計測タイプ

基準位置から積雪面までの距離を計測するセンサで、図 2.2.2.1 に示すように A から E までの方式が、実用化されている。

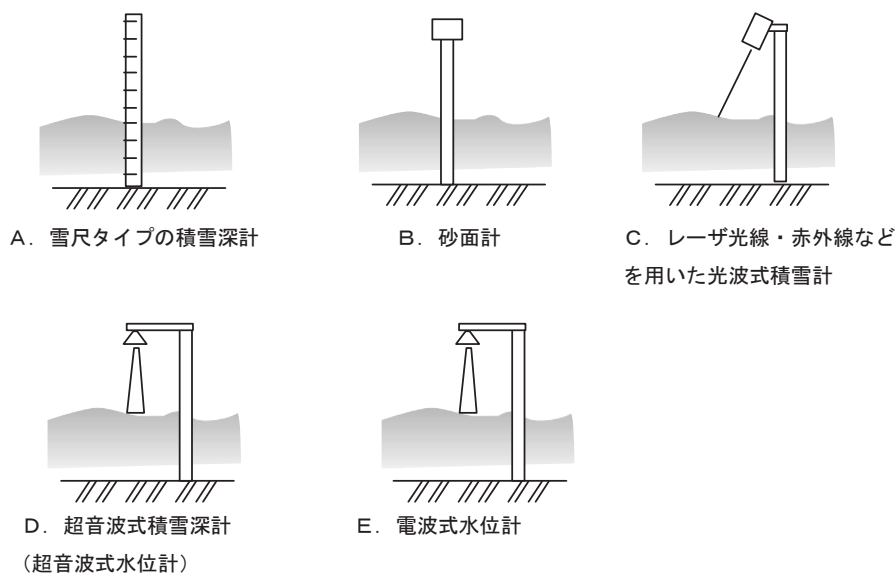


図 2.2.2.1 距離計測タイプの測定原理図

(b) 重量計測タイプ

感圧部に積もった雪の重量を計測して、積雪深に換算するセンサが実用化されている。

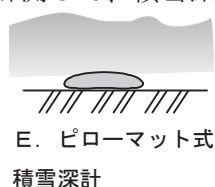


図 2.2.2.2 重量計測タイプの測定原理図

(c) 画像処理タイプ

カメラにて標尺のメモリを撮影し、撮影した画像を信号処理して積雪面の位置を検出するセンサが実用化されている。

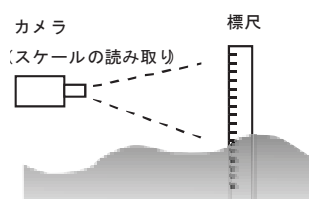


図 2.2.2.3 画像処理タイプの測定原理図

(d) その他

その他の既存センサとして、雨・雪等の発生状況を検知する現在天気計、降雪検知器などがある。

③既存センサの比較と問題点

現在実用化されて運用実績のある各センサについて、火山灰堆積厚計測への適用性について取りまとめた表を2.2.2.2に示す。

表 2.2.2.2 既存センサの火山灰堆積厚計測への適用性

計測方式の分類		非接触方式				非接触方式		
	精雪深計 (光波式)	精雪深計 (超音波式)	水位計 (電波式)	現在天気計 (レーザー透過方式)	画像計測センサ (標尺方式)	ピローマット方式	降雪検知器 (水滴計数式)	
1. システムイメージ								
2. 観測諸元								
①測定媒体	赤外線・レーザー	超音波 (18kHz～)	電波 (5.8GHz)	レーザー (650nm)	可視光	圧力計による積雪重量測定	融雪水の水滴／雪温	
②測定可能範囲	10m程度	10m程度	10m程度	照射光空間: 約30cm	5m程度	0～1999kg/m ²		
③測定分解能／	1cm	±1cm	±1cm	±10% (粒径)	数cm～数10cm	±10kg	0.01±0.001(mm/滴)	
⑤計測精度	±1cm程度	±1cm程度	±1cm程度	±10%	数cm～数10cm	±10kg	－(雨・露)には反応しない	
3. 運用上の制約・課題	①受感部の著しい汚れ ②特性上、黒色の火山灰は計測不能の可能性あり	①受感部の著しい汚れ ②温度補正が必要	①受感部の著しい汚れ	①受感部の著しい汚れ ②温度補正が必要	①霧・強雨では計測不能 ②降雪物が有ると計測不能	①降雪が水を呑み込んだときの重量の判定が困難であり、計測誤差が増大する ②設置面積が12m以上必要	①降雪の付着対策	
4. 設置上の制約・課題		精度保持のため温度補正が必要		場所によりヒータを装着する必要がある(標準装備)	①夜間は照明が必要 ②霧・豪雨時は、計測不能	周囲5m以内に樹木、建物がない測定環境を確保する必要あり	特になし	
5. 運用実績／適用例	気象観測分野、道路管理分野に多数実績有り	気象観測分野、道路管理分野に多数実績有り	水位観測分野に多数実績有り	気象観測分野、道路管理分野に多数実績有り	道路管理分野(実験段階)	積雪計測に一部実績あり	ロードヒーティング等の消雪システム	
6. 定期的メンテナンス								
①頻度	年間1～2回程度	年間1～2回程度	年間1～2回程度	年間1～2回程度	年間1～2回程度	年間1～2回程度	年間1～2回程度	
②清掃作業	受波面の清掃	受波面の清掃	受波面の清掃	受波面の清掃	レンズ・標尺の清掃	特に無し	各部清掃	
7. 電源・電源種類	商用電源	商用電源	太陽電池化可能	太陽電池化可能(ヒータ電源不可)	商用電源	太陽電池化可能	商用電源	
8. 伝送機器へのデータ出力	○	○	○	○	○	○	○	
9. 電波許認可などの要否	不要	不要	不要	不要	不要	不要	不要	
10. 降灰量計への適用時の役割	堆積面の検知 (単独使用では雪分離不可)	堆積面の検知 (単独使用では雪分離不可)	堆積面の検知 (単独使用では雪分離不可)	降下状況の検知	堆積面の検知 (単独使用では雪分離不可)	堆積面の検知 (単独使用では雪分離不可)	降下状況の検知	
11. 降灰量計への適用時の課題	堆積面凹凸による非反射	堆積面凹凸による非反射	堆積面凹凸による非反射	灰と雪の降下速度による分離	他手法との組み合わせによる雪分離	他手法との組み合わせによる雪分離	他手法との組み合わせによる雪分離	
	他手法との組み合わせによる雪分離	他手法との組み合わせによる雪分離	他手法との組み合わせによる雪分離	他手法との組み合わせによる雪分離	他手法との組み合わせによる雪分離	水分付着時に誤差増大	付着降灰の除去	
	火山灰色による検出不可							

(a)火山灰堆積厚・積雪深計測への応用に関する問題点

表 2.2.2.2 から明らかなように既存センサには、次の問題点がある。

- a.単体のセンサで火山灰堆積厚および降雪深の分離計測が可能なセンサは無い。
- b.火山灰堆積厚のみの計測であっても運用実績が殆ど無い。

(b)問題点解決策の検討

問題点の解決策として、火山灰と降雪のそれぞれに計測可能なセンサあるいは運用実績のあるセンサを複数組み合わせた計測方法が適切である。組み合わせるセンサとしては、以下の種類のセンサが挙げられる。

- a. 積雪深計(水位計) : 音波方式、赤外線レーザ方式、電波方式
- b. 落下物センサ : 現在天気計(レーザ透過方式)、降雪検知器 (水滴計数方式)
- c. 気温計 : サーミスタまたは白金抵抗体

(ア)積雪深計

音波方式および赤外線レーザ方式のセンサは、いずれも積雪深計測に実績があり、電波方式は、水位計測に実績がある。

火山灰および降雪を測定対象とした場合の計測性能に関する事項を比較すると表 2.2.2.3 の通りとなる。

表 2.2.2.3 超音波式・光波式・電波式による積雪深計（水位計）の精度比較

No.	比較項目	超音波式	光波式	電波式
1	火山灰と雪の判別計測	不可	不可	不可
2	計測精度	±1cm 程度	±1cm 程度	±1cm 程度
3	計測精度に関する問題			
3.1	対象物の表面色依存性	無し	有り、黒色は計測不可	無し
3.2	計測区間の温度依存性	有り	無し	無し
3.3	感部の汚れによる障害	無し	有り、投受光部の汚れ	無し
3.4	霧、雨などによる障害	無し	濃霧時は計測困難	無し
3.5	火山灰特性による障害	無し	無し	比透磁率が低いと計測不可の可能性

表 2.2.2.3 に示すように、いずれも積雪面に火山灰が堆積しても両者を区別して計測することは不可能であり「積雪面上昇」として計測される。

- a. 光波式は、表面色が黒色の火山灰の場合や濃霧時などに難がある。
- b. 超音波方式は、温度補償を要するが、計測の安定性が高い。
- c. 電波方式は、温度補償が不要であるが、火山灰の特性により計測不能となり得る。

このように三者とも、長短があるため、基本特性による机上判断だけでは選定ができない。このため、後述する(4)において、それぞれのセンサ実機及び実際の火山灰を用いて実験を行った。

(イ)落下物センサ

このセンサは、落下物の存在検知および粒径、落下速度等の属性情報を収集するセンサである。一つはレーザ透過方式の「現在天気計」で、道路管理、空港などの視程障害に係わる気象観測に実績がある。現在天気計の設計思想は、視程障害事象の判別とWMOコード（雨、雪、霧等の事象を示すコード）の出力を前提としているため、直接「空中浮遊物が火山灰である」との判別はしていない。しかし、0.2mm～25mm の落下物を捕捉し、粒径と落下速度の計測が可能であるので潜在的に火山灰を検知する能力を持っていると考えられる。もう一つは、水滴計数方式の「降雪検知器」で、降雪センサとして除雪・消雪分野で実績がある。降雪検知器は、受水器で雪片を受けヒータで溶解水に変える。この溶解水を水滴の数として計数するため、降雪の開始および終了時刻と降雪強度を示す直接的な情報を得ることが出来る。

従って両者は、火山灰と降雪を判別するための間接的な情報を得るセンサとして使用できる。
例えば、次のような間接的な情報を出力し、気温など他の間接情報と共に推論処理を施すことにより火山灰の落下が推定可能となる。

a.現在天気計

間接情報 1：無降雨、霧非発生中に空間落下物を検知した

間接情報 2：空間落下物の落下速度は、 V ($0.2 \sim 20\text{m/s}$) である

b.降雪センサ

間接情報：ある強度以上の降雪を検知した

(ウ)気温計

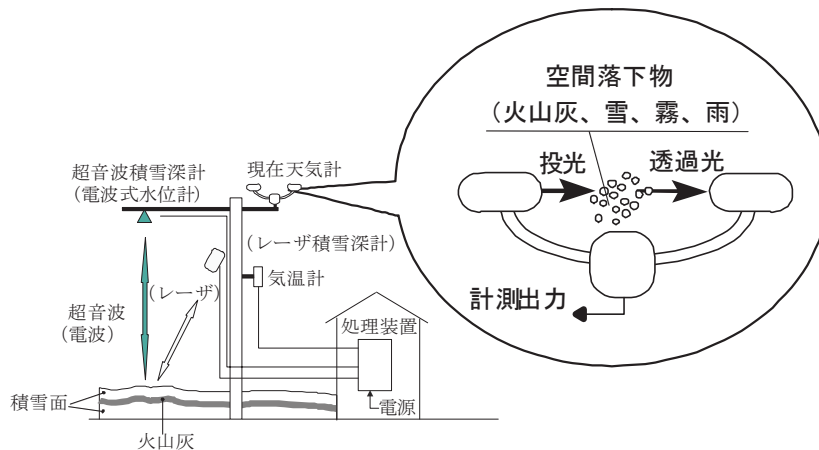
このセンサは、大気中の温度を収集するセンサである。

間接情報：降雪の状況を判断する情報として利用する。

(3) 複数センサ組み合わせ計測技術の提案

(a) 機器構成

図 2.2.2.4 に示す様に 3 種類のセンサを組み合わせ、それぞれの計測出力を収集する。センサ情報を推論処理により降灰と降雪を判別し、火山灰堆積厚を算出する。
尚、落下物センサは、現在天気計を例として図示している。



＜積雪深計は、音波方式、赤外線レーザー方式、電波方のいずれかを使用する＞

図 2.2.2.4 火山灰堆積厚・積雪深計測 機器構成図

(b) 推論処理

処理装置に入力された各計測出力は、図 2.2.2.5 のフローにより推論処理される。尚、ここでは、現在天気計を使用した例を示す。

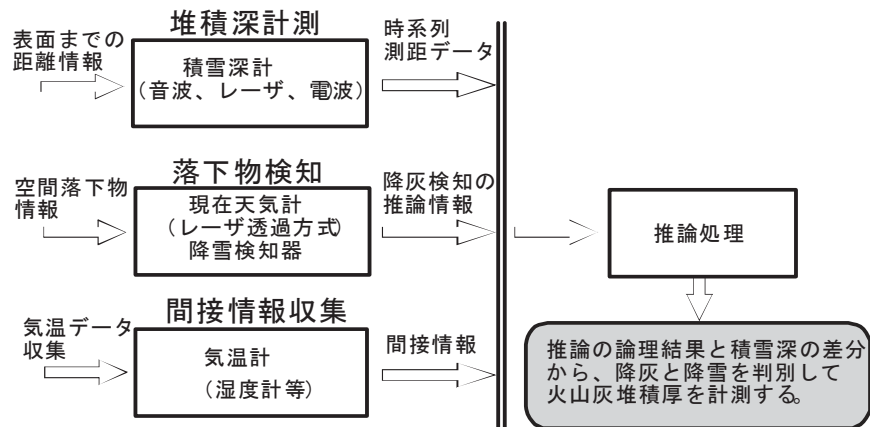


図 2.2.2.5 推論処理フロー

推論処理フローでは、概ね図 2.2.2.6 のアルゴリズムのイメージで降灰と降雪を判別し、火山灰堆積厚を計測する。

(c) 推論の基本アルゴリズム

センサ情報を推論処理により降灰と降雪を判別し、火山灰堆積厚を算出する。

a. 収集した落下物に関する間接情報をリアルタイムで推論処理する。

< 現在天気計を使用した場合 >

火山灰 = (落下物検知) AND (落下速度 $> V_r$) AND (気温 $> T_r$)

落下物：雪以外の落下物の検知情報

V_r ：落下速度のデフォルト値 (m/s)

T_r ：気温のデフォルト値 (°C)

< 降雪センサを使用した場合 >

火山灰 = (降雪検知)

b. 推論の論理結果から降灰と降雪を判別する。

c. 判別した時刻 t_1 から t_2 まで降雪深データの差分 ΔL を演算し、火山灰堆積厚を算出する。

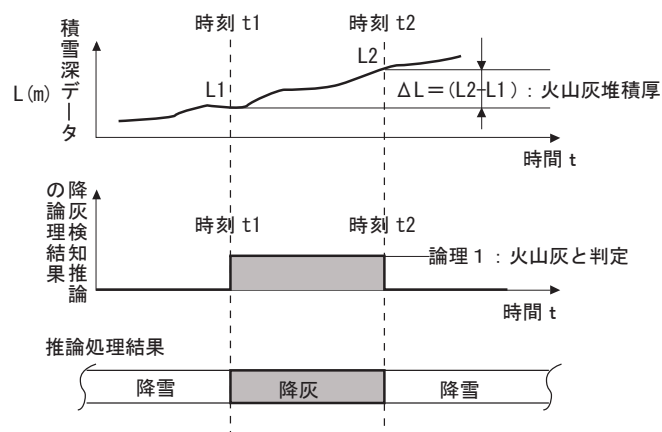


図 2.2.2.6 火山灰堆積厚・積雪深 計測アルゴリズムのイメージ

(4) 既存センサの火山灰堆積厚計測精度の検証

前項におけるアルゴリズムを確立する上で、既存のセンサによって火山灰の堆積面を精度良く計測できることが必要条件の一つとなるが、従前では精度検証事例がないため、既往センサのうち代表的な超音波積雪計、光波式積雪計、電波水位計の3種類について実際に火山灰を用いた精度実験を行った。

①実験概要

以下の通りの条件で実験を行った。

a) 使用する火山灰

三宅島において採取された火山灰を使用した。



図 2.2.2.7 採取した火山灰

b) 実験設備

(株)拓和新技术開発センターにある非接触型水位計試験装置を利用した。本装置は、高さ可変のセンサ取付装置及び下部水槽から構成され、センサ高さ毎の測定精度を確認するものである。今回は、下部に水槽の代わりに受容器（木材製、縦2m×横2m×深さ0.3m、底板には電波の透過防止用鉄製板を敷いた）を置いて火山灰を入れた。また、装置周辺にやぐらを組み、火山灰を上部から降らせるための作業足場を確保するとともに、及びビニールシートによる火山灰の飛散防止を図った。



図 2.2.2.8 実験装置の外観
(左：やぐら全景、右：下部の受容器)

光波式 超音波式 電波式



図 2.2.2.9 実験装置の外観
(センサ取り付け部)

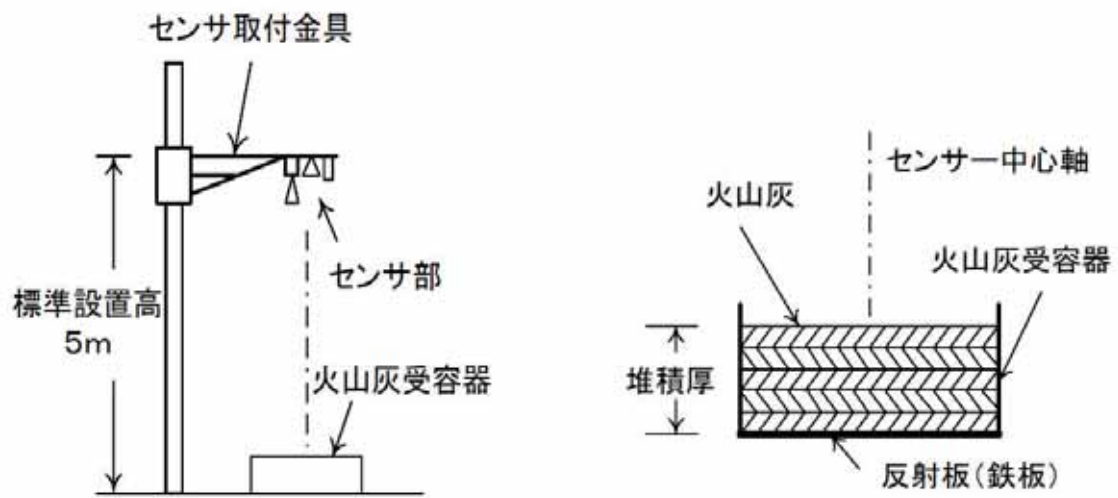


図 2.2.2.10 実験装置の概略図

c)実験条件

実験条件は、以下の4ケースで行った。

ケース1：堆積厚変化の計測

堆積した状態の火山灰を1cm単位で計測可能かどうか。（降灰なし）

ケース2：堆積厚大幅増加時の計測

火山灰の堆積厚が増加してセンサ～堆積面までの距離が短くなっても精度が変わらずに計測可能かどうか。（降灰なし）

ケース3：降灰状態での計測

実際に火山灰が降っていてセンサ～堆積面までの空間中に飛散している状態で精度よく計測可能かどうか。

ケース4：含水状態での計測

火山灰が堆積した後、降雨で火山灰が含水した場合でも精度良く計測可能かどうか。（降灰なし）

②実験結果

a) ケース 1：堆積厚変化時の計測

既往センサが火山灰を 1cm 単位で計測可能かどうかを目的とし、センサを地上高 5m に設置して不動とし、下部の受容器に火山灰堆積厚を 0、1、2、3、4、6、8、10、15、20cm まで段階的に変化させ、それぞれの堆積厚で計測を行った。

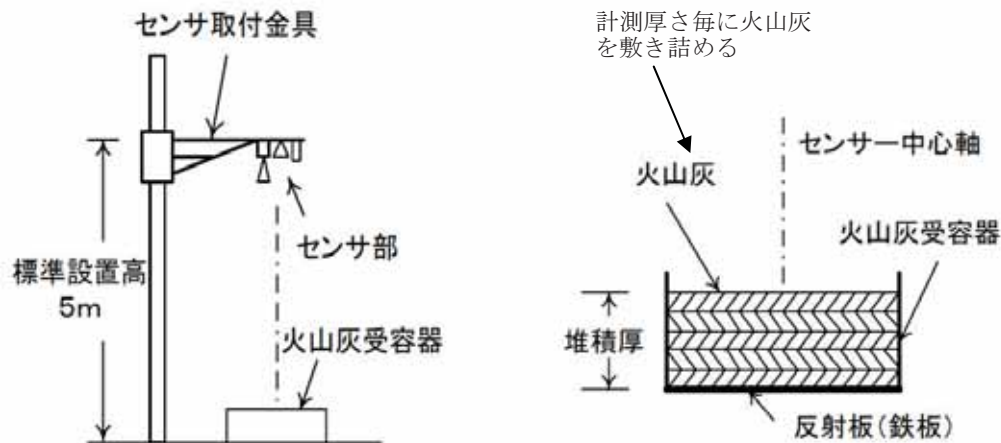


図 2.2.2.11 堆積厚計測実験イメージ図



図 2.2.2.12 実験状況
(左：火山灰敷き詰め状況、右：堆積厚 4cm の状況)

火山灰の堆積厚を 1cm ずつ増してゆき、それぞれの厚さで測定を行って実高と計測値との差を比較した。結果を表 2.2.2.4 に示す。

光波式は、堆積厚 8cm までは計測誤差 -1cm 、10cm 以上は -2cm の誤差であった。

超音波式は、どの堆積厚でも $\pm 1\text{cm}$ 程度の誤差内で計測された。

電波式は堆積厚 4cm までは誤差が最大 -9cm と大きく電波が火山灰を透過しているものと思われたが、堆積厚 6cm 以上は -1cm 以内の誤差で計測された。

表 2.2.2.4 火山灰堆積計測結果

実際の火山灰堆積厚(cm)	光波		超音波		電波	
	計測値 (cm)	誤差 (cm)	計測値 (cm)	誤差 (cm)	計測値 (cm)	誤差 (cm)
0	0	0	0	0	0	0
1	0	-1	0~1	0~-1	-1	-2
2	1	-1	2~3	0~+1	-1	-3
3	2	-1	2~3	0~-1	-6	-9
4	3	-1	4~5	0~+1	-3	-7
6	5	-1	5	-1	5	-1
8	7	-1	8~9	0~+1	8	0
10	8	-2	9	-1	10	0
15	13	-2	15	0	15	0
20	18	-2	21	1	20	0

b) ケース 2：堆積厚が大幅に増加した場合の堆積厚計測結果

火山灰の堆積厚が大幅に増加してセンサ～堆積面までの距離が短くなっても精度が変わらずに計測可能かどうかを試験した。試験は便宜上、堆積厚を数 m 増すのではなくセンサ高さを低下させることによって行った。計測条件は、火山灰堆積厚を 20cm で固定したまま、センサー設置高を標準設置高 5m から下降させて、4、3、2.5m の空間距離において行った。

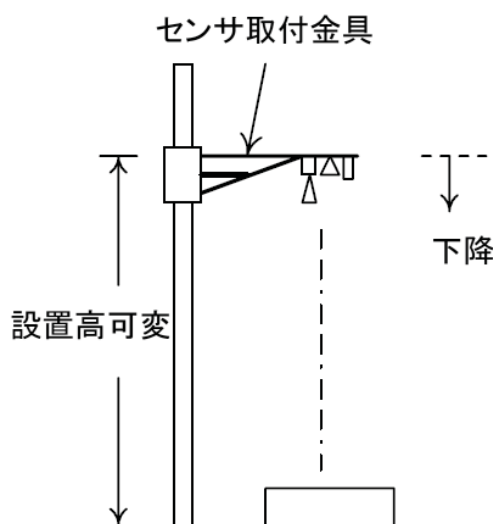


図 2.2.2.12 実験概要図

設置高さ変動時の計測結果を表 2.2.2.5 に示す。光波、超音波、電波共に設置高さを変動しても仕様誤差範囲の値で計測され、堆積厚が数 m であっても設置高さに依存しないことが判明した。ただし計測機器の持つ不感地帯に入らないことが条件である。

表 2.2.2.5 堆積厚が大幅に増加した場合の計測結果

センサ 高さ(m)	計測理論 値 (cm)	光波		超音波		電波	
		灰の高さ (cm)	誤差 (cm)	灰の高さ (cm)	誤差 (cm)	灰の高さ (cm)	誤差 (cm)
5.0	20	19	-1	23	3(補正後1)	20	0
4.0	120	119	-1	123	3(補正後1)	122	2
3.0	220	219	-1	223	3(補正後1)	221	1
2.5	270	270	0	272	3(補正後0)	271	1

※超音波式に関して、計測前に何らかの影響で 0 基準点が 2cm ずれたため補正を行った。

c) ケース 3：降灰状態での堆積厚計測結果

センサの計測範囲内を実際に火山灰が降っている状況で精度良く計測可能かどうかを試験した。センサを設置高 5m に固定し、受容器に 20cm の火山灰を堆積させた状態で、網ふるいを利用してセンサ部の上方より火山灰を降らせてそのときに堆積厚計測を行った。降灰量の強度は、下記の 2 ケース行い、事前に重量計にて重量を計り、降灰時間を計測した。

- ・ 1 回目 …… 火山灰 6kg を 90 秒かけて降灰させた。（降灰強度 67g/s）
- ・ 2 回目 …… 火山灰 12kg を 120 秒かけて降灰させた。（降灰強度 100g/s）

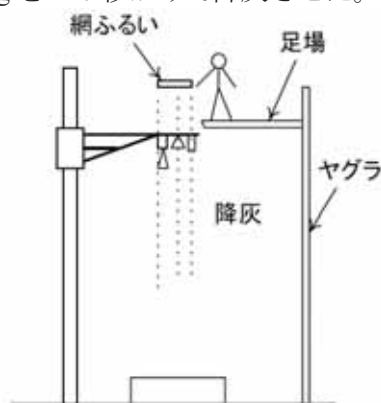


図 2.2.2.13 降灰時計測イメージ図



図 2.2.2.14 降灰時実験状況

表 2.2.2.6 に測定結果を示す。超音波式、電波式共に 1、2 回目実験の両方においても計測値に影響は見られず、火山灰によって精度に影響を受ける程の減衰は生じないことが分かった。しかし、光波式は、1、2 回目実験の両方で計測値がメートル単位で変動したため、減衰の影響を受けることが分かった。

表 2.2.2.6 降灰状態での堆積厚計測結果

観測機器	降灰の影響	備考
光波式積雪計	1, 2 回とも影響有り	降灰中計測値が m 単位で変動した
超音波式積雪計	影響なし	計測値の変動は認められなかった
電波式水位計	影響なし	受信強度は変動したが、計測値の変動は見られなかった

d) ケース 4：含水状態での堆積厚計測結果

火山灰が堆積した後、降雨等で火山灰が含水した場合にも正しく計測可能かどうかを目的とし、20cm 堆積させた乾燥状態の火山灰に散水して、含水させた状態での火山灰堆積厚の計測を行った。散水は 2 ケース行い、霧吹きに 600cc の水を入れて 2m×2m の受容器全体の火山灰表面が湿る程度の場合と、ビニルホースから散水して浸透能を越えて表面に薄く水面が生じる場合とを行った。

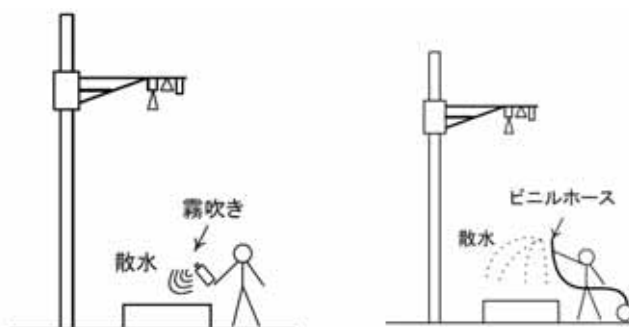


図 2.2.2.17 含水状態計測イメージ図

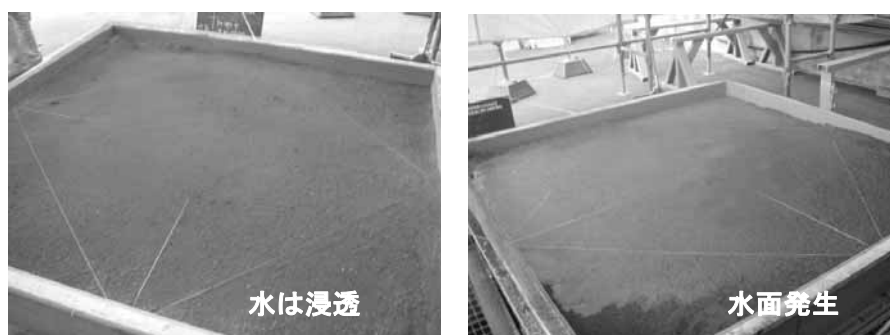


図 2.2.2.18 含水状態実験状況
(左：霧吹きによる散水後、右：ホースによる散水後)

表 2.2.2.7 に測定結果を示す。今回実験を行った既存の 3 種類のセンサにおいては、火山灰が含水しても堆積厚計測に影響がない事が判明した。

表 2.2.2.7 含水状態での堆積厚計測結果

散水状況	光波		超音波		電波	
	計測値 (cm)	受光量	計測値 (cm)	受信 強度(V)	計測値 (cm)	受信 強度(dB)
散水前(乾燥状態)	19	99	23	14	20	5.18
水600ccを霧吹きで火山灰全体に散水	20	99	23	14	20	6.81
更に水600ccを霧吹きで火山灰全体に散水	19	98	23	14	20	9.48
更にシャワーを1分間程度火山灰全体に散水	19	87	23	14	20	12.98
更にシャワーを1分間程度火山灰全体に散水	19	92	23	14	20	13.84
更にシャワーを連続散水中に計測	20	99	23	14	20	14.06

③まとめ

既往センサ（超音波積雪計、光波式積雪計、電波水位計）3 種類の計測方法は、共に約 1cm 程度で火山灰の堆積厚が計測可能であることが判明した、しかし電波式においては、堆積厚が 6cm 以上ないと計測不可能であることが判明した。

また、数 m 堆積した状態でも計測に影響を受けないことも判明した（但し、計測機器の持つ不感地帯に入ると計測はできない）。降灰状態での実験に関しては、超音波式、電波式においては影響を受けず降灰中においても計測が可能であることが判明したが、光波式においては、降灰中は計測値の変動が大きく測定困難であることが判明した。含水状態での実験に関しては、3 種類の計測方法共に火山灰が含水しても計測値に影響を受けないことも判明した。

表 2.2.2.8 実験結果比較表

項目	光波式	超音波式	電波式
堆積厚変化時	○	○	△
堆積厚大幅増加時	○	○	○
降灰状態時	×	○	○
含水状態時	○	○	○

(5) 全体のまとめ

既往機器を利用して火山灰の堆積厚を自動測定するためのシステムとして、複数センサ（積雪深計、気温計、現在天気計）の組み合わせを提案し、それを実現するために必要な要素の一つである既往センサの火山灰堆積厚の測定性能を確認することができた。

今後、次のステップとしてはアルゴリズムの具体的提示とその検証が望まれる。また、暫定的使用方法としては、既往積雪深センサを使用して、冬期以外の火山灰堆積厚測定を行うことは直ちに実施可能である。

また、火山ガスによる機器の保護に関しては、既往各センサはほぼ無対応であるため、材質・構造の改良等も望まれる。

2.2.3 自動計測技術（専用機器）

前項においては火山灰堆積厚を既往観測機器によってリアルタイム自動観測することを検討したが、ここでは精度向上、可搬化、低価格化等を目的として、専用機器の検討及び試作機の製作、検証を行った。

(1) 機器の概要

火山灰堆積厚を測定する専用降灰量計（以下、降灰量計）の測定方式としては、重量計測法を選択した。

降灰量計は、大きく上部の捕灰用タンク（ドラム缶）及び水位計、下部のロードセルから構成され（図 2.2.3.1、表 2.2.3.1）、測定フローとしては図 2.2.3.2 の通りとなる。

本機器の特徴としては、火山灰だけでなく雨水も貯留するため、オーバーフローを回避すれば雨量計の役割を併せ持つこと、灰の乾湿状態による重量変化を除くことにより計測精度が高いこと、灰乾燥時に強風による灰の飛散防止が可能なことなどが挙げられる。また、計測データはデータロガーへの記録、携帯電話回線等による遠方伝送などが可能となる。

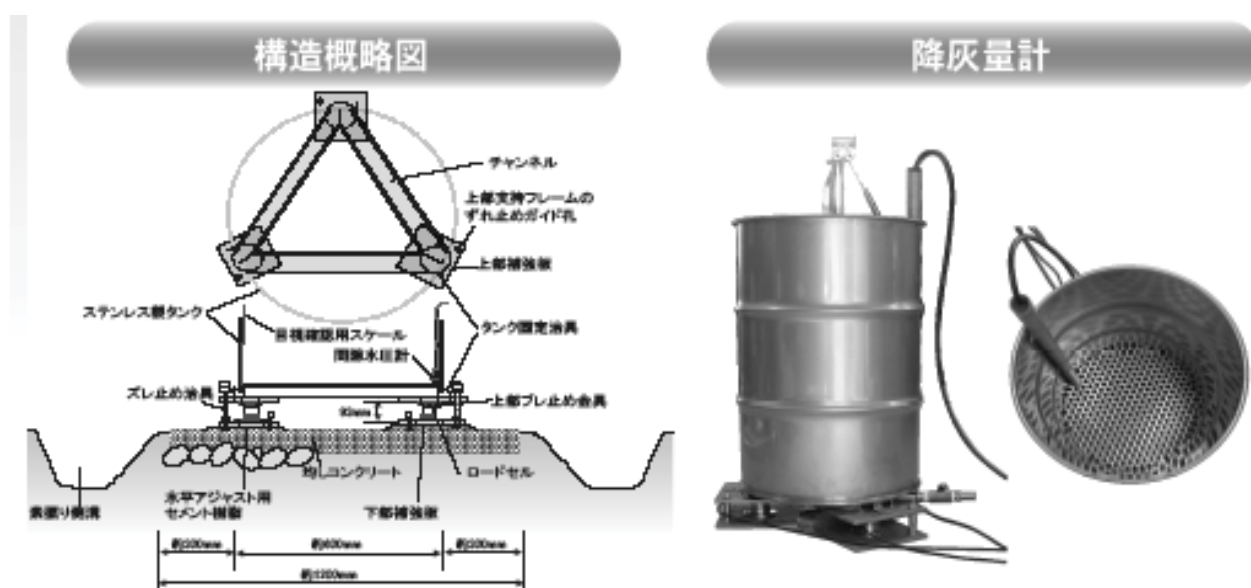


図 2.2.3.1 降灰量計構造概略図

表 2.2.3.1 降灰量計の緒元

機器名	仕様	数量	備考
荷重変換器 (ロードセル)	LCF-A-2KN/㈱共和電業	3	0～2kN (203.9kgf) 総合精度 $\pm 0.1\%$ ($\pm 0.2\text{kgf}$ の精度)
投げ込み式水位計	TD4310/豊田工機㈱	1	0～100cm、 $\pm 0.1\%$ ($\pm 0.1\text{cm}$ の精度) 半導体素子タイプ
捕灰タンク	オープンドラム缶 SUS 製	1	内径 567(mm)、高さ 885(mm)

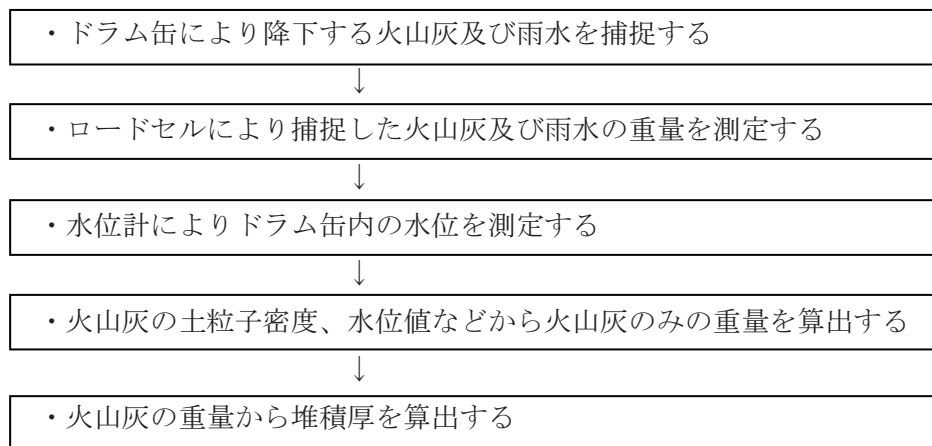


図 2.2.3.2 降灰量計の測定フロー

各機器の選定理由は以下の通りである。

- 捕灰タンク：標準規格品（内径 567×高 885mm）のドラム缶を使用した。材質は、錆付きや腐食等の経年劣化を抑えるためステンレス製とした。
- ロードセル：捕灰タンクが火山灰で満杯となっても重量測定できるよう、定格容量 200kg のタイプを 3 台使用して 600kg まで測定できるようにしている（火山灰の飽和密度 2g/cm^3 、タンク質量を 50kg と仮定すると満杯時の総荷重は 500kg となる）。
- 水位計：フロート式、水圧式、非接触式などの種類があるが、形状寸法、測定精度などを勘案し、水圧式水位計を選択した。

フロート式：水面に浮かべたフロートの位置変化をエンコーダやシンクロモータにより捉える方法や、測定管内に磁石付きフロートを浮かべて管の内壁に埋め込んだリードスイッチにより位置検出をする方法などがある。寸法は比較的大きく、前者によるタイプは累積誤差が生じ得る。

圧力式：静水圧を感圧素子（水晶、半導体、シリコンなど）で検出して電気信号に変換する方式。寸法は小さく、比較的精度が良い。

非接触式：超音波、電波などを水面に送波し、反射され戻ってくるまでの伝播時間を水位に換算する方式。寸法は比較的大きい。精度は温度、水面状態等に左右される。

(2) 火山灰堆積厚の計算法

①計算式の組立て

火山灰堆積厚測定に必要なパラメータを表 2.2.3.2 に示し、降灰量計の観測データから、火山灰の堆積厚を求める算定式の誘導を以下に記した。

表 2.2.3.2 火山灰堆積厚測定に必要なパラメータ

	記号	項 目	補 足 説 明
計 測 値	W'	計測重量（降灰量計+水+火山灰）	降灰量計容器、水、火山灰の重量
	W0	実質容器重量	降灰量計容器の重量
	D	計測水位	水位計による測定値
	S	有効断面積	捕灰タンクの断面積
仮 定 値	ρ_s	火山灰の土粒子密度	
	ρ_d	火山灰の乾燥密度	
	ρ_w	水の密度	

(釣り合い式)

$$\bullet W = W_{WA} + W_S + S(D-L) \cdot \rho_w \quad (1)$$

W_{WA} : 飽和した堆積灰中の水分重量

W_S : 堆積灰の土粒子重量

(条件式)

$\bullet S_r$ (堆積灰の飽和度 : 1/100 比表示)

$$= \rho_s \cdot w_A / \{(\rho_s / \rho_d - 1) \cdot \rho_w\} \quad (2)$$

$$S_r = 1.0 \text{ (飽和度 100\%)} \text{ より} \quad (3)$$

$$w_A = (\rho_s / \rho_d - 1) \cdot \rho_w / \rho_s \quad (4)$$

$$\text{次に、} W_{WA} = W_S \cdot w_A \text{ より ((4)を(5)に代入)} \quad (5)$$

$$W_{WA} = W_S \cdot (\rho_s / \rho_d - 1) \cdot \rho_w / \rho_s \quad (6)$$

$$\text{また、} \rho_d = W_S / (S \cdot L) \text{ であるから ((7)を(6)に代入)} \quad (7)$$

$$W_{WA} = W_S \cdot \left[\rho_s / \{W_S / (S \cdot L)\} - 1 \right] \cdot \rho_w / \rho_s \quad (8)$$

以上より ((8)を(1)に代入)

$$W = \rho_w (S \cdot L) - W_S (\rho_w / \rho_s) + W_S + S(D-L) \cdot \rho_w$$

上式を整理して

$$\begin{aligned} W_{S1} &= \{W - S(D-L) \cdot \rho_w - \rho_w (S \cdot L)\} / (1 - \rho_w / \rho_s) \\ &= (W - S \cdot D \cdot \rho_w) / (1 - \rho_w / \rho_s) \quad (9) \quad (\rho_s \text{ を仮定する要あり}) \end{aligned}$$

以上は ρ_s を仮定する方法であるが、以下では灰が水中堆積した時の水位増分を考慮する方法を記す。水位増分量を $\angle D$ とすると、堆積した土粒子の全体積は $V_s = \angle D \cdot S$ である。

従って、 $W = S \cdot D \cdot \rho_w - \rho_w \cdot \angle D \cdot S + W_S$ となり整理すると

$$W_{S2} = W - \rho_w \cdot S \cdot (D - \angle D) \quad (9')$$

次に堆積厚 L について検討する。

$$(7) \text{ は } \rho_d \cdot (S \cdot L) = W_{S1} \text{ であるから} \quad (10)$$

$$\rho_d \cdot (S \cdot L) = (W - S \cdot D \cdot \rho_w) / \{1 - (\rho_w / \rho_s)\}$$

これを整理して

$$L_1 = (W - S \cdot D \cdot \rho_w) \cdot \rho_s / \{ (\rho_s - \rho_w) \cdot \rho_d \cdot S \} \quad (11) \quad (\rho_d, \rho_s \text{を仮定する要あり})$$

以下、Ws 同様に水位変化量に着目して L を求めると ((9')を (10) に代入)

$$\rho_d \cdot S \cdot L_2 = W - \rho_w \cdot S \cdot (D - \Delta D)$$

これを整理して

$$L_2 = \{ W - \rho_w \cdot S \cdot (D - \Delta D) \} / (\rho_d \cdot S) \quad (12) (\rho_d \text{を仮定する要あり})$$

水位上昇量により土粒子密度を求める方法を採用した場合には、観測中の水位上昇が①降雨のみか、②降雨と灰が同時に降ったか、③降灰のみかの判断を別の方法で行う必要がある。言い換えると常に別途計測している雨量を以下の式により考慮することが出来る。

$$\Delta D = h + \Delta d$$

h : 降雨量

Δd : 降灰土粒子の沈降による水位上昇量

②パラメータ値の設定および火山灰堆積重量と堆積厚の関係

計算に必要な既知パラメータの値を表 2.2.3.3 に示し、計算による堆積重量と堆積厚の関係を図 2.2.3.3 に示した。

表 2.2.3.3 パラメータの値

記号	項目	補足説明および数値
W0	実質容器重量	降灰量計容器の重量 (** kg)
S	有効断面積	2525(cm ²) タンク内径 56.7cm より
ρ_s	火山灰の土粒子密度	ρ_s : 2.68g/cm ³ (桜島火山灰の土粒子密度)
ρ_d	火山灰の乾燥密度	ρ_d : 1.40g/cm ³ (桜島火山灰の乾燥密度)
ρ_w	水の密度	1.00

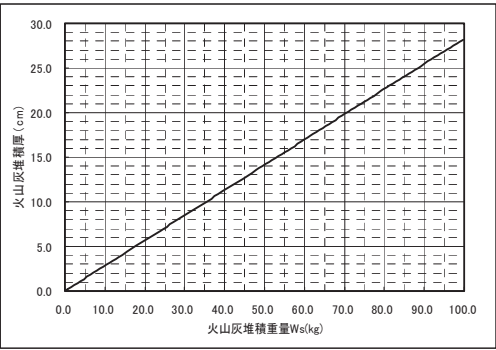


図 2.2.3.3 重量と堆積厚の関係

(3) 暴露試験結果と現地設置に向けた検討

試作した降灰量計を現地設置するにあたり、表2.2.3.4に示すような耐久性などの課題が考えられるため、現地設置に先立ち暴露試験や机上検討を実施した。

表 2. 2. 3. 4 現地設置に関する課題

課題	対応	検討方針
・野外での耐久性や雨量計としての適用性	暴露試験を実施して、課題を探る	計測値の変動を把握する。
・捕灰タンク内の水分の凍結	タンク内に不凍液を投入する	適正な不凍液投入量の把握
・捕灰タンク内の水分の蒸発	捕灰タンク内にオイルを投入し、水分蒸発防止膜を形成させる	適正なオイル種、オイル投入量の把握
・降灰量計の耐雷性	避雷ゲージの設置	避雷ゲージの構造や費用の把握

①暴露試験

(ア)試験目的

降灰量計の野外での適用性を確認するため、暴露試験を実施した。試験は日本工営(株)中央研究所敷地内で行った(図 2.2.3.4 参照)。

(イ)測定項目

- ・重量(ロードセル3基) ・水位(水位計)、
- ・外気温(熱電対) ・雨量(転倒ます型雨量計)

(ウ)試験方法

データロガーにて上記項目を連続自動観測した。測定間隔は10分間隔とし、初期水位20cmの水面に油膜(マノメータ用水分蒸発防止油)を形成させた。

(エ)試験結果と考察

7月5日16時10分(試験開始日)から7月21日(木)10時10分までの暴露試験結果(データ数2269)を以下に示す。

降灰量計の測定項目と雨量および気温の関係

降灰量計測定項目である重量と水位、および雨量と気温の関係を図2.2.3.5～図2.2.3.10に示した。降雨などが無い期間においても重量が増加する現象や、また気温の変動傾向と調和的な変動傾向を示す温度ドリフト現象が認められる。

雨量と降灰量計の重量増加および水位増加の関係

降り始めから振り終わりまでの累積雨量と重量増加分および水位増加分に関して、比較的まとまった雨の降った以下の2期間を考察した。

- ・H18 7/5 23:10～7/6 11:00 ・H18 7/9 20:00～7/10 2:00

図2.2.3.11によると、対象2期間において累積雨量と降灰量計総重量の間には直線的な関係が認められ、雨量1mmあたりの総重量増加分(図内の近似直線の傾き)は0.29～0.30kgfである。降灰量計の捕灰タンクの内径は567mmであり断面積は2524cm²となる。したがって雨量1mmあたりの総重量増加分を断面積から換算すると0.25kgfとなり、上記値とは、0.04～0.05kgf(誤差率にして16～20%)の違いが認められる。一方、図2.2.3.12によると、対象2期間において累積雨量と水位の間には直線的な関係が認められ、雨量



図 2. 2. 3. 4 測定機器設置状況

1mm あたりの水位増加分は 0.102～0.106cm（約 1mm）である。これは誤差率にして、2～6%である。

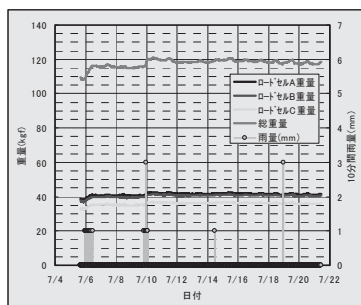


図 2.2.3.5 測定重量と雨量の関係

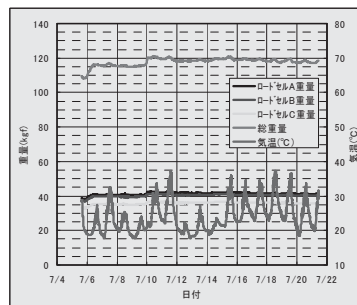


図 2.2.3.6 測定重量と気温の関係

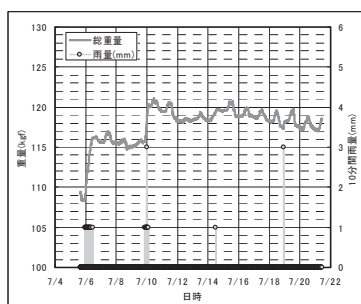


図 2.2.3.7 測定重量と雨量の関係

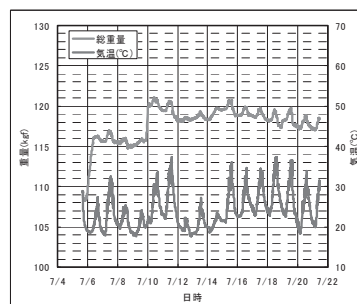


図 2.2.3.8 測定重量と気温の関係

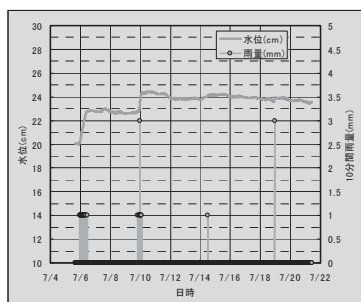


図 2.2.3.9 水位と雨量の関係

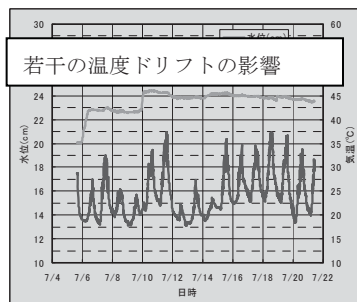


図 2.2.3.10 水位と気温の関係

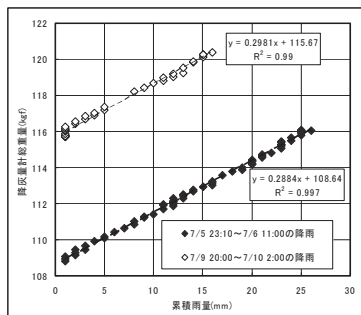


図 2.2.3.11 累積雨量と総重量増加の関係

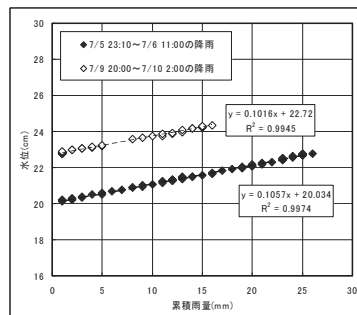


図 2.2.3.12 累積雨量と水位増加の関係

②不凍液混合による捕灰タンク内水分凍結防止策の検討

(ア)試験目的

捕灰タンク内の水分凍結防止策として適正な不凍液混合量を検討した。ここでは国内で火山活動が比較的活発である桜島への設置を想定し検討した。

(イ)桜島における最低気温の推定と凍結防止策設定期間の検討

桜島近傍の鹿児島気象台における月別最低気温の観測結果を表 2.2.3.5 に示す。桜島気象台と桜島野尻川では標高が異なるため標高による気温差を補正した。0℃以下となる 12 月～3 月期には不凍液による凍結防止策を講じる必要があり、1 月期の野尻地点推定最低気温は-3.6℃であり最低気温を-4℃とした。

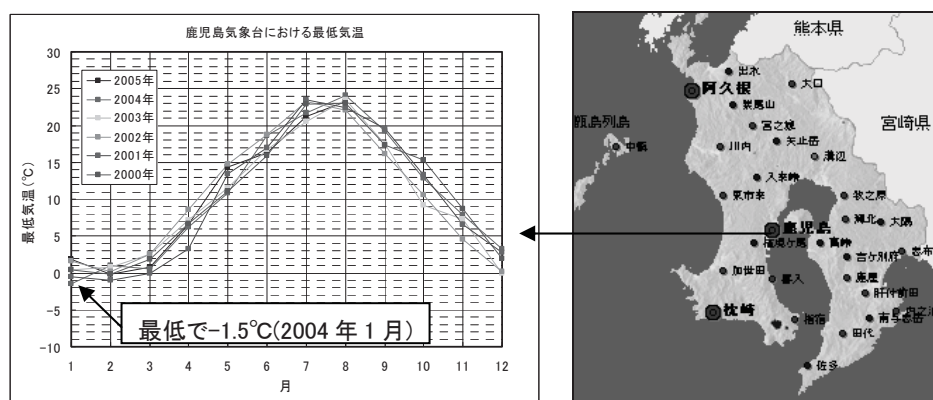


図 2.2.3.13 鹿児島気象台における月別最低気温（2000～2005 年）¹⁾

(出典：気象庁電子閲覧室, <http://www.data.kishou.go.jp/index.htm>)

表 2.2.3.5 鹿児島気象台での月別最低気温と野尻川地点での推定最低気温
(2000～2005 年)

	鹿児島気象台 ¹⁾ の 最低気温(℃)	野尻川地点 ²⁾ の 推定最低気温 ³⁾ (℃)
11月	4.5	2.4
12月	0	-2.1
1月	-1.5	-3.6
2月	-1	-3.1
3月	0	-2.1

1)鹿児島気象台の標高:約4m

2)野尻川地点の標高:約350m

3)標高の温度勾配を-0.6℃/100mとし推定

(ウ)適正な不凍液濃度

不凍液濃度と凍結温度の相関性を把握するため、室内の凍結試験を実施した。方法は以下のとおりである。

- ・直径 10cm 程度の透明容器（蓋付）に水深 5cm 程度（容積 360cc 位）の水を張る。
- ・水に不凍液を混合し、数種類の濃度の不凍混合液を準備する。
- ・不凍混合液を冷凍庫内に入れ、冷凍庫内の温度ごとに凍結具合を確認する。

不凍液メーカーによる不凍液濃度と凍結温度の対応関係、および凍結試験結果を図 2.2.3.14、図 2.2.3.15 に示す。これにより、野尻地点の最低気温-4℃に対応できる不凍液濃度は最低限 10%であることが分かった。

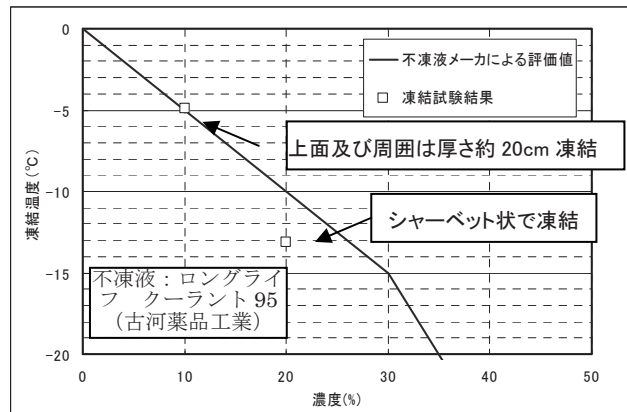


図 2.2.3.14 不凍液濃度と凍結温度の関係

(エ)降水による不凍液の濃度低下と適正な不凍液投入量

降水による不凍液濃度低下が懸念されるため、降水量を見込んだ上で、初期の不凍液投入量を設定する必要がある。図 2.2.3.16 に鹿児島気象台における月別降水量を示す。凍結防止策が必要な 12～3 月期では、平均して 100mm 程度の降水であるが、特異値と

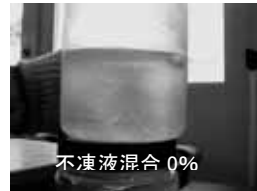


図 2.2.3.15 凍結試験による凍結状況

として、2005 年 2 月に計 250mm の降水量を示している。これは、2 月 15 日に発生した九州南部の局地的豪雨による影響が大きい（鹿児島で 1 日 113mm の降雨量で、2 月総計の約半分の降雨があった）。上記 250mm の降雨による濃度低下に対しても、前節で設定した不凍液濃度 10%となれば十分である。表 2.2.3.6 に初期水位に応じた不凍液の投入重量を示した。例えば初期水位が 20cm の場合、降水による濃度低下を考慮した投入量は約 11.4kg である。

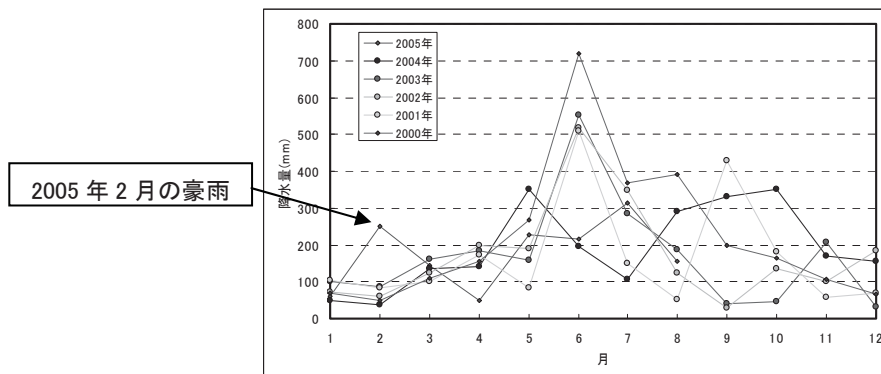


図 2.2.3.16 鹿児島気象台における月別降水量（2000～2005 年）¹⁾

表 2.2.3.6 初期水位に応じた濃度 10%を満たす不凍液重量

初期水位 (cm)	水分重量 ¹⁾ (kg)	降水量 ²⁾ (mm)	水分重量＋ 降水量分重量(kg)	濃度10%にあたる 不凍液重量(kg)
10	25.24	250	88.34	8.834
20	50.48	250	113.58	11.358
30	75.72	250	138.82	13.882
40	100.96	250	164.06	16.406

1) 捕灰タンク表面積S:2,524cm²として算出

2) 12-1月期における過去の最大降水量(2000年～2005年)

③オイル膜による水分蒸発防止対策

(ア)試験目的

火山灰の飛散防止する捕灰タンク内水の水分蒸発防止策として、水面にオイル膜を形成することとして、適正なオイル投入量について検討した。

(イ)試験方法

水およびオイル種、オイル量を変えたポリ容器を野外に放置し（雨水混入防止のためブルーシートで覆う）、重量変化を計測した（図 2.2.3.17）。投入したオイル種およびオイル量は表 2.2.3.7 に示すとおり全 13 ケースである。

(ウ)オイル投入量の目安

試験結果は図 2.2.3.18 のとおりである。エンジンオイルが特に 5g、10g で水分蒸発防止効果が高く、試験後 3 週間経過時でも水分蒸発がほぼ抑えられている。したがって、エンジンオイル 5g 程度が最適と思われる。

なお、実際の捕灰タンク表面積は 2,524cm² であるので、今回の野外試験における油量 5g(油膜厚 0.05cm)にあたる油量は、126.2 cm³（111 g：密度 0.88 g/cm³）となる。

表 2.2.3.7 野外試験に用いたオイルとその油量

検 討 項 目	ケ ー ス 設 定
オイル種	エンジンオイル、サラダオイル、いっすい式オイル、オイル無し（全 4 ケース）
オイル量（油膜厚）	1g (0.01cm)、3g(0.03cm)、5g(0.05cm)、10g(0.1cm)（全 4 ケース）
備 考	エンジンオイル：ホンダ製・化学合成油、SE10W-30 サラダオイル：日清製・植物油 可塑剤*：横河電子機器製 *可塑剤とは、ある材料に柔軟性を与え、加工をしやすくするために添加する物質（酸とアルコールから合成されるエステル）。主に、塩ビを中心としたプラスチックを軟らかくするために用いる。



図 2.2.3.17 オイル膜による水分蒸発防止効果の野外試験状況

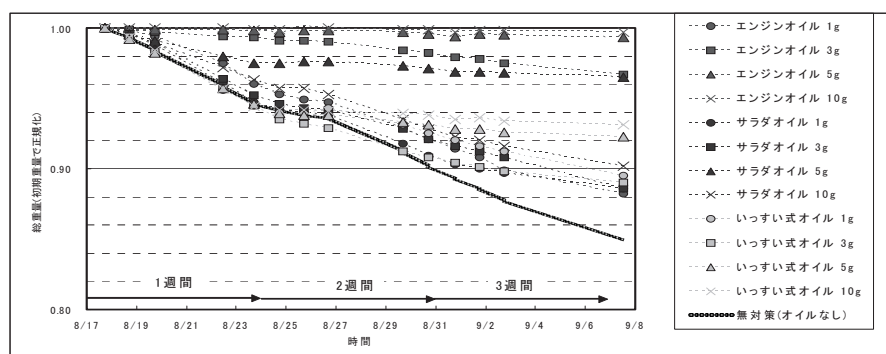


図 2.2.3.18 オイル膜による水分蒸発防止効果の野外試験

④温度ドリフト対策の検討

(ア)降灰量計で使用しているロードセルの分解能の限界

降灰量計に使用しているロードセルは、以下のタイプである。

- ・形式：一般用圧縮型ロードセル 「LCF-A-2KN」（共和電業㈱製）
- ・定格容量：2kN(203.9kgf)
- ・温度補償範囲：－10～70℃ (許容温度範囲：－35～80℃)
- ・総合精度（分解能）：±0.1%RO 以内 (RO：定格容量)

当該ロードセルは、1基あたり定格容量の0.1%にあたる0.2kgf以内の分解能を有し、計3基では0.6kgf以内の分解能となる。また、外気温は当器の温度補償範囲内である。

(イ)検討目的

降灰量計の暴露試験の結果、重量測定値が外気温の影響を受けて、ドリフトを生じているため、その補正方法に関して検討を行う。

(ウ)検討結果

計測結果

現状の暴露試験結果のまとめ図として、ロードセルによる総重量測定値と外気温の関係を図 2.2.3.19 に示す。無降雨時において、温度の影響として約 3kgf のドリフトが生じている。別途実施した油膜による水分蒸発防止効果の実験において、このときの蒸発量による変動(重量減少分)は、油膜のない場合で 1 時間あたり約 30g である。降灰量計には油膜による水分防止対策が施されており、これよりも小さい値と考えられる。そのため約 3kgf の変動は、温度ドリフトのロードセル測定値に対する影響が大半を占めるとの判断ができる。

次に、無降雨期間として相対的に気温が低い（タンク内水分の蒸発量の小さい）、7 月 10 日 2:10～7 月 14 日 11:20 での気温と総重量の関係を図 2.2.3.20 に示す。これによると、温度によるデータのばらつきとして以下が挙げられる。

- ・同一温度において、上記の直線的な傾向から外れるばらつき（大きいところで±1kgf 程度のばらつきが認められる）
- ・温度上昇に応じて、総重量が直線的に増加する（気温と総重量においては正の相関があり、1℃あたりにおいて、0.153kgf 程度の重量増加が認められる）

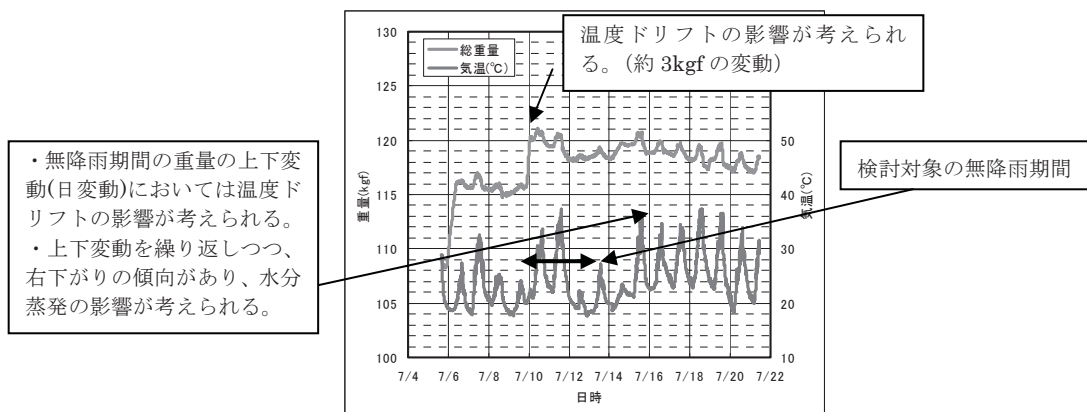


図 2.2.3.19 ロードセルによる総重量測定値と外気温の関係

温度ドリフト誤差の検討

上記のようにロードセル測定値のばらつきには 2 種ある。そこで、以下ではそれぞれのばらつきにおいて、降灰量計測にどの程度の影響を及ぼすかについて検討した。まず、温度一定時に発生する誤差は、 $\pm 1\text{kgf}$ 程度である。この 1kgf の増加が、降灰としてどの程度の厚み増加になるかを試算すると、火山灰の飽和密度を 2.0g/cm^3 と仮定し、タンク断面積は 2524cm^2 であるので、下式より $1000[\text{gf}]/(2.0[\text{g/cm}^3] \times 2524[\text{cm}^2]) = 0.2(\text{cm})$ 、 0.2cm 程度の誤差が推定できる。

$$(\text{降灰の厚み増加量}) = (\text{重量増加量}) / (\text{灰の飽和密度} \times \text{タンク断面積})$$

現状の火山灰堆積厚測定に求められる目標値は 10cm であり、予備試験で行なった標準砂による堆積厚測定において、降灰量計の厚み分解能は 1cm であったことから、上記のばらつきは許容誤差範囲内のばらつきであると考えられる。

次に、温度上昇時の誤差は、日中から夜間にかけて約 20 度変化する場合もあり、これが約 3kgf の変動に値する。上記のような試算をすると、この変動は灰堆積厚に換算して $0.6(\text{cm})$ の誤差となる。これは、降灰量計の厚み分解能は 1cm と比して無視できない。温度ドリフトの影響を直線関係として評価し、除去した結果を図 2.2.3.21

に示す。温度ドリフトによる影響を除去すると温度による重量増加は概ね 0 となり、ばらつきは概ね $\pm 1\text{kgf}$ に収まる。このばらつきによる灰堆積厚の計測誤差は 0.2cm 程度であり、許容誤差範囲内である。

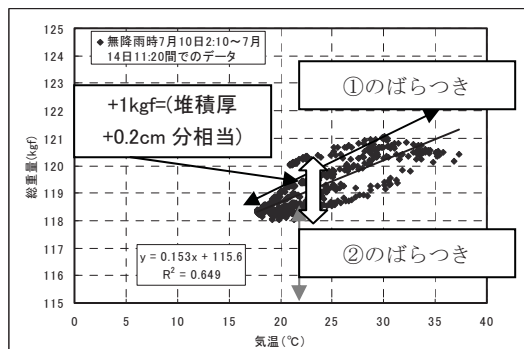


図 2.2.3.20 無降雨時における
気温と総重量の関係

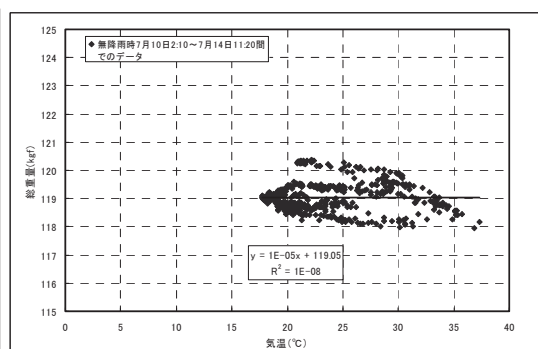


図 2.2.3.21 温度ドリフトの影響
を除去した結果

⑤耐雷対策

日本は温帯地域にあり山岳地が多いため熱雷や界雷が発生しやすく、国土のほぼ7割の地域が年間襲来日数(IKL)=20~40 の範囲に入る。このため、屋外に設置する電気機器・電子機器に対しては、雷の被害を受けないように雷に対する何らかの防護方策をとる必要がある。雷防護という面で考えた場合には、直接雷撃を受け被雷物の一部または全体に大電流が流れ、電氣的破壊および熱的破壊を生じさせる直撃雷と、近傍に落雷があったときに雷放電路に流れる大電流によって発生する強い電磁界の影響により電氣的な被害を受ける誘導雷がある。直撃雷による被害を防止するためには、避雷針等を被保護物の付近に設置し、雷放電路を避雷針に誘導し、大電流を大地に安全に流す対策が取られる。しかしながら、被保護物が機器・装置・器具のような場合には、これらのために避雷針等を設置するようなことは経済性に見合わないため、直撃雷に対する防護は行わず、誘導雷に対する対策が一般的にとられる。このため、今回開発した降灰量計についても、直撃雷に対する防護は行わず、誘導雷に対する防護を行うこととする。

⑥降灰量計の現地適用限界について

降灰量計の現地設置にあたっては、下記の点を留意しておく必要がある。

- ・火山弾などの衝撃には耐える設計となっていないこと

火山噴出物には細粒な火山灰のほか、径5cm以上、時には数10cmに及ぶ火山弾の噴出もある。火山弾の衝撃を避けるためにはコンクリート等で降灰量計の周囲を覆う必要があるが、設置作業が膨大な量となり現実的でないため考慮しないこととした

- ・降灰量計高さを超える堆積には対応していないこと
- ・泥流発生する河床には置けないこと

(4) 現地設置法と現地観測結果

①設置上の留意点と設置法

(ア)設置上の留意点

降灰量計設置に関わる諸条件を表2.2.3.8に示した。今回は国内で火山活動が比較的活発化した桜島に設置することとした。

表 2.2.3.8 現地設置に関わる留意点

条 件	理 由
オープンスペースに設置	・崖からの礫落下、木々による火山灰堆積の遮蔽を考慮して、オープンスペースに設置する。 ・電源供給は太陽光発電や風力発電によるため、太陽光が届く箇所や遮蔽物ない箇所が望ましい。
コンクリート基礎上に設置	不等沈下して、降灰量計に傾きが生じないように、地盤を締固めたうえ、コンクリート基礎を打設し、基礎上に降灰量計を設置する必要がある。
携帯電話サービスエリアに設置	近年、情報基盤が急速に整備されていることから、山地地域でも携帯電話サービスエリアが拡大している。携帯電話によるデータ伝送を考慮して、サービスエリア内に設置することが望まれる。
断熱対策	メーカー資料では、ロードセルは、温度の急速な変化、温度勾配がある場合に精度良く測定できないとされ、熱源となる日射の回避、断熱材でロードセルを囲むなどの対策が必要となる。

(イ)設置の手順

降灰量計設置の流れを図 2.2.3.22 に示し、各作業の流れと留意点等を表 2.2.3.9 に示す。また、現地設置にあたっては、以下に示すようなロードセル断熱対策を実施して、ロードセルに対する温度の影響を軽減する必要がある。具体的な断熱対策例は図 2.2.3.23 のとおりである。

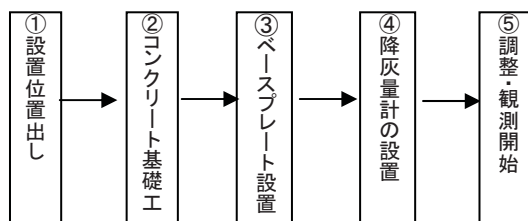


図 2.2.3.22 降灰量計設置の流れ

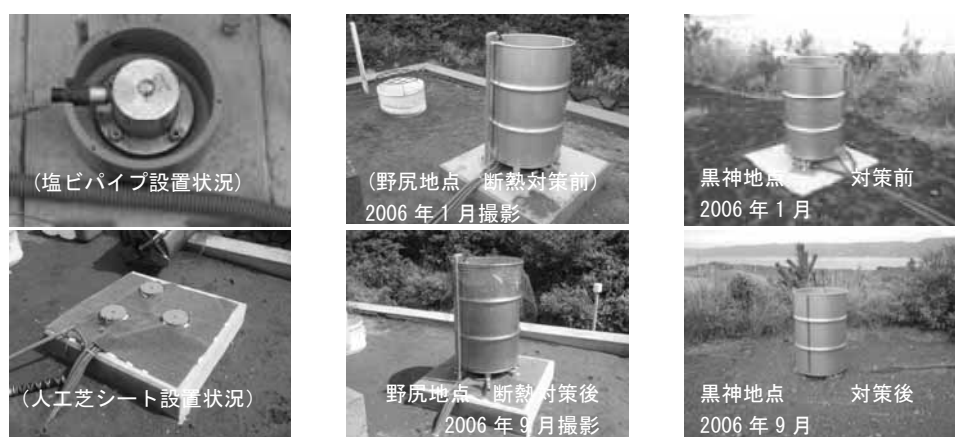


図 2.2.3.23 ロードセル断熱対策状況

表 2.2.3.9 降灰量計設置までの流れ

作業項目	留意点など	作業写真
①設置位置出し	平坦かつオープンスペースに設置するものとする。	
②コンクリート基礎施工	1.0×1.0×0.2(m)程度を床掘し、地盤を締固め、コンクリート基礎を打設する。収縮クラックを防止する配力鉄筋を挿入する。	
③降灰量計ベースプレート設置	ロードセルの水平性確保のため基礎の施工と同時にベースプレートを設置するか、施工後グラインダ等でコンクリート面を切削する必要がある。	
④降灰量計の設置	ベースプレート上にロードセルを設置する。また、断熱対策を実施する。	
⑤タンク設置・調整・観測開始	タンクを設置し、電源設備やデータロガーなどを設置、調整、観測を開始する。調整にあたっては、一定重量の水を投入し、荷重増加値および水位増加値が正しい値を示すか確認する。	

(ウ)現地設置位置

風向による火山灰堆積厚の違いを明らかにするため、御岳西側の野尻地点ならびに東側の黒神地点の2地点とした。設置地点の詳細は、鹿児島県桜島野尻川5号えん堤上流部（以下、野尻地点）および黒神川(以下、黒神地点)である。野尻地点は雨量観測局舎上、黒神川地点は既設の風速計脇に設置した。設置位置を図2.2.3.24～図2.2.3.26に示す。野尻地点は、国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所設置の既設の手動型降灰量計(No.13)のすぐ脇に位置し、黒神地点は既設の手動型降灰量計(No.1)の約200m上流に位置する。

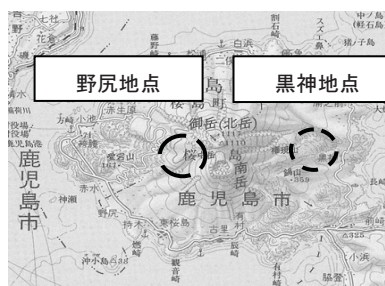


図 2.2.3.24 設置位置



図 2.2.3.25 野尻川地点

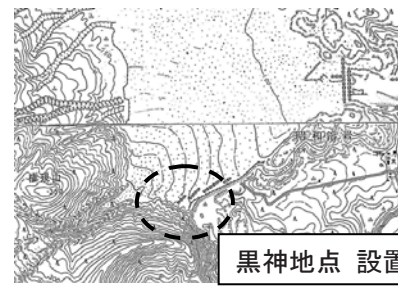
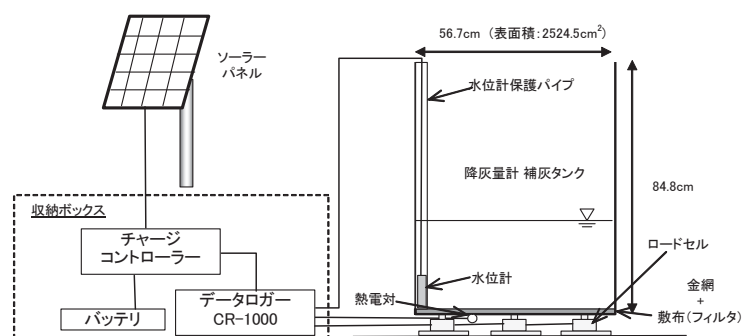


図 2.2.3.26 黒神川地点

(エ)設置した観測システム

設置した降灰量計の観測システム概要図を図2.2.3.27、設置品の一覧を表2.2.3.10に示す。



*水投入前の重量（タンク＋（金網＋敷布(フィルタ)）＋水位計＋水位計保護パイプ）＝50.2kgである。

図 2.2.3.27 降灰量計観測システム概要図

表 2.2.3.10 設置品一覧

部位	設置品	数量
計測部	降灰量計	1
	熱電対（銅・コンスタンタン）	3
記録部	データロガー（CR1000/Campbell 社）	1
電源供給部	ソーラーパネル（SX20U/SOLAREX 製）	1
	チャージコントローラー（SS-6L/株電菱）	1
	バッテリー（NP7-12/YUASA 社）	1
機材収納部	屋外用制御盤ボックス（OR16-45/日東工業(株)）	1

(オ)設置後の状況

野尻地点の設置状況を図 2.2.3.28、図 2.2.3.29 に示す。設置後約 1 年経過し、SUS 製であったがドラム缶表面上の錆付きが目立つ状況であった。また、黒神地点の設置状況を図 2.2.3.30、図 2.2.3.31 に示す。黒神地区では錆は確認されていない。



図 2.2.3.28 観測局舎上設置状況(野尻地点)

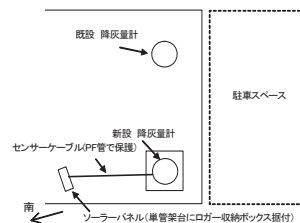


図 2.2.3.29 設置位置概略図



図 2.2.3.30 降灰量計 設置状況(黒神地点)

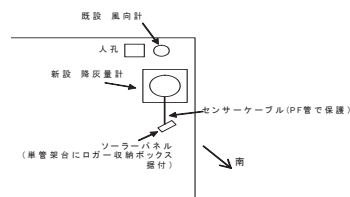


図 2.2.3.31 設置位置概略図

②現地観測結果

(ア)現地観測結果

降灰量計におけるロードセルの名称、各ロードセル名称 A, B, C の位置を図 2.2.3.32、図 2.2.3.33 に示す。野尻地点および黒神地点ともに、当初はロードセルの断熱対策を実施していなかったが、現地観測精度の安定値の安定を目的として断熱対策を実施した。断熱対策を実施した時期は平成 18 年 8 月 30 日～9 月 1 日である。断熱対策後には、全ロードセルに熱電対を設置し温度測定を実施した。観測結果は野尻地点を図 2.2.3.34、図 2.2.3.35、黒神地点を図 2.2.3.36、図 2.2.3.37 に示した。

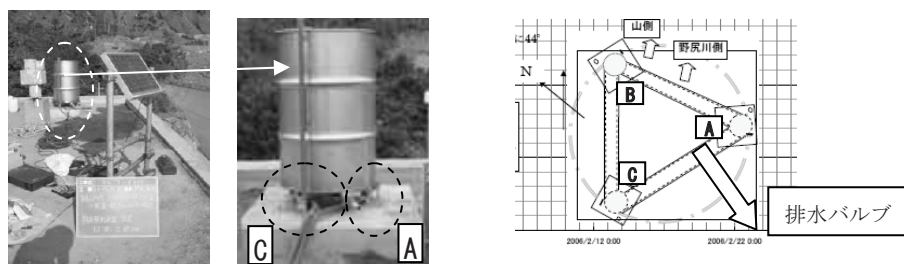


図 2.2.3.32 野尻地点降灰量計 ロードセル A, B, C の位置

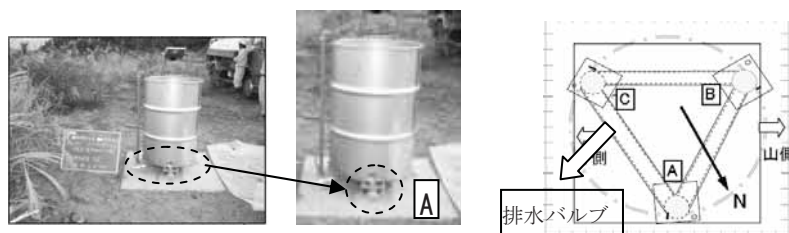


図 2.2.3.33 黒神地点降灰量計 ロードセル A, B, C の位置

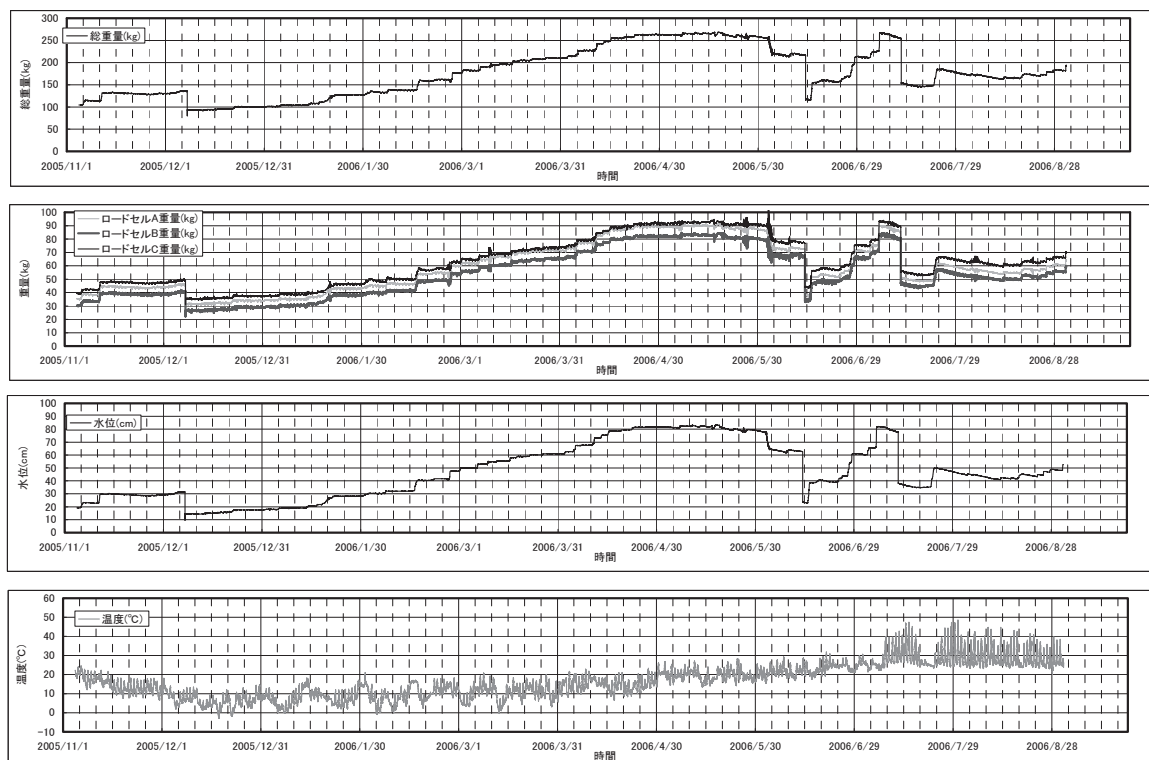


図 2.2.3.34 降灰量計観測データ 野尻地点 (断熱対策前 2005 年 11 月～2006 年 8 月)

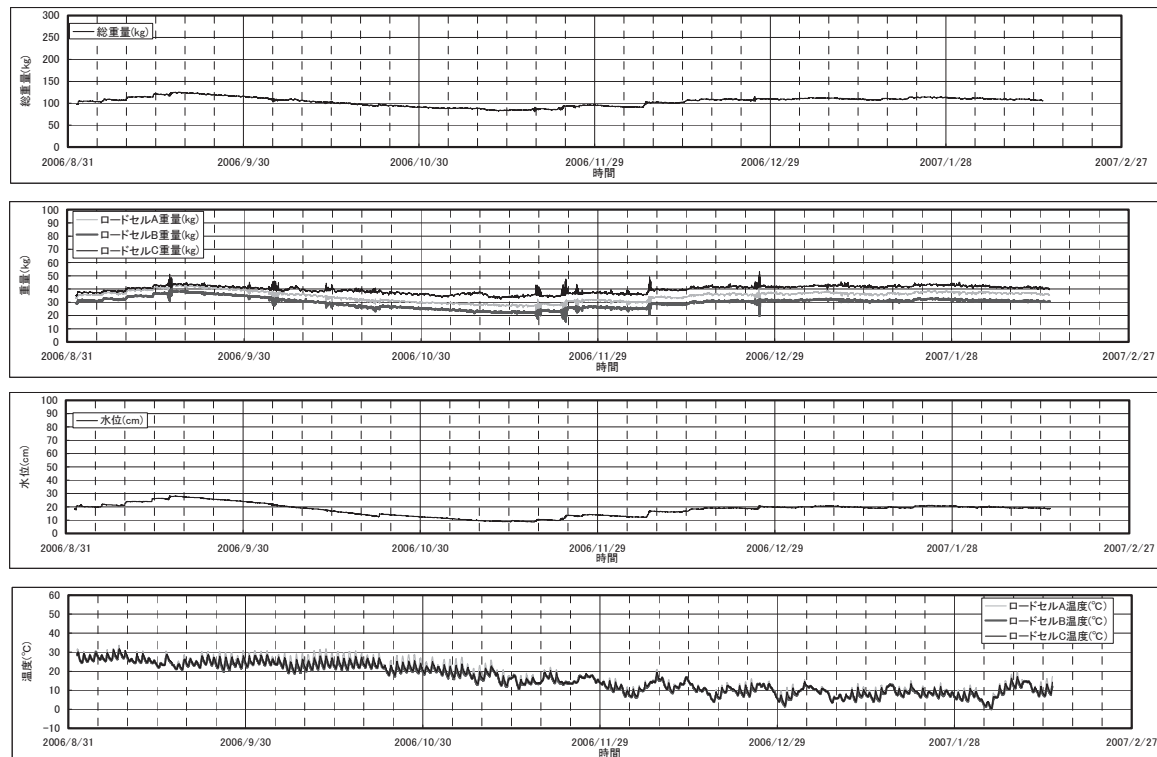


図 2.2.3.35 降灰量計観測データ 野尻地点 (断熱対策後 2006 年 9 月～2007 年 2 月)

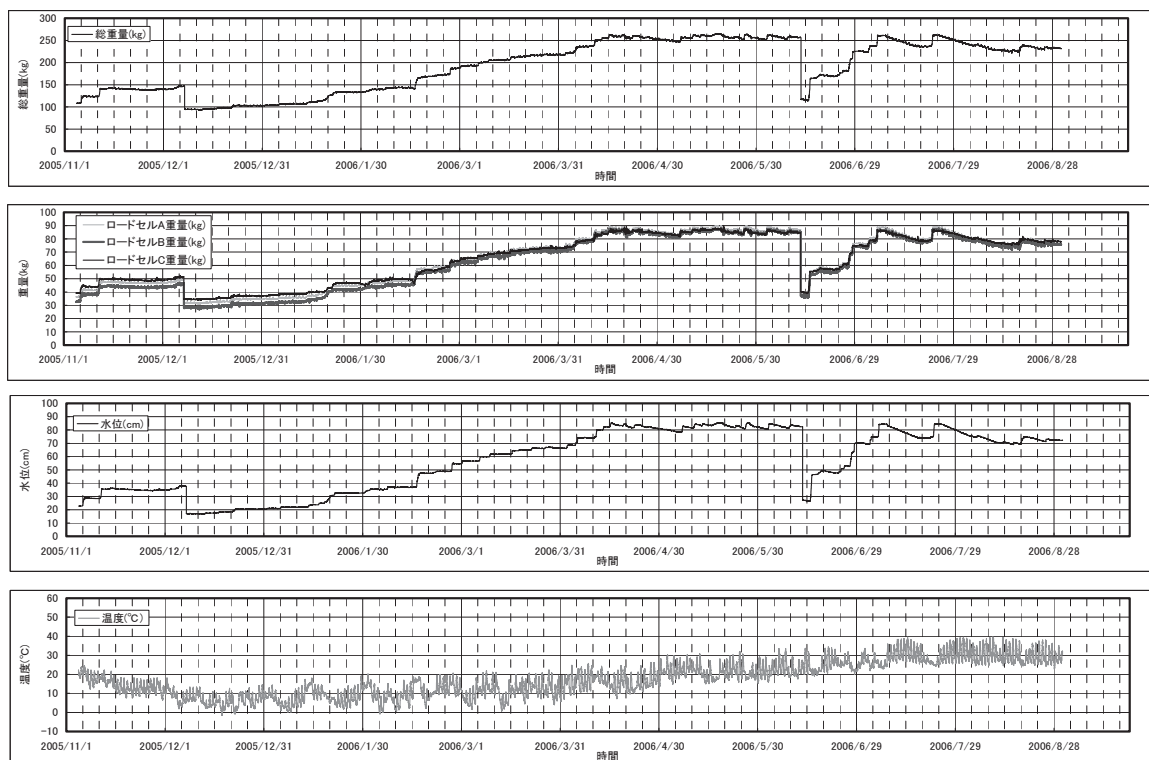


図 2.2.3.36 降灰量計観測データ 黒神地点 (断熱対策前 2005 年 11 月～2006 年 8 月)

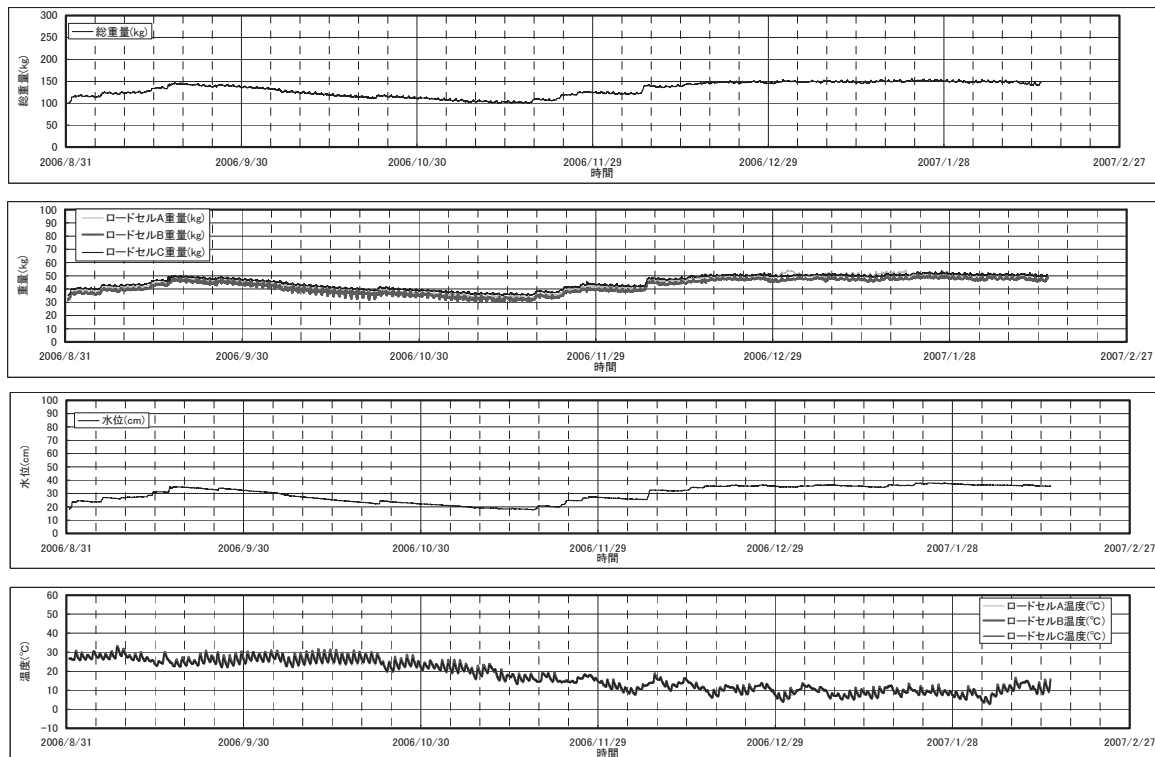


図 2.2.3.37 降灰量計観測データ 黒神地点 (断熱対策後 2006 年 9 月～2007 年 2 月)

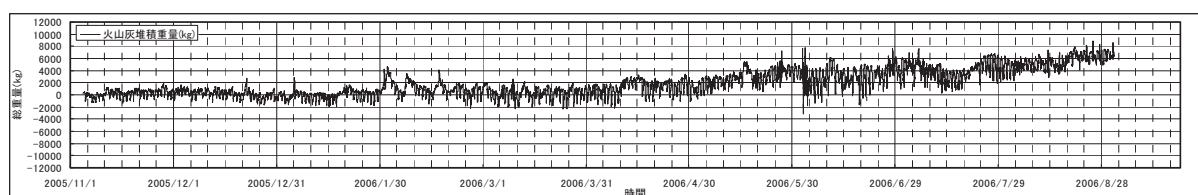
(イ)火山灰堆積重量及び堆積厚への換算結果

両地点の火山灰堆積重量及び堆積厚への換算結果は、野尻地点を図 2.2.3.38、図 2.2.3.39、黒神地点を図 2.2.3.40、図 2.2.3.41 に示す。降灰量計のデータは 10 分間隔の観測データであるが、データは毎 10 分の瞬時値を採用しているためノイズの影響を受けやすい。そこで、前後 30 分間のデータで移動平均を取り、観測データの平滑化を実施した。断熱対策後のグラフを確認すると、計測当初（2006 年 9 月中）においては火山灰厚の変動が 1cm 以内に収まっており所定の観測精度内である。しかし、野尻地点においては、2006 年 10 月 6 日以降堆積厚が急増しており、2～4cm 程度の堆積厚となっている。そのときの火山灰重量は 15kg 程度にあたる。しかし、実際には、降灰量計で観測できるだけの降灰・堆積はなかった。

野尻地点においては、図 2.2.3.42 に示すとおり、設置したロードセルの挙動の異常が示されており、他の 2 基が荷重減少を示しているのに対して 1 基は荷重増加を示している。2～4cm 程度の堆積厚が換算された原因はこの異常による影響と考えられる。また、黒神地点においても、図 2.2.3.43 に示したように平成 18 年 12 月 29 日以降、設置したロードセルの挙動の異常が示されており、この影響を受けたものと解釈される。

次項では、この異常に対する補正法等について検討した。

火山灰堆積重量



火山灰堆積厚

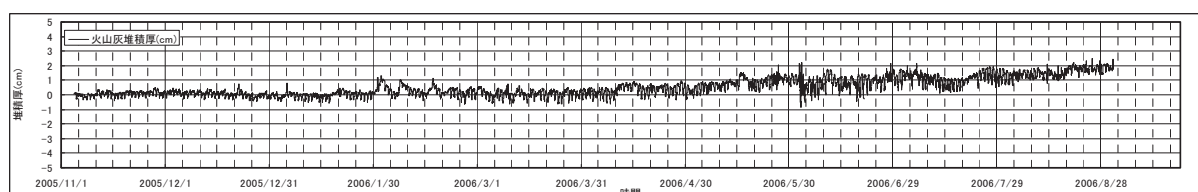
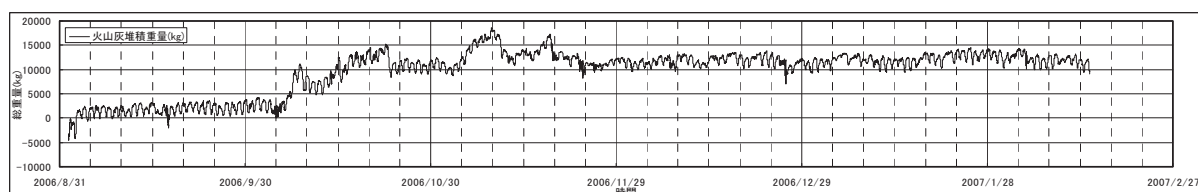


図 2. 2. 3. 38 降灰量計換算データ 野尻地点 (断熱対策前 2005 年 11 月～2006 年 8 月)

火山灰堆積重量



火山灰堆積厚

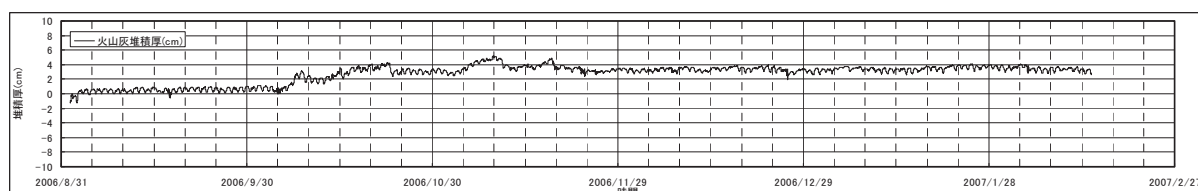
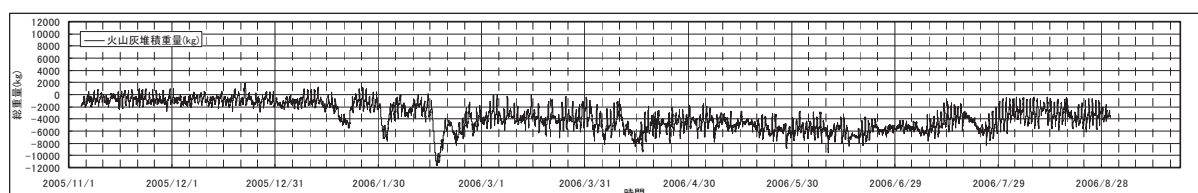


図 2. 2. 3. 39 降灰量計換算データ 野尻地点 (断熱対策後 2006 年 9 月～2007 年 2 月)

火山灰堆積重量



火山灰堆積厚

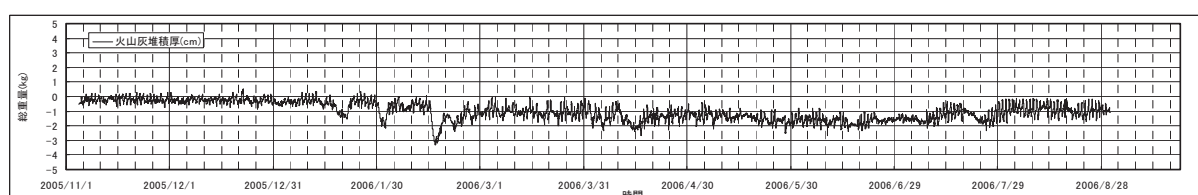
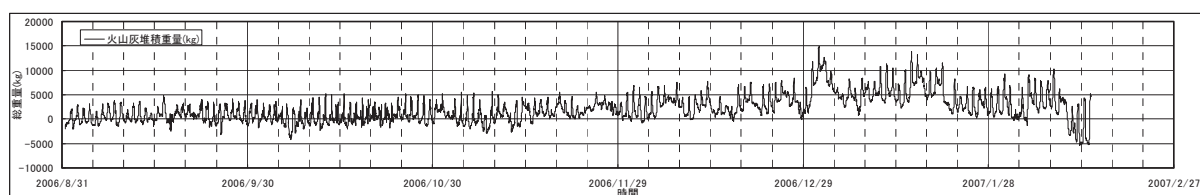


図 2. 2. 3. 40 降灰量計換算データ 黒神地点 (断熱対策前 2005 年 11 月～2006 年 8 月)

火山灰堆積重量



火山灰堆積厚

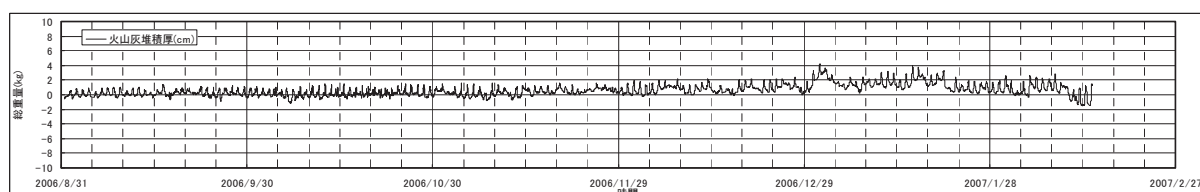


図 2.2.3.41 降灰量計換算データ 黒神地点（断熱対策後 2006 年 9 月～2007 年 2 月）

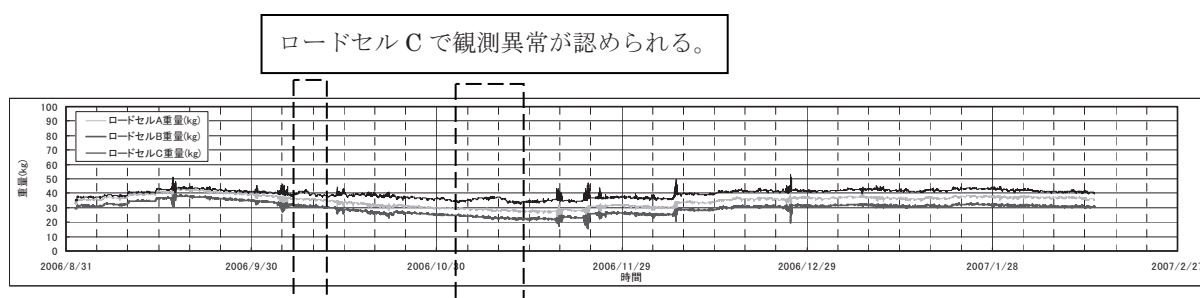


図 2.2.3.42 各ロードセル荷重と異常を示したデータの事例（野尻地点）

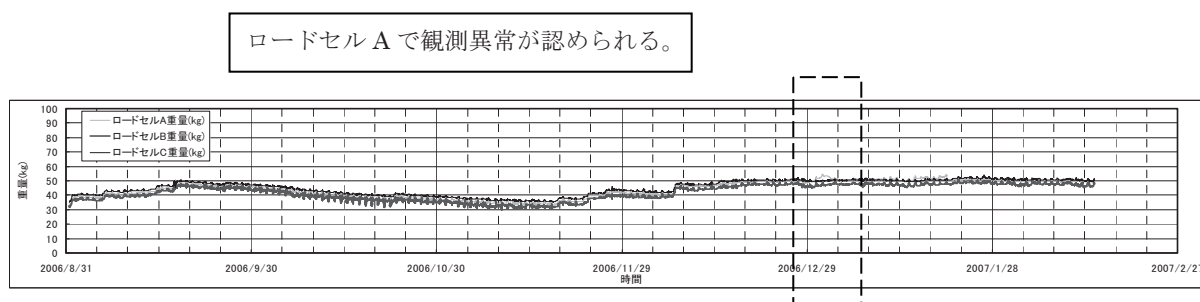


図 2.2.3.43 各ロードセル荷重と異常を示したデータの事例（黒神地点）

③計測法に関するいくつかの対策

(ア)ロードセル 指示値異常に関する補正法の検討

目的と補正実施方法

野尻地点のロードセル 1 基が、他のロードセルと異なる荷重増減傾向を示しており、その結果降灰量計の降灰堆積厚で、最大 5cm 程度に達する変動が認められたと考えられた。そこで、このような影響を除去するため、補正を実施した。黒神地点においても、ロードセル 1 基が、他のロードセルと異なる荷重増減傾向を示しているため、同様の補正を実施した。補正の考え方は以下のとおりである。また、補正実施の流れを図 2.2.3.44 に示す。

正常と考えられるロードセルの荷重をそれぞれ A 並びに B として、異常と考えられるロードセルの荷重を補正したロードセル荷重 C'は、

$$C' = (\alpha A + \beta B) / 2$$

ここで、 α および β は荷重比率を表し、異常発生前のロードセルの荷重を C とした場合、以下で求めた。

$$C = \alpha \cdot A \quad C = \beta \cdot B$$

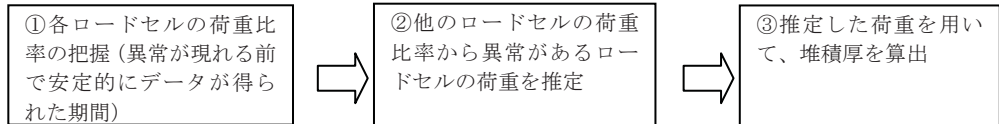


図 2.2.3.44 補正実施のフロー

各ロードセル測定値の相関関係

野尻地点においては、異常が現れる前で安定的にデータが得られた時期として、平成 18 年 9 月 4 日～9 月 16 日までのデータ（データ数：1728）を用いて、各ロードセルの荷重比率を求めた（図 2.2.3.45）。野尻地点で異常が発生したのはロードセル C である。次に黒神地点においては、異常が現れる前で安定的にデータが得られた時期として、野尻地点と同様の平成 18 年 9 月 4 日～9 月 16 日までのデータ（データ数：1728）を用いて各ロードセルの荷重比率を求めた（図 2.2.3.46）。黒神地点で異常が発生したのはロードセル A である。

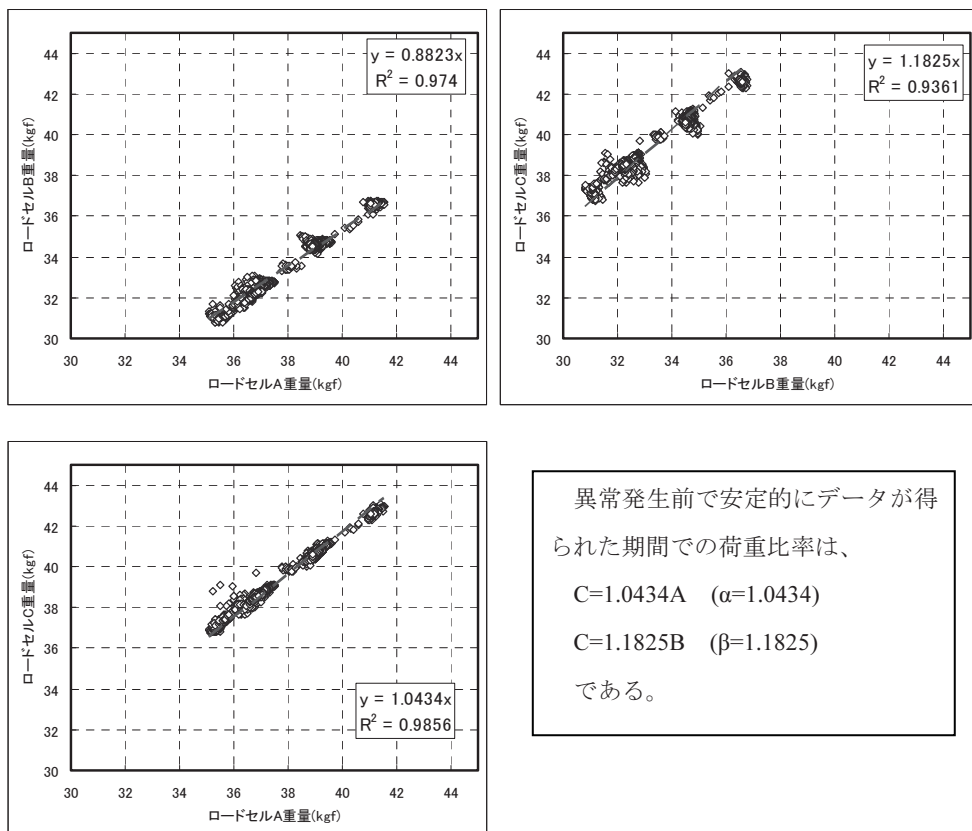


図 2.2.3.45 野尻地点の各ロードセルの荷重対応関係

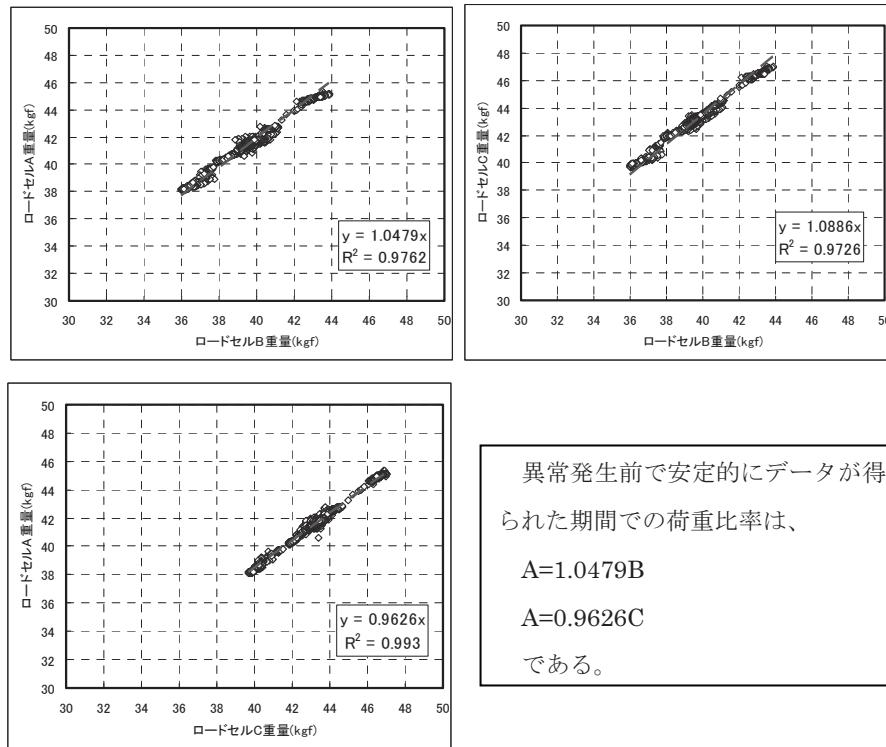


図 2.2.3.46 黒神地点の各ロードセルの荷重対応関係

ウ) 補正結果

野尻地点（平成 19 年 1 月 10 日までのデータ）

補正を行なった時期を図 2.2.3.47 に示し、補正前と後を対比して図 2.2.3.48、図 2.2.3.49 に示す。補正実施後、堆積厚の急増は認められなくなっており、堆積厚はほぼ 2cm 以内に収まっている。また、補正の効果が現れていることから、堆積厚の異常は 1 基の観測異常に起因しているものと考えられる。

黒神地点

補正を行なった時期を図 2.2.3.50 に示し、補正前と後を対比して図 2.2.3.51、図 2.2.3.52 に示す。補正実施後堆積厚の急減は認められなくなっており、堆積厚はほぼ 2cm 以内に収まっている。また、補正の効果が現れていることから野尻地点同様に堆積厚の異常が 1 基の観測異常に起因しているものと考えられる。ただし、黒神地点においては、断熱対策後の観測当初に比較して厚みのばらつきが大きくなっており（当初 1cm 以内で推移していた値が、3cm にまで拡大）、ロードセル観測異常の原因、ばらつきが大きくなる原因を調査する必要がある。

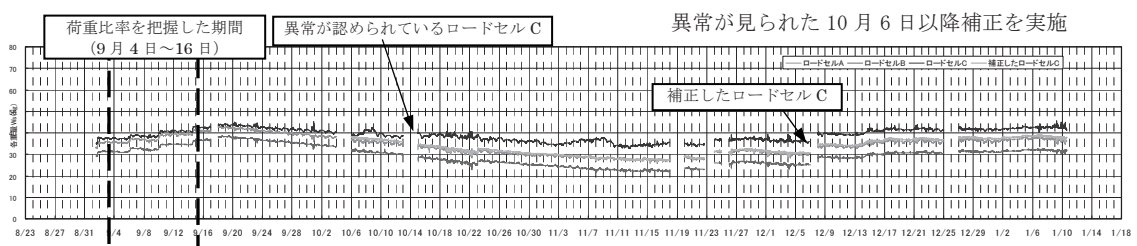


図 2.2.3.47 各ロードセルの荷重(野尻地点)

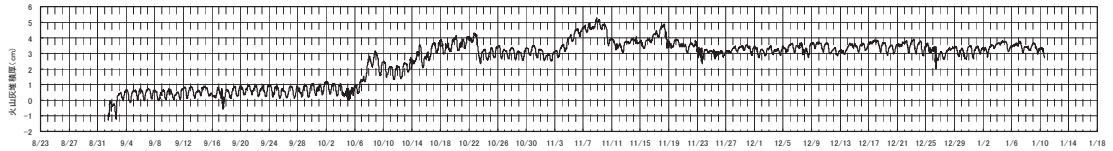


図 2.2.3.48 補正前堆積厚(野尻地点)

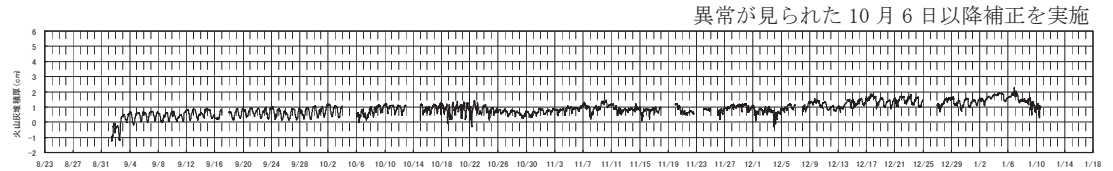


図 2.2.3.49 補正後堆積厚(野尻地点)

(観測期間：平成 18 年 9 月～平成 19 年 1 月)

*風荷重を受け各ロードセルの荷重に偏りが生じているデータは図示していない。

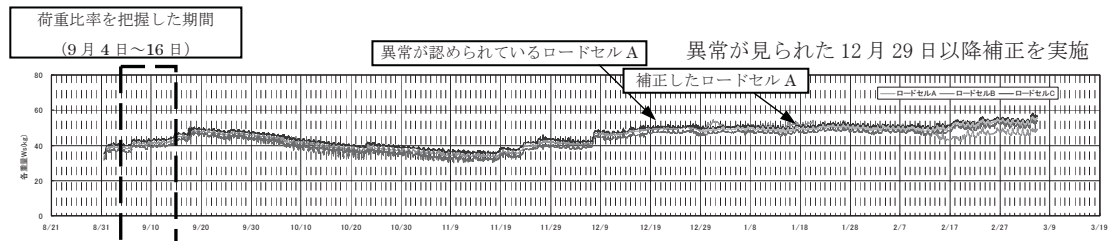


図 2.2.3.50 各ロードセルの荷重(黒神地点)

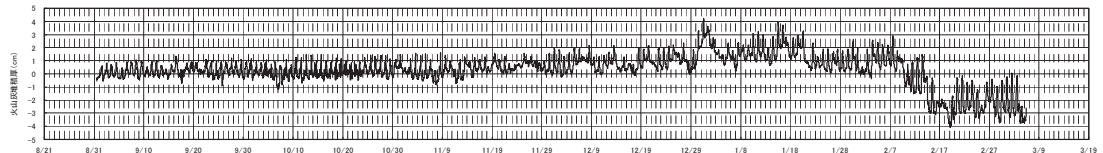


図 2.2.3.51 補正前堆積厚(黒神地点)

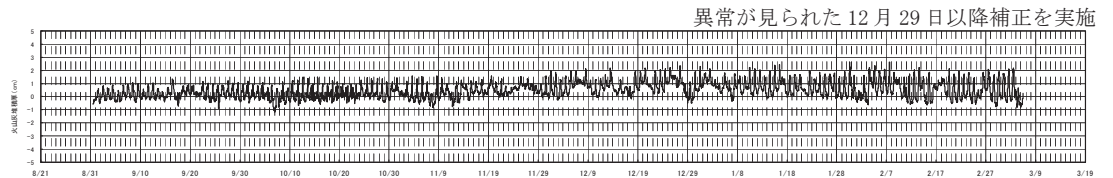


図 2.2.3.52 補正後堆積厚(黒神地点)

(観測期間：平成 18 年 9 月～平成 19 年 3 月)

(イ)温度補正に関する検討

温度補正の概要

メーカー資料によるとロードセル使用上の留意点として、補償温度範囲内で温度による影響は補償されてはいるが、急速な温度変化や温度勾配がある場合には精度が落ちるため、

断熱材で囲む必要があるとしている。桜島での観測の結果、この温度の影響は火山灰厚にして約 1cm となり誤差として無視できない。そこでロードセルを塩ビ管で囲い塩ビ管内にグラスウールを詰めることで、直射日光遮蔽などの断熱対策を実施した。図 2.2.3.53 に断熱対策前後の温度変化を示す。対策前に 30℃ 台後半にあった温度が 30℃ 程度になっており、大幅に温度変化を抑えることができた。断熱対策により急激な温度変化は抑えられたがロードセルの温度依存性を完全に除去することができなかった。そこで、温度依存性を除去する方法として、観測データに補正を行なう方針とした

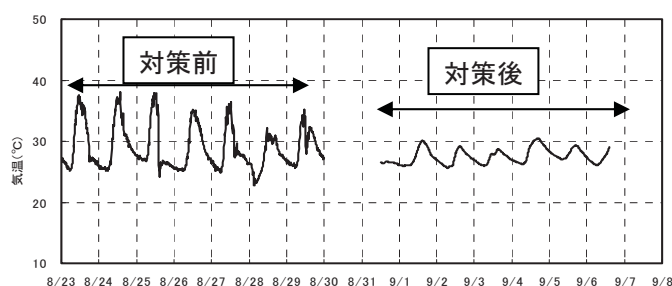


図 2.2.3.53 断熱対策前後の温度変化

既往の研究事例

気温と計測データの相関性を議論し、補正を実施した研究事例として、例えば、東北大学の研究事例である立花 (1998)²⁾や京都大学の研究事例である竹本ら(2004)³⁾がある。立花 (1998) は、地震の前兆をとらえることを目的とした地殻変動（ひずみ）観測に用いている計器が、温度による影響と思われる変動が観測されノイズとなっていることを報告している。この研究では、観測坑内の温度変化を複数台の高精度温度計（分解能：1/1000℃）を用い、歪・傾斜の同時観測データから相関等を詳細に調べ、歪と傾斜データに含まれる温度の影響を取り除き S/N 比の向上をはかっている。観測計器の配置は図 2.2.3.54 のとおり伸縮計 3 成分（EXT1～3）、水管傾斜計 2 成分（WTT1-2, WTT3-4）のほか、観測孔内温度観測が伸縮計、傾斜計を挟む TMP1～6で行っている。

観測の結果、伸縮計データと温度データの変化傾向は非常によく一致するとし、例えば、EXT1, TMP1 に関する図 2.2.3.55 によると、温度と歪の記録は非常によく似ている。しかし位相は若干ずれて温度の変化傾向より歪が早く現れており 12 日ほど歪のデータを遅らせると位相がよく一致し、その関係は 1 次関数で近似され温度係数は-3,890 ナストrein/℃となる。この歪と温度の直線関係から温度補正を行なうと図 2.2.3.56 が得られ、青線で示すように温度依存性は概ね除去されている。

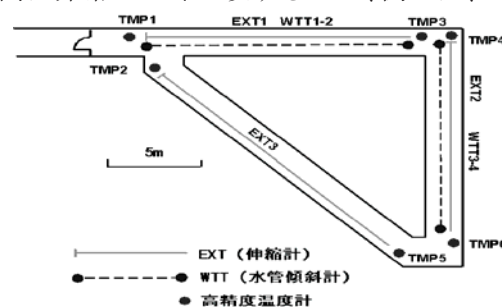


図2 東北大学観測坑最奥部分の平面図、及び観測計器の配置

図 2.2.3.54 東北大学地殻変動観測計器配置²⁾

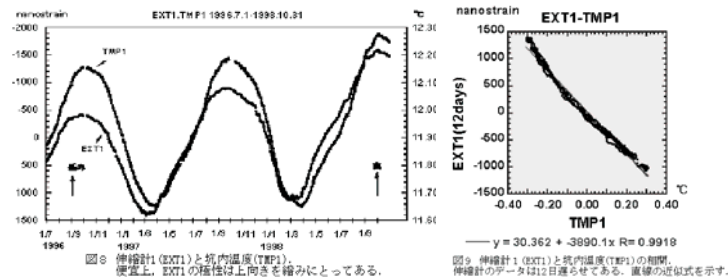


図 2.2.3.55 ひずみデータの温度依存性²⁾

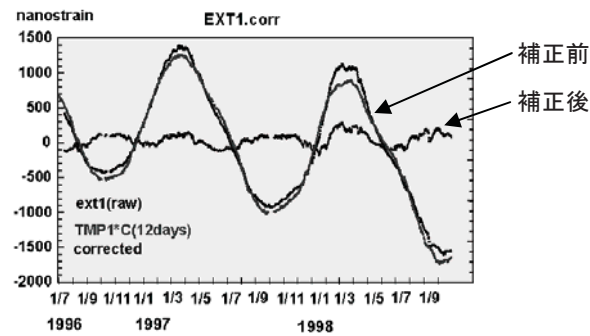


図 2.2.3.56 温度補正前後のひずみデータ²⁾

(ウ)断熱対策後の観測データと温度補正

立花の研究²⁾を参考として、各地点の降灰量計の温度補正を試みた。

黒神地点

断熱対策後当初の観測データのうち、換算した火山灰堆積量と温度の結果を以下に示す。この間には降灰はほとんどない状況であった。堆積量と温度の間には正の相関性があることが認められる (図 2.2.3.59)。ただし、堆積量のピークと温度のピークを示す時間はずれており (図 2.2.3.57)、立花の報告と同様に、火山灰堆積量が増加した後にそれに追従するように温度が変化する傾向が認められる。そこで目視にて温度データのシフト量を換算し 80 分温度データをシフトさせたところ、図 2.2.3.58 に示す結果が得られ、両者のピークが一致する傾向が認められた。シフトさせた後の堆積量と温度の相関性は、1 次関数で近似でき、この直線関係 (図 2.2.3.59) で補正した結果を図 2.2.3.60、図 2.2.3.61 に示す。堆積厚のピークを見ると、補正前後で約 0.5cm 厚みが減少している。

野尻地点

野尻地点においては、堆積量と温度の間には負の相関性があることが認められる (図 2.2.3.62)。目視にて温度データのシフト量を換算し、黒神と同様に 80 分温度データをシフトさせると、図 2.2.3.63 が得られ、両者のピークが一致する傾向が認められた。

堆積量と温度の直線関係 (図 2.2.3.64) で補正前・後を比較して図 2.2.3.65、図 2.2.3.66 に示す。堆積厚のピークを見ると、補正前後で約 1cm 程度厚みが減少し、補正の効果が現れていることが分かる。今後はシフト量が一定値と見てよいか、相互相関係数を用いてシフト量の定量的決定法を精査する必要がある。

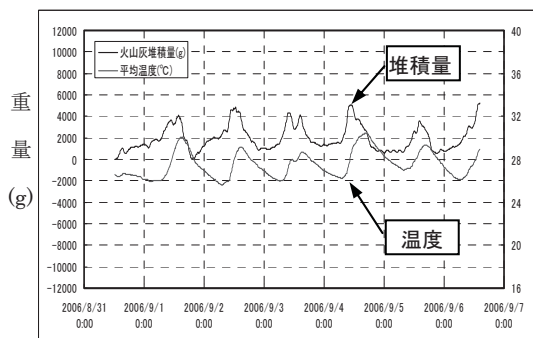


図 2. 2. 3. 57 黒神地点の堆積量換算値と
温度の時系列変化(生データ)

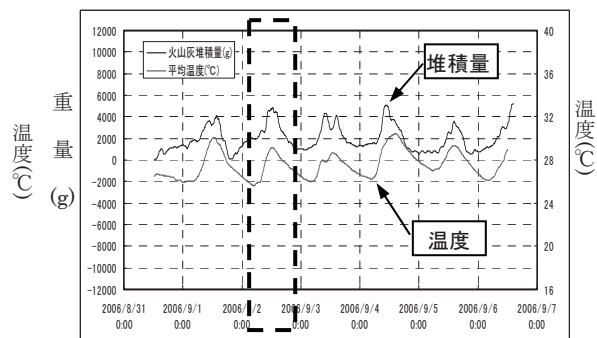


図 2. 2. 3. 58 黒神地点の堆積量換算値と
温度の時系列変化

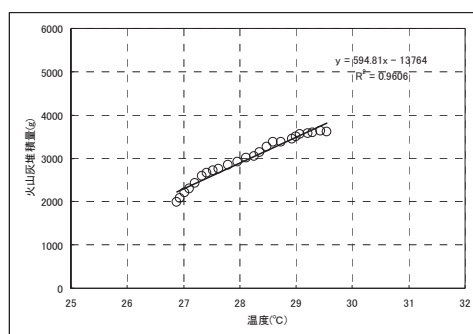


図 2. 2. 3. 59 火山灰堆積量と温度との関係(黒神地点)

黒神地点の温度と火山灰堆積重量の
相関性(上記グラフの破線内データ
を使用)
 $+594.8\text{g}/^{\circ}\text{C}$ (決定係数 $R^2=0.96$)
上記の補正係数を用いて、補正を実
施することとした。

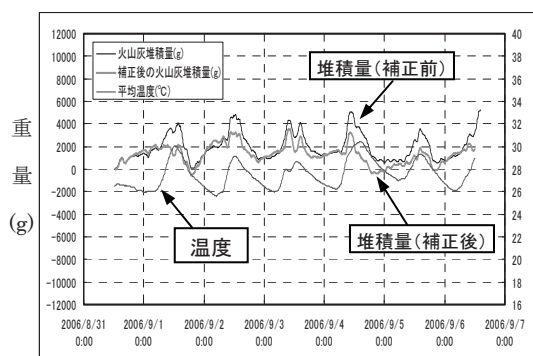


図 2. 2. 3. 60 黒神地点の補正前後の
堆積量換算値の時系列変化

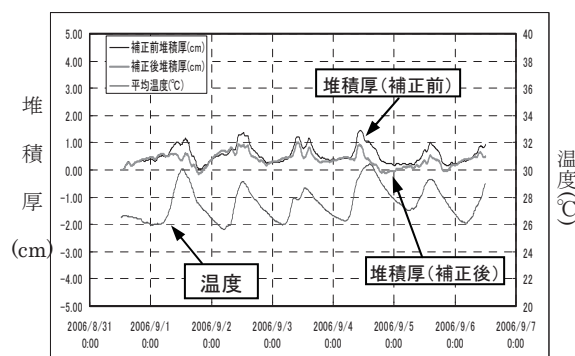


図 2. 2. 3. 61 黒神地点の補正前後の
堆積厚換算値の時系列変化

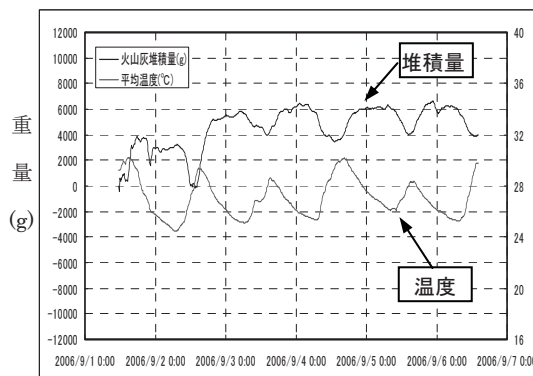


図 2. 2. 3. 62 野尻地点の堆積量換算値と
温度の時系列変化(生データ)

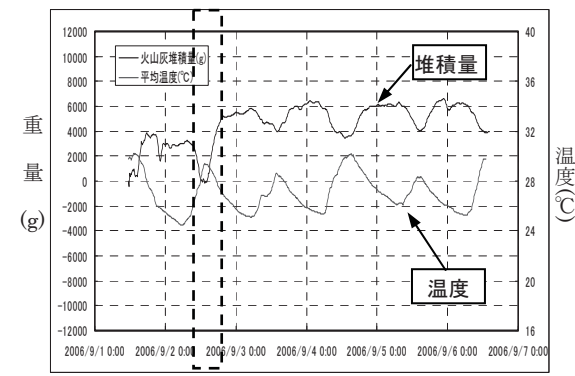
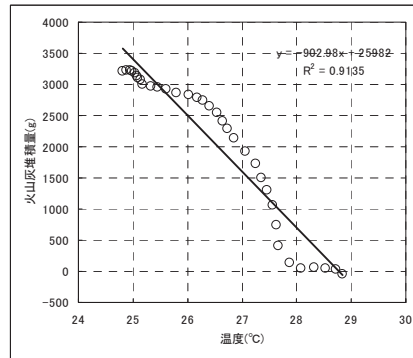


図 2. 2. 3. 63 野尻地点の堆積量換算値
の時系列変化



野尻地点の温度と火山灰堆積重量の相関性（上記グラフの緑枠内データを使用）
 $-903.0\text{g}/^{\circ}\text{C}$ (決定係数 $R^2=0.91$)
 上記の補正係数を用いて、補正を実施。

図 2.2.3.64 火山灰堆積量と温度との関係（野尻地点）

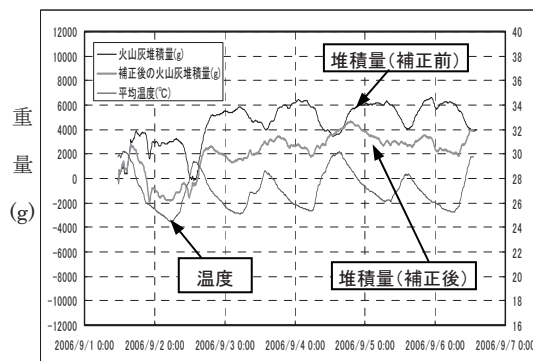


図 2.2.3.65 野尻地点の補正前後の堆積量換算値の時系列変化

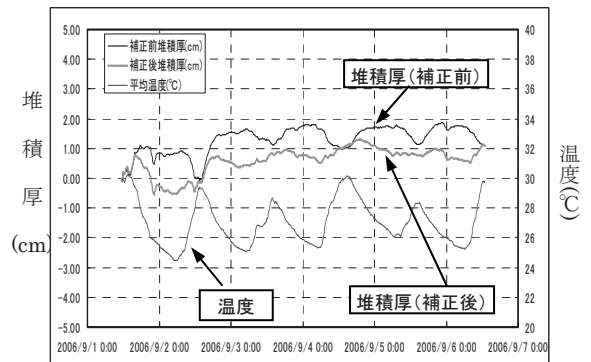


図 2.2.3.66 野尻地点の補正前後の堆積厚換算値の時系列変化

④計測精度

ロードセルの観測異常がなく、温度補正後を行うことを前提とすると計測精度は、野尻地点で、 $\pm 1\text{cm}$ （ピークからピークの値で、 2cm 程度）、黒神地点で、 $\pm 1.5\text{cm}$ （ピークからピークの値で、 3cm 程度）である。

⑤現地設置して判明した事項

蒸発防止用オイルの投入は、その効果の反面、オイルの酸化という副作用が生じる。それに伴い形成される白色の泡を排除するのは意外に困難で、タンク内の火山灰をサンプリングする作業性に支障をもたらす。これまでの観測結果によると、貯留水が完全になくなることはなく、むしろ蒸発防止オイルは入れないほうが現実的とも考えられる。

(5) 機動性および精度向上に関する小型化の検討

①試作機の問題点

試作機は機能・精度において概ね目的を達成するが、かなり大型であるため運搬および現地における台座の製作など設置作業が大掛かりとなる。そのため火山活動の前兆現象下における緊急を要する場合には、現状の装置では経済性と機動性において設置地点数の制約を受けるため適切とは言い難い。そのため、機動性に富み、多くの地点に設置できるような小型タイプの検討を行なった。

②小型化の基本方針

小型化の検討に際し以下の事項を基本的方針とした。

- (ア) 速やかな適地への運搬・設置が人力で可能であること。(部材寸法・重量の配慮)。
- (イ) 危険地域での現地作業は可能な限り短縮化が可能な構造とし、設置後数年間はメンテナンスフリーとする。
- (ウ) 温度の急変化の影響、風による横荷重の影響を軽減する対策を行なう。
- (エ) 傾斜の影響を軽減するため、装置はできるだけ鉛直を保つ構造とする。
- (オ) 無人観測を行い、データは携帯電話など無線通信により伝送する。
- (カ) 出来るだけ多くの設置を可能とするため、機器コスト・設置コストを抑える（高精度・高コストの観測機とはしない）。

③構造の検討

(ア) 捕灰容器の寸法

雨量計は、降灰と同様に風などの影響を受けながら空中落下する物質を捕捉する機器として基準の寸法になる。簡易型としては 14~18cm なども供用されているが、雨量計の口径は気象庁により $20\pm0.6\text{cm}$ が規定されている。降灰量計の事例ではドラム缶(ϕ 約 56cm)があるが、現在のところ適切な口径を決める根拠は明確ではなく、簡易的にバケツ、洗面器、コップなどの器を利用して降灰状況を研究レベルで観測が行われている。また、雨滴の径は約 1mm が 90%以上とされている。しかし、火山灰は粘土 ($5\mu\text{m}$ 以下)・シルト ($74\mu\text{m}$ 以下) から砂(2mm 以下)や礫相当 (2mm 以上) のスコリアなども含まれ一概には代表粒径を特定できない。また、物質特性としても水の密度 ($\rho_w=1\text{g/cm}^3$) に対して、火山灰の粒子密度は、乾燥したスコリア以外は 1 以上である ($\rho_s=2.1\sim2.8\text{g/cm}^3$)。これら火山灰の物質特性と風の影響などを考慮し、雨滴との相対評価により適切な口径を決定する事が論理的であるが、上記のように物性値の特定が出来ないことや、同じ火山でも噴火時期によってその特性が異なる実態がある。

口径が大きいほど風の影響による捕捉誤差が少なくなるとの定性的判断は出来るが、装置の小型化(軽量化)を目的とした場合、最小限の寸法を雨量計以上とする根拠付けは上記の理由で難しい。反対に、雨量計より小さくてもよいという根拠においても同様であることから、小型降灰量計の容器は、雨量計に準じることとする。

(イ) 貯水式と流水式の比較

捕灰容器の底面にドレインを設けて雨水を排水するタイプと、ある程度の水深でオーバーフローさせる貯水タイプが考えられる。排水タイプは構造が簡便になるが、一旦捕捉された火山灰が乾燥して風により飛散する恐れがあること、捕捉した灰の湿潤~乾燥による重量差が降灰量の計測誤差になる欠点をもつ。一方、貯水タイプは、容器に捕捉した灰の風や雨滴衝撃による飛散を防止するほか、設置した水位計による貯水位を計測することにより、捕灰量を常に湿潤状態で安定して計測できる長所をもつ。表 2.2.3.11 には、図 2.2.3.67 の概略図に示すような両タイプの比較表を示す。構造としては水位計設置の有無と排水機構設置の有無による違いがあるだけで、現地設置用の台座構造なら

びに設置作業における違いはほとんどない。構造の違いは製作コストに影響するが、それぞれ目的に見合う構造が必要でありどちらかが明らかに低コストとの違いはない。

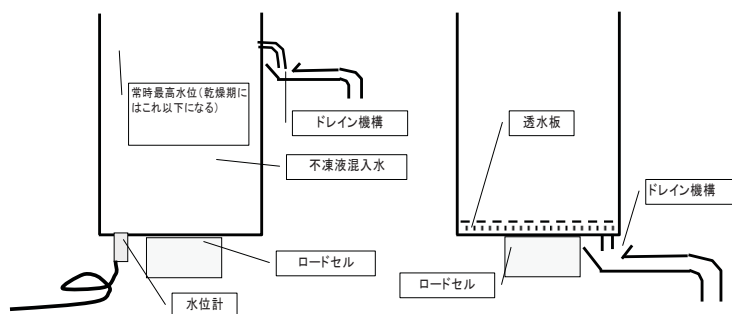


図 2.2.3.67 貯水タイプ及び流水タイプの捕灰容器

表 2.2.3.11 貯水式と流水式の特徴比較表

機能	形式	貯水式概要	流水式概要
捕捉機能 (粒子飛散)		水中捕捉であるため、容器内の火山灰の飛散(容器外への飛び出し)がない。	風などの影響で、容器内の火山灰の飛散減少(容器外への飛び出し)が否定できない。
冬季 捕捉機能		貯水には予め不凍液を混入しておくことにより、氷結を防ぐことができ、降雪の場合も融解能力があり測定が可能である。ただし、不凍液の濃度をチェックするためのメンテナンスを要する。また、1回/年程度に不凍液の補充を要する。	寒冷時期の試料の乾燥状態にもよるが、重量は結氷状態の重量になる。降雪の場合には容器が雪で満杯になり、融雪能力はない。
構造 及び 降灰量の 測定精度		水位計を併設する必要がある、その分構造が複雑化する。水位測定と全重量測定の併用により降灰量の測定精度を堆積厚換算で2～5mm程度で推定できる。ただし、堆積厚換算に際しては堆積密度を仮定する必要がある、過去の堆積状態から推定することが出来るが、推定精度には限界がある。	測定を重量のみとするため、水位計の設置に関する構造を単純化できる。しかしながら、排水機構として、底面のみのフィルター構造では、細粒土粒子によるフィルターの目詰まりは長期間において避け得ない。そのため、捕灰容器の側面にもフィルター機能を付設する必要がある、容器構造は複雑になる。重量のみの測定を行うため、捕捉した火山灰の湿潤状態の重量差がそのまま計測誤差になる。誤差の概略は堆積厚換算で1～2割程度。

④小型化機の概略測定精度の検討

以下では、上記のタイプ選定を兼ねて測定精度の検討を行なった。堆積厚の算出に際し誤差の要因は、流水式においては、ロードセルの精度の違い、土粒子の密度の違い、および乾燥密度の違いによって発生する。貯水式においては、水位を計測するため水位計の精度の違いが更に加わる。

ロードセルおよび水位計の精度については、普及製品を対象に精度を整理した。また各タイプの降灰量計に対する誤差量の試算に際しては、火山灰堆積厚 10cm における計器による誤差量を評価した。仮定する火山灰の状態は、既往の調査結果を参考にして堆積した灰の乾燥密度を $\rho_d=1.3, 1.5, 1.7\text{g/cm}^3$ の 3 種、土粒子密度を $\rho_s=2.1, 2.5, 2.8\text{g/cm}^3$ の 3 種とし試算した。

(ア) ロードセルおよび水位計の精度の整理

市販製品の精度を水位計に関して表 2.2.3.12、ロードセルに関して表 2.2.3.13 に示した。水位計の総合誤差*は 0.1～0.5%程度の範囲、ロードセルの総合誤差*は 0.05～0.5%の範囲がいわゆる普及型製品の精度である。ここで、総合精度とは、計測器の精度を表示する指標 Er を意味しており、次式のように計器の各誤差の 2 乗平方根で算出する値である⁴⁾。

$$E_r = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + (E_4 \times \Delta t)^2 + (E_5 \times \Delta t)^2}$$

E_1 : 非直線性

E_2 : ヒステリシス

E_3 : 繰り返し性

E_4 : 零点の温度影響($^{\circ}\text{C}$)

E_5 : 出力の温度影響($^{\circ}\text{C}$)

Δt : 周囲温度の変化幅

(イ) 流水式降灰量計の誤差量の検討

誤差を試算した結果を図 2.2.3.68 に示す。誤差はロードセルの精度によらず、火山灰の設定密度ごとにほぼ一定であり、堆積密度が低いほど、かつ土粒子密度が高いほど（堆積火山灰の間隙比が大きいほど）誤差量は大きい。試算による最大誤差量は、 $\pm 2.1\text{cm}$ （堆積密度 1.3g/cm^3 、土粒子密度 2.8g/cm^3 の場合）、また最小誤差量は、 $\pm 0.6\text{cm}$ （堆積密度 1.7g/cm^3 、土粒子密度 2.1g/cm^3 の場合）である。

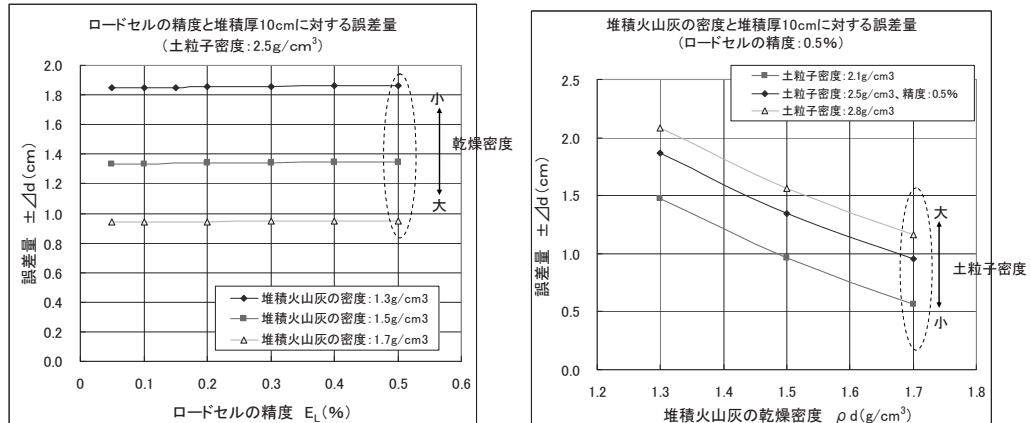


図 2.2.3.68 流水式降灰量計の誤差量の試算結果

表 2.2.3.12 水位計の比較

(株)豊田工機

タイプ	定格容量 (cm)	非直線性(%)	ヒステリシス (%)	繰返し性	ゼロ点の温度影響(%)	出力の温度影響(%)	総合誤差(%)	材質保護級	外径 (mm)	長さ (mm)	計器の重量 (kg)	①概略精度 (cm)*	備 考
TD4310	100		0.10		0.004	0.004	0.10	SUS316	30	178	0.35	0.100	現状降灰量計設置品

*概略精度は、定格容量×総合誤差で算出

(株)共和電業

タイプ	定格容量 (cm)	非直線性(%)	ヒステリシス (%)	繰返し性	ゼロ点の温度影響(%)	出力の温度影響(%)	総合誤差(%)	材質保護級	外径 (mm)	長さ (mm)	計器の重量 (kg)	①概略精度 (cm)*	備 考
BWL-ET	1000	0.15	0.10	0.05	0.01	0.01	0.19	ステンレス	32	122	0.4	1.876	測温機能付

*概略精度は、定格容量×総合誤差で算出

(株)ヤマタケ

タイプ	定格容量 (cm)	非直線性(%)	ヒステリシス (%)	繰返し性	ゼロ点の温度影響(%)	出力の温度影響(%)	総合誤差(%)	材質保護級	外径 (mm)	長さ (mm)	計器の重量 (kg)	①概略精度 (cm)*	備 考
NIVOPRESS	100		0.5			0.005	0.50	ステンレス	22	176		0.500	

*概略精度は、定格容量×総合誤差で算出

(株)T&F

タイプ	定格容量 (cm)	非直線性(%)	ヒステリシス (%)	繰返し性	ゼロ点の温度影響(%)	出力の温度影響(%)	総合誤差(%)	材質保護級	外径 (mm)	長さ (mm)	計器の重量 (kg)	①概略精度 (cm)*	備 考
HM500	200		0.3		0.01		0.30	SUS316	22	176	0.25	0.600	

*概略精度は、定格容量×総合誤差で算出

クリマテック(株)

タイプ	定格容量 (cm)	非直線性(%)	ヒステリシス (%)	繰返し性	ゼロ点の温度影響(%)	出力の温度影響(%)	総合誤差(%)	材質保護級	外径 (mm)	長さ (mm)	計器の重量 (kg)	①概略精度 (cm)*	備 考
CDK-PDCR1730	150		0.25			0.5	0.56	SUS316	17.5	162	0.1	0.839	
CDK-PDCR1830	35		0.1			0.02	0.10	チタン	17.5	96	0.1	0.036	

*概略精度は、定格容量×総合誤差で算出

(株)オサン・テクノス

タイプ	定格容量 (cm)	非直線性(%)	ヒステリシス (%)	繰返し性	ゼロ点の温度影響(%)	出力の温度影響(%)	総合誤差(%)	材質保護級	外径 (mm)	長さ (mm)	計器の重量 (kg)	①概略精度 (cm)*	備 考
DS-5	75		0.13			0.03	0.13	チタン	17.5	96	0.1	0.100	

表 2. 2. 3. 13 ロードセルの比較

㈱共和電業

タイプ	定格容量 (kgf)	非直線性(%)	ヒステリシス (%)	繰返し性	ゼロ点の温 度影響(%)	出力の温度 影響(%)	総合誤差(%)	材質 保護級	外寸 (mm)	全高 (mm)	計器の重量 (kg)	①概略精 度(kgf)*	備 考
LCN-A-500N	50.99	0.15	0.1	0.05	0.005	0.01	0.19	ステンレス	50	25	0.22	0.096	ステンレス製・密閉構造
LC-10KA	10.2	0.3	0.2	0.2	0.01	0.01	0.41		90	58	1.6	0.042	低容量型ロードセル
LC-20KA	20.39	0.3	0.2	0.2	0.01	0.01	0.41					0.084	
LCF-A-500N	50.99	0.1	0.1	0.05	0.005	0.005	0.15		68	44	1.2	0.077	現状降灰量計と同タイプ
LC-50kG	50.99	0.05	0.05	0.03	0.003	0.0015	0.08		89	110	4	0.039	高精度ロードセル
LC-50KFH	50.99	0.5	0.5	0.05	0.005	0.01	0.71		68	44	1.5	0.361	高温用ロードセル
LTZ-50KA (引張・圧縮)	50.99	0.03	0.03	0.03	0.005	0.005	0.05	アルミ合金	32×68	64	0.3	0.027	高精度引張圧縮
LU-50KE (引張・圧縮)	50.99	0.2	0.1	0.1	0.005	0.005	0.25		80	91.5	3.9	0.125	引張圧縮
LUX-A-500N (引張・圧縮)	50.99	0.1	0.1	0.05	0.005	0.005	0.15	SUS金属地 肌	28	37	0.3	0.077	引張圧縮・小型
LU-10KA (引張・圧縮)	10.2	0.3	0.2	0.2	0.01	0.01	0.41		90	77.5	2.3	0.042	低容量引張圧縮
LU-20KA (引張・圧縮)	20.4	0.3	0.2	0.2	0.01	0.01	0.41				2.3	0.084	
LUH-50KF (引張・圧縮)	50.99	0.02	0.02	0.02	0.0015	0.001	0.03		98	95	2.1	0.018	高精度引張圧縮
LUB-10KB	10.2	0.03	0.03	0.03	0.003	0.003	0.05	ステンレス	42×120	42	0.53	0.005	ビーム型
LUB-20KB	20.4	0.03	0.03	0.03	0.003	0.003	0.05	ステンレス			0.53	0.106	
LUB-30KB	30.6	0.03	0.03	0.03	0.003	0.003	0.05	ステンレス			0.53	0.016	

* 概略精度は、定格容量×総合誤差で算出

東京測器

タイプ	定格容量 (kgf)	非直線性(%)	ヒステリシス (%)	繰返し性	ゼロ点の温 度影響(%)	出力の温度 影響(%)	総合誤差(%)	材質 保護級	外寸 (mm)	全高 (mm)	計器の重量 (kg)	①概略精 度(kgf)*	備 考
CLB-100NA	10.2	0.1	0.1	—	0.01	0.01	0.14	IP42	75	48	0.45	0.014	圧縮型低容量
CLB-200NA	20.4	0.1	0.1	—	0.01	0.01	0.14				0.9	0.029	
CLA-NA	51	0.2	0.1	—	0.01	0.01	0.22	IP67	54	33	0.36	0.114	圧縮型
TCLB-100NA	10.2	0.1	0.1	—	0.01	0.01	0.14	IP42	75	42	0.45	0.014	引張・圧縮型
TCLB-200NA	20.4	0.1	0.1	—	0.01	0.01	0.14				0.9	0.029	
TCLA-500NA	51	0.3	0.3	—	0.01	0.01	0.42	IP67	58	62	1	0.216	
TCLZ-100NA	10.2	0.05	0.05	—	0.01	0.005	0.07	IP41	30×54	59	0.1	0.007	引張・圧縮高精度
TCLZ-200NA	20.4	0.05	0.05	—	0.01	0.005	0.07					0.015	
TCLZ-500NA	51	0.05	0.05	—	0.005	0.005	0.07					0.036	
TCLN-500NA	51	0.5	0.5	—	0.05	0.05	0.71	IP67	26	32	0.08	0.362	小型引張・圧縮

㈱A&D

タイプ	定格容量 (kgf)	非直線性(%)	ヒステリシス (%)	繰返し性	ゼロ点の温 度影響(%)	出力の温度 影響(%)	総合誤差(%)	材質 保護級	外寸 (mm)	全高 (mm)	計器の重量 (kg)	①概略精 度(kgf)*	備 考
CP-20L	20		0.05		0.03	0.03	0.07	IP67	89	122	3.1	0.013	密閉構造型
CP-50L	50		0.05		0.03	0.03	0.07					0.033	
CMX-50L	50		0.2		0.1	0.1	0.24	ステンレス IP67	83	29	0.8	0.122	密閉構造型
UM-50L-A	50		0.3		0.1	0.1	0.33	IP67	50	70	0.3	0.166	密閉構造型小型ロードセル
LBP-10L	10		0.04		0.02	0.02	0.05	IP67	125×42	35	0.9	0.005	密閉構造ビーム型ロードセル
LBP-20L	20		0.04		0.02	0.02	0.05					0.010	
LBP-30L	30		0.04		0.02	0.02	0.05					0.015	
U2Z1-10L-A	10		0.2		0.05	0.1	0.23	IP67	135×60	60	1.4	0.023	密閉構造ビーム型ロードセル
U2Z1-20L-A	20		0.1		0.05	0.1	0.15		143×60	60	1.7	0.030	
U2Z1-50L-A	50		0.1		0.05	0.1	0.15					0.075	

TEAC電子計測㈱

タイプ	定格容量 (kgf)	非直線性(%)	ヒステリシス (%)	繰返し性	ゼロ点の温 度影響(%)	出力の温度 影響(%)	総合誤差(%)	材質 保護級	外寸 (mm)	全高 (mm)	計器の重量 (kg)	①概略精 度(kgf)*	備 考
TU-BR	20.4	0.05	0.05	0.03	0.05	0.05	0.10	アルミ	60×28	44	0.3	0.020	引張・圧縮型2型
TU-CR	20.4	0.05	0.05	0.03	0.05	0.05	0.10	アルミ	124×29	25	0.2	0.020	引張・圧縮型ビーム型

(ウ)貯水式降灰量計の誤差量の検討

誤差を試算した結果を図 2.2.3.69 に示す。水位計の総合誤差が大きいほど、当然ながら計測誤差量が大きくなる。また土粒子密度の影響として土粒子密度が小さいほど、乾燥密度が小さくなるとともに計測誤差量が大きくなり、土粒子密度が大きいほど、乾燥密度が大きくなるとともに計測誤差量が小さくなる傾向がある。

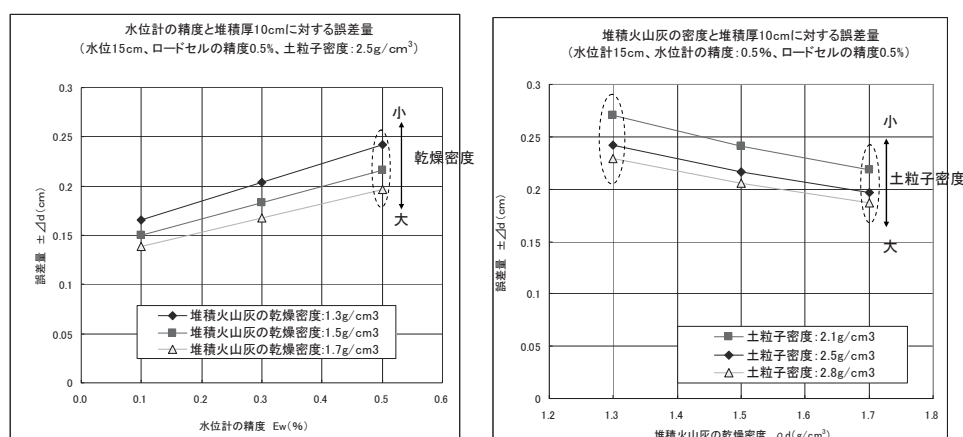
高精度センサーを併用した場合（水位計精度 0.1%、ロードセル精度 0.05%）では、想定 の最小誤差量は、 $\pm 0.03\text{cm}$ （堆積密度 $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ 、土粒子密度 $2.8\text{g}/\text{cm}^3$ の場合）、また一般型センサー（水位計精度 0.5%、ロードセル精度 0.5%）を使った場合では、試算の最大誤差量は、 $\pm 0.27\text{cm}$ （堆積密度 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 、土粒子密度 $2.1\text{g}/\text{cm}^3$ の場合）となる。このように、高精度センサーと一般型センサーによる計測精度には、0.3mm に対して 3mm という 1 オーダー程度の差が見られるが、今回の測定目的においては一般型の使用が可能である。

(エ)貯水式と流水式の誤差量の比較

最大誤差量を比較すると、流水式で $\pm 2.1\text{cm}$ 、貯水式（一般型センサー使用）で $\pm 0.27\text{cm}$ であり、貯水式の誤差量の方が 1 オーダー誤差量は小さい。

(オ)測定精度に関するまとめと今後の課題

最大測定誤差量の比較結果より、貯水式の方が 1 オーダー程度は誤差量が小さいこと、構造上の問題が特に見当たらないことから、小型化した降灰量計としては貯水式を推奨する。貯水式において、一般型精度センサー（水位計精度 0.5%、ロードセル精度 0.5%）を使った場合でも、誤差量は $\pm 0.27\text{cm}$ とミリオーダーであり、降灰量計に求められる厚み分解能 1cm を満たすものと考えられる。今後は、センサーの価格面および耐久性に着目して、使用センサーの選定を絞り込む必要がある。



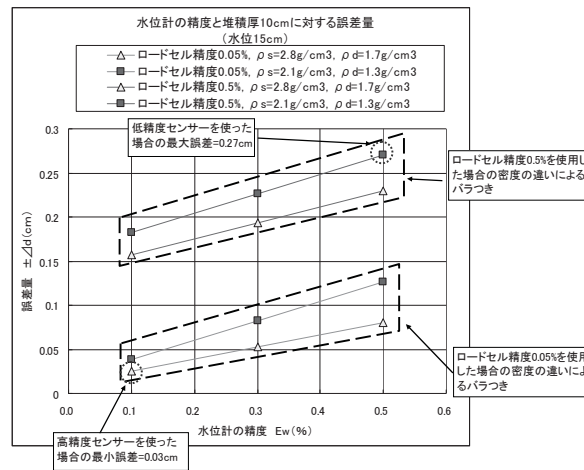


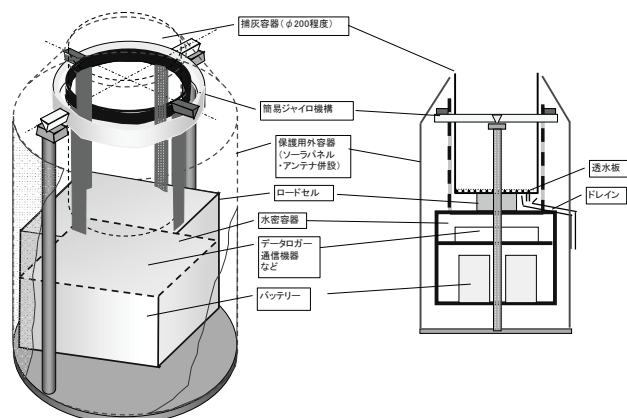
図 2. 2. 3. 69 貯水式降灰量計の誤差量の試算結果

⑤小型化したプロトタイプ（案）

（ア）本体基本構造

捕灰容器は重量計測精度と捕灰機能の非方向性のために、鉛直を保つ必要がある。そのため、プロトタイプの場合としては、自動的に鉛直性を保つ機構を持つものと、設置時に鉛直を確保するものの2通り考えられ、以下に示す3タイプを候補とした。

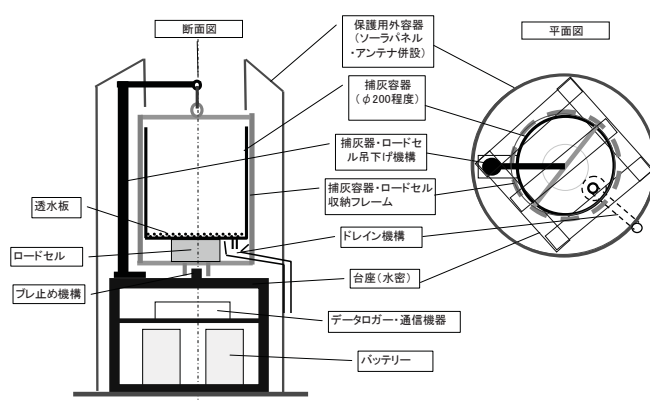
簡易ジャイロ機構タイプ



特 徴

- ・捕灰容器、ロードセル、ロガー、バッテリーなど装置全体をフレームで構成した小コンテナに搭載する。
- ・直行する2軸を用い、二段階でヒンジ連結され、小コンテナは常に重力方向に吊下げられた状態を保つ。
- ・従って、設置時に装置の水平度を余り気にしなくてもよい長所を持つ。
- ・装置全体は保護容器で囲むことにより、風や直射光から保護して急激な温度変化などを低減する。
- ・ロガー、バッテリー、通信機器は水密性をもつ容器に納める。
- ・できれば、保護容器の外壁にソーラーパネルを付設しておき、現場作業における工程を減らす。

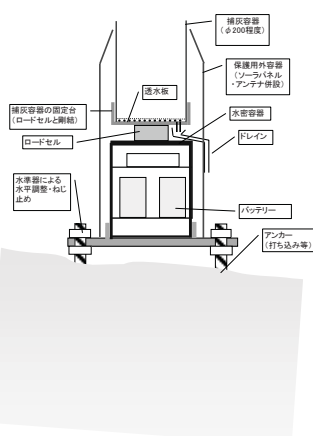
吊下げタイプ



特 徴

- ・捕灰容器、ロードセルをロガー、バッテリーなど装置全体を一体化する。
- ・フレームで構成した小コンテナに搭載し、フレーム全体を近傍に設置した支持棒で構成した吊下げ機構に取り付ける。
- ・フレームは重力方向を保つため、設置時に容器の鉛直度に関して余り気を使わなくてすむ。
- ・捕灰器上部に張り出す吊下げ材は、捕灰の障害になるが、できるだけ小さい部材を用いる。
- ・装置全体は保護容器で囲むことにより、風や直射光から保護して急激な温度変化などを低減する。
- ・ロガー、バッテリー、通信機器は水密性をもつ容器に納める。
- ・できれば、保護容器の外壁にソーラーパネルを付設しておき、現場作業における工程を減らす。

鉛直性調整タイプ



特 徴

- ・捕灰容器、ロードセル、ロガー、バッテリーなど装置全体を一体化する。
- ・現地で打ち込んだアンカーボルトに、水準器などによってある程度の水平を調整した台座の上に一体化した装置を固定する。
- ・装置全体は保護容器で囲むことにより、風や直射光から保護して急激な温度変化などを低減する。
- ・ロガー、バッテリー、通信機器は水密性をもつ容器に納める。
- ・できれば、保護容器の外壁にソーラーパネルを付設しておき、現場作業における工程を減らす。

(イ)通信および電源

小型化の基本方針により以下を前提とする。

- ・降灰量計からのデータ回収は、人が計器に近づくことなく、遠隔地から行うことを可能とする。
- ・降灰量計設置位置の制約をなくするため、ケーブル敷設工事を伴わないことから、無線方式を採用する。
- ・降灰量計設置位置の制約をなくするため、商用電源でなく、自家発電による電源確保することとし、設置実績から太陽光発電（ソーラーパネル）+バッテリーによる電源確保を基本とする。

無線方式の選定

無線方式として、表 2.2.3.14 に示す方法が考えられる。同表に併記したいいくつかの評価を行い、伝送範囲が広く（2km 以上）、設置が簡便な携帯電話接続を採用することを基本とする（ただし、携帯電話の伝送範囲外では衛星電話方式を採用する）。

使用バッテリーの選定

一般的にバッテリーのタイプにはシール鉛蓄電池、ニッカド電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池など各種あり、表 2.2.3.15 にいくつかの項目で比較評価を行なった。これによると、小型化した降灰量計に必要とされる程度の容量にはシール鉛蓄電池が経済的である。2Ah 台になると AA サイズ（単三型）のニッケル水素電池が価格的に有利となる。リチウムイオン電池は高価な上に使い方も難しい。ニッカド電池は廃棄時の問題に問題があり、価格・性能についても有利な点はなく特に選択すべき理由は無い。

表 2.2.3.14 無線方式によるデータ伝送法の評価

方式	携帯電話接続	衛星電話接続	無線LAN	無線システム
概要	NTTの800MHzデジタルムーバと専用モデムを使用して、テレメータ施設を簡単に構築する。	NTTの衛星電話を使用すると、日本全国場所を選ばず通信が可能である。	無線LANを中継し、TCP/IPによる通信接続をする。	VHFまたはUHF用無線モデムを利用する。
	・ 接続条件：NTTドコモのサービス範囲	・ 接続条件：衛星の位置を直接に見えるところ	・ 接続条件：300m程度。外部アンテナ等を用いることによって、最大2km程度の通信が可能	・ 接続条件：最大1.6km
特徴	・ 通信方式：1(データ収集装置)対1(現場計測装置)の通信	・ 通信方式：1(データ収集装置)対1(現場計測装置)の通信	・ 通信方式：1対多の通信	・ 通信方式：1対1の通信
	・ 接続形態：ダイヤルアップ方式	・ 接続形態：ダイヤルアップ方式	・ 接続形態：常時接続	・ 接続形態：常時接続
長所	・ 利用可能範囲が広い	・ どこでも利用可能	・ 通信費不要	・ 通信費不要
短所	・ 携帯電話のサービス圏内のみ利用可能である。	・ 通信に関するランニングコストが発生する。	・ 伝送範囲が狭い。	・ 初期設置費用がかかる。
	・ 通信に関するランニングコストが発生する。	・ 装置とランニングコストは携帯電話より高い。	・ 電力の消費が多い。	・ 電力の消費が多い。
評価	◎	○	×	×

表 2.2.3.15 バッテリタイプの比較表

比較項目	鉛蓄電池	ニカド電池	ニッケル水素電池	リチウムイオン電池
サイズ	×	×	×	○
重量	×	×	×	○
大電流放電	○	○	△	△
コスト	○	△	△	×
環境性	×	×	○	○

○：優れる △：平均的 ×：劣る

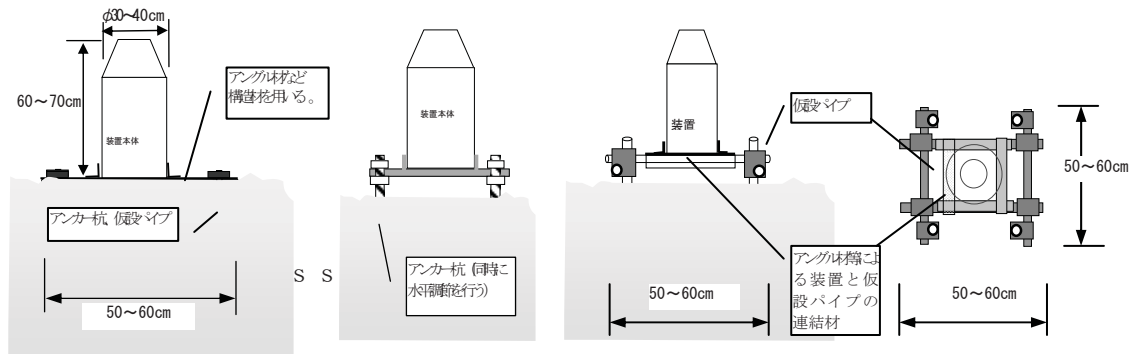
(ウ) 現地における降灰量計の固定方法

小型化の基本方針により、固定方法についても以下を前提とする。

- ・ 台座にはコンクリートなど、運搬を含めて人力作業に限界がある構造を用いない。
- ・ 基礎地盤には、土砂（粘性土、砂礫）、岩盤などが考えられるが、どのような場合にも臨機応変に対応できる治具を準備しておく。ただし、寸法・重量には人力作業を前提とする配慮をする。以下に、想定した地盤に対応したいくつかの方法を例として示した。設置する地点の地盤状況がある程度事前に分かっているならば、この中からいくつかを用意して現地に搬入できる。このうち、土嚢による根固め法は、固定の確実性に若干問題があるものの、土嚢袋のみを持っていけば中に詰める土砂を現地調達できるという利点がある。

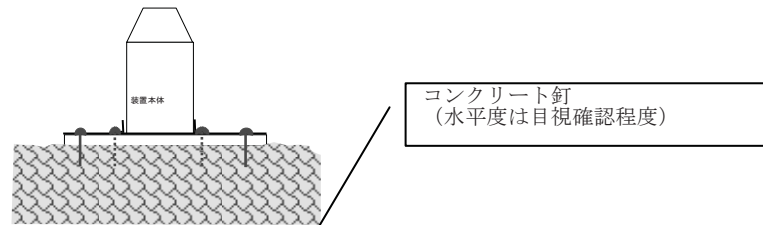
アンカー打設方式

アンカーの打ち込みが可能で、ある程度の反力が期待できる場合に用いる。



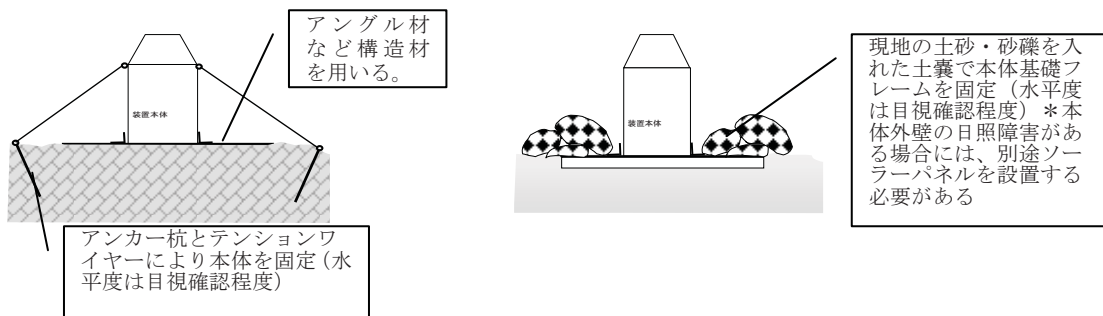
岩盤(コンクリート)用釘の打設方式

基礎が岩盤の場合には、コンクリート釘などの打ち込みによる固定を行う。ただし、岩盤の状態により固定の確実性は異なる。



根固め方式

アンカー、仮設パイプの打ち込みにおいて、基礎の状態により固定の確実性に問題がある場合は、以下の補助的根固めを併設する。



(エ) 落雷対策

ステンレス製の金属容器のなかに電子装置類を収納して、ファラディケージ方式による電磁界の遮蔽効果を持たせることにより、かなり近傍に落雷があった場合でも誘導電圧をほとんど発生しない構成としている。太陽電池やアンテナから入り込むサージに対しては、サージ保護装置 (SPD) の接続によってサージ電圧を電子装置類の耐電圧下まで抑制することが可能である。

(オ) 小型降灰量計の構造と設置イメージ

降灰量計の本体は、最も構造が単純なもの (本体基本構造のウ案) を用いた貯水方式とする。

(6) まとめと今後の課題

これまでの降灰量計に関する知見をまとめると以下の通りである。

①降灰量計の測定原理

本機器は、捕灰用タンク（ドラム缶、φ567mm）で、降雨および降灰を捉え、捕灰用タンク下のロードセル（荷重変換器）計3器により重量と、投げ込み式水位計により水位を計測する。計測水位と計測重量から、タンク内に貯まった正味の火山灰堆積重量と堆積厚を計測するものである。

②調査実施可能条件

- ・当機器の設置作業が必要であること。
- ・原則として設置する地形は選ばない。ただし、平坦地であると設置作業がより容易となる。
- ・携帯電話を介して計測データを回収するので、サービスエリア内での設置が必要である。
- ・太陽電池パネルでの発電となるため、日射条件の良好な場所の設置が必要である。

③計測精度（厚さ・面的広がり）

- ・計測の分解能は、±1cm程度である（桜島での試験設置結果による）
- ・計測頻度は任意に設定可能（分・秒単位）で、データ記録容量は約2年間分である。

（10分間隔計測の場合）

④1回に調査できる範囲、または箇所数

- ・設置地点のピンポイント計測である。
- ・無人計測によるリアルタイムのデータ伝送が可能であり、1回に調査できる範囲は、当機器の設置地点である。
- ・設置箇所数に制限は無い。

⑤安全上の留意点

- ・設置に関して、一般的な安全管理（ヘルメット着用等）が必要である。
- ・自動計測でき、遠隔地から計測データの回収が可能であることから、火山噴火時の人的被災の可能性は基本的でない。

⑥事前設置・準備の必要性

- ・降灰量計製作と現地設置作業が必要である。
- ・現地設置作業項目は以下のとおりである。

ベースプレート設置→太陽電池パネル設置→降灰量計設置→システム調整

⑦装置据え付けの作業性

圃灰容器にステンレス製ドラム缶を利用しているため、容積が大きく、かつ台座・電源・通信設備など付属物の合計重量が約80kgにおよぶため、搬入路がない原野への人肩運搬は容易でない。

また、容器が雨水満水状態では、約300kgに至るため、装置の基礎構造は、コンクリートなどで堅固にする必要がある。

搬入路がある場所で、ユニック車を用いた据付を行ったときの工期は、基礎工事1日、据え付け1日、測定機器・電源および通信機器据え付け1日、計約3日である。

⑧今後の課題

設置作業の簡便化、迅速性を向上させるため、タンク径 $\phi 200\text{mm}$ の小型式降灰量計の開発が挙げられる。

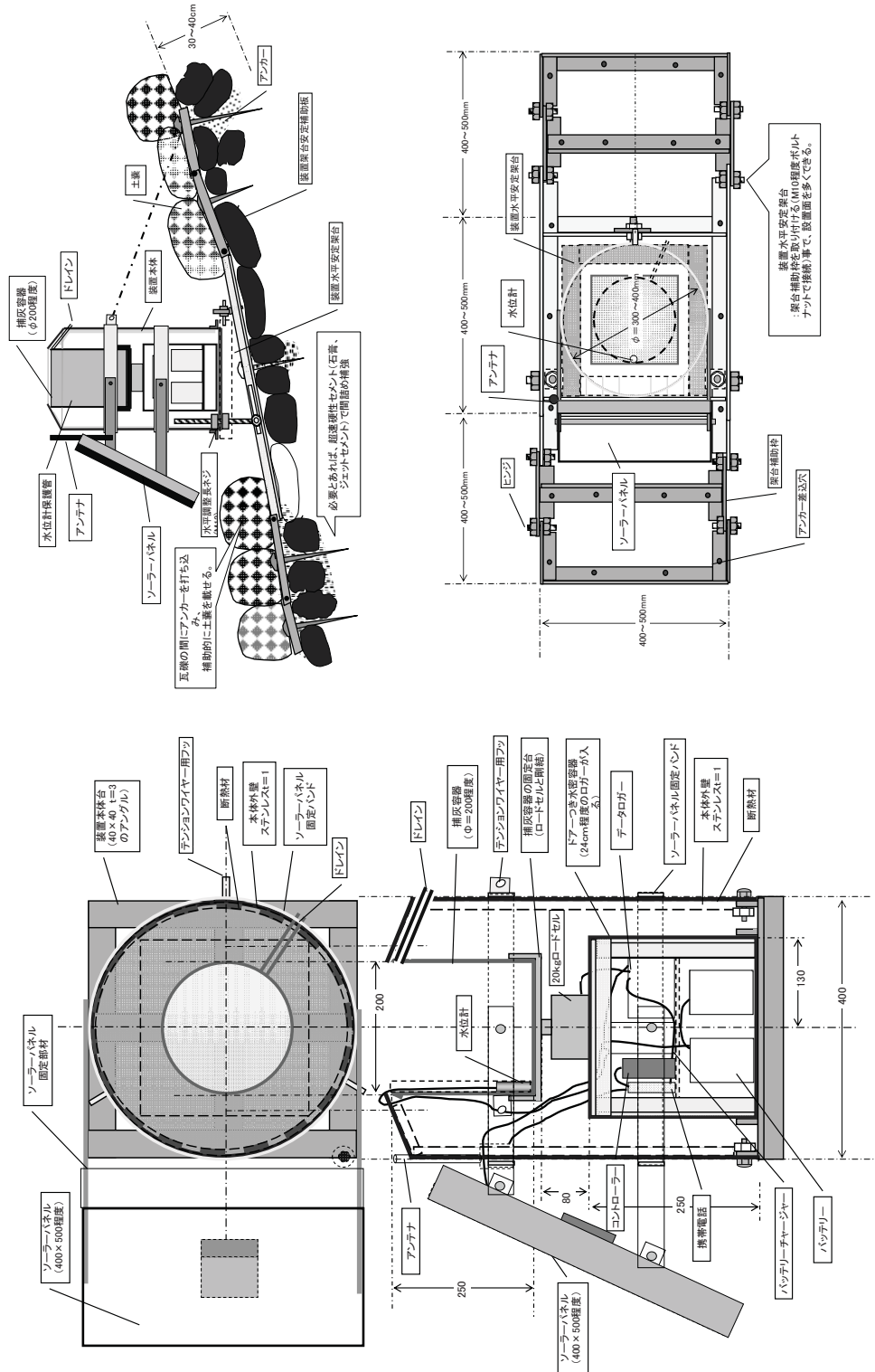


図 2.2.3.71 小型降灰量計の設置概要図

図 2.2.3.70 小型降灰量計の構造概要図

参考文献

- 1) 気象庁電子閲覧室： <http://www.data.kishou.go.jp/index.htm>
- 2) 立花憲司：多点温度観測による地殻変動データの温度補正，東北大学大学院理学研究科・理学部技術研究会報告 1998 年.
<http://www.tech.sci.tohoku.ac.jp/activ/proceed/h10/report2.html>
- 3) 竹本修三・和田安男・伊藤 潔・福田洋一・森井 亙・百瀬秀夫・中村光邦：地殻ひずみの観測に及ぼす局所的日照変化の影響－花山と立山観測室のデータ比較－，京都大学防災研究所年報 第 47 号 B, 2004.
- 4) 株式会社共和電業：ロードセル関連技術情報，ロードセル計重システムの総合精度の求め方.
http://www.kyowa-ei.co.jp/japanese/technical_inf/files/tecinf_lc03.pdf

2.3 無人機械

現地に火山灰採集容器を設置している場合、風や雨水などによる再移動をさけるために、容器は降灰後できるだけ早い時期に回収する必要がある。しかし、大概の場合、降灰後しばらくは噴火活動の危険があるため、人が現地に立ち入ったり、有人航空機が火山に近づくことは難しい。そもそも、突然火山活動が活発化する場合や予め容器を現地に設置しておくことが難しい場合も想定される。

無人機械の技術を転用することによって、人が立ち入ることが出来ない区域での容器回収や試料採取、画像取得などができるとすれば、2次災害の回避も含め噴火災害軽減に大きく貢献する。ここでは、人間や有人機械の立入・進入が禁止される噴火中の火山地域であっても、いち早く土石流が発生する流域源頭部や火口に近い山腹斜面の火山灰堆積状況を把握する手段として、UAV (Unmanned Air Vehicle) など自律制御可能な運航手段を整理する。

無人機械の技術には、大きく分けて自律制御と遠隔制御という2つ技術がある。いずれも、危険区域における無人化施工や防災ロボットの分野などで多くの技術が実用化されており、著しい発展を遂げている。自律航行能力を備えた無人ヘリコプターは、2000年に有珠山や三宅島の噴火時に初めて火山噴火災害の軽減目的で適用されたが、現在ではさらに機能・性能が向上されつつあり、広い分野での用途が検討されている。いっぽう、2002年～2007年には、ロボット工学における防災分野において、①上空からの情報収集、②瓦礫上移動体を用いた情報収集、③瓦礫内移動体を用いた情報収集、④広域情報収集インフラの整備といったミッションを掲げた大都市大災害軽減化特別プロジェクト（科学技術振興費研究）が実施された。

(1) UAVの有効性

UAVとは、中低空域を対象とした遠隔操作による自律飛行ができる無人航空機のことである。各種センサーを搭載することによって、降雨時や夜間でも、人が近づけない危険箇所での監視、観測等が可能になる。予め飛行ルートをプログラミングすることで離陸から着陸まで自動的に実行されるため、オペレーターの視界から外れても飛行上の問題はない。また、普段からのメンテナンスがあれば準備時間を必要としないことや、可搬性に優れること、光ファイバー通信などの地上局が整備されていればオペレーターが現場に赴く必要がないことなどが特長である。

現行の航空法におけるUAVの取扱いは、航空法第2条における「航空機」の定義に該当しないため、航空機とは認められておらず、“浮遊物”扱いとなっている。このため、電波法や航空管制法に影響しない範囲（特定省電力、高度150m程度）であれば、免許や許可は不要である。

課題点としては、制御信号にFM放送に近い73MHz帯を使用しているために通信環境が不安定になったり、違法電波による混線等の可能性があることがあげられる。

宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、気象観測や海上監視、災害監視などに使用できる多目的小型無人機の開発研究を進めている。現在、飛行安全の確保、安全基準の制定などのほか、他の用途への適用検討を進めており、火山灰堆積厚の把握への適用可能性も考えられる。

（参考 URL：http://www.jaxa.jp/projects/aero/future/index_j.html）

(2)ヘリコプター（自律航行型）による調査

UAV利用による災害調査実績は多く知られているが（例えば：JACIC 研究報告 <http://www.jacic.or.jp/kenkyu/3/3-1-2-1.pdf>）、中でも無人ヘリコプターに限ると、2000 年の有珠山噴火観察、2001 年の三宅島泥流観測を目的とした事例などがある。自律航行型のヘリコプターは、有人機と比べて低高度を飛行できる、搭乗者の危険がない、維持管理がしやすいなどの利点を持ち、さらに可搬性・安全性に優れ、計画から計測実施・データ解析に至る時間が短いことが特長である。火山灰堆積厚を把握するための 3 次元計測を行う場合には、レーザ測量機、デジタルカメラと、撮影時の位置・姿勢を計測する GPS と IMU を搭載する。これらのセンサを補完的に効率良く統合することにより精度や信頼性を大きく向上させ、さらに、システム全体の低価格化や小型化が望める。

千葉大学の野波研究室と(株)ヒロボーとの共同研究によるシステム（スカイサーベイヤー <http://www.hirobo.co.jp/sec/skysurveyor.html>）では、1 名でのオペレーションが可能で、慣性航行センサー等を用いて正確に定点でホバリングする自律航行機能を有し、電波が途絶えた際には移動操作車まで自動帰還が可能になっている。



図 2.3.1 北海道開発局が既に多くの運用実績を持つ自律航行可能なヘリコプター調査システム
『岸寛人・中野智史・中島知幸（2007）小形無人ヘリコプターによる調査と今後の活用について、
第 50 回（平成 18 年度）北海道開発局技術研究発表会。』

①計測精度

機体に搭載した GPS センサーが基地局の GPS センサーからの補正信号を受け取ることで、位置の誤差は 20cm 以内を確保している。3 次元計測を行う際に搭載するレーザ測量機における高さ方向の精度は、機種によって異なるがおおよそ 2.5cm～15cm である。

②安全上の留意点

基本的には open area での操縦・使用に制限されている。万が一、通信が途絶した場合でも、GPS で測位しながら自動的に帰還する機能がある。機種によっては、予め設定したウェイポイントによる自律飛行のほかに、地上局における画像モニターを見ながらの臨機応変なマニュアル航行への切り替えも可能である。

③適用範囲と今後の課題・発展性

飛行距離の限界は、有珠山 2000 年噴火当時で半径約 1.5km 程度、最新型では半径 5km 程度まで可能な機種の開発が進んでいる。高さ方向は機体によって制限が異なり、海拔 1000m までのものと 2000m 程度まで可能なものがある。対象が火山体で土砂発生源の情報を押さえる目的である

ため、対地高度が 2000m を越えることは十分に想定される。今後この部分での技術進展が期待される。また、微細な火山灰が機体の航行に影響を与えることが危惧されるが、防塵フィルタによって海外の砂漠地帯で航行した際にも問題なかったことが報告されている。

適用範囲として、現時点で既に静止画像を取得するカメラのほか、動画映像を取得するビデオ、赤外線カメラ、レーザー計測器などの搭載は可能である。これらを複数同時に搭載したり、例えば次に記すような他の機能をもたせたりすることによって、発展性が期待できる。

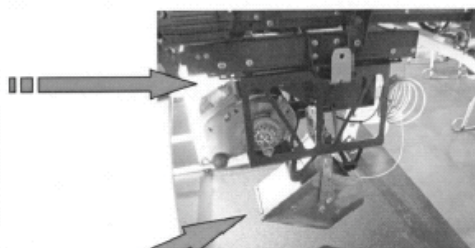
a) 試料採取機能の搭載

北海道開発局石狩川開発建設部では、自律航行型ヘリに降灰サンプルを収集する機能の搭載を検討している。カメラ装置の代わりに本装置を搭載し、移動操作車からの指令により、回収部の昇降を行い、降灰サンプルを収集するものである。この機能を搭載することが出来て、運用が出来るようになると、噴火毎に異なる性質を持つ火山灰の特徴を、噴火活動中であっても適時に知ることができるようになるため有効である。

【 主要諸元 】

<昇降部>

品番	0T77-95100-00
品名	REEL, ASSY.
外形寸法(L×W×H)	320×240×280
重量(リール込み)	5.0Kg
入力電圧	12VDC



<回収部1>カニバサミ仕様

品番	0T77-95200-00
品名	CATCHER, ASSY.
外形寸法(L×W×H)	250×100×245
重量	1.0Kg
回収能力	***

<電動リール>

品番	CH-4HP(改造)
糸巻き量	15号 300m
ドラグ耐力	196.1N~282.4N
瞬間最大巻上力	294.1N
巻取り速度/分	20~140m/分
リール自重	1.8Kg



図 2.3.2 北海道開発局が開発した試料採取装置の仕様と実際に装備したときの写真
(機体中央下部に見えているカニバサミが試料採取用のバケット)

b) 試料測定装置（ペネトレータ）の投下

観測システムを内包した筒を搭載して航行し、目的地へ達した時点で筒を投下させることによって、噴火中の火山であっても継続的な観測と取得データの安全な場所へ送受信を自動で行うこ

とができる。

1995 年 10 月の雲仙普賢岳活動中には、九州大学や宇宙科学研究所などのグループが月面観測用だった装置を火山観測用に応用して予備実験を実施し、約 2.5km 離れた場所で投下時の衝撃力データなどの観測データ受信に成功している。投下装置は、長さ約 1m、幅 13cm、重さ 20kg のペンシル型であった。2004 年の浅間山活動の際には、名古屋大学が山腹に投下した観測プローブ（GPS）によって 1cm の山体変形を検出した。プローブで観測されたデータは 5 ヶ月間、1 時間ごとに受信局に送られた。

装置はいずれも投下時の衝撃に耐えられる設計になっているが、観測精度や機能は搭載するセンサーの精度・種類に依存する。これまでに研究されて実証実験がなされてきた投下装置には、地震計や温度計、GPS、データ送信装置などが含まれているが、火山灰堆積厚把握のためには別途搭載するセンサーの選定が必要である。また、センサーの物理的な重量や送信データ容量、装置を駆動するための電力、火砕サージなどによる耐熱機能など確保などの要件を満たす改良が必要である。



図 2.3.3 九州大学などが雲仙普賢岳へ投下したペネトレータ

(九州大学ホームページ <http://www.sevo.kyushu-u.ac.jp/sevo/staff/shimizu/peneto.html> より引用)

(3) カイトプレーンによる調査

カイトプレーンは、凧と飛行機の長所を生かして開発された UAV であり、GPS による簡単な操作方法と高い安全性、持ち運びに便利なコンパクトさを特徴としている。火山活動に関しては、阿蘇山、三宅島などの火口撮影やガス採取などの実績がある（株式会社アトリム）。なお、消防庁消防研究センターでも夜間撮影可能な暗視カメラを搭載したカイトプレーン（ガソリン式）を導入して、2007 年 2 月に実証実験を行っている。

総重量（内ペイロード約 5～6kg）は 15kg、電池式の軽量型の場合は 1 時間の充電で 30 分の飛行、ガソリン式の場合は 2～3 時間の飛行が可能。速度は 20～40km/h。飛行高度は 50～250m（ガソリン式は 50～3000m）。現地に到着してから飛行までに要する時間は、20～30 分と短い。

①計測精度

航行ルートは、拠点地に設置されたパソコンに必要な情報を入力することで設定が可能である。位置情報は機体に搭載された GPS で把握され、基地局のパソコンと無線通信をしながら予め設定した航行ルートの微調整を自動で行う。位置精度は 1m 以内が実現されている。

②安全上の留意点

手投げ式のカイトプレーンは、従来の滑走路を使った離陸に加え、操縦者の手から直接離陸することが可能で、着陸時にも滑走路なしで操縦者が低速旋回しながら下降してくる本機を直接受け止める「ダイレクトキャッチ」も安全に行える。このため、建物の屋上や駐車場など、特別な設備のない場所での離着陸が可能である。

カイトプレーンは、風速 10m/sec 以上の場合、雨天（霧雨程度までは可能）・降雪時には飛行制限がある。

③適用範囲と今後の課題・発展性

地上から見えない有視界エリアや災害地域など、人の介入が難しい場所での搭載小型 CCD カメラを利用した調査が可能である。水滴や粉塵のユニット内侵入を防ぎ、搭載された機器の安定した動作を守られている。赤外線カメラ等を搭載することによって、夜間災害時の情報収集も可能である。



カイトプレーン



カイトプレーンレスキュー
(2005年度グッドデザイン賞中小企業庁長官特別賞受賞)

図 2.3.4 カイトプレーンと手投げ式のカイトプレーンレスキュー

(中小企業庁 モノ作り中小企業支援 Web ページより引用：

http://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/monozukuri300sha/8kyuushuu/43kumamoto_02.html)

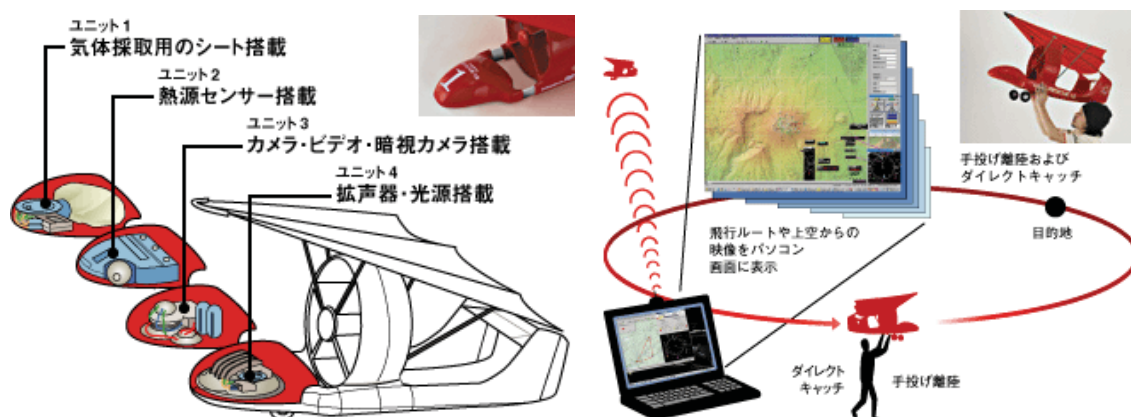


図 2.3.5 手投げ式カイトプレーンの機能と運用イメージ

(株式会社アトリム Web ページより引用：<http://www.atrim.co.jp/spec/index.html>)

(4) バルーンによる調査

ヘリウムガス（不燃性、無臭）を使用して浮上させる気球に高解像度カメラと小型ビデオカメラを取り付けて、地上の受信機でモニターしながら遠隔操作（無線式）でカメラを地上の被写体に合わせて撮影する。

①計測精度

撮影高度は 5m～200 m、撮影範囲は左右 360 度・上下 90 度、垂直撮影では、気球の真下 200 m 四方を撮影が可能である。

②安全上の留意点

ヘリウムガスで浮上しているので、水素ガスのように爆発の危険性もなく安全である。素材は、特殊な軟質塩化ビニールで穴が空いてもすぐには縮小しないので、急激に落下することがない。ただし、風速 5m/sec 以上の場合、雨天・降雪時、送電線の付近・海上・鉄道の上・空港禁止区域では飛行制限があり、適用できない。

③適用範囲と今後の課題・発展性

小型ラジコン飛行機や、ラジコンヘリによる撮影に比べ安全で、操作が容易で機動性に富む。また、ヘリコプターによる騒音、ほこりの巻上げ等がなく長時間静止滞空による撮影が可能である。バルーンに CCD カメラや画像伝送システムを搭載可能であり、リアルタイムのモニターがも可能である。



飛行船型バルーン



丸型バルーン

図 2.3.6 バルーンの種類

(引用：鎌田空撮サービス Web ページ <http://www10.ocn.ne.jp/~kamata/>)

(5) 無人化施工機械による調査

①概要

事前準備が間に合わなかった場合や、噴火直後に現地での撮影や試料採取、計測を行うことは、危険が伴うため現実的でない。そこで、近年めざましい進歩をとげている無人化機械の活用が考えられる。火山活動開始後・降灰後の現地での作業に際して、無人化機械に求められる機能・能力は、例えば ①悪路走破、②遠隔操縦、③走行距離・時間の確保、④防塵・防水・耐火山弾、⑤堆積深計測、⑥試料採取、⑦データログまたはデータ送信などである。

同じく技術の進歩が著しいものとして、地震防災分野におけるロボット研究がある。この分野では瓦礫や階段といった環境を強く意識しているため、悪路走破や遠隔操縦、データ送信、防塵・防水などの点で、火山灰堆積厚把握のための機能要件に合致する。

既に、無人化施工は全国各地で実施され始めて実績を積んでいるが、悪路走行性能や遠隔操縦における操作性などの面で、課題が残されている。一方でロボット研究についてはこれらの課題点をクリアしているものの、都市部や建物内などでの利活用を想定して開発されているものが多く、活動中の火山体斜面という現場条件における走行距離・時間や耐塵・火山ガス・熱などのほか、実現性の点で課題が残されている。

②安全上の留意点

無人化機械の利点は、遠隔操作によって人間が直接立ち入ることができない場所まで進入し、作業することが可能なことである。

③適用範囲と今後の課題・発展性

現段階の無人化機械には悪路走破能力が乏しく、降灰後雨が降るまでという時間的制約のある中での作業対応としては心許ない。

(6) 無人火山調査機械（MOVE：東北大学）

東北大学のグループ（谷口教授ら）は科研費研究開発として、無人化施工機械の改造による火山探査移動観測ステーション（Mobile Observatory for Volcanic Explosion; MOVE）を製作して実証実験中である（例えば：後藤ほか,2004,火山学会発表要旨）。ベースとなる車両は、無人施工型クローラードンプであり、操縦や観測のための4台のカメラのほか、観測機器を収納する断熱ボックス、火砕サージに耐えるための断熱処理などが施されている。

現状では試験レベルであり、無線操縦可能な範囲は数m～数100mであること、実地試験の際に無線系統のトラブルが多かったこと、地形的障壁がある際の電波の送受信が難しかったことなど、走行速度が遅いことなど課題が残されている。今後の研究進展に期待したい。（情報・資料は、東北大・後藤博士より御提供頂いた）



<引用文献>

- ・岸寛人・中野智史・中島知幸(2007) 小形無人ヘリコプターによる調査と今後の活用について, 第50回(平成18年度)北海道開発局技術研究発表会.
- ・大都市大震災軽減化特別プロジェクト(2003) 文部科学省.
- ・平成17年度 無人機(UAV)の汎用化に伴う防衛機器産業への影響調査報告書(2006) 社団法人 日本機械工業連合会・日本戦略研究フォーラム.
- ・秋常秀明・白鳥昭浩・中神拓(2001) 河川管理への UAV の活用検討について. 第3回 建設情報研究所 研究発表会.
- ・松島健・及川純・山科健一郎・清水洋(1995)火山観測用ペネトレータの開発ーレーザ計測システムを用いたペネトレータ着地位置の測定ー, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, 83-83.
- ・後藤章夫・市原美恵・谷口宏充・前野深・小暮昌史・小山将明・藤田健昇・山下誠二・菅原一宏・近藤尚志・大平修二・井口正人(2004)火山探査移動観測ステーション(MOVE)の走行試験, 日本火山学会講演予稿集, 108-108, 日本火山学会.
- ・谷口宏充・後藤章夫・市原美恵(2005),火山探査移動観測ステーション MOVE 開発の現状.火山爆発のダイナミックス, 文部科学省科学研究費特定領域研究(領域番号 422)研究成果報告書(平成16年度), 263-264, 井田喜明(兵庫県立大学)

<参考 URL>

宇宙航空研究開発機構(JAXA) URL:http://www.jaxa.jp/projects/aero/future/index_j.html

JACIC 研究報告 URL:<http://www.jacic.or.jp/kenkyu/3/3-1-2-1.pdf>

千葉大学野波研究室と(株)ヒロボー URL:<http://www.hirobo.co.jp/sec/skysurveyor.html>

九州大学ホームページ URL:<http://www.sevo.kyushu-u.ac.jp/sevo/staff/shimizu/peneto.html>

中小企業庁 モノ作り中小企業支援Web

URL:http://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/monozukuri300sha/8kyuushuu/43kumamoto_02.html

株式会社アトリム URL:<http://www.atrim.co.jp/spec/index.html>

鎌田空撮サービス URL:<http://www10.ocn.ne.jp/~kamata/>

巻末資料

- 1 少ない計測データから降灰分布を推定する手法の検討結果
- 2 ALOS「だいち」の火山灰等堆積状況把握への適用可能性検証結果

1. 少ない計測データから降灰分布を推定する手法の検討結果

火山灰の降灰分布や堆積量を推定するには堆積厚（あるいは堆積重量）がわかる観測点が必要である。ただし、桜島のように観測点が限られている火山や頻繁に噴火する火山では、多くの観測点を確保することが難しい場合がある。このため、少ない計測データ（1 点程度の情報がある場合および 2 点程度の情報がある場合）から火山灰堆積厚分布を推定する手法を考案した。

1.1 降灰分布の推定法

(1) 2 点のデータが判明している場合

降灰分布を推定する方法については、2 点のデータがあり降灰の分布軸が判明している場合には堆積厚と面積の積（ $V = \beta TS$ ）が一定と考える関係を用いることによって機械的に求めることが可能となる。以下にその考え方を示す。

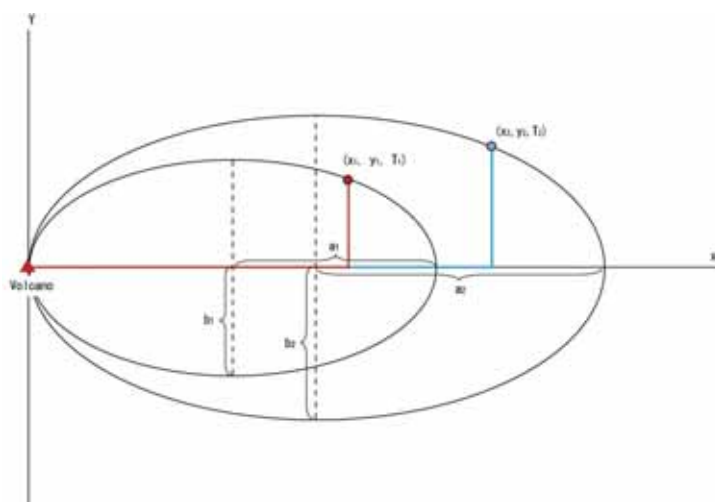


図 1.1-1 アイソパックを描く場合のイメージ図

楕円 1 と楕円 2 は相似形と仮定する

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{b_2}{a_2} \rightarrow \frac{b_2}{b_1} = \frac{a_2}{a_1} \quad \frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} \dots\dots\dots (1-1)$$

早川式より

$$T_1 a_1 b_1 = T_2 a_2 b_2 \rightarrow \frac{b_2}{b_1} = \frac{T_1}{T_2} \frac{a_1}{a_2} \quad \frac{T_1 a_1 b_1}{T_2 b_2} = a_2 \dots\dots\dots (1-2)$$

(1)と(2)より

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{T_1}{T_2} \frac{a_1}{a_2} \rightarrow 1 = \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^2 \rightarrow \frac{a_2}{a_1} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \dots\dots\dots (1-3)$$

(1-3)等より楕円 2 の P2 点を変換し，楕円 1 上の点とする。

$$P_1(x_1, y_1), \quad P_2\left(\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}x_2, \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}y_2\right), \quad (0,0)$$

上記より，以下が成り立つ

$$\frac{(x_1 - a_1)^2}{a_1^2} + \frac{y_1^2}{b_1^2} = 1 \dots\dots\dots (1-4)$$

$$\frac{\left(\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}x_2 - a_1\right)^2}{a_1^2} + \frac{\left(\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}y_2\right)^2}{b_1^2} = 1 \dots\dots\dots (1-5)$$

(1-5)式を開く

$$\frac{\frac{T_1}{T_2}y_2^2}{b_1^2} = 1 - \frac{\frac{T_1}{T_2}x_2^2 - 2\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}x_2a_1 + a_1^2}{a_1^2}$$

$$\frac{\frac{T_1}{T_2}y_2^2}{b_1^2} = \frac{\frac{T_1}{T_2}x_2^2 - 2\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}x_2a_1}{a_1^2}$$

$$b_1^2 = \frac{\frac{T_1}{T_2}y_2^2}{\frac{\frac{T_1}{T_2}x_2^2 - 2\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}x_2a_1}{a_1^2}}$$

$$b_1^2 = - \frac{y_2^2}{\frac{x_2^2 - 2\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}x_2a_1}{a_1^2}} \dots\dots\dots (1-5)'$$

同様に(1-4)式を開く

$$b_1^2 = -\frac{y_1^2}{\frac{x_1^2 - 2a_1x_1}{a_1^2}} \dots\dots\dots (1-4)'$$

(1-4)'と(1-5)'より

$$\frac{y_1^2}{\frac{x_1^2 - 2a_1x_1}{a_1^2}} = \frac{y_2^2}{\frac{x_2^2 - 2\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}x_2a_1}{a_1^2}}$$

$$\left(x_2^2 - 2\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}x_2a_1\right)y_1^2 = y_2^2(x_1^2 - 2a_1x_1)$$

$$x_2^2y_1^2 - 2\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}x_2y_1^2a_1 = x_1^2y_2^2 - 2a_1x_1y_2^2$$

$$2\left(x_1y_2^2 - \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}x_2y_1^2\right)a_1 = x_1^2y_2^2 - x_2^2y_1^2$$

$$a_1 = \frac{x_1^2y_2^2 - x_2^2y_1^2}{2\left(x_1y_2^2 - \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}x_2y_1^2\right)} \dots\dots\dots (1-6)$$

以上より, a_1, b_1, a_2, b_2 を求める。

(2) 1 点のデータが判明している場合

なお、楕円の形状が決まっている場合、軸が明らかであり、楕円形状の短軸/長軸比が一定と仮定できる場合、1 点の観測データがあれば楕円を描くことが可能である。

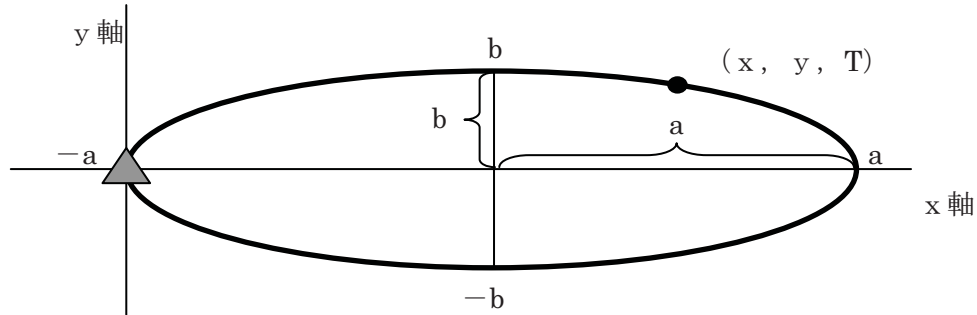


図 1.1-2 アイソパックを描く場合のイメージ図

楕円の任意の点の座標を示す式

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

a : 長半径、b : 短半径 (a > b)

$$\frac{(x-a)^2}{a^2} + \frac{(y)^2}{b^2} = 1 \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

$\frac{b}{a} = \gamma$ と仮定

$$\frac{(x-a)^2}{a^2} + \frac{(y)^2}{(0.3a)^2} = 1$$

$$\frac{x^2 - 2ax - a^2}{a^2} + \frac{y^2}{0.09a^2} = 1$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{2x}{a} + 1 + \frac{y^2}{0.09a^2} = 1$$

$c = \frac{1}{a}$ とする。

$$0.09x^2c^2 + 0.18xc + y^2c^2 = 0$$

$$c\{(0.09x^2 + y^2)c - 0.18x\} = 0$$

$$c = 0, \frac{0.18x}{0.09x^2 + y^2} \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

$a = \frac{1}{c}$
c より a を求める

1.2 噴出量の推定法

面積と層厚一定の関係は次のように表すことができる。

$$T = \alpha S^{-1}$$

T と S の積の関係を積分したものが噴出量に相当するため、上式を定積分する。

$$\int_a^b T = \alpha \times \log(S_b) - \alpha \times \log(S_a)$$

ここで a については宝田・他（2001）に示されるように 10,000 m²の範囲とし、b は概ね降灰の分布限界を示す 10⁻⁶ t/m³の等重量線が囲む面積とした。この方法を用い、吉本・他（2005）によって得られた等層厚線の積算から求められた噴出量の推定方法との検証を行ったが、 $V = 12.2TS$ の関係を用いたものより良い相関関係を得ることができた（後述）。宝田・他（2001）との関係も比較したが、吉本・他（2005）よりは相関性が劣る。これは、吉本・他（2005）は容器による採取を行っており、宝田・他（2001）は地面等に堆積したものを採取しているための違いが現れた可能性があると考えられる。噴出量の推定法については、面積・層厚の積が一定の関係を用いても、一定の精度の値を得ることができることが確認でき本法を用いることとした。

1.3 プログラムの入力方法・出力結果

前記において設計したアルゴリズムをもとに、市販のマイクロソフト社製のソフトエクセルを用いて火山灰堆積厚分布図を作成するプログラムを開発した。プログラム言語は Visual Basic とした。別添のプログラムを参照とする。

(1)入・出力例

以下に入・出力例を示す。基本的には、「1. 火口位置入力」、「2. 観測点入力」、「3. 条件入力」、「4. 等層厚線情報表示」の順に入力する。また、各シートの赤枠で示した所が未入力の場合、「5. 図形」シート上で等層厚線が出力できなくなる。

I. 火口位置入力 シート

火 口 位 置

火口	項目	単位	入力値	備考
0	原点位置	X(km)	0	
		経度	130.669950	WGS84: ddd.dddddd
		Y(km)	0	
		緯度	31.574114	WGS84: ddd.dddddd
1	火口名称		Minamidake A crater	
	火口半径	m	70	
	火口位置	X(km)	0	座標から計算させる場合は何も入力しない
		経度	130.662947	WGS84: ddd.dddddd
		Y(km)	0	座標から計算させる場合は何も入力しない
		緯度	31.574967	WGS84: ddd.dddddd
2	火口名称		Minamidake B crater	
	火口半径	m		
	火口位置	X(km)	0	座標から計算させる場合は何も入力しない
		経度	130.660544	WGS84: ddd.dddddd
		Y(km)	0	座標から計算させる場合は何も入力しない
		緯度	31.577100	WGS84: ddd.dddddd
3	火口名称		Showa crater	
	火口半径	m		
	火口位置	X(km)	0	座標から計算させる場合は何も入力しない
		経度	130.669950	WGS84: ddd.dddddd
		Y(km)	0	座標から計算させる場合は何も入力しない
		緯度	31.574114	WGS84: ddd.dddddd

必ず入力

入力が好ましい

未入力でも可

入力セル

自動表示セル

Ⅱ. 観測点入力 シート

必要に応じて地
点名称を入力

観 測 点

求めたい火口（原
点）からの距離、
下図参照

観測点	名称	項目	単位	入力値	備考
1	有村 1	地点(x)	(km)	0.924	原点からの距離 東(+), 西(-)
		座標		130.679336	WGS84: ddd.dddddd
		地点(y)	(km)	-1.496	原点からの距離 北(+)
		座標		31.560744	WGS84: ddd.dddddd
		層厚(T)	(cm)	0.022004488	計算時にkmに変換
2	有村 2	地点(x)	(km)	0.543	原点からの距離 東(+)
		座標		130.676322	WGS84: ddd.dddddd
		地点(y)	(km)	-1.898	原点からの距離 北(+)
		座標		31.556825	WGS84: ddd.dddddd
		層厚(T)	(cm)	0.025712467	計算時にkmに変換
3	有村 3	地点(x)	(km)		原点からの距離 東(+), 西(-)
		座標			WGS84: ddd.dddddd
		地点(y)	(km)		原点からの距離 北(+), 南(-)
		座標			WGS84: ddd.dddddd
		層厚(T)	(cm)		計算時にkmに変換
4	有村 4	地点(x)	(km)	0.033	原点からの距離 東(+), 西(-)
		座標		130.660796	WGS84: ddd.dddddd
		地点(y)	(km)	-2.264	原点からの距離 北(+), 南(-)
		座標		31.552264	WGS84: ddd.dddddd
		層厚(T)	(cm)	0.003464597	計算時にkmに変換
5	有村 崎	地点(x)	(km)	1.199	原点からの距離 東(+), 西(-)
		座標		130.683144	WGS84: ddd.dddddd
		地点(y)	(km)	-2.575	原点からの距離 北(+), 南(-)
		座標		31.549606	WGS84: ddd.dddddd
		層厚(T)	(cm)	0.000544028	計算時にkmに変換

求めたい火口（原
点）からの距離、
下図参照

緯度を入力、未入
力でも可

数が足りない場合は、コピー・
ペーストで行を増やす

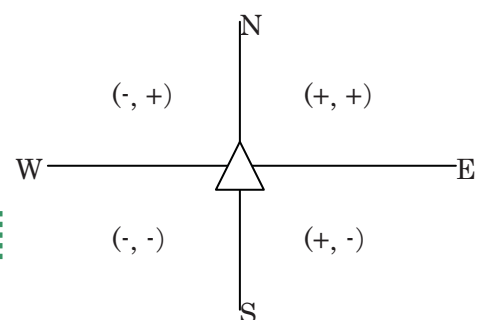
必ず入力

入力が好ましい

未入力でも可

入力セル

自動表示セル



Ⅲ. 条件入力 シート

計算条件入力					現在の値を使用
情報	項目	単位	入力値	備考	
図面	縮尺	分の1	10000	1/1万の場合、10000を入力	
噴煙	流向(風向)	角度	45.00	東から時計回り度(0-360) 東:0 南東:45、南:90、南西:135、西:180 北西:225、北:270、北東:315	流向・風向を入力
	流速(風速)	m/s	4.6		流速もしくは風速を入力 未入力でも可
計算楕円	長短軸比	b/a	0.3	初期値 0.3	
早川式	係数	-	12.2	初期値 12.2	
降灰分布 軸	角度		349.85	噴煙から 349.85 分布軸不明時 流向	1 点から求める 場合、長短軸比を 入力
計算用火口	番号	3	X (km)	0.00	火口情報入力
			経度	130.67	
			Y (km)	0.00	
			緯度	31.57	
		火口名	Showa crater		
計算用観測点1	番号	14	地点(x1) (km)	2.65	観測点の番号
			経度	130.700003	
			地点(y1) (km)	0.47	
			緯度	31.578703	
		層厚(T1) (m)	0.0002842		
計算用観測点2	番号	11	地点(x3) (km)	3.22	観測点の番号 1点で計算する
			経度	130.706506	
			地点(y3) (km)	0.04	
			緯度	31.575564	
		層厚(T3) (m)	0.0000401		

必ず入力

入力が好ましい

未入力でも可

入力セル

自動表示セル

係数を入力、12.2
固定値

降灰分布軸の角
度を入力(東より
反時計回)

1. 火口位置入力
の火口番号を入
力

2. 観測点の観測
点番号を入力

2. 観測点の観測
点番号を入力
1 点で計算する
場合は 0 を入力

※ 早川式(係数): $V(\text{量}) = \alpha(\text{係数}) * T(\text{層厚}) * S(\text{面積})$ の α 値を入力
(Hayakawa(1985)では 12.2)

IV. 等層厚線情報表示 シート

等層厚線情報表示

番号	厚さ (mm)	長軸長 (km)	短軸長 (km)	面積 (km ²)
Vent	500			
Model	T1	2.687953	0.396587	0.837240
	T2	7.156865	1.055941	5.935430
1	100	0.143292	0.021142	0.002379
2	10	0.453128	0.066856	0.023793
3	1	1.432915	0.211416	0.237929
4	0.1	4.531276	0.668555	2.379291
5	0.01	14.329154	2.114157	23.792915
6	0.001	45.312765	6.685551	237.929154
7	0.0001	143.291544	21.141569	2379.291544
8	0.03	8.272941	1.220609	7.930971
9				

等層厚線を描く
のに必要な厚さ
を入力

短軸/長軸	0.147542
-------	----------

	換算密度	噴出量
マグマ換算(DREm ³)	2.5 g/cm ³	2903
質量換算(t)	1.0 g/cm ³	7257
堆積量換算(m ³)	1.5 g/cm ³	4838

堆積量に換算す
る場合のみかけ
密度を入力

図形を表示

以上の情報を入力した後、ク
リックすると「等層厚線情
報」シートに等層厚線が出力
される。

必ず入力

入力が好ましい

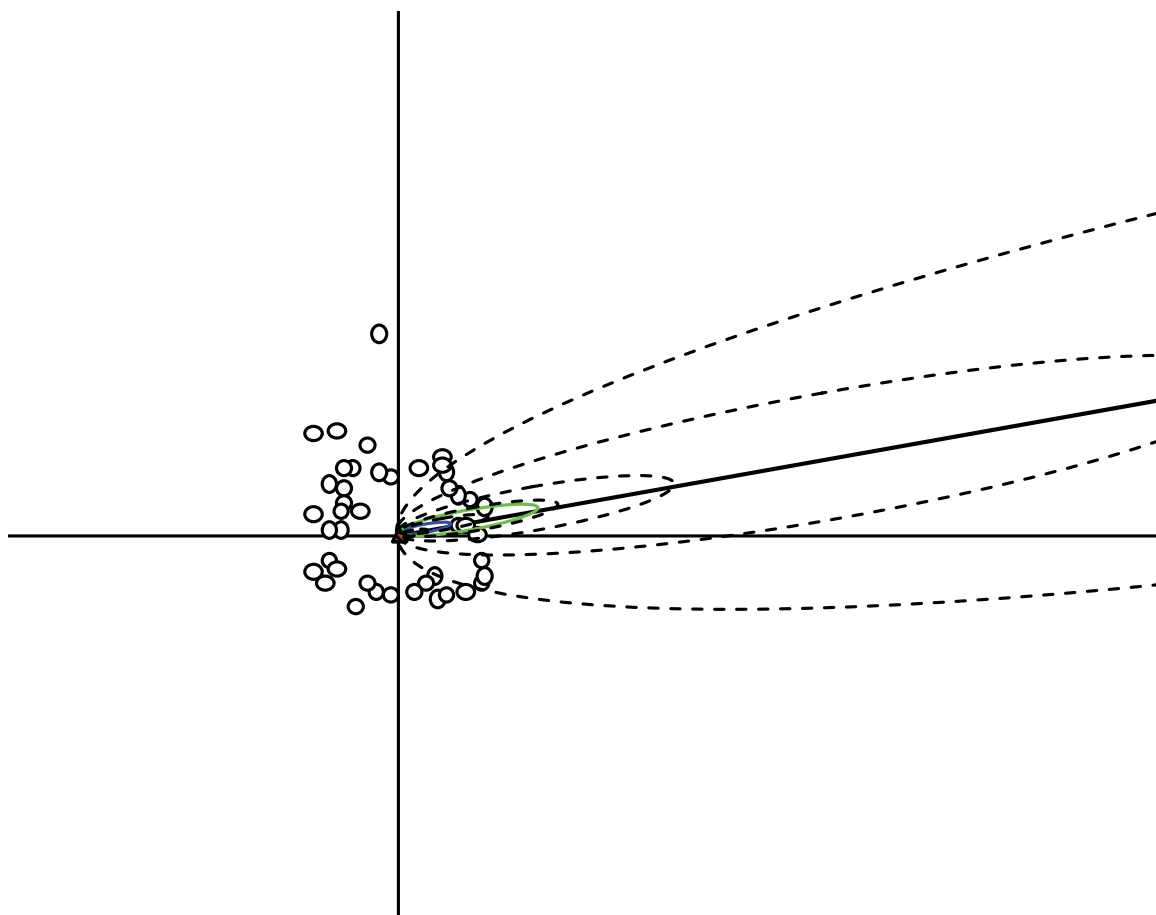
未入力でも可

入力セル

自動表示セル

V. 図形

「4. 等層厚線情報表示」シートの「図形を表示」をクリックするとこの様な図形が描かれる。場合によっては、楕円がずれる場合もありその場合は手作業で修正する。



VI. 出力画面

結果の整理用の参考シートを作成し、その入力イメージを示す。

整理番号: 2008/4/8 0:29 噴火 降灰分布 第2報

火山名称	桜島	火口	Showa crater		
噴火開始日	2008/4/8	噴火終了日	2008/4/8		
噴火時刻	1-start 1-end	2-start 2-end	3-start 3-end		
	0:29				
流向(風向)	南東	観測点	X1(km)	Y1(km)	T1(mm)
噴煙高度	1200 m		2.646	0.473	0.284182886
観測点	X2(km)	Y2(km)	T2(mm)	噴出量(マグマ換算)	2,903 m ³
	3.217	0.043	0.040086251	噴出量(質量換算)	7,257 m ³
設定軸	349.85 ° (時計回り)	計算	噴出量(堆積換算)	4,838 m ³	
広がり角	°		短軸/長軸	0.15	

必要に応じて入力する

「図形」シートよりコピー＆ペーストで貼り付ける

噴火日, 時刻, 風向・噴煙方向, 噴煙高度は気象庁火山の状況に関する解説情報による。

1.4 桜島における検証

桜島において、現地に簡易的にカップを設置し、カップに堆積した火山灰の重量から降灰分布を推定した。桜島のように周囲を海で囲まれているような場合、多くの地点でデータを得ることは困難であり、上述の降灰分布プログラムを利用した。

1.4.1 等層厚線について

最も近接した等層厚線は、Hayakawa(1985)の三宅島の例を参考に 0.2 km^2 を下回らないものとする。最も薄い等層厚線は、現地において降灰が確認できる 0.0001 mm (1.5 g/m^2) 以上の範囲とする。等層厚線の間隔は、 0.01mm , 0.1mm , 1mm の桁毎とする。

1.4.2 2008 年 4 月 27 日噴火の事例

(1)回収状況

桜島周辺にカップを設置した後の最初の噴火である 4 月 27 日 12 時頃の噴火の火山灰を回収した。この噴火では現地において現象を目撃した後、回収を行った。回収は降灰がみられた南東域の 15 ヶ所について、4 月 27 日 16:43 から 4 月 28 日 11:39 にかけて行った。

(2) 重量計測

南部の桜島口（海潟）付近において 62.876g/m^2 のやや高い値が得られた。また、有村 4 地点付近でも周辺に比べ相対的に高い 40.204g/m^2 の値が得られた。

(3)前回回収後の噴火活動

この日の回収と設置の間に火山観測報に記録された噴火は、4 月 27 日 12:08-12:22 の 1 回である。

気象庁火山観測報に記録された噴火

4 月 27 日 12:08-12:22 1400m 南東 中量

(4)降灰分布推定及び推定堆積量

4 月 27 日 12:08-12:22 の噴火に対するものと考えられる火山灰が島南東の地域で見られ、黒神 1 地点でほとんど堆積がなく、持木 4 地点は全くなかったため概ねこの間が降灰範囲と推定される。火山灰が最も多いのは、桜島口（海潟）地点の 62.876g/m^2 、有村 4 地点の 40.204 g/m^2 と周辺より相対的に高い値が得られ、桜島口（海潟）と有村 4 地点付近に分布軸があると推定される。桜島口（海潟）地点付近を軸とする降灰分布の等層厚線図を描くと、図 1.4-1 の様になり、降灰量は 710 トンと推定される。有村 4 地点付近を軸とする降灰分布の等層厚線図を描くと、図 1.4-2 の様になり、降灰量は 400 トンと推定される。

4 月 27 日 12 : 08-12 : 22 の噴火

分布 A (図 1.4-1)

軸の推定法：桜島口（海潟）・身代湾・有村崎の分布より推定

軸の角度：東より時計回り 43 度

計算に用いた観測点：桜島口（海潟）＜SG＞、身代湾＜ST＞

堆積量：710 t

分布 B (図 1.4-2)

軸の推定法：有村 4・古里 1・古里 2 の分布より推定

軸の角度：東より時計回り 72 度

計算に用いた観測点：有村 4＜AR4＞、古里 1＜HR1＞

堆積量：400 t

(5)降灰分布に関する考察

0.0001mm に換算した分布範囲が、概ね現地で確認された分布範囲と一致する。また、各分布の等層厚線は概ねそれ以外の地点の堆積量と整合的である。

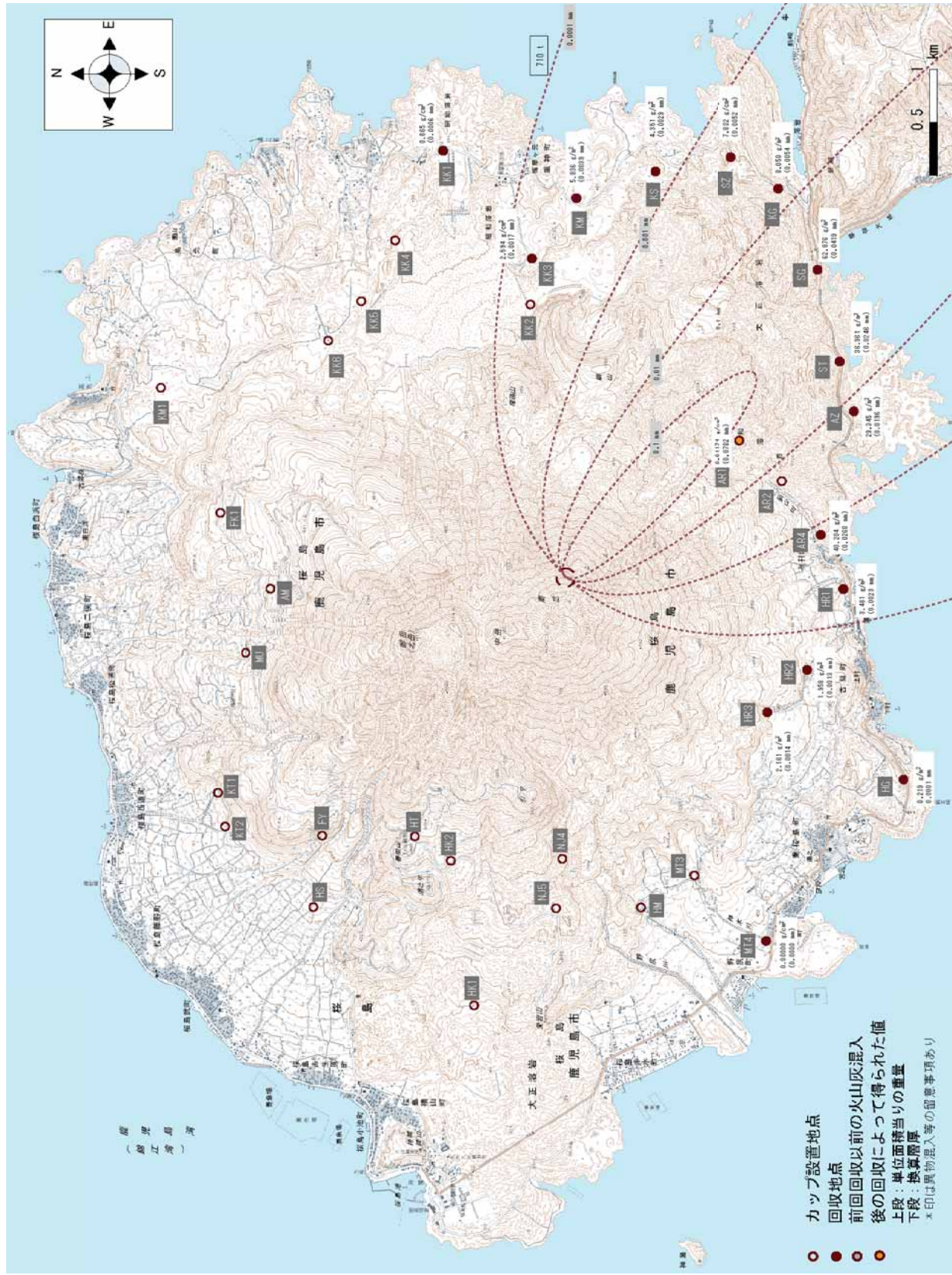


図 1.4-1 4月27日 12:08-12:22 の噴火の推定降灰分布 A

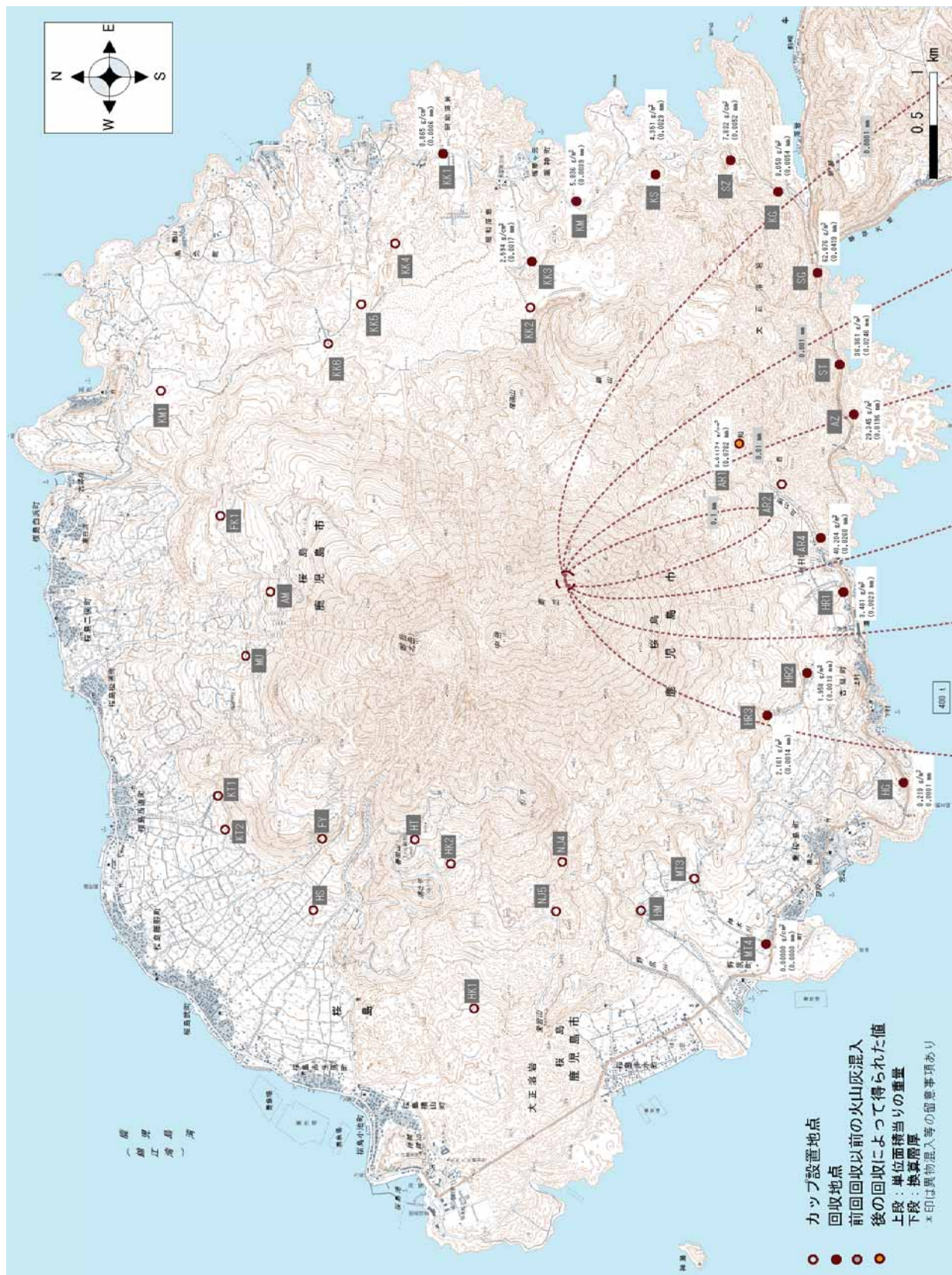


図 1.4-2 4月27日 12:08-12:22 の噴火の推定降灰分布 B

1.4.3 2008 年 4 月 30 日および 5 月 1 日噴火事例

(1)回収状況

4 月 28 日の回収後、4 月 30 日の噴火による火山灰を回収するため 5 月 2 日の 11 時 17 分から 17 時 46 分の間に 22 箇所のカップ回収を実施した。島の西の引ノ平 2 地点から野尻 5 地点にかけて、北の松浦川地点からアミダ川地点にかけて相対的に降灰が多く、概ねこれらの地点付近に分布軸があると推定される。東桜島から古里 1 間には降灰はほとんどなく、東部に堆積量は少ないが降灰がみられる。

(2)重量計測

西部の引ノ平 2 地点において 46.386 g/m^2 の値が得られ、北のアミダ川地点で 26.414 g/m^2 、松浦川地点で 15.462 g/m^2 の相対的に高い値が得られた。

(3)前回回収後の噴火活動

この日の回収と前回の回収の間に火山観測報に記録された噴火は、4 月 30 日 13:52-14:00 の 1 回である。また、4 月 30 日（火山の状況に関する解説情報 第 38 号）、5 月 1 日 06:52（火山の状況に関する解説情報 第 39 号）ではごく小規模な噴火に発生していたと報告されている。

気象庁火山観測報に記録された噴火

4 月 30 日 13:52-14:00 1500m 西 中量（気象庁火山観測報）

(4)降灰分布推定及び推定堆積量

島西～北の地域及び南東地域で火山灰の堆積が見られる。また、黒神 4～黒神 6 地点間及び持木 3～持木 4 地点間ではほとんど堆積がない状況が現地観測から推定された。西部では引ノ平 2 地点において、 46.386 g/m^2 の相対的に高い値が見られる。北部ではアミダ川地点付近で 26.414 g/m^2 の相対的に高い値が見られた。南東部では身代湾、瀬戸崎西付近で相対的に高い値となるが、西、北部に比べれば低い。以上の状況と火山観測報より、西部に堆積したものは 4 月 30 日 13:52-14:00 の噴火に対する堆積物と考えられる。北部のものは「桜島 火山の状況に関する解説情報 第 38 号」に示されたその後断続的に発生した極小規模噴火の累積に対応する可能性が高いと考えられる。南東部の堆積物については、「桜島 火山の状況に関する解説情報 第 39 号」に示された 5 月 1 日 6 時 52 分の極小規模噴火である可能性が考えられるが、ビデオ等で確認する必要がある。

現時点では、西部の火山灰の堆積は 4 月 30 日 13:52-14:00 の噴火、北部の火山灰はその後の断続噴火、南東部のものは 5 月 1 日 6 時 52 分の噴火として分布を推定した。4 月 30 日 13:52-14:00 の噴火の降灰分布の等層厚線図を描くと、図 1.4-3 の様になり、降灰量は 500 トンと推定される。4 月 30 日 13:52-14:00 の噴火及びその後の断続噴火については堆積状況より、引ノ平 2、アミダ川付近に軸があると推定され、降灰分布の等層厚線図を描くと、図 1.4-4 の様になり、降灰量は 280 トンと推定される。黒神送信所付近の降灰分布もその後の断続噴火によるものの可能性があるが不明である。黒神送信所付近を軸とする降灰分布の等層厚線図を描くと図

1.4-5 の様になり、降灰量は 30 トンと推定される。また、5 月 1 日 6 : 25 の噴火については、身代湾地点付近に軸があると推定され、降灰分布の等層厚線図を描くと図 1.4-6 の様になり、降灰量は 110 トンと推定される。

4 月 30 日 13 : 52-14 : 00 の噴火及びその後の断続噴火

分布 1 (図 1.4-3)

軸の推定法：引の平 2・野尻 5・長谷川 1・持木 4 より推定

軸の角度：東より時計回り 195 度

計算に用いた観測点：引ノ平 2<HK2>、野尻 5<NJ5>

堆積量：500 t

分布 A (図 1.4-4)

軸の推定法：アミダ川・松浦川・金床川 1 より推定

軸の角度：東より時計回り 267.4 度

計算に用いた観測点：アミダ川<AM>、松浦川<MU>

堆積量：280 t

分布 B (図 1.4-5)

軸の推定法：黒神送信所・黒神南・瀬戸崎西より推定

軸の角度：東より時計回り 12.55 度

計算に用いた観測点：黒神送信所<KS>、黒神南<KM>

堆積量：30 t

5 月 1 日 6 : 25 の噴火

①分布 1 (図 1.4-6)

軸の推定法：身代湾・有村 4・海潟（桜島口）・古里 1 より推定

軸の角度：東より時計回り 52.2 度

計算に用いた観測点：有村 4<AR4>、身代湾<ST>

堆積量：110 t

(5)降灰分布に関する考察

西部～北部にかけては 0.0001mm に換算した分布範囲と概ね現地で推定された降灰範囲とほぼ一致する。また、各分布の等層厚線は概ねそれ以外の地点の堆積量と整合的であるが、鹿児島（高免 1）地点の値が推定される等層厚線に比べ高い値を示す。この付近に軸を設定する必要があるが全体への影響が少ないことから今回は設定しなかった。また、南東部についても、0.0001mm に換算した分布範囲と現地で推定された降灰範囲とほぼ一致するが、北部への広がりが現地状況よりやや広く推定された可能性がある。また、各分布の等層厚線は概ねそれ以外の地点の堆積量と整合的である。

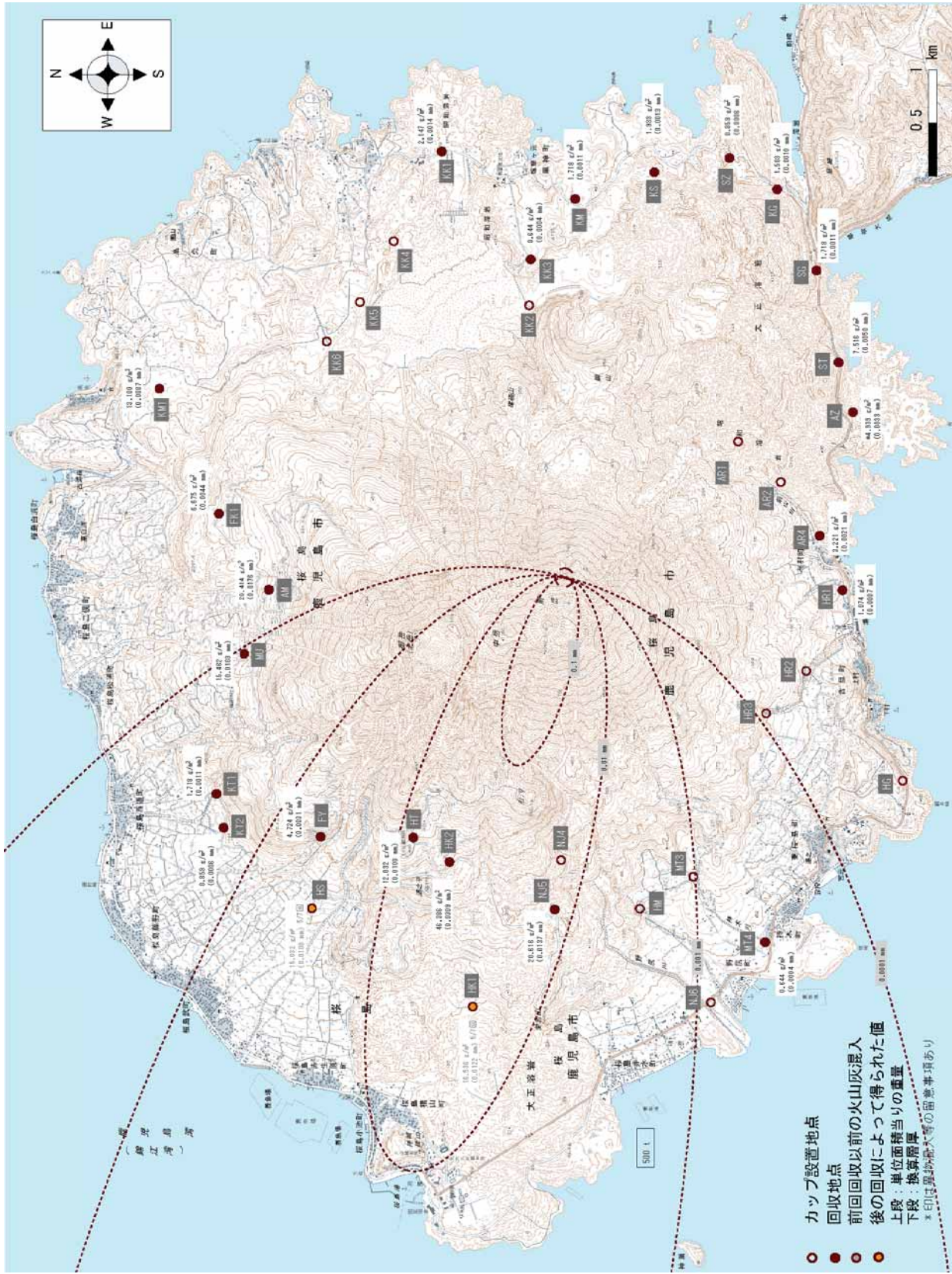


図 1.4-3 4月30日 13:52-14:00 の噴火の推定降灰分布 1

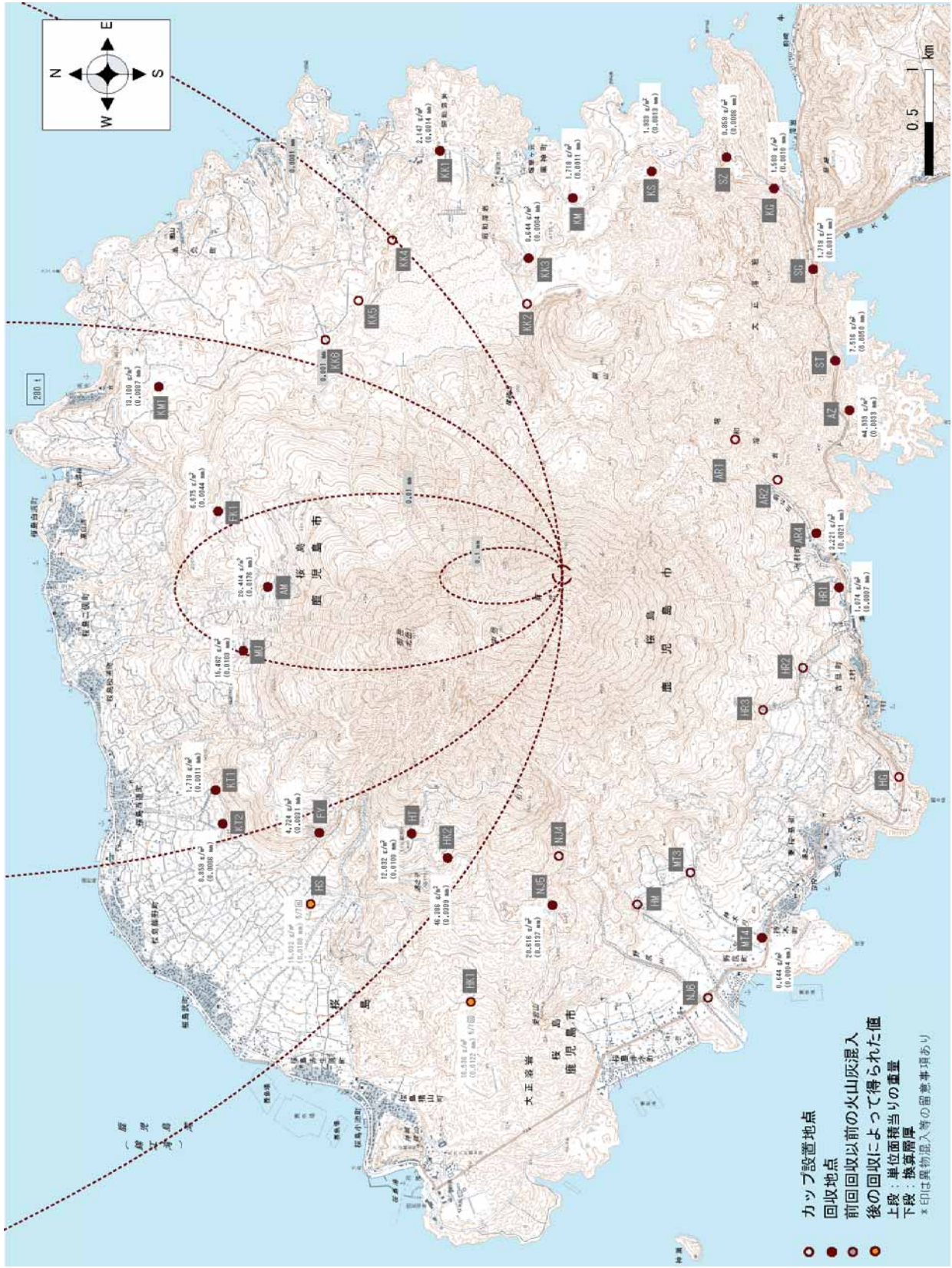


図 1.4-4 4月30日 13:52-14:00噴火後の断続噴火の推定降灰分布 A

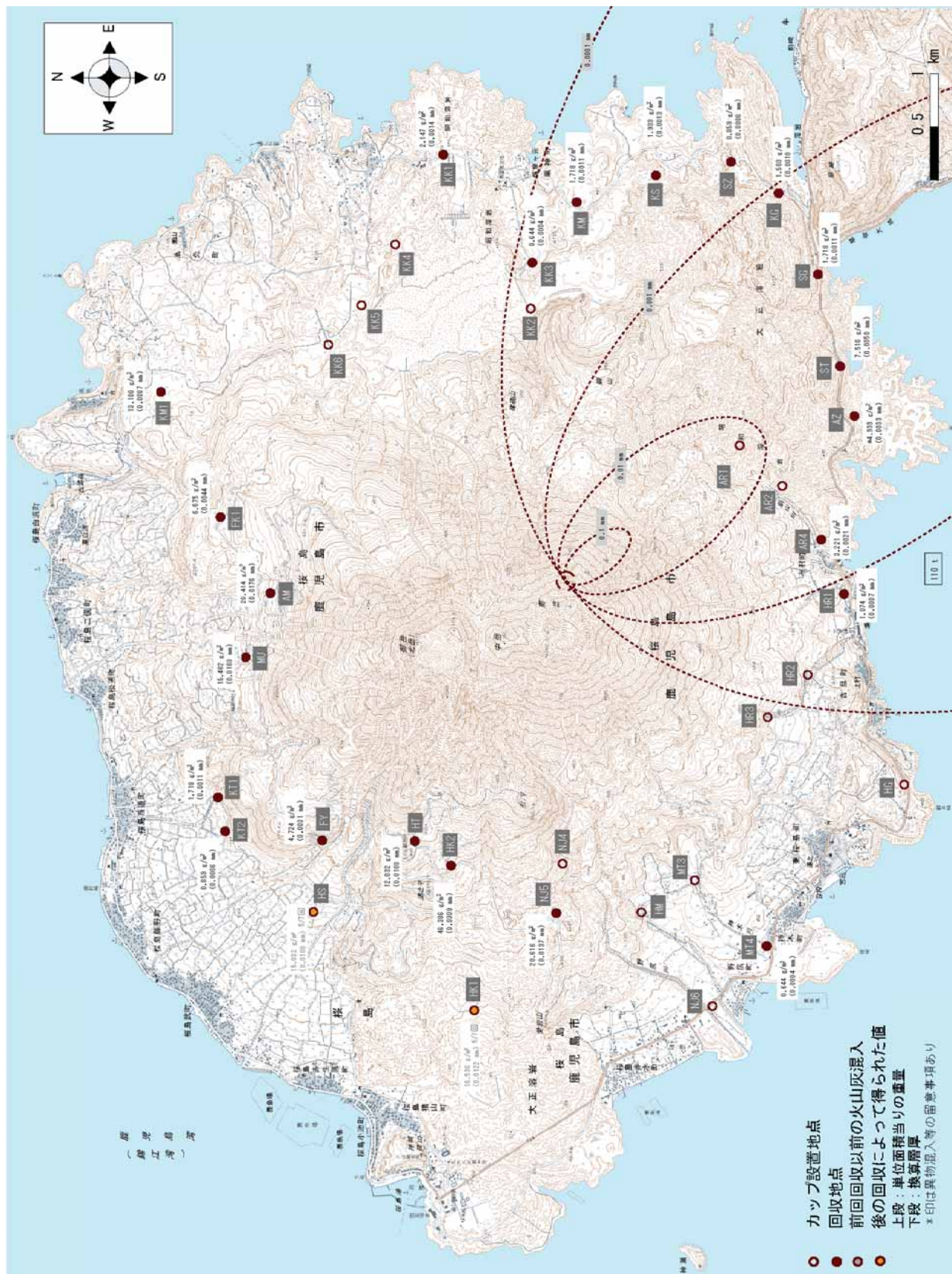


図 1.4-6 5月1日 6:25 の噴火の推定降灰分布 1

1.5 精度検証

(1)降灰の分布限界について

設置から噴火までの期間が短く噴火後早い段階で試料の採取ができた場合には $0.1\sim0.2\text{ g/m}^2$ 程度でも計測でき降灰分布と比較的整合的である。しかし、これらの値より低いものについては検出できず、 $0.1\sim0.2\text{ g/m}^2$ が降灰の分布限界となる。

(2)噴出量の算出について（本法と宝田法の比較検討）

火山灰堆積物の噴出量算出については、Hayakawa(1985)に基づく火山灰堆積量の算出法（早川法）と宝田・他（2001）、吉本・他（2005）による火山灰堆積の算出量（宝田法）がある。早川法は、結晶法（Walker,1980）によって求められた噴出量を元に、等層厚線の面積・層厚の関係から面積・層厚の積が一定の関係にあると仮定し、噴出量を推定する方法である。これに対して、宝田法は面積・層厚の関係を使用する点については早川法と同じであるが、面積・層厚の関係を対数値に変換し、数段階程度に区切った近似式によって表現し、段階毎に積分し質量を求めている。本報は、少ない観測点に基づいて降灰分布、堆積量を推定することを目的としたために、Hayakawa(1985)が示した $V=12.2TS$ の性質に着目して等層厚線、噴出量を推定した。

吉本・他（2005）に示された噴出量推定とそれらの論文の点を用い本報における噴出量の推定方法から算出した噴出量の関係を図 1.5-1 に示す。吉本・他（2005）の結果は等層厚線と噴出量の整合性の観点から精度が高いものと考えられ、その噴出量と本報の計算結果とを検証すると比較的良い相関が得られた。

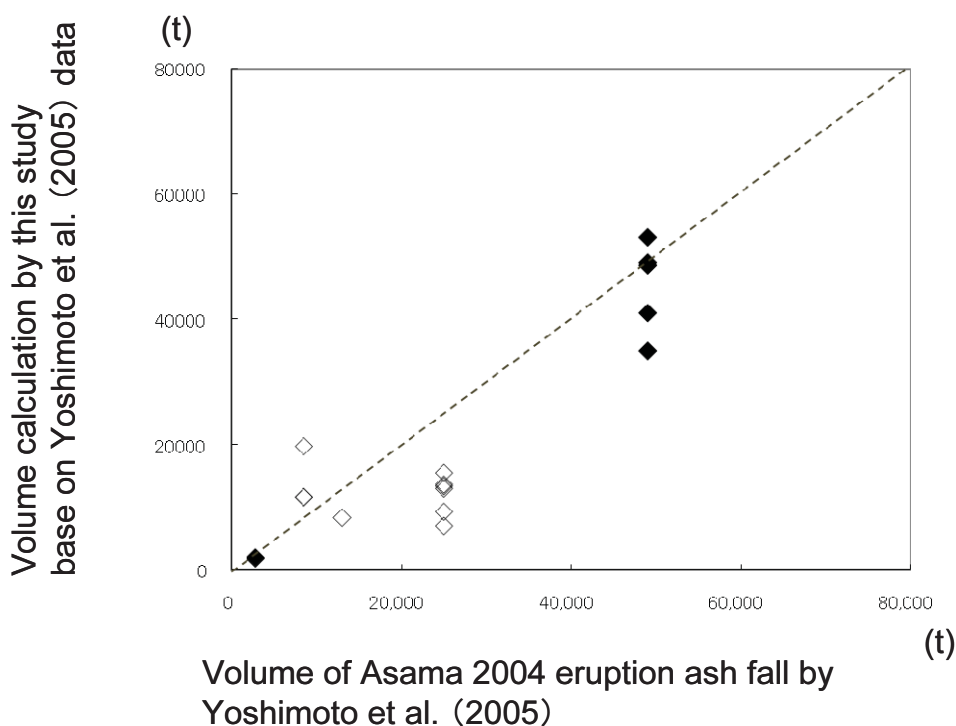


図 1.5-1 浅間山 2004 年噴火の堆積量（吉本・他，2005）に基づく精度検証

黒塗：分布の相関が良い

白抜：分布の相関が悪い

【参考文献】

- Hayakawa Y. (1985) Pyroclastic geology of Towada volcano, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 60, 507-592
- 宝田晋治・吉本充宏・北川淳一・平賀正人・山元孝広・川辺禎久・高田 亮・中野 俊・星住英夫・宮城磯治・西村裕一・三浦大助・廣瀬 亘・石丸 聡・垣原康之・遠藤祐司・八幡正弘・野呂田晋・新井田清信・石塚吉浩・工藤 崇・相沢幸治・本間宏樹・江草匡倫・石井英一・高橋 良 (2001) 有珠火山 2000 年噴火の降灰と火口近傍の状況, 地質調査研究報告, 52, 167-179
- Walker, G.P.L. (1980) The Taupo pumice : product of the most powerful known (ultraplinian) eruption?, Jour. Volcanol., Geotherm. Res., 8, 69-94
- 吉本充宏・嶋野岳人・中田節也・小山悦郎・辻 浩・飯田晃子・黒川 将・岡山悠子・野中美雪・金子隆之・星住英夫・石塚吉浩・吉川竜太・野上健治・鬼沢真也・新堀賢志・杉本 健・長井雅史 (2005) 浅間山 2004 年噴火の噴出物の特徴と降灰量の見積もり, 火山, 50, 519-533.

ALOS「だいち」の火山灰等堆積状況把握への適用可能性検証結果

1. はじめに

火山灰が降灰すると、その後の降雨によって簡単に泥流が発生するといわれている。火山周辺溪流における泥流発生危険性を判別するためには、火山灰堆積範囲及び厚さを迅速に把握する必要がある。しかし、大規模な火山噴火の場合、現地に立ち入ることができないため降灰の実態把握に時間と労力を要し、泥流災害の危険度把握に支障が生じる。衛星画像からこれらが把握できれば、迅速な泥流緊急対策に繋がると考えられる。

本検討では、陸域観測技術衛星ALOS（「だいち」）のAVNIR-2（高性能可視近赤外放射計2型）及びPALSAR（フェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダ）を用いることによって、火山灰堆積範囲及び厚さを把握することができるか否かを検証した。

2. 検討地域・方法

検討地域には、2008年2月3、6日に爆発的噴火に伴う降灰及び火砕流の発生が確認された鹿児島県桜島を選んだ(図1は当イベントで昭和火口から発生した火砕流堆積物)。この2008年2月3、6日の爆発的噴火前後の最も近いALOSデータを取得し、現地踏査、空中調査によって推定した火砕流、火山灰堆積範囲(図1&2)¹⁾と比較することで、火砕流及び火山灰堆積物の堆積範囲を衛星データにより把握できるかについて検証を行った。

本検討の解析に用いたALOSデータは、2008年2月3、6日の降灰イベント前後のAVNIR-2画像、PALSAR(アセンディング)画像、PALSAR(ディセンディング)画像の計6枚である(表1)。AVNIR-2画像のデータ撮影日は、降灰イベント前の画像は2007年5月11日、イベント後の画像は2008年3月28日と、対象とした降灰イベント時期から期間が開いている。これはAVNIR-2が天候(特に雲量)に強く影響を受けるためであり、AVNIR-2画像は災害直前・直後にデータを取得することが難しいことが上げられる。



図1 昭和火口から発生した火砕流の堆積物

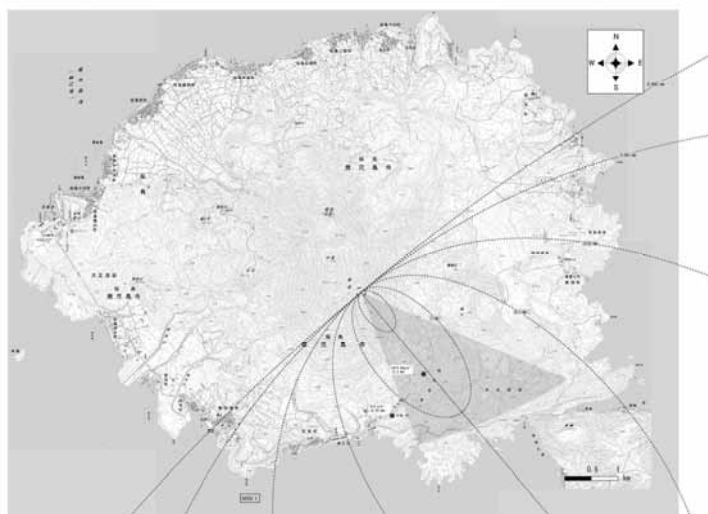


図2 2008年2月3日、6日の火山灰分布推定図

また本調査で用いた AVNIR-2 画像は全て、ポインティング角 0.00° である。

本検討で用いた PALSAR データは、衛星進行方向アセンディング・ディセンディング共にオフナディア角は 34.3° である。本調査地域のアセンディングは西側から、ディセンディングは東側から撮影する衛星方向である。PALSAR(アセンディング)画像の撮影日時は、降灰イベント前の画像は 2007 年 12 月 28 日、降灰イベント後のものは 2008 年 2 月 12 日であり、PALSAR(ディセンディング)画像は、降灰イベント前が 2008 年 1 月 10 日、降灰イベント後が 2008 年 2 月 25 日と、AVNIR-2 の画像撮影日に比べて降灰イベントと期間は短い。これは、PALSAR が天候を問題にしないこと、昼夜問わずデータを取得できることが理由である。

衛星データの処理は ERDAS-Imagine 9.1[ESRI]を用いた。これら全データを桜島全域、及び桜島噴火口周辺地域で切り出すことで、降灰イベント前後の比較を行った。また、最も火山灰及び火砕流堆積物の影響が表れていると観察された、桜島噴火口付近の PALSAR(アセンディング)画像においては、降灰イベント前後のデータの差分を取ることで、後方散乱係数の降灰イベントによる変化についても議論した。

表 1 使用した ALOS データ

	AVNIR-2	PALSAR	
		Ascending	Descending
噴火前	07/05/11	07/12/28	08/01/10
噴火後	08/03/28	08/02/12	08/02/25

3. 検討結果

桜島全域の ALOS データと 昭和火口付近の ALOS データを図 3 および 4 に示す。図は上から、AVNIR-2 画像、PALSAR (アセンディング) 画像、PALSAR(ディセンディング)画像であり、図左側が 2008 年 2 月 3、6 日に発生した爆発的噴火前の画像、右側がその後の画像である。桜島噴火口付近の AVNIR-2 データの比較からは、今回の噴火による降灰範囲は把握できなかった。これは、噴火規模が小さすぎたこと、撮影時期が降灰イベント発生時から 2 ヶ月程度時間が経過してしまっていること等が原因と考えられる。PALSAR(アセンディング)データからは、噴火口東側において、噴火イベント後の後方散乱係数において低下域が見られた。これは降灰イベントと同時に発生した火砕流の堆積範囲とほぼ一致する。しかし、この桜島南岳東側斜面に堆積した火砕流は、東側から撮像した PALSAR(ディセンディング)画像では堆積範囲は不明瞭であった。これはフォアショートニングのため、衛星に面している昭和火口東側斜面のデータがつぶれてしまい、画像が判読しにくいことが理由である。

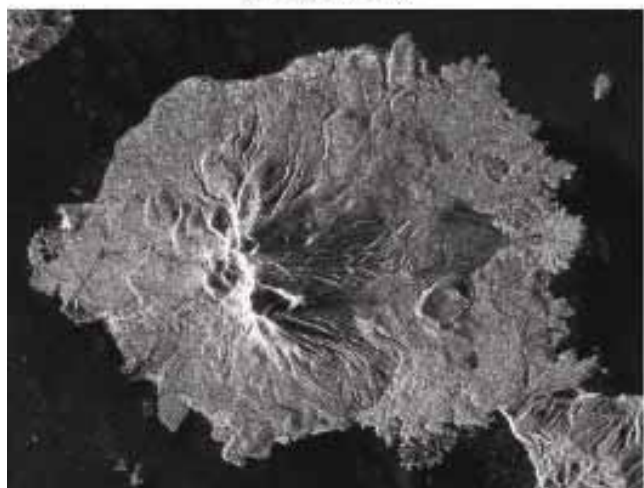
以上より、本検討地域で最も火山灰及び火砕流堆積物の堆積範囲を抽出できる可能性が高い PALSAR(アセンディング)データを用いて、画像データの差分を行った(図 5)。この差分値は、噴火後の画像データから、噴火前の画像データの輝度値の差である。したがって、この図における明るいエリアは、噴火前に比べて後方散乱係数が高くなった地域、暗いエリアは噴火前に比べて後方散乱係数が低くなったエリアを示している。局所的な後方散乱係数の低下は、地表面粗度の低下と考えられることから、本検討地域における噴火口東部の一部で見られる後方散乱係数の低下域は、その形状、範囲から、図 1 に示す火砕流堆積物の範囲とほぼ一致しているものとみえる。図 1 のとおり、火砕流堆積物およびその周辺地面の表面は、かつての溶岩流や密にガリーが発達した急勾配斜面であったが、火砕流と火山灰によって厚く覆われることによって平滑化され、地表面粗度が低下したものと推定される。



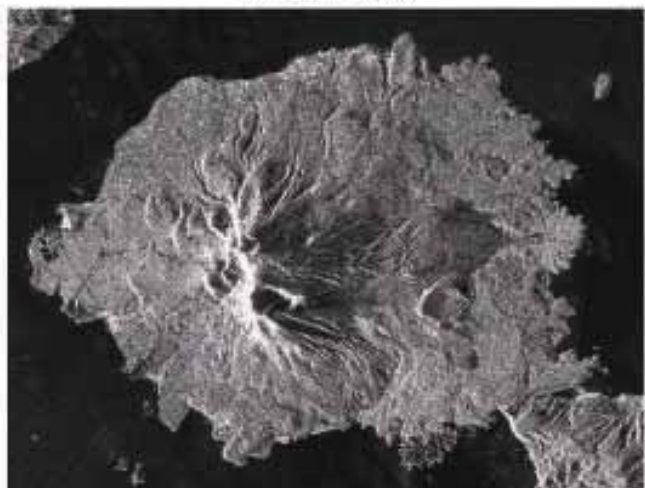
a) 噴煙発生前(2007年5月11日)に撮影された
AVNIR-2の画像



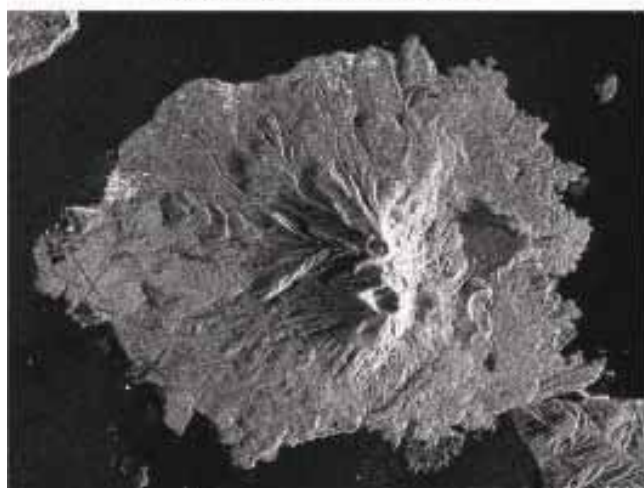
b) 噴煙発生後(2008年3月28日)に撮影された
AVNIR-2の画像



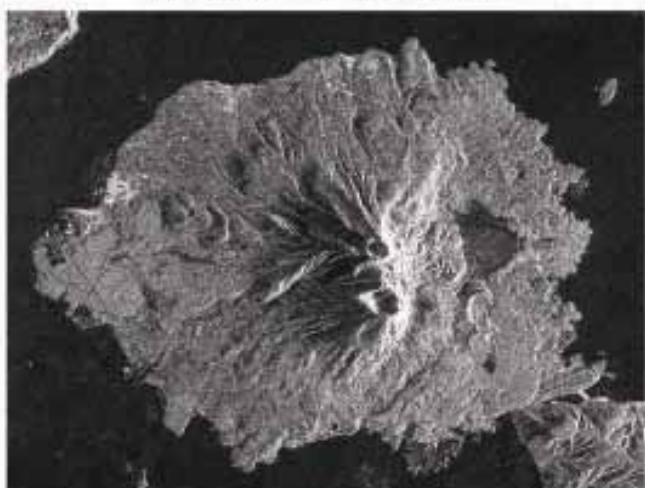
c) 噴煙発生前(2007年12月28日)に撮影された
PALSAR(アセンディング)の画像



d) 噴煙発生後(2008年2月12日)に撮影された
PALSAR(アセンディング)の画像



e) 噴煙発生前(2008年1月10日)に撮影された
PALSAR(ディセンディング)の画像

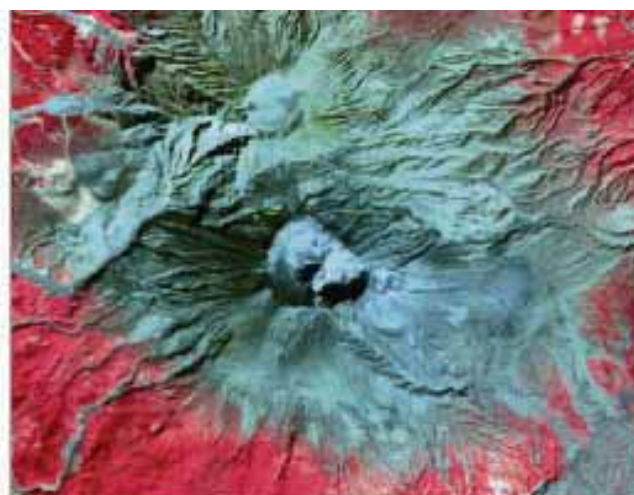


f) 噴煙発生後(2008年2月25日)に撮影された
PALSAR(ディセンディング)の画像

図3 桜島全域における2008年2月3日、6日の爆発的噴火前後に得られたALOSデータ



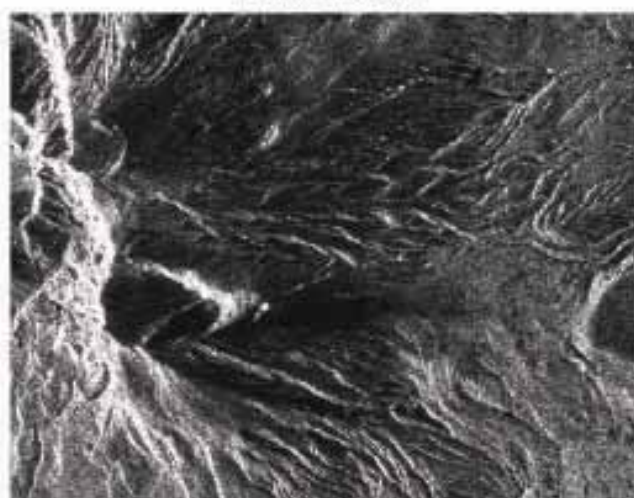
a) 噴煙発生前(2007年5月11日)に撮影された
AVNIR-2の画像



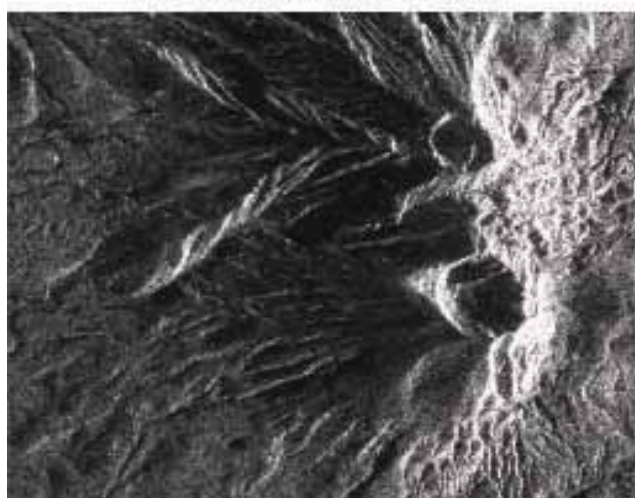
b) 噴煙発生後(2008年3月28日)に撮影された
AVNIR-2の画像



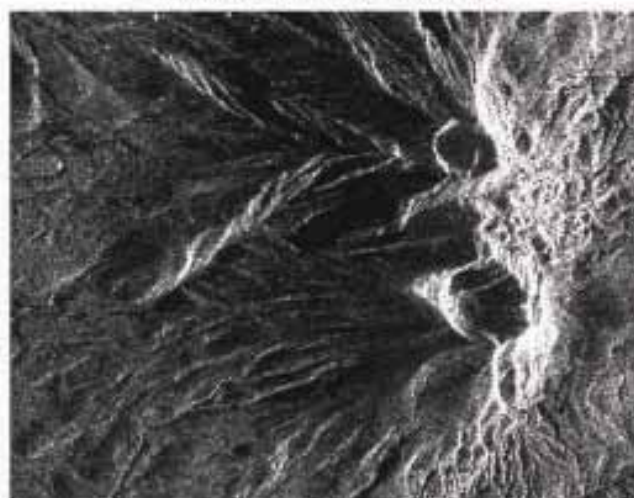
c) 噴煙発生前(2007年12月28日)に撮影された
PALSAR(アセンディング)の画像



d) 噴煙発生後(2008年2月12日)に撮影された
PALSAR(アセンディング)の画像



e) 噴煙発生前(2008年1月10日)に撮影された
PALSAR(ディセンディング)の画像



f) 噴煙発生後(2008年2月25日)に撮影された
PALSAR(ディセンディング)の画像

図4 昭和火口周辺における2008年2月3,6日の爆発的噴火前後に得られたALOSデータ

このように、地表面粗度を平滑化するほどに火山灰等が厚く堆積しているのであれば、判読技術を有する技術者を養成することにより、PALSAR データを用いることで火砕流の堆積範囲を把握できる可能性があるものと考えられる。

4. まとめ

H11～13 年度に実施された国土交通省総合技術開発プロジェクト「災害等に対応した人工衛星利用技術に関する研究」において、ALOS の PALSAR とほぼ同程度の空間分解能

(9m) を有する RADARSAT の後方散乱強度画像によって、噴火後の降灰範囲、土砂流出範囲の抽出可能性が検討された。SAR の後方散乱強度画像はモノクロ画像であり、かつ、空間分解能が不足していたことから、大きな湛水域や、大きな地割れ以外には判読は不能、という結論とせざるを得なかった²⁾。しかし、今回、同等の画像を用いたが、噴火前後の観測方向、オフナディア角の等しい画像を比較することにより、後方散乱強度画像によっても火砕流であれば判読が可能であることが示された。また、北川らが、位相情報も合わせて取得して、噴火前後の画像間のコヒーレンシーを用いることで火砕流の堆積範囲が把握可能であることを指摘している³⁾。位相情報を活用する場合も、事前の画像が不可欠である。これらのことから、実際の噴火時に、迅速に火山灰等の堆積範囲を把握するためには、国内の火山について、事前に ALOS 画像の集積を図ることが重要である。特に、すぐに比較可能な画像を取得できるようにするためには、国内の火山について、事前に様々なオフナディア角によって観測を行って、データをアーカイブしておくことが重要であると考えられる。

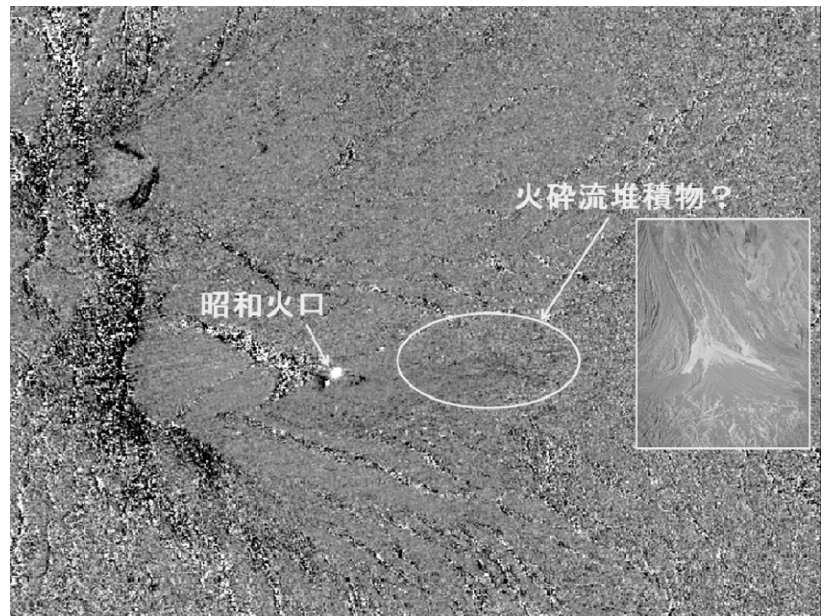


図5 昭和火口周辺における噴火前後の PALSAR の差分画像

参考文献

- 1) 田島靖久、山越隆雄、田村圭司、津根 明、鶴本慎治郎：桜島における 2008 年 2 月に発生した噴火の降灰分布について、日本火山学会講演予稿集 2008 年度秋季大会，p. 128
- 2) 国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室、(独) 土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム：人工衛星による流域の土砂環境把握と危険度評価手法に関する研究，「災害等に対応した人工衛星利用技術に関する研究総合報告書」国土交通省，平成 15 年 1 月，pp. 52-61.
- 3) 北川貞之、福井敬一、安藤忍：リモートセンシング技術を用いた火砕堆積物量の推定—桜島の事例—、日本火山学会講演予稿集 2008 年度秋季大会，p. 10