

細粒火砕物堆積斜面の粗粒化に伴う
地表安定化過程に関する研究

2021 年

小川 泰浩

Study on the stabilization process
of a coarse-grained slope surface mantled
with fine-grained pyroclastic material

2021

Yasuhiro OGAWA

目次

第1章 緒言	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究における火砕物の粗粒化の位置づけ	5
1.3 火砕物堆積斜面における表面侵食と植生回復に関する既往研究	7
1.4 既往研究の問題点と着想点	10
1.5 本研究の調査地	11
1.6 本研究の目的および構成	13
第2章 粗粒化に伴う火砕物の堆積構造と物理性変化	15
2.1 目的	15
2.2 試料採取地の概要	16
2.3 試験方法と調査方法	18
2.3.1 堆積構造	18
2.3.2 透水試験	19
2.3.3 粒度試験	20
2.4 結果と考察	21
2.4.1 火砕物の堆積構造	21
2.4.2 火砕物の粒径組成	24
2.4.3 火砕物の透水性	24
2.5 結論	25
第3章 火砕物の粗粒化過程	26
3.1 目的	26
3.2 試験地と試験方法	26
3.2.1 試験地の概要	26
3.2.2 細粒火砕物流亡試験方法	28
a. 現地調査方法	28
b. 試験方法	31

3.3	試験結果	31
3.3.1	細粒火砕物の流亡状況	31
3.3.2	細粒火砕物の流亡による降雨流出特性の変動	35
a.	地表流の変動	35
b.	土砂流出の変動	40
3.4	火砕物の粗粒化過程の考察	46
3.4.1	細粒火砕物の流亡	46
3.4.2	細粒火砕物の流亡に伴う火砕物の粗粒化が降雨流出に与える影響	47
3.5	結論	49
第4章	粗粒化が進む火砕物堆積斜面の 植生回復と土砂流出の変動	50
4.1	目的	50
4.2	試験地と調査方法	50
4.2.1	試験地の概要	50
4.2.2	試験地における緑化工の概要	53
4.2.3	植生調査方法	60
4.2.4	降雨流出観測方法	60
4.3	植生調査と降雨流出観測の結果	63
4.3.1	試験地の植生回復	63
4.3.2	植生回復に伴う土砂流出の変動	66
4.3.3	植生回復に伴う地表流の変動	70
4.4	植生回復が地表安定化に与える影響の考察	74
4.5	結論	77
第5章	細粒火砕物堆積斜面の粗粒化に伴う 地表安定化過程に関する総合考察	78
5.1	目的	78
5.2	火砕物の粗粒化に伴う地表安定化過程	78
5.3	粗粒化した火砕物の植生回復に伴う地表安定化過程	81

5.4 結論	89
第6章 細粒火砕物堆積斜面の地表安定化過程 に関する成果の利活用	90
6.1 目的	90
6.2 粗粒層を利用する地表安定化資材と地表安定化工法の提案	91
6.3 地表安定化資材を活用する点群緑化工法の課題と展開	97
第7章 総括	100
謝辞	106
引用文献	109
要旨	119
Summary	123
論文目録	128

第 1 章 緒言

1.1 研究の背景

日本は世界の活火山の約 1 割が集中する環太平洋火山帯に位置している。1 万年前までに国内で活動した記録のある火山（活火山）は 111 に達し（気象庁，2013），再噴火の可能性のある第 4 紀火山を含めると国内の総数は 456 に達する（産業技術総合研究所，2013）。

火山噴火後に発生する火山災害は火山活動に直接起因する 1 次災害と，火山活動の結果間接的に引き起こされる 2 次災害がある。1 次災害には噴火時の降灰，溶岩流，火砕流などがあり，2 次災害は山体崩壊による津波や降雨による土石流などの土砂災害の発生である。2 次災害のひとつである土砂災害の主な要因は，斜面に堆積した火山砕屑物であり，これが長期にわたり火山周辺の噴火荒廃地に影響を及ぼす。噴火荒廃地における治山や砂防の目的は，降雨で流出した火山砕屑物に起因する土砂災害を防止，軽減することである。

この火山砕屑物とは，爆発的噴火の際に火口から空中に噴出し，地上に破砕された状態で降下した火山岩の破片である（宇井，1997）。本研究では，これを火砕物と呼び，火砕物による土砂災害発生過程は次のように示される。火砕物が地表に堆積すると，山腹斜面の既存植生が埋没して地表が裸地化する。ここに降雨があると地表に出水（地表流と呼ぶ）が発生し，火砕物が流亡する。そして比較的小さい降雨強度でも溪流に集まった土砂が流動化して土石流が発生する（水山，1997）。

噴火で放出された火砕物は，風の影響を受けずに降下する粒子の大きな火砕物が山腹斜面の下位に堆積し，その上位に，空中で分級された小さい粒径の火砕物が，時間差で堆積する実態がある。本研究では，山腹斜面における火砕物の堆積実態によって火砕物を 2 つに区分した（図 1-1-1）。シルトよりも粒子が大きい火砕物（砂や礫）を粗粒火砕物とし，この粗粒火砕物の上位に堆積した砂よりも粒子が小さいシルトと粘土を細粒火砕物と定義した。本研究では 0.075 mm の粒径を細粒火砕物と粗粒火砕物の境界とした。

細粒火砕物の堆積実態は，以下に述べる噴火規模が比較的大きな活火山の現地調査から明らかになっている。大規模噴火と呼ばれるものは，1 回の火砕物総噴火量を体積で示すと「0.01～0.1 km³ で，やや大規模」，「0.1～1 km³ で，大規模」，「1 km³ 以上で，非常に大規模」となる（宇井，1997）。たとえば噴出物総量が 0.08 km³ 「やや大規模」であった有珠山 1977-78 年の噴火では，中央粒径が 0.06 mm で，地表の浸透能が 1～7 mm/hr (2.8 × 10⁻⁵ ～ 1.9 × 10⁻⁴ cm/s) の細粒火砕物が存在した（山本ら，1980）。噴出物総量が 2.5 km³

「非常に大規模」のセントヘレンズ山 1980 年の噴火では、地表に中央粒径が 0.02~0.06 mm (Collins and Dunne, 1986), 地表の浸透能が 1~11 mm/hr ($2.8 \times 10^{-5} \sim 3.1 \times 10^{-4}$ cm/s) の細粒火砕物が存在した (Collins and Dunne, 1988)。噴出物総量が 2.1 km³ 「非常に大規模」の桜島 1914 年の大正噴火では、地表に中央粒径が 0.03~0.08 mm, 地表の浸透能が 17 mm/hr (4.7×10^{-4} cm/s) の細粒火砕物が存在した (下川, 2011)。

このように粒子が細かく浸透能が低い状態で地表に位置する細粒火砕物は、火砕物の中でも最初に地表流によって表面侵食を受けると考えられる。これら細粒火砕物の表面侵食速度は、表 1-1-1 のとおり世界各地の活火山で調べられている。噴火終了から 2~5 年間の速度は、7~105 mm/yr であり (Swanson *et al.*, 1983 ; 下川・地頭菌, 1987), 三宅島の 2000 年噴火では 5 年間で 18~36 mm/yr であった (黒川・小川, 2010)。このように噴火後に地表に残存した火砕物の侵食速度は、2~30 度の草地や林地の速度 (0.01~0.1 mm/yr, 川口, 1951) に比べると非常に大きな値であることがわかる。

以上の調査結果は、細粒火砕物が新たに堆積し植生が失われた山腹斜面では、地表変動の激しい不安定な状態に変化することを示している。ところが表面侵食速度は、増加の一端ではなく、噴火終了直後から 1~2 年程度で低下し始めることが報告されている (Swanson *et al.*, 1983 ; 山本, 1984 ; Collins and Dunne, 1986)。すなわち火砕物に覆われた地表では、植生回復の前から表面侵食の減少が始まっている。植生回復の影響を受けずに表面侵食が不活発になる理由は、細粒火砕物の流亡とともに火砕物の粒径が粗くなる現象の関与が推定されている (Swanson *et al.*, 1983 ; Chinen and Rivière, 1989)。本研究では、この現象を「火砕物の粗粒化」と呼ぶ。

不安定な荒廃斜面の侵食速度を人為的な植物被覆によって早期に減少させる治山砂防技術のひとつに山腹緑化工がある。山腹緑化工のなかでも実播工は、初期生育が早く、種子の確保が容易な草本や木本を荒廃斜面に導入する工法で、高度成長期の国土開発に伴って発展したのり面の侵食防止技術を応用した治山砂防技術である (村井, 1997)。図 1-1-2 のとおり、この技術によって、のり面では緑化施工当年から草本植被率の増加に対応して侵食土砂量が大幅に減少し (岩川, 1976), 急速な植物被覆が地表の安定化に大きく寄与していることがわかる。この技術を応用した山腹緑化工により噴火荒廃地を早期に植生回復することは可能であるが、この工法は植物を活着させるために地表面や地形を改変する工法である。したがって、火砕物の粗粒化は、緑化工を行う前から火砕物堆積斜面において広域に見られる自然現象であるにもかかわらず、これまで注目されていなかった。

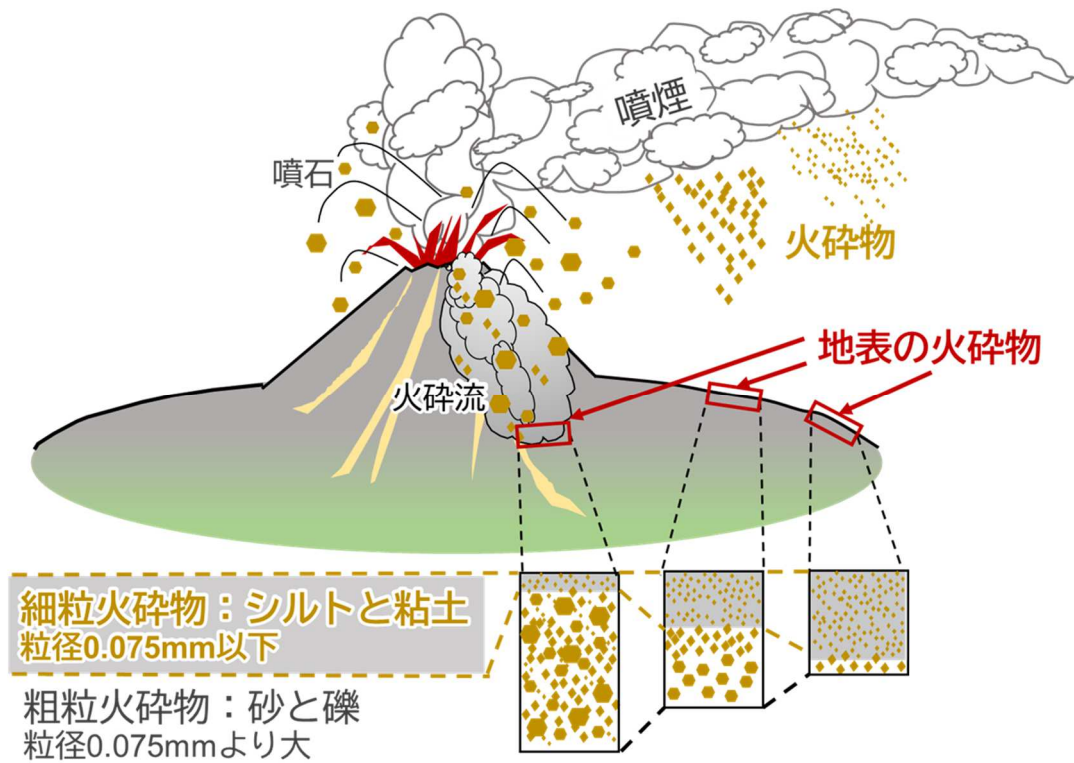


図 1-1-1 地表に降下堆積した細粒火砕物の模式図

注)細粒火砕物の厚さは相対的な比較であり、火口から離れるほど細粒火砕物が全層厚に占める割合が高くなることを示している。

表 1-1-1 噴火後の火山における表面侵食速度

火山名(国名)	火山碎屑物の種類	侵食形態	侵食速度(mm/年)	観測期間(年)	文献
パルクティン(メキシコ)	降下火砕物	布状, リル	55	4	Swanson et al. (1983)
イラズ(コスタリカ)	降下火砕物	布状, リル	50-80	1	Swanson et al. (1983)
バルカン(パプアニューギニア) 噴石丘		リル, ガリ	105	5	Swanson et al. (1983)
セントヘレンズ(アメリカ)	火砕サーージ, 降下火砕物	布状, リル	25	2	Swanson et al. (1983)
有珠山	降下火砕物	布状, リル	7-11	1.3	山本 (1984)
	降下火砕物	布状, リル, ガリ	54	1.3	山本 (1984)
桜島	降下火砕物	布状	12	3.5	下川・地頭園 (1987)
	降下火砕物	布状, リル	26.2	3.5	下川・地頭園 (1987)
	降下火砕物	布状, リル, ガリ	92.9	3.5	下川・地頭園 (1987)
三宅島	降下火砕物	布状	18-36	5	黒川・小川 (2010)

下川・地頭園(1987)に加筆

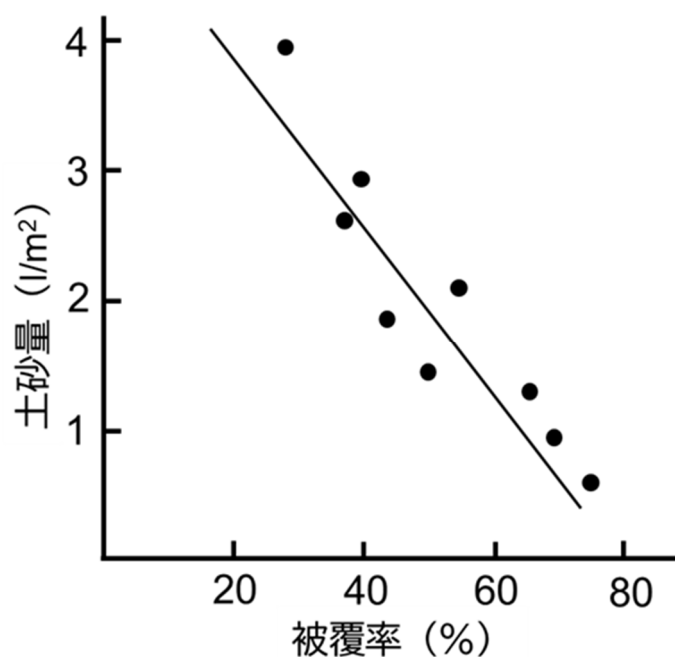


図 1-1-2 植生被覆率と侵食土砂量の関係(岩川, 1976)

1.2 本研究における火砕物の粗粒化の位置づけ

火山における土砂移動の起点は、山腹斜面やその下流に集水する溪流に堆積した火砕物である。図 1-2-1 に火山地域において雨水が関与する土砂移動現象と緑化工による植生回復の関係を示した。この図の通り土砂移動の発生場所や発生機構は多様である。溪流の火砕物に由来する土砂移動は、緑化工による植生回復では抑止できない。そこで、下流域に治山砂防施設を集中的に整備することによって、溪流で発生する 2 次災害である土砂災害を防止している。

これに対して火砕物堆積斜面の広域に発生する表面侵食は、山腹緑化工によって、抑えられる土砂移動である。噴火が終了しても立ち入りが困難な上流域の山腹斜面では、2 次災害を防ぐ緊急治山対策として緑化植物の種子や肥料などの資材を広域に空中散布する山腹緑化工によって、表面侵食の拡大が抑えられてきた。

これまで噴火荒廃地の山腹緑化工は、表面侵食によって火砕物の粗粒化が広範囲に進行している時期に行われていると考えられる。そのため、山腹斜面では、緑化植物の種子の一部が流亡する、もしくは定着した実生が流亡する、という表面侵食による攪乱を受けながら、緑化植物の生育によって植生回復していると推測される。よって、火砕物の粗粒化は、表面侵食から植生回復への移行を中継ぎする役割があると考えられる。すなわち、火

砕物の粗粒化は、地表の攪乱から安定に向かう途中の「つなぎ役」といえる。

以上より、温暖湿潤な気候に立地している日本列島の火山地域において、地表の粗粒化が持つ植生回復に関する重要な役割を解釈するためにも、これまで注目されていなかった火砕物の粗粒化過程を解明する必要がある。

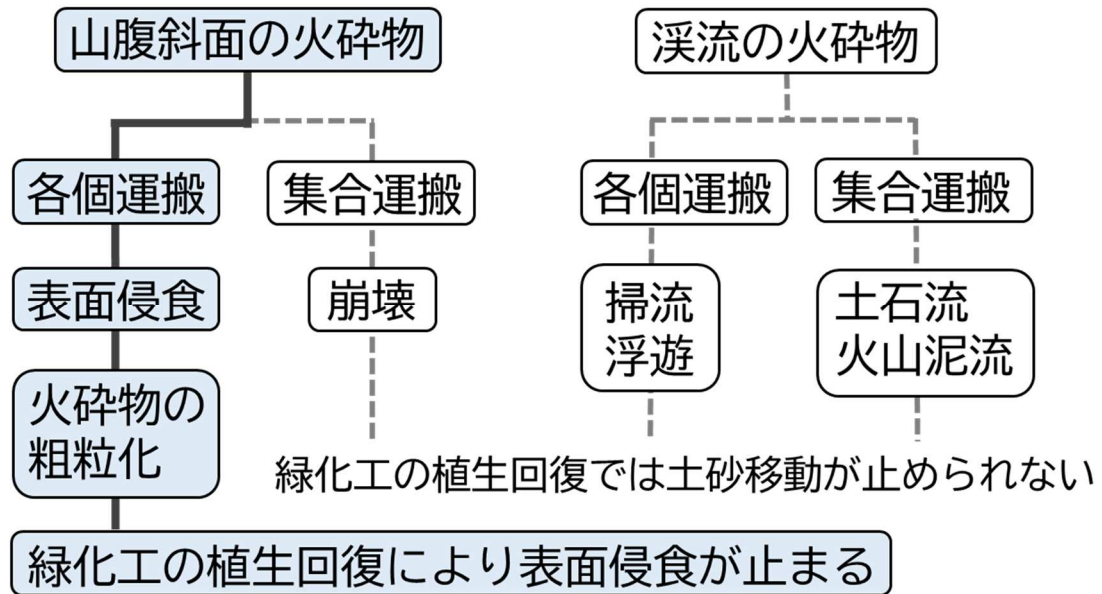


図 1-2-1 火山地域において雨水が関与する土砂移動形態と緑化工による植生回復の関係

1.3 火砕物堆積斜面における表面侵食と植生回復に関する既往研究

火砕物が堆積した山腹斜面において発生する表面侵食やそれに伴う土砂移動に関する既往研究は、以下の通り整理される。活火山の山腹斜面に火砕物が新たに堆積すると、降雨時に表面侵食が発生する (Kadomura *et al.*, 1983; 山本, 1984; Collins and Dunne, 1983; Collins and Dunne, 1986; 寺本ら, 2004; 黒川・小川, 2010)。表面侵食のひとつであるリル侵食が拡大したガリでは、さらに下刻が激しくなる (Waldron, 1967; Chinen and Kadomura, 1986; 下川・地頭菌, 1987; 山越ら, 2003)。このような表面侵食過程を経て、山腹斜面の下流に位置する溪流では土石流などの急激な土砂移動が発生する。

これまで地表に堆積した火砕物が流亡している時に見られる水文環境の変化は、噴火終了後の現地観測や現地採取試料による室内実験で検討されている。これまで現地では、有珠山・桜島・雲仙普賢岳・三宅島の噴火活動終了後に火砕物が堆積した斜面に流量観測施設を設置して、地表流出や土砂流出を観測している。裸地状態の時期に、地表流が比較的少ない降雨強度で発生し、降雨ピーク時に地表流のピークを迎える特徴がある (奥西, 1980; 山本・今川, 1983; 地頭菌・下川, 1989; 地頭菌ら, 1997; Yamakoshi *et al.*, 2005)。これらの現地観測結果から細粒火砕物が堆積した斜面では、現場で測定した地表の火砕物における単位時間・単位面積あたりの水の浸透強度 (浸透能と呼ぶ) が低下する現象を報告している (Kadomura *et al.*, 1983; 山本・今川, 1983; 下川・地頭菌, 1987; 竹下, 1987; Collins and Dunne, 1988; 地頭菌ら, 1996)。

室内実験では、細粒火砕物試料を使い噴火活動時の地表の浸透能低下メカニズムを推定している。桜島・雲仙普賢岳・三宅島における土石流発生溪流の山腹斜面の地表から火砕物試料を採取し、以下に示す 2 つの方法で実験が行われている。降雨時の斜面を再現するため、試験土槽に詰めた細粒火砕物に人工降雨を与えて実際の山腹斜面に発生する表面侵食を想定した実験 (降雨実験と呼ぶ) と、人工降雨を与えずに細粒火砕物の浸透能低下を検証する実験 (浸透実験とよぶ) が行われている。

降雨実験によって地表流が発生する限界降雨強度は、斜面傾斜や火砕物の厚さが増加するとともに急激に減少し (河原田・長, 1984)、表面流出の発生時間は降雨強度が強いほど早い (森脇ら, 1979) ことが明らかになった。浸透実験では、火砕物の厚さによらず、地表付近が飽和すると一定値 (最終浸透能) に達することが報告されている (小橋ら, 1994; Hendrayanto *et al.*, 1995)。そして、実験初期にみられる急激な浸透能低下は、地表付近の堆積構造の変化が原因であることが明らかになっている。堆積構造の現地観察で

は、地表の目詰まりが細粒火砕物の流亡で解消し、地表の浸透能が上昇する現象（浸透能の回復）が推定されている（西田ら，1996）。これらの現地観測や室内実験によって明らかにされた火砕物堆積斜面における細粒火砕物の流亡に関する模式図を図 1-3-1 に示す。

しかし、実際に細粒火砕物が流亡により地表の目詰まりが解消する実態は検証されていない。前述の室内実験では、細粒火砕物の浸透能の低下を定量的に示したが、実際の火砕物堆積斜面において細粒火砕物の流亡している時の地表の火砕物における浸透能の変化は、定量的に示されていない。

噴火荒廃地斜面では、不安定な状態で裸地化した火砕物堆積斜面を広範囲に植生回復させる治山砂防技術のひとつとして先駆植物を導入する山腹緑化工が採用されている。1.2 で述べたとおり斜面の表面侵食は、山腹緑化工によって抑えられている。国内の火山では、山腹緑化工のひとつである航空機から種子を空中散布する航空緑化工が 1979 年に有珠山で初めて行われ、施工後 3 ヶ月で緑化草本が短期間に定着した（伊藤ら，1984）。その後、三宅島、平成新山、桜島における噴火後の活火山で実施され、早期の植生回復を実現している（高橋，1985；長崎県・島原振興局，1998；寺本・下川，2009）。緑化された噴火砕物堆積斜面における表面侵食の実態は、平成新山において緑化 2 年目の侵食土砂量が裸地に比べて 6 分の 1 以下に減少し（西田ら，1998），2001 年に緑化された桜島の斜面でも早期に植生回復が進み、緑化 2 年目の侵食土砂量が前年に比べて約 9 割減少した（寺本・下川，2009）。これらの結果は、山腹緑化工による火砕物の急速な侵食防止効果を定量的に示している。

噴火終了後の火砕物堆積斜面に見られる植生回復は、上述の人為による緑化工とともに、自然回復が報告されている。火砕物の堆積で裸地化した環境に適応する先駆植物の侵入や生き残った根株から再生する（上條，2008；露崎，2008）。例えば 1977-1978 年ならびに 2000 年有珠山噴火後の植生回復は、厚さが 2 m 以内の火砕物で埋没した植物（オオイタドリ、アキタブキ、ドロノキ）の萌芽による再生が確認されていた（伊藤ら，1984；Tsuyuzaki, 1989；白井ら，1996；Adikari *et al.*, 2005）。これらの萌芽は、表面侵食に伴う埋没土壌の露出や、噴出物から貫通した多年生植物であり、1 年生植物よりも多年生草本の植生回復が先行した（Chinen and Revière, 1990）。

以上のとおり噴火で裸地化した火砕物堆積斜面の植生回復は、表 1-3-1 に整理すると、人為（緑化工）や自然による植生回復に分かれ、植生回復の様式や主な制限要因がそれぞれ異なる。自然回復よりも制限要因が少ない緑化工の進歩によって人為的に広範囲の植生

回復が可能になったが、種子や肥料など資材を投入し生育基盤を造成することが植生回復に求められる条件である。しがたって、緑化工の植物種は、おもに広範囲の表面侵食が防止可能で生育が早い外来種が主体となる。ところが近年、多くの火山が立地する国立公園の緑化工では、緊急時を除き生物多様性に配慮し、地域性種苗の使用が求められている（環境省，2015）。これに対して、植生の自然回復は、養分や水分が欠乏し生育基盤が不十分な火砕物において植物の生育が困難なため、上記の通り表面侵食により埋没土壌が露出した場所や火砕物の厚さが薄い場所に限られている。よって、2次災害防止に必要な広範囲の侵食防止を植生の自然回復だけに期待するのは限界がある。これまで広範囲に火砕物が堆積した山腹斜面では侵食防止効果が高い既存の緑化資材を利用する山腹緑化工が行われているが、近年こうした噴火により大規模攪乱を受けた荒廃地においても生物多様性に配慮した緑化資材を利用し植生の自然回復を促す緑化工が求められている。

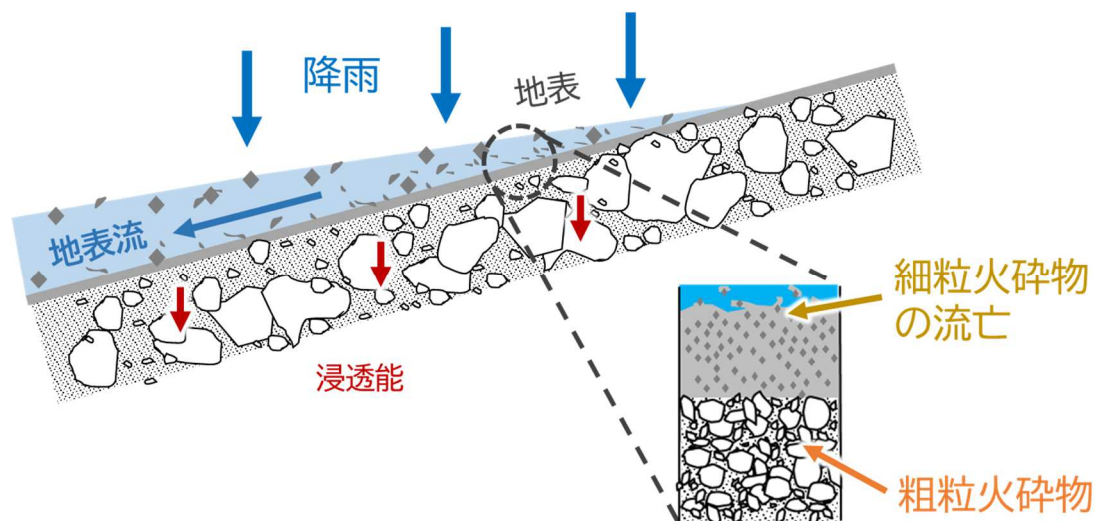


図 1-3-1 火砕物堆積斜面における細粒火砕物の流亡に関する模式図

表 1-3-1 火砕物堆積斜面における植生回復の様式と主な制限要因

	植生回復様式	植生回復の主な制限要因
自然の植生回復	埋没土壌の地下茎や埋土種子から再生、埋没した樹木の萌芽から再生	火砕物の厚さ、火砕物に窒素分がない
緑化工の植生回復	火砕物に散布された緑化植物の種子から発芽	表面侵食による種子や苗の流亡

1.4 既往研究の問題点と着想点

これまでの噴火荒廃斜面の表面侵食に影響を及ぼす火砕物の粗粒化に関する研究は、以下の多くの問題のため進んでいない。

噴火活動中や噴火終了後の山腹斜面では、降雨時の土石流や突発的な噴火活動による災害発生を回避するため、現地の立ち入りが規制される。こうした状況では、現地の調査や観測が制限される。規制期間も細粒火砕物の流亡に応じて、火砕物の粗粒化が広範囲に進行していると考えられるが、継続的な現場検証は困難となる。

既往研究のように噴火活動終了後に一定の時間が経過し、地表が既に粗粒化した現地調査や観測では、地表に堆積していた受食性の高い細粒火砕物がほとんど失われた環境を明らかにしているに過ぎない。したがって、既往研究では、受食性の高い細粒火砕物が堆積している地表の粗粒化過程が考慮されていないので、粗粒化する前の地表を再現し、降雨により実際に火砕物が粗粒化する過程を現地の水文観測と観察で明らかにする必要がある。

火砕物堆積斜面における植生の自然回復は、1.3 で述べたとおり火砕物で埋没した植物株が火砕物を通過し地上から再生している事例や、火砕物が表面侵食を受けて埋没した土壌の埋土種子や埋没株から再生している事例が報告されている。これらの報告によると火砕物の厚さが1~2 m以上の場所から植物が再生していない。そのため、埋没土壌に由来する植物の自然回復は、火砕物の厚さが一定以内の狭い範囲に限られ、火砕物による土壌の埋没深が、さらに大きい場所では、こうした自然回復が期待できない。これに対して、航空緑化工は、土壌が厚い火砕物によって広域に埋没した場所にも植生回復できると考えられる。しかし、火砕物堆積斜面において緑化植物の植生回復に伴う表面侵食の抑制効果が1.3のように報告されているにもかかわらず、緑化工と同じ時期に噴火荒廃斜面の広範囲にみられる火砕物の粗粒化を考慮した緑化植物による植生回復過程が明らかになっていない。

そこで、上記の問題を解決するため、次節1.5で述べる火砕物が厚く堆積した火砕物堆積斜面において、細粒火砕物が堆積した地表を再現し、火砕物の粗粒化過程を現場で検証する火砕物の流亡試験を着想した。はじめに、この試験によって火砕物が粗粒化する実態を解明する。次に火砕物が粗粒化した時期に実行された播種緑化工に伴う地表安定化過程を解明する。これらの結果から粗粒化した火砕物の影響を受けた緑化斜面の地表安定化過程を連続的に解釈できる成果が得られると考えた。そして、この成果に基づいて地域性種苗や自然回復を利用する植生回復手法の提案を行った。

1.5 本研究の調査地

研究対象とした火山は、長崎県島原半島に位置する普賢岳の山頂（標高 1359 m）から東に約 500 m 離れた火口から 1990 年に噴火した新たな最高峰（標高 1486 m）である。この峰は、のちに平成新山と名付けられた。噴火当時、火口から粘性の高い溶岩ドームが生まれ、ゆっくり拡大成長しながら山腹の急斜面にせり出すようになった。噴火翌年の 5 月から溶岩ドームの一部が斜面に崩落する火砕流（メラピ型火砕流）が断続的に発生し、噴火災害は約 4 年半に及んだ。図 1-5-1 のように崩落溶岩が熱雲と呼ばれる小規模火砕流（中田，1993）となって山腹斜面を流れ下った。爆発的に破碎された火砕物が流下の途中に谷を埋め、流域の地形が大きく変化した。石川ら（1996）によると山腹斜面に堆積した火山砕屑物は約 1 億 6 千万 m^3 となり、谷を埋めた火砕物の厚さは最大 150 m に達した。

一例として 1991 年 9 月に平成新山の東斜面に発生した火砕流の堆積物断面を図 1-5-2 に示した。火砕流本体堆積物は淘汰が悪く粗粒であるが、火砕物の最上部の地表に降下した細粒火砕物は淘汰が良い（藤井・中田，1993）。この細粒火砕物が本体堆積物の上に被覆すると透水性が低下する。この状態に降雨があると雨水は地下に浸透できず地表を流れ、地表流が溪流に集水し、土石流が多数発生した（安養寺，2004）。噴火活動が終了した 1 年後に溪流を除く山腹斜面では、航空緑化が実施された（長崎県・島原振興局，1998）。

日本各地の火山では、2011 年に発生した巨大地震の影響を受けた噴火の発生が指摘されており（鶴川，2013）、火砕物が不安定に堆積した噴火荒廃斜面の復旧が必要な事態が想定される。本研究の調査地とした平成新山は、20 世紀以降の日本の火山のなかでは、1914 年の桜島噴火、1929 年の北海道駒ヶ岳における噴火に次ぐ規模の総噴出量であり（井田，1996）、第 2 次世界大戦以降に噴火した国内の火山のなかで噴出量が最大である。この噴火活動終息後に行われた大規模緑化工（長崎県・島原振興局，1998）により山腹斜面の植生回復が広域に進行した。

よって、調査地に設定した平成新山の山腹斜面は、火砕物の粗粒化の影響を受けて表面侵食から植生回復に移行している環境である。本調査地は、細粒火砕物の流亡による火砕物の粗粒化過程とともに、粗粒化した火砕物における緑化工の植生回復に伴う地表安定化過程の現地検証が可能である。

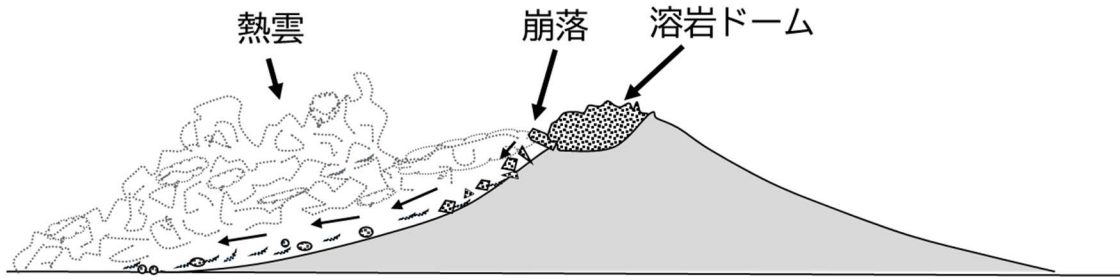


図 1-5-1 溶岩ドーム崩落タイプ(メラピ型)の火砕流

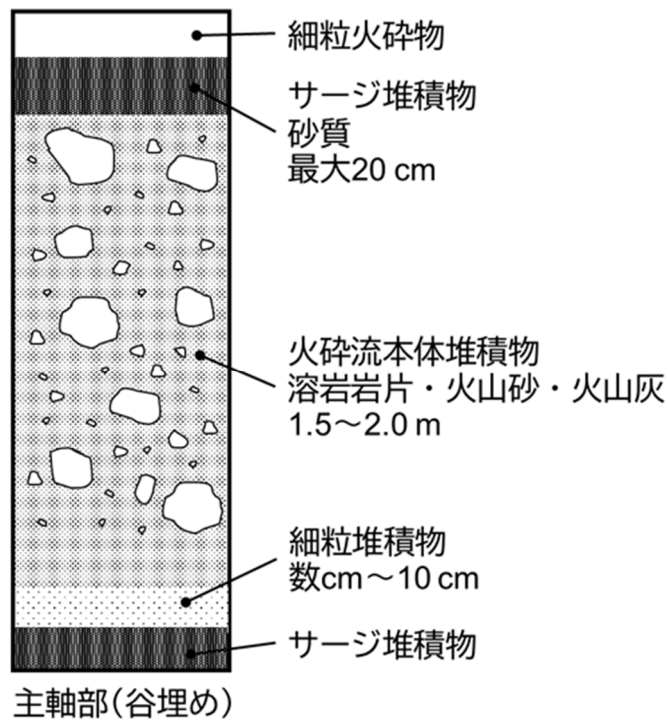


図 1-5-2 1991年9月15日に発生した火砕流の火砕流本体堆積物の模式断面図
(藤井・中田, 1993 に加筆)

1.6 本研究の目的および構成

噴火活動に伴い山腹斜面に被覆した細粒火砕物が流亡すると表面侵食が不活発となる原因は、1.1 で述べた細粒火砕物の流亡に伴う火砕物の粗粒化であると推定されている。火砕物の粗粒化は、噴火活動の影響で立ち入り調査が困難な時に進行するため、この推定の根拠となる火砕物の粗粒化過程は実証できていない。そこで、既に粗粒化して裸地状態となった火砕物堆積斜面に噴火活動時の新鮮な細粒火砕物を散布し、火砕物の粗粒化過程を追跡できる現地試験を設定した。

本研究では火砕物の粗粒化過程と、火砕物の粗粒化が緑化植物の植生回復に及ぼす影響の解明を目的として次の3項目に関する現地調査と現地観測を行う。

- 火砕物の堆積構造と物理性変化
- 粗粒化が進む斜面における土砂流出の変動
- 粗粒化が進む斜面における緑化工による植生回復に伴う土砂流出の変動

さらに、上記の結果に基づいて火砕物の粗粒化を生かした新たな緑化資材を提示する。そして、これまで噴火荒廃地に主に行われてきた外来種の種子を散布する緑化工に代わり、新たな資材を活用する緑化手法を提案する。

本研究の構成は、7章で構成されている。本研究は、図1-6-1に示した研究の流れにしたがって実行する。本章では、これまで火砕物堆積斜面の粗粒化や植生回復に伴う地表安定化に関する研究の背景と研究目的を示した。

第2章からは、細粒火砕物の流亡に伴う地表の安定化過程と粗粒化した火砕物における植生回復過程に関する調査を行う。

第2章では、火砕物の堆積構造と物理性変化を把握する。最初に平成新山の南東斜面で裸地化した火砕物堆積物斜面の調査地において、すでに粗粒化した地表の火砕物から試料を採取し、この試料の土壌薄片を作製して微細な堆積構造を把握した。次に採取試料の透水試験と粒度分析おこない火砕物の堆積状況に応じた透水性と粒径組成の変化を明らかにする。

第3章では、第2章と同じ場所の粗粒化した火砕物堆積斜面に小流域試験地を設定した。噴火活動時の地表から採取した細粒火砕物をあらかじめ小流域試験地に被覆し、その流亡状況を再現する野外試験を行った。試験斜面で火砕物の流亡状況を観察し、火砕物の粗粒化に伴う地表流や土砂流出が変動する過程を明らかにする。

第4章では、粗粒化した火砕物堆積斜面において植生回復に伴う地表の安定化過程を検

討する。平成新山の南東斜面において緑化工で植生回復した火砕流堆積物斜面に小流域試験地を設定した。植物が地表を被覆した結果、小流域試験地の地表流や土砂流出が変動する過程を降雨流出観測と植生調査によって明らかにする。

第5章では、これまでの結果を火砕物堆積斜面の地表安定化過程にまとめて総合考察する。火砕物の粗粒化と緑化工による植生回復に伴う地表の安定化を連続的な地表安定化過程として解釈した。

第6章では、本研究成果の利活用を検討する。最初に細粒火砕物の流亡によって粗粒化した火砕物を生かした新たな緑化資材を提示する。次にこれまで噴火荒廃地に主に行われてきた外来種の種子を散布する航空緑化工に代わり新たな資材を活用する緑化工法を提案し、見出された課題を検討する。そして、最後に火砕物の粗粒化で生まれた粗粒火砕物を利用し、植生回復に活用する地表安定化工法の展開について述べる。

第7章では第2章から第6章を総括する。火砕物の粗粒化が表面侵食と植生回復を中継ぎする役割をとりまとめる。

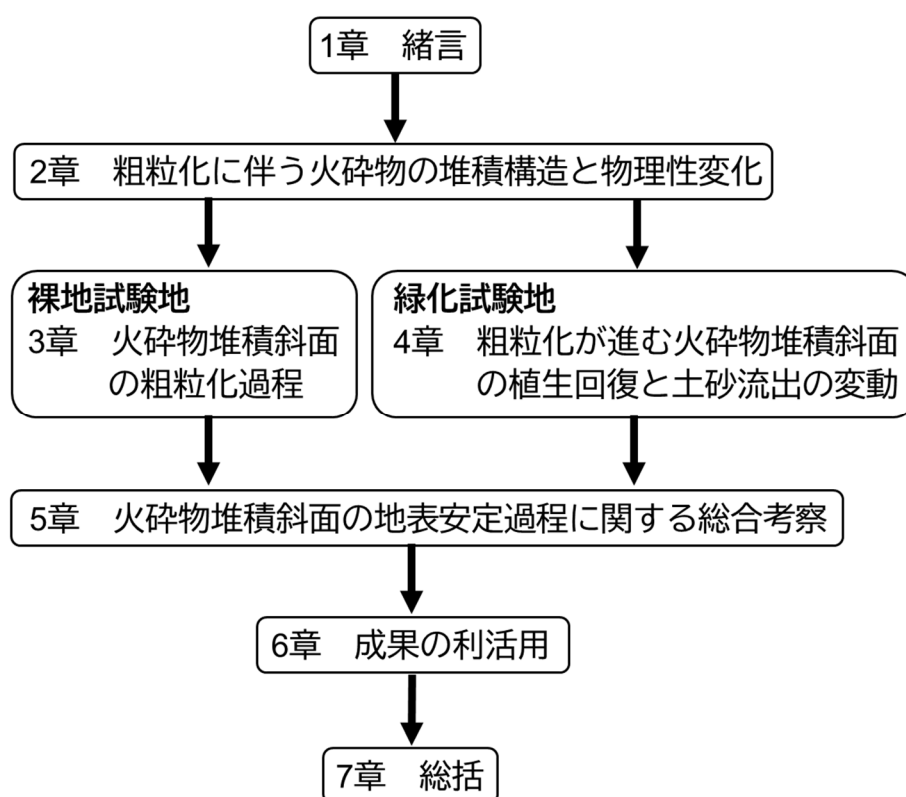


図 1-6-1 本研究の流れ

第2章 粗粒化に伴う火砕物の堆積構造と物理性変化

2.1 目的

本章では、噴火活動中に細粒火砕物が堆積していた地表において、降雨で急激に粗粒化した火砕物の堆積構造と物理性変化を明らかにすることを目的とする。細粒火砕物が降雨で流亡し、地表の火砕物が粗粒化したと推定される時期は、図 2-1-1 に示した平成新山における降水量と流出土砂量の年変動から、火砕流発生 3 年目（1993 年）以降に開始したと考えられる。特に 3 年目の降水量（気象庁雲仙岳測候所 4,773 mm）が平年値（2,899.4 mm）よりも 1.6 倍を記録する多雨年であった。

地表の透水性に関与する堆積構造の解明には、恩田・山本（1998）や三浦ら（1999）によるヒノキ林地における先行研究がある。これらの研究によって、土壌薄片による微細形態学的解析手法で、ヒノキ林地に堆積したリターの消失に伴う土壌の堆積構造や孔隙形態の変化を把握できることが示されている。火砕物の物理性の調査項目は 2 つあり、1 つ目は地表の細粒火砕物が流亡する前に透水性と、流亡した後の透水性の変動を飽和透水試験で検討する。2 つ目は流亡前の地表状態（細粒火砕物あり）と流亡後の地表状態（細粒火砕物なし）の粒径組成の変化を粒度試験で検討する。そして、物理的意味の明確な飽和透水係数による火砕物の透水性ならびに微細形態学的手法を適用した堆積形態の調査結果から、物理性変化に関与する火砕物の堆積構造を考察する。

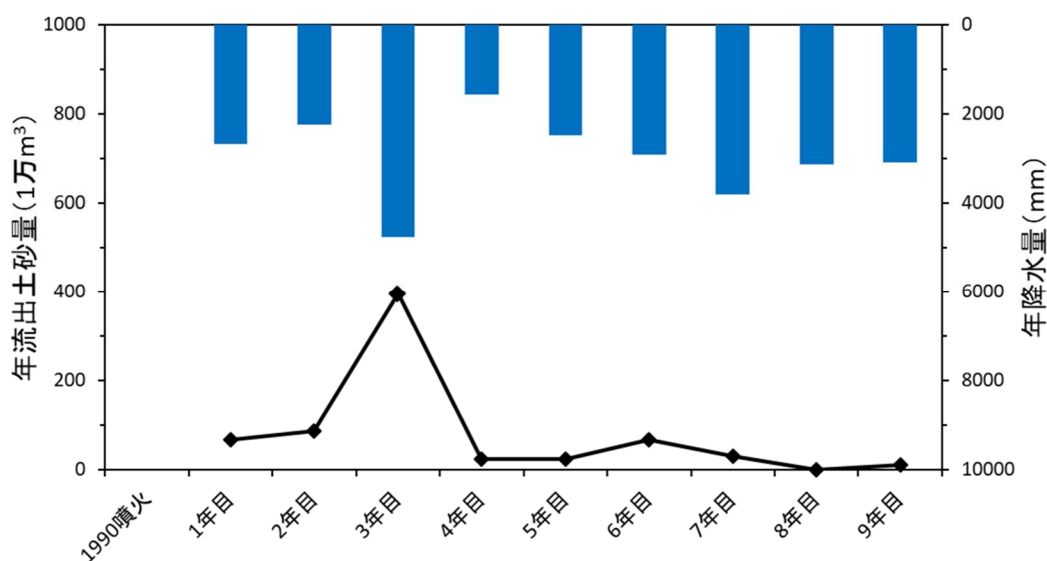


図 2-1-1 平成新山における火砕流発生 1 年目からの降水量と流出土砂量の年変化
(安養寺, 2004 より作図)

2.2 試料採取地の概要

試料採取地は平成新山における 2 か所の火砕流堆積斜面である (図 2-2-1)。地表の火砕物が粗粒化する前の火砕流堆積斜面における試料採取は、噴火活動中の火砕流発生による立ち入り禁止のため実行できなかった。よって、粗粒化前の地表にあった細粒火砕物は、火砕流による人的危険がない溶岩ドームから南へ約 2 km 離れた岩床山付近 (標高 690 m) の赤松谷 A で 1993 年に攪乱状態で採取し (図 2-2-1 の★)、風乾状態で室内に保管していたものを使用した。これを次節の作製方法にしがたって、噴火当時の細粒火砕物の堆積状況を再現した火砕物試料を作製した。

赤松谷 B は、普賢岳溶岩ドームから 2 km 南東に位置する赤松谷流域の裸地 (北緯 32° 44', 東経 130° 19', 標高 335 m, 斜面傾斜 8 度) であり、地表は火砕物が粗粒化していた (図 2-2-2)。この地表から粒度試験用、飽和透水試験用 (図 2-2-2)、土壌薄片用の試料を 1998 年にそれぞれ採取した。粗粒化した火砕物の上位には、厚さが約 0.5~2 cm の火砕物層が見られ、それより下位の火砕物と比べて細粒土砂を欠き、直径が最大数 cm の礫が観察された。本研究では、上位に見られる礫が目立つ火砕物層を「粗粒層」と呼び、細粒火砕物が失われた粗粒層を含む地表の火砕物を粗粒火砕物と呼ぶ。赤松谷 B の採取地の上流と左岸が、幅、深さともに約 10 m のガリで分断されていた (図 2-2-2 上)。ここでは緑化する 1 年前 (1995 年 3 月) には、すでにガリで分断されていることが、空中写真判読で確認されている。そのため、山腹緑化工で使用した植物種子が上流から地表流とともに流れ込まない裸地斜面である。赤松谷 B の地表は、噴火が終了した 1995 年以降、緑化や土石流埋没の影響を受けずに、粗粒火砕物を維持した状態であった。

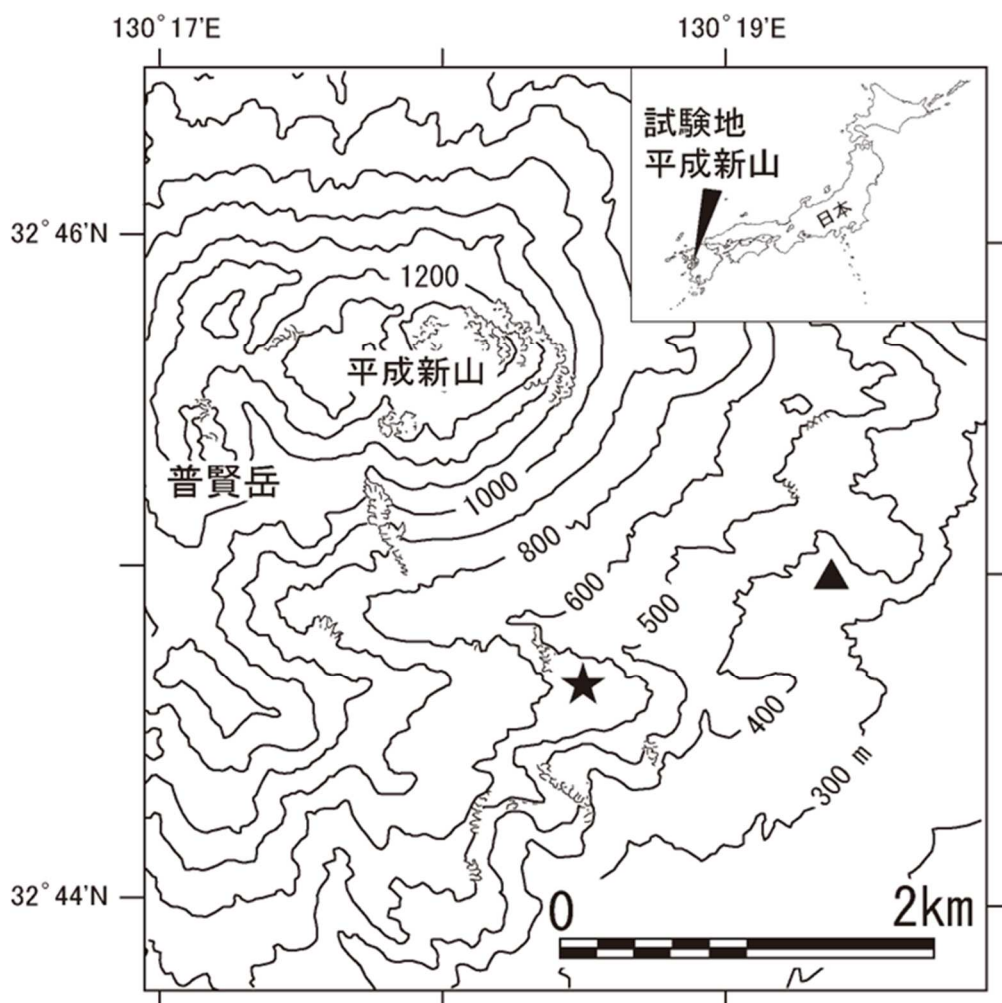


図 2-2-1 試料採取地の位置 ★:赤松谷 A, ▲:赤松谷 B

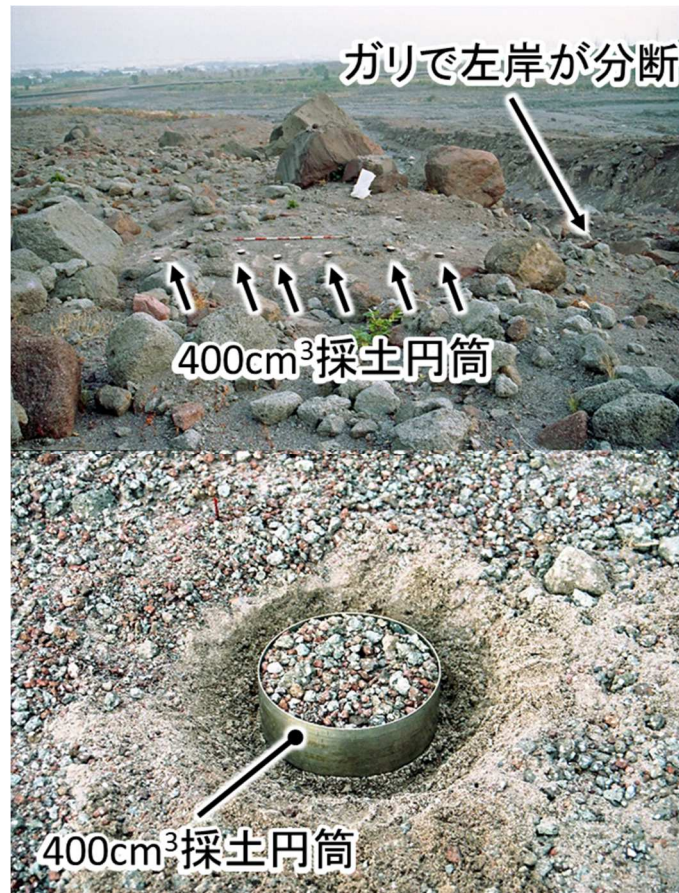


図 2-2-2 飽和透水試験用の試料採取状況

上:上流から見た採取地と周辺の地形, 下:粗粒化した火砕物の採取状況

2.3 試験方法と調査方法

2.3.1 堆積構造

火砕流堆積地表面層の堆積構造を詳細に把握するため、試料採取地である赤松谷 B より円筒試料を採取し土壌薄片により土壌微細形態を観察した。

サンプル缶（直径 12 cm，高さ 9 cm）で採取した不攪乱試料から粗粒火砕物の土壌薄片を作製した。この缶は、図 2-2-2 の容積 400 cm³ 芝本式採土円筒（高さ 4 cm）よりも長いので、採取時間は掛かるが粗粒化した火砕物の堆積構造が壊れにくい利点がある。1 つのサンプル缶から次の①～⑤の工程を経て垂直断面と水平断面の土壌薄片を作成した。①試料採取地の円筒試料を真空凍結乾燥機（米国ラブコンコ社製，LL-18）によりマイナス 10 度で 2 日間乾燥させる。②乾燥試料に不飽和ポリエステル樹脂を浸潤させた後、恒温乾燥機で浸潤試料を 45 度前後でゆっくり加熱固化させる。③固化試料をダイヤモンドカッタ

一で切断してブロック状の試料片を作り、試料片の接着面をガラス板上にて水で溶いた研磨剤で平滑にした後、エポキシ系接着剤でスライドガラスに張り付ける。④スライドガラスに張り付けた試料片を土壤薄片研磨機（株式会社マルトー製、プレパラップステップオート、MG-315）で厚さ 0.1 mm 程度まで研磨する。⑤顕微鏡観察するため試料片の厚さを 0.05 mm 程度まで、試料片をガラス板上にて水で溶いた研磨剤で仕上げ研磨する。

本研究では①の試料の乾燥工程で有機物を含む試料の乾燥に適した真空凍結乾燥法を採用した。平山（1991）は真空凍結乾燥する利点として、乾燥時の試料収縮が風乾より少なく、一度に大量の試料を乾燥でき、試料の取り扱いに手間がかからない、などを挙げている。

土壤薄片で観察された孔隙の形態や面積を把握するため、上記工程により作製された土壤薄片の垂直断面と水平断面に対してカラーコピー機で縦横方向に 4 倍拡大し、孔隙部分を 1 mm 方眼トレース紙に写し取ったメッシュの数を合計した。この方眼紙で分割されたメッシュの実寸は一辺 0.25 mm となる。計測対象とした孔隙の大きさは田淵（1963）にしたがい直径 0.1 mm 以上とした。拡大しても孔隙判定が困難な部分は、実体顕微鏡で土壤薄片を詳細に観察した。

2.3.2 透水試験

図 2-2-2 に示した赤松谷 B の試料採取地から 6 個の芝本式採土円筒（直径 11.3 cm、高さ 4 cm、容積 400 cm³）で採取した試料の定水位飽和透水試験を行い粗粒火砕物の透水性を把握した。粗粒層の飽和透水試験は、厚さが 1 cm の試料 3 個で行った。

次に細粒火砕物が地表に堆積していた噴火当時の火砕流堆積斜面における透水性を推定するため、円筒試料 6 個のうちの 3 個を上記の飽和透水試験終了後に採土円筒の底から半分（2 cm）の高さまで不攪乱状態の火砕物を取り外し、その上部に赤松谷 A の細粒火砕物を 2 cm 被覆した試料を作り、これらの飽和透水試験を赤松谷 B の試料と同様に行った。以下、これらの試料を細粒火砕物試料と呼ぶ。これは、0.42 mm フルイに入れた細粒火砕物を 1 m の高さから採土円筒へ自然落下で詰める方法で作製した試料である（図 2-3-1）。この試料の飽和透水係数は、2 cm の細粒火砕物層とその直下の砂礫層の互いに異なる飽和透水係数が関与する。そこで、以下で述べる方法で細粒火砕物層の飽和透水係数を推定した。細粒火砕物層の飽和透水係数を K_A 、この直下の土層の飽和透水係数を K_G 、土層全体の飽和透水係数を K_T で表すと、この 2 層を含む土層の飽和透水係数は次の関係式で表される（駒村，1999）。

$$L_T / K_T = (L_A / K_A) + (L_G / K_G) \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで、 L_T は土層全体の厚さ(cm) , L_A は細粒火砕物層の厚さ(cm) , L_G は細粒火砕物層直下の土層の厚さ(cm)である。

さらに、2.1 式を K_A で整理すると細粒火砕物層の飽和透水係数(cm/s)は 2.2 式となる。

$$K_A = (K_G \cdot K_T \cdot L_A) / (K_G \cdot L_T - K_T \cdot L_G) \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

この式で計算した K_A から細粒火砕物試料の飽和透水係数を推定した。

なお、細粒火砕物層の飽和透水係数の推定と同様に、実測から得た粗粒層と粗粒火砕物の飽和透水係数から、粗粒層の下位に位置する粗粒火砕物(2.4.1の火山砂礫層)の飽和透水係数は、2.2 式に粗粒層の平均的な厚さ (L_G) を 1 cm として推定した。

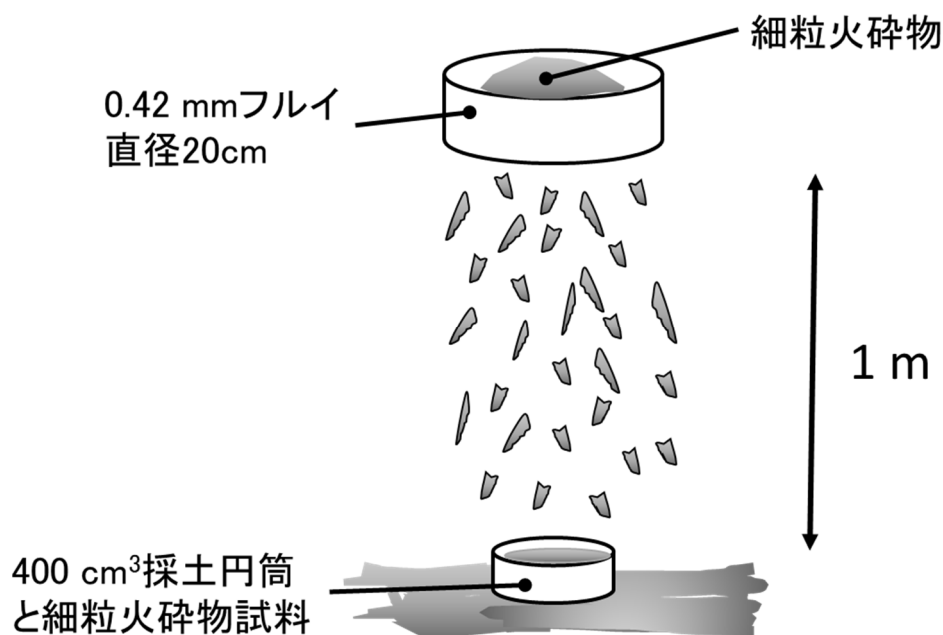


図 2-3-1 採土円筒への細粒火砕物充填方法(採土円筒の直径 11.3 cm, 高さ 4 cm)

2.3.3 粒度試験

赤松谷 B の地表から採取した試料は、容積 400 cm³ の採土円筒の高さに合わせて地表から深さ 4 cm までの粗粒火砕物である。不攪乱試料は飽和透水試験終了後に採土円筒を絶

乾させてから、JIS 試験用フルイに残留した土砂の重量を測定した。円筒採取試料は、粗粒層を含む粗粒火砕物、粗粒層、粗粒層直下の火砕物（後述の火山砂礫層）である。粒度試験は 0.85 mm 以下の粒径とそれ以上の粒径に分けて行った。はじめに 0.85 mm 以上の試料をフルイ振とう機でふるい分け、次に 0.85 mm フルイを通過した残留試料に対してレーザー式粒度分析装置（英国マルバーン社製、マスターサイザーS）で分析した。

2.4 結果と考察

2.4.1 火砕物の堆積構造

赤松谷 B における垂直断面と水平断面の土壤薄片を図 2-4-1 に(a)と(b)で示した。断面全体の顕微鏡観察では、垂直断面に直径 0.1~2.6 mm の孔隙が分布し、水平断面に直径 0.1~1.8 mm の孔隙が分布していた。竹下（1996）は、孔隙径が 0.06~0.6 mm を中孔隙、0.6~3 mm を大孔隙と区分している。土壤薄片で観察できる 0.1 mm 以上の孔隙に対して、この区分にしたがうと火砕物は、主に大孔隙が分布していることが明らかになった。垂直断面の顕微鏡観察では、現地観察と同様に火砕物の粒径が比較的粗い礫を中心とする礫層（前述の粗粒層）が確認できた（図 2-4-1 の C）。粗粒層は、どちらの断面にも細粒火砕物による目詰まりは見られず多孔質であった。粗粒層の孔隙形態は、直径 1~2 mm の連続した孔隙（以下、パッキング孔隙（三浦，1989）と呼ぶ）が分布し、垂直断面と水平断面のどちらにもパッキング孔隙が分布していた。この層より下部の火砕物は、パッキング孔隙が砂礫層よりも少なく直径 1 mm 程度の独立した孔隙が見られた。本研究では、粗粒層の直下にある堆積構造が粗粒層と異なる粗粒火砕物層を火山砂礫層と呼ぶ（図 2-4-1 の D）。堆積構造の観察によって地表の粗粒火砕物は、2 層構造であることが明らかになった。この粗粒層は直下の火山砂礫層よりも粗い礫が主体であるため、粗粒層の受食性は火山砂礫層の土砂よりも低いと考えられる。

表 2-4-1 に赤松谷 B の土壤薄片の孔隙率を示した。孔隙率はプレパラートの面積（縦断面、8 cm²、横断面 4.1 cm²）で得た孔隙率を 1 cm² 当りに換算した値である。垂直断面と水平断面はそれぞれ 15.8 %、16 %となり、16 %程度が 0.1 mm 以上の孔隙で占められていた。赤松谷 B で採取した同じ時期に、平成新山周辺の林地における細粒火砕物の直下に埋没していた森林土壌における土壤薄片の平均孔隙率が、垂直断面が 20 %、水平断面が 24 %であった（小川ら，2006）。赤松谷 B の値は、森林土壌と比べると低いが、極端に低い値ではなかった。

表 2-4-1 赤松谷 B の粒径組成, 飽和透水係数, 孔隙率

採取試料名	粒径組成(%)							飽和透水係数(cm/s)			孔隙率*** (%)	
	粘土 0.005mm以下	シルト 0.005-0.075mm	砂 0.075-2mm	細礫 2-4.75mm	中礫 4.75-19mm	粗礫 19-75mm	K_T	K_A^{**}	垂直断面	水平断面	K_A^{***}	
細粒火砕物*	10.50	63.14	26.36	0	0	0	ND	ND	ND	ND	ND	
粗粒火砕物	0.73	3.78	51.04	22.69	18.93	2.83	5.38×10^{-3}	ND	15.8	16.0	16.0	
粗粒層	0.13	0.63	13.15	14.08	60.04	11.97	3.40×10^{-2}	ND	ND	ND	ND	
火山砂礫層	1.01	9.22	56.51	15.47	17.79	0.00	5.38×10^{-3}	4.20×10^{-3}	ND	ND	ND	
細粒火砕物試料	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3.30×10^{-4}	1.70×10^{-4}	ND	ND	ND	

ND: 測定データなし。

*: 細粒火砕物の流亡試験で供試した赤松谷Aの1993年細粒火砕物。

** : 細粒火砕物試料と火山砂礫層の透水係数 K_A は2.2式より求めた。

***: 孔隙は0.1mm以上を測定した1cm²当たりの孔隙割合。

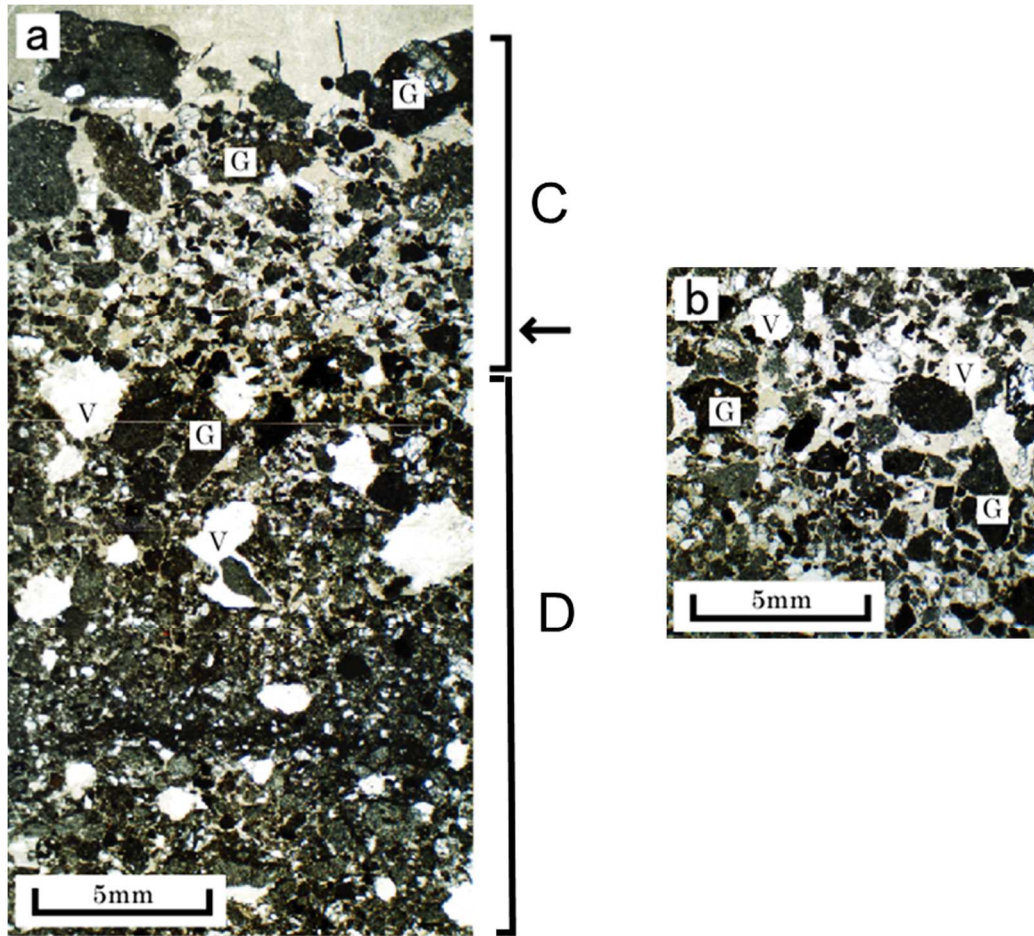


図 2-4-1 火砕物の土壌薄片による顕微鏡写真
 a:垂直断面, b:水平断面, C:粗粒層, D:火山砂礫層,
 G:礫, V:孔隙, ←:水平断面切断位置, スケール 5 mm

2.4.2 火砕物の粒径組成

表 2-4-1 に噴火当時の細粒火砕物と噴火終了後の粗粒火砕物（粗粒層と火山砂礫層で構成）の粒径組成を示した。その結果、噴火当時の地表に堆積していた細粒火砕物の粒径組成は、礫が含まれていなかった。シルトが 63 %で、粘土も含めると 74 %となり、砂よりも細粒分の割合が高かった。これに対して、粗粒層は、粘土やシルトがほとんど含まれておらず（0.8 %）、粒径 4.75 mm 以上の粗い土砂（中礫以上）が 70 %以上を占めていた。粗粒火砕物の土砂は、砂よりも粗い礫が粗粒層に集中していた。粗粒層の直下にある火山砂礫層は、砂が全体の 57 %を占めていた。粗粒火砕物にある砂は、火山砂礫層に集中していた。したがって、粗粒堆積物を構成する主な土砂の粒径は、粗粒層が礫であり、火山砂礫層が砂であることが明らかになった。

粗粒火砕物における上位の粗粒層と下位の火山砂礫層における粒径の違いは、細粒火砕物が地表流で流亡する時に、粗い礫が取り残されて粗粒層が形成された実態を反映していると推察された。細粒火砕物の流亡に関する推察は第 3 章で現地検証する。

2.4.3 火砕物の透水性

表 2-4-1 に細粒火砕物を粗粒火砕物に被覆した試料（細粒火砕物試料）の飽和透水係数を示した。細粒火砕物試料の透水係数（ K_A ）は、被覆前の状態である粗粒火砕物試料よりも低下し、この透水係数は 1.70×10^{-4} cm/s となった。1 時間あたりの換算値は 6 mm/h となるので、細粒火砕物を有する地表では容易に地表流が発生すると推測された。細粒火砕物試料の透水性は、平野ら（1996）が示した土石流が活発な時期の火砕流発生 1 年目の 1991 年から 1993 年の土石流発生時 1 時間雨量下限値（5 mm/h）とほぼ同じ値であった。

よって、細粒火砕物が地表に被覆すると表層の透水性が低下し、土石流が頻発した噴火活動中と同様に地表流が発生しやすい地表に変化する実態が示唆された。西田・水山（1998）は、噴火活動が終了して 1 年経過し、火砕物堆積斜面の溶岩塊のそばの狭い範囲に流亡せずに残留していた厚さ 2~5 cm の細粒火砕物の透水係数が、 1.0×10^{-4} ~ 1.0×10^{-3} cm/s であった。本研究の細粒火砕物試料の透水性は、西田・水山（1998）と同じ範囲であり、噴火当時の地表に堆積していた細粒火砕物の透水性を再現していると考えられた。

小橋ら（1994）や Hendrayanto *et al.*,（1995）は、細粒火砕物の厚さに係わらず、地表付近の飽和で透水性が低下することを室内実験で確認している。本研究の透水試験も同様に、地表付近の細粒火砕物層の飽和によって地表流が容易に発生することが推察された。

前節の堆積構造観察と本節の透水試験の結果によって、次の物理性変化が明らかになっ

た。斜面の上位に堆積した粘土やシルトを中心とした細粒火砕物による目詰まり作用が働き、火砕物の透水性が大幅に低下した（表 2-4-1 の細粒火砕物試料 K_A ）。この細粒火砕物が地表流で流亡する際に、孔隙に富む火砕物が粗粒層と火山砂礫層に（図 2-4-1 の C と D）に分離した結果、粗粒火砕物の透水係数が細粒火砕物試料の透水係数と比べて上昇したと推察された（表 2-4-1 の粗粒火砕物 K_T ）。特に粗粒火砕物の上位に占める粗粒層の透水係数は 3.40×10^{-2} cm/s であり、これが粗粒火砕物の透水係数の上昇に寄与していると推察された（表 2-4-1 の粗粒層 K_T ）

本章では、火砕物の堆積構造が 2 層に分かれている要因を、細粒火砕物の流亡によって、細粒火砕物堆積の目詰まり構造がパッキング孔隙に富む堆積構造に変化したことによると推察した。しかし、実際の降雨で発生した地表流で細粒火砕物が流亡する実態は不明である。火砕物の粗粒化過程に関与している細粒火砕物の流亡実態については次章で検証する。

2.5 結論

噴火時の地表に細粒火砕物が堆積した状態を再現した火砕物と、細粒火砕物が流亡し地表が粗粒化した火砕物の試料から、堆積構造解析と土壌物理試験（粒度試験、透水試験）を行った。これらの結果から、火砕物堆積斜面の上位に位置する細粒火砕物の流亡が堆積構造や物理性に与える影響を考察した。以下が得られた結論である。

- ・ 火砕物の上位に降下堆積した細粒火砕物は、構成粒子がシルトと粘土で、透水性が低いいため、地表流とともに流亡しやすい性質であると推察した。
- ・ 粗粒火砕物の上位に存在する粗粒層は、その直下の火山砂礫層よりも細粒土砂を欠いた粒径組成であることから、降雨で発生した地表流で地表の細粒火砕物が流亡した結果、粗粒層に特有の多孔質な堆積構造が形成されたと推察した。
- ・ 火砕物の透水試験や堆積構造解析によって、火砕物の透水性の変動は、地表に堆積していた細粒火砕物の流亡に伴って火砕物の堆積構造が多孔質に変化したことに起因している。

第3章 火砕物の粗粒化過程

3.1 目的

噴火活動中の溪流における急激な土砂流出（土石流，火山泥流）の発生は，新規に堆積した細粒火砕物が関与していることを奥西（1980）が，焼岳の噴火後における現地観測に基づき日本で初めて報告した。この報告と同じ時期に始まった細粒火砕物の侵食に関する定量的研究（森脇ら，1979；河原田・長，1984；諏訪ら，1989）によって，火山地域の噴火活動に伴う水文環境の変化過程は，①細粒火砕物に覆われた地表に雨が降ると，雨滴の突き固め作用で地表が目詰まりを起こして水浸透量が減少し，②豪雨時に地下への浸透経路が絶たれた雨水が地表流に形態をかえて増加し，③この地表流が山腹斜面から谷に集まる際に侵食した火砕物を取り込みながら急激に流量が増大し，溪流で巨礫を動かす土石流に発達する，という土砂流出過程が明らかになっている。

しかし，上述の既往研究では，土石流のような急激な土砂流出の引き金は，地表流による細粒火砕物の流亡が影響していると推定されるが，細粒火砕物の流亡実態は，これまで検証できていない。また，細粒火砕物の流亡が進むと地表流が減少することが報告されている（山本・今川，1983）が，細粒火砕物の流亡とともに変動すると考えられる地表流の実態も現地で検証されていない。

そこで，本章では噴火当時に見られた火砕物が粗粒化する前の地被状態を新しい細粒火砕物の散布により再現し，水文観測や野外試験によって，2章で推察にとどまっていた火砕物の流亡や地表流の変動に応じた火砕物の粗粒化過程を明らかにすることを目的とした。そして，火砕物の流亡に伴う地表の粗粒化が，地表流の流出や土砂流出に与える影響を考察した。

3.2 試験地と試験方法

3.2.1 試験地の概要

試験地の位置は，第2章の試料採取地と同じ赤松谷 B で，試験地は溶岩ドームより南東 2.6 km の斜面（北緯 32 度 44 分 56 秒，東経 130 度 19 分 26 秒）である。平成新山の南東斜面で，高温火砕流の通過で植生が完全に焼失し埋没した火砕流堆積地である。そのなかで山腹緑化工が行われなかった裸地とした（図 3-2-1 の▲，図 3-2-2）。

赤松台 B の標高は 335～339 m，集水面積は 220 m² であり，斜面傾斜は上部が 10 度で

下部が4度であった(図3-2-3)。赤松谷B上流端の流域界(図3-2-3の丸点線)の上流端は、深さ約10mのガリで分断されていた。そのため、上流から流域界を超えて水や土石流が全く流入しない小流域となっている(図3-2-2のB)。なお試験中に上流端のガリ壁面の崩落による流域面積の変化はなかった。設定当時の調査地には主に高さ数十センチのイタドリが点在し(図3-2-2のA)、地表には直径数mmから数cmの礫が堆積していた(図3-2-2のCとD)。この礫層は第2章で述べた粗粒層である。

赤松台B周辺の火砕流堆積物の厚さは10~20mで(石川ら, 1996)、この堆積物がかつての谷地形を埋めて、地表には最大直径6mの溶岩塊が残留している(図3-2-2のAとB)。

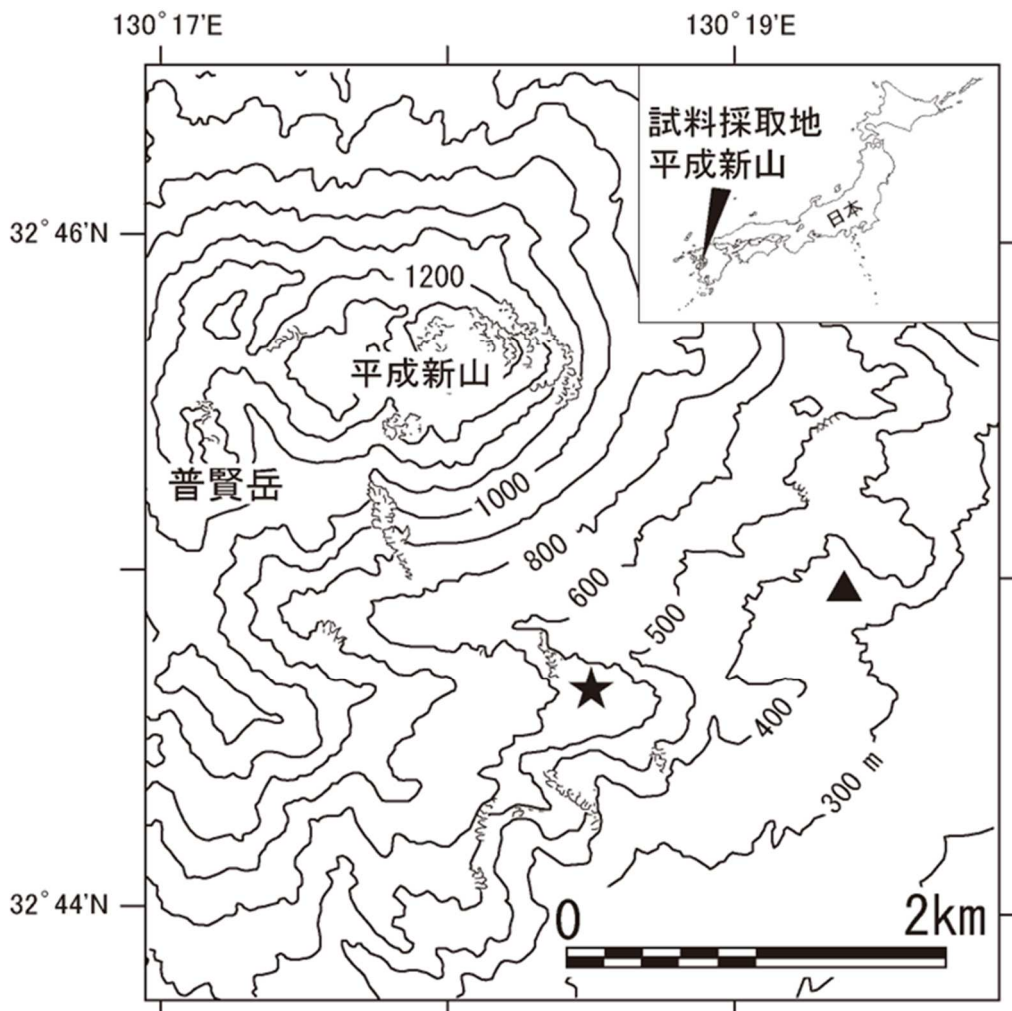


図3-2-1 試験地の位置 ★:赤松谷 A, ▲:赤松谷 B

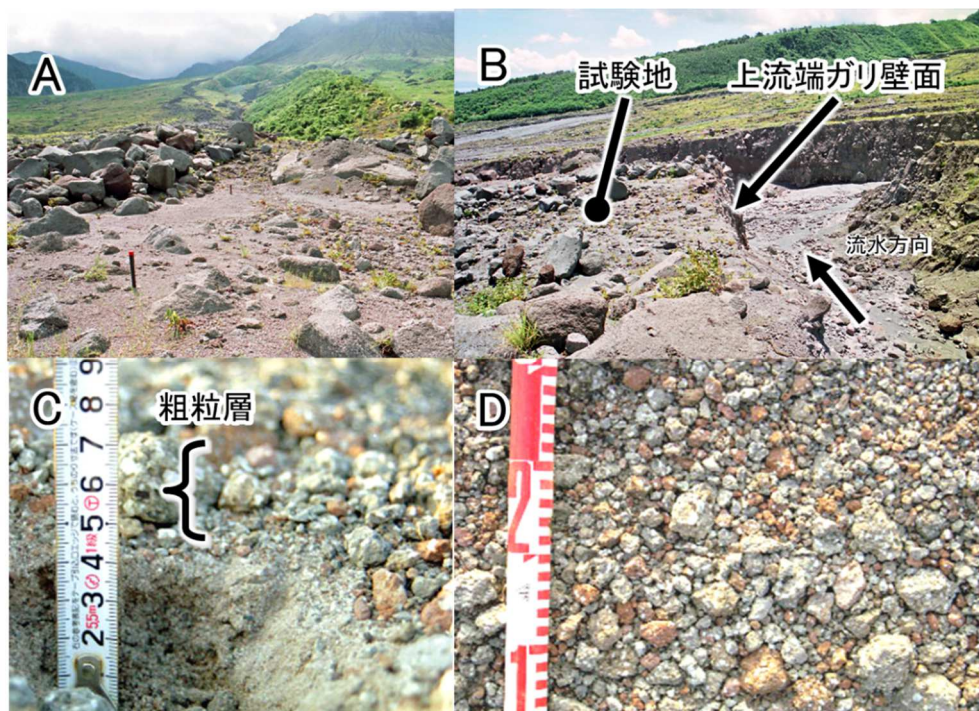


図 3-2-2 細粒火砕物散布前の赤松谷 B

A:1998年7月29日(南東である下流から望む), B:1998年月8月6日の上流端の分断状況(左岸から望む), C:1998年11月24日の地表断面, D:1998年11月24日の粗粒化した地表面

3.2.2 細粒火砕物流亡試験方法

a. 現地調査方法

赤松谷 B に地表流と流出土砂の観測施設を設置した。観測施設は 0.5 mm 転倒ます型雨量計と流量観測装置で構成されている。観測期間は 1998 年 8 月 26 日から 1999 年 11 月 16 日の約 14 か月間である。雨量観測は、治山工事の影響により観測途中に雨量計を短距離移動して継続した。観測開始から 1999 年 10 月 28 日は赤松谷 B の下流端で行い、10 月 29 日から 11 月 16 日は試験地から西へ 350 m 離れた小流域緑化試験地（第 4 章で述べる赤松谷 C）の下流端で行った。流量観測装置を使った流量観測は、雨量観測と同じ日に開始し、翌年の 11 月 16 日に治山工事の影響で終了した。赤松谷 B 設定時に流域下部（斜面傾斜 4 度の緩傾斜エリア）では流域界の区分が困難な場所があった。このような場所には、流域外から水が流入しないように仕切り板を設置した（図 3-2-3 実線）。流量観測装置は、試験地の下流端に設置した沈砂池（長さ 1.8 m、幅 0.44 m、深さ 0.5 m）と量水堰

で構成されている（図 3-2-4）。沈砂池と量水堰の接合には塩化ビニル管（図 3-2-4 の塩ビ管）を使用し、沈砂池と流路下流端の接合部分にはコンクリートを打設して地表流をもれなく観測装置に流入するようにした。量水堰に取り付けた三角堰の角度は、流量観測の精度を上げるため、西田ら(1998)や山越・諏訪(1998)の三角堰よりも鋭角である 15 度を採用した。地表流の流出量は三角堰に設置した水圧式水位計で測定した水位を流量に変換する方法により求めた。三角堰の流量を q (ℓ / sec), 水位を H (cm) とすると、設置する前に室内で行った流量検定の結果、水位流量曲線は 3.1 式で表された。

$$q = 0.0022 H^{2.5} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

上記の流量観測で得られた地表流は、流路下流端と沈砂池の接続にコンクリートを使用したため、水の浸透しないコンクリート打設部分（面積 1.3 m²）で発生した地表流が含まれていると推定される。そこで、観測結果からコンクリート打設部分のみで発生した地表流を除外するため、3.2 式にしがたって試験地で発生した地表流の総流出量を求めた。

$$Q = Q_0 - 1.3 (R / 1000) \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

ここで、 Q ：試験地で発生した地表流の総流出量（m³）、 Q_0 ：観測された地表流の総流出量(m³）、 R ：地表流発生期間の雨量(mm)である。本研究では、試験地に発生した地表流は 3.2 式が $Q > 0$ となる流出であると定義し、これを満たさない地表流は流量解析から除いた。観測開始から 1999 年 6 月 10 日までの約 9 ヶ月間は、自然状態の裸地斜面における降雨流出観測を行った。1999 年 6 月 11 日に細粒火砕物の流亡試験を行うため、流域面積の約 3 分の 1(面積 68 m²)におよぶ試験地の末端部の地表に次項の試験方法で細粒火砕物を散布した。この散布エリアは、降雨で流亡しやすいと想定される細粒火砕物の流亡状況を可能な限り長期間に観察するため、斜面傾斜 4 度の流域末端部に散布した。したがって試験地における地表流の流出、土砂流出観測は、2 つの地被条件、すなわち噴火時の細粒火砕物が堆積した地被と流亡した地被で行われた。最初の地被（1998 年 8 月 26 日から約 9 か月後の 1999 年 6 月 10 日まで）は、噴火活動終了 3 年後の火砕物が粗粒化している地表であり、次の地被（1999 年 6 月 11 日から 1999 年 11 月 16 日まで）は、噴火活動時に細粒火砕物が堆積した地表を再現している。

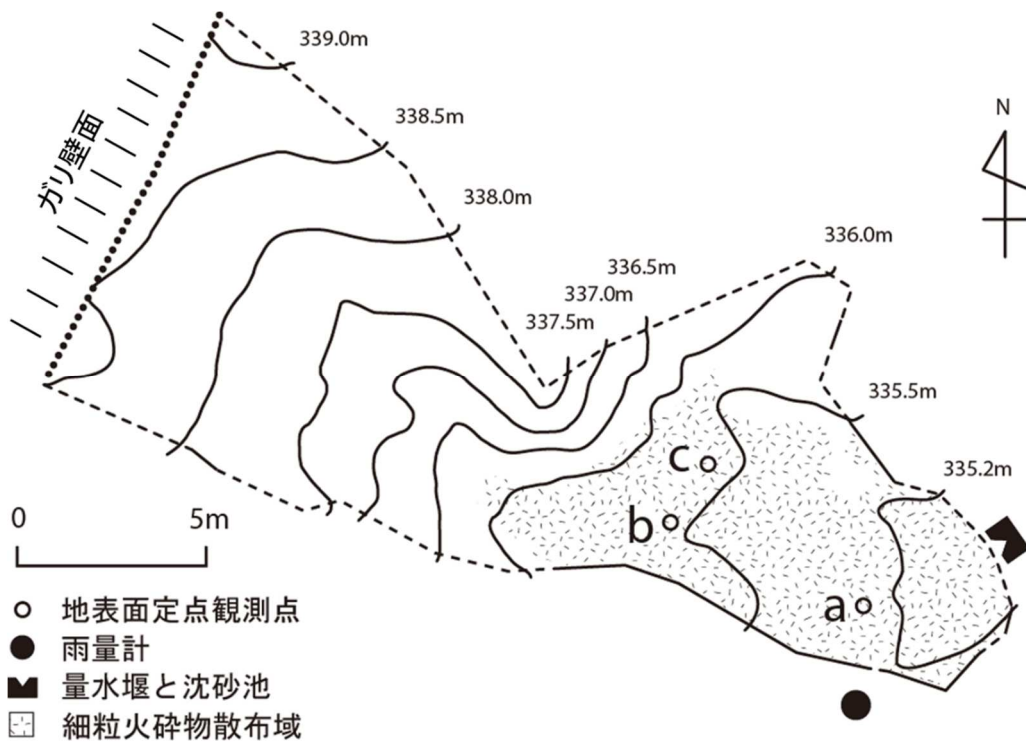


図 3-2-3 赤松谷 B の地形と細粒火砕物散布エリア(小川ら, 2003 改変)

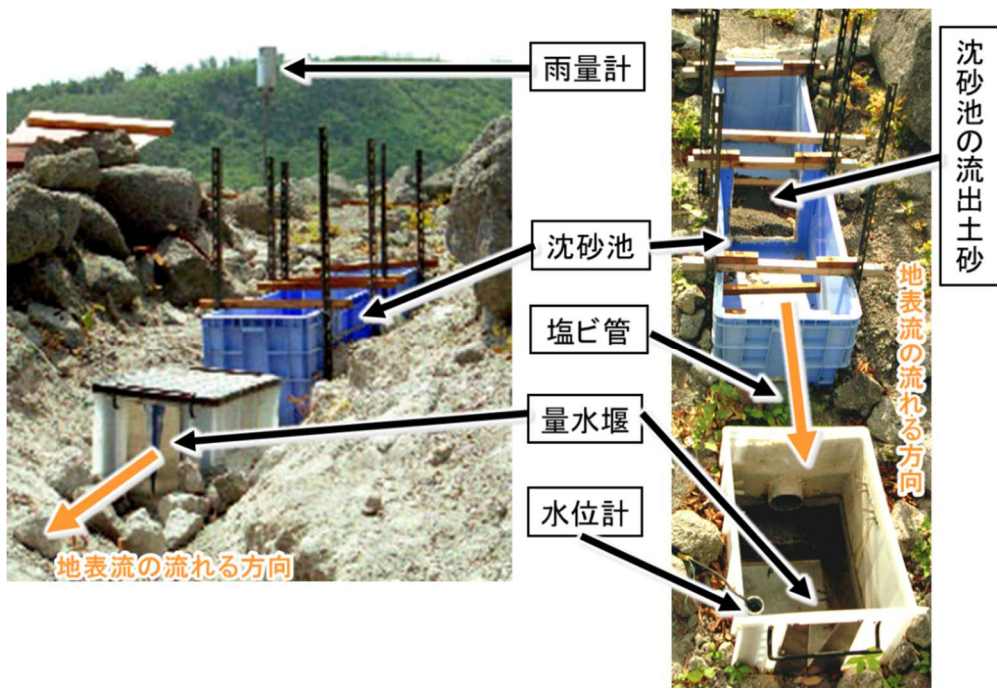


図 3-2-4 赤松谷 B の雨量計と流量観測装置

b. 試験方法

流亡試験に使用した細粒火砕物は、第2章と同じ場所である平成新山の溶岩ドームから南へ約2 km離れた岩床山の山頂付近(赤松谷 A)で噴火活動中に採取し(図3-2-1の★)、風乾状態で室内に保管していた試料である。試験前に0.42 mmふるいでゴミや粗粒土砂を取り除いてから以下の手順にしがたって細粒火砕物を散布した。まず、被覆直前に、わずかに点在していたイタドリなどの草本を全て刈り取って地表を植生のない裸地状態にした。次に、斜面の下部から上部にかけて、できる限り厚さが均一となるように約1 mの高さから細粒火砕物をフルイで散布した。被覆厚さは0.2~0.5 cmとなり、その総重量は135.1 kgとなった。

試験開始後の地表流で細粒火砕物が流亡する実態を把握するため、散布エリアの地表面観察を定期的に行った。細粒火砕物散布エリアの地表面観察と同時に定点観察地点(図3-2-3のa, b, c)を3点定めて地表面のスケッチと写真撮影を行い、地表の細粒火砕物流亡状況を追跡した。流亡試験前の定点観察地点に見られた礫は、直径が5~50 cmであった。流亡試験の地表面観察は、降雨状況に応じて1~3週間の間隔で実施した流量観測装置の観測データ回収時に行い、1999年11月16日の観測終了までに合計10回行った。

3.3 試験結果

3.3.1 細粒火砕物の流亡状況

細粒火砕物流亡試験後の地表面観察結果と雨量の結果を時系列に沿って述べる。1回目の地表面観察は、試験を開始した1999年6月11日(図3-3-1のA)から10日後の6月21日ときの試験地における細粒火砕物の堆積状況を(図3-3-1のB)に示す。この10日間の雨量は71 mmで、最大日雨量42.5 mmを6月18日に記録した。この間に発生した地表流は1流出イベントのみであり、その総流出量は0.32 mmであった。6月21日に散布エリアで観察した細粒火砕物は、地表に見られる石礫のなかでは比較的大きい直径20~50 cmの石礫の周囲(図3-2-3のa付近)に、厚さ1 cm程度でパッチ状に堆積していた(図3-3-1のBと図3-3-2のa)。これに対し、直径20~50 cmの礫が地表に見られない定点観察地点では、パッチ状に細粒火砕物が堆積している部分(図3-2-3のbと図3-3-2のb)とパッチ状に堆積していない部分(図3-2-3のcと図3-3-2のc)に区分された。パッチ状堆積(b)は、地表面の微少な凹地(深さ5 cm以内)に見られた。これに対し、パッチ状に堆積していない場所(c)は、細粒火砕物の散布前に見られた地表と同様であり、

直径が 5 cm より小さい砂礫が地表に現れていた。しかし、断面を観察すると、粗粒層のなかに厚さ 0.5 cm 程度の目詰まりした状態で細粒火砕物が見られた。以上の地表面観察では、降雨強度が低い場合でも、地表流とともに細粒火砕物が流亡して、一様に細粒火砕物が堆積していた状態から、大きな石礫の周辺や微少な凹地に再堆積する不規則な状態に変化していた。

6月30日から8月31日の地表面観察は、合計5回行われた。この期間はパッチ状の細粒火砕物は見られなくなり、散布エリアを概観しても細粒火砕物が地表に堆積していないように見えた。しかし、断面を観察したところ、6月21日に見られたパッチ状に火山灰が堆積していない場所と同様に細粒火砕物が地表の粗粒層に入り込んだ状態で堆積していた。試験開始40日後(7月21日)の断面観察では、20~50 cmの礫が分布している地表(図3-3-2のa)では、厚さ0.7~1.5 cm程度の細粒火砕物が粗粒層に目詰まりした状態で残留していた(図3-3-1のC下段写真)。この期間(10日後から40日後)の雨量は516.5 mmで、期間前半の梅雨期に集中し、最大日雨量126 mmを6月24日に記録した。直径5 cm以下の砂礫が地表に現れている場所(図3-3-2のb)では、厚さ約0.5 cm前後の細粒火砕物が、粗粒層の深さ1 cm程度の位置に層状に残留していた。この層状の細粒火砕物は、地表面観察を繰り返すにしたがって、次第に確認できなくなった。

試験開始81日(8月31日、図3-3-3のA)以降の地表面観察は、これ以前に比べて地表の状態が明らかに変化した。9月23日の観察では、前回の観察で細粒火砕物が地表に目詰まりしていた場所(図3-3-2のa周辺、図3-3-3のA)に細粒火砕物が確認できなくなっていた(図3-3-3のB)。このような地表の状態は11月16日に行った最後の観察まで続いた。また、9月1日から9月23日の期間雨量は603.5mmとなり(図3-3-3のB)、そのなかでも9月1日の日雨量(mm)が全観測期間中の最大値188.5 mmを記録した(図3-3-3)。短時間に多量の降雨で発生した地表流によって、直径20~50 cmの礫にせき止められて残留した散布エリアの細粒火砕物(図3-3-2のa)が、流亡した実態が示された。

以上の観察結果は次のようにまとめられる。試験開始から8月31日の細粒火砕物散布エリアでは、大きな礫の周辺および粗粒層に細粒火砕物が一時的にせき止められていた。その後、短時間に大量の降雨があると、細粒火砕物がせき止められていた場所も含めて速やかに流亡し、地表の火砕物が急激に粗粒化した。火砕物の粗粒化は、降雨や微地形に応じた細粒火砕物の残留や流亡の繰り返しによって生じた地表変動であることが実証された。

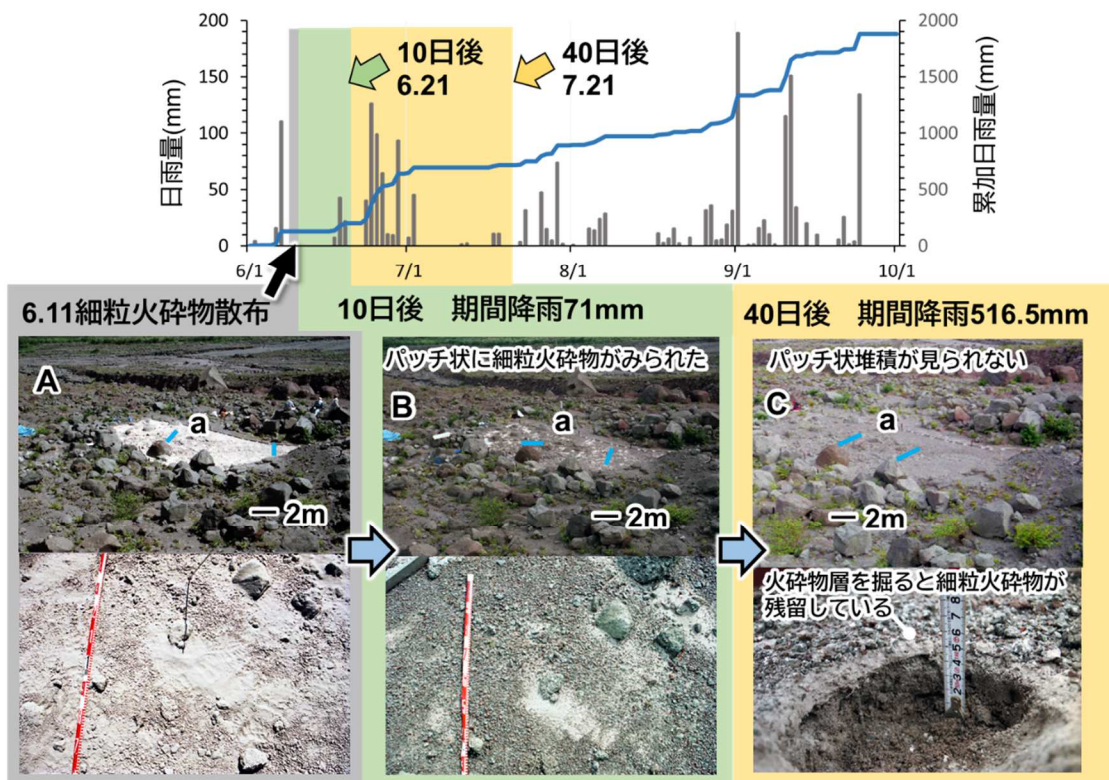


図 3-3-1 細粒火砕物散布エリアの流亡状況と日雨量の推移

A:細粒火砕物散布直後(1999年6月11日), B:10日後(1999年6月21日), C:40日後(1999年7月21日)

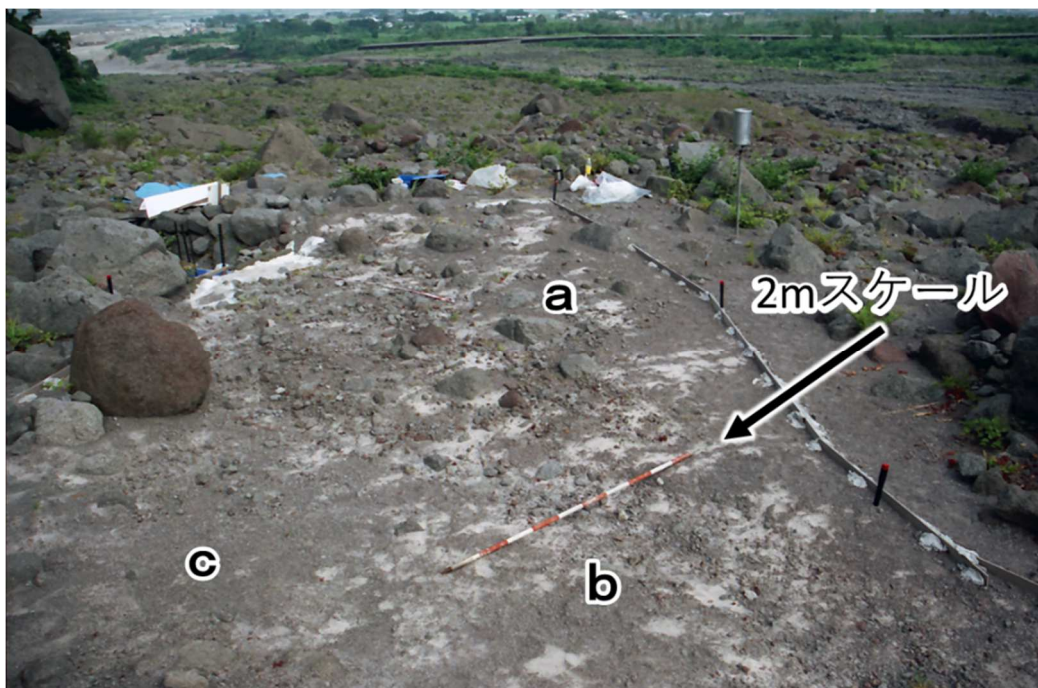


図 3-3-2 上流から見た 1999 年 6 月 21 日の調査地(小川ら, 2003 加筆)

a:直径 20~50 cm の礫が堆積した場所, b:微小な凹地に堆積した細粒火砕物, c:直径 5 cm 以下の礫が堆積した場所

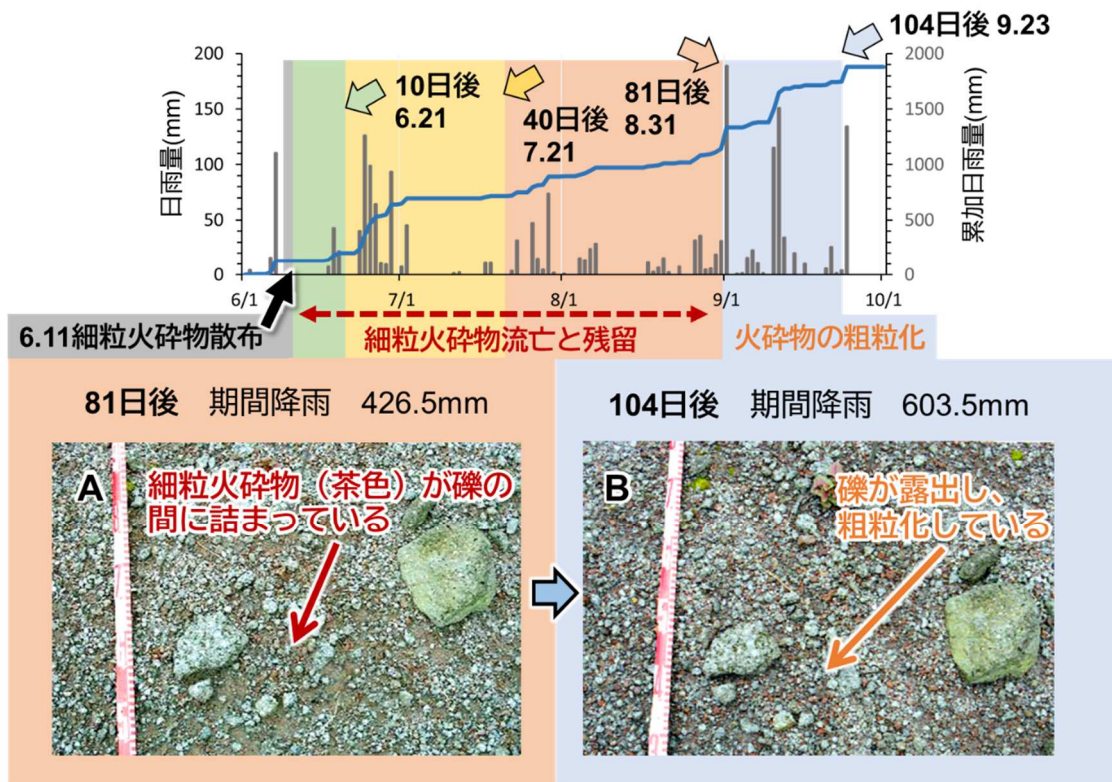


図 3-3-3 定点観測地点aにおける細粒火砕物流亡状況と日雨量の推移

A:細粒火砕物散布 81 日後(1999 年 8 月 31 日), B:104 日後(1999 年 9 月 23 日)

3.3.2 細粒火砕物の流亡による降雨流出特性の変動

a. 地表流の変動

細粒火砕物流亡試験による地表流発生状況の変化を明らかにするため、地表流発生に係わる降雨ならびに流出継続時間が類似している 2 つの流出を細粒火砕物の流亡試験前後で比較した。表 3-3-1 に試験開始 4 日前の 1999 年 6 月 7 日、試験開始 13 日後である同年 6 月 24 日の降雨流出の結果を示し、図 3-3-4(a),(b)に試験前、試験後の hidrograph をそれぞれ示した。これらの図により最大雨量に対する最大流出の応答は試験前、試験後ともに速やかであった。次に地表流発生時の降雨条件について検討する。表 3-3-1 に示した先行雨量は、地表流が発生する直前の一定時間の値を示し、最大雨量は、地表流が発生している間の雨量（以後、流出期間雨量と呼ぶ）の最大値を示している。図 3-3-5 に先行降雨、流出期間雨量、地表流出量の関係を模式図で示す。試験後（6 月 24 日）の流出期間の最大 5 分、最大 10 分雨量は、試験前（6 月 7 日）の 58 %、76 %となった。地表が粗粒化

していた試験前よりも試験後のほうが、最大雨量が小さいにもかかわらず、試験後のピーク流出量や総流出量は、それぞれ試験前の 1.4 倍、2 倍に増加した。以上の結果、地表が粗粒化した試験地に細粒火砕物を散布すると地表流の発生に起因する流出期間雨量が減少し、試験前よりも地表流が発生しやすい環境になっていることが明らかになった。

次に流亡試験期間の細粒火砕物の流亡に伴う地表流の変動を明らかにするため、流出期間雨量を解析した。流出継続時間は地表流ごとに異なるため、図 3-3-4 の流出継続時間が類似する流出イベントの比較は多数できない。そのため、試験後の流出期間雨量と地表流出量を 1 時間あたりに換算した値にしてから図 3-3-6 にこれらの関係を示した。この図に日付を記した 7 つの地表流出（1999 年 6 月 24 日、6 月 25 日、6 月 29 日、7 月 2 日、8 月 31 日は各 1 イベント、9 月 1 日は 2 イベント）に示したように 9 月 1 日までは、比較的小さい雨量にもかかわらず流出量の多い地表流が発生していた。したがって、細粒火砕物の影響による地表流の実態を明らかにするため、試験中の地表流に対し、9 月 1 日（日雨量 188.5 mm）を境に比較的少ない雨量で多量の出水が観測された期間とそれ以降の期間に分けて解析を行った。前者の期間（以降、前期と呼ぶ）は 6 月 11 日から 9 月 1 日とし（図 3-3-6●印）、後者の期間（以降、後期と呼ぶ）は 1999 年 9 月 2 日から 11 月 16 日とした（図 3-3-6□印）。両者を比較すると、後期は前期よりも大きい流出期間雨量で地表流が記録されているにもかかわらず、前期に比べその流出量が減少した。前期の地表流は全て 3.3.1 で述べた火砕物の粗粒化をはじめて確認した地表面観察日（1999 年 9 月 23 日）より前の地表流であった。図 3-3-6 と 3.3.1 の地表面観察により、細粒火砕物が流亡して、粗粒化が発生した日は、粗粒化を現地確認した日（9 月 23 日）より 12 日前の 9 月 1 日であると推定された。したがって、地表の粗粒化という視点で区分すると細粒火砕物が流亡と残留を繰り返している前期は、粗粒化が進んでいる途中の段階（これを粗粒化第 1 段階と呼ぶ）であるといえ、細粒火砕物がほとんど流亡して地表が粗粒化した後期は、前期に続く粗粒化段階（粗粒化第 2 段階と呼ぶ）であるといえる。この流亡試験で火砕物の粗粒化は、多量の地表流が発生すると、短時間に進む実態が明らかになった。

表 3-3-1 6月11日の試験前(1999年6月7日)と試験開始13日後(同年6月24日)の降雨と流出(小川ら, 2003 を改変)

降雨	試験前	試験後
流出期間雨量(mm)	18.0	20.5
60分先行雨量(mm)	18.0	15.0
30分先行雨量(mm)	8.5	9.5
20分先行雨量(mm)	6.5	7.0
10分先行雨量(mm)	4.5	4.0
5分先行雨量(mm)	3.0	3.0
最大1分雨量(mm)	1.5	1.5
最大3分雨量(mm)	3.5	3.0
最大5分雨量(mm)	6.0	3.5
最大10分雨量(mm)	8.5	6.5
流出	試験前	試験後
継続時間(min)	48	55
最大流量(mm/min)	0.33	0.46
表面流出量(mm)	2.80	5.51
流出率(%)	15.6	26.9

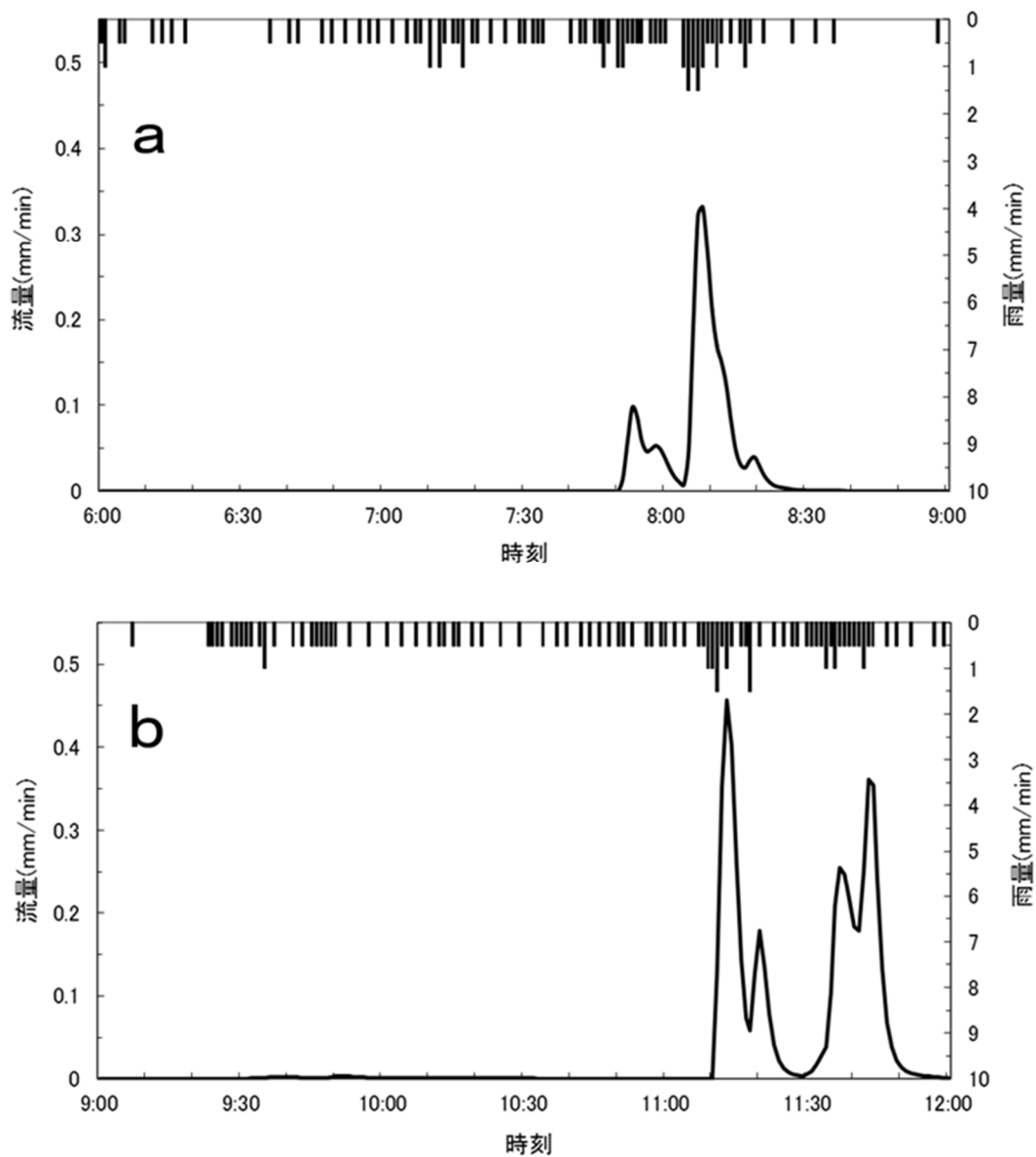


図 3-3-4 細粒火砕物流亡試験前後の降雨と流出の結果(小川ら, 2003 改変)

a:試験前の粗粒化している地表(1999年6月7日, 試験開始4日前)

b:試験後の細粒火砕物を被覆した地表(1999年6月24日, 試験開始13日後)

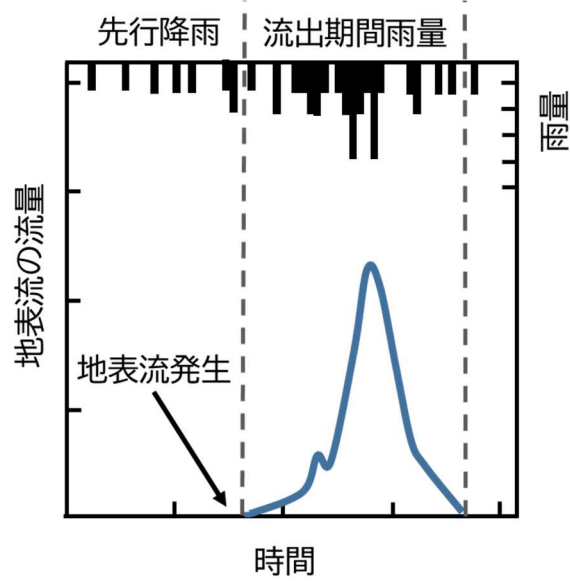


図 3-3-5 先行雨量, 流出期間雨量, 地表流の流量に関する模式図

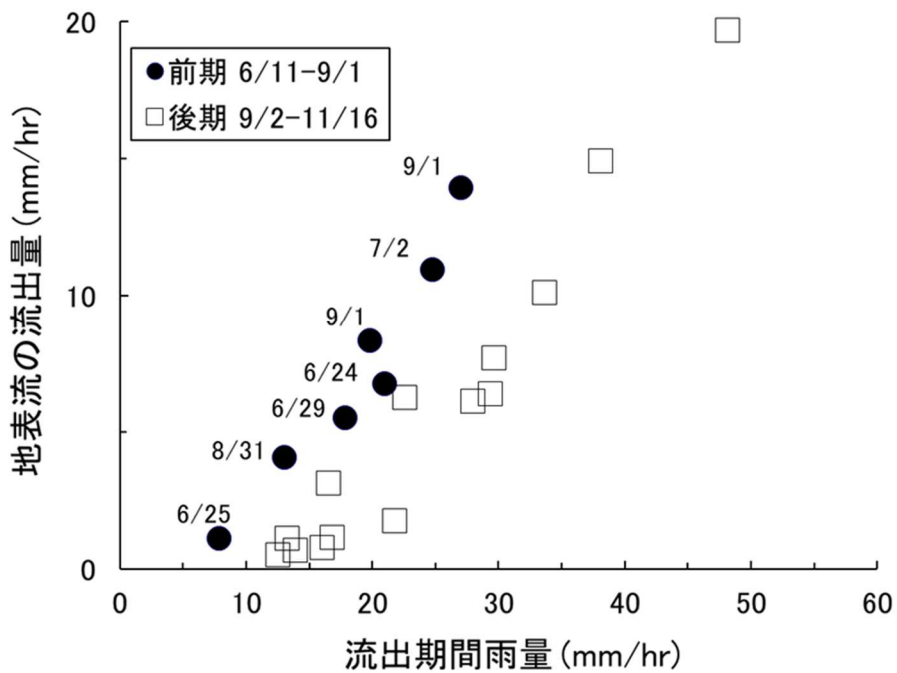


図 3-3-6 細粒火砕物流亡試験における流出期間雨量と地表流の流出量の関係

(小川ら, 2003 改変)

- 前期(粗粒化第1段階):6月11日~9月1日
- 後期(粗粒化第2段階):9月2日~11月16日

b. 土砂流出の変動

観測期間の日雨量 R (総降水量と呼ぶ), 地表流 Q , 流出土砂 S を累加した結果を図 3-3-7 (上段, 中段) に示した。地表流や土砂流出の結果を表 3-3-2 に整理し, 土砂流出の変動と 2 つの粗粒化段階を比較した。なお, 流亡試験前の約 9 か月間は, 2 つの観測期間でのみ土砂流出が発生した。そのため, 地表流が発生していない試験前の観測期間は図から除いた。

試験開始 10 日後 (6 月 21 日) は, パッチ状の細粒火砕物が地表に見られた時期であった (図 3-3-2)。表 3-3-2 のとおり, この 10 日間の総降水量は 71 mm で, わずかな地表流 (0.32 mm) によって 0.45 kg の土砂が流出した。試験開始 10 日後から試験開始 19 日後 (6 月 30 日) の観測期間は, 梅雨の多雨期 (総降水量 440.5 mm) にあたり, 短期間に地表流 (53.26 mm) と土砂流出 (26.29 kg) が急激に増加した。19 日後から試験開始 40 日後 (7 月 21 日) までの総降水量は 76 mm であったが, この間に地表流 (13.66 mm) と土砂流出 (13.30 kg) が発生したが, 地表流の観測記録は 7 月 7 日までであった (表 3-3-2)。試験開始 40 日後から試験開始 81 日後 (8 月 31 日) の総降水量は 426.5 mm (図 3-3-3 の A) で, この期間の土砂流出は, これよりも前の期間 (試験開始 10 日後から 40 日後) の土砂流出 (39.59 kg) の約 4 分の 1 (10.60 kg) と大幅に減少した。試験開始 81 日後から試験開始 104 日後 (9 月 23 日) の総降水量は, 603.5 mm となった。この降雨は台風の影響を受けた多雨期にあたり, 観測期間で最大量の地表流 (102.02 mm) と土砂流出 (105.68 kg) が発生した。

以上のように梅雨や台風の影響を受けた多雨期に土砂流出が急増することが明らかになった。しかし, 土砂流出量の観測では, 図 3-3-6 で示した細粒火砕物の流亡に応じた地表流の変動のように, 2 段階の火砕物の粗粒化に応じた土砂流出の時系列変動は, 確認できなかった。そこで, 表 3-3-2 の土砂流出量の時系列変動を地表流出量 (Q , 単位 mm) 当たりの比流出土砂量 (S , 単位 kg/m^2) の変動として図 3-3-7 の下段に整理した。これを S/Q (単位 $\text{kg}/\text{m}^2/\text{mm}$) と記して, S/Q の変動を 2 段階の粗粒化と対応させた。表 3-3-2 のとおり S/Q は試験前に 0.0001~0.0003 を示したが, 粗粒化第 1 段階である試験開始 10 日後 (6 月 21 日) の S/Q は 0.0064 となり, 試験前に比べ急激に増加した (図 3-3-7 の下段①少雨期)。細粒火砕物が残留していた 11 日後から 104 日後 (9 月 23 日) の S/Q は, 0.002~0.005 の範囲となり, 試験前よりも高い値で推移した (図 3-3-7 の下段②多雨期)。地表面観察から細粒火砕物の流亡が確認できた 9 月 23 日を過ぎた粗粒化第 2 段階の S/Q

は0.001程度となり、粗粒化第1段階よりも値が低下した(図3-3-7の下段③多雨期)。8月31日から9月23日は、流出期間雨量が40mmをこえる流出規模の大きい地表流が5回観測されていたのに対し、この前後の観測期間(8月12日から8月31日、9月23日から10月13日)では、流出期間雨量が40mmをこえる地表流は各1回記録されただけであった。また、9月23日に確認した火砕物が粗粒化した地表の細粒火砕物観察結果と9月23日以降のS/Qの低下(図3-3-7の下段③多雨期)と調和していた。

次に流出土砂の粒径組成を検討した。試験開始日(1999年6月11日)から10日間(6月21日まで)の流出土砂の粒径分布(図3-3-8の1本の黒色実線)は、試験前(図3-3-8の2本の細い破線)および6月21日以降の流出土砂(図3-3-8の7本の細い実線)よりも細粒で、中央粒径(d₅₀)はシルトを示した。これは、試験地に散布した細粒火砕物(図3-3-8の灰色実線)と同様の粒度分布であった。表3-3-2のとおり試験開始10日間(6月11日から21日)の少雨期における地表流の総流出量は0.32mmと非常に少なく、しかも流出土砂の粒度分布は細粒火砕物と類似していることから、少雨期には少量の地表流で細粒火砕物だけが流亡する実態が明らかになった。6月21日以降の7期間の流出土砂では、粒度分布が試験開始10日間よりも粗くなり、7つ全ての中央粒径(d₅₀)が砂を示した(図3-3-8)。これらの土砂は、試験前に採取した粗粒火砕物(図3-3-8の太い破線)に近い粒度分布を示した。しがたって多雨期の場合は、粗粒化第1段階(6月11日～9月23日)や粗粒化第2段階(9月23日～11月16日)の全期間を通じて粗粒火砕物が流出していた。

このように、図3-3-8より多雨期に粗粒火砕物が流出する実態が明らかになったが、2段階の粗粒化に応じた流出土砂の粒径組成の変化は明らかにできなかった。そこで、各観測期間の粒径加積曲線(図3-3-8)を、降雨状況や粗粒化の進行段階に応じた粒径区分に整理した(図3-3-9)。降雨状況は図3-3-7に示した土砂流出が発生していた雨期を3区分(①～③)し、粗粒化の進行段階は、細粒火砕物が残留と流亡を繰り返している粗粒化第1段階および地表の火砕物が粗粒化した粗粒化第2段階とした。これら火砕物の粗粒化に合わせて、土砂流出の粒径を3区分(シルトと粘土、砂、礫)した時の割合を、各雨期(①～③)で平均して図3-3-9に整理した。なお、粗粒化第1段階の土砂流出は、①が散布直後10日間の少雨期における1データであり(図3-3-7の下段①)、②が地表に細粒火砕物が残留と流亡を繰り返している多雨期(図3-3-7の下段②)の5データであった。粗粒化第2段階の土砂流出は地表が粗粒化している試験前と試験後の多雨期(図3-3-7の下段③)の4データとなった。ここで、試験前と試験後の4データの土砂流出を粗粒化第2段階の

多雨期（図 3-3-7 の下段③）の土砂流出として一括した理由は、次のとおりである。流亡試験終了翌日（11月17日）に細粒火砕物散布エリアから採土円筒試料3個を不攪乱で採取した。この飽和透水係数は、平均で $3.03 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ となり、試験前に試験地のそばで採取した粗粒火砕物の透水係数（表 2-4-1 の $5.38 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ）に近い値に回復し、図 3-3-6 の結果からも9月1日以降の地表の透水性の上昇が示唆されていた。よって、地表面観察で地表の粗粒化が確認できた9月23日以降の2期間における地表の透水性は、少なくとも火砕物の流亡によって試験前と同じ粗粒化第2段階の水準に回復したと判断した。そのため、試験前の2期間と地表の火砕物が粗粒化した2期間の土砂流出の粒径組成と合わせて、図 3-3-9 に示した。

以上の方法で流出土砂の粒径分布を図 3-3-9 のように再整理した結果、試験直後10日間の少雨期（図 3-3-9 の①）では、細粒分の土砂（シルトと粘土）が主に流亡し、①に続く細粒火砕物が残留と流亡を繰り返していた多雨期（図 3-3-9 の②）では、①よりも砂と礫の割合が増加した。②に続く細粒火砕物が流亡した多雨期の流出土砂（図 3-3-9 の③）は、②よりも砂や粘土・シルトの割合が増加し、それに応じて礫の割合が減少した。このように、粗粒化第1段階の地表では少雨期に細粒火砕物が流亡を開始し、多雨期に細粒火砕物と一緒に砂や礫が流亡した。そして、粗粒化第2段階に入り、地表の火砕物が粗粒化した状態に変化すると多雨期に礫の流亡が減り、礫に代わって砂以下の細粒土砂が主に流亡するようになった。図 3-3-9 より粗粒化第2段階に進むと、流出する主要な火砕物の粒径が、細粒化する実態が明らかになった。このような流出土砂の粒径が火砕物の粗粒化とともに変化する実態について、次節以降で考察する。

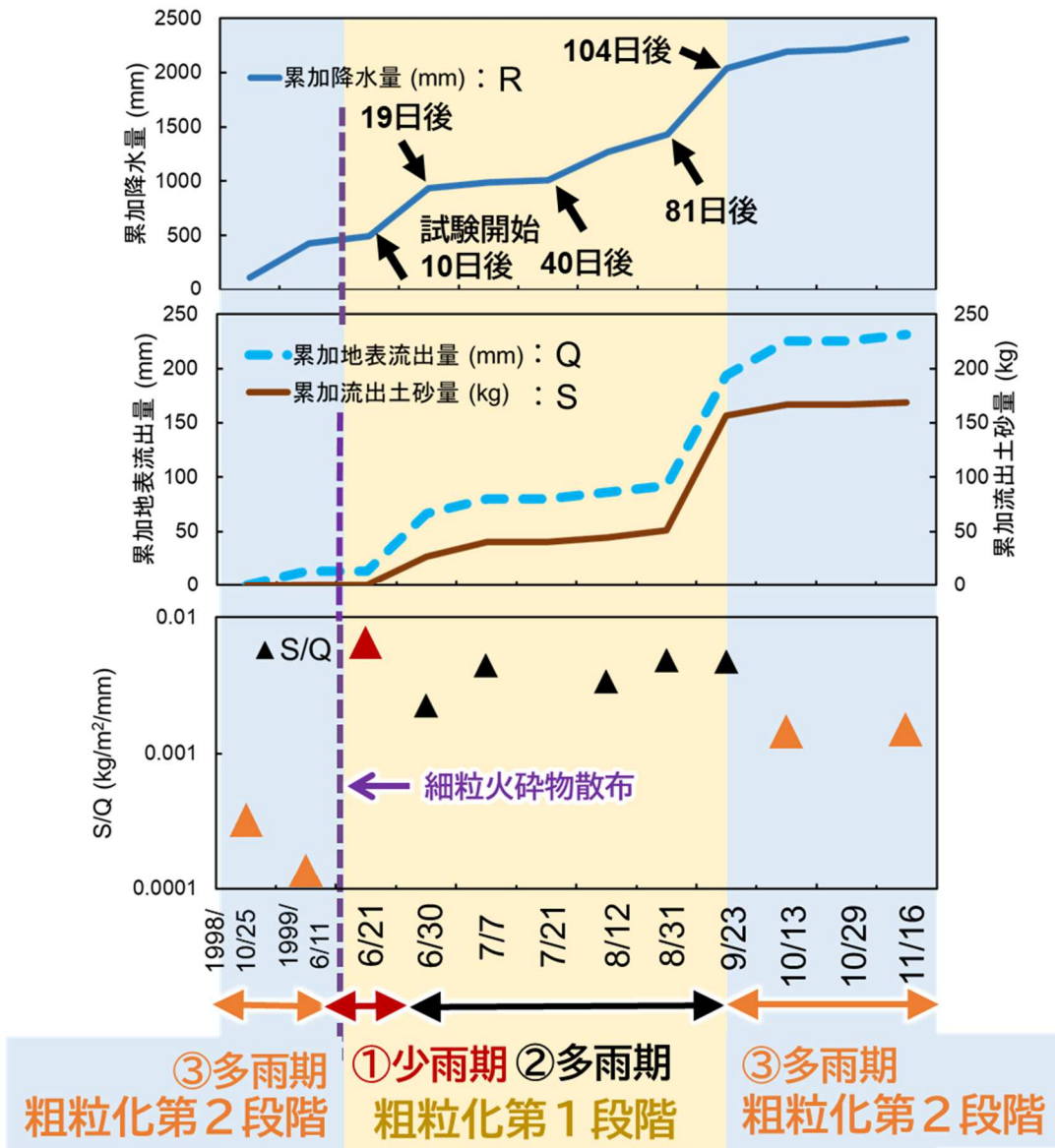


図 3-3-7 細粒火砕物流亡試験による降雨流出の結果と火砕物の粗粒化

表 3-3-2 赤松谷 B の降雨流出観測結果(小川ら, 2003 改変)

観測期間	総降水量 R:(mm)	地表流総流出量 Q:(mm)	流出土砂量 S:(kg)	中央粒径 d50:(mm)	S/Q (kg/m ² /mm)
1998年					
10/14-10/21	114.5	0.39	0.03	0.21	0.0003
1999年					
5/16-6/11	298.0	12.63	0.35	0.11	0.0001
6/11 細粒火砕物を赤松谷Bに散布					
6/11-6/21	71.0	0.32	0.45	0.02	0.0064
6/21-6/30	440.5	53.26	26.29	1.00	0.0022
6/30-7/7	52.0	13.66	13.30	1.20	0.0044
7/21-8/12	256.5	5.58	4.14	0.80	0.0034
8/12-8/31	170.0	6.06	6.46	0.80	0.0048
8/31-9/23	603.5	102.02	105.68	1.30	0.0047
9/23-10/13	154.5	31.49	9.87	0.90	0.0014
10/29-11/16	94.5	5.78	1.85	0.90	0.0015

注) 総降水量は観測期間の日雨量の総和

$$S/Q = (\text{流出土砂量}) / (\text{地表流流出量})$$

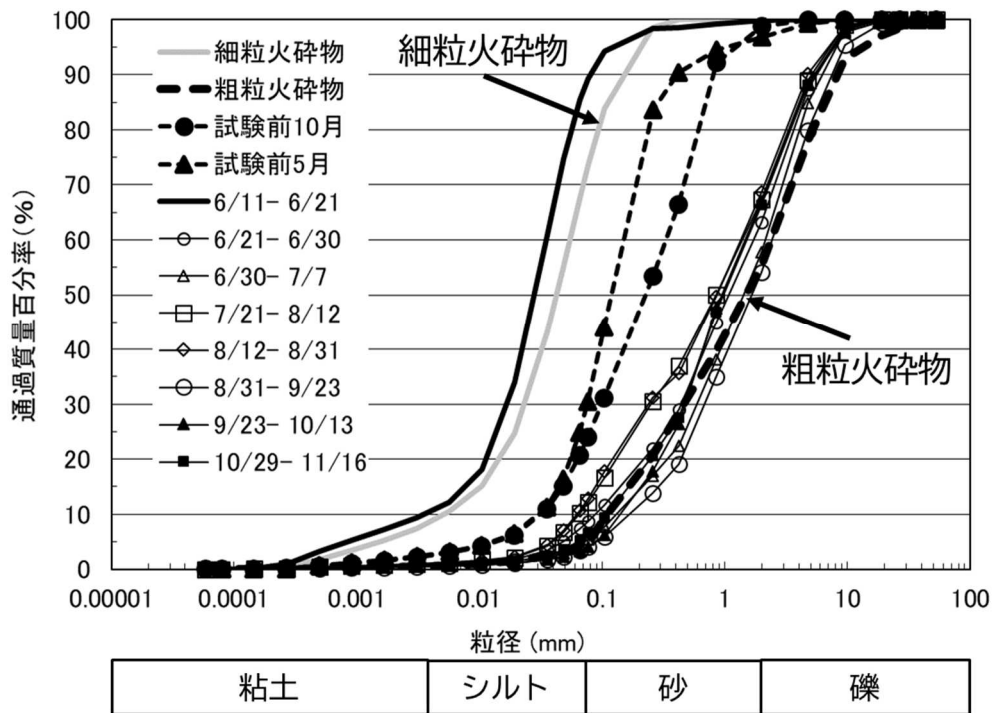


図 3-3-8 細粒火砕物と流出土砂の粒度分布(小川ら, 2003 改変)

注)凡例の日付は, 1999 年細粒火砕物流亡試験の観測期間。粒径区分は地盤工学に従った。細粒火砕物は, 赤松谷 A で 1993 年に地表から採取した火砕物で, 流亡試験で散布したものの。

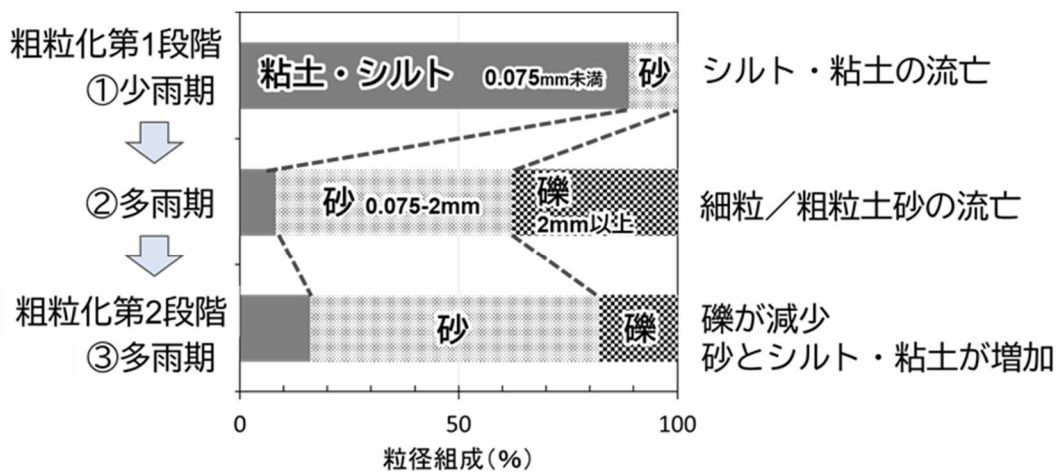


図 3-3-9 少雨期と多雨期における火砕物の粗粒化に応じた流亡土砂の粒径変化

3.4 火砕物の粗粒化過程の考察

3.4.1 細粒火砕物の流亡

流亡試験後の地表面観察および流出土砂の粒度分析結果は、以下の①と②に示す時系列に整理された。①地表に散布した細粒火砕物は、非常に少ない地表流でも容易に移動し、主に微少な凹地に厚く堆積していた（図 3-3-2 の b）。そのときの流出土砂は、散布した細粒火砕物とほぼ同じ粒径分布であった、②細粒火砕物の堆積厚が比較的安定している大きな石礫の周辺（図 3-3-2 の a）であっても、大きな出水を伴う降雨が集中した時期を過ぎると、地表に細粒火砕物の堆積がみられなくなった。

①の結果から細粒火砕物は、流亡すると微小凹地に容易に堆積し、②の結果から降雨が集中する時期まで大きな石礫が斜面下流方向への細粒火砕物の移動を一定期間抑えていたことを裏付けていると考えられる。また、②で述べた出水を伴う降雨の集中期を過ぎると地表に堆積した細粒火砕物が短期間に消失した現象は、集中豪雨で浸透能を超えた時に発生した地表流により斜面下流方向に細粒火砕物が流亡した結果であると推察される。以上により散布した細粒火砕物は、雨滴や浸透水によって鉛直移動しているというより地表流によって水平方向に移動すなわち斜面下流方向に流亡していると推定することができる。

細粒土砂が流水で移動する形態は、江頭・芦田（1981）によると粒径が 0.1 mm 以下の土粒子は浮遊の運動形態をとると報告されている。散布した細粒火砕物は 0.1 mm 以下の粒径が約 90 %を占めており（図 3-3-8 の細粒火砕物）、この細粒火砕物が地表流とともに流亡する場合は、砂礫が流亡する際に見られる掃流の運動形態とは異なり浮遊の運動形態であったと推察される。浮遊砂はいったん流水に入ると途中の溪床に堆積しない（水山、1993）ので、沈砂池に捕捉された土砂は主に掃流砂であると考えられる。流亡試験後の沈砂池土砂の主成分が掃流砂であることは、表 3-3-2 や図 3-3-8 に示した 6 月 21 日から 11 月 16 日における流亡試験期間の流出土砂の中央粒径（ d_{50} ）が 0.1 mm よりも大きいことで確認できる。これに対して、散布試験開始日から 10 日間の流出土砂が細粒火砕物であると認められることから、散布直後の細粒火砕物は、地表の粗粒層に目詰まりした状態（図 3-3-1 の C と図 3-3-3 の A）であるにもかかわらず、地表流で移動しやすい状態で堆積していたと考えられる。よって、流亡試験開始 10 日間で発生した地表流が、粗粒層の細粒火砕物だけを選択的に取り込んで浮遊砂となって流出し、浮遊砂の一部が沈砂池に取り残された結果、散布した細粒火砕物に類似した粒径分布の土砂が沈砂池に残留していたものと推察された。

3.4.2 細粒火砕物の流亡に伴う火砕物の粗粒化が降雨流出に与える影響

細粒火砕物の散布が、斜面の降雨流出に与えた影響は以下の4項目にまとめられた。①ほぼ同じ先行降雨で発生した流亡試験前後の地表流を比較したところ、試験後の地表流は試験前よりも少ない雨量で発生し、試験前に比べて地表流出量が増加した(表 3-3-1)。②細粒火砕物が地表に残留し、粗粒層の隙間に目詰まり状態になっている期間(図 3-3-6 粗粒化第1段階)の地表流は、細粒火砕物が流亡し地表が粗粒化した時(図 3-3-6 粗粒化第2段階)よりも少ない雨量にもかかわらず流出量が増加した。③比流出土砂量(S/Q)の変動は、細粒火砕物の残留や流亡による粗粒化に伴う地表環境の変化と対応した。具体的には地表の火砕物が粗粒化していた時期(図 3-3-7 粗粒化第2段階)のS/Qは、細粒火砕物が残留していた粗粒化第1段階よりも減少し、地表の粗粒化状況がS/Qの変動として反映されていた。④粗粒化第2段階では多雨期に粗粒化第1段階よりも細粒土砂が選択的に流亡した(図 3-3-9 の③)。

①により地表に被覆した細粒火砕物を流亡させる試験によって地表流が発生しやすくなるとともに地表流の流出量増加が明らかになった。さらに噴火活動中の火砕流堆積斜面における地表流の流出量の増加が再現されたと考えられた。そして、②により細粒火砕物の流亡が地表流の流出量の変動に関与していることを明らかにした。①と②は、細粒火砕物に覆われた地表では浸透能が低下し、次の細粒火砕物が地表から流亡する段階になると浸透能が回復する現象を裏付けるものである。③によりS/Qの時系列変化は、細粒火砕物散布エリアにおける火砕物の粗粒化を反映したものであるといえる。④において流出土砂が粗粒化した結果と、③に示した粗粒化第2段階における比流出土砂量の減少結果を合わせた結果は、粗粒化した火砕物の受食性低下を裏付けていると考えられた。

以上の流亡試験の結果と第2章の堆積構造解析の結果から、図 3-4-1 に火砕物の粗粒化過程としてA~Eのようにまとめられた。(A) 細粒火砕物が堆積している期間の少雨期に発生した地表流による流出土砂は、細粒火砕物のみであり、(B) 多雨期において地表流が大規模に流出する場合は、細粒火砕物と粗粒土砂(砂や礫)がともに流亡した。細粒火砕物が地表から流亡するまでは、降雨状況に応じてAとBを繰り返すと考えられる。(C) 地表から細粒火砕物が流亡してしまうと、下位の粗粒火砕物が地表に露出する。(D) 粗粒火砕物の透水性が細粒火砕物よりも上昇しているため、降雨に対する地表流の応答流量が減少した結果、粗粒火砕物の受食性が細粒火砕物よりも低下し、Bの時期よりも細粒土砂(砂以下)が流亡する。(E) 地表に礫が取り残されて、地表面に礫が露

出し、2層に分かれた粗粒火砕物が形成される。これらの上位が粗粒層で、下位が火山砂礫層である。よって、A～Bは、降雨に応じて細粒火砕物と粗粒火砕物が流亡する段階が粗粒化第1段階である。これに続くC～Eは、地表の粗粒火砕物がさらに流亡する粗粒化第2段階である。よって、火砕物の粗粒化により、地表の火砕物が2段階の流亡により粗粒化する過程を経てから、地表面に礫が残された状態の粗粒層が形成される。細粒火砕物が残留している粗粒化第1段階の地表よりも、粗粒層が見られる粗粒化第2段階の地表では受食性が低下したと考えられる。しかし、粗粒層の礫は、多雨期に地表流によって流亡している状況であり、地表が植生回復しないと粗粒層は安定化しない状態であると考えられる。

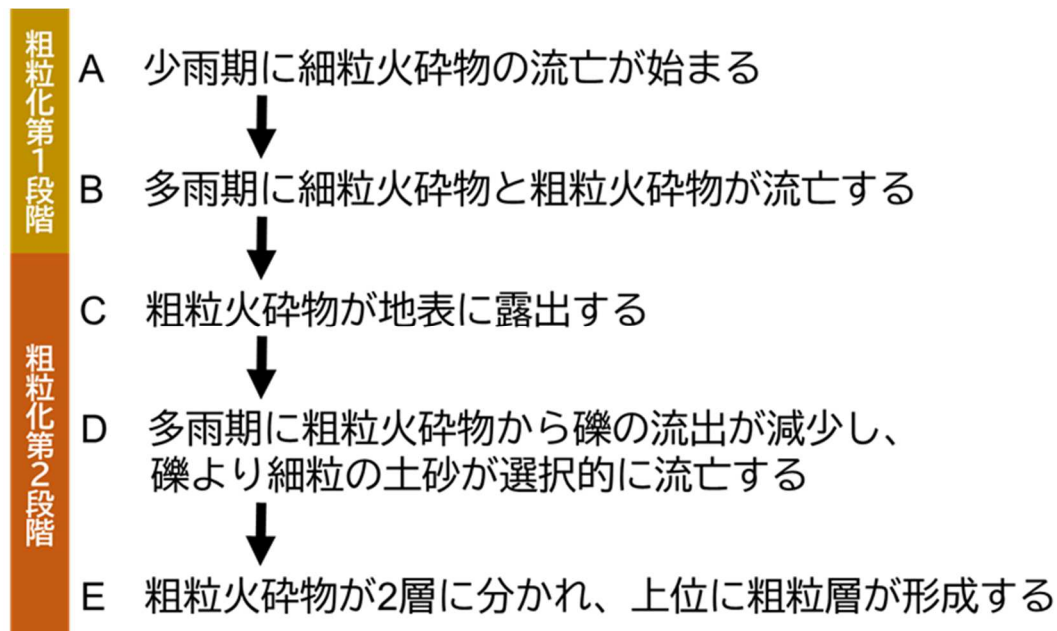


図 3-4-1 火砕物の粗粒化過程

3.5 結論

平成新山の火砕流堆積斜面において細粒火砕物を地表に散布する野外試験を行い、細粒火砕物の粗粒化過程の解明と、火砕物の粗粒化が火砕物堆積斜面の降雨流出特性に与える影響を考察した。細粒火砕物の流亡過程を時系列で整理した結果、地表の粗粒化は、以下の通り、雨期に火砕物が2段階の粗粒化で流亡し、これらの影響を受けて地表の火砕物が2層構造になる過程であった。最初に地表の細粒火砕物は、小雨期に発生した少量の地表流で容易に移動し、砂や礫よりも先行して流亡する。次に多雨期に入ると残留している細粒火砕物が流亡する過程で砂や礫を含む粗粒火砕物の一部も同時に流亡して、さらに火砕物が粗粒化した。ここまでの粗粒化第1段階である。次の粗粒化第2段階では、火砕物の粗粒化が進み、細粒火砕物の下位にあった粗粒火砕物が露出する。そして、多雨期に発生する地表流は、細粒火砕物が堆積していた時よりも雨量に対する応答流出量が減少した。そのため、流亡土砂の主要な粒径が礫から砂に細粒化して、地表から礫よりも細粒の砂が選択的に流亡するようになる。最終的に粗粒火砕物の上位に、取り残された礫が粗粒層を構成する。これらの粗粒層の礫は、細粒火砕物よりも受食性は低いが、多雨期に流亡していた。粗粒層の受食性をさらに下げるには植生回復が必要である。

第4章 粗粒化が進む火砕物堆積斜面の植生回復と土砂流出の変動

4.1 目的

第2章の火砕物の物理性試験や堆積構造解析、第3章の細粒火砕物を散布した試験地における流亡試験によって、噴火活動時の地表状態を再現し、細粒火砕物の流亡に伴う地表の粗粒化過程を検討した。細粒火砕物は少ない降雨で容易に流亡し、地表が短期間に粗粒化した。また、平成新山の噴火活動が終了して2年が経過した地表面には、粘土やシルトの細粒土砂を欠いた粗粒層が見られ、そこに最大数 mm の連続した孔隙構造が発達していた。この粗粒層は、火砕物が降雨を受けて選択的に流亡する過程で形成されたことが、流亡試験によって裏付けられた。

噴火活動の終了から進む火砕物の粗粒化は、これに続く植生回復に関与していると考えられるが、これまでの研究では火砕物の粗粒化が植生回復に及ぼす影響は検討されていない。行政機関は、平成新山の噴火活動が終了した1年後に火砕物堆積斜面の表面侵食を防止するため山腹緑化工を速やかに実行した。平成新山の山腹緑化工は、火砕物の粗粒化が進んでいた時期で、表面侵食を受けた環境にもかかわらず植生回復が短期間に進行した。第2章と第3章で示された火砕物の粗粒化過程と本章で示す火砕物斜面における緑化植物の植生回復過程を統合すれば、表面侵食から植生回復へ中継ぎしている粗粒化した火砕物の役割が解釈できると考えた。本章の目的は、その解釈の前提となる粗粒化した火砕物堆積斜面の植生回復に伴う地表安定化過程を解明することである。

4.2 試験地と調査方法

4.2.1 試験地の概要

山腹緑化により植生回復した試験地は、5年に及んだ噴火活動により高温火砕流の通過で植生が完全に焼失し埋没した火砕物堆積地の赤松谷 C である。また、赤松谷 C (図 4-2-1 の■) は、第2章の赤松谷 B (図 4-2-1 の▲) に近接した植生回復エリアの小流域 (面積 2759 m²) で、赤松谷 B との直線距離は約 350 m である。赤松谷 C 設定当時 (1998 年) の地表の状況を示す (図 4-2-2 左)。また、緑化草本の根系が既に 5~10 cm の深さに侵入していた (図 4-2-2 右)。

赤松谷 C は、南東斜面の赤松谷本流域の山腹斜面 (標高 361 m) で、平成新山の溶岩ド

一ムより約 1.8 km 離れた斜面（北緯 32 度 44 分 54 秒，東経 130 度 19 分 11 秒）に位置している（図 4-2-3）。試験地には噴火活動終了 1 年後の 1996 年に後述する航空緑化が広範囲に行われた（図 4-2-3 の黄緑色の植生回復エリア）。赤松谷 C の約 100 m 上流に幅 15 m，深さ 10 m のガリが存在し，このガリを通過する出水や土砂は，赤松谷 C に流入しない。

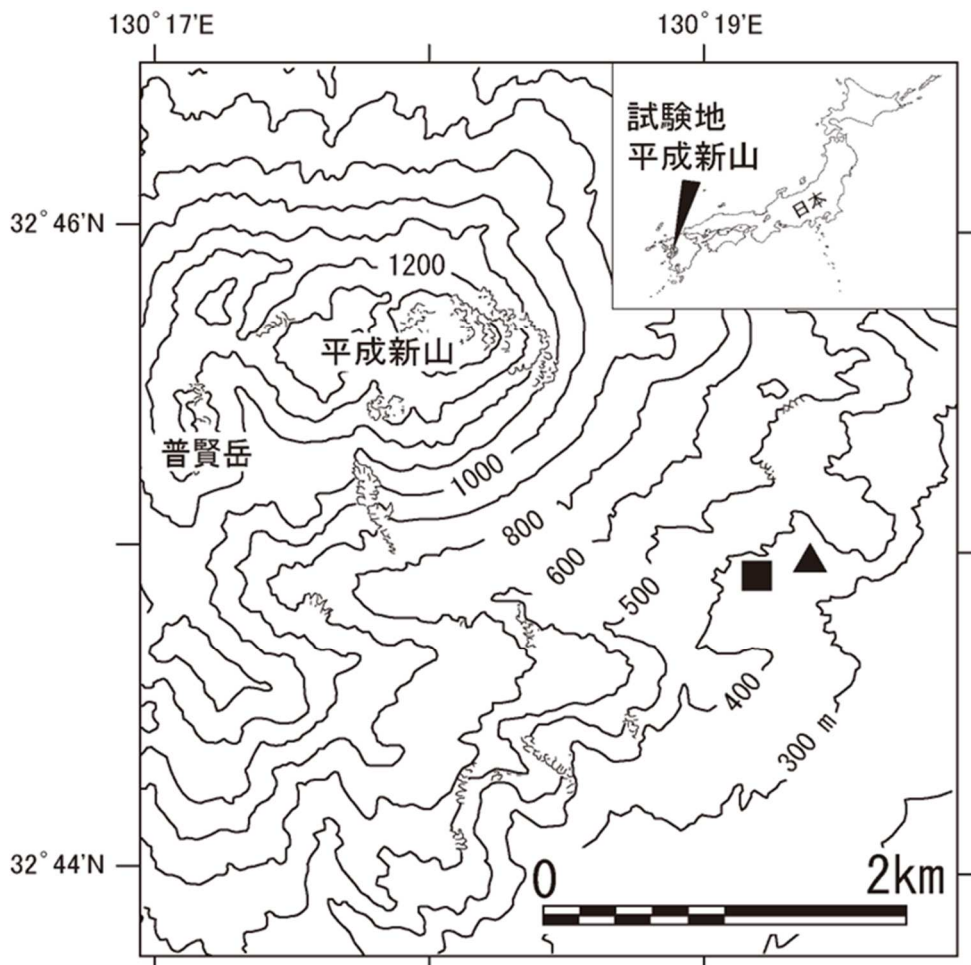


図 4-2-1 試験地の位置 ■:赤松谷 C(緑化試験地), ▲:赤松谷 B(3 章の裸地試験地)

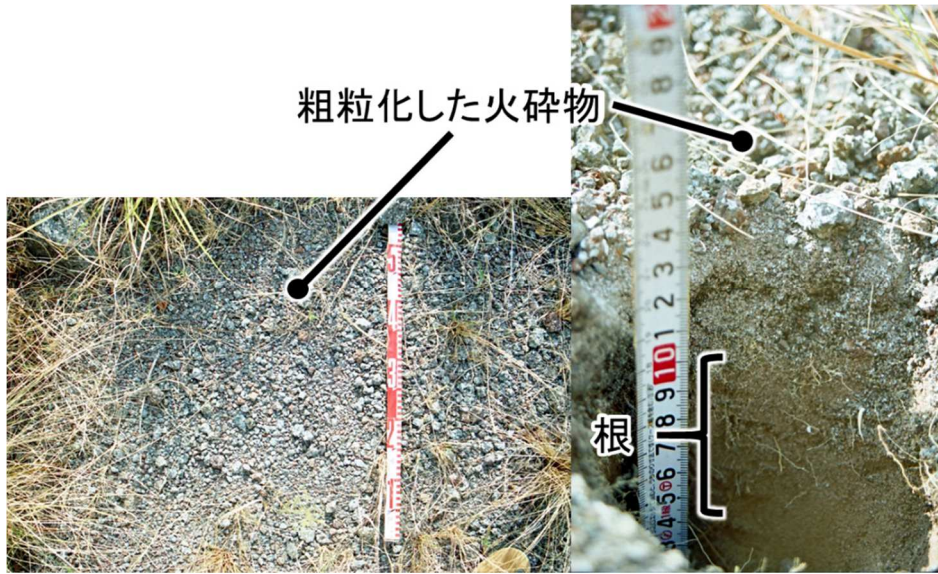


図 4-2-2 赤松谷 C の地表(1998 年) 左:地表の火砕物, 右:火砕物の断面

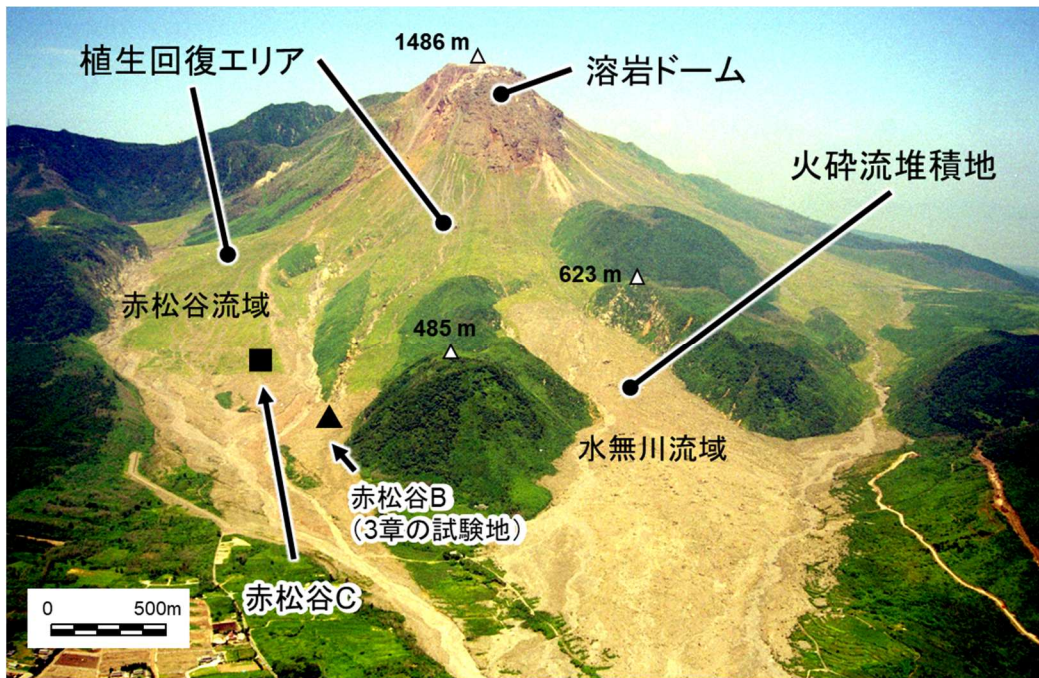


図 4-2-3 南東から見た赤松谷 C

(林野庁長崎森林管理署提供写真に加筆, Ogawa *et. al.*, 2007 改変)

4.2.2 試験地における緑化工の概要

行政機関は、平成新山の噴火によって荒廃した上流域の森林を復旧させるため、1996年4月に山腹緑化工を行った。林野庁は国有林の地形や流域を考慮して7つの工区を担当し、長崎県は国有林被災地の下流に位置する民有林被災地を3つの工区に分けた（（財）林業土木コンサルタンツ技術研究所、2000）。図4-2-4に各工区と赤松谷Cを示した。

噴火前の赤松谷Cは国有林であった南東斜面の被災地であった。山腹緑化工は、ヘリコプターで種子などの緑化資材を空中散布する航空緑化工が採用された。赤松谷Cが位置する2工区の航空緑化工（図4-2-4の白数字②）は、水に混ぜて液体状に加工した緑化資材（スラリー材）をバケットで空中散布するスラリー工法（湿式工法）であった（九州日植株式会社、1998）。表4-2-1に2工区における初播（1996年春季）以降の6年間の施工実績を示し、図4-2-5に2工区の施工状況を示した。表4-2-2に赤松谷Cにおける導入種、表4-2-3にスラリー工法で使用された植物種子以外の緑化資材を示した。侵食防止剤の名称は、NSA101であり、これが地表面に散布されると保水性のある皮膜が作られる。空中散布方式を取る限り土壌侵食防止剤の侵食防止効果が持続できる期間は3~4ヶ月位であり（倉田、1979）、植物被覆が形成されるまでの一時的な侵食防止効果を期待している。

2工区では肥料切れによる植生の衰退を避けるため、緑化7年目（2002年）までは1998年を除き初播から追肥や追播を行っていたが、緑化8年目（2003年）から追肥や追播は行われていない（表4-2-1）。なお、赤松谷Cでは、追播されずに追肥のみが行われた。

図4-2-6に全緑化工区の空中写真から判読した植被率と10m矩形植生調査プロットの植被率を示す。緑化が初めて行われた1996年から10年間は、植生調査プロットだけでなく山腹斜面全体の植生被覆が進んでいた。ただし山腹に深く刻まれたガリでは出水や土石流が通過堆積し、ガリ壁面の小規模崩壊が見られた箇所では植生被覆が遅れていた。館沼（2001）によると赤松谷Cの設置から1年経過した1999年当時、これらの植生回復が遅れているエリアは緑化斜面全体の8.5%であった。赤松谷Cでは、こうした植生破壊による植生回復の遅れはみられなかった。

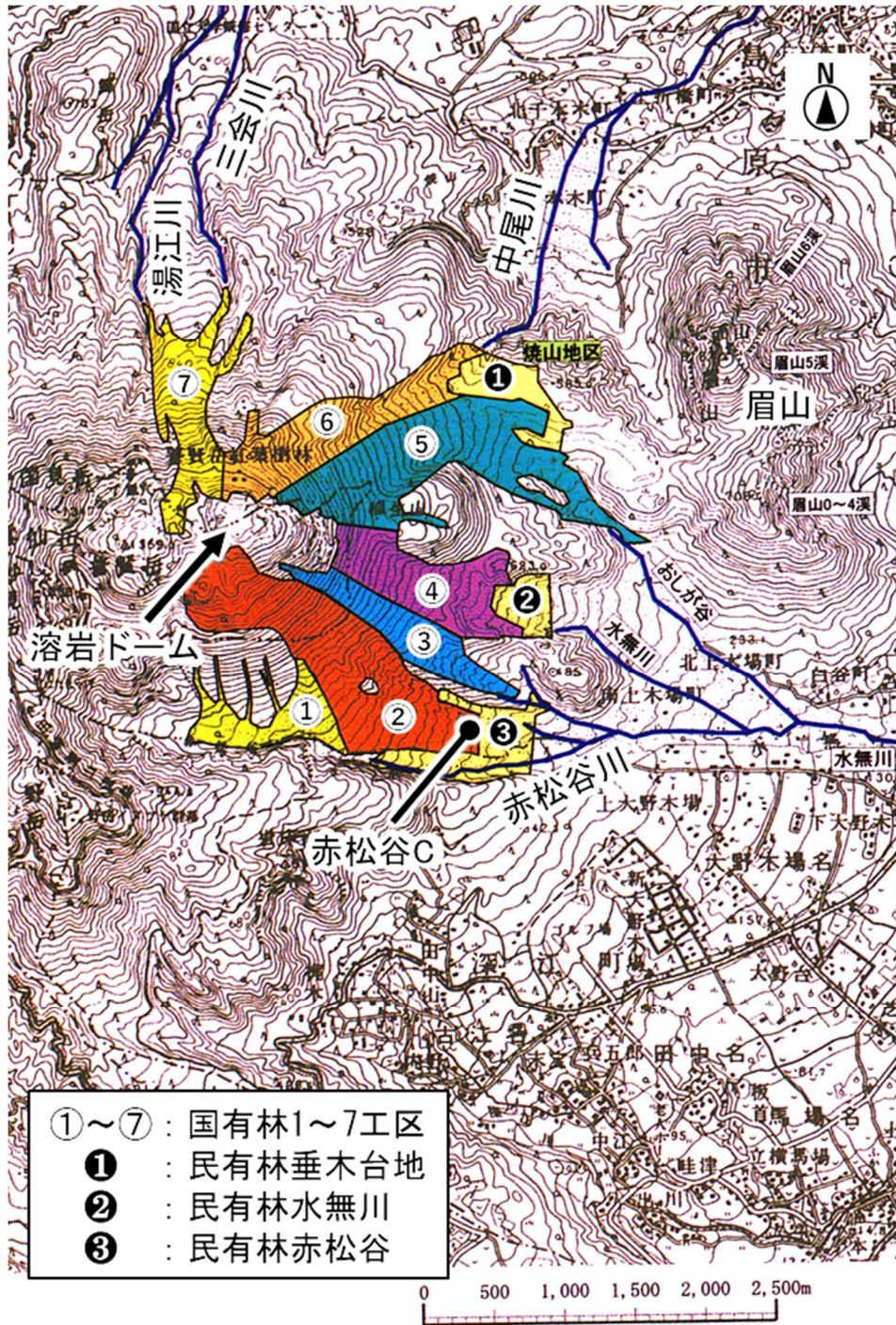


図 4-2-4 1996年(白丸数字)と1997年(黒丸数字)の緑化工区((財)林業土木コンサルタンツ技術研究所, 2000 に加筆), 国有林は林野庁緑化工区, 民有林は長崎県緑化工区

表 4-2-1 赤松谷 C とその周辺に行われた航空緑化施工実績(小川ら, 2010 改変)

施工年	施工面積 (ha)				
	スラリー式	スラリー式追播	追播	追肥1回目	追肥2回目
1996年春季	107.34	-	-	-	-
1997年春季	-	-	-	106.07	-
1999年春季	-	1.67	22.53	41.61	-
2000年春季	-	0.96	-	42.05	-
2001年春季	-	-	-	35.74	15.72
2002年春季	-	2.60	-	9.04	-

－: 施工実績なし

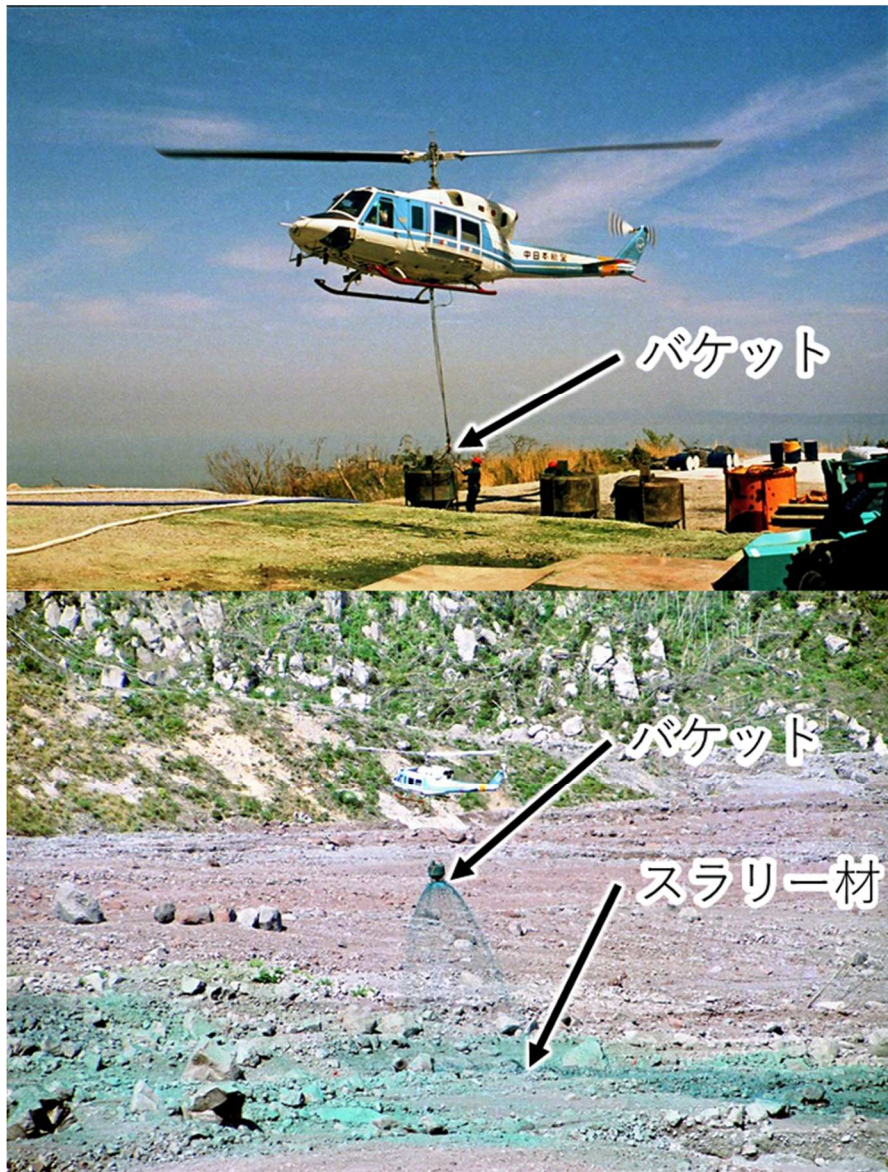


図 4-2-5 1996 年 4 月の 2 工区における航空緑化工
(林野庁長崎森林管理署提供写真に加筆)
上:ヘリポートからバケツト運搬, 下:スラリー材散布

表 4-2-2 赤松谷 C における導入種と導入 2 年後の生育種(小川ら, 2002 改変)

散布種子	国有林 2工区 124.21ha	
	1996年 施工時	1998年 観測開始時
トールフェスク	○	
クリーピングレッドフェスク	○	
バミューダグラス	○	
ウィーピングラブグラス	○	○
イタリアンライグラス	○	
メドハギ	○	○
ヨモギ	○	
イタドリ	○	
ススキ	○	○
ヤマハギ	○	○
イタチハギ	○	
オオバヤシャブシ	○	

表 4-2-3 赤松谷 C とその周辺に散布された種子以外のスラリー材の内容(林野庁長崎森林管理署提供資料より作成)

資材	名称	備考
	グリーンペット	紙を細かく裁断した繊維
有機質系土壌改良材	バーク堆肥	樹木の皮を原料とした堆肥
	ベントナイト	モンモリロナイトを主成分とする岩石
侵食防止剤	NSA101	ポリ酢酸ビニルが主成分の浸透皮膜を形成する
増粘剤	CMC 3H	天然セルロース由来のカルボキシメチルセルロース
有機肥料	菜種油かす	
無機肥料	化成肥料	
無機コーティング肥料	超遅効性肥料 グリーンマップ	表面が合成樹脂で被覆されており、有効成分が徐々に分解する粒状肥料
着色材	バンレイドグリーン	種子吹き付け緑化用の食用色素

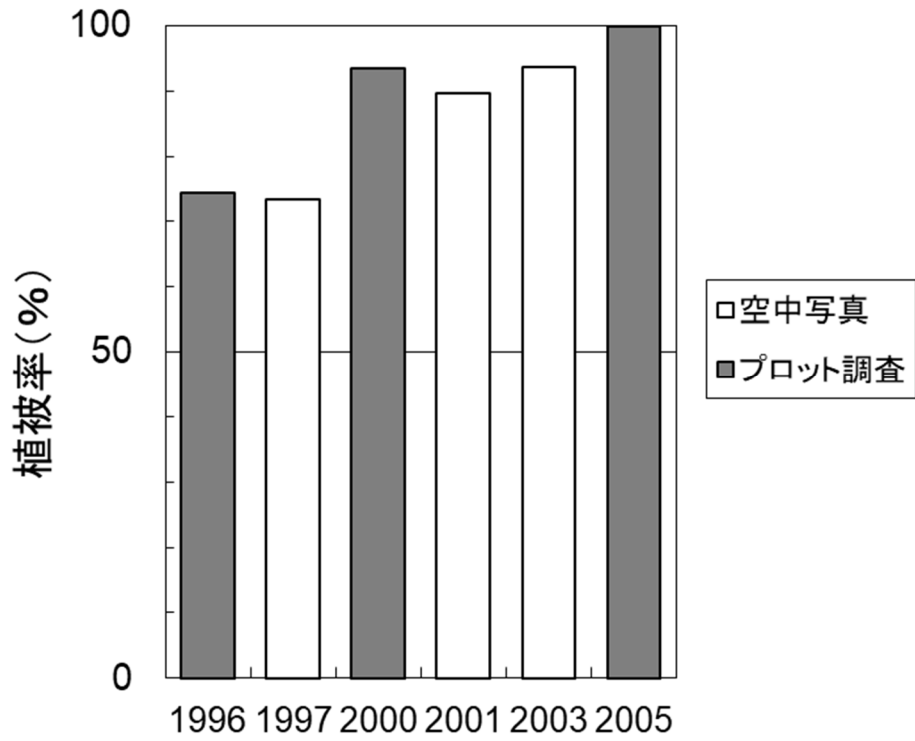


図 4-2-6 緑化工区全体の植被率

(小川ら, 2010; (財)林業土木コンサルタンツ技術研究所, 2006 より作図)

4.2.3 植生調査方法

赤松谷 C の植物生育状況を把握するため、コドラート法とライントランセクト法で植生を調査した。コドラート調査は 1 m 矩形枠を 2 カ所設定し、その植被率を草本と木本に分けて測定した。著者による植生調査は、木本の生育が顕著となった 2000 年から開始した。ライントランセクト調査は、試験地の下部に 10 m の調査ラインを斜面縦断方向（東西方向）、斜面横断方向（南北方向）に各 1 本とり、このラインを通過している植物に対して種類別に被覆の長さを記載し被覆率を求めた。草本は基底被覆率と草丈を測定し、木本は冠部被覆率と樹高を測定した。そして、被覆率と生育高から積算優占度を求めた。

なお、コドラート調査は、著者らが調査開始する以前の 1996 年から 1999 年に試験地周辺の 9 地点で、植生調査が定期的に行われていた（九州日植株式会社、2000）。このうち 1 地点の調査が、赤松谷 C の植生調査地点よりも約 50 m 上流の赤松谷 C 付近で行われていた。よって、筆者が行った植生調査以前の植生は、この調査地点の結果を参照した。

岩川（1976）によると緑化後に先駆的木本が侵入するためには 10 年程度以上の期間が必要であることを指摘している。しがたって緑化斜面の植生遷移を把握するための調査期間は、緑化開始の 1996 年から 2005 年にわたる 10 年間とした。

4.2.4 降雨流出観測方法

図 4-2-3 や図 4-2-7 に示した小流域に赤松谷 C を設定し、降雨時に小流域で発生する降雨流出を計測する観測施設を設置した。赤松谷 C は 1996 年 4 月に航空緑化された場所（面積 2759 m²）であり、その観測期間は、1998 年 8 月から 2005 年 12 月である。

観測施設は、図 3-2-4 と同様に雨量計、量水堰、沈砂池で構成されている。雨量観測装置は 0.5 mm 転倒ます雨量計とし、観測開始当初は第 2 章の赤松谷 B（図 4-2-7）で行っていた。しかし、治山工事のため 1999 年 10 月からは赤松谷 B から 350 m 西に離れた赤松谷 C に移動して雨量観測を行った（図 4-2-8 の A）。赤松谷 C の斜面に発生する地表流の流量は、量水堰（長さ 0.6 m、幅 0.43 m、高さ 0.4 m）に設置した水圧式水位計（コーナーシステム社製 KADEC-MIZU）で測定した量水堰の水位を流量に変換する方法（流量検定）により求めた。量水堰に設置した三角堰の角度は、流量の感度を上げるため 30 度とした（図 4-2-8 の B）。三角堰の流量を q (ℓ / sec)、水位を H (cm) とすると、設置前に室内で行った流量検定の結果、水位流量曲線は 4.1 式で示された。

$$\text{試験地： } q = 0.0037 H^{2.5} \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

上記の流量観測で得られた地表流がもれなく沈砂池と量水堰に流れ込むようにするために流路下流端と沈砂池の接続にコンクリートを使用したため、水の浸透しないコンクリート打設部分(面積 1.4 m²)が生じ、そこから発生した地表流が含まれていると推定される。そこで、観測結果からコンクリート打設部分で発生した地表流を除外するため、赤松谷 C では以下の 4.2 式にしがたって地表流の総流出量を求めた。

$$Q = Q_0 - 1.4 (R / 1000) \quad \dots \dots \dots (4.2)$$

ここで、 Q : 赤松谷 C で発生した地表流の総流出量 (m³)、 Q_0 : 観測された地表流の総流出量 (m³)、 R : 地表流発生期間の雨量 (mm) である。本研究では赤松谷 C に発生した地表流は、4.2 式が、 $Q > 0$ となる地表流と定義し、これを満たしていない地表流は解析から除いた。

地表流とともに流下した土砂は、量水堰上流側に連結した沈砂池(長さ 1.8 m, 幅 0.44 m, 高さ 0.5 m) で回収した。赤松谷 C における流出土砂の回収頻度は、設置当初は水位データの回収に合わせて 1 ヶ月であったが、観測開始から約 2 年経過した 2000 年以降には、土砂流出がほとんど発生しなくなったため、数ヶ月～半年以内とした。回収土砂は持ち帰り、炉乾燥後に重量を測定してから流出土砂量と粒度分析を行った。

なお、観測開始時に生育していた植物はウィーピングラブグラス (*Eragrostis curvula* Ness), ヤマハギ (*Lespedeza bicolor* var. *Japonica* Nakai), メドハギ (*Lespedeza cuneata* G. Don), ススキ (*Miscanthus sinensis* Anderss.) の 4 種であった (表 4-2-2)。

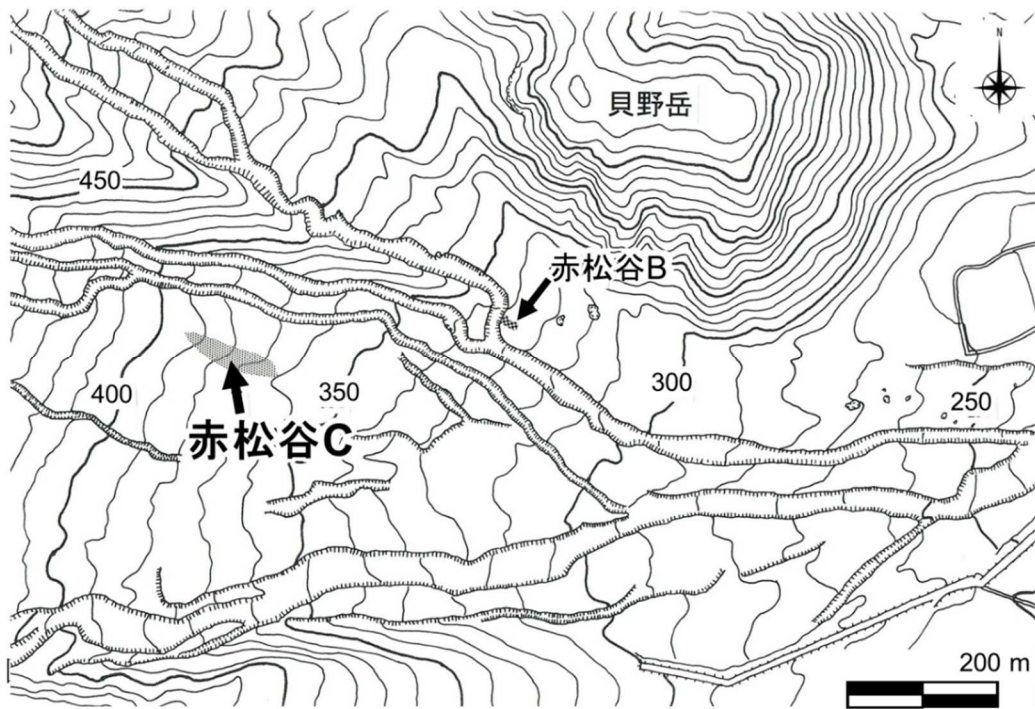


図 4-2-7 赤松谷 C の地形(小川ら, 2000 改変), 赤松谷 B は第 3 章の裸地試験地

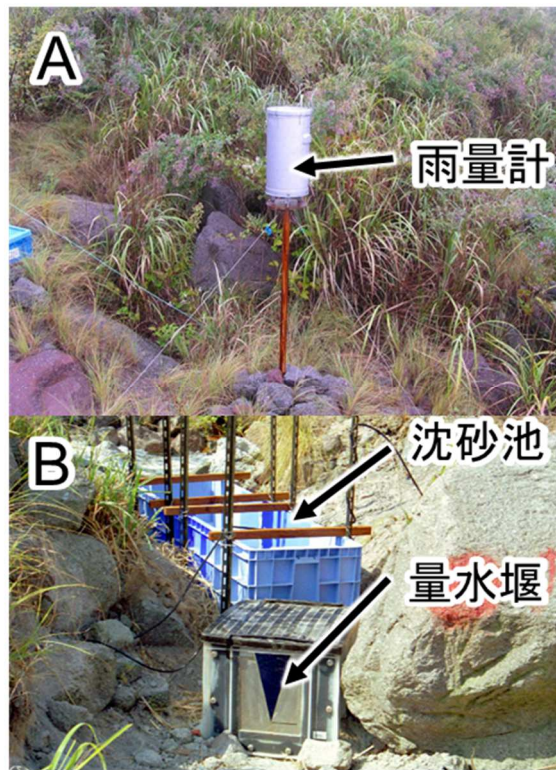


図 4-2-8 赤松谷 C の観測装置

A:1999 年 10 月に赤松谷 B から赤松谷 C に移設した雨量計, B:流量観測装置

4.3 植生調査と降雨流出観測の結果

4.3.1 試験地の植生回復

赤松谷 C における各年の植生調査結果を示す (図 4-3-1, 図 4-3-2)。図 4-3-1 より 1 m コドラートの植生被覆率は、既往の調査結果 (九州日植株式会社, 2000) によると緑化 1 年目の 1996 年から 1997 年にかけて草本が急速に増加し, 1997 年に草本だけで約 100 % に達した。1998 年以降は, 草本の被覆率が約 80 % に減少する一方で木本の被覆率が約 20 % に上昇し, 合計でほぼ 100 % に達した。

草本や木本の平均生育高は施工当年の 1996 年から 1999 年にかけて上昇し, 植物が垂直方向に急速に生育していた。2000 年以降に筆者らが行ったライントランセクトの調査結果では, 調査ライン上の草本の平均生育高は約 1 m であり, ライン上に成立していた唯一の小型木本 (ヤマハギ) の生育高は 2.1~2.6 m に達していた。赤松谷 C の草本や木本の平均生育高は, 前述のとおり急速に上昇していたが, 2000 年以降の平均生育高は, 草本が 1 m 程度で, 木本 (ヤマハギ) が 2.0 m 超えたところで, それぞれ頭打ちとなった (図 4-3-1)。

2000 年の植生は, 草本だけの単層的な群落構造ではなく, ヤマハギ・ススキが上層 (1~2 m), ウィーピングラブグラス・メドハギが下層 (0.5 m 前後) という 2 層の複層構造が形成されていた。その翌年の 2001 年 (緑化 6 年目) 以降の植生は, ヤマハギが上層 (2~3 m), ススキが中層 (1~2 m 前後), ウィーピングラブグラス・メドハギが下層 (0.5 m 前後) という 3 層の複層構造が形成されていた。1999 年までの植生被覆率の調査結果では, 草本の植生率の減少に調和して, 木本の植生率が増加した。側枝の成長 (被覆) が木本の植生率の増加に寄与していたと考えられる。

緑化施工後の復旧が早いところでは, 数年で植物群落の垂直的区分が急速に発達する (岩川, 1970) といわれており, 本調査結果からも赤松谷 C では, 施工から 4 年を過ぎるとヤマハギ (小型低木) の樹林化が始まると考えられた。

図 4-3-2 左に 2000 年以降の植物種別の積算優占度 (生育高と植生率) を示した。導入種のウィーピングラブグラスは, 一定の範囲 (40~60) で値が変動し, 衰退の傾向は見られなかった。これに対して, メドハギの値は経年的に減少し, 衰退していた。導入した草本の優占種は, 2005 年を境に外来種のウィーピングラブグラスから在来種のススキに転換しつつあった。試験地の植生は, 緑化後 10 年以内に外来草本から在来草本に移行する実態が明らかになった。しかし, 図 4-3-2 右 (写真 B~D) の植生外観では, こうした草本種ごとの変化は確認できなかった。

以上の調査結果を整理し、図 4-3-3 に示した。このように植物被覆の立体構造が 2000 年を境（赤線）に単層から複層に変化する 2 段階（前期と後期）の植生回復過程が明らかになった。

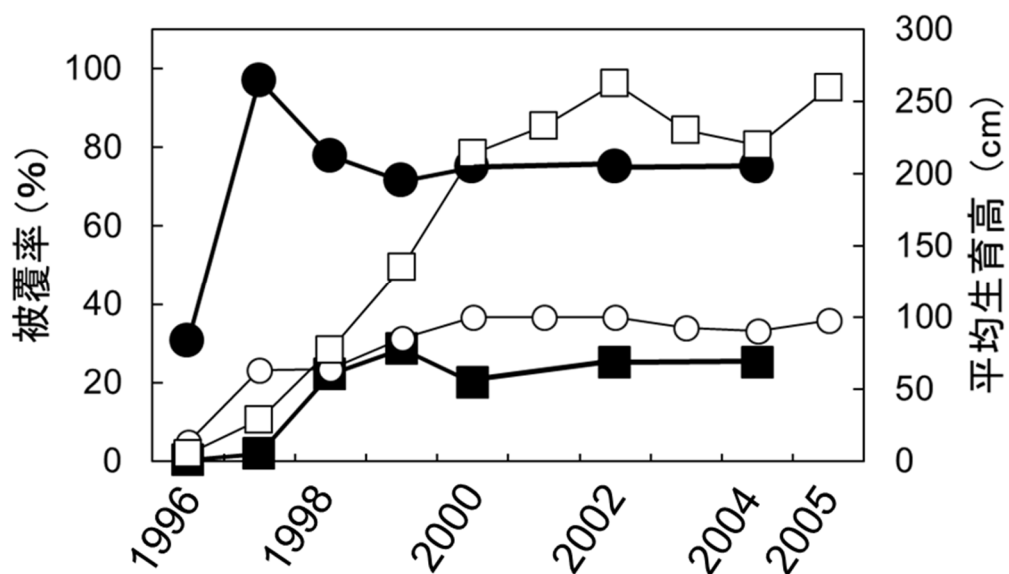


図 4-3-1 赤松谷 C のコドラート被覆率と平均生育高(小川ら, 2011 改変)

●:草本被覆率, ■:木本被覆率, ○:草本生育高, □:木本生育高

注)1996 年～1999 年の植生調査は、九州日植株式会社(2000)の結果を引用。

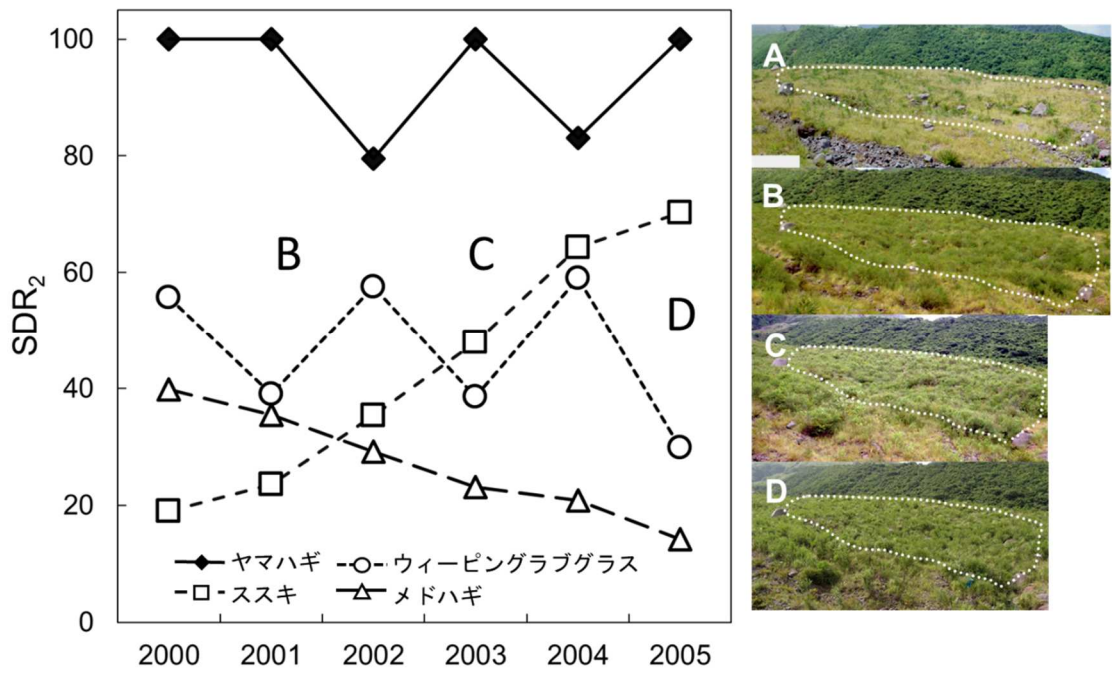


図 4-3-2 2000 年から 2005 年の赤松谷 C における積算優占度と南東から見た植生
(A:1998 年 7 月調査前, B:2001 年 8 月, C:2003 年 8 月, D:2005 年 8 月)

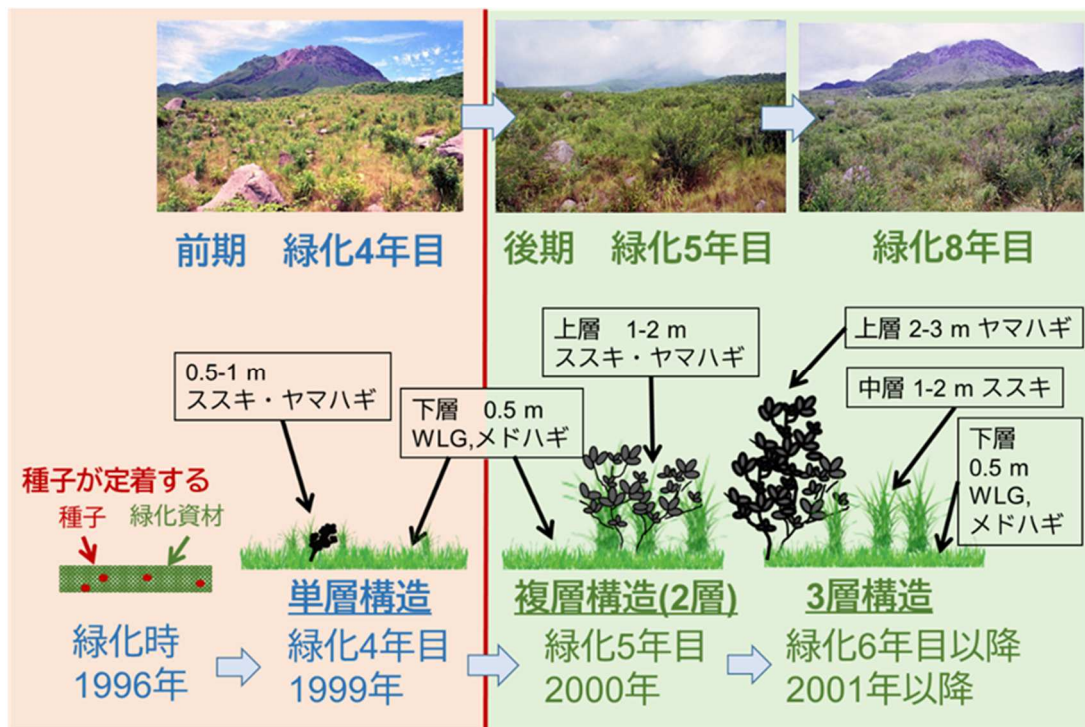


図 4-3-3 試験地における緑化後 10 年間の植生回復過程

4.3.2 植生回復に伴う土砂流出の変動

赤松谷 C の設定当時（1998 年 8 月）の植生は、航空緑化が行われてから既に 2 年が経過しており、メートルサイズの巨礫が露出している場所を除くと緑化植物で覆われていた（図 4-3-2 の A）。

赤松谷 C の設定時は、既に植生回復の影響を受けた土砂流出観測であったため、緑化前の土砂流出と緑化後の比較はできなかった。植生回復による土砂流出抑制効果を明らかにするため、第 3 章で設定した裸地状態の赤松谷 B と同じ時間の降雨で赤松谷 C に発生した土砂流出を比較した。緑化 4 年目にあたる 1999 年 5 月 26 日の赤松谷 C ならびに第 3 章の細粒火砕物流亡試験前（地表が自然状態）の赤松谷 B で同時刻に発生した地表流を図 4-3-4 に示し、地表流の変動を検討した。その結果、赤松谷 C における地表流の総流出量や最大流量は、概ね赤松谷 B の 4 分の 1 となった。また、面積あたりの流出土砂量（この降雨で発生した地表流を含む約 2 週間の積算値）は、裸地の 6 分の 1 となった（表 4-3-1）。

表 4-3-2 に赤松谷 C における各年の土砂流出の変動を示した。緑化 6 年目の 2001 年から 2005 年の年流出土砂量は、ほぼゼロを記録しており、観測期間にわたり赤松谷 C では沈砂地が埋没するような顕著な土砂流出が発生していなかった。1998 年 8 月から赤松谷 C で開始した約 7 年間の雨量観測によると、年降雨量は、1700～2600 mm で推移し（表 4-3-2）、緑化植物の生育に影響する渇水年は見られなかった。

このような赤松谷 C の降雨条件において、航空緑化から 10 年間の植生回復（図 4-3-1）と土砂流出を対比することによって植生回復に応じた流出土砂の変動を整理した（図 4-3-5）。なお、この図の下段（■）に示した 1996 年から 1998 年の土砂流出観測結果は、本研究の降雨流出観測以前に得られた航空緑化工の火砕流堆積斜面の土砂流出結果（山越・諏訪，1998）である。山越・諏訪（1998）の観測斜面（傾斜 20 度，面積 280 m²）は、赤松谷 C より上流（直線距離で西方約 500 m，標高差 120 m）で、本研究と同じ緑化工区（2 工区）に位置している。そのため、山越・諏訪（1998）の観測斜面の植生回復や土砂流出は、緑化施工直後の赤松谷 C の土砂流出と類似していると考えられる。本研究の年流出土砂量の一部は、山越・諏訪（1998）を参照して航空緑化から 10 年間の各試験地における面積当たりの値を示した（図 4-3-5 下段の■と赤●）。

その結果、2000 年（図 4-3-5 の赤線）を境に植生回復や流出土砂が次のように変動していた。図 4-3-3 と同様に 1996 年～1999 年を前期，2000 年以降を後期として、植生回復を 2 段階で分けると、前期の植生回復と流出土砂の関係は、草本と木本の生育高が上昇（図

4-3-5 上段)するにしがたって土砂流出量が調和して減少する傾向を示した(図 4-3-5 下段)。また、土砂流出がほぼゼロ(年流出土砂 0.1 g/m^2 以下、すなわち 1 kg/ha 以下)になる時期(図 4-3-5 下段の後期)と低木(ヤマハギ)の平均生育高が頭打ちになる時期(図 4-3-5 上段の後期)が、2000 年に一致した。2000 年以降の草本の植被率は、図 4-3-1 のとおり 6 年間で約 70% となり、平面的被覆が継続していた。さらにヤマハギのような小型低木は、平面被覆と同時に樹高成長を伴う立体的な被覆が見られた(図 4-3-5 上段)。よって、赤松谷 C では、観測期間に地表流が断続的に発生している環境にかかわらず、草本と低木による植生の複層構造が形成された 2000 年以降は、流出土砂がほぼ抑えられた。平成新山の火砕物堆積斜面では航空緑化から 4 年が経過し、草本と低木の植物群落が完成すると、地表流の発生状況によらず土砂流出が大幅に減少する環境に変化する実態が明らかになった。

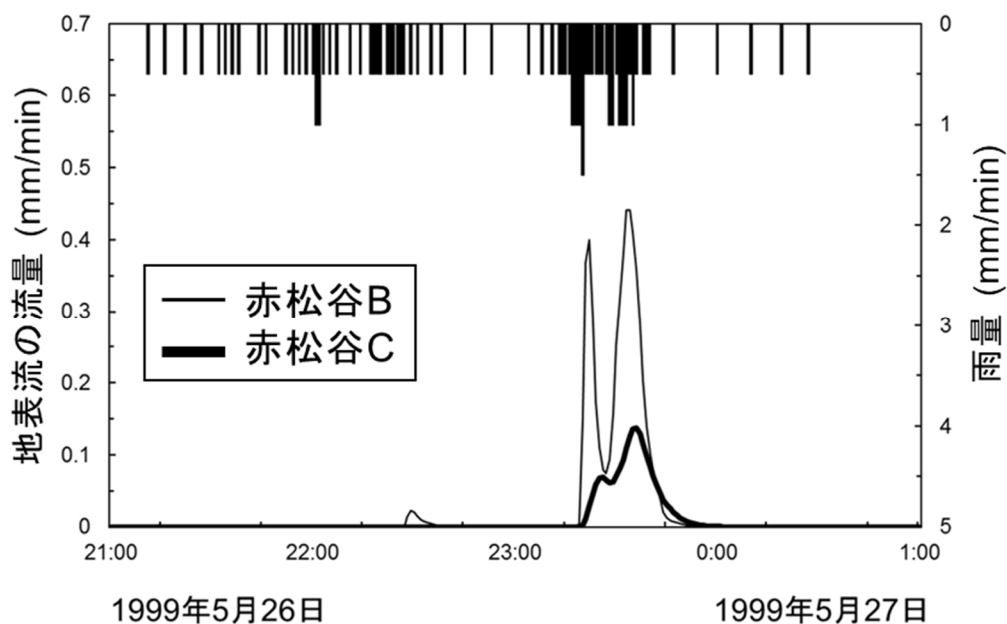


図 4-3-4 赤松谷 B(裸地)と赤松谷 C(緑化地)における降雨と地表流の流出の結果
(小川ら, 2011 改変)

表 4-3-1 1999 年 5 月 16 日から 1999 年 6 月 11 日の赤松谷 B(裸地)と赤松谷 C(緑化地)の観測結果

	地表流出量 (mm)	流出土砂量 (g/m ²)
赤松谷B	12.63	1.60
赤松谷C	3.03	0.26

表 4-3-2 赤松谷 C における降雨流出観測の結果

	年雨量 (mm/yr)	年流出量** (mm/yr)	年流出土砂量 (kg/yr)
1998*	291.0	0	0.00
1999	2684.5	72.68	8.01
2000	1995.5	13.63	0.19
2001	1979.0	0.32	0.00
2002	1701.5	2.71	0.03
2003	2535.0	17.49	0.00
2004	2613.5	6.62	0.00
2005	2304.5	12.21	0.04

* 1998年は8月27日から12月31日の雨量である。

** 2002年9月16日, 2005年9月6日のデータは欠測した。

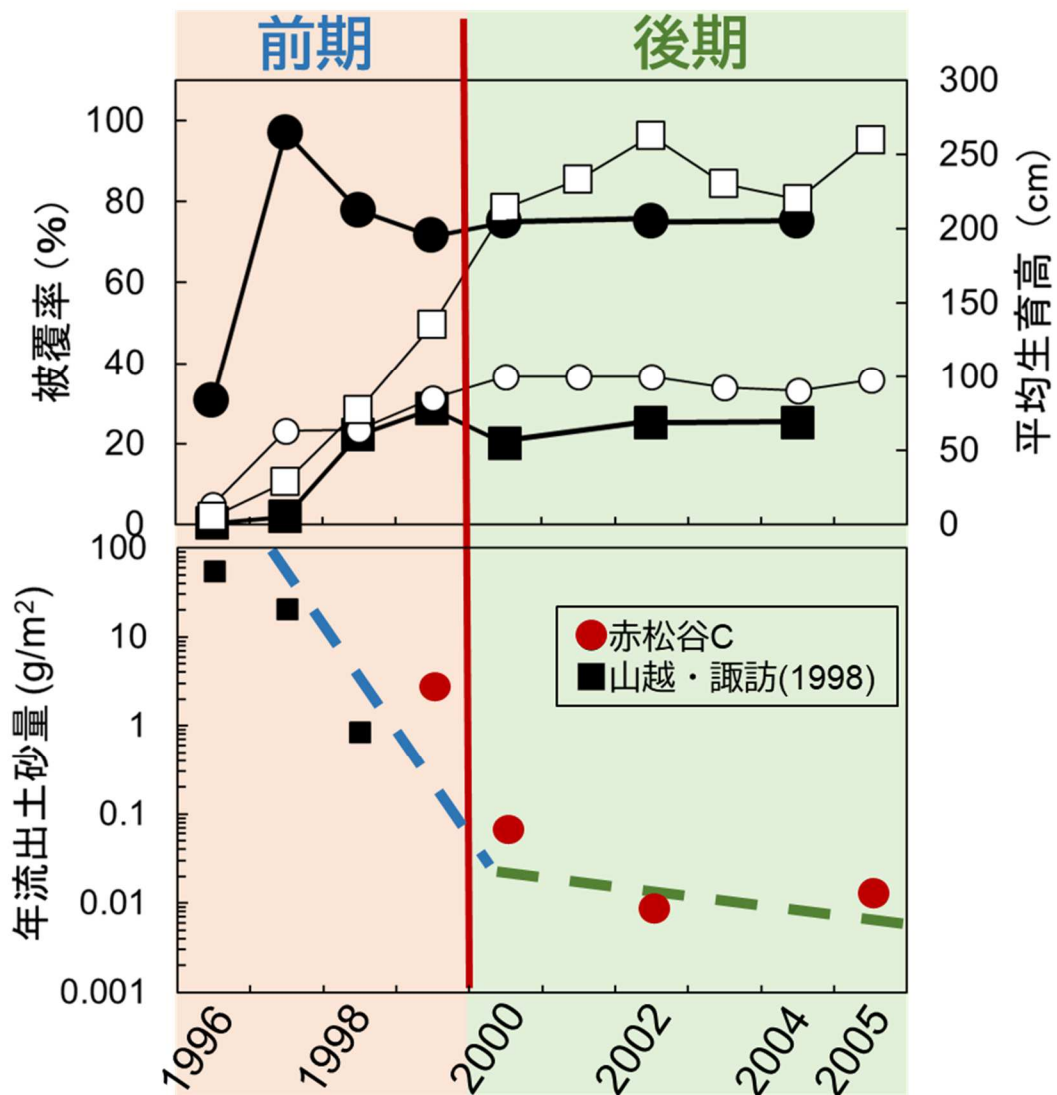


図 4-3-5 各試験地の面積当たりの年流出土砂と緑化植物の生育状況

上段の凡例は, ●:草本被覆率, ■:木本被覆率, ○:草本生育高, □:木本生育高

注 1) 上段前期の植生調査は, 九州日植株式会社(2000)の結果を引用

注 2) 下段前期の■は赤松谷 C より 500m 西方(標高 480m, 傾斜 20 度)であり,

緑化 2 工区の小流域試験地における観測結果(山越・諏訪, 1998)を引用

注 3) 下段後期に土砂流出記号がない年(2001, 2003, 2004)は, 年土砂流出が

ゼロである

4.3.3 植生回復に伴う地表流の変動

赤松谷 C における 10 年間の植生調査結果 (図 4-3-5) ならびに 7 年間の降雨流出観測結果 (表 4-3-2) を整理すると、観測開始 3 年後 (緑化 5 年目) の 2000 年までに、土砂流出が経年的に減少し、ほぼゼロになった。2000 年までに緑化植物の被覆率と生育高がともに経年的に増加しており、経年的な植生回復 (植被率の増加) と土砂流出の減少が調和していた。それから 2000 年以降の流出土砂量は、ほぼゼロの状態になった。2000 年以降の植生は、緑化工で導入された植物の生育が完了し、植物被覆による表面侵食抑止効果によって地表が安定化したと考えられる。

以上が火砕流堆積斜面の植生回復が土砂流出に及ぼす影響である。本節では植生回復が地表流に及ぼす経年的な影響を調べるために、表 4-3-2 の年雨量と地表流の年流出量の関係をグラフに示した (図 4-3-6)。この図では、草本の植生回復が主体であった 1999 年までの期間 (図 4-3-5 上段の前期) に比べて低木群落が完成した 2000 年以降 (図 4-3-5 上段の後期) の地表流の年流出量は、最大でも 20 mm 未満となり、観測期間の最大流出量 (73 mm) であった 1999 年よりも大幅に減少していた。特に 2001 年と 2002 年は、地表流の年流出量が 3 mm 未満に減少した。年流出土砂量のように地表流の流出量がそのまま経年減少することなく、2003 年以降の地表流の年流出量は 6 mm 以上に増加した。立体的な植物の被覆が完成した 2000 年以降の 6 年間では、流出土砂量の観測で見られた植生回復と調和した地表流の経年的な減少傾向は確認できなかった。

そこで、赤松谷における 2000 年以降の植生回復が地表流に及ぼす影響を流出イベントごとに検討した。そのため、植被が草本中心の時期であった 1999 年以前 (図 4-3-5 上段の前期) と、草本と低木で植物群落が構成された 2000 年以降 (図 4-3-5 上段の後期) の地表流に対して、類似した降雨条件 (先行降雨や流出期間雨量) のハイドログラフを比較する。降雨条件がほぼ一致した地表流は、1 組得られた (図 4-3-7)。比較の対象となった地表流出は観測開始から 10 ヶ月が経過し、草本主体の植生であった 1999 年 6 月 24 日 (図 4-3-7a) ならびに観測開始から 3 年が経過し、3 層構造の植生であった 2001 年 9 月 30 日 (図 4-3-7b) であった。

表 4-3-3 に両者の地表流発生に関する降雨条件を示した。最初に流出期間の雨量を比較すると 1999 年の地表流は、2001 年よりも最大雨量 (最大 1 分～10 分雨量) が少ない条件で地表流が発生していることが認められた。2001 年の地表流発生時の最大雨量は 1999 年より大きい値であるにもかかわらず、最大流量が 1999 年の約 15 % であり、総流出量も

1999年の11%であった。前述の通り試験地で観測された地表流の最大流量や総流出量は、植生回復が進むと減少したが、図4-3-7のように、どちらの地表流も短時間降雨ピーク時に地表流出ピークを同時に迎えるハイドログラフであり、観測期間にわたり地表流の発生形態は変化していなかった。

以上の結果から、地表に定着した緑化植物（草本と木本）による立体的被覆が進むと、地表流の最大流量や総流出量が大きく減少することが明らかになった。ただし、流出期間雨量が20mm程度の1組の地表流を比較した結果であり、地表流の出水規模が20mmより大きい場合や小さい場合の検討がさらに必要である。

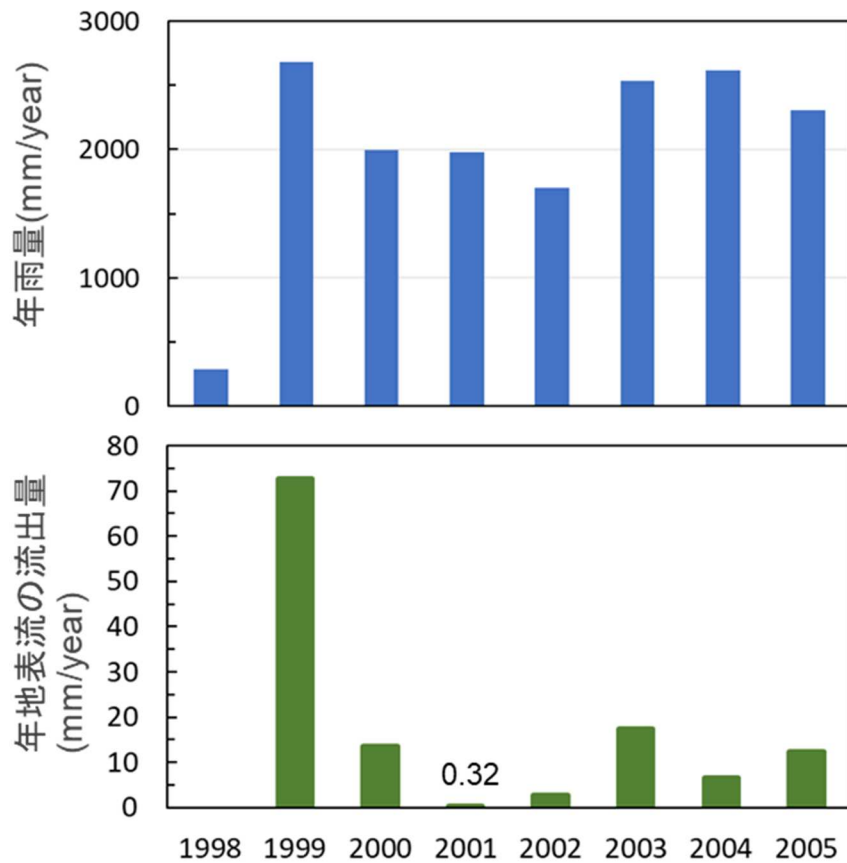


図 4-3-6 赤松谷 C における各年の雨量, 地表流の流出量

表 4-3-3 1999年6月24日と2001年9月30日の降雨と流出(小川ら, 2002)

降雨	6月24日	9月30日
流出期間雨量(mm)	19.0	23.5
24時間先行雨量(mm)	51.5	52.0
60分先行雨量(mm)	16.5	16.5
30分先行雨量(mm)	11.0	9.5
20分先行雨量(mm)	8.5	7.5
10分先行雨量(mm)	5.5	4.5
5分先行雨量(mm)	4.5	3.0
最大1分雨量(mm)	1.5	2.0
最大3分雨量(mm)	2.5	4.0
最大5分雨量(mm)	3.5	5.5
最大10分雨量(mm)	6.5	7.0
地表流		
継続時間(min)	58	62
最大流量(mm/min)	0.035	0.005
総流出量(mm)	0.57	0.061
流出率(%)	3.0	0.3

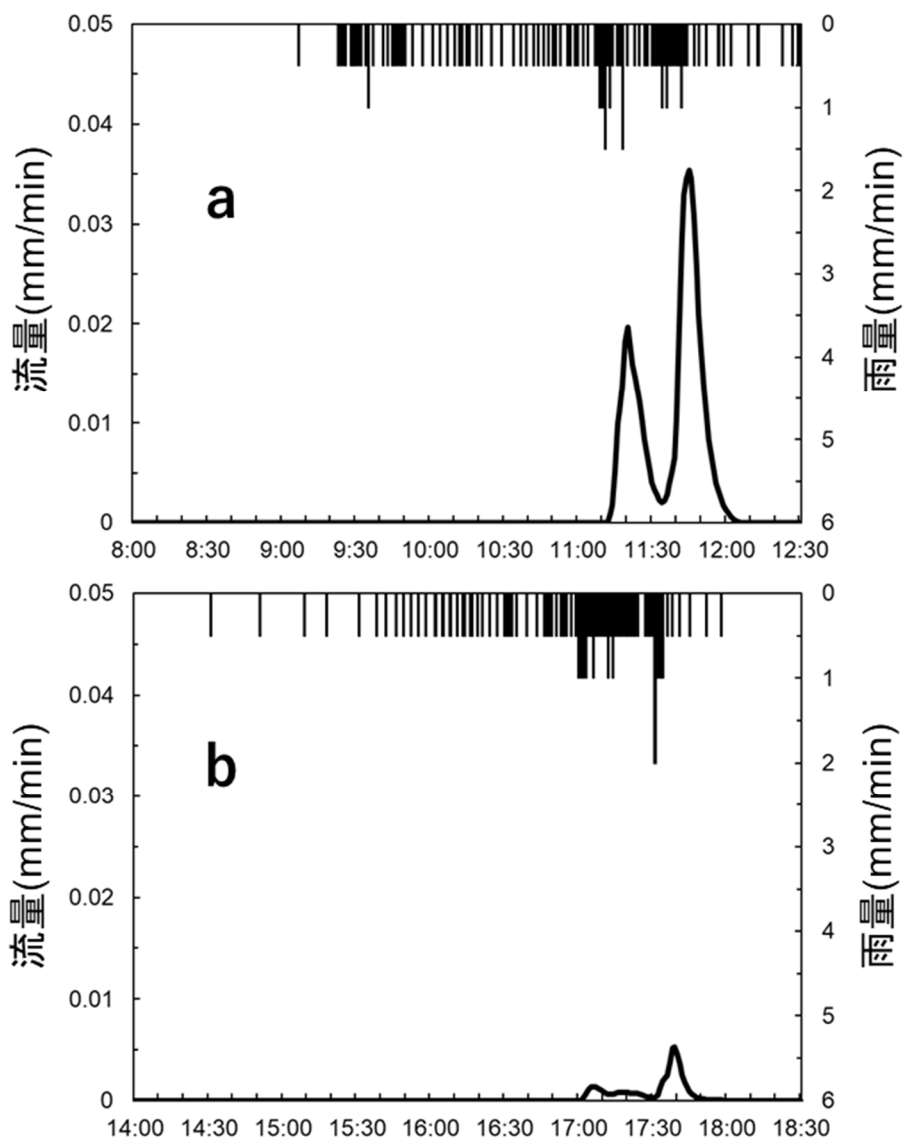


図 4-3-7 赤松谷 C における降雨と流出の結果(小川ら, 2002 改変)

a:1999 年 6 月 24 日, b:2001 年 9 月 30 日

4.4 植生回復が地表安定化に与える影響の考察

航空緑化工に採用された緑化資材であるスラリー材は、液体状で地表の火砕物に散布された。そして、スラリー材の侵食防止効果により草本が短期間に生育し、施工翌年には植被率がほぼ 100 %となった。第 2 章において緑化当時に透水性が高い状態の粗粒火砕物となっていた火砕物の堆積構造を顕微鏡観察した結果、火砕物は、粗粒層と火山砂礫層で構成された 2 層構造であり、特に地表面に位置する粗粒層は、礫の周囲に 1 mm 以上の連続したパッキング孔隙を有していた。このように粗粒化した地表に、液体状のスラリー材を散布すると、図 4-4-1 のような形態でスラリー材が定着し、地表面に位置する粗粒層は、スラリー材の受け皿になったと推察される。すなわち、2 層構造になった地表の火砕物は、地表面に凹凸が多く、スラリー材が密着しやすい堆積構造である。この構造とスラリー材の土壌侵食防止効果が、その後の植生回復に影響していることが推定された。粗粒化した火砕物におけるスラリー材の定着が植生回復に及ぼす影響についての考察は第 5 章で行う。

赤松谷 C の緑化斜面では、表 4-3-1 のとおり同じ観測期間の裸地斜面 (3 章の赤松谷 B) の土砂流出量と比較すると、赤松谷 B (平均傾斜 6 度) よりも急傾斜 (15 度) にもかかわらず単位面積当たりの流出土砂量が少なかった。この比較結果は、噴火活動終息から約 2 年が経過していた平成新山の裸地斜面 (傾斜 14 度) と緑化斜面 (傾斜 13 度) における単位面積当たりの流出土砂量の比較 (西田ら, 1998) と同じであった。裸地斜面 (赤松谷 B) に対する緑化斜面の流出土砂量の低減率は、1999 年の観測結果 (表 4-3-1) よりも 2 年前の 1997 年に赤松谷 C とほぼ同じ斜面傾斜で行った緑化 1 年後の観測結果 (西田ら, 1998) と同程度であり、本研究における緑化 3 年後の比較結果 (表 4-3-1) でも緑化草本が火砕物の流亡を継続的に抑止していた。さらに本研究によって緑化から 4 年以降の緑化斜面でも、引き続き地表流による表面侵食が草本の被覆で抑えられた環境であることが確認された。よって、図 4-3-5 上段の前期に示した 2000 年までの植生被覆率の短期増加に対応した土砂流出量の減少は、草本の早期被覆効果 (西田ら, 1998) によるものと考えられる。そして、2000 年以降の土砂流出量ゼロの状態 (図 4-3-5 下段後期) に達した地表では、草本と小型木本 (ヤマハギ) の植物群落 (図 4-3-5 上段後期) が、地表流による表面侵食を抑止していることが示された。このように赤松谷 C では、前期と後期に分かれた 2 時期の植生回復に応じて土砂流出が時系列に減少した。

本研究では、2 時期の植生回復の前期にあたる草本が早期に被覆し、土砂流出が経年減少している 1999 年までの期間を「植生回復第 1 段階」とし、これに続く後期にあたる 2000

年以降に草本と小型低木が被覆し土砂流出がほぼゼロの期間を「植生回復第2段階」として観測期間を2つに区分した。これらの結果により火砕物堆積地において緑化植物の植生回復により土砂流出がゼロに近い状態に抑制された植生は、植生回復第2段階に立体的な階層構造が形成されたことが示された。そして、この階層構造は、草本と小型低木の3層構造であることが明らかになった。

赤松谷 C において地表流による流出土砂が経年減少しているにもかかわらず、図 4-3-6 に示した地表流の流出量が経年減少しない理由は、新鮮な火砕物が厚く堆積した斜面では森林土壌のように団粒構造が発達し保水能が高い土壌層が火砕物の表土として形成されていないためであると考えられる。赤松谷 C の地表は、緑化から2年経過した植生回復第1段階では、落葉層がない状態であった(図 4-2-2)。緑化から10年経過した2005年の植生回復第2段階の地表では、未分解の落葉層(4 cm)と細根層(5 cm)が形成されていたが、土壌層の形成に至らなかった(図 4-4-2)。したがって未分解の落葉を中心とした地表には、地表流発生を抑える水貯留機能が十分に備わっていないため、試験地では緑化から10年経過しても地表流が抑えられていないと考えられた。

しかし、樹木の落葉層には、表面侵食防止機能があることが報告されている。乾燥重量に換算した値で村井(1984)は2~4 トン/ha、服部ら(1992)は5~7 トン/ha、塚本(1998)は5 トン/ha 程度の落葉が被覆していれば、林地の表面侵食を防止できると報告している。図 4-4-2 に示した赤松谷 C における落葉層の風乾重量は、緑化10年目に60~100 トン/ha に達しており、この緑化斜面においても落葉層による表面侵食防止機能が発揮されていると考えられる。

赤松谷 C では地表流の発生が続いているにもかかわらず、2000年から植生回復第2段階に入った翌年の緑化6年目にあたる2001年に土砂流出が初めてゼロに達した。しかし、その後の降雨条件によっては土砂流出がわずかに発生する年が見られた。赤松谷 C では、緑化以降に追播は行われておらず植生は自然回復に任せられている。今後、植生回復が導入された外来種を主体とする緑化植物から在来種に転換し、土砂流出が長期間ゼロを維持する植生に達した時に成立している土壌環境を明らかにするためには、さらなる継続的な調査が必要である。

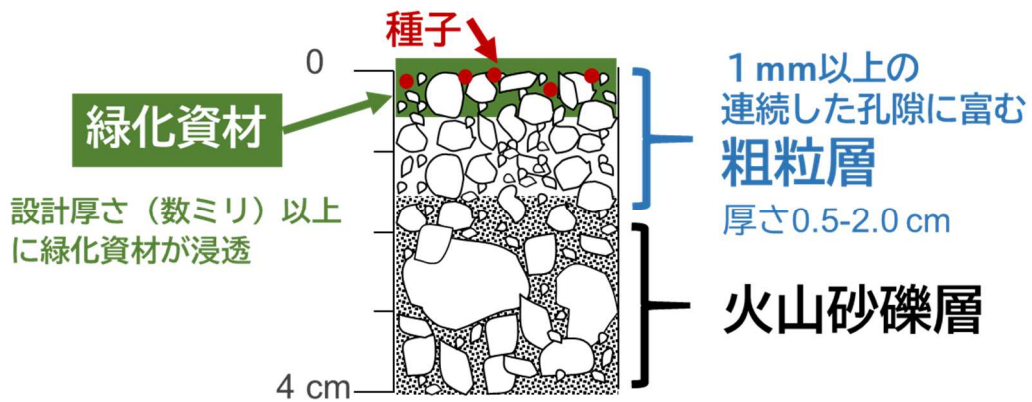


図 4-4-1 火砕物の堆積構造から推定される緑化資材の定着



図 4-4-2 赤松谷 C における緑化 10 年後の落葉層と細根層の断面

4.5 結論

本章では、火砕物が粗粒化した緑化斜面の現地観測によって植生回復が地表流の流出量や流出土砂量に与える影響を調査した。その結果、粗粒化した火砕物堆積斜面に植物が定着してから、2段階の植生回復を経た地表安定化過程が明らかになった。地表面に位置する粗粒層の堆積構造が緑化資材の定着を促し、その後の火砕物堆積斜面の植生回復に寄与していた。すなわち粗粒化した火砕物は、植物定着の受け皿になっていると推定された。

火砕物の粗粒化が進んでいる火砕物堆積斜面の植生回復は、緑化施工開始から4年間の植生回復第1段階では、短期間に生育した草本の平面的な被覆が土砂流出の経年的な漸減をもたらした。これに続く、施工5年目以降の植生回復第2段階では、草本と木本の立体的な被覆と落葉層の発達が生じた土砂流出の抑止をもたらした。以上から植生回復した斜面における地表安定化過程は、2段階の植生回復に応じた時系列的な土砂流出の減少過程であると結論づけた。

第5章 細粒火砕物堆積斜面の粗粒化に伴う 地表安定化過程に関する総合考察

5.1 目的

本章では、第2章と第3章で得られた平成新山の火砕物堆積斜面における地表の粗粒化過程を第4章で得た緑化植物による植生回復に伴う地表安定化過程と統合し、噴火活動終息後の火砕物堆積斜面における地表安定化過程として連続的に解釈することを目的とする。具体的には、火砕物の粗粒化の影響を受けた火砕物堆積斜面では、表面侵食から植生回復に移行し、緑化工によって地表が安定化する過程であることを実証する。

5.2 火砕物の粗粒化に伴う地表安定化過程

噴火後の地表に堆積した火砕物の粗粒化過程について、地表の火砕物が粗粒化した赤松谷Bを研究対象に、第2章では火砕物の堆積構造と物理性変化を検討し、第3章では細粒火砕物の流亡試験で、細粒火砕物の流亡に伴う2段階の粗粒化過程を現地で検証した。

第3章の細粒火砕物流亡試験によって、地表流の発生とともに異なる粒径の火砕物が流出する粗粒化第1段階(図5-2-1)が開始した。すなわち噴火活動中の地表に降下堆積していた細粒火砕物は、透水性の低い細粒火砕物層(図5-2-1のSaやSaG)を形成し、降雨量に応じて残留と流亡を地表で繰り返す。この状態に降雨があると地表付近の細粒火砕物層は速やかに飽和し、この部分の透水性が急速に低下する(野村ら, 2003)。この細粒火砕物層では、図3-3-9①のとおり小雨期に細粒火砕物だけが流亡するため、細粒火砕物が地表から優先的に失われていく。そして梅雨期や台風期のような多雨期には、少雨期よりも流量が増加した地表流によって地表では細粒火砕物と粗い砂礫が表面侵食を受けて、ともに流亡する(図3-3-9②)。こうして地表に堆積した細粒火砕物が粗粒火砕物とともに洗い流されている過程が図5-2-1の粗粒化第1段階である。この第1段階の地表は、図3-3-1のA~Cならびに図3-3-3のAであったと推察された。粗粒化が進行中の地表では、次のような地表流や土砂流出の時系列変動が見られた。地表に残留した状態の細粒火砕物が、1日で発生した大規模な地表流の発生で、地表が粗粒化した状態に変化すると、粗粒化前である粗粒化第1段階よりも地表流の流出量が減少した(図3-3-6)。

粗粒化第1段階につづく次の段階になると、細粒火砕物層が失われて地表に粗粒火砕物が露出する(図3-3-3のB, 図5-2-2)。これが図5-2-2の「粗粒火砕物の形成」から始ま

る粗粒化第 2 段階であり、粗粒火砕物の透水性は粗粒化第 1 段階よりも上昇した。その結果、多雨期に粗粒化第 1 段階より相対的に流量が減少した地表流によって、流亡土砂に占める粒径区分は、礫よりも細粒土砂（砂やシルト）の割合が粗粒化第 1 段階よりも増加した（図 3-3-9③，図 5-2-2「粗粒火砕物が 2 層に分離」）。

また、土砂流出の時系列変動は、細粒火砕物の残留と流亡（図 3-3-1 の A～C，図 3-3-3 の A，B）に応じた地表流の流出量（Q）に対する土砂量（S）の比（S/Q）の変動として、定量的に示された（図 3-3-7 の細粒火砕物散布後の S/Q の変動）。

寺本ら（2004）は、平成新山の火砕物堆積斜面で行った現地水理実験によって、火砕物の中央粒径（d50）が大きくなる（火砕物が粗粒化する）にしがたって、面積当たりの流出土砂量が減少することを明らかにした。本研究において流出土砂から礫の割合が粗粒化第 2 段階に減少する結果（図 3-3-9③）は、寺本ら（2004）と同様に地表の粗粒化が進むと、地表にとり残された受食性の低い礫の流出が抑えられている実態の裏付けとなっている。細粒火砕物の流亡によって地表が粗粒火砕物に変わり、粗粒化第 1 段階よりも粗粒火砕物の受食性が低下した結果、粗粒化第 2 段階における比流出土砂量（S/Q）が減少傾向を示したと考えられた。地表の礫は、地表流の流量減少に合わせて取り残されるので、地表面では礫よりも受食性の高い細粒土砂が選択的に流亡する。その結果、2 章で明らかにした礫の割合が高い粗粒層が地表面に形成され（図 2-4-1 の C，図 5-2-2 右の P1），その下位には砂礫主体の火山砂礫層が形成された（図 5-2-2 右の P2）。地表面の粗粒層には、細粒土砂の流亡後に生じた 1 mm 以上のパッキング孔隙が縦横に分布し、火砕物が大孔隙に富む堆積構造に変化した（図 2-4-1）。

上記の考察から、粗粒化第 1 段階から第 2 段階に移行した時に見られる土砂流出の減少は、火砕物の粗粒化によることが裏付けられた（図 3-3-7②から③に至る S/Q の低下）。また、粗粒化第 2 段階に移行した時の流出土砂の粒径組成は、粗粒化第 1 段階よりも砂の割合が増加し、砂よりも粗い礫の割合が減少した（図 3-3-9②から③）。よって、火砕物の粗粒化に伴う地表安定化過程は、地表の火砕物が 2 段階の流亡に応じた地表流や土砂流出の減少過程であるといえる。しかし、噴火終了から 3 年経過し、粗粒化が進んだ地表であるにもかかわらず、表 3-3-2 のとおり流亡試験前から土砂流出がゼロではない。よって、2 段階の粗粒化を経て火砕物の受食性が低下したとはいえ、土砂流出が終息しない限定的な地表安定化過程であることが明らかになった。

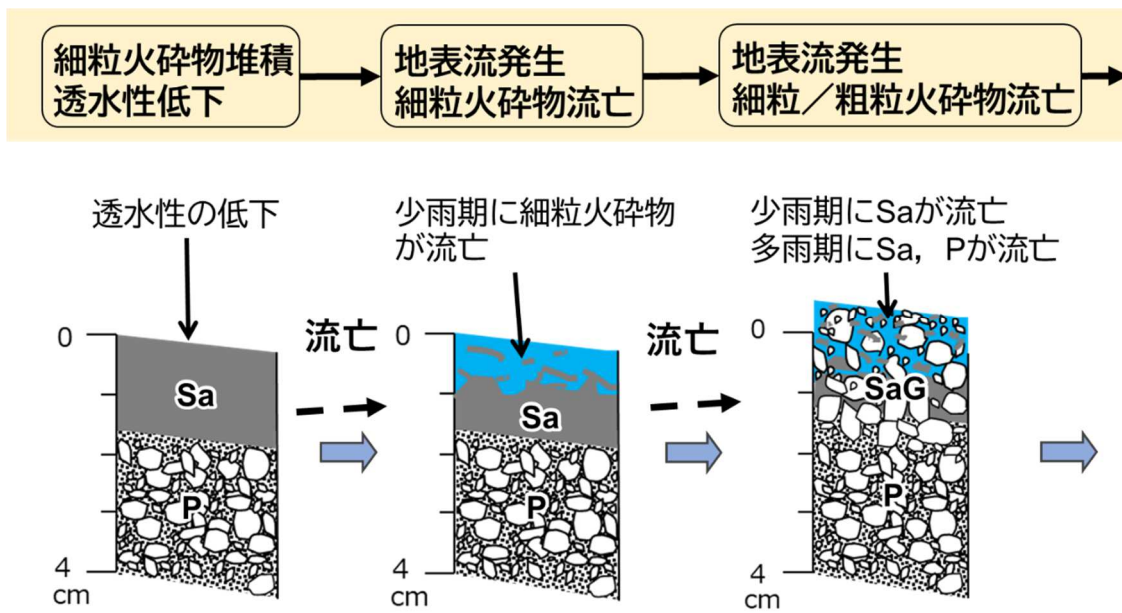


図 5-2-1 火砕物堆積斜面の粗粒化第 1 段階の概念図(矢印は図 5-2-2 に続く)

Sa: 細粒火砕物, SaG: 地表に残留した細粒火砕物, P: 粗粒火砕物

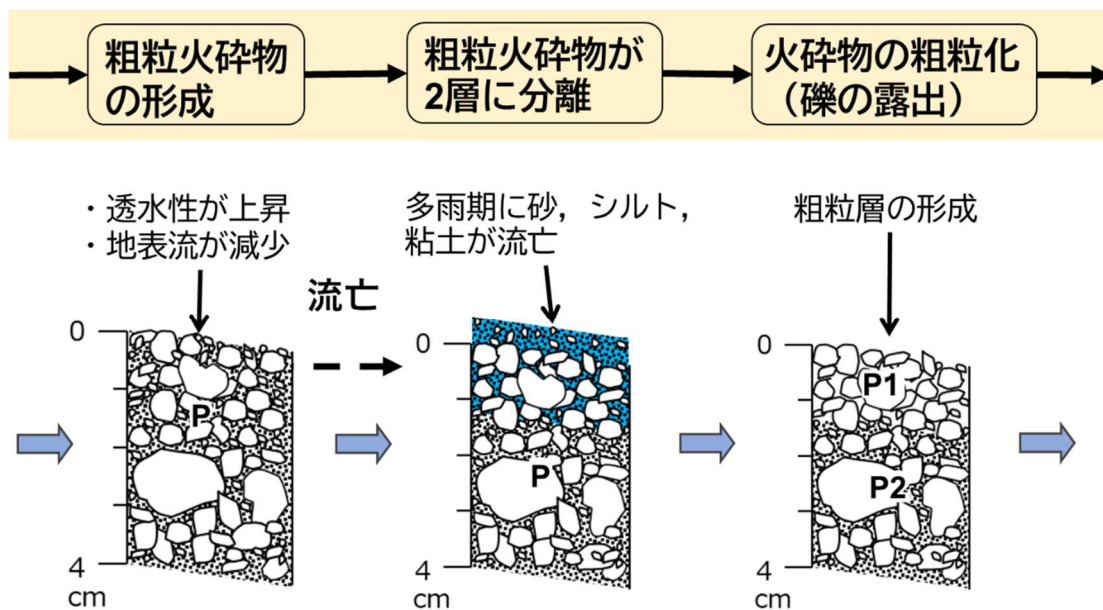


図 5-2-2 火砕物堆積斜面の粗粒化第 2 段階の概念図(矢印は図 5-3-1 に続く)

P: 粗粒火砕物, P1: 粗粒層, P2: 火山砂礫層

5.3 粗粒化した火砕物の植生回復に伴う地表安定化過程

第4章の調査結果から、火砕物が粗粒化した後に緑化された斜面では、2段階の植生回復に伴い流出土砂がほぼゼロに達し、終息に近づいていることが明らかになった(図4-3-5)。ここでは火砕物堆積斜面における地表の安定化過程を連続的に解釈するため、緑化植物の植生回復により土砂流出が終息するまでの地表安定化過程を考察する。

第4章の図4-4-1では、粗粒化した火砕物とスラリー材が一体となり生育基盤が形成されたことを推定したが、スラリー材に混ぜられた緑化植物の生育過程を検証していない。そこで、はじめに粗粒火砕物に散布されたスラリー材と粗粒層による生育基盤の形成を検証し、次に粗粒化した地表に定着した植物の生育に伴う地表安定化過程を考察する。

地表に散布されたスラリー材は表4-2-3のとおり土壤侵食防止剤(NSA101)が植物種子とともに含まれていた。この侵食防止剤の侵食防止形態は、皮膜兼連結型(林野庁, 1980)であり、ポリ酢酸ビニルを主成分とした高分子物質が地表に厚さ数ミリの被膜となって、土粒子を互いに連結させて流亡を防止する。粗粒化した火砕物が緑化工によって植生回復した理由は、スラリー材に混ぜられた植物種子が流亡することなく発芽し、その実生も流亡せずに生育したからである。つまり、スラリー材に含まれた土壤侵食防止剤が、少なくとも発芽生育期間に種子や実生の流亡を抑えた結果である。スラリー材の土壤侵食防止機能が一定期間持続するためには、地表にできた資材の皮膜が壊れない状態を維持する必要がある。粗粒化した火砕物は、第2章の調査結果よりスラリー材の流亡を抑止する2つの性質を持っていた。①粗粒火砕物の透水係数は、 5.38×10^{-3} (cm/s)であり、砂礫で構成された粗粒土に相当する値であった。この値を1時間当たりに換算すると194 (mm/h)と高い値であり、通常の降雨であれば地表流が起こりにくいと考えられる。②地表面を0.5~2 cmの厚さで被覆する粗粒層を構成する土粒子は、80%以上が礫であった。また、粗粒層の孔隙は多孔質で、土粒子の間に1 mm以上のサイズで連続した状態で分布していた。そのため地表に位置する粗粒層では、液体状のスラリー材が浸透すると同時に、スラリー材に混ぜられた先駆植物の小粒種子が、粗粒層の連続した孔隙(パッキング孔隙)に入り込んだと考えられる。また、緑化工で導入したイネ科草本の小粒種子は、えい果と呼ばれる果皮と一体化した果実である。たとえば、現地に生育するイネ科草本であるススキとシナダレスズメガヤのうち、ススキのえい果は、長さ1.9 mm、幅0.5 mm、厚さ0.2 mmであり(笠原, 1982)、シナダレスズメガヤのえい果は、長さ1.5 mmである(桑原, 2008)。これらの種子は、粗粒層の孔隙に入り込めるサイズである。さらに、緑化された粗粒層に

は、受食性が細粒火砕物よりも低い礫と、その間隙を埋めたスラリー材が一体となって、地表流による表面侵食に抵抗する働きがあったと考えられる。しがたって粗粒層とスラリー材が結合した被膜は、種子が発芽生育する基盤として有効に機能したと推察される。

次に粗粒層に実生がどのような形態で定着したかを考察する。緑化工で主に使用する先駆植物のうち、主なイネ科草本の種子根や一次分枝根の根径は 0.15~0.75 mm であり（ラッセル，1981），イネ科牧草の根径は 0.4~0.6 mm である（小林，1977）ことが報告されている。この粗粒層に、イネ科草本が播種された場合、種子から発芽生育した根の直径よりも大きい 1 mm 以上のパッキング孔隙が粗粒層に分布しているので（図 2-4-1 の C），根は少ない抵抗で伸長が可能となる。また，1 mm 以上のパッキング孔隙は，表 2-4-1 のとおり粗粒火砕物の縦断方向や横断方向に 1 cm²あたり 16 %程度分布していた。こうした大孔隙が連続する多孔質な地表面は，植物定着に有利であることが，第 2 章で行った火砕物の堆積構造の解析によって推察された。しかし，植物定着に寄与する孔隙率の評価は，他の活火山における粗粒化した火砕物の孔隙率を評価する必要がある，これは今後の課題である。本研究の結果から，平成新山の粗粒火砕物の場合は，大孔隙の割合が 16 %であれば，スラリー材による緑化工で，生育基盤の機能を果たせると考えられた。よって，2 段階の粗粒化を経て粗粒層に形成された多孔質な堆積構造は，緑化植物の効果的な生育基盤として利用できることが明らかになった。

以上の考察から緑化植物の生育基盤形成に欠かせない火砕物の粗粒化を考慮に入れた植生回復過程を時系列で図 5-3-1 と図 5-3-2 に整理した。緑化工による植生回復は，図 5-3-1 「種子が定着」で示した粗粒層が形成された状態にスラリー材が散布された粗粒火砕物から開始する。前述のとおり透水性が高い粗粒火砕物には，スラリー材が速やかに浸透する。特に地表面に位置する粗粒層に浸透したスラリー材が，粗粒層の間隙と礫を連結した生育基盤を形成する（図 5-3-1 の「緑化資材」）。スラリー材が浸透する際に粗粒層に固定された種子は，スラリー材の侵食防止機能が働いて，流亡から保護された状態で発芽した（図 5-3-1 の「植物の生育」）。粗粒火砕物が有する高い透水性と礫の多い粒径組成が，スラリー材や種子の定着に有利に働いた結果，設計時の散布厚（数ミリ）より厚い被膜が粗粒層に形成されたと考えられる。そして，粗粒化した火砕物の植生回復過程は，図 5-3-1 から図 5-3-2 に進むことが示された。具体的には①緑化工施工 1 年目から 4 年目までは草本が急速に地表を被覆し，草丈が 1 m に達し（図 5-3-1 の「草本群落の形成」），②緑化から 5 年目を迎えた 2000 年以降は，木本の生育高が草本を上回り，低木であるヤマハギが優占

種となった(図 5-3-2 の「草本と低木群落の形成」)。草本と低木で構成された生育高の異なる複層構造の植物群落は、斜面を立体的に被覆することによって不安定土砂の生成が抑止され(図 5-3-2 の右「3 層構造の植生」)、③緑化開始から 10 年間で厚さ 3 cm 以上の落葉層が形成され(図 4-4-2 の落葉層)、表面侵食を抑止した。第 4 章では、緑化施工から 4 年間で草本の被覆が急速に進んだ①の植生回復(図 4-3-5 前期)と、それに続く木本の生育による②の植生回復(図 4-3-5 後期)をそれぞれ、①植生回復第 1 段階、②植生回復第 2 段階に区分できた。植生回復第 1 段階では、スラリー材の土壌侵食防止が持続する期間(散布後 3~4 か月位)に緑化草本の被覆率が急速に高まり、緑化開始から約 5 ヶ月で緑化草本が地表面の約 50%を急速に被覆した(九州日植株式会社, 2000)。その結果、植生回復第 1 段階で土砂流出が経年減少した。これに続く植生回復第 2 段階では、緑化 5 年目(2000 年)の草本と低木群落の成立を契機に、それ以前に草丈 1 m の緑化草本が全面を被覆していた時期(植生回復第 1 段階)に比べて流出土砂量がほぼゼロに達した(表 4-3-2)。そして、土砂流出量がほぼゼロに達した時期(植生回復第 2 段階)と複層構造の植物群落の成立時期が一致していた(図 4-3-5)。この図は、緑化試験地で唯一の木本であるヤマハギ(低木)が草本に遅れて成長し、2000 年からヤマハギの樹高が草本の生育高を超えた植生回復第 2 段階で土砂流出がほぼ終息したことを示している。この結果は、低木の被覆が地表流による表面侵食を抑える実態を裏付けている。このように緑化後に見られた草本と木本による 2 段階の被覆状態と調和して、流出土砂量が 2 段階で時系列的に減少し最終的にほぼゼロに至る過程が、植生回復による地表安定化過程であることが実証された。

以上の粗粒層に緑化植物が定着する過程(図 5-3-1)や生育する過程(図 5-3-2)の考察によって、粗粒化した火砕物には、表面侵食と植生回復を中継ぎする役割があることを明らかにした。本研究によって火砕物堆積地において土砂流出を抑え持続的な地表安定化を保つためには草本群落だけではなく、草本と低木の群落形成が重要であることが示された。

本研究の火砕物堆積斜面では、緑化資材と粗粒火砕物による植物の生育基盤から植物が急速に生育した。短期間に植生回復する条件は、生育基盤だけでなく土壌水分環境や土壌養分環境などの土壌特性も重要である。植物の生育には土壌水分が必須であり、明間(2004)は、最も地表が高温乾燥している夏季の赤松谷 C 付近の裸地状態の火砕物地下 10 cm の土壌水分が、乾燥で植物枯死する土壌水ポテンシャル値(永久しおれ点-1500 kPa)よりも大幅に高い値(-50 kPa 以上)で、植物が利用しやすい土壌水分であることを報告した。乾燥に強い緑化草本の種子根は、地表の生育基盤が表面侵食から守られた環境であれば、

それほど深くない地下の吸水可能エリアまで短期間に伸長したと考えられた。こうした火砕物の水分状態を維持するためには、年間を通じて継続的な降水が重要である。赤松谷 C における観測期間の年降水量は 1,700~2,600 mm であり (図 4-3-6), 植物の生育障害となる極端な渇水年は発生していなかった。また, 土壌水分に加え植物の生育基盤に栄養素が必須である。航空緑化工の初播に散布されたスラリー材には表 4-2-3 に示す肥料が混ぜられていた。しかし, 現地では生育にしたがって肥料切れによる緑化植物の衰退が想定されていたため, 表 4-2-1 のとおり緑化事業の翌年から 1998 年を除く 6 年間にわたり赤松谷 C をふくむ 2 工区の広範囲に追肥が実施された。緑化後の植生管理として追肥の効果で肥料不足による植物の生育不良は発生していなかったといえる。

5.2 と 5.3 における考察の結果, 火砕物の粗粒化過程と, 緑化工による地表安定化過程を統合すると, 火砕物堆積斜面における地表安定化過程について以下のような連続的解釈が可能になった。噴火で地表面に最後に降下堆積した細粒火砕物が, 降雨時に流亡を開始した (粗粒化第 1 段階)。その結果, 地表の細粒火砕物が粗粒火砕物に変わり, 地表の透水性が上昇した。次に地表面の粗粒火砕物から砂を中心とした流亡が発生し, 地表面の粗粒火砕物に礫が取り残されて, 次第に, 細粒火砕物よりも受食性の低い礫を中心とする粗粒層が形成された (粗粒化第 2 段階)。しかし, 2 つの粗粒化段階を経て, 土砂流出は減少傾向となったが, 裸地状態のままでは土砂流出は終息しなかった。そこに, 緑化工で地表に空中散布されたスラリー材が多孔質の粗粒層に浸透し皮膜を形成した。粗粒層の皮膜が生育基盤となった結果, スラリー材に混ぜられた緑化植物種子から発芽した草本の根は, 根の直径よりも大きな孔隙 (パッキング孔隙) が単位面積あたり 16 %程度認められた多孔質な地表面の火砕物に抵抗なく侵入した。緑化から 4 年間の植生回復第 1 段階では, 緑化草本が順調に生育し, 草本被覆による土砂流出が経年的に減少した。緑化 5 年目以降は, 植生回復第 2 段階となり, 草本と木本による複層構造の植物群落が完成し, 地表に立体的な植物の被覆が完成した。この段階に入り土砂流出が終息した結果, 地表が安定化した。

以上から平成新山の火砕物堆積斜面では, 地被状態が 4 段階に変わる現象 (火砕物の粗粒化と植生回復) が連続的に進行して安定化することを実証した。本研究の成果は, 斜面に細粒火砕物が堆積して表面侵食を受けやすい状態になっていても, 細粒火砕物が流亡して火砕物が粗粒化すれば, 粗粒火砕物が緑化工による植生回復に貢献したことである。よって, 火砕物堆積斜面が緑化工による植生回復を経て地表が安定化するためには, 表面侵食と植生回復を中継ぎする役割を担う火砕物の粗粒化が, 不可欠であるといえる。なお細

粒火砕物が堆積している粗粒化第 1 段階は、活発な表面侵食により植物が定着できない。すなわち細粒火砕物の流亡が進まないと、植物の生育基盤となる粗粒層が形成されない。よって、緑化工を行うタイミングは、細粒火砕物が火砕物から洗い流されて、粗粒層が形成された粗粒化第 2 段階の時期であるといえる。平成新山における緑化施工は、噴火終了から約 1 年後であり、火砕物の粗粒化という観点から、施工のタイミングは適切であったと考えられた。

火山地域における山腹緑化工の主な施工対象は、火山の上流に位置する土砂生産域の山腹斜面である。これまで土砂生産域では、雨滴や地表流による表面侵食を防止するため、覆工、伏工、植生工などで不安定表土を固定している。しかし、立ち入り規制された火山の山腹斜面では、こうした表面侵食対策工による火砕物の固定が十分にできない。そこで、砂防工学で示された土砂移動の制御対策に関する基本原理である「水と土砂の分離」ならびに「水の分散と土砂の分散」に基づき（新谷，1991），土砂生産域から下流に移動する火砕物を流域全体で安全に制御する必要がある。

3.4.1 で述べた通り 0.1 mm 以下の火砕物の粒子は、地表流の流れのなかで浮遊の運動形態をとる。細粒火砕物は、0.075 mm 以下のシルトと粘土が多くを占め（表 2-4-1），浮遊砂となる 0.1 mm 以下の粒子が 90 %（図 3-3-8）であった。したがって、地表流に取り込まれた細粒火砕物は、溪流の河床にほとんど堆積せずに泥水となって流域外の河川や海に運搬されてしまう。これに対して、主に流水で掃流の運動形態をとる粗粒火砕物は、0.1 mm よりも大きな砂や礫が 90 %以上である（図 3-3-8）。砂や礫のような掃流砂は流水で河床近くを滑動、転動あるいは跳躍しながら移動する。立ち入りが規制された土砂生産域の掃流砂は、谷止工や床固工などの対策工によって水と土砂を流域のなかで分離できる。ところが土砂生産域の細粒火砕物は、流水で浮遊砂となり水と土砂の分離が困難である。前述では土砂生産域の火砕物斜面における山腹緑化工のタイミングを火砕物の粗粒化による植物生育基盤の形成という観点から考察した。これに加えて細粒火砕物の流出特性という観点の考察によっても、土砂生産域の火砕物斜面における山腹緑化工のタイミングは、細粒火砕物の流亡によって火砕物が粗粒化した時であると考えられた。

最後に、平成新山と同じ粘性の高いデイサイト質溶岩を過去に噴出した活火山において、緑化植物が植生回復した事例と平成新山の結果を比較することによって、平成新山以外の火砕物の粗粒化が植生回復に及ぼす影響を検討した。この検討から立ち入り規制区域の火砕物堆積斜面における山腹緑化工のタイミングを考察した。この事例は 1977-78 年に噴火

した有珠山の火砕物堆積斜面における緑化工による植生回復である。有珠山では、規模の大きな3時期の噴火に伴い、1977年8月に2回の大きな軽石噴火と1978年10月の水蒸気マグマ噴火により火砕物が堆積した。1977年噴火では、主に粗粒火砕物（軽石）が堆積した後に細粒火砕物による成層構造が生じ、この成層構造の上位に1978年の細粒火砕物が堆積した（山本，1984）。有珠山西麓の細粒火砕物堆積斜面における表面侵食の観測によると、リルとガリでは1978年の噴火に伴い細粒火砕物が堆積した2か月後に侵食が停止し、リルとリルの間（リル間地）の火砕物では約1年後に停止した（山本，1984）。この結果を得た表面侵食観測斜面に隣接する小流域では、山本・今川（1983）が地表流を観測していた。細粒火砕物の侵食とともにリル間地の透水性が増加した結果、経年的に地表流が発生しにくくなり、細粒火砕物の侵食によって粗粒な軽石層が露出したことが報告されている。有珠山では平成新山と同様に噴火終了後に山腹緑化工が広範囲（面積142 ha）に行われた（伊藤，1997）。緑化施工対象地は、上述の山本（1984）の表面侵食観測斜面よりも火口に近く火砕物の厚さが15～70 cmとなっていた有珠山西側外輪山の火砕物堆積斜面であった。ここにスラリー式航空緑化が噴火終息から6～7ヶ月経過した時期の1979年4～5月に行われた。施工6ヶ月後の植生調査から、緑化草本が90%以上の植生率であり（伊藤，1997）、平成新山の火砕物堆積斜面と同様に急速に緑化植物が被覆した。リルでは火砕物が粗粒化して軽石が露出し、リル間地の火砕物は、粗粒化した状態になってから緑化植物による植生回復が進んだと推察される。このように有珠山における施工タイミングは、平成新山よりも早いことが明らかになった。よって、粘性の高い溶岩が破碎された火砕物堆積斜面における緑化工の施工タイミングは、平成新山と有珠山の考察から噴火が終了して1年以内であると推定された。ただし、この推定の根拠となる火砕物の粗粒化に関する実態は、実際に山腹緑化工が行なわれた有珠山火口付近の火砕物堆積斜面の調査結果から得た推定ではない。今後、爆発的に噴火した火山では、実際に緑化工により植生回復を検討する斜面において、植生回復に寄与する火砕物の粗粒化という視点を取り入れた火砕物の実態調査を行うことが課題である。

緑化施工のタイミングに大きな影響を与える火砕物の特性は、本研究で明らかにした火砕物の粗粒化のほかに噴火に伴う火砕物の酸性化に伴う化学性の変化も考えられる。三宅島雄山では、2000年に顕著な噴火が約2か月で終了したにもかかわらず、二酸化硫黄などを含む火山ガスに由来する酸性物質の大量噴出が長期間継続した。立ち入り規制区域における高濃度火山ガスにより酸性化した火砕物は、噴火から7年が経過しても緑化植物の

定着が困難であった（小川ら，2012）。こうした火砕物の酸性化は，火砕物の粗粒化とともに植生定着に大きな影響を及ぼしていると考えられる。よって，立ち入り規制区域の緑化施工タイミングは，前述のとおり 1 年以内と推定したが，2000 年三宅島のように噴火活動終息後の火山ガスの噴出状況によって大きく変わることが示された。また，細粒火砕物の分布は，噴火の規模によって変化する。平成新山と有珠山における緑化施工タイミングは，噴火の規模が 1.1 で述べた比較的大規模な噴火から検討された結果であった。噴火の規模が異なる火山も含めた緑化工によって植生回復できる一般的なタイミングを議論するには，さらに各地の火山における噴火終了前後にわたって火砕物の詳細な実態を調査する必要がある。よって，噴火終了前後の危険な時期に火砕物の粗粒化や酸性化などの実態を明らかにするためには，離れた場所から実態調査できる遠隔探査技術の開発が求められている。

平成新山の火砕物堆積斜面では，緑化工当時も立ち入り規制が続いていたが，噴火活動終息後の火山ガスの噴出は少なく，三宅島のように火砕物堆積斜面の酸性化は継続しなかった。火山ガスの影響を受けていない粗粒化した火砕物堆積斜面では，第 4 章で述べたように緑化資材を空中散布する播種工が，植生回復に効果的であった。しかし，樹林化による植生回復が期待できる植栽工は，多くの人手がかかる作業を要するため，本研究の立ち入り規制区域では困難である。そこで，次の 6 章では，本章で得た成果に基づき，播種工に使う液体状の資材（スラリー材）に代わって，粗粒層を生育基盤として生かす地表安定化資材と，その資材を活用して省力化と自然環境との調和を目指す緑化工法の提案を行う。最後に提案した緑化工法の課題を述べるとともに，遠隔から細粒火砕物の流亡状況や火砕物の粗粒化状況を把握する遠隔探査技術，すなわち粗粒層の観測技術や採取技術に関する展望を述べる。

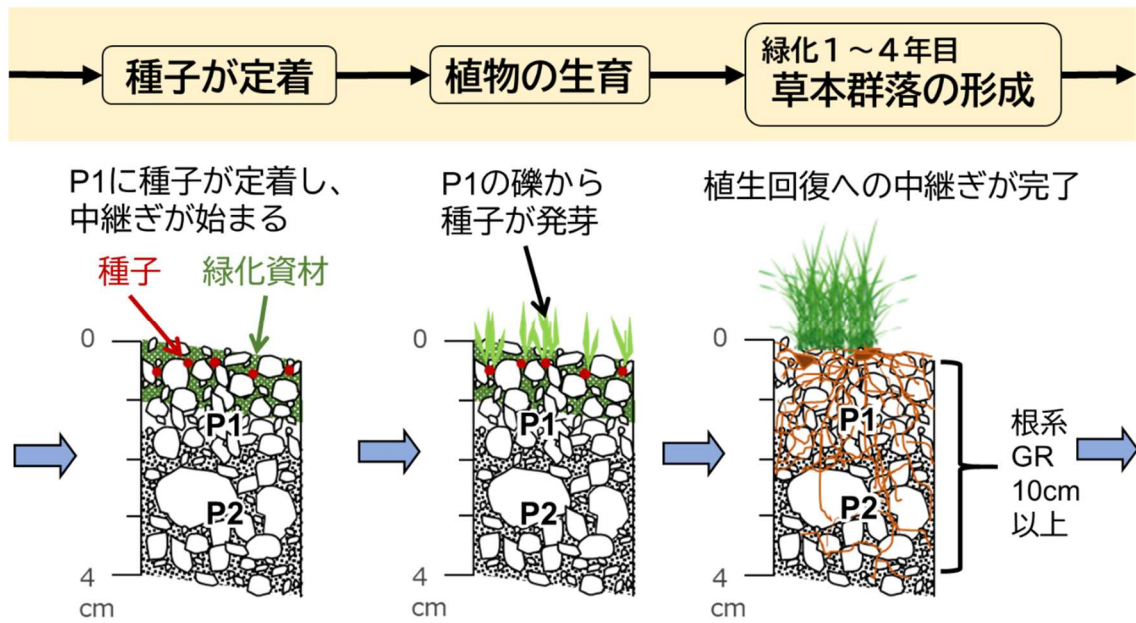


図 5-3-1 火砕物堆積斜面の植生回復第 1 段階の概念図(矢印は図 5-3-2 に続く)

P1:粗粒層, P2:火山砂礫層, GR:根が侵入した火砕物

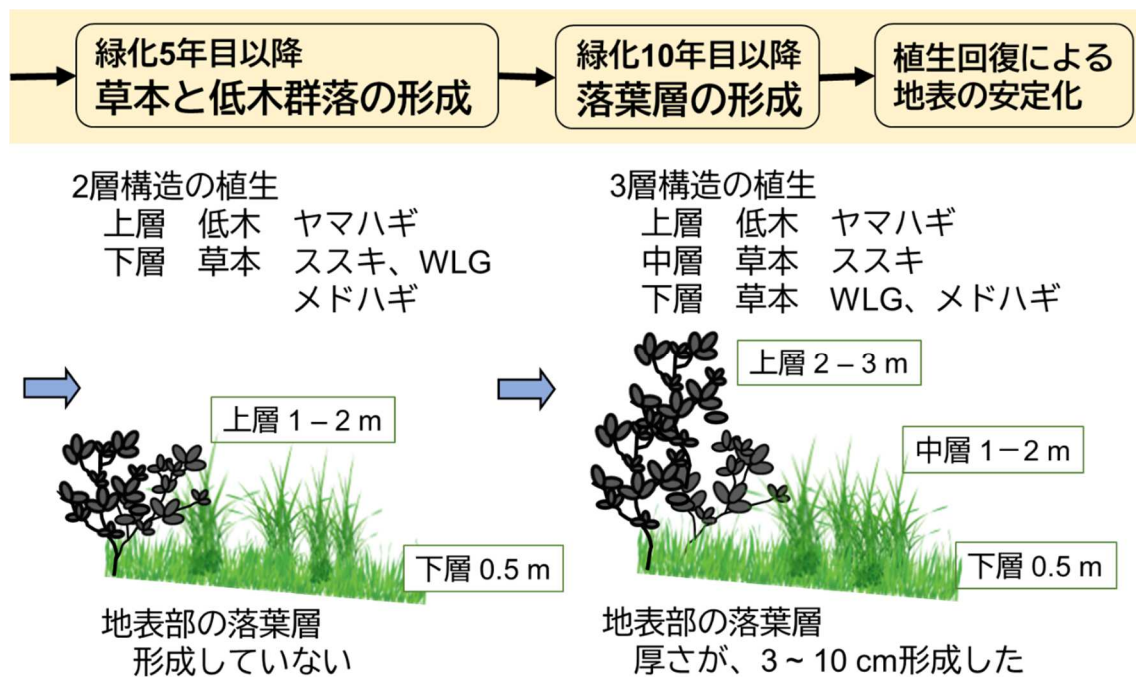


図 5-3-2 火砕物堆積斜面の植生回復第 2 段階の概念図

WLG:シナダレスズメガヤ

5.4 結論

火山噴火後の火砕物斜面における火砕物の粗粒化過程と緑化後の植生回復による地表安定化過程を統合すると、火砕物堆積斜面の粗粒化に伴う地表安定化過程は、以下の通り連続的に解釈することが可能となった。

裸地状態の火砕物堆積斜面の地表における粗粒化過程は2段階であった（粗粒化第1段階と第2段階）。火砕物の粗粒化過程は、平成新山の山腹斜面に堆積した火砕物が2段階に分かれて流亡する過程であった。地表に粗粒火砕物が露出した粗粒化第2段階から粗粒火砕物の上位に形成された粗粒層は、生育基盤に適した連続した大孔隙を持つ堆積構造であった。粗粒層の多孔質な堆積構造が植物生育基盤として植物定着に有利に働いた。そして、この働きによって粗粒化した火砕物が表面侵食と植生回復を移行する中継ぎする役割を持った。この生育基盤が形成された後の植生回復過程は2段階となる。最初の植生回復第1段階は、粗粒化した地表における緑化施工から4年間の急速な草本の被覆であり、次の植生回復第2段階は、草本に遅れて生育した木本（低木）の被覆である。緑化施工5年目以降の草本と低木群落の成立によって、最終的に土砂流出がほぼ抑止され地表が緑化工による2段階の植生回復によって安定化した。

第6章 細粒火砕物堆積斜面の地表安定化過程に関する成果の利活用

6.1 目的

5章の総合考察から得た本研究の成果は、火砕物が粗粒化した地表面にある粗粒層は、液体状の緑化資材（スラリー材）や植物種子が定着しやすい生育基盤の条件を備えていることである。緑化植物の被覆によって火砕物の流亡を抑えるスラリー材は、前述の通り表面侵食防止機能が短期間しか維持できない。この欠点を補うため、現状では火砕物の流亡を抑える緑化植物は、発芽生育の早い外来種のイネ科草本の種子に依存している。また、スラリー材を使用する航空緑化工の長所は、人が容易に立ち入ることができない奥地に繰り返し施工できるが、この工法の最大の欠点は、地域性種苗などを植栽できないことである。よって、平成新山の山腹斜面では、噴火活動終息後も2次災害の危険があり立ち入り規制が続いているため、噴火が終息して25年が経過した現在でも植栽による植生回復ができない。

本章の目的は、スラリー材の短所である表面侵食防止機能の持続性や植栽できないという問題を解決し、粗粒化した火砕物に適応した地表安定化手法として、以下に示す地表安定化資材と植生回復工法を提案することである。ただし火砕物が粗粒化した地表は、細粒火砕物が堆積した地表よりも受食性が低下しているとはいえ、3章のとおり火砕物が粗粒化していても裸地状態では地表が安定化しない。粗粒化した火砕物に存在する粗粒層の特性である生育基盤の機能を発揮するためには、スラリー材に頼らずに播種や植栽が可能で、生育基盤となる粗粒層にある礫の流亡を防止できる地表安定化資材が必要である。それには、立ち入り制限が想定される噴火活動終了後の山腹斜面において、現場の作業時間を減らした簡易な緑化基礎工を実行し、土砂流出を施工地で治める必要がある。

はじめに粗粒化した火砕物の流亡を抑え、地表面の粗粒層を生育基盤として維持できる地表安定化資材を6.2で提案する。次に現場の環境に応じて地表安定化資材を適切に配置することにより、緑化や自然による植生回復を促進して、地表の安定化に寄与する地表安定化工法（点群緑化工法と呼ぶ）を提案する。この工法は、既存の航空緑化工では対応できない植栽を可能にする簡易な緑化基礎工である。この工法で使用する資材は2016年に発明した後の施工実績が限られている。そのため、6.3で火山地域における点群緑化の課題と今後の展開も検討する。

6.2 粗粒層を利用する地表安定化資材と地表安定化工法の提案

噴火活動が終了した火砕物堆積斜面では2次災害を防ぐため、立ち入り規制が長期間継続することが多い。規制を受けた場所の山腹工事は、立ち入り許可条件に基づく作業が求められる。こうした制約のある施工環境で、粗粒化した火砕物の地表面に位置する粗粒層を生育基盤として利用するためには、地形や地表を破壊せずに現地に運搬し、短時間に設置できる地表安定化資材の開発が必要である。そのため、粗粒層を構成する礫の流亡を抑止する地表安定化資材として、著者らは、伊豆諸島の三宅島における緑化試験から三日月形資材（本資材と呼ぶ）を開発した（小川，2019）。

本資材（図 6-2-1）は、2000 年の三宅島噴火災害後に植生被害が深刻化した高濃度火山ガス噴出地域において、表面侵食防止と植生回復を両立させるために考案されたロール状の地表安定化資材である（小川ら，2014；小川ら，2016a の特許第 6037518 号）。本資材の外形は、ロール中央部が最も太く両端が絞られた三日月形状で（図 6-2-1 の A）、内部構造は、中央部が図 6-2-1 の B に示すように積層構造となっている。そのため、本資材の外側に露出している網がたとえ劣化しても、単層構造の資材より中詰め材が外に漏れ出しにくく、本資材が耐久性を維持できる構造となっている。標準的なサイズ（長さ 1.5 m）の重量は、中詰め材の量を調整すれば変えられるが、小運搬の限界となる最大 20 kg に抑えた。本資材は、3 つの特長がある。第 1 に地面を加工せずに両端 2 点止めで設置できる、第 2 に小運搬が可能で設置の際に粗粒層を破壊しない、第 3 にピットに播種や植栽による緑化が可能である。なお、ピットとは、本資材を置いた時に上流側にできる凹地の部分である（図 6-2-1 の A）。

本資材の標準的な製造方法を図 6-2-2 に示す。最初に様々な材質の網（金属，プラスチック，ヤシなど）を敷いて，その上に不織布を重ねる（図 6-2-2①）。これに石礫と木質チップを混合した材料（中詰め材）を三角形（基本形）に置いてから巻き（図 6-2-2②），巻いた網の終端をピンで留めて完成となる（図 6-2-2③）。なお，図 6-2-2①で示した中詰め材の石礫を現地で製造する場合は，たとえば治山砂防ダムに堆砂した礫をふるい分けて現場発生資材として使用することを想定している。すなわち下流に流下した流出土砂の一部を資材に再利用して，上流の土砂流出発生源に戻す地産地消型の資材を目指している。

そして設置の際に両端を上流側に向けて三日月状に変形させる。三日月状に設置することによって，上流側のピットが生み出す地表安定化機能は，次の 3 つ機能である。①ピットに地表流とともに流亡する土砂を受け止められる（菊池ら，2015；小川，2019），②ピ

ットで受け止めた粗粒土砂に播種や植栽ができる（小川ら，2014；菊池ら，2015），③ピットに流れてきた地表流を一時的に貯留できる（小川ら，2016b）。

この施工形態は，乾燥地域の山地において鱗状の深い植え穴に天水を誘導し，植え穴の苗木に水を供給する緑化基礎工である魚鱗工（山寺，2010）に類似している。本資材の利点は，魚鱗工と異なり本資材を設置するだけで，魚鱗工の植え穴と同様の凹地（図 6-2-1 の A のピット）が生まれることである。このピットが，植え穴になるだけでなく水や流亡土砂を貯留する機能を持つ。また，魚鱗工に必要な植え穴を掘る労力を削減でき，本資材の設置密度を調節することで，ピット（植え穴）の数が自由に決定できる。

これらの本資材の特長と資材設置場所を考慮して，表 6-2-1 に示す 2 つの型式（緑化型と待受型）に分けて火砕物堆積斜面に施工する。緑化型は，上記の地表安定化機能②の植生回復を主目的としている。本資材のピットに流入してきた地表流の水を捕捉し，ピットに植栽した植物に水分を供給する。これに対して待受型は，緑化は行わずに本資材が持つ地表安定化機能である①と③の侵食防止機能を植生回復に生かす形式である。待受型は，粗粒層における土砂の流亡抑止を主目的とする。多雨期に発生する地表流と粗粒層の砂礫を本資材で受け止め，上流から流されてきた種子により植生回復を誘導する型式である（図 6-2-3）。待受型は多雨期に地表流による表面侵食が発生するリルやガリなどの自然流路を想定している（図 6-2-1 の A）。この流路を本資材でせき止めれば，地表流の流速と掃流力をともに減らし，縦侵食の拡大を防ぐ簡易な床固工となる。倉田（1979）は，この例として柵樹や捨て石（石礫）を流路に設置する床固工を解説しているが，本資材であれば柵樹や捨て石よりも床固工が容易に施工できる。

本研究では本資材を使った点群緑化工法を火砕物堆積地に提案する。図 6-2-4 に地表が粗粒化した噴火荒廃地における 2 形式の資材を，地形に応じて配置する模式図を示した。本資材は，火山噴火後に火口周囲に設定されて立ち入りが禁じられる警戒区域から外れた立ち入り規制エリア（赤点線より下流側）に，現場の地形に合わせて本資材の設置密度や配置を変えて，点群状に設置する。緑化型の場合は，起伏の少ない山腹斜面に本資材を千鳥状に配置する。この配置によって地表流を資材で分散させて，水の集中に伴う新たな侵食地形（リル，ガリ）の形成を抑止し，本資材のピットに播種や植栽を行って植生回復を進める。たとえば先駆性植物で点群緑化を行った場合，本資材の施工エリアが，緑化植物由来の種子が風や鳥で散布される拠点になることが期待できる。これに対して待受型は，侵食地形に樹枝状かつ階段状に設置する。この配置によって侵食地形の拡大を防ぐための

床固めを図るとともに、地表流とともに流されてきた種子や土砂をピットで捕捉する。すなわち、リルやガリに置く本資材は、土砂や種子を待ち受ける役割を果たす。点群緑化工法は、いずれの型式でも植物定着の拠点づくりに有効な工法であるといえる。

開発当初の待受型は、図 6-2-3 のとおり植物種子がピットに貯留した土砂や資材下流のリルに定着する様式を想定していた。実際の無播種施工では、想定とは異なる植物の定着様式が見られた。それは、本資材の不織布表面にススキの種子が流水や風で付着し、そこに根を下ろして中詰めに定着する様式であった（菊池ら、2015）。また、この定着様式の例として豪雨時に地表流が流下するガリ（幅 1.5 m、深さ 2.5 m）に本資材を設置した試験では、ピットに植物が定着できなかった。しかし、設置 2 年目には、水で実生が流されにくい資材の下流側の資材本体からハチジョウススキが自然定着していた（図 6-2-5）。本資材へのハチジョウススキの定着実態に関して菊池ら（2015）は、中詰め材の保水環境がススキの生育基盤として機能したことを示唆している。本資材の網、チップ、不織布、砂礫で構成された多層構造が、資材の保水機能を高めていると推定されるが、保水機能の定量的評価は今後の課題である。粗粒化した火砕物の保全と緑化を両立させる三日月形資材は、現在も改良を重ねている。

次節で本資材を使った点群緑化工の課題と今後の展開について述べる。

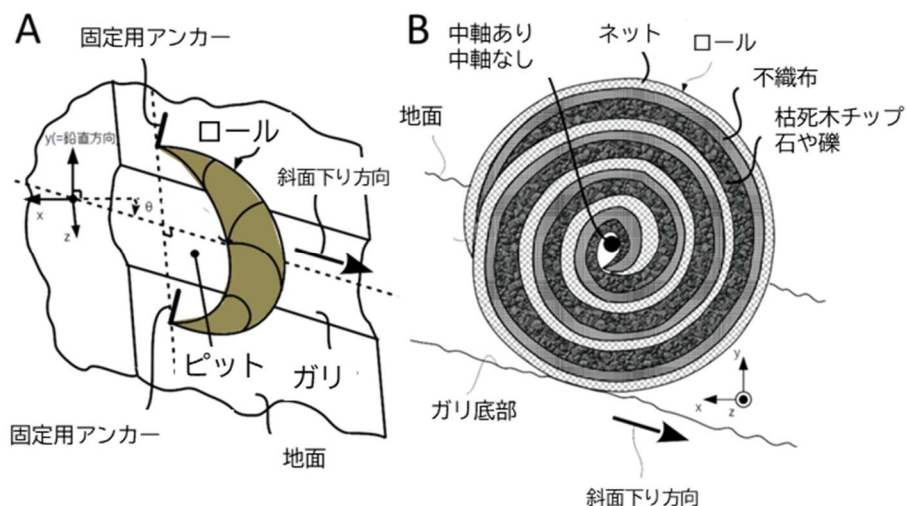


図 6-2-1 三日月型資材(特許第 6037518 号)

A:全体図, B:中央断面図



図 6-2-2 三日月型資材(弧長 3 m)の製造方法(小川, 2019;特許第 6037518 号)

①中詰め材を網に敷く, ②網を巻く, ③完成

表 6-2-1 緑化型と待受型の概要

	設置場所	設置目的	配置形状
緑化型	起伏が少ない斜面	播種、植栽	千鳥状
待受型	侵食地形(リルやガリ)	床固め、種子の誘導	樹枝状

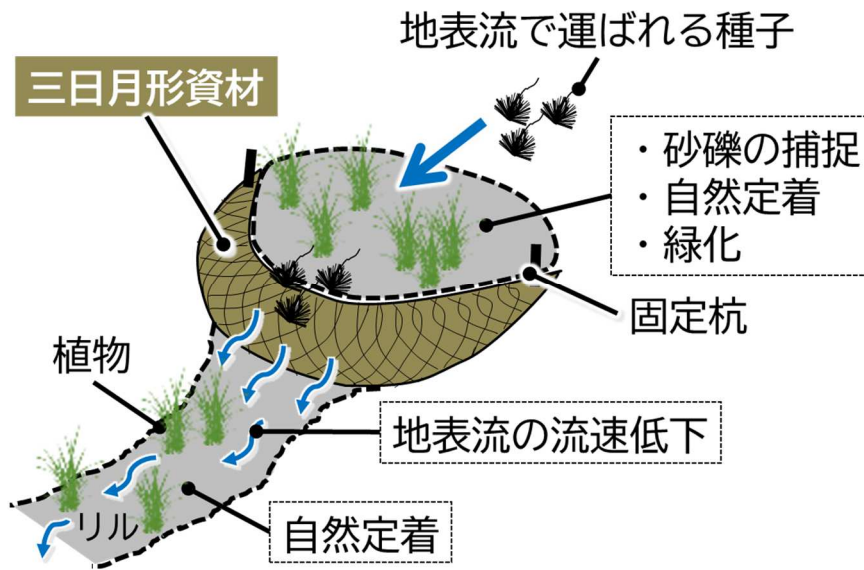


図 6-2-3 三日月型資材による植生回復機能

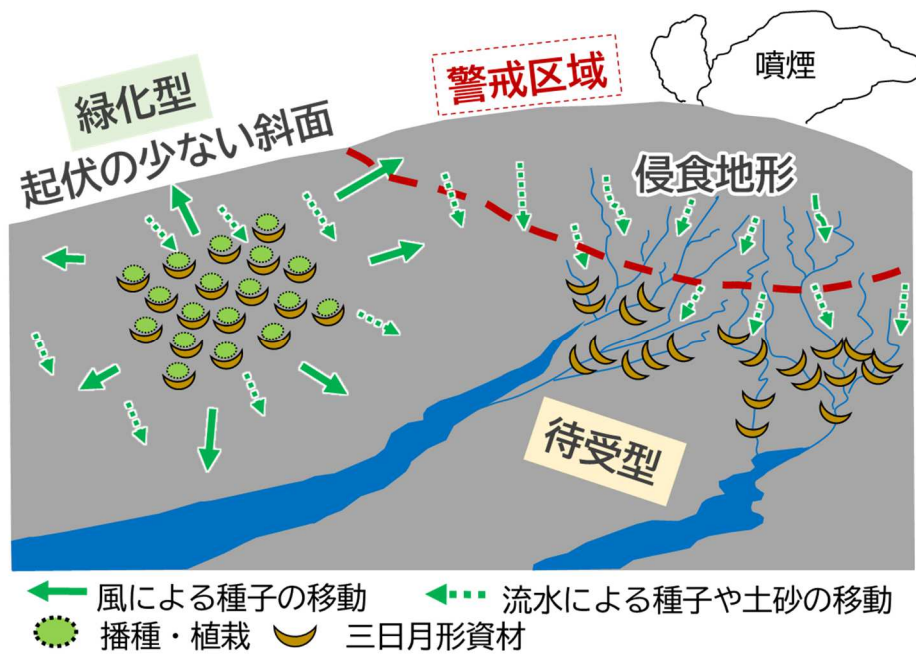


図 6-2-4 緑化型資材と待受型資材による地表安定化工法の模式図



図 6-2-5 三宅島のガリに階段状設置した三日月形資材に自然定着したハチジョウススキ

6.3 地表安定化資材を活用する点群緑化工法の課題と展開

火山地域における点群緑化工法の開発については、2つの課題がある。第1の課題は、本資材が適用可能な植物種の検証が進んでいないことである。本資材を試験している伊豆諸島三宅島における点群緑化は、前節で示した三宅島の自生種であるハチジョウススキやハチジョウイタドリによる播種や自然定着による植生回復が確認されている（小川ら，2014；図6-2-5）。さらに本土を含めた植物種の検証や木本の播種、植栽による生育実態を検証する必要がある。第2の課題が、本資材の設置密度である。前述の類似した緑化基礎工である魚鱗工と比べて少ない労力で設置密度を自在に変えられる点が長所である。なぜなら、施工地の地形、地質、周辺植生に応じて設置密度を変えれば、施工時間や施工時の環境負荷が減らせるからである。これまでの施工地は三宅島の火砕物堆積斜面と神奈川県のアノキ林地に限られており（小川，2019），設置数は起伏の少ない斜面の最大設置密度から推定している。具体的には、本資材の標準サイズである弧長が1.5 mの資材を千鳥状に最高密度に設置する場合であり、等高線方向、斜面方向ともに1.5 mの間隔で施工する。1.8平方メートル当たりの資材数が2個で、1ヘクタールでは2743個となる。現状では最適な設置密度や費用を判断する根拠を得るための施工実績が不足している。

従来から線状や面状に行う緑化工法（村井，1992）では、地形の改変や生育基盤の改良による植生回復技術が多数開発されている。現在では、これらの技術と初期生育が早い外来草本を組み合わせた大規模な緑化が可能となっており、航空緑化工もそのひとつである。これまでの緑化工は、改良された生育基盤と相性の良い植物を組み合わせることで、効率的な植生回復を実現している。本研究では、第4章より細粒火砕物の流亡によって粗粒化した火砕物と航空緑化資材を組み合わせると、地表の粗粒火砕物が生育基盤の役目を果たし、その結果、植生回復が急速に進行して地表が安定化した。よって、火砕物堆積斜面における航空緑化工では、粗粒化した火砕物と急速緑化資材の組み合わせが適合して、従来の緑化工と同様に、地表が植生回復によって短期間に安定化したといえる。

これに対して、点群緑化工法は、スラリー材のような生育基盤を改良する資材に頼らない工法で、粗粒層における礫の流亡を本資材で抑えながら、粗粒化した火砕物を生育基盤として利用する。そのため従来の緑化植物種子を使った急速緑化工法よりも遅速であるが、従来の緑化工では対処できない自生種と相性の良い現場に適用できる可能性がある。例えば、流水による侵食が激しいガリに設置した三日月形資材に風散布植物であるハチジョウススキが、施工翌年に自然定着した実態（図6-2-5）によって、その可能性が示唆された。

最後に、火砕物堆積地における植生回復に重要な火砕物の粗粒化過程を、噴火活動の終了前後から随時把握するために欠かせない観測技術に関する今後の展開について触れる。第4章で述べたように立ち入り規制区域となった火砕流堆積斜面における植物種子の散布は、有人ヘリコプターで緑化資材を大量に投入した緑化工法で行われた(図4-2-5)。この時に使われた緑化資材(スラリー材)は、すでに緑化資材が定着しやすい粗粒化した火砕物に散布されたため、急速な植生回復が可能となった。こうした既存の緑化工法では、生育の早い植物の種子散布でしか植生回復が見込めないため、地域の生物多様性に配慮した植生回復が期待できない。

今後、新たな爆発的噴火で生まれた火砕物堆積斜面に点群緑化工法を実行するためには、火砕物が粗粒化する実態を噴火活動の危険が及ばない場所から安全に観測する技術が必要となる。植生が失われた地表に堆積した細粒火砕物の流亡状態を遠隔から無人観測し、場合によって地表の火砕物試料が採取できれば、火砕物の粗粒化実態を随時把握しながら航空緑化工や点群緑化工のタイミングを検討できると考えられる。

近年、小型無人マルチコプター(小型 UAV)の運用技術が急速に発展している。平成新山では、2016年に小型 UAV を使った土砂サンプリング装置の投下実験と土砂回収実験が行われた((国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2016; 永谷ら, 2018)。実験の目的は、小型の UAV による遠隔制御技術を防災に生かすための実証であった。今後、小型 UAV を使った火砕物の観測技術や土砂サンプル採取技術が確立されれば、噴火活動中から火砕物の採取試料に基づいた粗粒化の実態を把握できるようになる。

平成新山の火砕物は、溶岩ドームの崩落・破碎によって生じた火砕流(メラピ型火砕流)に由来している(図1-5-1)。西田(1998)は、平成新山の噴火で崩落した溶岩は、さほど火砕流で破碎されず、火砕物に含まれた細粒火砕物が少ないため、細粒火砕物の直下の粗粒火砕物の透水性が高い値であったと推察している。こうしたメラピ型火砕流の火砕物の特性により細粒火砕物の流亡に伴って地表流の発生が速やかに抑えられた結果、表面侵食が急速に減少したと推察している。これに対し、火砕流の火口からの流下が全方位と広範囲になるスプリエール型火砕流は、火砕物が火口からいったん上空に浮きあげてから崩落したり、火口から火砕物が直接吹きこぼれたりして流下する(宇井, 1997a)。中筋ら(1981)によるとスプリエール型火砕流は、メラピ型よりも溶岩が粉碎されて細粒火砕物を多く含むことが指摘されている。日本国内の火山のなかで、メラピ型よりも規模が大きいスプリエール型火砕流が今後2000年程度の間には発生する可能性のある火山の数は、1929年に噴

火した北海道駒ヶ岳など合わせて 10 火山である（宇井，1997b）。これらの火山では，細粒火砕物が地表に厚く堆積し，細粒火砕物の流亡による影響を受けて斜面からの土砂流出が活発となる粗粒化第 1 段階が，平成新山の噴火よりも広域化し長期化すると予想される。

以上のように火砕物の粗粒化を広域に把握する技術開発では，近年の UAV の観測技術の発展が期待できる。既に述べた噴火当時の火砕物に含まれる細粒火砕物のサンプリング技術や流亡状況の観測技術の開発にとどまるものではない。これらの技術を応用すれば，ヘリコプターによる航空緑化では不可能な細粒火砕物の流亡状況や微地形にあわせた小規模（ピンポイント）緑化技術の開発につながっていくことが期待できる。今後こうした技術を取り入れながら噴火荒廃地の植生定着環境の解明や植生回復技術の発展を視野に入れた研究開発を続けてゆきたい。

第7章 総括

人類は、歴史時代よりもはるか昔から世界各地で噴火による火山災害や火山噴出物による土砂災害に見舞われ、歴史時代においても噴火によって多くの犠牲者が記録されている。なかでも日本列島は環太平洋火山帯の一部で、111の活火山を有する火山列島である。現在も変わらず国民の人命や財産が、噴火災害の脅威にさらされている。

溶岩流出よりも災害の規模が広域化する爆発的噴火では、多様な粒径で構成された火砕物と呼ばれる火山噴出物が火口から短時間に放出され、時には高温のガスを伴った火砕流が高速に流れ下り、山腹斜面に大量に堆積する。たとえ、噴火が終了しても降雨で大量の火砕物が表面侵食を受け、山腹斜面を流下する過程で侵食土砂が溪流を高速移動する土石流に発達する危険が残される。噴火の後に行われる防災対策は、火砕物堆積斜面の下流域における人命や財産を守る目的で、治山砂防施設（谷止工や床固工など）や山腹緑化工が土砂生産域に実施されている。なかでも山腹緑化工は、不安定な火砕物を植生回復で固定する表面侵食防止工法である。

従来の研究によると火砕物の表面侵食過程は、噴火によって生産された火砕物のうち斜面上位に堆積している細粒の火砕物が、地表流により流亡する過程であることが知られている。そして、火砕物堆積斜面では、細粒火砕物の流亡に起因する表面侵食が進行すると火砕物の粒子が粗くなる「火砕物の粗粒化」がみられた後に、植生回復によって表面侵食が終息して地表が安定化している。こうした観点から火砕物の粗粒化には、表面侵食から植生回復への移行を中継ぎする役割があると推定される。しかし、これまでの研究では火砕物堆積斜面における火砕物の粗粒化が、表面侵食や植生回復に及ぼす影響は不明である。そこで、本研究では火砕物の粗粒化過程の解明と粗粒化した火砕物が植生回復に及ぼす影響の解明を目的とした。

研究対象地は、長崎県平成新山の裸地状態の火砕物堆積斜面と、緑化工によって植生回復した火砕物堆積斜面とした。裸地状態の斜面では、火砕物の物理性試験、細粒火砕物流亡試験による地表流と土砂流出観測を行った。植生回復斜面では、植生調査とともに地表流と土砂流出観測を行った。

本章では各章で得られた主要な結論をとりまとめるとともに、今後の研究展開として火砕物の粗粒化に伴う地表安定化過程の研究成果の利活用に触れて、研究の総括とする。

第1章では、噴火で放出された火砕物は、風の影響を受けず降下する粒径の大きな火砕

物が山腹斜面の下位に堆積し、その上位に、空中で分級された小さい粒径の火砕物が、時間差で堆積する実態がある。本研究では、山腹斜面における火砕物の堆積実態によって火砕物を2つに区分した。砂以上の粗いものを粗粒火砕物とし、粗粒火砕物の上位に堆積した砂よりも細かいシルトと粘土のものを細粒火砕物と定義した。これまで火砕物堆積斜面の粗粒化や植生回復に伴う地表安定化に関する研究の背景や既往研究の問題点を論じた。また、問題点を解決するための着想点と研究目的を示した。

第2章以降は、研究フローにしたがって細粒火砕物の流亡に伴う地表の粗粒化過程と粗粒化した火砕物における植生回復過程を明らかにするための現地調査と各種試験を行った。

第2章では、降雨で地表が粗粒化した時期の火砕物の堆積構造と物理性変化を明らかにすることを目的とした。植生回復していない裸地状態の火砕物堆積斜面における粗粒化した火砕物の堆積構造と物理性を把握するため、裸地の火砕物堆積斜面から円筒試料を採取した。粗粒化していない火砕物の円筒試料は、粗粒化した火砕物の現地採取試料に、噴火当時の細粒火砕物を被覆して作製した。最初に粗粒化した火砕物から採取した試料によって、土壌薄片を作製して顕微鏡による微細な堆積構造を把握した。粗粒化した火砕物の堆積構造は2層構造であり、礫を主体とする厚さ0.5~2.0 cm粗粒層と、砂と礫を主体とする火山砂礫層に分かれていた。次に試料の透水試験と粒度分析おこない火砕物の堆積状況に応じた透水性と粒径組成の変化を調査した。その結果、噴火時の地表に堆積した細粒火砕物の飽和透水係数は 1.70×10^{-4} cm/sであり透水性が低く、シルトと粘土で構成されていた。これにより、地表流の発生とともに細粒火砕物が流亡する性質であると推察された。粗粒化した火砕物の上位に見られる粗粒層は、その下位の火山砂礫層よりも細粒土砂を欠いた粒径組成であることから、細粒火砕物が地表流で流亡した結果、2層構造が形成されたと推察された。透水試験や土壌薄片による堆積構造解析によって、透水性の変化は、細粒火砕物の目詰まりや、粗粒火砕物にある1 mm以上の連続したパッキング孔隙に起因していると考えられた。よって、火砕物が粗粒化する前に粗粒火砕物の上位に堆積していた細粒火砕物が流亡し、多孔質な堆積構造に変化したため、粗粒火砕物の飽和透水係数が 5.38×10^{-3} cm/s高い値を示し、透水性が上昇したと推察された。

第3章では、第2章で示された細粒火砕物の流亡によって変化した火砕物の堆積構造ならびに物理性の結果から得た推察を現地検証するため、細粒火砕物の流亡実態や降雨流出の変動に応じた火砕物の粗粒化過程を明らかにすることを目的とした。第2章と同様に地表が粗粒化した裸地状態の火砕物堆積斜面に細粒火砕物の流亡状況を現地観測する試験地

を設定した。噴火活動時の地表から採取した細粒火砕物をあらためて試験地に被覆し、その流亡状況を再現する野外試験（流亡試験）を行った。試験地とした火砕物堆積斜面に流量観測施設を設けて地表流の流量や流出土砂量を計測した。これらの現地観測とともに火砕物の流亡状況を観察し、地表の粗粒化に伴う地表流や土砂流出の変動を明らかにした。その結果、火砕物の粗粒化過程は、雨期に火砕物が2段階で流亡する時系列過程であることが明らかになった。はじめに細粒火砕物は、小雨期に発生した地表流で容易に移動し、粗い火砕物よりも先に流亡する。次に多雨期に残留していた細粒火砕物が粗粒火砕物とともに流亡する過程で細粒火砕物が地表から失われ地表が粗粒化する（粗粒化第1段階）。これにつづく粗粒化第2段階では、細粒火砕物が堆積していた粗粒化第1段階よりも火砕物の透水性が上昇し、多雨期に発生する地表流の流量が減少するため、流亡土砂の主な粒径が礫から砂に代わる。この火砕物の選択的流亡が粗粒化第2段階であり、地表に礫が取り残されて粗粒層が形成される。流亡試験の結果から、第2章で判明した粗粒層の堆積構造は、細粒火砕物の流亡に伴う最初の粗粒化第1段階だけではなく、2段階の粗粒化過程を経て生まれることが明らかになった。

第4章では、第3章の火砕物の流亡を経て粗粒化した火砕物堆積斜面の植生回復に伴う地表流と土砂流出の変動を解明することを目的とした。緑化工によって植生回復した火砕物堆積斜面に第3章と同様の流量観測施設を設けて地表流の流量や流出土砂量を計測し、植生調査で植物の生育状況を把握した。緑化植物の被覆に伴う降雨流出観測と植生調査によって、地表流や土砂流出が変動する過程を明らかにした。その結果、地表に散布された液体状の緑化資材（スラリー材）は、粗粒化した多孔質の火砕物に浸透し、粗粒化した地表の火砕物は、液体資材の定着に寄与したと推測された。緑化斜面の植生は、施工1年目に緑化草本が急速に被覆し、緑化施工5年目以降に草本と小型低木で構成された植物群落完成了。施工開始から4年間に草本の急速な被覆で経年減少していた緑化斜面の流出土砂量が、ほぼゼロとなった時期は施工5年目であり、草本と小型低木の植物群落が完成した時期と一致した。また、植物の被覆だけでなく植物群落から供給される落葉が、土砂流出抑止に寄与していると推察された。このように2段階の植生回復に応じて土砂流出の変動が対応しており、施工1年目から4年目までの土砂流出が経年的に漸減している時期を植生回復第1段階、施工5年目以降の土砂流出が無くなった時期を植生回復第2段階として、それぞれの段階で土砂流出の変動が明確に分かれた。土砂流出は2段階の植生回復と調和しており、第1段階で経年減少し、第2段階で複層的な植生被覆の完成とともにゼ

ロとなった時系列変動であることを定量的に示した。

第 5 章では、これまでの結果を火砕物堆積斜面の地表安定化過程として総合考察した。火砕物堆積斜面の地表安定化過程は、火砕物の粗粒化過程と、植生回復に伴う地表の安定化過程を統合することによって次の 4 段階を順次進む地表安定化過程として解釈できた。はじめに火砕流堆積物斜面では、2 段階の粗粒化プロセスが進んだ。粗粒化第 1 段階は、短時間の降雨で地表から細粒火砕物が流亡することによって火砕物の透水性が向上し、地表流の流出量が減少する過程である。つづく粗粒化第 2 段階は、透水性が高い粗粒火砕物に発生した地表流で砂以下の細粒土砂が流亡し、礫が取り残された結果、地表の粗粒火砕物に礫が主成分の粗粒層が形成され、火砕物が 2 層構造となる過程である。粗粒化第 2 段階で地表に形成された粗粒層の礫は、細粒火砕物よりも受食性は低いと考えられるが、多雨期に発生する地表流で流亡してしまう。よって、粗粒層の流亡を抑える表面侵食防止対策が必要である。このような 2 段階の粗粒化過程を経て粗粒層に航空緑化が実行されて、液体状緑化資材が多孔質の粗粒層に浸透し、植生回復第 1 段階が開始した。この段階は、生育基盤の役割を果たす粗粒層に緑化草本が急速に植生回復し、この植生回復に応じて流出土砂量が 4 年間で経年的に漸減する過程である。植生回復第 1 段階に続く植生回復第 2 段階は、草本と低木の群落が完成する緑化 5 年目以降に土砂流出がほぼゼロに達する地表安定化過程である。土砂流出がゼロに到達した時期は、草本と小型低木（ヤマハギ）の生育による植物群落が完成した時期と一致し、この一致が植生回復による地表安定化の裏付けとなった。以上の考察で述べた地表の火砕物における火砕物の粗粒化過程（2 段階）と植生回復に伴う地表の安定化過程（2 段階）を統合することによって、図 7-1 に示す緑化された火砕物堆積斜面における地表安定化過程（4 段階）として連続的に解釈できることを立証した。

第 6 章では、本研究の成果である植物の生育基盤として有効な粗粒層を利活用することを検討した。はじめに粗粒層を保全する資材を提案した。第 4 章で粗粒層とともに生育基盤を形成した液体状の緑化資材の短所は、播種工に限定された資材であるため、植栽工に使用できないことである。そこで、液体状の緑化資材に代わり、播種工に限らず植栽も可能な表面侵食防止資材（三日月型資材）を提案した。三日月型資材は、面状や線状による既存の治山緑化工法で使用する資材とは異なり粗粒層や地形を破壊せずに設置可能である。たとえ粗粒層の礫が流亡しても、この資材の上流側にできる凹地（ピット）が礫や種子を受け止めて、植生回復を促す。また、ピットに堆積した流亡土砂を利用した草本株や苗木

の植栽が可能である。次に、この表面侵食防止資材を活用した山腹緑化工法として点群緑化工法を新たに提案した。この工法は、地形に応じて資材の設置密度を変えられるため、植物定着の拠点づくりに有効な工法であるが施工実績が少なく、さらなる工法の検証が必要である。最後に、噴火終了後の立ち入り規制が継続している状況で、細粒火砕物の流亡状況の把握が困難な山腹斜面における火砕物の粗粒化過程を UAV で観測する手法の可能性と山腹緑化工への展望を検討した。

本研究では、火砕物の粗粒化過程と植生回復過程を統合した結果、火砕物堆積斜面の地表安定化過程を次のように解釈した。火砕物の堆積構造は、細粒火砕物の流亡によって粗粒化すると多孔質構造に変化した。この堆積構造が生育基盤として効果的であり、植物種子や緑化資材の定着を促した。その後、草本と低木による植物群落の形成と調和して土砂流出がほぼゼロに至る一連の過程が地表安定化過程である。よって、火砕物の粗粒化は、火砕物堆積斜面の植生回復による地表安定化に不可欠な地表面変動である。本研究によって、粗粒化した火砕物は、表面侵食から植生回復への中継ぎ役として地表安定化に寄与していることを示した。

さらに本研究では、火砕物の粗粒化過程で生まれ、生育基盤の役目を果たす粗粒層を利用する治山緑化工法のひとつである点群緑化工を提案したが、この工法は開発途上である。そのため、提案する点群緑化工法の実証試験を続けながら、噴火活動終息後に危険が残された時期に発生する火砕物の粗粒化を早期に把握する観測技術を開発することが課題である。そして、点群緑化工法の実証試験を続けることによって生物多様性に配慮し、粗粒層を破壊しない環境保全型の植生回復工法の展開が期待される。

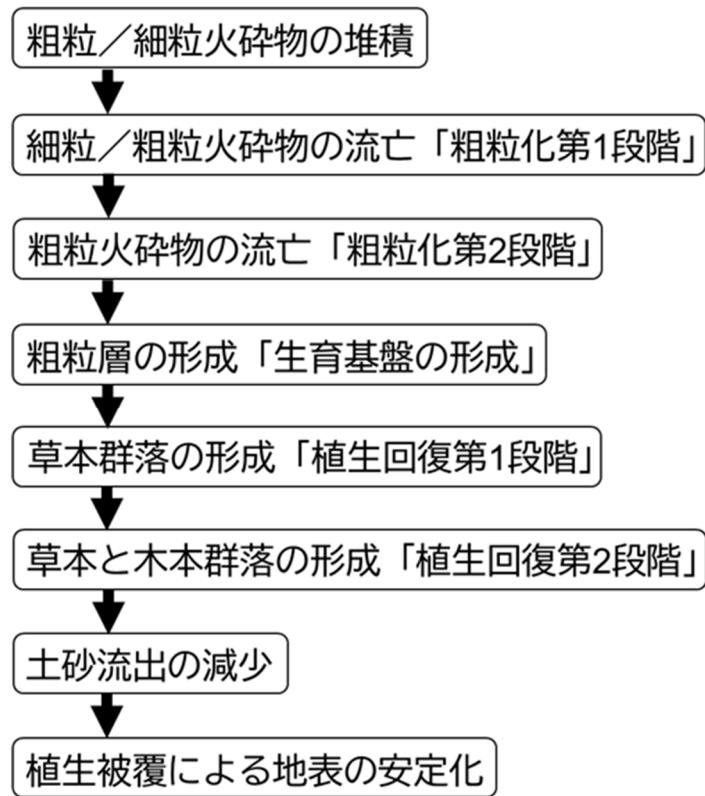


図 7-1 緑化工が行われた火砕物堆積斜面における地表安定化過程

謝辞

本論文のとりまとめに際し、東京農業大学地域環境科学部森林総合科学科 福永健司 教授には、終始懇切なご指導をいただきました。博士論文の審査では、同研究科 橘 隆一 教授、矢部和弘 准教授ならびに森林総合研究所 岡本 隆 山地災害研究室室長の皆様より論文全体にわたり大変有益なご指導とご助言をいただきました。心よりお礼申し上げます。

本研究の調査地が長崎県島原市の平成新山となった端緒は、大学生時代にさかのぼります。島原市は、当時の指導教官であった東京農業大学農学部林学科 山口伊佐夫 教授（故人）とともに 1993 年に卒業論文作成のため平成新山の東隣にある眉山の溪流調査に出かけたゆかりの地でした。山口先生には噴火活動が盛んな時期の平成新山で発生した火砕流災害や土石流災害の惨状を目に焼き付ける貴重な機会を与えていただきました。

大学卒業後の 1994 年 5 月に長崎県に隣接する熊本県の林野庁森林総合研究所九州支所に赴任し、1998 年から平成新山の火砕物堆積斜面において調査する機会を得ました。調査を始めた当時、噴火活動が終了して 3 年が経過していました。そのため、本研究で述べたとおり火砕物堆積斜面の表面侵食は火砕物の粗粒化によって低減し、加えて大規模な山腹緑化工も行われた時期、すなわち地表安定化が進んだ時期に研究が始まりました。

こうした研究環境で、研究テーマに火砕物の粗粒化過程を選択するきっかけを与えていただいた方が 3 名います。当時、森林総合研究所九州支所防災研究室室長であった清水 晃氏（現九州支所研究専門員）、京都大学農学研究科の大学院生であった奈佐原（西田）顕郎氏（現筑波大学生命環境系准教授）、ならびに九州農業試験場 久保寺秀夫 氏（現農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター）です。

清水室長は、1993 年に採取し保管していた細粒火砕物を流亡試験に利用することを提案いただきました。試験の際に細粒火砕物が火砕物の堆積構造や土砂流出に与える影響や試験地の設定など、噴火活動時の災害対応の経験を踏まえた貴重な助言とご指導いただきました。2 人目の西田氏は、本研究をはじめる 1 年前の 1997 年に平成新山でお会いしました。当時、彼は京都大学農学研究科博士課程の大学院生で、自らの試験地を案内していただきました。本研究にかかわる流量観測施設の設定方法や観測データ取得方法など、現場で具体的にご教示いただきました。また、当時の火砕物堆積斜面における火砕物の侵食や植生環境を本研究の開始前に肌で感じることができました。この貴重な経験を試験地設定に生かすことができました。3 人目の久保寺氏は、農地や牧草地における土壌の堆積構造

を解明するため、土壌薄片作製を手がけており、久保寺氏のもとで土壌薄片の作製機材や観察機器が完備されていました。そのため、足繁く九州農業試験場に通り、土壌薄片の作製と火砕物堆積構造の解析手法をゼロから快く教えていただきました。完成した火砕物の土壌薄片の堆積構造をはじめ顕微鏡観察したときの喜びは今も忘れません。

本研究の調査地は、災害対策基本法に基づいて 2021 年現在も設定された立ち入り規制区域に位置しています。そのため、立ち入りの際には地元自治体である深江町（現南島原市）総務課、島原市市民安全課ならびに、調査地周辺の治山工事を計画立案する行政機関である長崎県島原振興局林務課に事前連絡や立ち入り許可申請が不可欠でした。これまで無事故で調査できたことは関係各位のおかげです。お礼申し上げます。なかでも長崎県島原振興局林務課の近重朋晃 係長（現長崎県農林技術開発センター森林研究部門部門長）には大変お世話になりました。近重氏は、平成新山の地形変動を時系列分析ができる 3 次元 GIS（ウィングビート）を 2008 年に扇精光株式会社と開発し、この GIS を無償貸与いただきました。そのおかげで、調査地周辺の斜面侵食や植生回復の実態把握が可能となりました。また、本研究で提案した地表安定化資材について助言をいただきました。

本研究で提案した地表安定化資材の開発は、2000 年噴火後の東京都三宅村三宅島において火砕物堆積斜面の緑化試験区で行いました。三宅島の試験区における調査は、2002 年から立ち入り規制区域で行いました。当時、森林総合研究所山地災害研究室 阿部和時 室長（現日本大学生物資源科学部特任教授）、黒川 潮 氏（現九州支所山地防災研究グループ長）との三宅島における共同調査では、火砕物の実態や緑化試験に関する多くの経験と知見が得られました。こうした現地調査に際し、東京都三宅村総務課防災危機管理係の各位にご協力いただきました。東興ジオテック株式会社 吉田 寛 氏には、2008 年に三宅村において 2 回にわたり緑化試験の現地調査を行い植生回復や緑化施工に関する貴重な助言をいただきました。また、日頃より学位取得に関して激励の言葉をいただきました。

2010 年度から開始した三宅島緑化試験は、東京都三宅支庁産業課 藤岡牧夫 係長（当時）と偶然に林道での出会いがきっかけでした。「何か困ったことがあったら相談してください。」という別れ際の一言が、現在まで続く緑化試験を提案するきっかけとなりました。さらに 2012 年より現在まで東京都三宅支庁産業課と森林総合研究所が提携している技術協定「三宅島の火山性荒廃地における森林復旧技術の実証試験に関する協定」に基づき緑化試験が行われています。当時林務係長の西澤敦彦 氏よりご提案いただいた協定締結によって、三日月型緑化資材の特許出願や開発に弾みがつきました。本資材の開発は、三宅支庁

産業課が発注した緑化試験を受けて進められました。産業課治山担当の皆様には、大変お世話になりました。なかでも東京都三宅支庁産業課 原田佳代子 主事（現東京都産業労働局農林水産部森林課）は、2016年開催の第52回関東・中部地区治山林道研究発表会において噴火荒廃地における本資材を用いた植生回復手法を発表し、優秀賞を共同で受賞しました。日頃の円滑な意見交換が受賞に結び付きました。東京都三宅支庁との協定締結当時に二酸化硫黄ガスが最大日量1,000トン程度噴出していた三宅島の火山ガス環境では、既存の緑化資材や機材に頼るだけでは、植生回復が全く望めませんでした。火山ガス環境が厳しい現地で緑化試験を無事にすすめることができたのは、試験施工を担当した株式会社伊豆緑産の石森良房 社長と岡部宏秋 氏のご協力によります。この試験で行われた試行錯誤のなかから、両名と共同で三日月形資材（特許第6037518号）を発明しました。この発明の基礎となった多くのアイデアは三宅島民宿の新鼻荘(にっぱなそう)女将(平田節子 氏)のもてなしから生まれました。さらに本資材は東京クレセントロール®（登録商標第5634576号）として商標登録に至りました。

本研究の遂行にあたり、京都大学防災研究所の大学院生であった山越隆雄 氏（現国土交通省 国土技術政策総合研究所 砂防研究室長）に現地観測方法の相談や資料の提供でお世話になりました。また、森林総合研究所の皆様には、試験地設定、観測、調査、解析において多くのご協力とご助言をいただきました。試験地設定では、当時の九州支所の皆様（宮縁育夫 氏、清水貴範 氏、野田 巖 氏、出田元起 氏、佐々朋幸 氏）のお力を借りました。執筆にあたり森林総合研究所 三森利昭 元チーム長、岡本 隆 室長や岡田康彦 山地災害研究室 前室長（現企画部研究企画科）や村上 亘 チーム長には有益なご助言と終始温かいお言葉をいただきました。歴代の研究領域長であった落合博貴 氏、坪山良夫 理事、大丸裕武 研究ディレクターならびに玉井幸治 現森林防災研究領域長には、日頃より激励の言葉をかけていただきました。

最後に、家族にはコロナ禍にもかかわらず負担をかけたことをお詫びします。妻 美和からの励ましの言葉に感謝いたします。

本研究の一部は、森林総合研究所 政府外受託研究 F21S20「環境保全型治山緑化資材の評価及び施工技術の開発」（研究代表者：小川泰浩）ならびに日本学術振興会 科学研究費補助金 15H04507「火山島の荒廃地における自生種を用いた緑化に関する生態学的基礎研究」（研究代表者：上條隆志）による助成をうけて行われました。

2021年1月

引用文献

第 1 章

- 1) Adikari, Y., Kikuchi, S., Araya, T. (2005) Sedimentation and succession pattern in regeneration primary vegetation governing gully formation in the area devastated by the 2000 eruption of the Mount Usu volcano, in Hokkaido, Japan. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement volume* 140: 103-113.
- 2) 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. 北海道大学演習林報告 61(1):11-71.
- 3) Chinen, T., Kadomura, H. (1986) Post-eruption sediment budget of small catchment on Mt. Usu, Hokkaido. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement band* 60:217-232.
- 4) Chinen, T., Rivière, A. (1989) Post-eruption plant recovery with reference to geomorphic processes in the summit atrio of Mt. Usu, Japan. *Geographical Review of Japan* 62(1):35-55.
- 5) Chinen, T., Rivière, A. (1990) Post-eruption erosion processes and plant recovery in the summit atrio of Mt. Usu, Japan. *Catena* 17:305-314.
- 6) Collins, B. D., Dunne, T. (1983) Erosion of tephra-covered hillslopes north of Mount St. Helens, Washington: May 1980-May 1981. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement band* 46:103-121.
- 7) Collins, B. D., Dunne, T. (1986) Erosion of tephra from the 1980 eruption of Mount St. Helens. *Geological Society of America Bulletin* 97:896-905.
- 8) Collins, B. D., Dunne, T. (1988) Effects of forest land management on erosion and revegetation after the eruption of Mount St. Helens. *Earth Surface Processes and Landforms* 13:193-205.
- 9) 藤井敏嗣・中田節也(1993)雲仙普賢岳噴火の火砕流—内部構造に関するモデル—. 海洋出版株式会社, 月刊地球 15(8):481-486.
- 10) Hendrayanto, Kobashi, S., Mizuyama, T., Kosugi, K. (1995) Hydrological characteristics of new volcanic ash deposit. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources* 8(5):484-491.

- 11) 井田喜明 (1996) 雲仙普賢岳の噴火. 海洋出版株式会社, 月刊地球, 号外 15:5-14.
- 12) 石川芳治・山田孝・千葉達朗 (1996) 雲仙普賢岳噴火に伴う溶岩流出及び火砕流による土砂量と地形変化. 砂防学会誌 49(1):38-44.
- 13) 伊藤重右エ門・成田俊司・薄井五郎・柳井清治・清水一・佐藤孝夫 (1984) 有珠山航空実播工施行地の植生現況. 光珠内季報 60:12-16.
- 14) 岩川幹夫 (1976) 林叢形成促進のための実播緑化工とその保育管理. (社) 日本林業技術協会, 東京, わかりやすい林業研究解説シリーズ No.56, pp.64.
- 15) 地頭菌隆・下川悦郎 (1989) 火山灰に覆われた桜島山腹斜面における表面流出. 砂防学会誌 42(3):18-23.
- 16) 地頭菌隆・下川悦郎・寺本行芳・永田治 (1996) 雲仙普賢岳周辺斜面における火山灰の分布と浸透能. 砂防学会誌 49(3):33-36.
- 17) 地頭菌隆・永田治・寺本行芳・下川悦郎 (1997) 火砕流堆積物および火山灰に覆われた雲仙普賢岳山腹斜面における表面流出. 砂防学会誌 49(5):42-48.
- 18) Kadomura, H., Imagawa, T., Yamamoto, H. (1983) Eruption-induced rapid erosion and mass movements on Usu Volcano, Hokkaido. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement band* 46:123-142.
- 19) 上條隆志 (2008) 火山島の一次遷移. 重定南奈子・露崎史朗編著, 攪乱と遷移の自然史, 北海道大学出版会, 札幌, p.67-92.
- 20) 環境省自然環境局 (2015) 自然公園における法面緑化指針 解説編, 30pp.
- 21) 川口武雄 (1951) 山地土壌侵蝕の研究 (第 1 報) 従來の資料による統計的研究. 林業試験集報 61:1-44.
- 22) 河原田禮次郎・長勝史 (1984) 桜島降灰の表面流出限界降雨強度. 桜島地域学術調査協議会調査研究報告, 174-176.
- 23) 気象庁 (2013) 日本活火山総覧 (第 4 版) Web 掲載版,
http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/souran/menu_jma_hp.html,
参照 2020.8.8
- 24) 小橋澄治・水山高久・小杉賢一朗・ヘンドロヤント (1994) 雲仙火山における降下堆積物の浸透特性. 砂防学会誌 47(1):47-50.
- 25) 黒川潮・小川泰浩 (2010) 東京都三宅島雄山噴火災害跡地における土砂流出量の観測. 砂防学会誌 63(4):59-62.

- 26) 水山高久 (1997) 火山の砂防. 宇井忠英編, 火山噴火と災害, (財) 東京大学出版会, 東京, p.166-181.
- 27) 森脇寛・広部良輔・熊谷貞治・高橋博 (1979) 有珠山噴火による火山灰堆積層に関する研究—降雨の表面流出と浸食について—. 国立防災科学技術センター研究報告 22 : 83-92.
- 28) 長崎県山地災害対策室・島原振興局農林部山地災害復興課 (1998) 雲仙・普賢岳みどりへの一歩, 216pp.
- 29) 村井宏 (1997) 治山・砂防における植生導入法. 村井宏・堀江保夫編, 新編治山・砂防緑化技術, 株式会社ソフトサイエンス社, 東京, p.91-122.
- 30) 中田節也 (1993) 火砕流の本質—雲仙普賢岳噴火の例—. 土と基礎 41(3):37-42.
- 31) 西田顕郎・小橋澄治・水山高久 (1996) 雲仙普賢岳の土砂流出域における堆積物の浸透能の変化. 砂防学会誌 49(1):49-53.
- 32) 西田顕郎・小橋澄治・水山高久 (1998) 雲仙普賢岳火砕流堆積斜面における植生回復による表面流・土砂流出の変化. 日本緑化工学会誌 23(4):249-255.
- 33) 奥西一夫 (1980) 火山灰が堆積した斜面からの降雨流出と土砂流出. 第 17 回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集:151-152.
- 34) 産業技術総合研究所(2013) 日本の火山, 参照 2020.8.8, <https://gbank.gsj.jp/volcano/>
- 35) 下川悦郎・地頭菌隆 (1987) 火山灰の被覆が火山体の侵食速度に及ぼす影響—桜島火山を中心にして—. 地形 8(4):269-286.
- 36) 下川悦郎 (2011) 土砂災害. 1914 桜島噴火報告書, 中央防災会議 災害教訓の継承に関する専門調査会, p.62-74., 参照 2020.8.8
http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1914_sakurajima_funka/index.html
- 37) 白井知樹・坂本知己・寺嶋智巳・中井裕一郎・北村兼三 (1996) 1977, 78 年噴火以降の有珠山植生回復状況. 日本林学会論文集 107:363-366.
- 38) Swanson, F. J., Collins, B., Dunne, T. and Wicherski, B. P. (1983) Erosion of tephra from hillslopes near Mt. St. Helens and other volcanos. *Proceedings of the symposium on erosion control in volcanic areas, July 1982 at Seattle and Vancouver, Washington*. Public Works Research Institute, Ministry of Construction Government of Japan, p.183-221.

- 39) 高橋清六 (1985) 三宅島における航空緑化工の施工結果について. (社) 農林水産航空協会, 東京, 林業航空技術研修資料, pp.11.
- 40) 竹下敬司 (1987) 広域火山活動に起因する土壌浸透能の変化とそれに伴う山地の地形変化過程. 地形 8(4):227-248.
- 41) Tsuyuzaki, S. (1989) Analysis of revegetation dynamics of the volcano Usu, northern Japan, deforested by 1977-1978 eruptions. *American Journal of Botany* 76: 1468-1477.
- 42) 露崎史朗 (2008) 軽石・火山灰噴火後の植物群集遷移—軽石は軽くない—. 重定南奈子・露崎史朗編著, 攪乱と遷移の自然史, 北海道大学出版会, 札幌, p.37-50.
- 43) 寺本行芳・下川悦郎・地頭菌隆 (2004) 雲仙普賢岳湯江川流域における侵食及び土砂流出過程. 砂防学会誌 57(4):15-25.
- 44) 寺本行芳・下川悦郎 (2009) 桜島の緑化斜面における植物の生長に伴う土砂流出の経年変化. 海岸林学会誌 8(1):37-42.
- 45) 宇井忠英 (1997) 火山現象の多様性. 宇井忠英編, 火山噴火と災害, (財) 東京大学出版会, 東京, p.19-47.
- 46) 鶴川元雄 (2013) 大地震と噴火の連動性について. 地震ジャーナル 55:13-25.
- 47) Waldron, H. H. (1967) Debris flow and erosion control problems caused by the ash eruptions of Irazú Volcano, Costa Rica. *Geological Survey Bulletin* 1241-I, 37pp.
- 48) 山越隆雄・仲野公章・渡正昭・水山高久・千葉達朗 (2003) 2000年三宅島噴火後の雄山山腹斜面におけるガリー形成特性. 砂防学会誌 55(5):40-48.
- 49) Yamakoshi, T., Doi, Y., Osanai, N. (2005) Post-eruption hydrology and sediment discharge at the Miyakejima Volcano, Japan. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement band* 140:55-72.
- 50) 山本博・門村浩・鈴木利吉・今川俊明 (1980) 1977-1978年噴出物に覆われた有珠山西山川流域における泥流の発生. 地形 1(1):73-88.
- 51) 山本博・今川俊明 (1983) 有珠山 1977-1978年噴火物の堆積した斜面における表面流出について. ハイドロロジー 13:25-33.
- 52) 山本博 (1984) 有珠山の一斜面における 1977-1978年降下火砕堆積物の侵食. 地形 5(2):111-124.

第2章

- 1) 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. 北海道大学演習林報告 61(1):11-71.
- 2) Hendrayanto, Kobashi, S., Mizuyama, T., Kosugi, K. (1995) Hydrological characteristics of new volcanic ash deposit. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources* 8(5):484-491.
- 3) 平野宗夫・橋本晴行・川原恵一郎(1996)雲仙・水無川における土石流の流出特性とその変化. 水工学論文集 40:1027-1032.
- 4) 平山良治(1991)土壌薄片作成のための脱水法の検討. 森林立地 33(1):19-24.
- 5) 小橋澄治・水山高久・小杉賢一郎・ヘンドロヤント(1994)雲仙火山における降下堆積物の浸透特性. 砂防学会誌 47(1):47-50.
- 6) 駒村正治(1999)土壌の構造と土壌水の運動. 地域環境水文学, 丸山利輔・三野徹編, 株式会社朝倉書店, 東京, p.79-85.
- 7) 三浦憲蔵(1989)微細構造. 土壌薄片記載ハンドブック, 久馬一剛・八木久義訳監修, 株式会社博友社, 東京, p.58-69.
- 8) 三浦覚・吉永秀一郎・山田毅(1999)堆積リターによる被覆が表層土壌の物理性に及ぼす影響. 第110回日本林学会大会学術講演集:956-957.
- 9) 西田顕郎・水山高久(1998)雲仙普賢岳火砕流堆積物の表面構造. 砂防学会誌 51(3):44-46.
- 10) 小川泰浩・清水晃・久保寺秀夫(2006)雲仙普賢岳の新しい火山噴出物が堆積した斜面表層の土壌微細形態が透水性に与える影響. 日本森林学会誌 88(5):329-336.
- 11) 恩田裕一・山本高也(1998)リターに被覆された土壌表面におけるクラスト形成プロセスの解明. 日本林学会誌 80:302-310.
- 12) 田淵公子(1963)土壌薄片の顕微鏡観察による土壌間ゲキの研究—関東ロームと磐田原赤黄色土—. 農業土木研究別冊 7:21-31.
- 13) 竹下敬司(1996)植生, 土壌, 水と地形変形プロセスの制御. 水文地形学, 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編, 株式会社古今書院, 東京, p.151-163.

第3章

- 1) 江頭進治・芦田和男（1981）山地流域における微細土砂の生産場と流出過程に関する研究．京都大学防災研究所年報 24B-2:239-250.
- 2) 石川芳治・山田孝・千葉達朗（1996）雲仙普賢岳噴火に伴う溶岩流出及び火砕流による土砂量と地形変化．砂防学会誌 49(1):38-44.
- 3) 河原田禮次郎・長勝史（1984）桜島降灰の表面流出限界降雨強度．桜島地域学術調査協議会調査研究報告 第2集:174-176.
- 4) 水山高久（1993）溪流での土砂移動現象．山地保全学，小橋澄治編，文永堂出版株式会社，東京，p.179-229.
- 5) 森脇寛・広部良輔・熊谷貞治・高橋博（1979）有珠山噴火による火山外堆積層に関する研究－降雨の表面流出と浸食について－．国立防災科学技術センター研究報告 22:83-91.
- 6) 西田顕郎・小橋澄治・水山高久（1998）雲仙普賢岳火砕流堆積斜面における植生回復による表面流・土砂流出の変化．日本緑化工学会誌 23(4):249-255.
- 7) 小川泰浩・清水晃・清水貴範・宮縁育夫（2003）細粒火山灰被覆を行った斜面の降雨流出に関する実験的研究．砂防学会誌 55(5):22-30.
- 8) 奥西一夫（1980）火山灰が堆積した斜面からの降雨流出と土砂流出．第17回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集:151-152.
- 9) 諏訪浩・真中朋久・稲庭篤（1989）焼岳上々堀沢における土石流の発生と規模の検討．京都大学防災研究所年報 32B-1:229-247.
- 10) 山越隆雄・諏訪浩（1998）雲仙普賢岳火砕流堆積斜面における植生回復に伴う降雨流出・土砂流出特性の変化．砂防学会誌 51(3):3-10.
- 11) 山本博・今川俊明（1983）有珠山1977-1978年噴出物の堆積した斜面における表面流出について．ハイドロロジー 13:25-33.

第4章

- 1) 服部重昭・阿部敏夫・小林忠一・玉井幸治 (1992) 林床被覆がヒノキ人工林の侵食防止に及ぼす影響. 森林総合研究所研究報告 362:1-34.
- 2) 倉田益二郎 (1979) 表層土の保全. 倉田益二郎著, 緑化工技術, 森北出版株式会社, 東京, p.85-106.
- 3) 岩川幹夫 (1970) 植生調査法. 林野庁監修, 治山調査法, 千代田出版株式会社, 東京, p.247-284.
- 4) 岩川幹夫 (1976) 林叢形成促進のための実播緑化工とその保育管理. (社) 日本林業技術協会, 東京, わかりやすい林業研究解説シリーズ No.56, pp.64.
- 5) 九州日植株式会社 (1998) 緑化工技術検討会追跡調査報告書, 雲仙・普賢岳みどりへの一步, 長崎県山地災害対策室・島原振興局農林部山地災害復興課発行, p.133-156.
- 6) 九州日植株式会社 (2000) 雲仙普賢岳における航空実播工 (NSA 航空緑化工) 施工後の生育状況について. 雲仙・普賢岳みどりへの一步, 長崎県山地災害対策室・島原振興局農林部山地災害復興課発行, p.177-193.
- 7) 村井宏 (1984) 落葉地被物による侵食防止効果. 村井宏著, 治山緑化工, 農林出版株式会社, 東京, p.37-40.
- 8) 西田顕郎・小橋澄治・水山高久 (1998) 雲仙普賢岳火砕流堆積斜面における植生回復による表面流・土砂流出の変化. 日本緑化工学会誌 23(4):249-255.
- 9) 小川泰浩・清水晃・宮縁育夫・清水貴範 (2000) 雲仙普賢岳火砕流堆積斜面の緑化地・裸地における表面流・土砂流出観測. 日本林学会九州支部研究論文集 53:133-134.
- 10) 小川泰浩・清水晃・清水貴範・大丸裕武・宮縁育夫 (2002) 雲仙普賢岳の航空緑化斜面における3年間の表面流出・土砂流出観測. 日本緑化工学会誌 28(1):255-258.
- 11) Ogawa Y., Daimaru H., Shimizu A. (2007) Experimental study of post-eruption overland flow and sediment load from slopes overlain by pyroclastic-flow deposits, Unzen volcano, Japan. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 13(3):237-246.
- 12) 小川泰浩・大丸裕武・近重朋晃 (2010) 雲仙普賢岳 1990-1995 噴火災害後の山腹の復旧状況と土砂流出. 水利科学 316:101-124.

- 13) 小川泰浩・明間民央・大丸裕武（2011）雲仙普賢岳火砕流堆積斜面における緑化植物の植生調査と降雨時の表面流観測. 砂防学会誌 63(5):78-82.
- 14) 館沼慧（2001）普賢岳の緑化を調査して. 日本緑化工学会誌 26(4):252-257.
- 15) 塚本良則（1998）森林の表土保全. 塚本良則著, 森林・水・土の保全, 株式会社朝倉書店, 東京, p.80-88.
- 16) 山越隆雄・諏訪浩（1998）雲仙普賢岳火砕流堆積斜面における植生回復に伴う降雨流出・土砂流出特性の変化. 砂防学会誌 51(3):3-10.
- 17) （財）林業土木コンサルタンツ技術研究所（2000）雲仙・普賢岳緑への復元. 九州森林管理局・長崎県監修,（財）林業土木コンサルタンツ, p.191-203.
- 18) （財）林業土木コンサルタンツ技術研究所（2006）航空緑化工施工地（既プロット）の植生調査. 平成 17 年度雲仙岳・眉山地域治山事業総合調査報告書,（財）林業土木コンサルタンツ, p.58-140.

第 5 章

- 1) 明間民央（2004）雲仙普賢岳火砕流跡地に移植したアカマツ実生苗の生存と菌根菌接種の影響. 九州森林研究 57:261-262.
- 2) 新谷融（1991）溪流および扇状地における土砂の移動特性とその制御対策. 塚本良則・小橋澄治編, 新砂防工学, 株式会社朝倉書店, 東京, p.107-114.
- 3) 伊藤重右衛門（1997）火山噴火跡の荒廃地. 村井宏・堀江保夫編, 新編治山・砂防緑化技術, 株式会社ソフトサイエンス社, 東京, p.238-254.
- 4) 笠原安夫（1982）日本雑草図説, 株式会社養賢堂, 東京, 518pp.
- 5) 小林裕志（1977）イネ科牧草根の物理的な機能に関する研究 I.根系分布と根の力学的強度について. 日本草地学会誌 23(2):135-139.
- 6) 桑原義晴（2008）シナダレスズメガヤ（セイタカカゼクサ）. 桑原義晴 日本イネ科植物図譜, 株式会社全国農村教育協会, 東京, p. 219.
- 7) 九州日植株式会社（2000）雲仙普賢岳における航空実播工（NSA 航空緑化工）施工後の生育状況について. 雲仙・普賢岳みどりへの一步, 長崎県山地災害対策室・島原振興局農林部山地災害復興課発行, p.177-193.

- 8) 野村康裕・小杉賢一郎・水山高久（2003）三宅島・有珠山・桜島の火山灰の物理特性の比較検討—火山灰の物理特性が泥流発生に与える影響に関する一考察—. 砂防学会誌 55(6): 3-12.
- 9) 小川泰浩・黒川潮・阿部和時・久保寺秀夫（2012）高濃度火山ガスが噴出する三宅島噴火堆積物斜面における噴出物表層部の理化学性変化が植生回復に与える影響. 日本緑化工学会誌 38(2):290-301.
- 10) R. S. ラッセル（1981）土壌環境. 作物の根系と土壌, 田中典幸訳, (社) 農山漁村文化協会, 東京, p.191-222.
- 11) 林野庁監修（1980）航空緑化工の計画, 設計, 施工指針とその解説, (社) 日本治山治水協会, 東京, 161pp.
- 12) 寺本行芳・下川悦郎・地頭蘭隆（2004）テフラの粒径の違いが斜面の浸透能, 粗度および土砂流出に及ぼす影響. 鹿児島大学農学部演習林研究報告 31:1-5.
- 13) 山本博・今川俊明（1983）有珠山 1977-1978 年噴出物の堆積した斜面における表面流出について. ハイドロロジー 13:25-33.
- 14) 山本博（1984）有珠山の一斜面における 1977-1978 年降下火砕堆積物の侵食. 地形 5(2):111-124.

第 6 章

- 1) 菊池輝海・上條隆志・小川泰浩・岡部宏秋・石森良房（2015）火山性荒廃地における東京クレセントロール工法の治山緑化機能の評価. 日本緑化工学会誌 41(1):231-234.
- 2) (国研) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（2016）マルチローター機を活用した土石流災害予測シミュレーションの実証実験を実施—国土交通省と連携し, 災害対応ロボットの実用化を加速
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100677.html, 参照 2020.8.8
- 3) 倉田益二郎（1979）水の無害化. 倉田益二郎著, 緑化工技術, 森北出版株式会社, 東京, p. 60-66.
- 4) 村井宏（1992）治山砂防緑化. 小橋澄治・村井宏・亀山章編, 環境緑化工学, 株式会社朝倉書店, 東京, p.109-122.

- 5) 永谷圭司・谷島諒丞・羽田靖史・伊豆智幸・銭谷彰・金崎裕之・皆川淳・島田徹・森山裕二 (2018) マルチロータ機を用いた無人火山観測システムの開発. 第 36 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p. 3F3-02.
- 6) 中筋章人・中山政一・国重賢一・高見俱幹 (1981) メラピ火山と有珠火山における熱雲堆積物. 砂防学会誌 34(1):53-61.
- 7) 西田顕郎 (1998) 火砕流堆積地における侵食に関する水文地形学的研究. 京都大学農学研究科森林科学専攻学位論文, 183pp.
- 8) 小川泰浩・岡部宏秋・石森良房・西澤敦彦・広瀬光一郎・足利陽史 (2014) 治山緑化に寄与する環境保全型ロール資材の開発. 日本緑化工学会誌 40(1):191-194.
- 9) 小川泰浩・岡部宏秋・石森良房 (2016a) 環境保全型ロール状フィルタおよびその製造方法, 特許第 6037518 号
- 10) 小川泰浩・上條隆志・菊池輝海・岡部宏秋・石森良房 (2016b) 三日月型治山緑化資材 (ToCR) を設置したリルにおける地表流調節に関する現地観測. 日本緑化工学会誌 42(1):248-251.
- 11) 小川泰浩 (2019) 点群配置による治山緑化工法の開発と課題. 日本緑化工学会誌 44(4):568-573.
- 12) 宇井忠英 (1997a) 火山現象の多様性. 宇井忠英編, 火山噴火と災害, (財) 東京大学出版会, 東京, p.19-47.
- 13) 宇井忠英 (1997b) 噴火と災害. 宇井忠英編, 火山噴火と災害, (財) 東京大学出版会, 東京, p.48-78.
- 14) 山寺喜成 (2010) 生態環境の修復改善への新しい取り組み. 山寺喜成著, 自然環境再生の緑化技術, (社) 日本砕石協会, 東京, p.9-44.

細粒火砕物堆積斜面の粗粒化に伴う 地表安定化過程に関する研究

小川泰浩

要旨

火山地域において爆発的噴火が発生すると、周囲の山腹斜面に大量の火山砕屑物（火砕物）が堆積する。既存植生が火砕物で埋没した後の山腹斜面では、植生回復が困難になる。さらに大量の火砕物が不安定な状態で斜面に堆積するため、火山活動の影響を受けずに降雨や地震の作用で容易に土砂が移動する。よって、火砕物が堆積している山腹斜面の下流域では、火山活動とは直接結びつかない2次的な土砂移動から人命や財産を守る防災対策が重要課題となる。こうした土砂移動を防止するために従来から行われてきた治山砂防工事では、上流域の山腹斜面に堆積した不安定な火砕物の早期安定化が求められている。

爆発的噴火で空中に放出された火砕物は、はじめに風の影響を受けず降下する粒径の大きい火砕物が堆積し、その上位に風とともに空中で分級された粒径の小さい火砕物が遅れて堆積する。このうち、粒径がシルトや粘土を含む細粒の火砕物が堆積した斜面では透水性が急速に悪化するため、通常よりも少ない降雨量で発生した地表流が粒径の小さい火砕物を流亡させて、その結果として表面侵食が発生する。

火砕物が斜面に堆積した後に斜面の最上位に位置していた細粒の火砕物の流亡とともに地表の火砕物の粒径が粗くなる「火砕物の粗粒化」が生じることが知られている。しかし、火砕物が粗粒化する過程や、粗粒化した後の緑化植物による植生回復に与える影響については多くの点が不明である。

本研究では、長崎県島原半島の平成新山の山腹斜面を対象として、1991年以降の火砕流によって斜面に堆積した火砕物の粗粒化過程を把握し、火砕物の粗粒化が緑化植物の植生回復に与える影響の解明を目的とする。さらに火砕物の粗粒化と植生回復による地表の安定化過程を統合し、火砕物堆積斜面における地表の安定化過程の連続的解釈を試みた。

第1章では、前述した斜面に時間差で分級し堆積した粒径が異なる2種類の火砕物に対して、下位の粗粒火砕物とその上位に被覆された細粒火砕物に分類し、次のように定義した。細粒火砕物の下位に位置し、砂や礫のような粗粒土砂を主体とする火砕物を「粗粒火

砕物」、0.075mm以下のシルトや粘土のような細粒土砂を主体とする粗粒火砕物の上位にある火砕物を「細粒火砕物」とした。つづいて、これまで火砕物堆積斜面における地表の粗粒化や植生回復に伴う地表安定化に関する研究の背景や既往研究の問題点を論じた。最後に本研究の目的と流れを示した。

第2章では、火砕物の粗粒化に伴う火砕物の堆積構造と物理性の変化を議論するため、平成新山南東側の裸地状態の火砕物堆積斜面において、粒径組成と透水性に関する実態調査をおこなった。その結果、粗粒火砕物の上位に堆積する細粒火砕物はシルトと粘土で構成され、飽和透水係数は 1.70×10^{-4} cm/sと低い値であった。このことから細粒火砕物は自身の流亡につながる地表流を容易に発生させる性質があると推察された。この細粒火砕物が地表流により流亡すると下位の粗粒火砕物が露出すると考えられた。この粗粒火砕物は、礫を主成分とする厚さ0.5～2.0 cmの粗粒層が上位に位置し、その下位に砂と礫を主体とする火山砂礫層が位置する2層構造を有していた。粗粒層は、下位の火山砂礫層よりも細粒土砂を欠いた粒径組成であることから、粗粒火砕物中の細粒分が地表流によって流亡した結果、形成されたと推察された。粗粒火砕物の飽和透水係数は 5.38×10^{-3} cm/sとなり、細粒火砕物と比較して高かった。この理由は、細粒火砕物の流亡によって火砕物の堆積構造が多孔質な状態に変化したためと考えられた。よって、細粒火砕物の流亡によって火砕物上位に位置づけられた粗粒火砕物は、堆積構造が多孔質に変化し、流亡する前に火砕物の上位にあった細粒火砕物よりも透水性が上昇したと推察された。

第3章では、2章の結果から推察した細粒火砕物の流亡による火砕物の粗粒化過程を議論するため、現地で採取した細粒火砕物を粗粒火砕物の上位に人工的に散布して被覆し、細粒火砕物の流亡による火砕物の粗粒化を再現する野外試験を行った。その結果、火砕物の粗粒化は、雨期に火砕物が2つの段階を経て進行することが明らかとなった。最初の粗粒化第1段階では、小雨期に発生した少量の地表流で上位の細粒火砕物の一部で流亡が始まり、続く多雨期に発生した大量の地表流によって残りの細粒火砕物と下位の粗粒火砕物の一部がともに流亡し、地表に粗粒火砕物が露出した。次の粗粒化第2段階では、粗粒火砕物の透水性の上昇によって雨量に対する地表流の応答流出量が減少し、流出土砂の主要な粒径が礫から砂に細粒化した。これらの結果は粗粒火砕物の透水性が上昇したことを示すものである。流出土砂の細粒化によって、地表では礫が取り残されて粗粒層が形成されたと考えられた。以上の野外試験によって、第2章の現地調査結果から得た火砕物の粗粒化過程に関する推察が実証された。

第4章では、粗粒化した火砕物堆積斜面において植生回復に伴う地表流と土砂流出の減少による地表の安定化過程を議論した。そのために平成新山南東側の火砕物が粗粒化した後に緑化された火砕物堆積斜面に流量観測施設を設けて地表流の流量や流出土砂量を計測し、植生調査で植物の生育状況を把握した。その結果、粗粒化した地表の火砕物に散布した液体状の緑化資材は、地表面の多孔質な粗粒層に浸透し、定着したと推測された。このように粗粒化した火砕物は、液体資材の定着に寄与していた。液体資材が定着した斜面では、緑化施工1年目に緑化草本が急速に被覆し、施工5年目以降に草本と小型低木で構成された植物群落が出来た。施工開始後4年間は草本中心の被覆によって、年土砂流出量が漸減した。それに続き、草本に加えて小型低木の植物群落が出来た緑化施工後5年目以降は、土砂流出が年間を通じてほとんどなくなった。このように草本と小型低木による2段階の植生回復に調和して年土砂流出量が減少した。緑化施工後1年目から4年目までの年土砂流出量が漸減している時期を植生回復第1段階、緑化施工後5年目から土砂流出がなくなった時期を植生回復第2段階に分けると、各段階で土砂流出特性は明確に異なっていた。以上から緑化斜面における降雨流出観測と植生調査によって、植生回復による2段階の地表安定化過程が明らかになった。

第5章では、これまでの結果をとりまとめ、火砕物堆積斜面の地表安定化過程を総合的に考察した。細粒火砕物の流亡試験の結果から植生回復による地表安定化には、2段階の火砕物の粗粒化が不可欠な現象であることが結論付けられた。すなわち粗粒化第1段階では、降雨状況に応じて少雨の時は上位に堆積した細粒火砕物が流亡し、多雨の時は下位の粗粒火砕物の一部が細粒火砕物とともに流亡して、次第に地表に下位の粗粒火砕物が露出する。これに続く粗粒化第2段階では、粗粒化第1段階よりも火砕物の透水性が上昇することによって、降雨に対する地表流の応答流出量が減少する。粗粒火砕物のうちの砂以下の細粒土砂が選択的に流亡し、細粒土砂よりも受食性が低い粗粒土砂（礫）が取り残された結果、地表には礫が主成分の粗粒層が形成され、地表の火砕物が2層構造となる過程である。粗粒化第2段階の粗粒層の礫は、多雨期に発生する地表流で流亡するので、植生被覆による粗粒層の侵食防止が必要である。2段階の粗粒化過程で形成した多孔質な粗粒層に液体状緑化資材が浸透して、粗粒層が緑化植物の生育基盤としての役割を果たした。こうして植物定着に有利な条件が整っていた斜面では、次に示す2段階の植生回復プロセスが明らかになった。植生回復第1段階は、粗粒層における草本の植生回復に応じて流出土砂が経年的に漸減する過程である。これにつづく植生回復第2段階は、草本と小型低木の

群落が完成した後に年間を通して土砂流出がほぼゼロを持続する地表安定化過程である。

本研究では、粗粒火砕物が持つ植物生育基盤としての役割を考慮して、地表の粗粒化過程と植生回復過程を統合した地表安定化過程を次のように示した。すなわち、粗粒層を有する火砕物は、生育基盤として有効な多孔質構造であり、この構造が植物や緑化資材の定着を促し、表面侵食から植生回復へ中継ぎを進展させる。この中継ぎを経た2段階の植生回復が表面侵食を防止する地表安定化過程である。このように火砕物の粗粒化過程を考慮することによって、火砕物堆積斜面の地表安定化過程が連続的に解釈できることを立証した。

第6章では、本研究から得た成果の利活用を検討した。最初に地表の粗粒層が持つ生育基盤としての役割を利用し、種子散布に限定された液体状緑化資材に代わり、種子散布と植栽のどちらも選択可能な表面侵食防止資材を提案した。次に、この表面侵食防止資材を活用した山腹緑化工法として点群緑化工法を新たに提案し、本工法の課題と今後の展開を述べた。

第7章は、本研究の総括を行った。そして、平成新山の地表安定化過程から見出された課題を検討した。噴火活動終了後も継続する立ち入り規制により火砕物の流亡状況の把握が非常に困難な火砕物堆積斜面における粗粒化過程を把握する観測技術の開発が進展すれば、火砕物の流亡実態に合わせた適切なタイミングで航空緑化工や点群緑化工を行うことが可能になるであろう。

Study on the stabilization process of a coarse-grained slope surface mantled with fine-grained pyroclastic material

Yasuhiro Ogawa

Summary

An explosive eruption in a volcanic region results in the accumulation of large amounts of volcanic deposit (pyroclastic material) on the hillside slopes. This accumulation makes it difficult to recover vegetation on the slopes after burial by the pyroclastic material. Because a large amount of pyroclastic material deposited on slopes is in an unstable state, the material can be easily transported by rainfall and earthquakes without the influence of volcanic activity. Therefore, in the downstream area of hillside slopes where pyroclastic materials are deposited, it is important to protect human lives and property from secondary sediment transport that is not directly related to volcanic activities. To prevent such sediment transport, the unstable pyroclastic materials deposited on upstream slopes should be stabilized as soon as possible.

The pyroclastic materials ejected by eruption are classified into two groups: the larger masses, which are not affected by the wind, fall downward, whereas the smaller ones are carried by the wind and deposited on the hillside slope. Because of the rapid deterioration of the permeability of the slope when fine-grained pyroclastic materials, including silt and clay, are deposited on the slope, an overland flow generated by little rainfall causes the smaller-grained pyroclastic materials to be washed away, resulting in surface erosion.

It is known that “coarse-grained pyroclastic material” forms after pyroclastic material is deposited on the slope, and the grain size of the pyroclastic material becomes coarser with loss of the fine-grained pyroclastic material located at the top of the slope. However, the process of formation of coarse-grained pyroclastic material and the effect of coarse-grained pyroclastic material on surface erosion and subsequent recovery of vegetation remain largely unknown.

This study aims to understand the coarse-grained pyroclastic deposits on the hillside of Heisei Shinzan in Shimabara peninsula, Nagasaki Prefecture, and its impact on surface erosion and vegetation recovery. By integrating the coarse-grained process of pyroclastic materials and the surface stabilization process, a continuous interpretation of the surface stabilization process on the pyroclastic-accumulated slope was attempted.

In chapter 1, the pyroclastic materials deposited on the slope were classified into two categories, namely, coarse-grained and fine-grained pyroclastic materials. Hereinafter, coarse-grained pyroclastic material is referred to as “coarse pyroclastic material,” which is mainly composed of sand and gravel with a particle diameter greater than 0.075 mm. Further, fine-grained pyroclastic material is referred to as “fine pyroclastic material,” which is mainly composed of silt and clay with a particle diameter less than 0.075 mm. In addition, the background and research questions of previous studies on surface slope stabilization in the slopes of pyroclastic flow deposits and vegetation recovery are discussed. The purpose and flow of this study are also described.

In Chapter 2, to discuss the changes in the sedimentary structure and physical properties of coarse-grained pyroclastic materials, the grain size composition and permeability in the bare slope of the pyroclastic flow deposit on the southeast side of Heisei Shinzan were investigated. The results showed that the fine pyroclastic material overlying the coarse pyroclastic material consisted of silt and clay and that its saturated hydraulic conductivity was as low as 1.70×10^{-4} cm/s. This suggests that the fine pyroclastic material can easily generate an overland flow, which can cause surface erosion of fine materials. The coarse pyroclastic material was exposed when the fine-grained pyroclastic material was washed away by the overland flow. The coarse pyroclastic material had a two-layered structure: an upper coarse-grained layer (thickness: 0.5–2.0 cm) which is mainly composed of gravel, and a lower volcanic sandy gravel layer consisting mainly of sand and gravel. The upper layer has less silt and clay compared to the lower layer, suggesting that the coarse-grained layer was formed because fine sediments were carried away by the overland flow. The coarse pyroclastic material had a higher saturated hydraulic conductivity of 5.38×10^{-3} cm/s compared to that of the fine pyroclastic material possibly because of the change in the sedimentary

structure of the pyroclastic materials to a porous state by the outflow of the fine sediments. Consequently, the coarse pyroclastic material, which was located under the fine pyroclastic material, was assumed to have a more porous sedimentary structure. Hence, the coarse pyroclastic material had a higher permeability than the fine pyroclastic material. These results imply that the fine pyroclastic material overlying the coarse pyroclastic material was eroded.

Chapter 3 discusses the coarse-grained process based on the results of field tests. In these field tests, the coarse-grained process of pyroclastic materials was simulated by artificially spreading fine-grained pyroclastic materials. The results showed that the coarse granulation of the pyroclastic materials proceeded in two stages during rainfall. In the first coarse-grained stage, a small amount of overland flow during a light rainfall event started displacing a part of the upper coarse pyroclastic material, and a large amount of overland flow during a heavy rainfall event caused the remaining fine pyroclastic material and a part of the lower coarse-grained pyroclastic material to flow away together, thereby exposing the coarse pyroclastic material at the ground surface. In the second coarse-grained stage, the response of the overland flow to rainfall was reduced because of the increased permeability of the coarse pyroclastic material, and the main grain size of the sediment load was reduced from gravel to sand. These results indicate that the permeability of the coarse pyroclastic material was increased. The finer grain size of the sediment load suggests that gravels were left behind at the ground surface to form a coarse-grained layer. These aforementioned field experiments verify the inferences about the coarse-grained process of the pyroclastic materials based on the results of the investigation discussed in Chapter 2.

In Chapter 4, the process of slope-surface stabilization in a slope of pyroclastic flow deposit was discussed in terms of the reduction of overland flow and sediment load as a result of vegetation recovery. The flow rate and sediment load were measured at the slope of the pyroclastic flow deposit on the southeast side of Heisei Shinzan, where the coarse-grained pyroclastic material had been revegetated, and plant growth was monitored by vegetation surveys. It was presumed that liquid greening materials applied to the coarse pyroclastic material penetrated into the coarse-grained layer of the

ground surface and settled there. The coarse-grained pyroclastic material contributed to the fixation of the liquid material. The vegetation on the slope was rapidly covered by green grasses in the first year of revegetation work, and a plant community consisting of herbs and small shrubs was formed after the fifth year of the work. The herbaceous plants covered the area during the first four years of the revegetation work, and the annual sediment load was gradually reduced. In the fifth year after revegetation, the sediment load was almost completely eliminated by the completion of the herbaceous and small shrub community. Thus, the annual sediment load was reduced in harmony through two stages of vegetation recovery by growing herbaceous plants and small shrubs. In the first phase, the annual sediment load decreased from the first to the fourth year after revegetation, and in the second phase, the annual sediment load disappeared from the fifth year after revegetation. The field observation and vegetation survey in the revegetated slope showed that vegetation recovery proceeded in two stages of slope surface stabilization.

Chapter 5 presents a summary of the results of the previous studies are summarized and a comprehensive discussion of slope-surface stabilization. The results of the experiments involving spreading of fine-grained pyroclastic material indicate that the two stages of coarse-graining of pyroclastic materials are indispensable for surface stabilization through vegetation recovery. In the first coarse-grained stage, the upper fine-grained pyroclastic materials are lost under low-rainfall conditions, while the lower coarse-grained pyroclastic materials are gradually exposed on the ground surface during heavy rainfall events. In the subsequent coarse-grained stage, the discharge of overland flow reduced as the permeability of the pyroclastic material increased compared to the first coarse-grained stage. In this second coarse-grained stage, sand and silt in the coarse pyroclastic materials were selectively washed away, and gravel was left behind in the coarse-grained layer. This resulted in the formation of a coarse-grained layer consisting mainly of gravel at the ground surface and a two-layered structure of the pyroclastic materials at the surface. The gravels in the second stage of the coarse pyroclastic layer were washed away by the overland flow during heavy rainfall events. Hence, it is necessary to prevent the erosion of the

coarse-grained layer by establishing a vegetation cover. Liquid greening materials penetrated into the porous coarse-grained layer. The coarse-grained layer served as a substrate for the growth of plants. A two-stage vegetation recovery process was inferred for the revegetated slope where the liquid greening material was established. In the first recovery stage, the sediment load decreased with time as the vegetation recovered in the coarse-grained layer. The second stage of vegetation recovery is the surface stabilization process, in which the sediment load remains almost zero after the formation of herbaceous and small shrub communities.

Considering the role of coarse pyroclastic material as a growth substrate, this study presents a slope surface stabilization process that integrates the coarse-grained process and the vegetation recovery process. The coarse pyroclastic material is an effective porous structure as a growth substrate, and this structure promotes the growth and establishment of plants and greening materials. The subsequent two-stage recovery process is a slope-surface stabilization process that prevents surface erosion. By integrating these two processes, this study demonstrates that the surface stabilization process of a pyroclastic-deposited slope can be interpreted in a chronological manner.

In Chapter 6, the utilization of the results of this study is discussed. First, the coarse-grained layer was used as a growth substrate, and a surface erosion control material was proposed as an alternative to liquid greening materials, which are limited to seed dispersal in terms of application. Next, we propose a new method of hill-slope revegetation, i.e., “point cloud revegetation” using this surface erosion control material, and describe the challenges of this method and its future development.

In Chapter 7, we summarize the study, and discuss the issues identified in the process of slope surface stabilization of Heisei Shinzan. The development of an observation method of the coarse-grained process on the slope of pyroclastic flow deposit, which is difficult to monitor due to the continuous entry control after eruptive activity, will make it possible to perform aerial revegetation and point cloud revegetation activities at appropriate time depending on the actual erosion of the pyroclastic material.

論文目録

参考論文

- 1) 小川泰浩・清水晃・清水貴範・宮縁育夫 (2003) 細粒火山灰被覆を行った斜面の降雨流出に関する実験的研究. 砂防学会誌 55(5):22-30.
- 2) 小川泰浩・清水晃・久保寺秀夫 (2006) 雲仙普賢岳の新しい火山噴出物が堆積した斜面表層の土壌微細形態が透水性に与える影響. 日本森林学会誌 88(5):329-336.
- 3) Ogawa, Y., Daimaru, H., Shimizu, A. (2007) Experimental study of post-eruption overland flow and sediment load from slopes overlain by pyroclastic-flow deposits, Unzen volcano, Japan. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 13(3):237-246.

その他

- 1) 小川泰浩・清水晃・清水貴範・大丸裕武・宮縁育夫 (2002) 雲仙普賢岳の航空緑化斜面における3年間の表面流出・土砂流出観測. 日本緑化工学会誌 28(1):255-258.
- 2) 小川泰浩・大丸裕武・近重朋晃 (2010) 雲仙普賢岳 1990-1995 噴火災害後の山腹の復旧状況と土砂流出. 水利科学 316:101-124.
- 3) 小川泰浩・岡部宏秋・石森良房・西澤敦彦・広瀬光一郎・足利陽史 (2014) 治山緑化に寄与する環境保全型ロール資材の開発. 日本緑化工学会誌 40(1):191-194.
- 4) 菊池輝海・上條隆志・小川泰浩・岡部宏秋・石森良房 (2015) 火山性荒廃地における東京クレセントロール工法の治山緑化機能の評価. 日本緑化工学会誌 41(1):231-234.