

◆ 報 文 ◆

主要な火山における火山灰の透水性の実態とその決定要因の考察

田方 智* 武澤永純** 山越隆雄*** 栗原淳一****

1. はじめに

火山噴火に伴って火山灰や火砕流が堆積した流域では、噴火後の降雨により土石流や泥流が頻発するようになるといわれる。これは一般に、火山灰が地表面を覆うことにより地表の浸透能が急激に低下し、降雨時に表面流が発生しやすくなることで、リルやガリーの侵食が進行することが原因であるとされる¹⁾。これまで、火山灰が被覆した斜面における表面流出に関する研究^{2), 3)}や、火山灰の浸透能に関する研究^{4), 5)}、降灰活動と土石流発生に関する研究⁶⁾などが様々な火山を対象になされてきた。

のように、噴火後の土石流や泥流の発生には火山灰の堆積とその浸透特性が大きく関係しており、噴火後の緊急的な対策を講じる場合には、流出規模の予測計算のために火山灰の浸透特性を迅速に把握することが課題となる。しかしながら、噴火中や噴火直後に現地でも浸透試験を実施したり、火

山灰を採取することは極めて危険である。また一刻を争う緊急事態に透水試験・浸透試験に費やす時間的な余裕もないことから、過去のデータを基に予め火山灰の浸透特性を把握しておくことは有益な情報となる。

本報では、国内外の火山において既存の研究事例を収集し、火山灰の浸透能や透水係数の計測値をこれまで土木研究所で実施してきた試験結果と合わせて火山ごとに整理した。ここで、浸透能は、地表面を通過する水のフラックスの最大可能な値のことであり、その時点の土壤水分条件にも依存する。一方、透水係数は、ダルシーの法則において定義される、表層土を通過する水のフラックスと表層土内のポテンシャル勾配の関係における比例係数であり、土壤水分状態の変化とは無縁な、当該土層について固有の水の通しやすさを表す定数である。このように両者の持つ意味は異なるが、大きく見て火山灰堆積物の浸透特性を表すものであり、斜面表層が飽和した状態、すなわちポテン

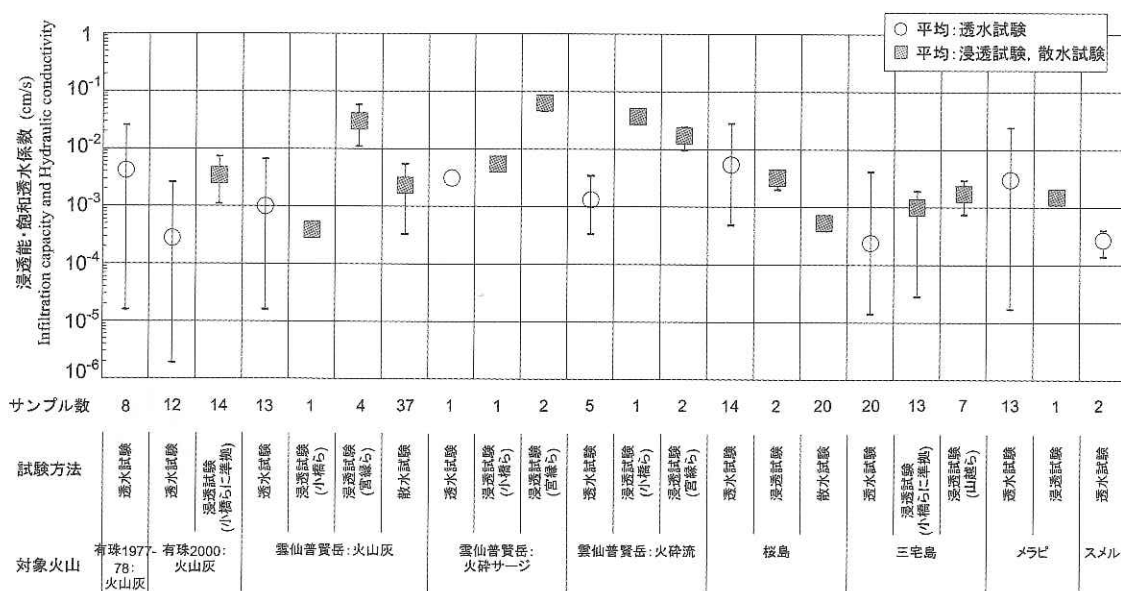


図-1 火山ごと、試験方法ごとの浸透能・透水係数(4), 5), 7~21)

The Infiltration Capacities of Volcanic Ash of the Previous Volcanic Eruptions and the Determining Factors

シャル勾配が1の状態においては、理想的には両者は一致するものでもあることから、以下では、透水係数と浸透能を、ともに浸透特性を表すパラメータとして以下では取り扱うこととする。

また、噴火中や噴火直後における各浸透試験手法の適用性について整理するとともに、粒度組成や間隙比といった火山灰の物理特性と透水係数との関係を検討した。

2. 各火山における火山灰の浸透能・透水係数

火山灰の浸透能や透水係数に関する既往研究の整理に際して、JDream II (科学技術振興機構)、GEOLIS (産業技術総合研究所)、GeNii (国立情報学研究所) のデータベース、その他 Web 検索エンジンにより文献検索を行った。キーワード「火山灰」に続き AND 条件で「浸透」「土質試験」「粒度」「間隙比」などで検索を行い、ヒットした約 150 件のうち、火山灰の浸透能や透水係数に関する具体的なデータや知見が記述されているもの 16 文献を対象とした。

本報では、地表の浸透能を低下させることが懸念される降下火山灰の他、火砕流、火砕サージを対象に浸透能や透水係数の値を整理した。なお、ここでは粒度調整した火山灰等については除外している。そして、文献中に値が明記されていないものについては図からの読み取りを行った。また、

ここで示す浸透能は最終浸透能の値とし、浸透能や透水係数は (cm/s) 単位に換算した。

上記に従って整理した既往文献のデータと土木研究所で実施した試験結果を合わせ、各火山における浸透能・透水係数を試験方法別に整理した (図-1)。試験方法について詳細は後述するが、透水試験 (JIS A 1218)、小橋ら⁴⁾に準拠する浸透試験、宮縁らの浸透試験 (竹下²²⁾の方法による)、下川ら⁶⁾に準拠する現地散水試験、山越ら²⁰⁾の現地モールド試験に分けた。浸透能や透水係数は各火山灰の物理化学特性、試験対象箇所、試験方法、堆積状況、噴火からの経過年数などで値が異なることが考えられるが、ここでは火山灰等の浸透能・透水係数値の概略を把握するため文献中にある全てのデータを含んでいる。

火山ごと、試験方法ごとにばらつきがあるが、概ね $10^{-1} \sim 10^{-6}$ cm/s オーダーとなり、 10^{-3} cm/s オーダーのものが多く結果となった (図-1)。各火山でいくつかの試験が実施されているが、全ての火山で実施されている透水試験の結果をみると、有珠山 (2000 年火山灰) や三宅島でやや低い透水係数を示しており、それぞれ平均値で 2.8×10^{-4} cm/s、 2.4×10^{-4} cm/s であった。一方、雲仙普賢岳や桜島は 10^{-3} cm/s オーダーであった。

通常の森林斜面では浸透能が高いために浸透能を超過した Horton 表面流は発生しないといわれる。一方、火山灰の場合は一部で大きな浸透能を

表-1 噴火中および噴火直後における各浸透試験方法の適用性

浸透試験方法	試験箇所	長 所	短 所
透水試験 (JIS A 1218)	室内	・規格化された試験である。 ・室内で行うため、安全である。	・現地の状況を再現させることが難しい。
小橋ら ⁴⁾ の手法	室内	・炉乾燥させた試料を自由落下させるため、ある程度は現地の状況を再現できる。 ・室内で行うため、安全である。	・容器が小さいため、容器の壁を伝わる流れの影響がでる。
散水試験 (例えば、下川ら ²⁴⁾)	現地	・実際の降雨を再現できる。	・一回の試験に水量を多く要する。 ・計測に人手が必要である。 ・噴火中や噴火直後には危険を伴う。
冠水型浸透試験 (例えば、宮縁ら ¹⁷⁾)	現地	・散水試験に比べ、必要な水量や人手が少なくて済む。	・ヘッドを作用させて浸透させるので、横方向への浸透流が生じるため、大きめの浸透能を示す傾向がある。 ・円筒を打ち込む際、土層を乱してしまう。 ・噴火中や噴火直後には危険を伴う。
山越ら ²⁰⁾ の手法	現地	・容器が小型であるため、持ち運びが非常に容易である。 ・数多くの箇所で行うことができる。 ・水量が少なくて済む。	・ヘッドを作用させて浸透させるので、横方向への浸透流が生じる。冠水型と同様に大きめの浸透能を示す傾向があると考えられる。 ・容器が小さいため、容器の壁を伝わる流れの影響がでる。 ・噴火の最中や直後には危険を伴う。

示すことがあるものの、その浸透能は多くの事例で報告されている 10^{-3}cm/sec オーダーの値より小さい。このような小さい浸透能は、降雨強度が上回ることもあり得るレベルであり、降雨時に Horton 表面流が発生し得ることが推測できる。このように、火山噴火後の土石流や泥流の発生に関係する表面流を考える場合、表面流の発生の有無や表面流量は浸透能や透水係数の決定精度に大きく依存するといえる。図-1の結果から、各火山における火山灰等の浸透能・透水係数の概略値を把握することができる。しかしながら、同じ火山でも試験方法や試験箇所によって値に幅がある。そこで、次章では試験方法が計測値に及ぼす影響を考えるとともに噴火時における各試験方法の適用性を考察する。そして、4章では透水係数と粒度組成や間隙比との関係について考察を行う。

3. 試験方法に関する考察

まず、火山灰の浸透能や透水係数を求める試験方法について簡単な説明を行う。土の透水試験 (JIS A 1218) には、定水位透水試験と変水位透水試験がある²²⁾。火山灰等は細粒分を多く含むため変水位試験による場合が多い。小橋ら⁴⁾の浸透試験は、対象とする火山灰を炉乾燥させた後、篩でふるいながら自由落下させて供試体サンプルを作成する。そして、豊浦標準砂を詰めた円筒の上部にサンプルを置き、サンプル表面にロータリーポンプで散水を行うことで浸透能の経時変化を測定するものである。散水試験は単位区画を設定し、区画全体に均一にじょうろなどで散水する。そしてその区画から流出する表面流量を計測するものである^{例えば、24)}。宮縁ら¹⁷⁾の試験方法は一種の冠水型浸透計を用いたもので、断面積 100cm^2 の円筒を 5cm 程度の深さに埋め込み、初期の水高 50mm の水が浸透する時間を計測して1分あたりの浸透量を求めるものである。山越ら²⁰⁾の現地浸透試験は、直径 50mm 、高さ 50mm の小円筒 (モールド) を半分の深さまで埋め込み、筒の中を湛水させ、満水位を保つように給水し続け、一定量を給水し終わるまでの時間を計測する簡易的なものである。

図-1によると、サンプル数に違いがあり一概に比較することはできないが透水試験結果の方が浸透試験よりばらつきの幅が大きい傾向がみられる。これは、透水試験を実施したサンプル数が多いことに加え、試験に用いた試料は同火山でも様々な

箇所から採取しており、火山灰の性質が異なっていることが影響していると考えられる。さらに三宅島とメラピ火山については、同じ試料を用いて間隙比を変化させて透水試験を実施していることがばらつく原因のひとつであると考えられる。

次に、浸透試験や散水試験について考察するが、高橋ら²⁵⁾によると、冠水型はヘッド (水頭) を作用させて浸透させるので、横方向への浸透流が発生することや円筒を打ち込む際に土層を乱してしまうこと、散水型は水滴の落下によって地表面を締め固めたり目詰まりさせるため、冠水型の方が散水型より大きな浸透能値を示すとされている。宮縁ら¹⁷⁾も散水型より冠水型は大きな浸透能値を示すことを指摘しており、得られた浸透能値は相対値として比較することを記している。図-1でも宮縁らの試験結果は他の試験と比較して高い浸透能値を示しており、自らの指摘と合致している。同様に山越ら²⁰⁾の手法も試験要領は冠水型と同様であり、ヘッドがかかり横方向への浸透の影響がでることや、容器が小さいために容器の壁に沿う流れの影響が大きくなることが推測され、高い浸透能値を示すことが考えられる。山越ら²⁰⁾らの方法による三宅島での試験結果をみると他の試験方法より大きい値を示している。一方、小橋ら⁴⁾の手法は湛水させることがないため、ヘッドの影響はないと考えられる。なお、図-1に示す値は最終浸透能値であり、最終浸透能に達したときにはほぼ飽和していると考え、透水試験に近い状況での試験と考えることができる。図-1の結果でも雲仙火砕流の事例を除くと、透水試験結果と同オーダーの値となっている。

これらをふまえて表-1に火山噴火中および噴火直後に実施する各種浸透試験方法の適用性を示すが、それぞれ一長一短がある。

まず、噴火の最中や噴火直後のように安全が確保できない場合には、迅速に試料を持ち帰り、小橋ら⁴⁾の手法による浸透試験や透水試験を行うことになる。特に透水試験は規格化された試験方法であり客観性は確保される。ただし、現地の状況を再現させるのが難しいといった短所を有するため、試料の充填条件などに留意する必要がある。現地の状況をできるかぎり再現するためには可能な限り不攪乱試料を採取し、その試料を用いて試験を行うことが望ましい。その一方で小橋ら⁴⁾の手法は試料を自由落下させることで火山灰が堆積した状況がある程度再現できるといった長所を有

するが、本試験も不攪乱試料を用いることができればなお良いと考えられる。

次に、噴火活動に伴う危険が十分に少ない場合には現地にて散水試験や浸透試験の実施が可能である。実際の降雨を再現できる散水試験を行うのが望ましいといえるが、水量や人員など多くの労力が必要となる。一方、冠水型浸透試験は労力や

人員を省力化できる。また、火山灰等の影響が広い範囲に及ぶ場合など、各溪流における土石流の発生危険度を検討する必要がある場合には、持ち運びが容易であり、より多くの箇所での試験が実施できる山越ら²⁰⁾の手法が有効であると考えられる。しかし、これらの試験は前述のように浸透能値が実際より大きめに生じる傾向があることに留意し、飽くまで相対的評価のために用いる必要がある。

先にも述べたが、噴火時に火山灰の透水性を把握する試験方法は一長一短である。今後、より正確かつ迅速に火山灰等の浸透能や透水係数を把握する手法の開発が望まれる。

4. 透水係数と粒度組成および間隙比との関係

4.1 透水係数と粒度組成の関係

下川・地頭蓮²⁶⁾は、桜島および有珠山、諸外国の火山における火山灰について中央粒径と浸透能の関係を示し、50%粒径の大きい火山灰ほど浸透能が大きいことを示している。西田ら¹⁰⁾は、雲仙普賢岳の火砕流堆積物やガリー内外の試料を用いて、最終浸透能と透水係数を調べている。そして、粘土（粒径0.005mm以下）・シルト（粒径0.075mm以下0.005mm以上）の割合と透水係数の関係を示し、粘土・シルトが少ないほど透水係数が大きいことが明瞭であることを示している。Hendrayantoら¹⁴⁾は、雲仙と桜島の火山灰を用いて、細粒土砂の割合を変化させた試料で浸透試験を実施している。そして、粘土分の含有割合が増加すると最終浸透能、透水係数が小さくなる結果を得ている。以上のように、これまでの研究結果を整理すると、概ね中央粒径が小さいほど、また細粒成分が多いほど浸透能・透水係数が小さくなる傾向を示しているといえる。しかし、その一方で、野村ら⁵⁾は三宅島・有珠山・桜島の火山灰試料を用い、上述した小橋ら⁴⁾に沿う方法で供試体サンプルを作成し、変水位法で透水試験をおこなっている。その結果、同程度の孔隙率を持つ三宅島と有珠山の比較では、三宅島の火山灰の方が細粒成分が少ないにもかかわらず、透水係数が小さくなったことを報告しており、火山灰の透水性が常に粒度分布と良い対応を示すわけではないことを示している。

上記の結果をふまえ、既存の文献にあるデータと土木研究所で実施した試験結果を整理していくが、前章で述べたような試験方法による値のばら

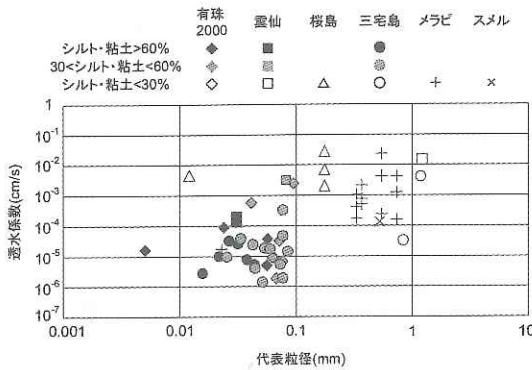


図-2 代表粒径と透水係数の関係 4), 5), 8) ~ 10), 13), 14)

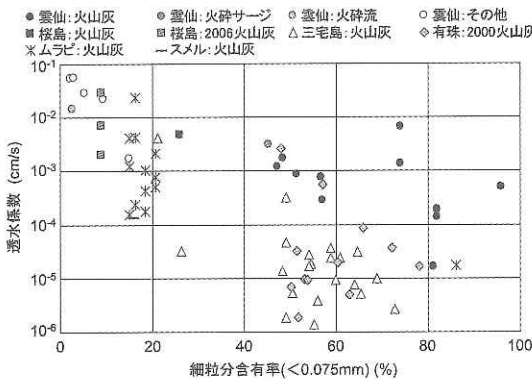


図-3 細粒分含有率 (0.075mm 以下) と透水係数の関係 5), 8) ~ 10), 13), 14)

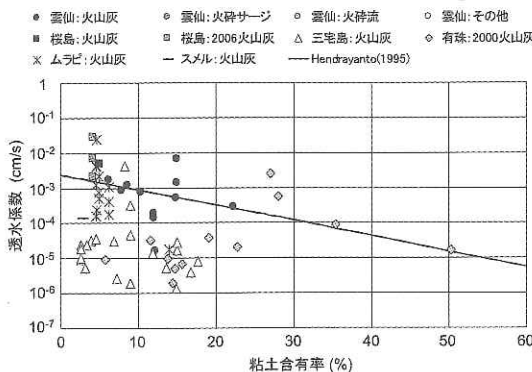


図-4 粘土含有率と透水係数の関係 5), 8), 9), 13), 14)

つきを考慮し、ここでは既往研究や筆者らが行った試験のうち透水試験を実施している事例を抽出し、粒度組成と透水係数との関係を検討した。まず、透水係数と代表粒径との関係を図-2に示す。火山灰試料ごとにシルト・粘土含有率に分けてプロットした。ここで、代表粒径とは、文献中に中央粒径・平均粒径・50%粒径 (D_{50}) と記述されているものとした。この図から代表粒径と透水係数には弱い正の相関がみられる。次に、同様に既存研究によるデータと土木研究所実施の試験結果を用い、細粒分含有率 (0.075mm以下) と透水係数の関係を図-3に示す。ばらつくものの負の相関性はみられ、細粒分が多いと透水係数は低い値を示した。次に、図-4に粘土含有率と透水係数の関係を示す。図-3と同様に負の相関傾向はみられる。Hendrayantoら¹⁴⁾は雲仙火山灰を対象に透水係数と粘土含有率の関係式を求めている。図中にHendrayantoら¹⁴⁾が示した関係式を示すが、三宅島や有珠山の火山灰ではこの関係式からずれており、必ずしもこの関係式に全ての火山灰が当てはまるわけではないことがわかった。以上の結果を整理すると、相関はやや低いものの代表粒径が小さいほど、また細粒分が多いほど透水係数は小さくなる傾向がみられた。

4.2 透水係数と間隙比の関係

粒径や粒度分布と同様に火山灰の透水性を決める要因のひとつとして間隙比が挙げられる。ここでは、間隙比と透水性の関係をみていく。

山内ら¹⁸⁾は桜島の火山灰を用いて定水位透水試験を行い、間隙比と透水係数の関係を示している。また、同時に乾燥密度と透水係数の関係も示している。間隙比が大きいほど、乾燥密度が小さ

いほどに透水係数が大きくなる傾向を示している。

図-2～図-4と同様に既存文献中にあるデータに加えて土木研究所で実施した試験結果を用い、透水係数と間隙比の関係を整理した (図-5)。代表粒径0.075mm (粗粒分と細粒分の境界) を境に分類しているが、それぞれのグループでみると間隙比が大きいほど透水係数は大きくなる傾向があり、既存の研究成果と同様の傾向を示した。

以上のように、粒度組成、特に細粒分の含有率や間隙比は透水係数と密接な関係があり、粒度が細かいほど、または、間隙比が小さいほど、火山灰の浸透能は低下すると考えられる。

5. まとめと今後の課題

火山噴火に伴い火山灰が堆積した箇所では、浸透能が著しく低下するといわれる。火山灰の透水性に関する研究はこれまでも各火山を対象に多くなされている。本検討では、既存文献のレビュー、文献中のデータや土木研究所で実施した試験結果を基に、火山灰の浸透特性に影響する項目ごとに浸透能・透水係数との関係を整理した。その結果、下記の傾向が明らかになった。

- (1) 火山ごと、試験方法ごとにばらつきがあるが、概ね $10^{-6} \sim 10^{-1} \text{ cm/sec}$ であった。平均的には 10^{-3} cm/s オーダのものが多かった。
- (2) 火山灰に含まれる粘土・シルト分の含有率、粘土含有率が高いほど透水係数の値は小さくなる。また、間隙比が大きくなるほど浸透能・透水係数が大きくなる傾向がある。

火山が噴火して大量の火山灰や火砕流が堆積した流域では、次の降雨時に土石流が発生することが懸念される。被害を軽減するためには、降雨前までに土石流の発生危険度や発生規模を把握することが望ましい。噴火後の流域における土石流の発生には表面流の発生が大きく影響すると言われるが例えば、1)、その表面流の発生は火山灰の浸透能に支配される。また、火山灰の浸透能は、降下後様々な理由で経時的に増大すると考えられる (例えば、16)。今後、より正確かつ迅速に火山灰等の浸透能や透水係数を把握する手法を開発するとともに、その経時変化メカニズムを解明することが課題である。

参考文献

- 1) 池谷 浩：雲仙・水無川の土石流発生機構について、砂防学会誌 (新砂防), Vol.46, No.2, p.15-21, 1993

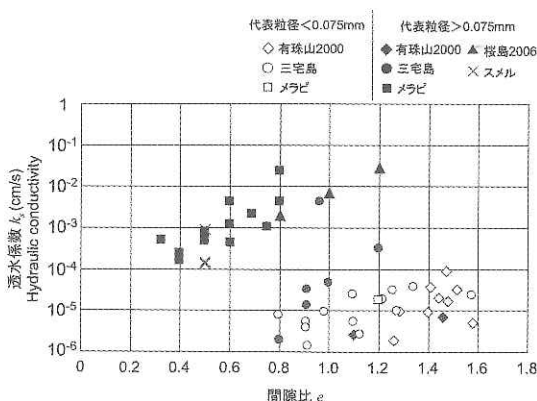


図-5 間隙比と透水係数の関係

- 2) 地頭菌隆、下川悦郎：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（新砂防）、Vol.42, No.3, p.18-23, 1989
- 3) 地頭菌隆、永田 治、寺本行芳、下川悦郎：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、Vol.49, No.5, p.42-48, 1997
- 4) 小橋澄治、水山高久、小杉賢一朗、ヘンドロヤント：雲仙火山における降下堆積物の浸透特性、砂防学会誌（新砂防）、Vol.47, No.1, p.47-50, 1994
- 5) 野村康裕、小杉賢一朗、水山高久：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、Vol.55, No.6, p.3-12, 2003
- 6) 地頭菌隆、下川悦郎：桜島における火山活動が土石流・泥流の発生や流出に及ぼす影響、砂防学会誌（新砂防）、Vol.43, No.6, p.9-15, 1991
- 7) 山本 博、今川俊明：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、No.13, p.25-33, 1983
- 8) 佐藤耕治、渡邊康玄：有珠山における降下堆積物の浸透特性、北海道開発土木研究所月報、No.581, p.46-49, 2001
- 9) 小川泰浩、清水 晃、久保寺秀夫：噴火活動停止後の雲仙普賢岳周辺斜面における噴火堆積物の浸透特性、平成11年度砂防学会研究発表会概要集、p.304-305, 1999
- 10) 西田顕郎、小橋澄治、水山高久：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、Vol.49, No.1, p.49-53, 1996
- 11) 西田顕郎、水山高久：雲仙普賢岳火砕流堆積物の表面構造、砂防学会誌、Vol.51, No.3, p.44-46, 1998
- 12) 東 孝寛、高山昌照、近藤文義、岩下幸司：火山灰の混合に伴う畑作土（黒ぼく土）の透水性、保水性の変化、自然災害西部地区部会報・論文集、13号, p.60-64, 1992
- 13) 恩田裕一、竹中千里、水山高久：雲仙火山灰が浸透能低下を引き起こす原因、砂防学会誌、Vol.49, No.1, pp.25-30, 1996
- 14) Hendrayanto、小橋澄治、水山高久、小杉賢一朗：HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF NEW VOLCANIC ASH DEPOSIT、水文・水資源学会誌、第8巻、第5号, p.484-491, 1995
- 15) 下川悦郎、地頭菌隆、寺本行芳：雲仙普賢岳における侵食と土石流、雲仙岳の土石流・火砕流災害に関する総合的研究、文部省科学研究費No.06302079, p.29-38, 1995
- 16) 地頭菌隆、下川悦郎、寺本行芳、永田 治：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（新砂防）、Vol.49, No.3, p.33-36, 1996
- 17) 宮縁育夫、清水 晃、竹下敬司：雲仙普賢岳1990～95年噴火堆積物の粒度組成と浸透能、地形、第20巻、第2号, p.85-96, 1999
- 18) 山内豊聡、村田秀一、岡林 巧：降雨下における桜島降下火山灰斜面の侵食崩壊機構に関する実験的研究、桜島地域学術調査協議会調査研究報告、p.133-148, 1984
- 19) 寺本行芳：火山灰被覆に伴う侵食と土砂流出、鹿児島大学農学部演習林研究報告、33, p.73-120, 2005
- 20) 山越隆雄、水山高久、内田太郎、野村康裕、安養寺信夫、榎本敏仁（2002）：三宅島噴火後1年間の火山灰堆積斜面の浸透能と土砂流出の変化、砂防学会誌、Vol.55, No.2, p.36-42
- 21) 寺本行芳、下川悦郎、地頭菌隆：雲仙普賢岳湯江川流域における侵食および土砂流出過程、砂防学会誌、Vol.57, No.4, p.15-25, 2004
- 22) 竹下敬司：桜島火山の降灰に伴う土壌浸透能の変化と火山斜面の侵食、第93回日本林学会大会発表論文集、p.413-416, 1982
- 23) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説（第1回改定版）、丸善、p.341-342, 2000
- 24) 下川悦郎、地頭菌隆：桜島における表面侵食による土砂生産、砂防学会誌（新砂防）、Vol.39, No.6, p.11-17, 1987
- 25) 高橋 裕、安藤義久、盛谷明弘：流域地表面の浸透能測定法の相互比較、水利科学、Vol.29, No.1, p.35-44, 1985
- 26) 下川悦郎、地頭菌隆：桜島火山における土砂生産と火山活動、火山体の水循環－関係論文と既往研究レビュー集－、p.102-139, 1992

田方 智*



日本工営株式会社（前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム交流研究員）
Satoshi TAGATA

武澤永純**



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム研究員
Nagazumi TAKEZAWA

山越隆雄***



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム主任研究員、農博
Dr. Takao YAMAKOSHI

栗原淳一****



長野県土木部砂防課（前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム上席研究員）
Junichi KURIHARA