

土石流の発生予測を目的とした UAV 搭載型自動透水性試験装置の開発

○谷島 諒丞, 渡辺 敦志, 永谷 圭司, 皆川 淳, 金井 啓通

Development of UAV hanging type automatic permeability testing device

○Ryosuke YAJIMA, Atsushi WATANABE, Keiji NAGATANI,
Jun MINAGAWA, and Hiromichi KANAI

Abstract : Water permeability is an important data to predict debris flow. However, there is no unmanned method to measure it until now. Therefore, we aim to measure it without human and developed UAV hanging type automatic permeability testing device using a water balloon and cameras. As a result of experiment, this could observe difference of permeability between hard and soft ground.

1. 緒言

活火山の噴火に伴い降灰が発生し、山体斜面が火山灰に覆われると、地面の透水性が低下することが多い¹。このような状態で降雨が発生すると、山体斜面では、雨水が地面に浸み込まず、地表に表面流が発生する。これによって地表が削られ、リルやガリーのような溝状の地形が形成されると、活火山の麓の地域に甚大な被害を与える土石流の発生につながる。このため、地面の透水性は、土石流の発生を予測する上で重要な情報の1つであり、噴火に伴い降灰が発生した際には、迅速に透水性を調査することが必要である。

一方、活火山が噴火すると、噴火の規模に応じて火口の周辺に半径数 km の立入制限区域が設定され、人が山体斜面に近づくことはできない。しかし、従来の透水性計測方法はいずれも無人では実施できないため、これまで噴火時に立入制限区域内の山体斜面の透水性を調査することはできなかった。

そこで、本研究では、噴火が発生した際、土石流が発生する前に、立入制限区域内の透水性を応急的に無人でかつ迅速に調査することを目的とし、カメラを用いて透水性を調べる UAV 搭載型自動透水性試験装置を開発した。本稿では、開発した試験装置ならびに実施した動作試験について述べる。

2. 透水性調査のシナリオと試験方法の検討

2.1 システムの提案と透水性調査のシナリオ

本研究では災害時の応急的な調査の実現を目指すため、調査手法には迅速であることが要求される。迅速性は、「現場まで迅速に到達できること」と「透水性を迅速に調べら

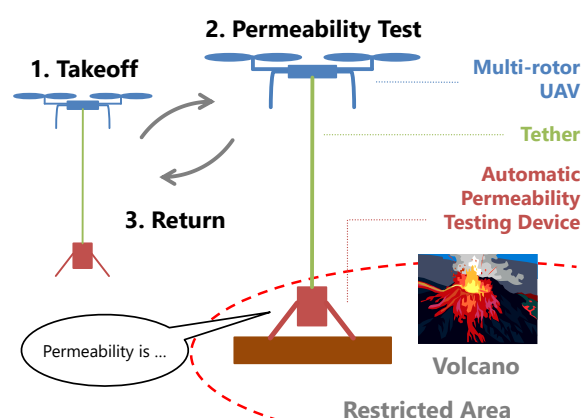


Fig. 1: System configuration and scenario of permeability examination

れること」の2つに分けることができるが、本研究では、前者を実現するために、UAVを用いることとする。UAVは、地表の状態によらず、高速で移動することが可能である。一方、状況が正確にはわからない不整地の山体斜面にUAVを自動で着陸させることは、墜落の恐れがある。そこで、UAVを着陸させて試験を行うのではなく、図1右側に示すような、UAVから透水性試験装置をテザーで吊り下げた構成のシステムで、試験装置のみを着陸させ、試験を行うこととした。この方式は、本研究室で開発した土砂サンプリングデバイスでも採用されており、実際に活火山で運用した実績もある²。

このシステムを用いた透水性調査のシナリオを以下に示す。

- (1) カメラを取り付けた UAV で、立入制限区域内の状況を把握する。
- (2) 得られた画像から、土石流の発生危険がある場所を調べ、透水性を調査する地点を決定する。

- (3) 透水性試験装置を吊り下げた UAV を立入制限区域外の安全な地点から離陸させる。(図 1-1)
- (4) 目的地点にて、透水性試験装置のみを着地させ、透水性を調査する。この間、UAV は上空でホバリングしている。(図 1-2)
- (5) 試験が完了したら、透水性試験装置を持ち上げ、離陸地点に戻る。(図 1-3)
- (6) 得られたデータを防災減災対策に役立てる。

2.2 試験装置と試験方法への要求

このシナリオを実現するための要求事項として、透水性を迅速に調べることが挙げられる。これは、対策を立てるために土石流が発生する前に情報が必要である他、UAV の飛行時間に制限も存在するためである。

次に、UAV に搭載するため、小型軽量の装置で実現できることが求められる。立入制限区域内に運搬することを考えると、片道 3km 程度の運搬が必要であり、UAV の積載重量を考えると、試験装置は最大でも 3 kg 以内におさえる必要がある。

また、迅速性にも関連するが、試験を実施し、その場ですぐに結果が得られる試験であることが望ましい。現場での作業後に手間のかかる処理が必要である場合、結果を得るのに時間がかかってしまい、防災減災対策に役立てることができない。

2.3 従来の計測方法の自動化・無人化

まず、従来の試験方法が上述の要求を満たして自動化・無人化できるかを検討した。現場における透水性試験方法は、冠水型と散水型に大別され、従来これらの方法が用いられてきた³。

冠水型は、地面に差し込んだ円筒内に水を注ぎ、その水位の変化から単位時間当たりの浸透量を求める方法で、携帯しやすく、使い方も簡単であるため、広く用いられている。しかし、計測範囲が狭いため計測地点による差異が大きい、自然な降雨を再現していないため計測値が過大になる等の問題もある⁴。この方法を自動化・無人化するにあたっての課題は、円筒を十分に地面に差し込み、水が漏れないようにすることである。軟らかい地面の場合、小型軽量の装置でも容易に差し込むことができるかもしれないが、硬い地面の場合、複雑な構造で、十分な重量がある装置でなければ、差し込むことができない。従って、冠水型では、UAV に搭載できる装置にできないと考えられる。

散水型は、傾斜のある地面の一定範囲に降雨を模擬して散水し、斜面下側まで地表を流れた水を回収し、散水量と

回収した地表水量の差から単位時間当たりの浸透量を求める方法である。これは、自然に近い降雨を再現できるが、器具が大型で必要な水量も多いため携帯に向かない。この方法の自動化・無人化を考えると、まず、水の量は 10 L 程度必要とされているため、UAV で運搬し、遠隔で試験を行うことは困難であると考えられる。また、広い範囲に水を撒き、表面を流れた水を斜面下側で回収しなければならないため、装置の小型化も望めない。従って、散水型も、UAV に搭載できる装置にはできないと考えられる。

また、現場で不攪乱サンプルを採取し、持ち帰って、透水性試験を行い、透水係数を調べるという方法もあるが⁵、現場ですぐにデータを得ることができず、本研究の目的には合わない上、不攪乱サンプルを採取することが容易ではないという問題もあるため、この方法も適切ではない。

2.4 カメラを用いた透水性試験

前節より、従来の試験方法は、UAV を用いて無人で迅速に行う応急的な調査には適さないことが分かった。そこで、本研究では、より簡易的に透水性を調べる従来とは異なる試験方法を採用することとした。冠水型も散水型も、基本的には、地面への水の染込み具合を確認しているだけであることから、山体斜面に水を流し、その様子を観察するだけで、水の流れ方や浸み込み方の違いから、簡易的に透水性を調べることができると考えた。この方法は、装置としても、一定量の水を流す機構と流れた水を撮影するカメラだけで実現できるため、UAV に搭載できる小型軽量のものにできると考えられる。

3. UAV 搭載型自動透水性試験装置の開発

3.1 UAV 搭載型自動透水性試験装置

カメラを用いた透水性試験を行う装置として、本研究では、図 2 に示す、UAV 搭載型自動透水性試験装置を開発した。この試験装置は、流す水を貯めておく貯水部、離着陸を検出し水を流すタイミングを制御する制御部、着陸時の支えになる脚から構成され、貯水部に搭載した水風船を割り、大雨を模擬して水を一度に流し、それをカメラでとらえることで、透水性を試験するものである。サイズは、縦横 350 mm、高さ 320 mm で、貯水部と制御部は直径約 100 mm の円筒である。貯水部の円筒は、下方に水を流すために底がないが、糸が十字に張っており、その上に水風船を搭載する。水は、最大で約 900 ml 搭載できる。また、貯水部の円筒の側面には、カッターの刃が付いたアームを回転させるサーボモーターが取り付けられており、これで水

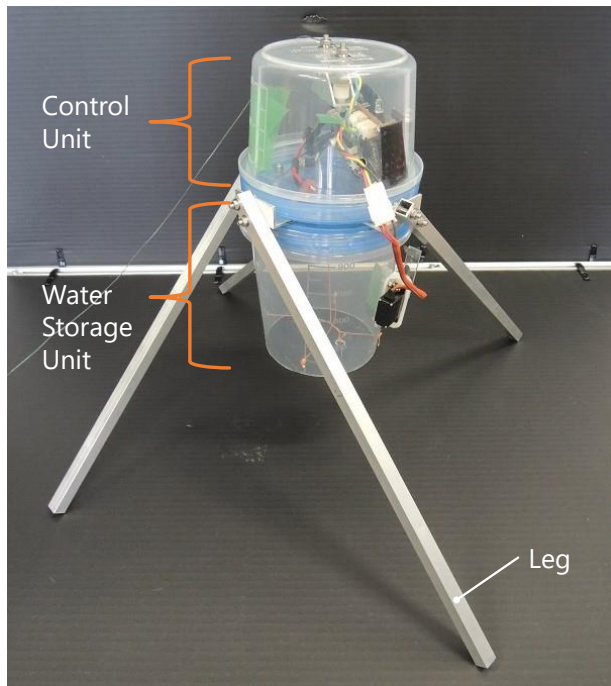


Fig. 2: UAV hanging type automatic permeability testing device (general view)

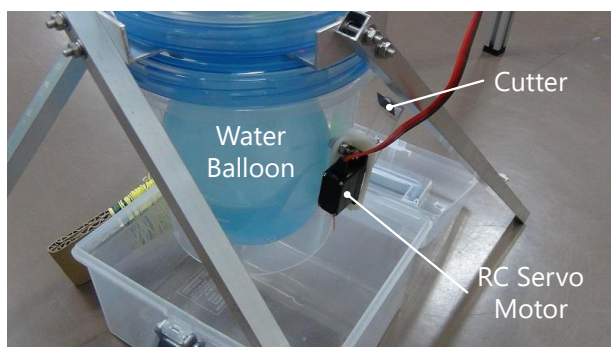


Fig. 3: Water balloon, cutter and RC servo motor of water storage unit

風船を割る (図3)。なお、本装置は、試作段階のため、カメラは取り付けておらず、動作試験をして水の広がり方を確認してから、取り付け位置を決定する。

3.2 透水性試験の流れ

この試験装置を用いた透水性試験は、以下のような手順で実施する。

- (1) 試験装置を降下させ、着陸させる。(図4-1)
- (2) 採取装置は着地を検知し、サーボモータを回転させる。(図4-2)
- (3) サーボモータに取り付けたアームのカッターの刃が水風船を割り、貯水部の円筒の下から地面に水が流れる。(図4-3)

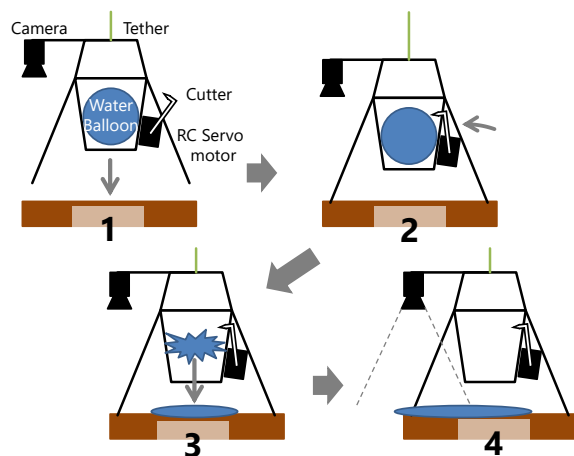


Fig. 4: Process of automatic permeability test

- (4) 地面の水の様子をカメラで撮影する。(図4-4)
- (5) 終了後、試験装置を持ち上げる。
- (6) 得られた画像を人が判別、あるいは、画像処理を行い、透水性を判定する。

4. 動作試験

4.1 試験内容

開発した試験装置が所定の動作を実施できるか、その動作によって地面の透水性の違いを確認できるかを確認するため、動作試験を実施した。試験環境は、図5に示すように、屋外の締め固められた地面と同じ場所をスコップで掘り返し柔らかくなった地面とした。また、UAVは使用せず、UAVで運搬するのと同様に人が試験装置を持ち上げて着地させる動作を行い、試験装置を自動で動作させた。

4.2 試験結果

試験の結果、開発した試験装置は、着地を検知し、水風船を割って、地面に水を流すという一連の動作を自動で実施することができた。一度、試験装置を持ち上げる前に水風船が割れてしまったが、これは誤動作が原因ではなく、水風船の口を縛る際に付いた傷が原因だと考えられる。

また、この試験装置で地面の透水性の違いを確認できることが分かった。締め固められた地面では、水は、装置の中心から約800mm流れ、染込むまでの時間も約20sかかり、地面を流れる様子が確認できた(図6)。一方、スコップで掘り返し柔らかくなった地面では、水は、装置の中心から約200mmしか流れず、染込むまでの時間も約5sしかかからず、水が周囲には広がらない様子が確認できた(図7)。



Fig. 5: Test environment



Fig. 6: Result of automatic permeability test on hard ground



Fig. 7: Result of automatic permeability test on soft ground

4.3 考察

今回行った動作試験では、地面の透水性の違いをとらえられるかの確認にとどまっておき、十分な定量的評価には至っていない。水が吸収されるまでの時間や水が広がった面積等が評価指標になると考えられるが、いずれの評価指標を用いるかは、従来の透水性試験の結果と比較しながら、検討する必要がある。また、その評価指標の値と従来の透水性試験の値の間の換算式、あるいは対応表も必要である。

今回は試作機であるため、カメラは取り付けしていないが、動作試験を行った締め固められた地面では、地表を1 m近く水が流れたため、カメラを取り付ける際は、広範囲を撮影できるようにすべきである。また、実際の運用では、ど

の方向に地面が傾いていて、水が流れるかはわからないので、試験装置の周囲360度を撮影できる、あるいは、斜面下側に視点を向けられるカメラが必要である。

また、開発した試験装置は、貯水部の円筒の底が完全に抜けており、水は一度に全て流れてしまうため、自然な降雨の状態ではない。底を付け、細かい穴をあけた方が、自然な降雨の状態に近づけることができる。どのように水を流すのが透水性を評価するのに適しているかも、従来の透水性試験の結果と比較しながら、検討する必要があると考えられる。

5. 結言

本研究では、噴火が発生した際、土石流が発生する前に、立入制限区域内の透水性を応急的に無人でかつ迅速に調査することを目的とした UAV 搭載型自動透水性試験装置を開発した。この試験装置は、搭載した水風船を割り、地面に水を流し、その様子をカメラで撮影することで、透水性を調査する。また、屋外の状況の異なる2つの地面で動作試験を実施し、動作試験の結果、一連の動作を自動で実施できること、さらに、開発した試験装置で透水性の違いを判別できることを確認した。

今後の課題としては、カメラを取り付けること、透水性計測の定量的な評価を行うこと、水の流し方を検討することが挙げられる。また、開発した試験装置を UAV から吊り下げたシステム全体で、実際の運用を模擬したフィールド試験を実施することも必要である。これらを実施し、改善を重ねることで、UAV 搭載型自動透水性試験装置は、災害時における有用なツールになると考えられる。

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，新砂防，46，2，15 / 21 (1993)
- 2) Ryosuke Yajima, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida : Development and Field Testing of UAV-based Sampling Devices for Obtaining Volcanic Products, Proceedings of the 2014 IEEE Int'l Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, 27 (2014)
- 3) 恩田裕一，辻村真貴，湯川典子：野外における異なる浸透能測定法による測定値の違い，第46回平成9年度砂防学会研究発表会概要集，P-23 (1997)
- 4) 山根玄一：塩ビ管円筒を用いた表層土の浸透能の測定，光珠内季報，75，12 / 15 (1989)
- 5) JIS A 1218:2009，土の透水試験方法