

テーパ付きローラを用いた 旋回式 UAV 搭載型土砂サンプリングデバイスの開発と評価

Development and evaluation of
turning-sampling-device with tapered rollers carried by Multi-rotor UAV

○ 谷島諒丞 正 永谷圭司 (東北大)

Ryosuke YAJIMA, Tohoku University, yajima@frl.mech.tohoku.ac.jp
Keiji NAGATANI, Tohoku University

We have developed UAV hanging type sampling device using rotating rollers to realize unmanned and quick sample-return for pyroclastic material. However, the device cannot obtain samples which are at depth of over 15 mm from the earth's surface. Therefore, we aim to improve the sampling depth of the device. In this research, a new method that is rotated the device using tapered rollers has been proposed, developed, and evaluated. As the result of the evaluation, the slight improvement of the sampling depth has been proved.

Key Words: Volcano Observation, Sample-Return, Pyroclastic Material, UAV

1 緒言

活火山が噴火すると、溶岩流、火砕流、噴石、降灰、土石流等の様々な火山災害が発生する。日本には 110 もの活火山が存在するため、これまでにこれらの火山災害から甚大な被害を受けてきた。火山災害による被害を軽減するためには、様々な情報が必要だが、中でも、堆積した火山灰や火山礫等の火山砕屑物から得られる情報は特に重要である。例えば、火山砕屑物には地下のマグマに由来する成分が含まれており [1]、これを分析することは、噴火の推移の予測に役立つ。また、堆積した火山砕屑物の粒径や透水性を分析することは、噴火後の降雨によって発生する土石流の発生予測に役立つ。しかし、活火山が噴火すると、その規模に応じて、火口の周囲半径数 km に立入制限区域が設定されるため、人が火山砕屑物を採取することはできない。仮に、立入が許可されたとしても、非常に危険である。また、防災に活かすためには迅速性が要求されるが、人による採取では時間がかかってしまう。そこで、ロボットによる無人かつ迅速な火山砕屑物の採取が求められてきたが、それを実現するシステムは存在しなかった [2]。

我々は、この無人かつ迅速な火山砕屑物の採取を実現するため、これまでに、図 1 に示す、UAV 搭載型土砂サンプリングデバイスを開発してきた [3]。このサンプリングデバイスは、平行に並べられた 2 本のローラを内向きに回転させ、地表を崩し、ローラの上に巻き込んで採取を行うもので、UAV からテザーで吊り下げられて、目的地点まで運搬される。このシステムによって無人かつ迅速な火山砕屑物の採取が実現可能となった。しかし、このサンプリングデバイスには、(1) 運搬時に振り子のような振動が発生し、着地時に転倒する、(2) 地表から約 15 mm の深さまでしか採取できない、(3) 地面の粒径分布を維持して採取できない、(4) 不攪乱サンプルが得られない、の 4 つの問題がある [4]。この内、(1) については、UAV の飛行速度の調整とリールを使って採取時のみテザーを伸ばす降下装置によって解決できたが、それ以外の問題については、これまで、解決できていない。

本研究では、解決できていない問題のうち、(2) に注目し、UAV 搭載型土砂サンプリングデバイスの採取深さを改善することを目的とする。本稿では、採取深さを改善する手法として、テーパ付きローラを用いた旋回採取手法を提案するとともに、提案手法を用いたサンプリングデバイスの開発、屋内模擬フィールドでの評価試験を行ったので、それらについて報告する。

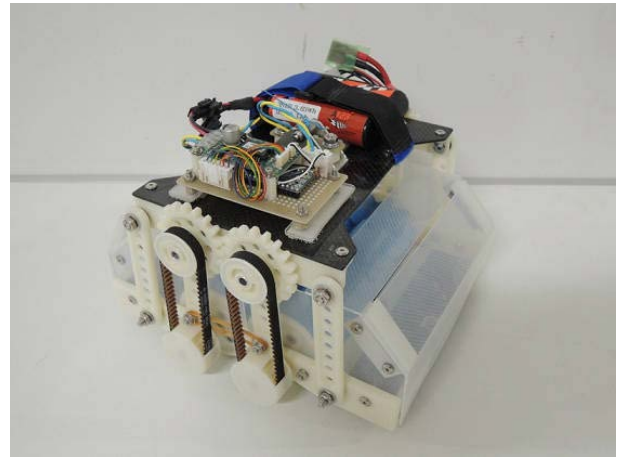


Fig.1: Previous sampling device

2 テーパ付きローラを用いた旋回採取手法の提案

2.1 従来型が 15mm しか採取できない原因

従来型のサンプリングデバイスは、図 2 左に示すように、本体の中央に 2 本のローラを並べて配置し、その左右に採取サンプルの受け皿を取り付けた構造になっている。ローラの最下部から受け皿までの高さは 15 mm である。採取を行うと、ローラの下は採取されるので、ローラは徐々に地面に沈んでゆくが (図 2 中央)、受け皿の下は採取できないので、最終的に、受け皿は地表に接触してしまう (図 2 右)。サンプリングデバイスは、受け皿が地表に接触した時点、つまり、15 mm 掘った時点で、それ以上地面を掘り進めることが出来なくなってしまふ。従って、採取深さに限界が存在する原因は、受け皿の下に地面を採取することできないためであり、その限界値が 15mm である原因は、ローラの最下部から受け皿までの高さが 15 mm に設定されているためである。

2.2 採取深さ改善手法の検討

前節の原因を踏まえると、採取深さの改善手法としては、(1) ローラの最下部から受け皿までの高さ、または、その最大値であるローラの直径を大きくする、(2) 受け皿の下を掘れるように採取機構を取り付ける、(3) 受け皿の下を掘れるように移動しながら

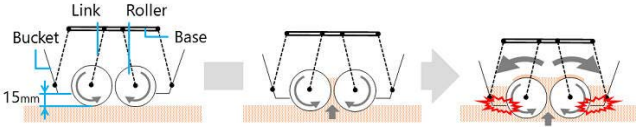


Fig.2: Structure and sampling sequence of previous sampling device (front view)

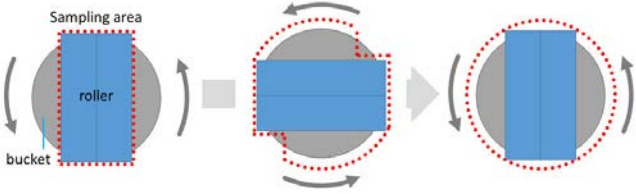


Fig.3: Sampling sequence and sampling area in the case of turning motion (front view)

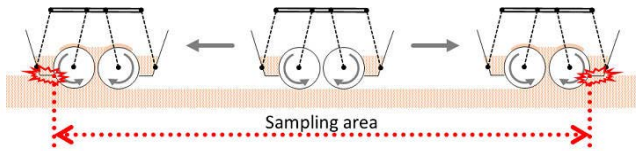


Fig.4: Sampling sequence and sampling area in the case of translational motion (top view)

ら採取する、(4) 受け皿をなくす、の4つが挙げられるが、UAVに搭載するために小型軽量で実現できること、従来型に近い構造で実現できること、明らかな採取深さの限界や問題がないことを条件に検討すると、(3)が適切であると考えられる。(3)は、サンプリングデバイスを移動させることで、今まで掘ることができなかった受け皿の下の部分を採取できるようにし、受け皿が地面に接触せずに採取を続けられるようにする手法であり、移動方法や寸法を検討することで、比較的従来型に近い構造で実現できると考えられる。

2.3 テーパー付きローラを用いた旋回採取手法

本研究では、採取サンプルの受け皿の下を掘れるように移動しながら採取する手法として、テーパー付きローラを用いた旋回採取手法を提案する。これは、サンプリングデバイスを旋回させ、従来型では採取できなかった受け皿の下の部分も採取することで、採取深さを改善しようとするものである。図3に示すように、ローラの幅を直径とする円の内側に全ての構造物が入るように設計することで、サンプリングデバイスの直下の全範囲を採取することが可能になるため、採取を継続できる。この旋回運動は、テーパー付きローラで実現する。テーパー付きローラを回転させると場所によって周速度に差ができるため、これを点対称に配置することで、サンプリングデバイスは対象の中心を軸に旋回運動を行う。

旋回以外の移動としては、並進移動が考えられるが、図4に示すように、移動範囲の両端に採取できない部分が残ってしまうため、採取深さには限界がある。また、テーパー付きローラを用いる方法以外の旋回方法としては、(1) モータ等で外力を加える、(2)2本のローラをさらに前後に分割し、4本にして、点対称の回転速度差を与える、(3)2本のローラをさらに前後に分割し、4本にして、点対称でローラ直径を変える、等が考えられるが、(1)は新たにモータや固定脚が必要になるため、大型化し、重量が増加してしまう、(2)と(3)は構造が複雑になるという問題がある。以上を踏まえ、ここでは、テーパー付きローラを用いた旋回採取手法を採用した。

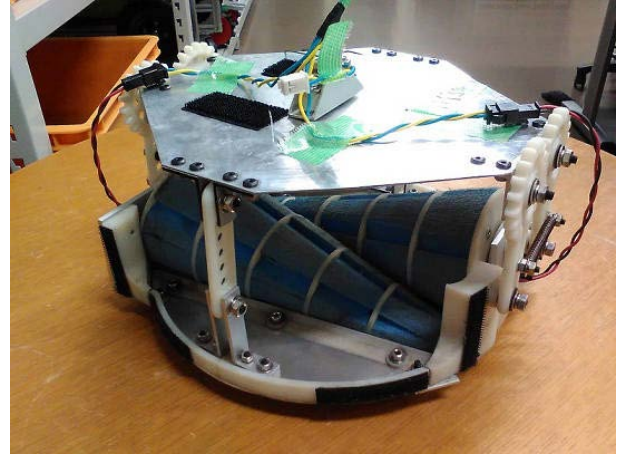


Fig.5: Turning sampling device with tapered rollers

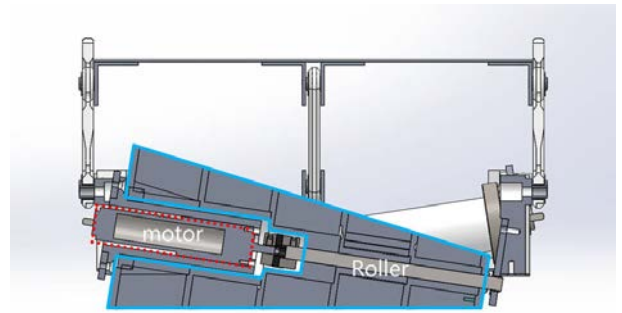


Fig.6: Internal structure of the tapered roller

3 提案手法を用いたサンプリングデバイスの開発

提案手法を実装した、テーパー付きローラを用いた旋回式 UAV 搭載型土砂サンプリングデバイスを開発した。図5に開発した旋回式サンプリングデバイスを、表1に仕様を示す。上から見た形状は、構造上の制限でわずかにみ出している部分があるが、ほぼローラの幅を直径とする円の内側に全ての構造物が入っている。サイズは、受け皿の面積を確保するために、従来型より大きくなっている。開発における最大の課題は、テーパー付きローラを地面に接するように配置すると、ローラ軸が地面や上部のベースと平行にならないため、従来型のようにベースにモータを取り付け、その回転をベルトによってローラに伝達することが困難であるということであった。そこで、本研究では、図6に示すように、ローラの内側にモータを入れて、ローラを直接回転させるようにすることで、この課題を解決した。従って、モータは各ローラに1本ずつ、2本搭載されている。これらの変更に伴い、重量も従来型より増加しているが、UAVに搭載可能な範囲に収まっている。なお、ローラの最下部から受け皿までの高さは、従来型と同様、15mmに設定した。

Table 1: Specification of turning sampling device with tapered rollers

size [mm]	$\Phi 215 \times 140$
weight [g]	1120
roller diameter [mm]	max:75, min:25
roller width [mm]	170
motor	NC-153901G ZJP1/256 (Citizen Chiba Precision Co.)

4 屋内評価試験

4.1 試験内容

開発した旋回式サンプリングデバイスの採取深さが従来型と比べ改善されているか、また、その他の性能に影響がないかを評価するため、屋内の模擬フィールドにて評価試験を実施した。試験では、旋回式と従来型の両方でそれぞれ3回ずつ採取を行い、比較を行った。試験環境には、市販の富士砂（富士山麓に分布する火山砂礫）の粗目（粒径4 mm以上）と細目（粒径4 mm未満）を表2に示す比率で混合した模擬フィールドを用いた。なお、この評価試験では、採取の時間は定めず、採取深さの限界まで、あるいは採取量が増えなくなるまで採取することとした。

4.2 評価項目および計測方法

採取深さ

採取範囲から十分に離れた、採取の影響がない模擬フィールドの地表を基準に、採取範囲で最も深い3点の深さをスケールで計測し、その平均を採取深さとする。

採取サンプルの重量

1回の動作で得られた採取サンプルの全体の重量を電子天秤で計測する。なお、実験環境は十分に乾燥しており、水分の影響は微小であるため、採取サンプルの乾燥は行わない。

採取サンプルの粒径分布

ここでは、簡易的に、粗目と細目の粒径の閾値である4 mmのふるいのみでふるい、粗目と細目それぞれの重量を計測し、割合を計算する。計測は、粗目と細目を混合した、粗目25%細目75%、粗目50%細目50%の2つの模擬フィールドで採取したサンプルに対してのみ行う。また、旋回式と従来型のサンプリングデバイス以外に、ショベルで採取したサンプルについても計測し、これを模擬フィールドの粒径分布として比較に用いる。

採取サンプルの密度分布

密度の計測には、ガラスビーズを用いる [5]。まずサンプル1個の重量を電子天秤で計測し、その後直径2 mmのガラスビーズが入ったメスシリンダーに入れ、入れる前後の体積を比較することで、サンプル1個の体積を求める。密度は、この計測した重量を体積で割ることで求めることができる。ここでは、粗目100%細目0%の模擬フィールドにおいて採取したサンプルのうち、粒径の大きいものから順に各30個のサンプルの密度を計測する。また、旋回式と従来型のサンプリングデバイス以外に、ショベルで採取したサンプルについても計測し、これを模擬フィールドの密度分布として比較に用いる。

4.3 試験結果

各模擬フィールドで採取を実施した結果、旋回式サンプリングデバイスは、想定した通り、旋回をしながら採取を行った。粗目0%細目100%と粗目100%細目0%の模擬フィールドでは、長い時には、1分以上にわたって旋回を続けた。ただし、常にローラの対称中心を軸に回転し続けるわけではなく、地面の状態や重心バランスによって、移動する様子が見られた。一方で、粗目25%細目75%と粗目50%細目50%の模擬フィールドでは、あまり旋回ができず、一周も旋回せずに停止してしまうこともあった。

以下に、各評価項目に関する結果をまとめる。なお、粗目100%細目0%の模擬フィールドでは、粒径の大きい粗目の成分によって、ローラの欠損や受け皿の変形が発生したため、計測値は参考値として扱う。

4.3.1 採取深さ

各模擬フィールドにおける旋回式と従来型の採取深さのグラフを図7に示す。横軸は模擬フィールドに含まれる粗目の重量割合を、縦軸は採取深さを示す。どの模擬フィールドでも、若干ではあるが、旋回式の方が採取深さが深くなっていることが分かる。特に、粗目0%細目100%の模擬フィールドでは、旋回式の方が

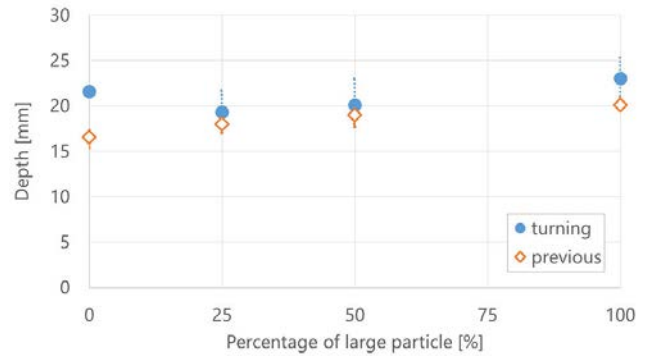


Fig.7: Results of sampling depth

約5 mm深く採取できており、比較的效果が高いと言える。これは、粒径が小さく、ローラの溝で容易に採取でき、かつ、ローラ詰まりにくく、採取を継続できたためであると考えられる。一方で、粗目25%細目75%と粗目50%細目50%の模擬フィールドでは、差が小さくなっているが、これは、本節冒頭でも述べたように、十分に旋回ができず、掘り進めることができなかったためである。また、実際の採取の様子からは、粗目0%細目100%の模擬フィールドでは、約5 mmまでは、旋回しながら採取し、その後、旋回が停止し、従来型と同様、受け皿が接触するまで、採取が続いていることが分かる。なお、従来型の採取深さが、模擬フィールドの粗目の割合が増加するに従って増加しているが、これは、粒子の一部が15 mmより深い位置に埋まっている粒径の大きいものを採取しているためである。

4.3.2 採取サンプルの重量

各模擬フィールドにおける旋回式と従来型の採取サンプルの重量のグラフを図8に示す。横軸は模擬フィールドに含まれる粗目の重量割合を、縦軸は採取サンプルの重量を示す。前節の採取深さのグラフと比較すると、まず、粗目0%細目100%の模擬フィールドでは、旋回式は旋回しながら従来型より約5 mm多く掘っているにもかかわらず、重量に大きな差がない。これは、旋回中に、採取されず周囲に押し出したものがあることを意味していると考えられる。実際、採取中には、重心の位置または地面の状態の影響で、片側の受け皿が地面に接触し、地面の富士砂が周囲に排除されている様子が確認できた。また、粗目100%細目0%の模擬フィールドでは、採取深さは旋回式の方が深いにもかかわらず、重量は若干ではあるが従来型の方が多くなっている。これは、本節冒頭でも述べたように、ローラの欠損や受け皿の変形が発生したことで、採取サンプルが流出したことが原因である。

4.3.3 採取サンプルの粒径分布

採取サンプルの粒径分布のグラフを図9に示す。横軸は模擬フィールドに含まれる粗目の重量割合を、縦軸は採取サンプルに含まれる粗目の重量割合を示している。旋回式と従来型のどちらの採取サンプルも、ほぼ同じ値で、粗目を多く採取している。これは、粒径の大きいものを採取する際に、ローラの間が開き、粒径の小さいものが落ちてしまうため、粒径の小さいものが採取されづらいことが原因である。基本的な採取方法は、旋回式でも従来型でも同じなので、結果もほぼ同じになったと考えられる。

Table 2: Weight ratio of Fujizuna in the simulated fields

Ratio of large particle [%]	Ratio of small particle [%]
0	100
25	75
50	50
100	0

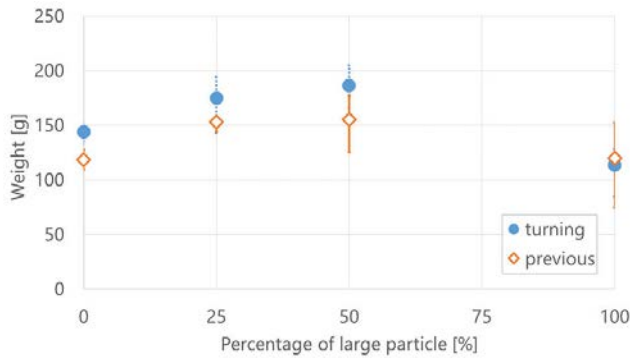


Fig.8: Results of sampling weight

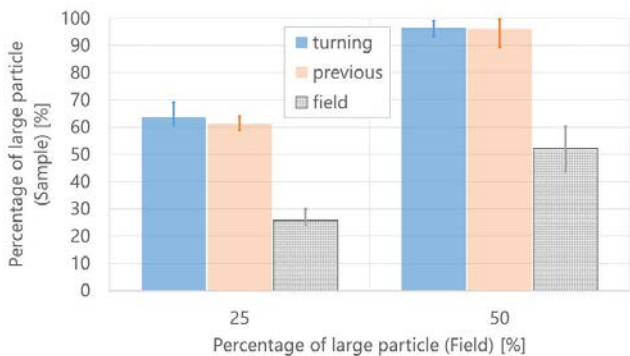


Fig.9: Results of particle size distribution

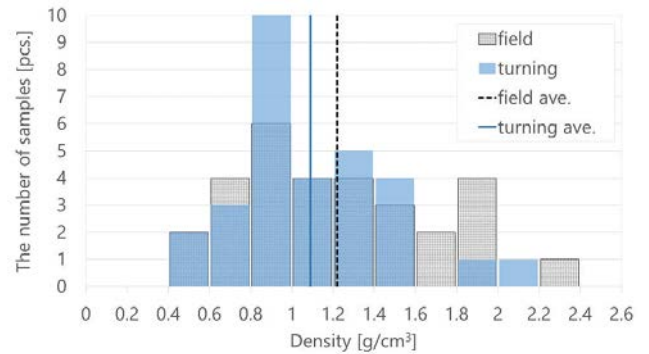
4.3.4 採取サンプルの密度分布

採取サンプルの密度分布のグラフを図 10 に示す。グラフの横軸は密度を 0.2 g/cm^3 ごとに区切った階級を、縦軸は各階級内の密度を持つサンプルの個数を示す。旋回式と従来型のどちらの採取サンプルも、極端な特徴はなく、ほぼフィールドと同じ分布で採取できていると言える。前節の粒径分布と同様、基本的な採取の方法は、旋回式でも従来型でも同じなので、少なくとも粒径の大きいものに関しては、密度によって、採取の可否が決まることはないのだと考えられる。一部、多く採取されている階級や模擬フィールドには存在しているにもかかわらず採取されていない階級が存在するが、これは、サンプル数が少ないためであると考えられる。

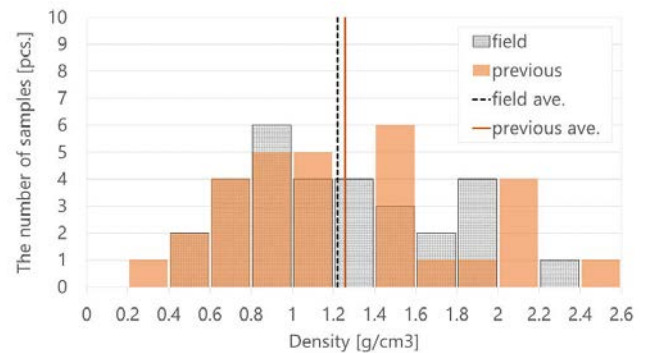
5 結言

本研究では、UAV 搭載型土砂サンプリグデバイスの採取深さを改善することを目的とし、15 mm 以上の深さの採取の妨げとなっていた採取サンプルの受け皿の下の地面をサンプリグデバイスを旋回させることによって採取できるようにするテーパ付きローラを用いた旋回採取手法を提案した。また、提案手法を実装した旋回式 UAV 搭載型土砂サンプリグデバイスを開発し、屋内評価試験でその性能や特性の評価を行った。評価の結果、提案手法を用いることで、採取深さを深くすることができることが証明できた。ただし、掘った部分の地面が全て採取されているわけではなく、徐々に流出していたり、周囲に排除されたりすることが分かった。また、採取サンプルの粒径分布や密度分布については、従来型のサンプリグデバイスとほぼ変わらないことが分かった。

今後の課題としては、ローラの欠損や受け皿の変形が発生しないよう改良すること、サンプルの流出を防ぎより多く採取できるような仕組みを検討することが挙げられる。



(a) Turning sampling device and simulated field



(b) Previous sampling device and simulated field

Fig.10: Results of density distribution

謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」の委託業務の一環として実施された。

文献

- [1] K. Watanabe, T. Danhara, K. Watanabe, K. Terai, T. Yamashita, "Juvenile Volcanic Glass Erupted Before the Appearance of the 1991 Lava Dome, Unzen Volcano, Kyushu, Japan", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, volume 89, p113-121, 1999
- [2] 山田孝, "火山砂防研究の現時点での到達点とこれからの課題", *砂防学会誌 Vol.64 No.5*, p1-2, 2012
- [3] 谷島諒丞, 永谷圭司, 吉田和哉, "無人電動マルチロータ機搭載型土砂採取機構の開発", *日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2014*, 1P1-H03, 2014
- [4] 谷島諒丞, 久利美和, 永谷圭司, 吉田和哉, "UAV 搭載型火山砕屑物採取装置の開発と評価", *日本地球惑星科学連合 連合大会 2015 年大会予稿集, SVC45-16*, 2015
- [5] 佐々木龍男, 勝井義雄, "ガラスビーズを使った軽石の密度測定法", *火山 第 2 集 第 26 巻*, p117-118, 1981