

回転ローラを用いた MUAV搭載型火山噴出物採取装置の開発とフィールド試験

○ 谷島 諒丞 (東北大学), 永谷 圭司 (東北大学), 吉田 和哉 (東北大学)

Development and Field Test of Roller Type Sampling Device for Obtaining Volcanic Products

○ Ryosuke YAJIMA (Tohoku Univ.), Keiji NAGATANI (Tohoku Univ.), Kazuya YOSHIDA (Tohoku Univ.)

Abstract: When an active volcano erupts, a restricted area is imposed around the crater of the volcano for safety. On the other hand, it is important to observe inside of the restricted area. Particularly, sampling and analyzing of volcanic products inside the restricted area is very important for a forecast of volcanic activity or disasters. In our past research, we have been developing a roller type sampling device to obtain small volcanic products, and carried out indoor experiments and outdoor field tests. Through the experiments, we found that some issues were uncovered. Therefore, in this research, we developed a new sampling device to solve them. In this paper, we introduce the new sampling device, and report indoor experiments and outdoor field tests using the device.

1 緒言

日本には110もの活火山が存在し、多くの火山が活動している。最近では、2013年11月に小笠原諸島の西之島で噴火が起こり、現在も活動を続けている[1]。また、2014年8月には、鹿児島県の口永良部島の新岳が34年ぶりに噴火し、住民が自主避難した[2]。この他にも、桜島、阿蘇山、草津白根山、三宅島、諏訪之瀬島、霧島山等で、活発な火山活動や噴火の前兆現象が確認されている。日本は常に火山災害と隣り合わせであり、火山災害に対する防災対策が必要不可欠である。

火山が噴火すると、その活動に応じて、立入制限区域が定められる。例えば、浅間山では、噴火警戒レベルがレベル3(入山規制)になると、火口から4km以内への立ち入りが制限される。その一方で、避難計画の策定や火山災害の予測のためには、立入制限区域内の状況把握が必要である。

状況把握の方法の中でも、立入制限区域内に降り積もった火山噴出物のサンプルリターンは特に重要である。例えば、火山噴出物が堆積した場所で、降雨後に発生する土石流の発生予測の精度向上には、堆積した火山噴出物の分析が重要であることが知られている。また、噴火初期の火山噴出物には、地下のマグマに由来する成分が含まれているため、それを採取し、その成分を分析することができれば、その後の火山活動の推移予測につながる。しかしながら、これまでに研究開発されてきた無人火山探査ロボットは、主に移動機構を用いて立入制限区域に侵入し、カメラやセンサを用いて環境情報を取得することが目的であり、火山噴出物を採取することが一切できない、または、素早く火山噴出物を持ち帰ることができなかった[3][4][5][6][7]。

本研究室では、これまでに、Fig. 1に示すような無人電動マルチロータ機(以降、MUAVと表記)による火山噴出物

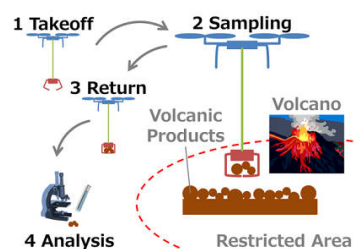


Fig. 1: Sample-return scenario of volcanic products inside restricted areas

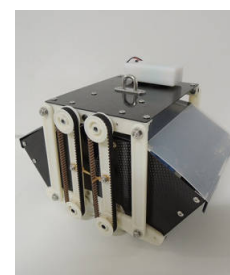


Fig. 2: Sampling device "Strawberry II"

の採取を想定し、回転ローラを用いた火山噴出物採取装置 Strawberry II (Fig. 2, 以降、SB-2と表記)を開発し、研究室での土砂採取実験や屋外でのフィールド試験を行ってきた[8]。土砂採取実験やフィールド試験から、採取装置の性能が明らかになり、MUAVによるサンプルリターンの実証もできたが、同時にいくつかの問題も判明した。

そこで、本研究では、これらの問題を解決するため、火山噴出物採取装置 Strawberry III (以降、SB-3と表記)の開発を進めてきた。本稿では、SB-3の開発と改良点、ならびに、SB-3を用いた土砂採取実験とフィールド試験について報告する。

2 Strawberry IIの問題点

筆者らは、これまで、SB-2を用いた研究室内の砂場・砂利場における土砂採取実験ならびに、2014年4月8日に広瀬川河川敷にてフィールド試験を実施してきた。土砂採取実験の結果より、採取量に関する特性等が明らかとなり、また、フィールド試験の結果より、MUAVからSB-2をテザーで釣り下げた構成で、実際にサンプルリターンが行えることが実証されたが、同時に以下に示す問題が判明した。



Fig. 3: Clogging of samples between roller and bucket



Fig. 4: Tipping over of SB-2

採取物がローラとバケットの間に詰まる

屋内での採取実験中には、Fig. 3に示すように、採取物がローラとバケットの間に詰まり、回転が止まってしまう、またはローラが破損してしまうという現象が見られた。これは、大量の砂利を採取した場合に見られ、採取量に対しバケットの大きさが小さいことが原因である。また、ローラとバケットの間の仕切りが低いことも原因の1つである。

採取量が少ない

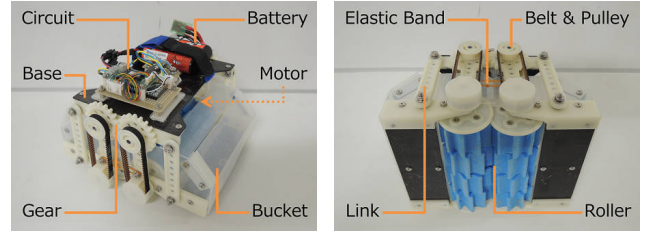
SB-2を使ったフィールド試験での採取量は、Table 1に示すように、研究室で行った土砂採取実験の採取量に比べ、少ないという問題が明らかとなった。これは、フィールド試験ではSB-2の電源に、軽量でかつ入手しやすいことから9V乾電池を用いたが、9V乾電池では電池容量が小さいため、繰り返し行ったフィールド試験において、十分な電流を流すことができなかったためであると考えられる。

斜面で転倒する

SB-2は、採取を行う目的地点に傾斜がある場合、Fig. 4に示すように、転倒しやすいという問題も明らかとなった。これは、ローラの軸間距離を変えるためのリンクの長さが長く、さらにモータ・回路・電池等の重量物が最上部にあり、重心が高いためである。また、左右のリンクの動きが同期されていないため、リンクが同じ方向へ動くとき、リンク上部のモータ・回路・電池等の重量物が載ったベース部分が、斜面下側へ移動し、重心がずれて、不安定になることも原因の1つであることが判明した。

Table 1: Field test results for SB-2

	outdoors (field test)				indoors (experiment)
	1st	2nd	3rd	avg.	avg.
number of pieces of gravel [pcs]	2	12	7	7	24.67



(a) General View

(b) Bottom View

Fig. 5: Structure of SB-3

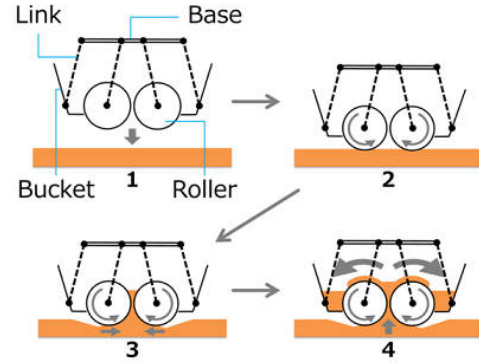


Fig. 6: Sequence of operation of SB-3 for obtaining volcanic products inside restricted areas

3 Strawberry IIIの開発

2節で示した問題点を受けて、SB-2を改良した火山噴出物採取装置Strawberry III（以降、SB-3と表記）を開発した。

3.1 構造と動作原理

SB-3の構造をFig. 5に、仕様をTable 2に示す。基本的な構造は、SB-2と同様である。ローラの軸間距離は平行リンクにより変化でき、ローラ間に入ってきた土砂のサイズに応じて開閉するが、リンク間にはかけられたゴムにより、常にローラが閉じる方向に力がかかるようになっている。また、モータの回転はベルト・プリーによってローラに伝えられ、ローラが回転する。動作手順についても、Fig. 6に示すとおり、SB-2と同様で、ローラが地面を崩し、それを巻込むことで、採取を行う。

Table 2: Specifications of SB-2

size [mm]	180×190×130
weight [g]	830
roller diameter [mm]	φ50
roller material	polyethylene foam
motor	NC-153901G ZJP1/256 (Citizen Chiba Precision Co.)
minimum tension [N]	3

3.2 Strawberry IIからの改良点

SB-3では、2節で示した問題点を踏まえ、SB-2から以下のような改良を行った。

バッテリー

フィールド試験での採取量が少なかった問題を解決するため、十分な電流を流すことができ、かつできる限り軽量のバッテリーを選定した。使用するバッテリーは、リン酸鉄リチウムイオンバッテリー（以降、LiFePO4バッテリーと表記）で、電圧9.9V、電流容量1.1Ah、サイズ55×70×20mm、重量139g、最大許容放電電流（連続）33Aである。9V電池（ケース付）と比較すると、サイズは約1.6倍、重量は約2倍となったが、大電流放電に優れている。

底面積

SB-2では、地面を掘り進めることを考慮し、底面積をできる限り小さく設計したが、実験結果より、SB-2は表層の土砂しか採取できないことが明らかとなったため、底面積を小さくする必要はなく、むしろ、斜面での転倒を防ぐため、底面積を大きくし、安定させた方がよいと判断した。また、底面積を小さくしたために、採取物が入るバケットが小さくなってしまい、採取物がローラとバケットの間に詰まるといった問題が発生したことから、底面積を大きくして、バケットを大きくする必要があることがわかる。

そこで、SB-3では、幅（Fig. 5(a)の横方向の長さ）を広げ、底面積をSB-2の約1.2倍とした。これによって、同様に採取物が入るバケットも約1.4倍に広がった。

重心

斜面での転倒を防ぐため、リンクを短くし、重心位置を下げた。SB-2では、リンクの長さが114mmで、重心位置はローラの最下部から約90mmであったが、SB-3では、リンクの長さを67.5mmまで短くすることによって、重心位置をローラの最下部から約70mmまで下げることができた。リンクの長さの変化に対し、重心位置の変化が小さいのは、バッテリーの重量が2倍になったが、位置を変更せず、最上部に取り付けているためである。

リンクの同期

斜面での転倒に関係のある重心移動を防ぐには、左右のリンクの動きを同期させ、リンクが常に左右対称に動くようにする必要があるため、中央のリンクの間に歯車を取り付けた。これによって、リンクが同じ方向に動き、重量物が移動し、重心が移動することがなくなった。

4 Strawberry IIとIIIの比較

SB-2とSB-3の間で、性能にどのような違いがあるかを検討した。ここでは、採取量と斜面での転倒に関する比較を行った。以下に、それぞれの比較について述べる。

4.1 採取量に関する比較

SB-3における改良が採取量にどのような影響を与えるかを調べるため、採取量の比較を行った。実験は、本研究室内に設置した砂利場にて実施し、実験結果は、砂利の採取重量及び採取個数で、3回の採取の平均値である。また、取り付けたローラの溝数は10カ所、素材はポリエチレンフォーム、回転時間は10sで、どちらも同じ条件とした。電源は、SB-2は9V乾電池、SB-3はLiFePO4バッテリーである。実験の結果、採取量は平均で、SB-2の場合、17.3g、6.7個、SB-3の場合、54.0g、32.3個であった。SB-3における改良によって、採取重量は約3.1倍、採取個数は約4.8倍に増加した。

また、予備実験として、それぞれの改良に関する採取量の比較を行い、どの改良がどのような影響を及ぼしているかを検討した。比較に用いたのは以下の3タイプである。

- SB-2：これまでに開発したリンクの同期をしていない採取装置
- SB-2G：SB-2のリンクに歯車を取り付け、リンクを同期させたもの
- SB-3：SB-2を改良し新たに開発した採取装置

全て、取り付けたローラの溝数は10カ所、素材はポリエチレンフォーム、回転時間は10sである。また、電源に関しては、場合によって変更しているため、その都度述べる。予備実験の詳細を以下に述べる。また、実験結果のまとめをTable 3とTable 4に示す。

Table 3: Sampling experiment results 1 (weight [g])

	1st	2nd	3rd	avg.
SB-2 9V	18	14	20	17.3
SB-2G 9V	24	19	25	22.7
SB-2G LiFePO4	30	36	33	33
SB-3	63	53	46	54

Table 4: Sampling experiment results 2 (number of pieces of gravel [pcs])

	1st	2nd	3rd	avg.
SB-2 9V	7	5	8	6.7
SB-2G 9V	19	15	15	16.3
SB-2G LiFePO4	22	29	16	22.3
SB-3	40	30	27	32.3

リンク同期の有無に関する比較

まず、SB-2（リンク同期なし）とSB-2G（リンク同期あり）で採取量の比較を行った。電源は9V乾電池とし、リンクの同期の有無以外の条件は全て同じである。実験結果より、リンクを同期することで、採取量は増加することがわかるが、採取重量は約1.3倍しか増加しなかったのに対し、採取個数は約2.4倍になっている。これは、SB-2（リンク同期なし）の場合は、ベース部分が片側へ移動し、重心がずれることで、地面を移動しながら、表層の大きな砂利のみを採取するが、SB-2G（リンク同期あり）の場合は、ベース部分の移動とそれに伴う本体の移動はなく、その場で採取を続けるため、その場の表層の大きな砂利だけでなく、その下にあった細かい砂利まで採取できたためであると考えられる。

9V乾電池とLiFePO4バッテリーに関する比較

次に、バッテリーが9V乾電池の場合とLiFePO4バッテリーの場合で採取量の比較を行った。実験に用いたのはSB-2Gで、バッテリー以外の条件は全て同じである。実験結果より、9V乾電池からLiFePO4バッテリーに変えることで、採取重量及び採取個数ともに約1.4倍に増加していることがわかる。これは、電圧が高くなったため、回転数が上がったことと、十分な電流が流せるようになったため、トルクが上がったことが関係している。

重心位置及び底面積の変化に関する比較

最後に、SB-2G（重心位置：高、底面積：小）とSB-3（重心位置：低、底面積：大）で採取量の比較を行った。重心位置と底面積に関しては、それぞれ個別に簡易的に実現することができなかつたため、同時に変化させた。電源はLiFePO4バッテリーとし、重心位置及び底面積以外の条件は全て同じである。実験結果より、重心位置を低く、底面積を大きくすることで、採取重量及び採取個数ともに約1.5倍になっていることがわかる。これは、底面積が大きくなったこと、すなわち、採取物が入るバケットが大きくなったことが関係していると考えられる。SB-3のバケットは、SB-2及びSB-2Gの約1.4倍になっており、採取量の増加とほぼ一致している。

4.2 斜面での転倒に関する比較

また、斜面での転倒に関する検討も行った。板で斜面を作り、そこに採取装置を置き、転倒するか否かを確認した。斜面の角度は、0度から30度まで、5度刻みで実験を行った。比較に用いたのは、採取量に関する比較と同様、SB-2、SB-2G、SB-3の3タイプである。また、採取装置のローラの軸方向と斜面方向を平行にする置き方（以降、平行と表

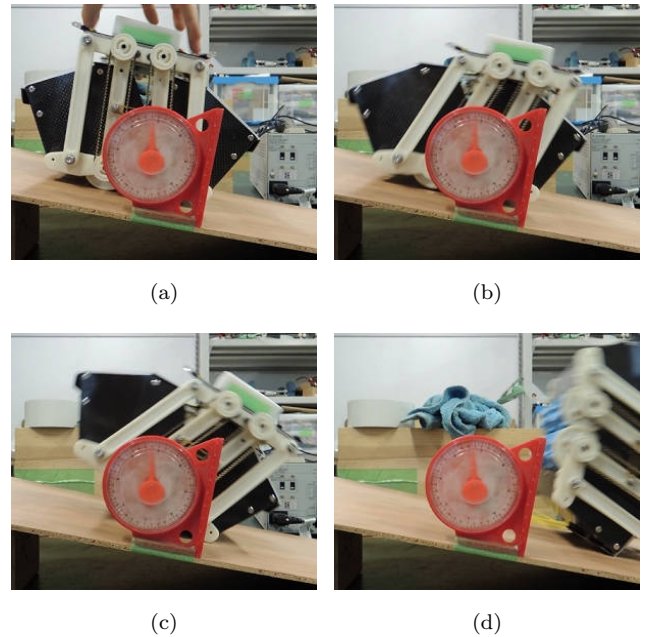


Fig. 7: Slope test result of SB-2

記）とローラの軸方向と斜面方向を垂直にする置き方（以降、垂直と表記）の2つの場合に関して、検討を行った。

まず、平行に置いた場合は、どの採取装置でも、15度までは、斜面上で動かず、20度になると、斜面を滑り始めた。30度になると、SB-2とSB-3は、斜面を滑った後、斜面の終わりで転倒し、SB-2Gは、滑るだけで、転倒はしなかった。実験結果より、30度では違いが見られたものの、25度以下では、明確な差はなく、リンクの同期や20mm程度の低重心化では、ローラの軸方向の転倒防止に寄与しないことがわかる。これは、どのタイプの採取装置も、ローラの軸方向に関しては、サイズが同じで、リンクの動きもないためである。

一方で、垂直に置いた場合は、違いが見られた。SB-2は、5度では、斜面上を動かなかったが、10度で、Fig. 7に示すように、リンク上部のモータ・回路・電池等の重量物が載ったベース部分が斜面下方向へ移動し、重心がずれ、転倒した。SB-2GとSB-3は、15度までは、斜面上で動かず、20度になると、斜面を滑り始め、30度になると、SB-2は、斜面を滑った後、斜面の終わりで転倒し、SB-3は、滑るだけで、転倒はしなかった。実験結果より、SB-2とSB-2G及びSB-3の間で明確な違いが見られ、リンクを同期することが、ローラの軸方向と垂直な方向の転倒防止に大きく貢献したことが分かる。しかし、平行に置いた場合と同様、垂直に置いた場合でも、SB-2GとSB-3の間に、明確な差はなく、1.2倍程度の底面積の拡大や20mm程度の低重心化では、転倒防止の効果は、それほど得られなかったことがわかる。



Fig. 8: Preliminary field test conditions for SB-3 at Tohoku University on August 25, 2014



Fig. 10: Field test conditions for SB-3 at Mt.Koasama on September 10, 2014



(a) Left side bucket (b) Right side bucket
Fig. 9: Preliminary field test results



(a) Left side bucket (b) Right side bucket
Fig. 11: Field test results

5 フィールド試験

SB-3をMUAVから釣り下げ、実際の火山環境にて土砂を採取するフィールド試験を行った。まず、東北大学の敷地内にて予備試験を実施し、その後、小浅間山にて本試験を実施した。以下に、各試験について述べる。

5.1 予備実験

まず、予備試験を2014年8月25日に東北大学の敷地内にて実施した。予備試験では、SB-3を約2.5mのテザーでMUAVから釣り下げ、約10m先の目的地点にある土砂の採取を行った。使用したMUAVは、エンルート社製Zion PG560で、操縦は人が目視で行った。SB-3に取り付けたローラの溝数は10カ所、素材はポリエチレンフォーム、回転時間は10sとした。

Fig. 8にフィールド試験の様子を、Fig. 9に実際に採取したサンプルを示す。予備試験より、SB-3をテザーでMUAVから釣り下げた構成で、サンプルリターンが行えることが確認できた。採取したサンプルの個数は、20個であった。

5.2 本試験

次に、本試験を2014年9月10日に小浅間山にて実施した。本試験では、予備試験と同様に、SB-3を約2.5mのテザーでMUAVから釣り下げ、約50m先の目的地点にある土砂の採取を行った。使用したMUAV、操縦方法、ローラの条件も、予備試験と同様である。

Fig. 10にフィールド試験の様子を、Fig. 11に実際に採取したサンプルを示す。本試験より、実際の火山環境でサンプルリターンが行えることが実証された。採取したサンプルは、29g、10個（1mm以下のものを除く）であった。

また、今回のフィールド試験では、MUAVから釣り下げた状態での採取以外に、ほぼ同じ地点で、MUAVから釣り下げない状態での採取も行った。採取量の結果をTable 5に示す。実験結果より、本試験のMUAVから釣り下げた場合は、著しく採取量が少ないことがわかる。これは、採取地点が斜面であったことが影響している可能性がある。SB-3は、軸対称の構造をしていないため、斜面方向に対しどのような向きでSB-3が置かれたか（例えば、斜面方向とローラの軸方向が垂直・平行等）によって、採取量が変化し得る。実験では、この斜面方向とSB-3の向きの関係が、一定ではなかった。

Table 5: Field test result for Strawberry III

	1st (MUAV)	2nd	3rd
weight [g]	29	110	73
number of pieces of gravel [pcs]	10	21	24

6 結言

本研究では、これまでに開発した火山噴出物採取装置の問題点を解決するために、新たに火山噴出物採取装置 Strawberry IIIを開発した。この採取装置では、リンクの同期、バッテリーの変更、低重心化、底面積の拡大等の改良を行い、これらの改良が、採取量の増加や転倒防止に効果があることを研究室内での実験により確かめた。また、小浅間山にてフィールド試験を実施し、実際の火山環境でサンプルリターンが行えることを実証した。

今後は、フィールド試験で発生した離陸時の転倒や採取場所の誤判定に関する対策、斜面方向と採取装置の向きとの関係が採取量に与える影響の解明等を行う。また、採取物がローラとバケットの間に詰まる問題に対して、バケットを大きくすることで対応を行ったが、それに伴い採取量も増加したため、採取物の詰りの問題については解決できていない。これは、今後、ローラとバケットの間の仕切りの形状の再検討を行うことで解決する予定である。火山噴出物採取装置以外の今後の課題については、テザーの巻取り機構の開発、テザーの振動制御、GPSを用いた自動採取等が挙げられる。

参考文献

- [1] 気象庁地震火山部 火山監視・情報センター，“西之島の火山活動解説資料（平成25年11月）”，火山活動解説資料，2013
- [2] 福岡管区気象台 火山監視・情報センター，鹿児島地方気象台，“口永良部島の火山活動解説資料”，火山活動解説資料，2014
- [3] D. Wettergreen, C. Thorpe and R. Whittaker, “Exploring Mount Erebus by Walking Robot”, International Conference of Intelligent Autonomous Systems, 1993
- [4] J. E. Bares, D. S. Wettergreen, “Dante II: Technical Description, Results, and Lessons Learned”, International Journal of Robotics Research, 1999
- [5] G. Muscato, D. Caltabiano, S. Guccione, D. Longo, M. Coltelli, A. Cristaldi, E. Pecora, V. Sacco, P. Sim, G.S. Virk, et al., “Robovolc: A Robot for Volcano Exploration Result of First Test Campaign”, Industrial Robot: An International Journal, 2003
- [6] 後藤章夫, 谷口宏充, 市原美恵, “無人火山探査車MOVEの開発とその運用課題”, 日本惑星科学会誌 Vol. 21, 2012
- [7] 秋山健, 山内元貴, 永谷圭司, 吉田和哉, 伊豆智幸, “活火山探査を目的とした移動ロボットの開発とフィールド試験”, 第18回 ロボティクス シンポジア 予稿集, 2014
- [8] 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