

氷河がつくる溶岩地形： お菓子で学ぶキッチン火山学の実演

松本 恵子¹⁾・コンウェイ クリス¹⁾・谷 健一郎²⁾・佐野 貴司²⁾・石塚 治¹⁾

1. はじめに

現在、氷河をもつ活火山は世界に 138 個存在している (Edwards *et al.*, 2020). 氷河を擁する火山に溶岩が流れると特徴的な地形ができるのだが、それはどんな地形だろうか？

氷河や雪が存在するなかで発生するマグマ活動や火山活動は、glaciovolcanism (Kelman *et al.*, 2002 ; Smellie, 2006) と呼ばれる。本稿では氷河火山活動と訳すが、日本では氷底火山活動 (subglacial volcanism) と呼ばれ、南極やアイスランドでは顕著に観察されている。これらは、環太平洋でも報告例がある (第 1 図)。

多くの火山にはかつて氷期に氷河が存在していたが、現在はなく (例えば Eaves *et al.*, 2016), 今後どのように変動するかは明らかではない、人間活動の時間スケールに対する氷河体積の変動が顕著になる中で (Vargo *et al.*, 2020), 過去、長期的な時間スケールで氷河域がどれくらい変化したかを理解しておくことは重要である。氷河成の火山地形を識別できれば、過去の気候変動を知る有力な手掛かりとなり得る。ところが、日本では、氷河と火山の相互作用についてはほとんど知られておらず、氷河成火山地形はほとんど認識されていない。

そこで、氷河成火山活動について広く知ってもらうため、自宅のキッチンで作れるソーダブレッド (パン)、チョコレート、アイスクリームを使った簡単な実験を考案した (Conway *et al.*, 2023)。さらに、その実験を 2023 年 3 月 5 日に板橋区立教育科学館 (東京都) で開催された「全国火山実験研究交流会」で一般公開した。本稿では、氷河火山活動の日本での普及を目的として、Conway *et al.* (2023) から実験レシピと実験方法を日本語化し、また、氷河成火山地形の形成過程や過去の気候変動との関係について、主要な部分を日本語で理解できるように翻訳し説明を付すとともに、その一般公開の様子を紹介する。紙面の都合上割愛・再編した説明もあるので、詳細は Conway *et al.* (2023) の

原文に当たってほしい。

2. 氷河と火山との相互作用

日本を含む環太平洋の沈み込み帯では、繰り返す噴火により標高の高い成層火山が形成されている (Davidson and de Silva, 2000)。標高が高い火山には季節変化により積雪があったり、高緯度帯では氷河があったりもする。現代の気候で氷河が観察されていなくても、過去の氷期に氷河による浸食・運搬・堆積などの氷河作用があれば、かつて氷河火山活動があった可能性が高い。

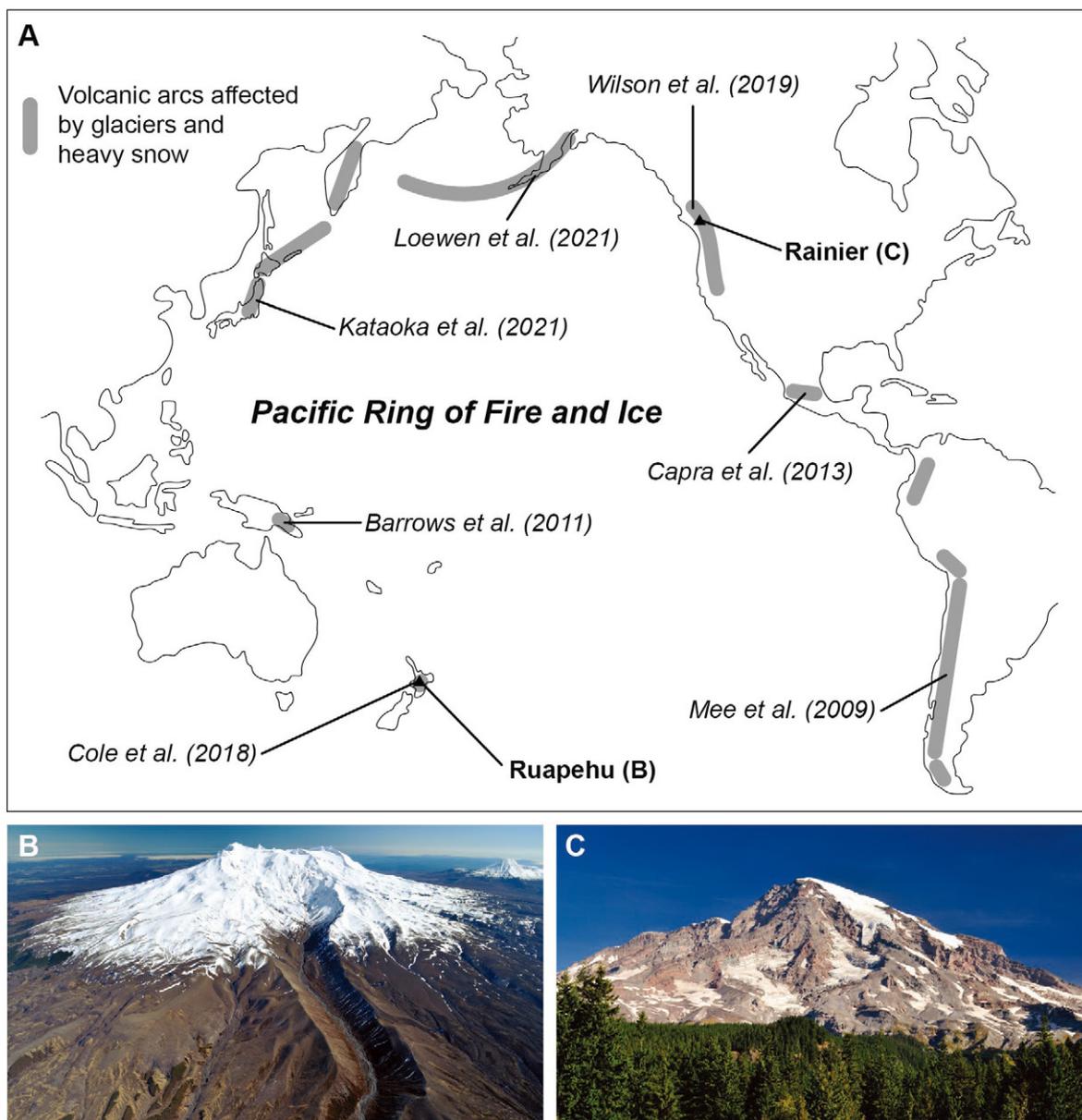
火山体に存在する氷河は、過去約 70 万年の間に発生した 10 万年サイクルの気候変動に呼応して進退してきた (Goñi *et al.*, 2019 ; Coombs and Jicha, 2020)。約 2 万 ~ 2 万 5000 年前の最終氷期極大期 (the Last Glacial Maximum) には、世界の平均気温は今より約 6 °C 低く (Tierney *et al.*, 2020), 現在氷河がない火山も含め、多くの火山に広大な氷河が広がっていた (Eaves *et al.*, 2016)。火山における過去の氷河作用の痕跡は、U 字谷やモレーン (第 1 図 B), あるいは氷河擦痕のある溶岩として認められる。古典的には、このような氷河地形は、活発に噴火する火山の成長期 (比較的温暖な気候ステージ) とは時期を異にする、噴火活動が沈静化した浸食期 (比較的寒冷なステージ) の痕跡であると考えられてきた (例えば Hobden *et al.*, 1996)。この考えに基づけば、谷の側面に尾根状に張り出した溶岩が認められる場合、氷河作用で削り残されたと解釈されており、実際多くの火山で確認されている (例えば Singer *et al.*, 1997)。しかし、⁴⁰Ar/³⁹Ar 法や K-Ar 法による年代測定では、氷河が卓越している時期にも噴火が発生している例が多くあることが示された (Fiertsein *et al.*, 2011 ; Conway *et al.*, 2016 ; Calvert *et al.*, 2018 ; Pure *et al.*, 2020)。では、氷河を擁する火山で溶岩が噴出した場合、どんなことが起こるだろうか？

Mathews (1952) のカナダ・ブリティッシュコロンビア

1) 産総研 地質調査総合センター活断層・火山研究部門

2) 国立科学博物館 地学研究部

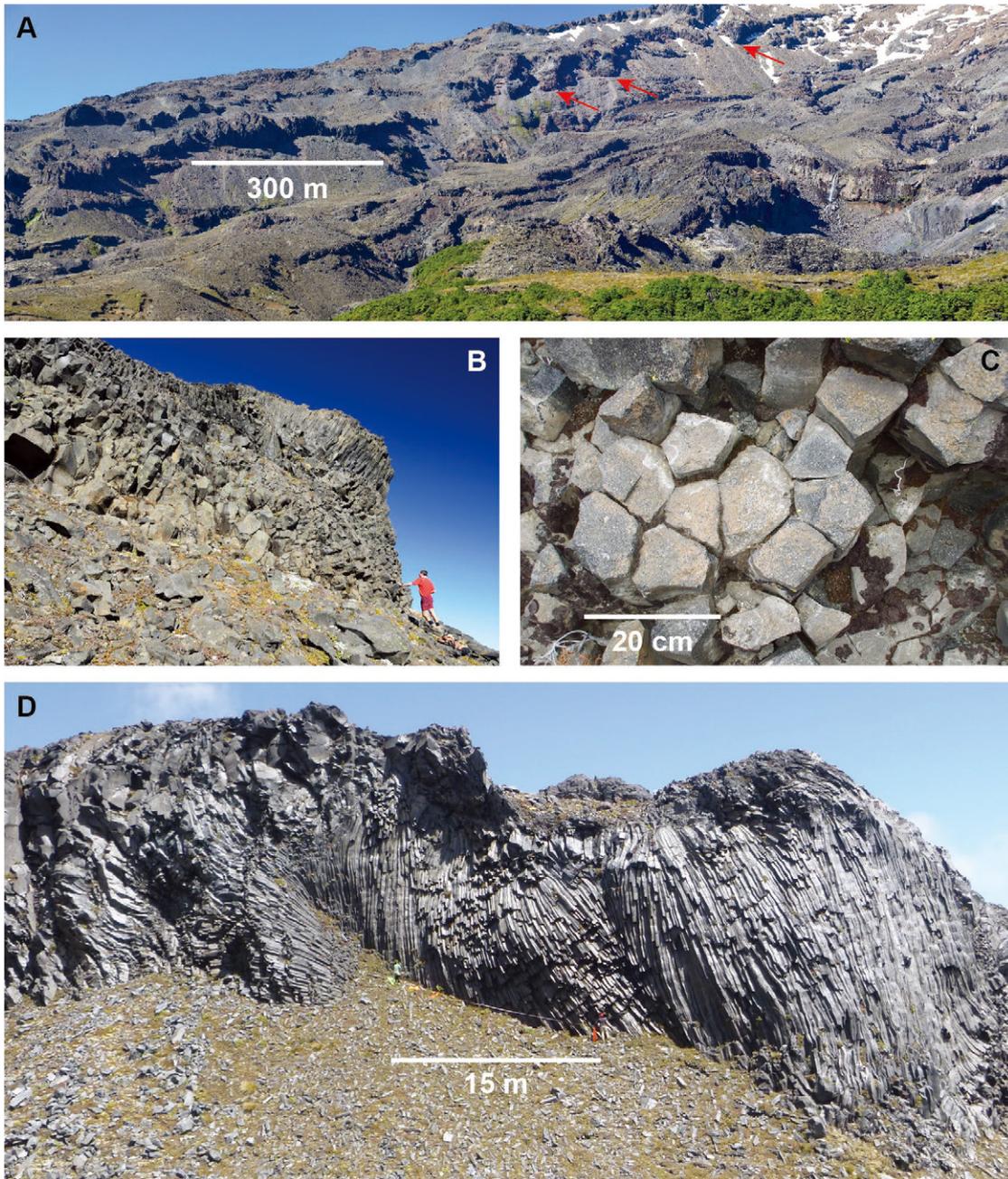
キーワード：氷河火山活動、火山、溶岩地形、気候変動、キッチン火山学、アウトリーチ



第1図 過去約25年以内に氷河火山活動 (glaciovolcanism) が発生した成層火山の例。(A) 過去に氷河や多量の積雪による影響があった環太平洋の火山列を灰色線で示した。地図には Conway *et al.* (2023) で言及した代表的な研究を示した。(B) ルアペフ山 (ニュージーランド) の南東に位置する Wahianoa River。氷食作用によるU字谷の側方にモレーンが形成されている。(C) レーニア山 (アメリカ, ワシントン州) の南東からの写真。複数の氷河と、溶岩による急峻な尾根からなる。写真は Dougal Townsend 氏による。

での先駆的研究に基づき, Lescinsky and Sisson (1998) はアメリカのレーニア山 (Mount Rainier) について研究し, 尾根の上側と側面に位置する厚い溶岩流が, 噴火の際に火山体側面を流れ, 谷埋めの氷河の縁に沿って定置したことを明らかにした。すなわち, 氷河によって溶岩は谷の内部に流れ込めず, 標高の高い部分に“溶岩溜まり”としてとどまり, 数千年後に氷河が後退したあともそのまま尾根の頂部や側面に張り付いたまま残っていたのである。Conway *et al.* (2023) はこれを ice-bounded lava と呼んでいる。本稿では氷塞溶岩^{ひょうそくようがん}と訳し, 「氷河によって流路を制限されせき

止められた溶岩流」と定義する。本実験ではこの地形を再現する。このような地形はニュージーランドのルアペフ山 (Mount Ruapehu) でも報告された (第1, 2図; Spörli and Rowland, 2006; Conway *et al.*, 2015)。このような急峻な露頭では, 氷の融解で発生した水や蒸気による急冷を示す, ガラス質組織や特徴的な割れ目が観察される (第2図C)。氷河周縁の垂直な氷壁で急速に冷却されるため, 氷塞溶岩には水平方向または曲線状に柱状節理が形成される (第2図D)。多くの場合冷却面は一樣ではないため, 冷却面から離れた複雑な方向に割れ目が進展する (Lodge and



第2図 ルアペフ山（ニュージーランド）にある氷塞溶岩（ice-bounded lava flow）の例（Conway *et al.*, 2023）。（A）南西側の Mangaturuturu valley 北側尾根にある厚い溶岩。約 45–20ka の間に氷河に隣接して定置した。溶岩の赤矢印は、連なる凸部（“knuckles”）を指す。写真は Dougal Townsend 氏による。（B）西側の氷塞溶岩の周縁部に見られる柱状節理。写真は Dougal Townsend 氏による。（C）南西側の氷塞溶岩に見られる柱状節理（直径約 10 cm）の断面。（D）北西側の氷塞溶岩の扇形に広がる柱状節理。2人の人物が 15メートルの距離で立っている。

Lescinsky, 2009)。割れ目は約 60 度で交差し、直径約 10–20 cm の特徴的な多角形を形成する（第 2 図 C）。

このような氷塞溶岩は環太平洋でいくつか確認されている（例えば、Mee *et al.*, 2009; Conway *et al.*, 2015; Lachowycz *et al.*, 2015; Coombs and Jicha, 2020; Mixon *et al.*, 2021）。しかし、氷河と溶岩との接触が発生したのは過去で、すべての痕跡が現在も残存しているとは限らない。直接観察することが難しい氷河と溶岩の相互作用を直感的に理解するに

は、実験による再現が効果的だと考えられる。

3. 食材を用いた「キッチン火山実験」によるアウトリーチ

学校教育でアクティブラーニングが重要とされるなかで、身近な食材を使用した実験は安価なうえ、再現性のある手法で仮説を検証する科学的手法を自ら実施できるという利点がある。日本では、身近な食材など用いて火山分野

の普及啓発を行う「キッチン火山実験（林，2006）」が盛んにおこなわれており，最近も，2021年福徳岡ノ場噴火の軽石の組織をお菓子で再現する方法が取り入れられた（丸谷，2022）．他の国でも，M&M[®] チョコレートを用いた分別結晶作用シミュレーション（Wirth，2003）や，フアッジというお菓子とキャンディを用いた溶岩レオロジーの実験（Rust *et al.*，2008）など，それぞれの国の特色あるキッチン実験の例がある．“アナログ実験”は自然現象の正確なスケーリングであるべき（Galland *et al.*，2006）との考えがある一方，今回の実験のような“アナロジー（類似）物質による実験（Ichihara，2023）”であっても，直感的な理解を促したり物理パラメータの近似的なスケーリングを可能にする役割があると考えられる．

今回紹介する実験は，氷河と溶岩の相互作用で生じる地形や層序の特徴が再現でき，噴火の様子を直接いろいろな角度から観察することができる．この実験を通して氷河による火山活動について知ることによって，野外において氷河との相互作用が生む火山地形の特徴を識別できるようになり，噴火史や気候変動史の理解に繋がることが期待される．

4. レシピと実験

実験に使用する食材は第1表，レシピは第3図にまとめた．詳細な作り方は第3図およびYouTube (<https://www.youtube.com/watch?v=6hfwlnsz10Q> 閲覧日：2023年6月22日)を参照してほしい．ソーダブレッドを火山体に，ゼラチンで粘性を調整したチョコソースは溶岩流に，アイスクリームは氷河に見立てる．いずれの食材も食べて問題ない．ソーダブレッドは火山の形にし，氷河を模したアイスクリームを定置させる「谷」を作るため，4か所に切れ込みを入れて焼くのがポイントだ．レシピでは材料に炭酸水を用いているが，ビールやレモネードなど他の炭酸でも作ることができ，それぞれ風味が変化する．チョコソースは，氷期と後氷期の識別をしやすいように，色（ホワイトチョコの量）を変えた2種類を作る．ここでは氷期用をチョコソース①，後氷期用をチョコソース②とする．ゼラチンは冷えると固まるので，チョコソースは流す直前に，そのつど用意するか，お湯で保温する必要がある．実験方法と観察ポイントは第4図に示した．YouTube (<https://www.youtube.com/watch?v=eFZyjfBupM> 閲覧日：2023年6月22日)も参照してほしい．実験は，(1)氷期 (syn-glacial stage)，(2)融氷期 (deglacial stage)，(3)後氷期 (post-glacial stage)と進行する．

(1)では，火山体に氷河が発達した時（例えば，最終氷

第1表 実験用具と実験材料のリスト．

ソーダブレッド（火山）	
小麦粉	3カップ（360 g）
ベーキングパウダー	小さじ3（12 g）
ソーダ水（炭酸水）	150 ml
溶かしたバター	大きじ1
チョコソース（溶岩）	
ダークチョコ	25 g
ホワイトチョコ	15 g
お湯	25 ml
粉ゼラチン（増粘剤）	10 g
アイスクリーム（氷河）	
バニラアイス	100 ml
調理器具	
大きめのボウル、計量カップ、 攪拌用のスプーン、ふるい、小さじ、耐熱皿、 オープン、包丁、カップ、シリンジ	

期極大期)に溶岩がつくる地形を再現する．まずソーダブレッド(火山)の谷にアイスクリーム(氷河)を載せる．このとき，アイスクリームが谷の中心では厚く，谷の頂部と側方ではより低く収まるように盛る．チョコソース①をソーダブレッドの頂部に注ぎ，方向を変えながら4つの谷に流す．するとチョコソース①は火山の表面を流れ，盛り上がったアイスクリームと崖にできた隙間に流れ込む．しばらくするとチョコソース①は冷え固まる．

次は(2)融氷期である．チョコソース②を作りながら，谷を埋めているアイスクリームをスプーンなどで取り去る．このとき，固まったチョコソース①を壊さないようにする．

最後の(3)では，融氷期を経て氷河がなくなった火山体で溶岩が流れた時の地形を再現する．(1)と同様に，チョコソース②をソーダブレッド火山の山頂に注ぎ，4つの谷に流す．すると，チョコソース②は氷期のチョコソース①を乗り越えて前進し，谷底まで流れ着くはずである．

5. 観察のポイント

単純な実験だが，実際の氷河による溶岩地形が非常によく再現されている(第5図)．(1)氷期の実験では，チョコソース①は，氷河を回り込むように流れ，氷河が解けて無くなっても，谷の内側の側面に張り出すように定置する

ソーダブレッド (火山)

- 1.小麦粉3カップとベーキングパウダー小さじ3を大きめのボウルに入れ、混ぜ合わせる。
- 2.ソーダ水（炭酸水）100mlをボウルに注ぐ。
- 3.混ぜこむ。
- 4.フレーク状になるまで、さらにソーダ水を10mlずつ追加する。
- 5.ひと固まりになるまで手でこねて生地を作り、押しつぶしながらこねる作業を繰り返す。
- 6.生地どうしがくっつかない場合は、ひとまとまりになるまでさらにソーダ水を加える。逆に生地が手にくっつく場合は、つかなくなるまで小麦粉を足す。
- 7.生地の縁を押し広げて、円錐形に広げる。
- 8.薄く油を塗った耐熱皿に生地をのせる。生地の上部に、山頂付近約2cmを残し、四方にむけて生地の端まで約1cmの深さの切れこみを入れる。
- 9.バターを溶かし、生地の上に塗る。予熱したオーブンに入れ、200℃で30分間焼く。
- 10.パンを取り出し、10分ほど冷ます。切れこみの周りをさらにカットして、幅2～3cm、長さ約5cmの「谷」を形成する。

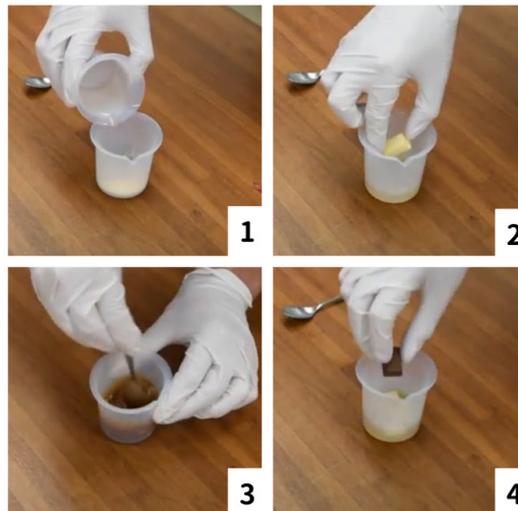


チョコソース (溶岩)

1. [溶岩1] には、5gの粉末ゼラチン（増粘剤）をカップに入れ、約10mlのお湯を加える。
- 2.ダークチョコレート5gとホワイトチョコレート15gを加える。
- 3.電子レンジ（約700W）で40秒加熱し、よくかき混ぜてとろみのあるソースを作る。
4. [溶岩2] は、実験を進めてから作るとよい。別のカップを用意し、20gのダークチョコレート、5gの粉末ゼラチン、および10～15mlのお湯を混ぜて同様の手順で作る。実験の都合上、[溶岩2] は [溶岩1] よりも少しさらっとしている（粘性が低い）ものをつくる。

作り方の動画はこちら

<https://www.youtube.com/watch?v=6hfwlnsz10Q>



第3図 ソーダブレッド(火山)とチョコソース(溶岩)の作り方。Conway et al. (2023) を一部改変。

実験方法

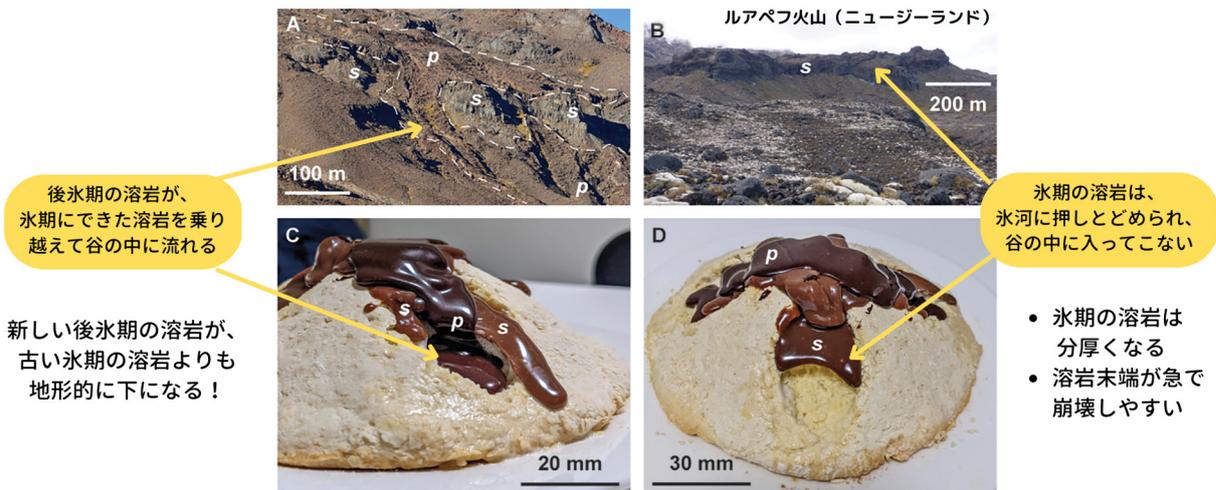
1. [氷期] 火山パンの谷に、氷河を模したアイスクリームを配置する。氷河アイスは谷の真ん中付近で最も厚く、氷河の末端と側面は谷よりも低めの厚さにする。火山の頂上部分にはアイスを載せずに残す。
2. [溶岩1] を1秒あたりおよそ2~4mlの速度で山頂付近に流す。
3. [溶岩1] がどの山腹にも流れるように、山頂からの溶岩流出点を様々に変える。
4. [溶岩1] は、火山パン山腹の氷河のない部分に沿って流れ落ち、谷部の崖と氷河アイスとの隙間に流れ込むはずである。[溶岩1] の溶岩流は冷まして固める。
5. 【融氷期】 谷から氷河アイスを慎重にすくい取る。このとき谷の周りに堆積した[溶岩1] の溶岩流を壊さないようにする。
6. 【後氷期】 濃い色で粘性の低い[溶岩2] を同じ速度ですこしずつ火山の山頂付近に流す。別の溶岩流出点からも流す。今度は、[溶岩2] が氷河期にできた[溶岩1] の上を流れて、氷河のない谷の底まで流れる。

実験動画はこちら

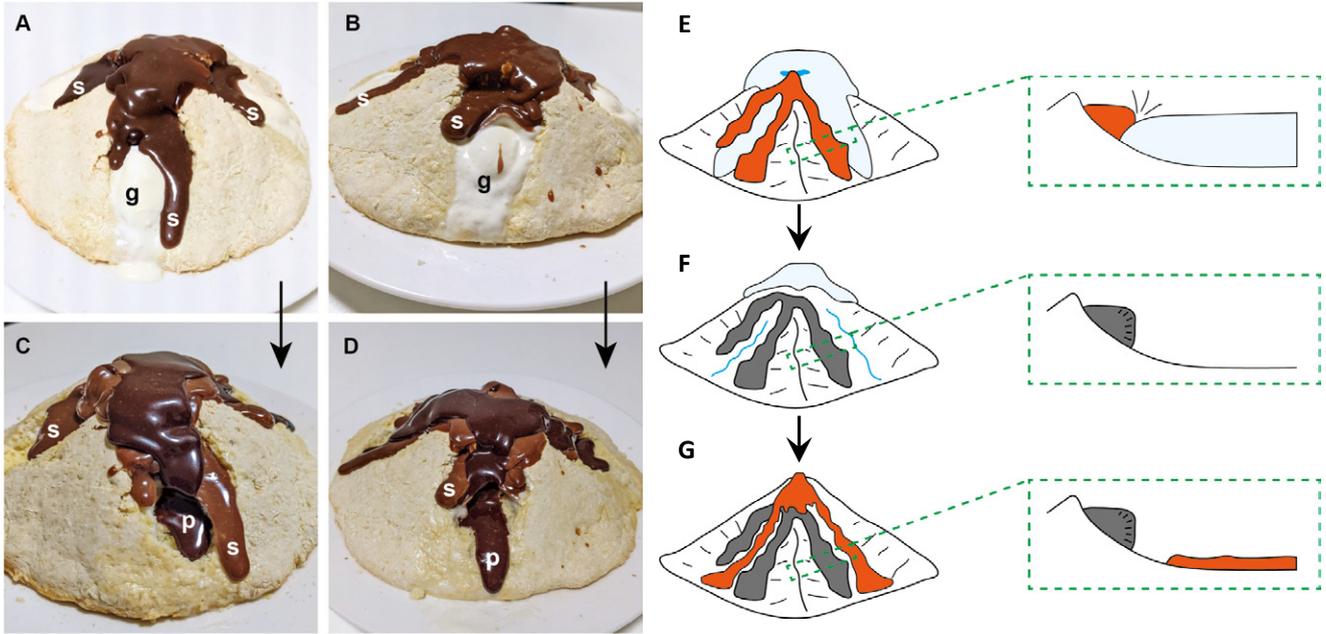
<https://www.youtube.com/watch?v=eFZyjfBupM>



観察ポイント



第4図 実験方法と観察のポイント。Conway *et al.* (2023) を一部改変。s: syn-glacial lava flow (氷期に流れた溶岩流), p: post-glacial lava flow (後氷期に流れた溶岩流)。



第5図 (A–D) 実験結果 (Conway *et al.*, 2023) と (E–G) 模式図。(A, B, E) 氷期に流れた溶岩流 (s) が氷河 (g) によって流向を変えられて尾根に張り付いたように定置している。(F) 氷河が融解し、溶岩が谷の側面に張り付いたままとどまる。(C, D, G) 融氷した後、後氷期の溶岩流 (p) が溶岩を乗り越えて氷河のなくなった谷に流れ落ちている。このトリックにより、新しい溶岩 (p) の方が古い溶岩 (s) より下に位置し、層序編纂を複雑にする場合がある。

(第5図A, B, E). このような特徴は、ニュージーランドのルアペフ山にある氷塞溶岩をよく再現している。ルアペフ山やその他の氷河を擁する成層火山では、氷塞溶岩が、氷河谷の頂部や側面に厚く (> 20 m)、急傾斜で定置していたり、谷の内側で氷河にせき止められて広がる様子が観察される。また、実験では、接する氷壁の形状によって溶岩の厚さが局所的に変化する様子が観察される場合がある。これは、例えば、ルアペフ山に見られる、尾根の頂上付近で比較的薄く谷に向かうにつれて厚い連続した凸部 (“knuckles”; 第2図A) の構造に類似する。このような地形的特徴は、より小さいスケールの実験や冷却組織の再現実験では再現されない。逆に、本実験では溶岩の亀裂形成や破碎といった現象は再現されない。ただし、チョコソース①と溶けたアイスが混ざる様子が観察される場合がある。これは、氷河を擁する成層火山で想定すべき重要な現象である融氷型ラハール (ice-melt lahals) を再現している (Pierson *et al.*, 1990; Smellie, 2022)。また、実際の氷塞溶岩は急峻かつ急冷縁が細かく破碎されているため、崩壊による浸食が進みやすい。また、後の氷河域の再発達の影響を受けている場合もある。しかし、本実験ではチョコソース①は固まると壊れることはないため、このような特徴は再現されない。

実験で(2)融氷期となりアイスクリームを取り除くと(第5図F)、(3)後氷期になる。この時に流したチョコソース

②は、チョコソース①の上を流れ下って谷の中に流れる(第5図C, D, G)。このような谷内部へ溶岩が流れこむ様子は、間氷期である完新世に噴火した溶岩にも共通してみられる特徴である。溶岩は障害物にせき止められないため比較的薄くなる。実験ではこの特徴を強調するため、チョコソース②に入れるお湯の量を多めにして粘性を低くした。

6. 氷河成溶岩地形を識別する重要性

多くの成層火山は数百年～10万年程度の時間で成長するが、山体崩壊や浸食により非対称の円錐形を呈している(第1図B, C)。氷は崩壊や浸食に影響を与える重要な要素で、氷河の後退時には急傾斜で弱い火山岩が不安定化し崩壊したり (Capra, 2006)、氷河の進展時には氷河により谷が削られ、削剥された物質が周囲の平野まで押し出されたりする (Eaves *et al.*, 2016)。さらに本実験で見られたように、氷の存在により成層火山での噴出物の分布や保存が改変される場合もある(第5図)。

本実験で注目すべき現象の一つは、谷の側面に張り付いた溶岩(第2図A)の解釈である。これは氷河がない時に流出した溶岩が浸食により露出したわけではなく、多くの場合は噴火時に存在していた氷河によってその場所に取り残されたのである。このような氷河と相互作用した溶岩は、

谷に向かって厚く堆積し、氷河により阻まれ冷却された特徴的な冷却割れ目が発達する(第2図)。一方、後氷期の溶岩は厚さが一様で、流路が障害物に阻まれる様子もなく、急冷組織を持たない。氷塞溶岩の存在から、火山体の成長と浸食のステージが交互に繰り返されたのではなく、成層火山がそのライフサイクルの間じゅう活動的であったことが示唆される。

また、氷河は溶岩流の層序関係を複雑にする場合がある。後氷期の溶岩は、氷期の氷塞溶岩よりも年代が若いにもかかわらず、現地では層序的に下に見えることがあるためである(第4図)。このような層序の逆転を認識することは噴火史を編む際に非常に重要である。現地の層序関係の検証には、地質年代学的手法で各噴火ユニットの絶対年代の測定が有効である。

本論文では氷河による溶岩地形に焦点をあてたが、他にもアイスランドの氷河の融解と火山活動率との関係(Maclennan *et al.*, 2002)や、氷や雪を頂く火山における融雪型ラハール(Pierson *et al.*, 1990; Uesawa, 2014; Smellie, 2022)、地すべり(Roberti *et al.*, 2018)といった災害の発生に関する研究も行われている。氷河を擁する火山という場におけるマグマと氷との相互作用は、火山の進化やダイナミクスだけでなく、地球の気候変動や自然災害とも関連している。わかりやすい教材を通して、次の世代を含む多くの人に関心を持ってもらえれば幸いである。

7. 全国火山実験研究交流会での実演

2023年3月5日、板橋区立教育科学館において、科学館と日本火山学会が主催する「全国火山実験研究交流会」が開催された。火山教育の普及のために火山実験の活用を広げることを目的に、火山の専門家などが身近な材料などを使った実験を行ったり、伊豆半島の地形や風景を再現したお菓子「ジオガシ®」を作るジオガシキッチン教室などが行われた。全体で27件の実験ブースが開設され、一般からは約150名の参加があり、初めての開催にも関わらず非常に盛況であった。

我々は「氷河がつくる溶岩地形」のタイトルで参加した(第6図)。設備や説明の効率を考慮して、ソーダブレッドは予め焼いたものを2点準備、アイスクリームは会場最寄りのコンビニエンスストアで購入し、チョコソースは電気ケトルを用意し実験と平行して現場で作ることで対応した。ブースには、実際の溶岩地形の写真や模式図をパネルに配置したほか、普及用に英語論文(Conway *et al.*, 2023)と日本語のレシピを印刷したもの、それらのダウンロード用リンクのQRコードを準備した。実験の実演はおおむね1時間に1回の頻度で行った。一度実演し、その終了後も片方のソーダブレッドはそのままの形で保存して、ブースに立ち寄った参加者への解説に用いた。チョコソースはゼラチンで固まっているので、簡単にソーダブレッドからはがすことができ、繰り返し実演することができた。



第6図 全国火山実験交流会での「氷河がつくる溶岩地形」実演の様子。(A) 予め準備したソーダブレッド2つを交互に実験に使用した。(B) 野外の写真と対比させて解説を行った。

実験は好評で、火山専門家や学生、親子連れのほか、ジオパーク関係者、サマースクール担当者、新聞記者、博物館関係者など、多くの来訪者が立ち寄った。特に、パン(ソーダブレッド)とアイスとチョコレートという、食べておいしそうな組み合わせで作ったことが目を引いたことと、氷河と火山の関係という耳慣れないテーマに興味を持ってもらえたと感じた。また、単純な実験ながら実際に存在する地形をよく模擬しており、「日本にもあるかもしれない」「ぜひ野外で観察してみて」というメッセージも印象に残ったのではないかと感じる。親子連れやジオパーク関係者にはソーダブレッドのレシピが好評だった。一方で、専門家にとっても氷河成の火山地形というテーマは新しく、年代測定の方法や氷河でなくてはできない理由、気候の変化についてなど専門的な質問も多く寄せられた。

“アナログ物質”による厳密なスケージングアップができなくとも、“アナロジー(Ichihara, 2023)”を考慮することで、複雑な実際の現象をより深く理解できる場合がある。また、身近な材料を用いて自然現象を伝えることができれば、一般の人にも専門的な話題に興味を持ってもらえる。今回は特に、氷河と火山というこれまで日本ではほとんど認知されていない研究テーマで、多くの人に興味を持ってもらうにあたりお菓子によるアウトリーチが特に効果的に働いたかもしれない。キッチン実験を入りに、噴火の不思議や地球の気候変動の歴史、そして地球科学全体に目を向けてもらうきっかけになれば嬉しい。

謝辞: 氷河地形の日本語訳については及川輝樹氏と下司信夫氏にご助言いただいた。記して感謝申し上げます。

文 献

- Barrows, T. T., Hope, G. S., Prentice, M. L., Fifield, L. K. and Tims, S. G. (2011) Late pleistocene glaciation of the Mt Giluwe volcano, Papua New Guinea. *Quaternary Science Reviews*, **30**, 2676–2689.
- Calvert, A. T., Fierstein, J. and Hildreth, W. (2018) Eruptive history of middle sister, Oregon cascades, USA—product of a late pleistocene eruptive episode. *Geosphere*, **14**, 2118–2139. doi:10.1130/GES01638.1
- Capra, L. (2006) Abrupt climatic changes as triggering mechanisms of massive volcanic collapses. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **155**, 329–333. doi:10.1016/j.jvolgeores.2006.04.009
- Capra, L., Bernal, J. P., Carrasco-Núñez, G. and Roverato, M. (2013) Climatic fluctuations as a significant contributing factor for volcanic collapses. Evidence from Mexico during the Late Pleistocene. *Global and Planetary Change*, **100**, 194–203.
- Cole, R. P., White, J. D. L., Conway, C. E., Leonard, G. S., Townsend, D. B. and Pure, L. R. (2018) The glaciovolcanic evolution of an andesitic edifice, South Crater, Tongariro volcano, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **352**, 55–77.
- Conway, C. E., Townsend, D. B., Leonard, G. S., Wilson, C. J. N., Calvert, A. T. and Gamble, J. A. (2015) Lava-ice interaction on a large composite volcano: A case study from Ruapehu, New Zealand. *Bulletin of Volcanology*, **77**, 21. doi:10.1007/s00445-015-0906-2
- Conway, C. E., Leonard, G. S., Townsend, D. B., Calvert, A. T., Wilson, C. J. N., Gamble, J. A. and Eaves, S. R. (2016) A high-resolution $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ lava chronology and edifice construction history for Ruapehu volcano, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **327**, 152–179. doi:10.1016/j.jvolgeores.2016.07.006
- Conway, C. E., Tani, K., Sano, T., Matsumoto, K. and Ishizuka, O. (2023) A kitchen experiment for replicating lava-ice interaction on stratovolcanoes. *Frontiers in Earth Science*, **11**, 1116157. doi:10.3389/feart.2023.1116157
- Coombs, M. L. and Jicha, B. R. (2020) The eruptive history, magmatic evolution, and influence of glacial ice at long-lived Akutan volcano, eastern Aleutian Islands, Alaska, USA. *GSA Bulletin*, **133**, 963–991. doi:10.1130/B35667.1
- Davidson, J. and de Silva, S. (2000) Composite volcanoes. *In: Sigurdsson, H. ed., Encyclopedia of volcanoes*, Academic Press, 663–682.
- Eaves, S. R., Mackintosh, A. N., Anderson, B. M., Doughty, A. M., Townsend, D. B., Conway, C. E., Winckler, G., Schaefer, J. M., Leonard, G. S. and Calvert, A. T. (2016) The last glacial Maximum in the central north island, New Zealand: Palaeoclimate inferences from glacier modelling. *Climate of the Past*, **12**, 943–960. doi:10.5194/cp-12-943-2016
- Edwards, B. R., Kochtitzky, W. and Battersby, S. (2020) Global mapping of future glaciovolcanism. *Global and Planetary Change*, **195**, 103356. doi:10.1016/

- j.gloplacha.2020.103356
- Fiertsein, J., Hildreth, W., and Calvert, A. T. (2011) Eruptive history of South sister, Oregon cascades. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **207**, 145–179. doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.06.003
- Galland, O., Cobbold, P. R., Hallot, E., de Bremond d’Ars, J. and Delavaud, G. (2006) Use of vegetable oil and silica powder for scale modelling of magmatic intrusion in a deforming brittle crust. *Earth and Planetary Science Letters*, **3**, 786–804. doi:10.1016/j.epsl.2006.01.014
- Goñi, M. F. S., Ferretti, P., Polanco-Martínez, J. M., Rodrigues, T., Alonso-García, M., Rodríguez-Tovar, F. J., Dorador, J. and Desprat, S. (2019) Pronounced northward shift of the westerlies during MIS 17 leading to the strong 100-kyr ice age cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, **511**, 117–129. doi:10.1016/j.epsl.2019.01.032
- 林 信太郎 (2006) 世界一おいしい火山の本—チョコやココアで噴火実験—. 小峰書店, 127p.
- Hobden, B. J., Houghton, B. F., Lanphere, M. A. and Nairn, I. A. (1996) Growth of the tongariro volcanic complex: New evidence from K-Ar age determinations. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, **39**, 151–154. doi:10.1080/00288306.1996.9514701
- Ichihara, M. (2023) Understanding the flow-to-fracture transition of volcanic fluids through analogy experiments. *Scientific Assembly of the International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth’s Interior*, Abstract number 1489.
- Kataoka, K. S., Tsunematsu, K., Matsumoto, T., Urabe, A. and Kawashima, K. (2021) Crisis hazard assessment for snow-related lahars from an unforeseen new vent eruption: The 2018 eruption of kusatsu-shirane volcano, Japan. *Earth Planets and Space*, **73**, 220.
- Kelman, M. C., Russell, J. K. and Hickson, C. J. (2002) Effusive intermediate glaciovolcanism in the garibaldi volcanic belt, southwestern British Columbia, Canada. *Geological Society, London, Special Publications*, **202**, 195–211.
- Lachowycz, S. M., Pyle, D. M., Gilbert, J. S., Mather, T. A., Mee, K., Naranjo, J. A. and Hobbs, L. K. (2015) Glaciovolcanism at volcán sollipulli, southern Chile: Lithofacies analysis and interpretation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **303**, 59–78. doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.06.021
- Lescinsky, D. T. and Sisson, T. W. (1998) Ridge-forming, ice-bounded lava flows at Mount Rainier, Washington. *Geology*, **26**, 351–354. doi:10.1130/0091-7613(1998)026<0351:RFIBLF>2.3.CO;2
- Lodge, R. W. D. and Lescinsky, D. T. (2009) Fracture patterns at lava–ice contacts on Kokostick Butte, OR, and Mazama Ridge, Mount Rainier, WA: Implications for flow emplacement and cooling histories. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **185**, 298–310. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.10.010
- Loewen, M. W., Dietterich, H. R., Graham, N. and Izbekov, P. (2021) Evolution in eruptive style of the 2018 eruption of Veniaminof volcano, Alaska, reflected in groundmass textures and remote sensing. *Bulletin of Volcanology*, **83**, 72.
- MacLennan, J., Jull, M., McKenzie, D., Slater, L. and Grönvold, K. (2002) The link between volcanism and deglaciation in Iceland. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **3**, 1062. doi:10.1029/2001GC000282
- 丸谷 由 (2022) パミスのだいぼうけん. 石田製本株式会社, 38p.
- Mathews, W. H. (1952) Ice-dammed lavas from clinker mountain, southwestern British Columbia. *American Journal of Science*, **250**, 553–565. doi:10.2475/ajs.250.8.553
- Mee, K., Gilbert, J. S., McGarvie, D. W., Naranjo, J. A. and Pringle, M. S. (2009) Palaeoenvironment reconstruction, volcanic evolution and geochronology of the Cerro Blanco subcomplex, Nevados de Chillán volcanic complex, central Chile. *Bulletin of Volcanology*, **71**, 933–952. doi:10.1007/s00445-009-0277-7
- Mixon, E. E., Singer, B. S., Jicha, B. R. and Ramirez, A. (2021) Calbuco, a monotonous andesitic high-flux volcano in the Southern Andes, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **416**, 107279. doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107279
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J.-C. and Borrero, C. A. (1990) Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **41**, 17–66. doi:10.1016/0377-

- 0273(90)90082-Q
- Pure, L. R., Leonard, G. S., Townsend, D. B., Wilson, C. J. N., Calvert, A. T., Cole, R. P., Conway, C. E., Gamble, J. A. and Smith, T. B. (2020) A high resolution $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ lava chronology and edifice construction history for Tongariro volcano, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **403**, 106993. doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.106993
- Roberti, G., Ward, B., van Wyk de Vries, B., Friele, P., Perotti, L., Clague, J. J. and Giardino, M. (2018) Precursory slope distress prior to the 2010 Mount Meager landslide, British Columbia. *Landslides*, **15**, 637–647. doi:10.1007/s10346-017-0901-0
- Rust, A., Cashman, K. and Wright, H. (2008) Fudge factors in lessons on crystallization, rheology and morphology of basalt lava flows. *Journal of Geoscience Education*, **56**, 73–80. doi:10.5408/1089-9995-56.1.73
- Singer, B. S., Thompson, R. A., Dungan, M. A., Feeley, T. C., Nelson, S. T., Pickens, J. C., Brown, L. L., Wulff, A. W., Davidson, J. P. and Metzger, J. (1997) Volcanism and erosion during the past 930 k.y. at the Tatará-San Pedro complex, Chilean Andes. *GSA Bulletin*, **109**, 127–142. doi:10.1130/0016-7606(1997)109<0127:VAEDTP>2.3.CO;2
- Smellie, J. L. (2006) The relative importance of supraglacial versus subglacial meltwater escape in basaltic subglacial tuya eruptions: An important unresolved conundrum. *Earth-Science Reviews*, **74**, 241–268. doi:10.1016/j.earscirev.2005.09.004
- Smellie, J. L. (2022) Sedimentation associated with glaciovolcanism: A review. Volcanic processes in the sedimentary record: When volcanoes meet the environment. *Geological Society, London, Special Publications*, **520**, 1–43. doi:10.1144/SP520-2021-135
- Spörli, K. B. and Rowland, J. V. (2006) ‘Column on column’ structures as indicators of lava/ice interaction, Ruapehu andesite volcano, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **157**, 294–310. doi:10.1016/j.jvolgeores.2006.04.004
- Tierney, J. E., Zhu, J., King, J., Malevich, S. B., Hakim, G. J. and Poulsen, C. J. (2020) Glacial cooling and climate sensitivity revisited. *Nature*, **584**, 569–573. doi:10.1038/s41586-020-2617-x
- Uesawa, S. (2014) A study of the Taisho lahar generated by the 1926 eruption of Tokachidake Volcano, central Hokkaido, Japan, and implications for the generation of cohesive lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **270**, 23–34. doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.11.002
- Vargo, L. J., Anderson, B. M., Dadić, R., Horgan, H. J., Mackintosh, A. N., King, A. D. and Lorrey, A. M. (2020) Anthropogenic warming forces extreme annual glacier mass loss. *Nature Climate Change*, **10**, 856–861. doi:10.1038/s41558-020-0849-2
- Wilson, A. M., Russell, J. K. and Ward, B. C. (2019) Paleoglacier reconstruction in southwestern British Columbia, Canada: A glaciovolcanic model. *Quaternary Science Reviews*, **218**, 178–188.
- Wirth, K. R. (2003) Using an M&M[®] magma chamber to illustrate magmatic differentiation. *Annual meeting of the Geological Society of America, Abstracts with Programs*, **34**, 250.

MATSUMOTO Keiko, CONWAY Chris, TANI Kenichiro, SANO Takashi and ISHIZUKA Osamu (2023) A kitchen experiment for replicating lava-ice interaction on stratovolcanoes: a demonstration at Itabashi Science and Education Museum.

(受付：2023年3月31日)