

御嶽火山ハザードマップとの比較が可能な火砕流モデル実験教材の開発と 中学校での授業実践

Development of the model experiment of pyroclastic flows comparable with the hazard map of Ontake volcano and a study in the junior high school science class

田中健二郎^{1,3}・川上紳一¹・武藤正典²

Kenjiro TANAKA, Shin-ichi KAWAKAMI, and Masanori MUTOH

¹岐阜聖徳学園大学 ²岐阜市立長良中学校 ³名古屋市立大高中学校

¹Gifu Shotoku Gakuen University ²Nagara Junior High School ³Odaka Junior High School

[要約] 次期学習指導要領では、理科の学習において自然災害に関する内容の充実が図られている。日本は火山国であり、多数の活火山が存在している。火山活動のしくみを理解すると同時に、火山ハザードマップなどを活用して、予想される被害を読み取る学習が想定されている。本研究では、3Dプリンタで御嶽火山の地形モデルを作り、火砕流のモデル実験教材を開発した。火砕流の発生は、地形モデルを水中に入れ、粉末（カーボランダム）を混ぜた水を塩水中に流し込んで噴煙柱を生成し、その重力崩壊で火砕流が発生するようにした。開発した実験教材を用いて、大学生と中学生を対象に授業実践を行い、実験結果を御嶽火山ハザードマップと比較した。授業実践の結果をもとに、火砕流モデル実験の学習効果と防災意識について、アンケート調査を行った。

[キーワード] 火砕流, 火山学習, 探究学習, 中学校, 理科, 防災教育

1. はじめに

日本は世界有数の火山国であり、桜島、霧島連山、阿蘇山、御嶽山、浅間山、白根山などで火山活動や火山噴火が起こっている。2014年の御嶽山の噴火や、2018年の白根山の噴火では死傷者が出ている。こうした自然災害の頻発を受けて、次期学習指導要領では、小中学校の理科教育で、自然災害に関する学習の充実が図られている（文部科学省, 2017）。火山に関する学習では、地形、景観、温泉、地熱の利用など、火山の恩恵にも触れることになっているが、今後は火山災害についてもハザードマップを活用するなどして、予想される被害を読み取る能力の育成も重要となる。火山活動に関するしくみを理解し、火山災害について考察させる手段として、火山噴火のモデル実験が有効であると考えられる。

火山活動や火山噴火現象に関する興味・関心を高め、そのしくみを理解する手立てとして、火山活動のモデル実験を取り入れた学習活動が広く展開されてきた。こうした活動は、日本火山学会

のアウトリーチ活動、自然史系博物館での学習活動、小中学校の理科授業など、さまざまな実践事例がある。とりわけ、チョコレート、ココア粉末などの身近な食材を利用した溶岩流の発生やカルデラ形成などの火山モデル実験は、キッチン火山学と呼ばれ、火山を身近に感じることができる実験として人気がある（林, 2006）。一方、火山に関する知識・理解を踏まえ、災害や防災に対する意識を高める試みについては、火山が身近なところに存在する地域で、先進的な取り組みが始められている（永田・木村, 2016）。

本研究では、爆発的火山噴火にともなって発生する火砕流のモデル実験教材を開発した。火砕流は、火口から噴出した火山灰や火山ガスに大気を取り込まれて生じた噴煙柱が重力崩壊して、火山の斜面を流れ下る現象であり、大きな被害をもたらすことがある。火砕流の流れをシミュレーションするために、火山の地形モデルを水中に設置し、固体粉末の混ざった相対的に比重の大きな流体を火口から噴出させる実験が考案されている。本

研究では、御嶽火山の数値地図を用いて3Dプリンタで火山の地形モデルを作ることにより、山体の尾根や谷などの地形をリアルに再現し、噴出した火山灰がどこに降り積るかをわかるように工夫した。降り積った火山灰の分布をもとに、被害が及ぶ範囲を読み取らせ、実際に公表されている御嶽火山ハザードマップと比較できるようにした。

2. 火砕流のモデル実験

(1) 火砕流の水槽実験のデザイン

爆発的火山噴火では、噴煙柱と火砕流が発生する。火山噴火によって発生した噴煙は、噴出の慣性力で上昇する部分は少なく、周りの空気を取り込み、取り込まれた空気の熱膨張によって得た浮力により上昇していく。その高さは数千メートルに達することがある。噴火活動が弱まって、空気を取り込みが不十分となると、噴煙の密度のほうが周囲の空気よりも大きくなり、崩壊して山体斜面を流下する火砕流となる。

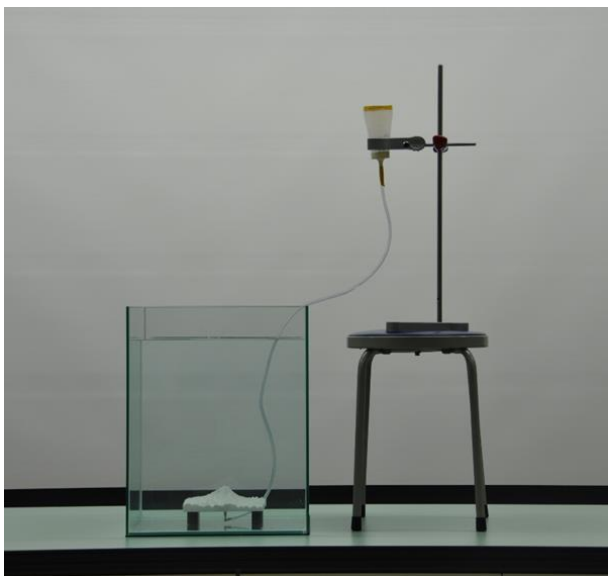


図1. 火砕流実験器.

噴煙柱や火砕流の発生のシミュレーションは、水槽を用い、噴煙と周囲の大気との密度差を液体の密度差を利用する実験が行われている。Carey et al. (1988)では、塩水を大気に見立て、微細粒子を混合した水で噴煙柱をシミュレーションしてい

る。同様の実験は、林 (2000)、笠間 (2001)、下司 (2006) 笠間ほか (2011)、佐藤ほか (2014) などで行われている。本研究では、これらの研究を参考にして噴煙柱のモデル実験を試みた。すなわち、大気の模擬物質としては、水に食塩を溶かした水溶液を使用し、火山の火口から噴出する噴煙は、食塩水に固体微粒子を混ぜた。

本研究で開発した火砕流実験器の全体像を図1に示す。これは火山の地形モデル食塩水を入れた水槽の底に設置し、ビニールチューブで固体微粒子を含む流体を流し込んで噴煙柱を発生させるものである。

(2) 水槽

火山の噴煙や火砕流の実験では、火口から噴煙が上昇する高さは、火口から流出させる噴煙の慣性力が影響し、噴煙柱はかなりの高さに達することがある。水槽が浅いと噴煙が水面に達するため、噴煙の流れに容器の大きさが影響する可能性がある。そこで、本研究では、容量70L(W400×D400×H500)の大型水槽(コトブキ, レグラスフラットF-4050)を使用した。実験で発生させた火砕流の高度は概ね30cmであり、この水槽の上面近くまで水を溜めた場合には、火砕流の上面が水面に達することはなかった。

(3) 火山の地形のモデル

火山の地形のモデルは3Dプリンタ(Mutoh MF-1100)を用いた。データは国土地理院の地形図のサイトから御嶽山の山頂周辺を選択し、3Dプリンタ用のデータ形式でダウンロードした。モデルの大きさは、180mm×150mmである。

(4) 噴煙材料

水槽実験で、噴煙をシミュレーションするために、固体微粒子を混ぜた液体が使われてきた。下司 (2006) は、岩石粉末と硝酸銀水溶液を用いている。笠間 (2001) は、チョーク粉末を水に混ぜて実験を行っている。チョーク粉末の濃度を変えることで、噴煙柱が発生する場合と、火砕流になる場合があり、噴煙柱と火砕流を観察するためには、条件を変えて2回実験を行う必要があった。

林 (2000) は、研磨材として使われているカーボランダムを用いて実験を行っている。カーボランダムは粒径が異なるものが市販されており、異なる粒径のものを混ぜることによって、噴煙柱と火砕流の両方を同時に再現することができる。すなわち、噴煙の挙動はカーボランダムの粒径が影響し、細粒のものは水中に長くとどまるが、粒径の大きなものは比較的すみやかに落下する。本研究では、材料の入手しやすさや実験後の後片付けの簡便さを考慮し、林 (2000) を参考にして、カーボランダムを用いることにし、噴煙の形態が実際の火山の噴煙と類似するような粒径を選んだ。

林 (2000) を参考に、大気を模擬した食塩水の濃度は 0.6% とし、噴煙柱を模擬物質として、濃度の異なる食塩水と粒径を変えたカーボランダムを混ぜて実験を行った(表 1)。

表 1. 食塩水の濃度、カーボランダムの粒径と噴煙柱の形態の関係。

粒径/濃度	0.0%	0.5%	1.0%	1.5%
# 80	◎	◎	◎	◎
# 500	○	○	◎	◎
# 1000	△	△	△	○
# 2000	×	×	×	×

注：◎：粒子はすべて降下；○：半分以上が降下，△：半分以上が降下しない；×：降下しない

この実験から、粒径が粗い # 80 や # 500 では噴煙の比重が大きく、降下するが、# 1000 や # 2000 では降下しにくいことが明らかになった。そこで、実際の火山の噴煙をモデル化するには、異なるサイズのカーボランダムを混合したものが適していると考え、その混合比を調べた。実験条件を表 2 に示す。

表 2. カーボランダムの混合比を変えたモデル。

粒径/モデル	①	②	③	④	⑤
# 80	0.1g	0.2g	0.5g	1.0g	2.0g
# 500	0.1g	0.2g	0.5g	0.5g	0.5g
# 1000	0.1g	0.1g	0.1g	0.1g	0.1g
# 2000	0.1g	0.1g	0.1g	0.1g	0.1g



図 2. モデル実験の例. 噴煙柱と火砕流がみられる。

図 2 は、モデル④で発生させた噴煙柱の様子である。この場合、噴出した噴煙柱がやがて崩壊し、山体を流下する火砕流が観察された。

表 2 に示した①から⑤までのモデルについて、実験を行った結果、①から③までは噴煙柱のみで火砕流は発生しなかった。⑤では粗粒のカーボランダムの割合が高く、噴煙柱が十分発達しなかった。④の場合は、噴煙柱と火砕流の両方が観察されたため、授業実践では、④の混合比で実験を行うことにした。

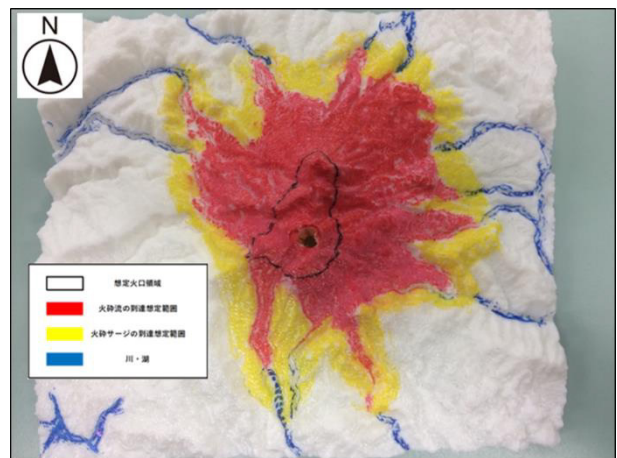


図 3. 御嶽火山ハザードマップを 3D プリンタで作成した火山の地形モデルに表示したもの。

(5) 御嶽火山ハザードマップ

御嶽火山ハザードマップは、御嶽火山防災協会が公表しているものを使用した。実験結果とハザードマップを比較するには、地図の判読能力が必要とされ、大学生を対象にした実践によって、短時間で対応関係を読み取るのが困難であることがわかった。そのため、3D プリンタで作成した火山の地形モデルに、ハザードマップで示された火砕流による被害が想定される範囲をマジックペンで色塗りした(図3)。中学校での実践では、それを写真撮影したものを資料として配布した。

3. 授業実践

授業実践は、岐阜聖徳学園大学教育学部理科専修の1, 2年生を対象に試行したあと、岐阜市立長良中学校1年生を対象に理科授業として行った。

(1) 大学生を対象とした実践

2017年11月14日の大学1年生を対象にした授業実践では、28名を6班に分けて行った。授業時間は90分である。授業のはじめに火山災害について紹介し、ハザードマップを説明した。次に、モデル実験を行い、ワークシートを記入した。その後、モデル実験の結果とハザードマップの比較を行った。11月16日の大学2年生を対象とした実践でも授業の流れは同様である。

図4に、実験を行ったあと、火山の地形モデルに降り積ったカーボランダム分布、および学習者が記録したワークシートの一部を示す。火山の地形モデルは、白色のフィラメントを使用したことと、カーボランダムが黒っぽいことから、降り積ったカーボランダムの量を色の濃さで読み取ることができる。カーボランダムは御嶽火山の火口付近に多いこと、山腹の谷地形に沿って多く降り積っていることがわかる。

実験結果について、学習者の記述には次のようなものがあった。

(a) 実験からわかったこと

- ・谷に多く降り積った
- ・火口付近に多く降り積った

- ・火砕流が谷に流れた。

(b) ハザードマップと比較してわかったこと

- ・火砕流が流れる方向にずれがあった
- ・谷や火口付近が予想被害範囲になっていて、実験結果と同じであった
- ・実験のほうが、被害範囲が広がった
- ・ハザードマップの予想被害範囲が広がった。

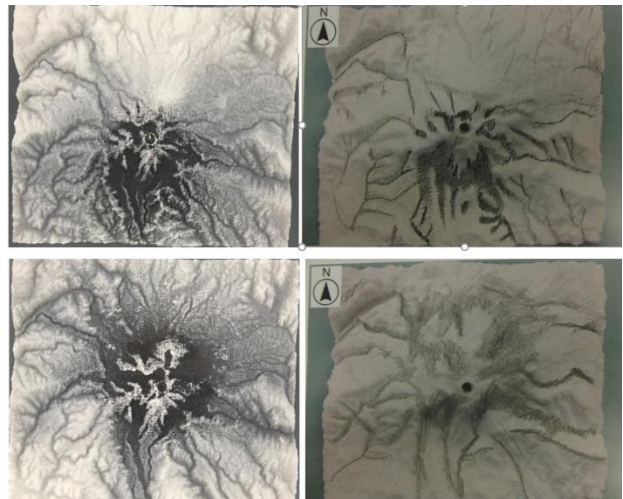


図4. 地形モデルに降り積ったカーボランダムの分布(左)と、学習者のスケッチ(右)の例。

(2) 中学生を対象とした実践

2017年12月14日に岐阜市立長良中学校で、1年生29名を対象に授業実践を行った。29名を6班に分けて授業を行った。授業時間は50分である。授業は、御嶽山について調べ学習の結果を発表、雲仙普賢岳と御嶽山の火山噴火の動画視聴、1度目のモデル実験、実験結果の記入、ハザードマップとの比較、2度目のモデル実験、実験結果の記入、ハザードマップとの比較、事後アンケートの記入という流れで行った。時間の都合上、ワークシートは一人1枚ではなく班に1枚大きなものを用意した。実験結果から分かったことに関しては、大学生の記述とほぼ同じ内容であった。

4. アンケート調査の結果

いずれの授業においても終末で、火砕流のモデル実験の授業について、アンケート用紙を配布し、

学習者の意識調査を行った。

ハザードマップに対する興味と有効性については、ほとんどの学習者が肯定的な回答を示した。その理由は、実験結果との比較を行い、一致しているか検討したことが影響していることが挙げられる。

ハザードマップの有効性については、大学生は実験結果との比較を十分に行ったため、有効性と限界の両方を意識しているが、中学生は有効性のみで、限界があることに関する記述はほとんどなかった。その理由は、中学校の実践では、実験結果とハザードマップを比較する時間が十分とれなかったため、ハザードマップは被害の及ぶ範囲を示した目安であることまで深く考察できなかった可能性が考えられる。



図5. 実験を行う生徒の様子。

学習成果に関するアンケート項目では、火砕流に対する理解が深まったこと、モデル実験自体が楽しかったという結果が示された。その理由としては、実験をやって、目で見て調べることができたという記述が多かった。

5. 議論

(1) 火砕流のモデル実験について

これまでの研究では、水槽実験において、火砕流の流れ方や噴煙柱のつき方を理解する授業実践（笠間ほか、2011）や、有珠山の地形を再現し、モデル実験を行い、ハザードマップとの比較を行った授業実践（横山 2009）がある。水

槽実験で、火砕流の流れ方や、噴煙柱のつき方を理解させているが、ハザードマップを活用して、防災意識の高まりを促す授業実践としてはさらなる工夫が必要であった。本研究では、3Dプリンタを活用して御嶽山の地形モデルを作成することで、水槽実験において、実際の地形を再現することができた。その結果、実験の様子を観察し、火砕流の流れ方と地形の関係を理解することができた。また、実験結果を観察することで、火山噴出物が火口付近や谷に多いことから地形との関係を理解することができた。モデル実験で得た結果を、ハザードマップと比較することで、ハザードマップの予想被害範囲がモデル実験の実験結果と似ていることに気付くことができ、ハザードマップの作成の科学的根拠を理解することにつながったのではないかと考える。

一方で、モデル実験の方がハザードマップの予想被害範囲よりも大きくなった班もあり、学習者のなかには、ハザードマップの予想被害範囲より広い範囲で実際には被害が出るかもしれないことに気づいたものがいた。このことをさらに考察させることができれば、ハザードマップの限界にも気づき、想定外の自然災害が発生する可能性があるという認識に至るような学習過程を展開できるかもしれない。

(2) 大学生と中学生の違い

本研究では、岐阜聖徳学園大学1年生と2年生、岐阜市立長良中学校1年生を対象に授業実践を行った。大学生と中学生で事後アンケートの記述に違いが見られた。大学生では、ハザードマップの有効性に気づくことができたか、役に立つと思うかという問いに対し、限界があるという記述が48人中13人で見られた。しかし、中学生では、同様の記述は29人中1人であった。大学生の授業実践では、90分間の授業であり、交流の時間もとることができた。また、交流する時間で、班によってモデル実験の結果に違いがあることに気づくことができたため、様々な大きさの噴火が起

きる可能性があることを考えることができたのではないかと考える。一方で、中学校での授業実践では、50分の授業で、あまり交流する時間をとることができなかつたものと考えられる。

授業の様子を観察していて、大学生に比べ、中学生の方が、ハザードマップが正しいものとみなしているようであった。モデル実験の結果は大学生も中学生も同じような結果であったにも関わらず、記述に違いが見られたのは、中学1年生の知識や思考力では、批判的な思考力の育成が不十分で、ハザードマップは正しいと考えている可能性があるのではないかと。

(3) モデルと自然をつなげるためのデジタルコンテンツの開発と活用

本研究では、火砕流のモデル実験を行う前に、実際の火山の景観や火山噴火の様子を写真やビデオで紹介した。実験は御嶽山で行ったが、火山活動の紹介では、2017年9月に、阿蘇山、雲仙普賢岳・平成新山、焼岳においてドローンで撮影した写真や動画を活用している。地学分野におけるモデル実験は、自然に対する見方・考え方を探究的に見出すために利用するものであり、見出した見方・考え方を活用して、自然の事象を探究する力をつけていくは実際の自然を撮影したデジタルコンテンツの有効活用が重要である。

6. おわりに

本研究では、火砕流のモデル実験教材を開発し、大学生と中学生を対象に授業実践を行った。実験は楽しく、火山に対する興味・関心を高めるうえでは有効であった。本研究で行った火砕流モデル実験の結果は、火山ハザードマップと比較できるものであり、火山災害に関する関心を高めると同時に、防災意識の向上につながる可能性がある。中学生を対象にした実践では、学習時間が短く、実験結果を考察する時間が十分にとれなかつた。次期学習指導要領では、自然災害や防災に関する内容の充実が図られることになっており、火砕流のモデル実験が中学校の理科授業で行われるよ

うになることを期待したい。

謝辞. 3Dプリンタを用いた火山模型の作成では、(株)森商会の長尾好裕氏、(株)ケニスの竹森浩氏に助言をいただいた。阿蘇山、雲仙普賢岳・平成新山、焼岳におけるカルデラ、溶岩ドームなどのドローンを用いた撮影は、岐阜聖徳学園大学助成金を使用して行った。ここに記して深謝する。

文献

- Carrey, S.N., Sigurdsson, H. and Sparks, R.S.J.: Experimental studies of particle-laden plumes. *Journal of Geophysical Research*, 93, 15314-15328, 1988.
- 下司信夫:水槽を用いた噴煙のアナログ実験. *地質ニュース*, no. 627, 22-24, 2006.
- 林譲治:モデル実験による火砕流の研究. *岐阜県高文連自然科学部会のあゆみ*, 18, 13-24, 2000.
- 林信太郎:世界一おいしい火山の本 - チョコココアで噴火実験, 小峰書店, 127p, 2006.
- 笠間友博:チョークを利用した火山噴火実験. *神奈川県高等学校科学研究会理科部会会報*, 45, 30-33, 2001.
- 笠間友博・平田大二・新井田秀一・山下浩之・石浜佐栄子:水槽実験を活用した小学生向け火山学習プログラム. *地学教育*, 64, no. 1, 1-12, 2011.
- 文部科学省:中学校学習指導要領理科編, pp80-81, 2017.
- 永田俊光・木村玲欧:火山災害から「生きる力」を高めるための火山防災教育プログラムの開発, *地域安全学会論文集*, No. 29, 175-184, 2016.
- 佐藤鋭一・中岡礼奈・佐野恭平:水槽を用いた火砕流の発生実験. *地学教育*, 67, 1-11, 2014.
- 横山光:火砕流のモデル実験, *北海道理科教育センター研究紀要*, 第21号, 58-63, 2009.