

水飴を用いた熱対流モデル実験の操作性向上

山崎 博史・藤井 潤*・兼重 堅志郎**・妹尾 息吹***・吉富 健一

(2018年12月10日受理)

An improved and simple experimental technique for modeling thermal convection in science class using frozen starch syrup and localized heating

Hirofumi Yamasaki, Jun Fujii, Kenshiro Kaneshige, Ibuki Senoo and Kenichi Yoshidomi

Plate tectonics is one of the most important and basic concepts required for understanding volcanic activity, seismicity, and various geological phenomena occurring within the framework of the rock cycle. Mantle convection, which refers to the thermal convection in the mantle, is the driving force for plate tectonics. Therefore, a heat convection modeling experiment was proposed for secondary school-level science students so that they can visualize and comprehend mantle convection. In this article, to improve operability and repeatability, we proposed a technique for conducting a simple experiment to model thermal convection using frozen starch syrup and localized heating; the use of starch syrup was suggested in a previous study.

Key words : model experiment, thermal convection, science class, frozen syrup, localized heating

はじめに

プレートテクトニクスは火山活動や地震活動を理解するためだけでなく、多様な地質現象を岩石サイクルや地球表層の水循環と関連づけて、物質循環という枠組みの中で理解するための基礎的概念として重要である。地球の表面を覆う十数枚のプレートはそれぞれ独自に動いており、その運動はプレートテクトニクスと呼ばれる。地球表面でのプレート運動は地球内部の動きを反映している、すなわちプレート運動の原動力は地球内部のマン

トル対流と考えられている。対流とは熱の移動の一つの様式であり、伝導と移流が組み合わさった現象である。対流は、伝導により温められるかまたは冷やされることによって生じる熱境界層が十分厚くなり、結果として力学的に不安定になってその境界層が境界から離れる(移流)ことによって起こる(是永, 2015)。このように、地球内部のマン

トル対流は生じる。なお、この地球表面の冷やされた境界層はプレートと呼ばれる。

マン

トル内の上昇流はプルームと呼ばれ、高等学校地学の教科書でも地震波トモグラフィの結果と合わせてマン

トルの動きが紹介されている(磯崎ほか, 1997)。そのため、理科授業においてマン

トル対流を視覚的に捉えるために幾つかの熱対流のモデル実験が提案されてきた(表1)。本報告では、それら先行研究のうち水飴を用いた熱対流実験をもとに、その操作性と再現性の向上を目的として、凍らせた水飴と局所的加熱を用いた実験方法を提案した。実験方法の検討は、山崎が担当した2016年度の大学院授業で兼重が提案したアイデア(凍らせた水飴の使用)を基に、妹尾と藤井が山崎と吉富の指導のもとに行った。

先行研究の概要

鴻上・岡本(2008)は中学校理科第2分野「大地のつくりとその変化」の単元導入部で、その単元全体を生徒にわかりやすくイメージさせること

* 広島大学大学院教育学研究科博士課程前期, ** 岐阜県立華陽フロンティア高等学校, *** 高梁市立高梁北中学校

表 1. マントル対流・プレートテクトニクスに関するモデル実験教材の比較.

	本論文	千葉県高等学校 教科研究員研究報告書	鴻上・岡本 (2008) A	鴻上・岡本 (2008) B
大陸地殻			木片	木片
海洋地殻			水 —— 60 ml 食用色素(青)	水 —— 100 ml 食用色素(青)
上部 マントル	水 —— 40 ml 水飴 —— 400 ml	水 —— 20 ml 水飴 —— 200 ml	水 —— 70 ml PVA のりー 230 ml 食用色素(緑)	水 —— 100 ml PVA のりー 150 ml
下部 マントル	下部マントルは上記から少量 取り, 食用色素(赤)を加える。	下部マントルは上記から少量 取り, 食用色素(赤)を加える。	豆乳 —— 5 ml 水 —— 25 ml PVA のりー 120 ml	水 —— 50 ml PVA のりー 250 ml 食用色素(緑)
容 器	500 ml ビーカー	200 ml ビーカー	耐熱ガラス食器	耐熱ガラス食器
加 熱	・ ホットプレートに銅柱 (φ 45 mm) を置き, 周りを断 熱材 (バルサ材とカーボン クロス) で覆う ・ 250 °C 程度	・ ホットプレートに1円玉 ・ 150~200 °C	・ ガスパナー	・ ガスパナー
備 考	下部マントルを冷凍しておく	容器の縁から静かに注ぐ	漏斗を用いて注ぐ	漏斗を用いて注ぐ

を目的として、マントル対流・プレートテクトニクスに関する現象の概要を捉えるためのモデル実験を提案している(表1)。この実験では径18 cmの耐熱ガラス食器を使用することで、マントルの上昇→マントルの広がり→海溝への到達という一連のマントルの動きを観察することができる。使用する素材はPVAのり、豆乳および水であり、その量比の違いにより、2つの実験が実践されている。

千葉県高等学校教科研究員研究報告書では「地学現象の理解に有効な教材開発—簡単にできるハンディサイズ実験—」と題して、地学現象を簡単な操作によって効果的・体感的に理解できる実験教材の開発を目的とした水飴ブルーム実験の検討とその実験教材を用いた授業実践が報告されている(横瀬, 2006)。この実験はマントル中を上昇するブルームを視覚化することで地球内部のダイナミックな活動についての興味・関心を高めることを目的としている。実験方法(図1)と実験結果の概要は以下の通りである。なお、この実験は、東京大学地震研究所地球惑星内部物理学研究グループの実験(熊谷ほか, 2006)をもとにしていると考えられ、また、ビーカーやホットプレート(電熱器)など既存の機器を用いて行えるよう工夫したものである。

<実験方法>

- ①200 ml ビーカーに水飴 (200 ml) と水 (15 ~20 ml) を入れ, 40~50 °Cのお湯で湯煎しながら混ぜる。

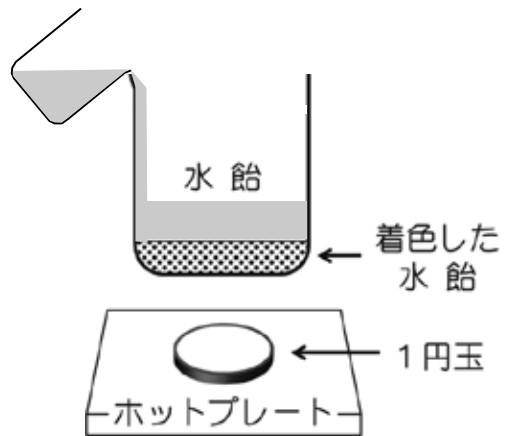


図 1. 先行研究 (水飴ブルーム実験) の実験概要.

- ②少量を 50 ml ビーカーにとり, 食紅を加えて水飴に色を付ける。
- ③色を付けた水飴を, 別のビーカーの中央に垂らす。
- ④泡が少なくなるまで, 放置する。
- ⑤着色した水飴を入れたビーカーに, 色の着いていない水飴を静かに入れる。混ざり合わないよう、縁の方から入れる。
- ⑥ホットプレートを保温し, 1円玉を置く。
- ⑦1円玉がビーカーの真ん中に来るように, 1円玉の上にビーカーを置く。
- ⑧ブルームの上昇を観察する。

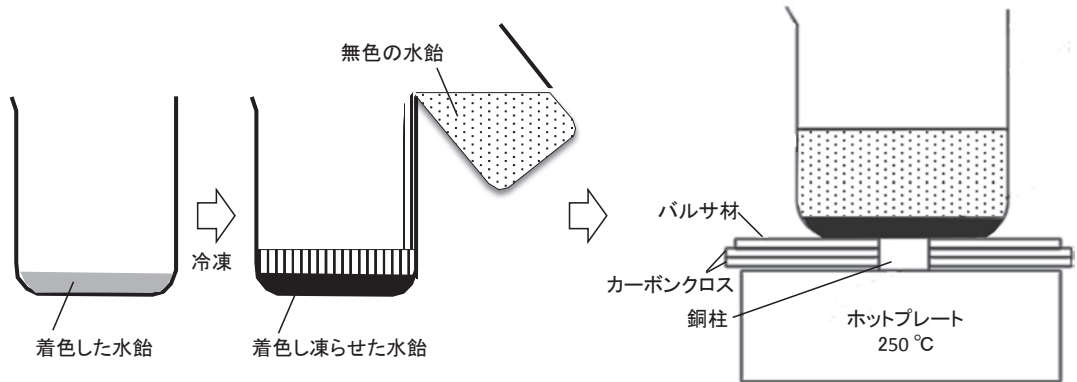


図 2. 改良した実験方法と実験機器.

<実験結果>

ホットプルームの上昇，コールドプルームの下降を再現できた。また，プルームが傘状に成長する様子も観察できた。

実験教材の課題および工夫・改良点

本研究ではマントル対流（プルームの上昇）の観察を主な目的とし，そのため先行研究で提案された水飴プルーム実験を基に検討した。具体的には，提案された実験方法を追試し，操作性および再現性について課題を見だし，それらを解消するための工夫・改良を行った。

(1) 追試と課題

先行研究では上記実験方法⑤で示したように，色のついていない水飴を入れる際，ビーカーの縁に沿うように静かに注ぎ入れる（図 1）。しかし，追試により，この方法では着色した水飴と無色の水飴が注入時に混ざってしまう場合があり，その後の加熱による水飴の動きの観察に支障があることを確認した。生徒実験を想定すると色の異なる水飴が混じり合う頻度は高いことが予想され，操作上の課題と考えられた。

また，先行研究では同じく実験方法⑥で示したように，温めたホットプレート上に 1 円玉を置き，さらにビーカーの底の中央部がその 1 円玉に接するように置く。この操作は，ホットプレートの熱が 1 円玉を伝わってビーカーの底の限られた範囲を温めることによりビーカーの中央部からのみプ

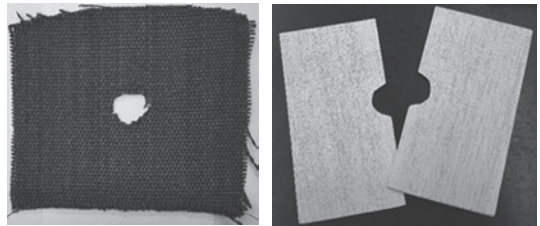


図 3. 断熱層の素材。左はカーボクロス，右はバルサ材。中央の穴は銅柱を通すためにあけられた。

ルームの上昇を生じさせるために行われる。しかし，追試の結果，この方法では 1 円玉に接していない部分でもホットプレートの熱が空気を介して伝わることによりビーカー底面の温度が上がり，上昇するプルームの形が不明瞭になる場合があることが確認された。そのため，不要な範囲でのホットプレートの熱を遮蔽してビーカーの底を局所的に加熱するための工夫が必要と考えられた。

(2) 工夫・改良点

上記の課題に対応するため実験教材の工夫・改良を行った。主な点は，凍らせた水飴（水との混合液）の使用と断熱層による加熱の局所化の 2 点である。

凍らせた水飴の使用とは，着色した水飴をビーカーに入れた後に凍らせることにより，その上に無色の水飴を注入するとき両者が混じり合うことが無くなる，という工夫である（図 2）。これにより，容易に下部マントルと上部マントルを想定し

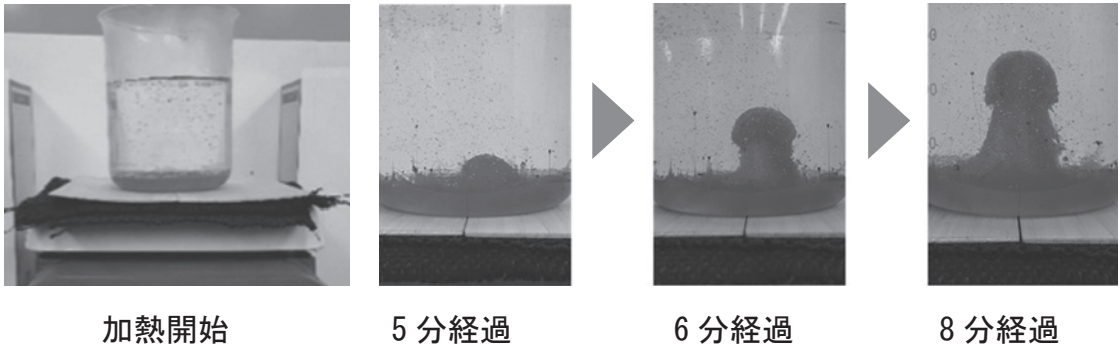


図 4. 実験の経過.

た 2 層の層状構造を作ることが可能となる。

断熱層による加熱の局所化とは、中心部に穴を開けた断熱層でホットプレートの天板を覆い、さらにその穴の部分に銅柱を置くことにより、ホットプレートの熱が銅柱からのみ伝わる、という工夫である。断熱層として、カーボクロス（厚さ 2 mm）2 枚とバルサ材（厚さ 2 mm）1 枚を重ねて敷いた。これにより、ホットプレートの熱が伝わりやすい部分が限定される。

結果と考察

実験方法を以下の通り改良した（図 3）。下記の実験方法のうち①～③は教師による事前準備，④～⑦を生徒実験の内容とする。

<実験方法>

- ① 水飴 400 ml を 500 ml ビーカーに注ぎ、水を 40 ml 加え、40～50 ℃で湯煎しながら攪拌する。
- ② ①で作った混合液（水飴）のうち、40 ml 程度を別の 500 ml ビーカーに移し、食紅または絵の具を用いて着色する。
- ③ 着色した水飴を冷凍庫に入れ、60 分程度冷却して固める。
- ④ 実験用ホットプレートの温度を 250 ℃に設定し、ホットプレート上で銅柱を加熱する。
- ⑤ 冷凍した着色水飴の入ったビーカーを冷凍庫から取り出し、その中に①で作った無色の水飴の残りをゆっくり上から注ぎ入れる。
- ⑥ ホットプレートの天板中央に加熱しておいた銅柱を立て、断熱層をセットした後、その上に⑤のビーカーを乗せる。その際、銅柱がビーカーの底の中央部に接するようにする。
- ⑦ 加熱されて融けた着色冷凍水飴が上昇する様子を観察する。

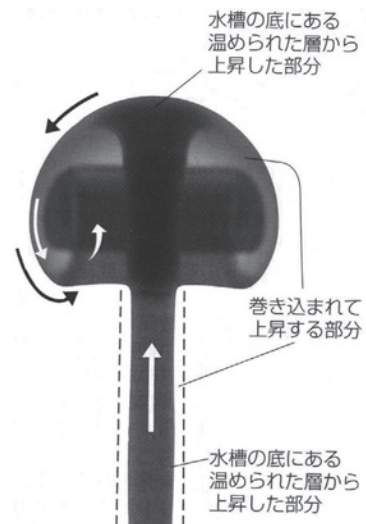


図 5. 教科書に掲載されたプルームのモデル実験結果（磯崎ほか，2017）。

この実験を中・高等学校理科教員を志望する大学生を“生徒”として試行した。その結果の概要は以下の通りである。

試行実験は延べ 10 名の学生がそれぞれ 1 回、合計 10 回行った。冷凍水飴の使用により、水飴の注入時に特別な注意を払わなくても着色水飴と無色水飴が混じり合うことは無くなった。その結果、10 回の全ての実験において、スムーズに実験方法⑥へ進むことができた。また、実験方法⑦では、例外なくビーカーの中心部から着色水飴の上昇が確認できた。この結果から、今回行った 2 つの工夫・改良は、操作性向上と再現性に関する課題解決のために概ね有効であったと判断される。

実験方法⑥では、ピーカーへの加熱を始めて 5 分後、下層を構成する着色した冷凍水飴がピーカー中央部でドーム状に盛り上がった (図 4)。時間の経過とともにその盛り上がった着色水飴は上方へ移動しその頂部が丸みを帯び、加熱後 6 分には頭部と頸部からなる形態が明確になった。加熱後 8 分経過すると、上昇してきた着色水飴の頸部の長さが増大した。また 6 分後と比べ頭部の径には大きな変化は認められないが、その先端は下降を始めることが確認され、全体として傘状の形態を呈するようになった。

上記のような着色水飴の全体的な形態は、高校地学の教科書でも示される傘状を呈するマントルブルームのモデル実験の結果 (図 5) と類似する。このため、マントル中を上昇するブルームを視覚化することで地球内部のダイナミックな活動についての興味・関心を高めるといふ点では、この実験は高い再現性を有していることから、有効であると考えられる。

また、この実験では、結果としての上昇後のブルームの形態だけでなく、加熱後の時間経過とともに変化するブルームの発達過程を観察することができる。すなわち、着色水飴のドーム状の盛り上がり→盛り上がった着色水飴の上方への移動→傘状の頭部と頸部からなる構造の顕在化という変化の様子を観察することができる。この一連の過程は、熱境界層の発達→熱境界層の厚さの増大に伴う重力不安定の発生→大きな頭と細い茎 (パイプ) の構造形成という古典的ブルーム (熱ブルーム) の形成過程 (熊谷ほか, 2009) に対応するとみることができる。

熱の伝わり方については、小学校理科第 4 学年の「物質・エネルギー」領域において、金属は熱せられた部分から順に温まるが、水や空気は熱せられた部分が移動して全体が温まることを学習する (文部科学省, 2017)。これに関連し、(1) 水に味噌や茶葉などを混ぜることで水の動きを可視化したもの、(2) 示温インクを用いて水の温まり方が見えるようにしたものなど、水 (或いは空気) が温まる際のプロセスである「対流」を可視化するための教材開発が行われてきた。しかし (1) では、「温められた水と共に上昇した味噌や茶葉が『重力』によって下降してくる際の動きを、上昇した後の水の動きであると誤解する危険性がある」などの課題が指摘されている (大阪府教育センター

http://www.osaka-c.ed.jp/category/plan/pdf/13_0

1_A_04_004_03a.pdf)。一方、このモデル実験は伝導と移流の組み合わせによる対流を視覚的にとらえることができる。このため、温められた部分が上昇、上昇した部分が上部に溜まり、最終的には全体が温められていく、という水の温まり方のプロセスを考察させる新たな教材として活用できる可能性が指摘される。

謝辞

本研究は筆頭著者が広島大学大学院教育学研究科で 2016 年度に行った授業での実験教材の試行・検討の機会を端緒としている。受講生の朝倉一晃、井上慶祐、山崎直人、吉田航一の各氏には授業の中でご意見をいただいた。また、2016 年日本地学教育学会第 70 回全国大会徳島大会において岡本研氏から有益なご助言をいただいた。以上の皆様に記して感謝申し上げる。また、本研究の一部は JSPS 科研費 26350235, 16K00966, 17H00820 の助成を受けて行われた。

引用文献

- 磯崎行雄・川勝 均・佐藤 薫ほか 12 名, 2017, 地学 改訂版. 新興出版社啓林館, 大阪, 429p.
- 是永 淳, 2015, 絵でわかるプレートテクトニクス 地球進化の謎に挑む. 講談社, 東京, 180p.
- 鴻上 貴・岡本 研, 2008, 簡単にできるプレートテクトニクスのモデル実験-見通しを持った観察・実験の活動に取り組みせる指導のあり方について-. 北海道立教育センター研究紀要, no. 20, 96-101.
- 熊谷一郎・栗田 敬・Davaille, A.・Limare, A., 2009, 流体実験から観たマントルブルームの多様性: 熱組成ブルームの定量的可視化実験. *ながれ*, 28, 421-430.
- 熊谷一郎・Vatteville, J.・Davaille, A.・岩田心・栗田敬, 2006, Scaling laws for mantle plumes: from a point source to Rayleigh-Benard convection. 地震研究所談話会 第 839 回, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/NEWS/LETTER/200606/danwa200605kumagai.html> (2018 年 11 月 17 日参照).
- 文部科学省 (2017): 小学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説 理科編, 48-50, http://www.mext.go.jp/component/a_menu/

education/micro_detail/__icsFiles/afieldfile/2018/05/07/1387017_5_1.pdf (2018年11月17日参照).

大阪府教育センター：http://www.osaka-c.ed.jp/category/plan/pdf/13_01_A_04_004_03a.pdf (2018年11月17日参照).

横瀬正史, 2006, 地学現象の理解に有効な教材開発-簡単にできるハンディサイズ実験-. 千葉県高等学校教科研究員報告書(2014/2)の中の2006年の1-12ページ.