

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18629

研究課題名(和文) 動手頭脳刺激実験の大学初年次教育への導入：キッチン地球科学の挑戦

研究課題名(英文) Kitchen Earth Science experiments as a tool of brain-stimulating tool

研究代表者

栗田 敬 (Kurita, Kei)

東京大学・地震研究所・名誉教授

研究者番号：00111451

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,700,000円

研究成果の概要(和文)：簡単な道具立てで複雑な現象を取り扱い、参加者が直截手を動かす実験課題を大学初年次教育や高校の探求型授業に使用できるように、実験課題の設計開発整備を行った。開発された課題は物理、地球科学分野を想定し、流体の運動と粘性の概念、熱対流と熱輸送の概念、破壊現象、多相流などの理解を目指すものである。背景にある物理現象や地球科学現象(例えば地震や火山噴火)の解説とともに実験の準備・手順を記したパンフレットを作成し、公開している。実験課題の開発とともにこれらを用いた実験授業を大学や高校で行い、受講者の反応やレポートをもとに、サンプルカリキュラムを作成し、公開している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で目指しているのは科学的な考察に裏付けられた実験課題の設計開発と教育現場での応用である。教育現場として大学初年次教育と高等学校における探求型授業を想定しているが、同時に「理科離れ」問題が懸念視されている中で広く社会的な関心も引き起こした。例えば中学での実験講義依頼、様々な年代の利用者の科学館での実験講義依頼、新聞の特集記事への採択など、「キッチン地球科学」的な発想は広く好意的に受け入れられてきた。国内外の学術研究会において採択されている「キッチン地球科学」セッションには広範囲な参加者が集まり、科学教育・啓蒙活動に役割を果たしている。

研究成果の概要(英文)：We propose simple-setup, but deep-thinking-required complicated experimental subjects could contribute innovations in tedious freshman courses at university as well as inquiry-based classes at high school. We have designed, developed such experimental subjects and tried these in the freshman course at universities and high schools to explore the student's response. The subjects are selected from the fields of physics and earth science such as viscous fluid dynamics, thermal convection and heat transfer, fracturing phenomena, multiphase flow and so on. As for publicizing our activity we organized special session named "kitchen-earth science" at JPGU and EGU annual meeting.

研究分野：惑星科学

キーワード：実験講義 大学初年次教育 複雑現象 地震発生 火山噴火プロセス 探求型授業 Inquiry-Oriented Class

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 出発点、その1: 従来の大学初年次教育に関して指摘されている最大の問題点は、講義体系の中で履修者が「学習」への高い動機付けが持てない点である。使用されている題材には使い古された旧態依然のものも多く、教官側も教材開発への熱意の薄い者も多い。これは講義体系の設計思想に初年次教育であることを考慮して「わかりやすさ」を重視していることが反映されているためではないかと考えたことが出発点である。「分かり難い、頭を混乱させるような」教材によって知的好奇心を喚起し、学習への高い動機付けを与えられるのではないかと考えた。

(2) 出発点、その2: 高校での地学履修者は大変少なく、いまや人生最後の地学の学習機会は中学第2分野である。一方自然災害や宇宙探査、自然探訪など日常生活を生きていく上で必要とされる地学リテラシーの重要度は高まっている。この状況の改善の一助として大学初年次教育の場に、文化系、理科系を問わない幅広い学生を対象とした地球科学現象を取り扱う簡単な実験の導入を構想した。

このような必要性、状況は現在においても変化していない。

2. 研究の目的

地球惑星科学の教育の機会が減少する中で、大学初年次教育において地球惑星科学の話題を取りあげた簡単な道具立ての「動手頭脳刺激実験」の導入を目指して、魅力的な実験テーマの開発を行うことが本研究の目指すところである。従来の大学初年次教育に指摘されている最大の問題点は、講義体系のなかで履修者は「学習」への高い動機付けが持てない点である。その改善のために手を動かし、謎を内包し、頭脳を刺激する簡単な道具立ての実験の導入は有効である。対象は理科系、文化系を問わない大学初年次の学生であるが、同様の課題や考え方は高等学校における探求型授業にも通じる。簡単にカリキュラムに導入できるような簡便な安価な道具立てによる実験課題の設計が必要である。そのためにはキッチンが優れた場を提供する。

3. 研究の方法

研究は大学や高校での実験に利用できる実験課題の設計・開発・整備とそれを用いた教育現場での試行という2本の柱からなっている。

- (1) 実験課題の設計・開発・整備: 各分担者が個別に実験課題の開発を行う。テーマは物理、地球科学分野から選択し、それぞれの課題の科学的背景を明確にし、実験講義の題材に組み上げた。課題の選択には、簡単なセットアップでできること、深い考察を必要とする、複雑な現象であること、更なる展開が可能な、様々な引き出しが用意されていること、と言う3種類の条件を考慮した。の要件は大学初年次教育ではある程度の人数を対象とせねばならず、また繰り返すうちに冗漫化することを防ぐために簡単に切り替えることができるためにも、簡単な安価なセットアップは必要条件である。頭脳を刺激し、科学的興味や好奇心を沸かしたさせるためには底の浅い、理解しやすい課題では逆効果であり、場合によっては答えの確定しない実験課題も有効である。のような課題は指導する教官側のモチベーションも上げることにつながる。実験終了時に「分かった、理解した」と受講生が感じる課題は害の多い悪い課題であると考えられる。終了後に「なぜ?」という疑問が残り、更に深化した理解が求められるような課題が優れている。
- (2) 実験講義の試行: 開発された課題を持ち寄り、研究会(地震研究所共同利用研究会)や学会(日本地球惑星科学連合、European Geoscience Union)の場で検討・相互批判を行うと同時に大学や高校での実験講義の試行を行う。その経験を活かし、モデルとなるカリキュラム案を提示する。

4. 研究成果

(1) 実験課題の設計・開発・整備

ここでは代表的な3つの実験課題について説明し、実験講義の運用の仕方、位置づけを解説する。

1 ベッコウ飴で理解する地震発生過程

地震は岩石の破壊現象であり、「破壊」は非線形な複雑な現象であるので、その発生には確率的な要素が強い。そのために破壊現象は不確実性が強く(実験課題としての再現性が悪い)、講義スケジュールに組み込みにくいために、従来実験講義の題材としては敬遠されてきた。温度変化による熱収縮クラックと言う制御された、再現性の高い現象を利用し、ベッコウ飴の固化過程でのクラック生成と地震現象を対比させ、地震発生過程の理解を試みる実験講義課題を考案した。

肉厚すき焼き鍋中に深さ数ミリの水飴を入れて、140度に加熱する。高温で水分が蒸発し、冷却すると固化、ベッコウ飴ができる。冷却を氷水中で行うと容器の急激な温度低下がおき、内

部との温度差が大きくなり熱クラックがベッコウ飴中に起きる。クラックは1センチほどの円形クラックであり、形成時に小音が発生する。また発生場所や発生過程が目視で確認出来る。目と耳で拮据できる点がこの教材のすぐれている点である。冷却が進むと徐々にクラックが形成されていき、最終的に鍋全体を覆いつくして終了する。これらは録画機能付きのスマートフォンでクラック音と場所の時間的な変化を記録でき、様々な解析が可能となる。大きなクラックには大きな音が伴うこと、一度できたところには新たなクラックはできない、など地震現象と対比できる。地震は応力が蓄積されたところに起き、一度起きてしまった応力の解放されたところには起きにくい。同様な挙動をスマートフォンで録画された動画から確認することができる。ある時点で再生を停止し、その時点で未だクラックの起きていない場所、「空白域」を特定し、次の時間帯でどこに起きるのか、予想させることにより、応力の蓄積と解放、地震の発生とを理解できる。一方底面のなめらかな肉薄ステンレス製円形容器を用いて同様な実験を行うと、円形の小型クラックは形成されず、容器全体にわたる大きな線形クラックが形成される。両者の違いの原因の議論を通してクラックの形状と原因となる力の掛かり方との間の関係を導くことができる。これは正断層や逆断層などの断層形状と応力のシステムとの関係の理解に結びつく。

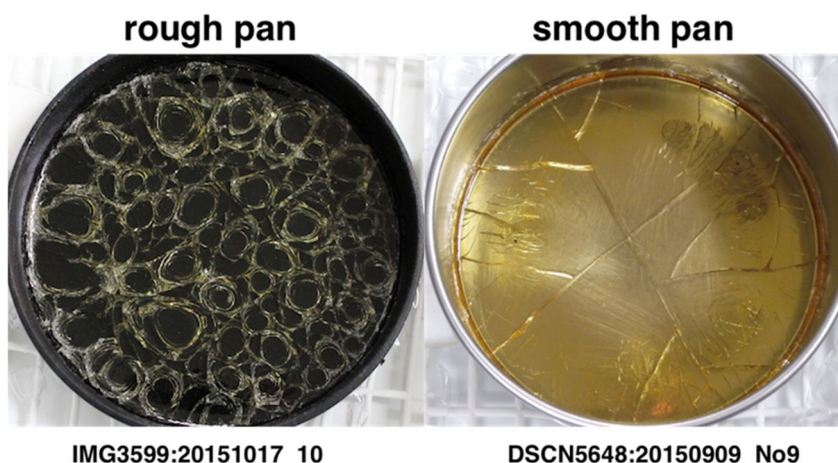


図1：ベッコウ飴のクラックの形状の容器による違い

図1はすき焼き鍋を用いたときのクラック形状(左)とステンレス容器(右)を用いたときのクラック形状の違いを表している。すき焼き鍋の場合、最終的には小さなクラックが前面を覆い、クラック発生は終了する。一方ステンレス容器の場合は全体にわたる大きな線形クラックが形成されて、終了する。応力の蓄積とは何か、を考えさせる良い題材となる。

2 流体の運動を支配する粘性とは何か？

この実験課題は流体力学を初めて学ぶ学生に対する講義と対となった実験として企画された。粘性とはどのようなものか、概念として頭ごなしに学習するのではなく、自分の手で実験を行い、自分の目で確認し、自分の頭で考えることを要求する形で進められた。そのためには中心となる「謎」の存在が不可欠であり、非ニュートン粘性を持つ懸濁液の特性を有効に利用した。最初にグリセリン水溶液や水飴を円筒容器に詰めた系での落球実験を行う。濃度を変えた溶液で粘性の違いと落下球のサイズの違いが速度に及ぼす影響を測定し、ストークス則を導く。次に家庭菜園用の保水ゲルとして市販されているSAP(Super Absorbent Polymer)粉末を粉碎し大きさをそろえたものを準備する。これに加水、膨化させ懸濁液を作成する。観察に適した透明な懸濁液ができる。構成粒子は大変柔らかく「Soft Particle Dense Suspension」の範疇に入るものである。これを用いて先ほどと同様な落球実験を行う。最初に行うのは膨潤ゲルのサイズよりも十分に大きな球を用いた実験で、グリセリンや水飴と同様な結果が得られる。サイズをだんだん小さくしていくと落下運動は複雑になり、直線的に落下せず、途中で立ち止まったりする。更に小さくしていくと落下しない。これはこの液が降伏応力を持つことに起因している。このような複雑な挙動は学生たちが予想もしなかったことであり、なぜこうなるのか「謎」の提示ができる。特に立ち止まったり、落下したりを繰り返すStop & Go Motionは学生の興味を強く惹き、深い考察へ導く。考察の議論の中であらためてストークス則の意味するところを考える。物体にはたらく粘性力とは何か？ なぜ小さなサイズの球は止まるのか？ なぜゲルのサイズが影響するのか？ なぜStop & Goは繰り返すのか？ なぜ直線的に落下しないのか？ 図2ではゲルサイズと落下球の相対サイズ比でまとめられた3種類の落下挙動が示されている。縦軸は落下距離、横軸は経過時間であり、単純な粘性落下(左上の一群)、Stop & Go

Motion (中央部分の一群)、全く落下しないケース(下側)が見られる。

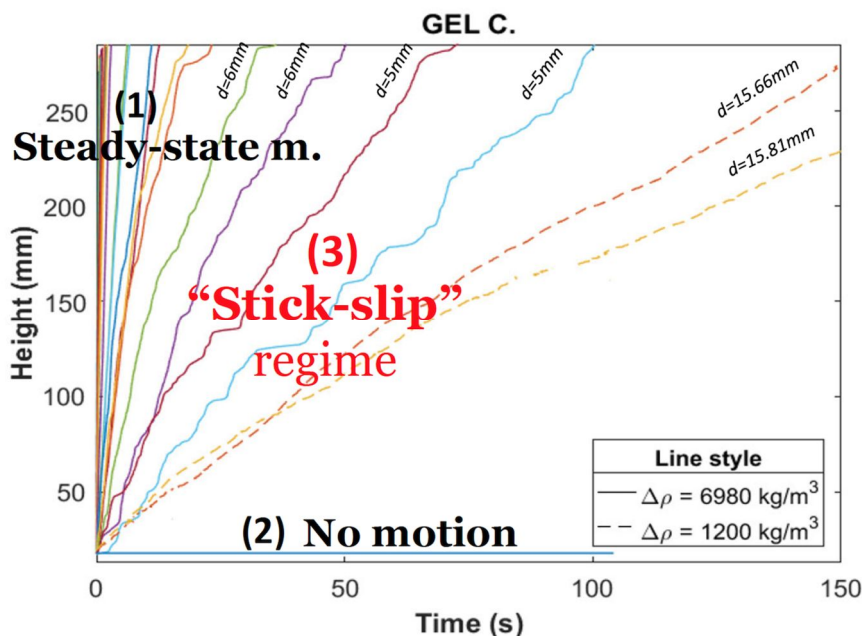


図2：球の落下距離と時間の関係、dは球のサイズ、線の色はゲルのサイズ

この実験課題の優れている点は一通りの実験終了後に学生の興味を引き立てる様々な拡張実験が出来る点である。例えば球の密度を変える、ゲルのサイズを変える、ゲルの粒子濃度を変える、落下パスのメモリー効果を検証する、複数球の落下を見る、集団運動と単独運動の違いを見る、懸濁液の Shear-Thinning 特性、等々簡単なセットアップである利点を生かした拡張実験を学生のデザインで行うことは学生の授業への動機付けを喚起する大変重要な要素である。

4 マグマ水蒸気爆発を重曹の熱分解から考える

昨今ニュージーランド、御岳山、草津白根山などで水蒸気爆発、マグマ水蒸気爆発が大きな被害を引き起こし、社会的にも強い関心が寄せられている。この現象の本質は水が高温のマグマと接する事で気化・体積膨張が急激に進むことであるが、この水とマグマの接触時の2相の界面の形状が重要な役割を果たしている。このことを一見パラドクシカルな実験結果の検討から理解するのが本実験課題である。「簡単には理解できない、頭脳を刺激する実験」には中心となるべき謎が必要である。本研究課題ではこの「謎」をうまく使い、界面の重要性を導いている。

利用するのは重曹の熱分解である。重曹は熱によって分解し、二酸化炭素ガスを発生する。重曹と市販のケーキシロップを様々な量比で混合したものを用意する。これを容器に詰め、その上に140度に熱したケーキシロップを注ぐ。この熱を受けて下にある重曹は熱分解を起こし、二酸化炭素を発生する。その様子は活発な発泡として観察される。キッチンスケールなどを用いて重さの変化を観察すると、発生した二酸化炭素は泡として空気中に放出されるので時間とともに重量は減少していく。この減少量から熱分解した重曹の量を定めることができる。図3は縦軸が熱分解量、横軸は重曹の濃度である。反応に関与する重曹量が多いものがより多く熱分解すると予想されるが、結果はそのようにならない。この謎を考えることがこの実験課題の中心である。ここで高温のケーキシロップは高温のマグマ、重曹とケーキシロップの混合物は水を含んだ堆積物と考え、高温のマグマが水を含んだ領域に流れ込んだときに起きる水の沸騰気化現象(マグマ水蒸気爆発の一つの要因)のアナロジーになっていると考えることができる。実験結果を適用すれば水分量が多いほど沸騰気化が促進されるわけではないことになる。これはなぜか？

実験回収後の試料を観察すると重曹の量の多い場合では下部の重曹を含んだ層と注ぎ込んだシロップの間の界面は殆ど変形せずに平面状であるのに対し、反応量が多い中間濃度では著しく変形した複雑な界面であることが分かる。すなわち高温層と低温層の界面の面積が大きく異なっていることが反応量を決めている要因であることが分かる。これを Wohletz は熱の輸送効率という抽象的な表現で彼のマグマ水蒸気爆発のメカニズムの論文に採り入れたが、この実験はその実態をよく示している。シロップと重曹の混合物のレオロジーを測定すると重曹の量が多くなるにつれて粘性が著しく増加していくことが確認出来る。同様なことは水を含んだ土・粘土や固体粒子系でも確認されている。このレオロジーの変化が界面形状を決める重要な要因で

あったことが分かる。

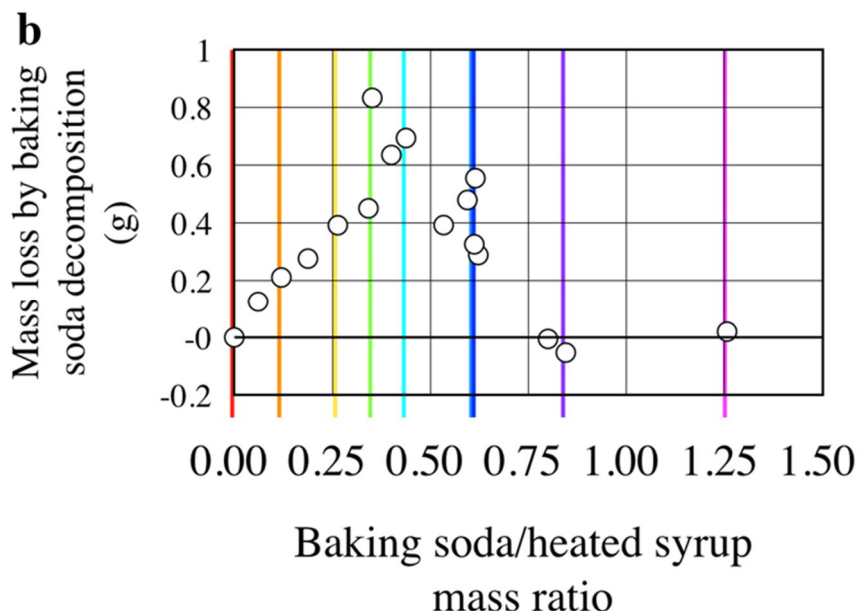


図3：質量の最終的な欠損量と重曹量（加えた高温シロップの量で規格化してある）

この実験課題では当初の予想とは反する実験結果の観察を通してより深い考察や更なる展開実験へ導入することができる点が特長となっている。容器の深さを変える、ケーキシロップの濃度を変えて粘性を変える、もっと高温のもの（例えばオリーブオイル）ではどうか？ など様々な拡張が考えられる。

(2) 実験講義の試行

様々な開発された実験課題を用いた実験授業の試行を行った。一例としては、大学初年次教育としては東京大学、明星大学、東北大学などである。また高等学校における授業や理科クラブの活動の一環としても取りあげられた。浜松聖星高校、聖園学園、八王子東高校などである。それぞれ授業終了後のレポートやインタビューなどにより内容の伝達度、効果などを評価し、モデルカリキュラムを作成し、公開している (<http://kitchenearth.sblo.jp/>)

(3) 研究会の開催、研究グループの立ち上げ

研究の裾野を広げ、より広範囲な取り組みをはかるために研究会を開催した。東京大学地震研究所の共同利用研究会として「キッチン地球科学、動手頭脳刺激実験」研究会を2018年9月、2019年11月に開催した。海外からの共同研究者の参加もあり、国際的な取り組みも広がっている。また日本地球惑星科学連合(JPGU)、欧州地球科学連合(European Geoscience Union)の年次総会でのセッション「Kitchen Earth Science」が採択されて多くの参加者を集めている。これを契機に研究グループが立ち上げられている。

「キッチン地球科学」のコンセプトに賛同する研究者は国内外に広がっており、新しい分野開拓の先導役を本科研費・挑戦的研究(萌芽)は十分に果たしたと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 R.Noguchi, A.Hamada, A.Suzuki and K.Kurita	4. 巻 70
2. 論文標題 Experimental approach to rootless eruptions using kitchen materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 208(9pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1186/s40623-018-0974-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kanno, Y., and M. Ichihara	4. 巻 80
2. 論文標題 Sawtooth wave-like pressure changes in a syrup eruption experiment: implications for periodic and nonperiodic volcanic oscillations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bull. Volcanol.	6. 最初と最後の頁 445, 461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00445-018-1227-z, 2018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 手塚寛, 関亜美, 熊谷裕太, 新谷直己, 宮鍋慶介, 久利美和	4. 巻 55
2. 論文標題 液状化実験を活用した効果的な防災教育の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 東北地域災害科学研究	6. 最初と最後の頁 203-208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 関亜美, 手塚寛, 石橋信治, 熊谷裕太, 新谷直己, 久利美和	4. 巻 55
2. 論文標題 自主的, 持続的な防災教育活動の普及を目指した実施支援: 減災アクションカードゲームを例に	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 東北地域災害科学研究	6. 最初と最後の頁 209-214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 K.Kurita
2. 発表標題 Demonstration of Earthquake Fracturing Processes in Kitchen
3. 学会等名 European Geoscience Union 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 I.Kumagai, Sgrevia, N., Davaille, A. and K.Kurita
2. 発表標題 A table-top experiment on magma transport system
3. 学会等名 European Geoscience Union 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市原美恵・山河和也・岩橋くるみ・西條祥・菅野洋
2. 発表標題 水あめ噴火実験を通して噴火様式を決める条件について考える
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会, 007-P02
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 熊谷一郎、山田美幸
2. 発表標題 災害教育における火災実験
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗田敬、熊谷一郎
2. 発表標題 科学的興味を誘起するキッチン地球科学的材料
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kumagai, I., Yamada, M.
2. 発表標題 Analog experiments on formation process of "Pele's hair" and "Pele's tears" using a cotton candy machine
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Ichihara
2. 発表標題 Proposing "analog experiment" as a sub-category of "analog experiment"
3. 学会等名 European geoscience Union (EGU2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N.Sgreva, A.Davaille, I.Kumagai & K.Kurita
2. 発表標題 Probing the characteristics of mush-magma transition: insights from laboratory experiments
3. 学会等名 European geoscience Union (EGU2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 I.Kumagai & M.Yamada
2. 発表標題 Fluid dynamic analog experiments on “Pele’s hair” using a handmade cotton candy machine
3. 学会等名 European geoscience Union (EGU2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 高橋正樹、栗田敬、鶴川元雄、加藤央之、磯崎行雄	4. 発行年 2019年
2. 出版社 日本文芸社	5. 総ページ数 126
3. 書名 眠れなくなるほど面白い地学の話	

〔産業財産権〕

〔その他〕

キッチン地球科学 http://kitchenearth.sblo.jp/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	市原 美恵 (Ichihara Mie) (00376625)	東京大学・地震研究所・准教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	熊谷 一郎 (Kumagai Ichiro) (50597680)	明星大学・理工学部・教授 (32685)	
研究分担者	久利 美和 (Kuri Miwa) (90374917)	東北大学・災害科学国際研究所・講師 (11301)	削除：2019年4月11日