

地学現象の再現実験

— 洗濯糊 (Polyvinyl alcohol: PVA)

スライムを用いた粘弾性流体の再現 —

谷口 英嗣・町田 嗣樹*・齋藤 洋輔**

はじめに

地学現象の再現実験を、大学教養課程や教職課程あるいは高等学校での理科実験において扱うにあたっては、地学現象が幾つかの素過程が複合し合った結果として我々の目前に示されていることを踏まえ、それらを紐解きながら、一つ一つの素過程を意識させることにより、複合体としての現象である事を理解させて行かねばならない。この時、対象となる地学現象の時間、規模のスケールが大きくあるいは逆に小さすぎるため、我々の日常のスケールに合った簡素なものに制限されることが多い。また、比較的大人数（40名以上）の学生・生徒に対して、一人の教員が指導する体制がほとんどであるため、学校で行われる理科の実験は、安全、安価で簡素なものに限られる。さらに、従来報告されているいくつかの実践例は、形の再現性に焦点をあてたもの（例えば火山のカルデラ形成の陥没モデル実験では、ココア粉末を山型に積み上げ、底板部分を落とし込むことで、山体内部のマグマ溜まりの陥没によるカルデラ地形の再現に成功している（林, 2006.））や、物理的特性に着目したもの等、1現象に注目した再現実験がほとんどである。その様な中で洗濯糊（Polyvinyl alcohol：以下 PVA と表記）を水で薄めホウ砂による水素結合と架橋構造によって粘弾性流体を作り、固体の粘弾性流動等を再現する実験は、①従来の理科実験ではイメージ化することが難しい粘弾性流体を再現し観察できること、②PVA 濃度により粘性を変える事ができ、流体の挙動がゆっくりと目で追いながら観察できること、③準備が比較的簡素であり、安全かつ安価であること、④普段手にする機会が少ない何やらグニャグニャした物質であり、手にした時のインパクトが大きく記憶に残り易いこと等の理由から、よく用いられる実験例である。特に④の理由から洗濯糊（PVA）スライム（以下 PVA スライムと呼ぶ）を作成する事に主眼が置かれた例が圧倒的に多い。（インターネット上で「洗濯糊 スライム」で検索すると 100,000 件以上ヒットする。）しかし、これらの一連の現象の中に様々な物理、化学

* 早稲田大学創造理工学部環境資源工学科

** 東京学芸大学附属高等学校

現象の素過程が見られることに言及したもの、あるいは地学現象に視点を向け、PVA スライムがどのような利点を持ち、活用できるかに付いて述べられた例はほとんどみられない。本論では、PVA スライムを用いた粘弾性流体を用いて再現できる地学現象の素過程から見た再現実験例について、主として実際に実習時に遭遇するポイントも含めて具体例と共に述べる。

PVA スライムの作成法と原理

ここでは基本的な PVA スライムの作成法を述べ、個々の実験に対応した相違点、変更点はそれら実験の各論で述べる。

① 準備するもの

用具、器具：500 ml 程度のビーカー、メスシリンダー、上皿天秤、薬包紙、薬さじ、空きペットボトル（対象の人数によっても異なるが 2l のものが便利である）、ビニール手袋等←人によっては使用する薬品で手荒れやかぶれを起こす場合があるので、用意する方が望ましい。

試薬：四ホウ酸ナトリウム、洗濯糊（PVA：ポリビニルアルコール）←スーパーマーケットで市販されているが、メーカーによって濃度が異なる。10%程度のもので使いやすい。

② 試料の作成

●四ホウ酸ナトリウムの過飽和水溶液の作成

- 一つの実験試料に 100~200 ml 必要であるので、それよりもやや多い量の水をガラスビーカーに取る。この時の水は水道水で構わない。
- ホットプレートあるいはガスバーナーでお湯にする。←目安は沸騰直前。
- お湯の中に四ホウ酸ナトリウムを溶けなくなるまでよくかき混ぜながら入れる。←目安は白濁した溶液が透明になりにくくなるころまで入れる。
- そのまま放置する。←最終的には常温（室温）にする。夏場は水冷して温度を下げてもいい。ただし、大事な点は溶液が過飽和状態になっている事である。

●洗濯糊の調整

- 市販の洗濯糊を約 100 ml ビーカーに取る（ビーカーはプラスチックのものでも良い）
- 水を入れる。←このとき入れる水の量を加減すると粘性（流動性）の異なる PVA スライムが作れる。標準は PVA 濃度 10%の洗濯糊であれば洗濯糊と等量の 100 ml である。
- 良くかき回す。←多少泡立つ程度まで。

●洗濯糊をスライム化させる。

- よく水と混ざった状態の洗濯糊に過飽和の四ホウ酸ナトリウムを少しずつ加えながらかき回す。←すぐに粘っこくなるが、その状態からさらに10~20 ml 四ホウ酸ナトリウム過飽和水溶液を加え続ける。
- しばらくかき回していると、液体が無くなりすべてゼリー状のPVA スライムになる。
- ここでビーカーから取り出し、手でおにぎりを作る要領で固める。←この時手の温度が高いと細かなPVA スライムが手にまとわり付く。あらかじめ四ホウ酸ナトリウム水溶液で手を濡らしておくが良い。
- しばらくすると、弾力感のある透明なPVA スライムが出来上がる。
- ビーカーに残ったゼリー状のPVA スライムは、手に持っていたPVA スライムで重ね合わせる（合体させる）事で一体となって取れる。←この時残ったビーカーに水を満たしておくで後でビーカーの洗浄が楽になる。

③ 反応原理・化学的構造

スライム作成の過程の中には架橋構造や含水構造と言った化学的な素過程が見られる。材料となるPVAつまりポリビニルアルコール $(\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH}))_n$ は、ビニルアルコール $\text{CH}_2 = \text{CH}(\text{OH})$ を付加重合させることにより得られる物質である。ヒドロキシル基を持ち、図1に示すような構造を持つ鎖状の高分子化合物である。

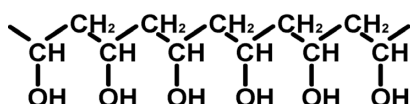


図1 PVA（ポリビニルアルコール）の分子構造

これに四ホウ酸ナトリウム $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ を加えるとPVA スライムが生じる。この反応は図2に示すような架橋結合（水素結合）によるものと考えられている（Casassa *et al.*, 1986）。加えた四ホウ酸イオンの一部は水溶液中にてホウ酸イオンの形で存在する。このホウ酸イオン中のOH基とPVA鎖のOH基の間で水素結合が形成され、結果的にPVA鎖同士を結び付ける“架橋”が出来る。

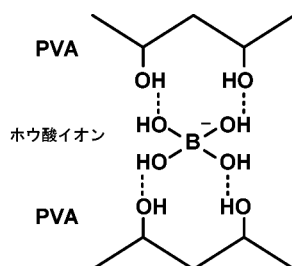


図2 PVA スライムの架橋結合の構造

また PVA スライムには架橋結合により図3に示すように網状の構造が形成される。そしてその空間に水分子が入り込むことにより、スライム独特のプルプルとした硬さが生まれる。

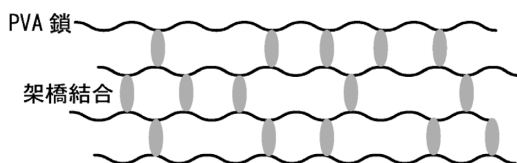


図3 PVA スライムの網目構造

観察ポイント

① PVA スライム（粘弾性流体）そのものの性質に注目して行う実験

㊦ PVA スライムが固体の性質を示す実験

観察キーポイント：ちぎれる。割れる。弾む。

「ボール状に丸めた PVA スライムを使ったチャッチボール」などの直感的な実験によって容易に（場合によっては一度に）確認することができるので、「遊び」の中から生まれる自由な発想およびスタイルの実験が想定できる。手に持った PVA スライムをゆっくりと引っ張ると、引き延ばすことができるが、急激に引っ張るとちぎれてしまう。丸めた PVA スライムを高さを変えながら落下させると、低い位置から落下させた場合は下の面に到達しても跳ね返るが、ある程度以上の高さから落下させるとガラスが割れるように破壊する。この様に、急激に変形させると固体の様な挙動が見られる。また、工夫次第では以下に述べる様な別の視点の実験との関連性も考察できる。

① PVA スライムが液体の性質を示す実験

観察キーポイント：境目が無くなる。

固体の場合は原子同士の結合は常温、常圧ではほとんど観察できない。作成した PVA スライムを二つに分け、お互いに近付けて放置する。すると両者が接触し、やがて一体となる。最初は無色の PVA スライムで行うと一体化した時には両者の境目がわからなくなっている事が印象深くなる。

次に片方の PVA スライムを後に説明する様な着色をしたものにして同様の実験を行う。その際、境界面の時間変化について観察させる。さらに、上記の「ちぎれる」または「割れる」のような固体の性質に関する実験の後にこの実験を行えば、バラバラになった物質が一体となること、つまり、粘弾性流体の持つ「固体と液体の中間的性質」を印象付けることができる。

観察キーポイント：透明感のある色を付けられる。

液体の着色法と比較しながら実験を行うと効果的である。着色に際しては水溶性色素、顔料系色素、蛍光物質（フルオレセイン等）、蓄光物質（アルミン酸ストロンチウム等があるが水に溶けにくい）を加えて作成する。水溶性色素の場合は①PVA 洗濯糊に水を混ぜる際に、混ぜる水にすでに溶かしておく場合と、②PVA スライムに直接塗りつける方法を取る場合に分けられる。特に②の場合は蛍光ペン等のインクを、ひらたく伸ばして煎餅状にした表面に直接塗りつけ、それを半分に折り返して、新しく表面に出てきた部分を引き伸ばし、その表面に再びインクを塗りつけ、再びそれを折り返し、引き伸ばし着色をする、を繰り返すと、全体に色が薄い色から濃い色へ変化させる事ができる。（ちなみに、この様な混ぜ方は効率が良く、うどんやそば打ちにも用いられている事に触れると良い。）また、始めに名前などの文字やイラストをPVA スライムの表面に書くと、それらが拡散し最終的に見えなくなっていく様子を追って体験することができる。

顔料系色素の場合も水溶性色素の場合と同様に着色できる。ただし、色素粒子の細かい水溶性色素とそれに比べて大きい顔料系色素の粒子の大きさの違いにより、透明感の水溶性色素の場合より劣るので、その違いに注目すると、光の透過性と粒径による拡散の違いの理解に役立つ。

観察キーポイント：特定の形を維持できない。

任意の形を作っておき、その形の変化を観察する。結果的に重力に引かれて変形していく様子が観察される。

② 計測値からその挙動の特性を知る

観察キーポイント：流れ下る。

PVA スライムは手に持っているだけで流れ下り始める。流動性の違いを知る実験は作成したPVA スライムをそのまま利用できるで、多くの実験例がある。ここでは、それを定量的な実験にする事により流動の特性を知ることができる例について述べる。

PVA スライムを一定量スタンドに取り付けた棒の上に転がり落ちないように載せ、自然に流れ落ちる様子を単位時間当たりの落下量（変位量）を測定することにより定量的に観察する。

スタンドから流れ下っている最中のPVA スライムは重力に引かれて落下して行くが、変位速度に注目すると、完全な自由落下とはなっていない。落下の様子に着目すると、最初大きな塊状で落下を開始するが、徐々に下部に塊ができ、それに引かれるように上部が細くなり、それとともに落下速度を増して行く。粘性をうまく調整すると、この様子がスローモーションの様に観察できる。

さらに詳細に落下の様子を観察すると、最初に細くなっていく場所は落下する中で一番細い所から始まり、その後はそこが選択的に引き延ばされる。その様子は「何本ものゴム紐に繋がれた錘」に例えると、錘をつるしていたゴム紐が一本切れ、そのたびに残りのゴム紐が引き延ばされ、

また一本切れ、引き延ばされを繰り返し、徐々に落下速度を増し、最後の一本が切れて完全に張力を失った時点で自由落下するという様子に近似できる。スタンドから流れ下る場合、最初ゆっくりと流れ下るのは張力が最初の内はまだ大きいためであり、張力を失うごとに落下速度が増して行くのである。

一方、球状に丸めた PVA スライムを実験台に置くと円形に台上を広がって行き、最初はその速度が速いが、広がるにつれて徐々にその速度は遅くなる。これは球状に丸めた直径分の高さがあるので、その高さから自重で流れ下る現象と同じであるが、薄く広がると押し広げる力と粘性抵抗の差がほとんど無くなるので広がる速さが遅くなる。言い換えれば、PVA スライムが流れ下るとともに流れ下る台の高さが低くなる事と同じになるためである。

これらの現象を水（液体）の流れ下る現象と比較してみるとより理解しやすい。水の場合は水滴ごとに流れ、お互いに繋がっていないから自由落下と同様の現象が見られるのである。

③ 地学現象の特性を知る

マグマの SiO₂ 含有量と粘性

スライムの作成法の中で述べた通り、洗濯糊の調整の際に用いる水の量を増減させることによってスライムの粘性を変化させることができる。水の量が多ければ粘性の低いスライムとなり、水の量が少なければ粘性の高いスライムとなる。一方、マグマの粘性は SiO₂ 含有量の差に大きく依存して変化し、SiO₂ 含有量の少ない玄武岩質マグマは粘性が低く、SiO₂ 含有量の多い流紋岩質マグマは粘性が高い。ここで、スライムの洗濯糊の量をマグマの SiO₂ 含有量に置き換えると、水が多く相対的に洗濯糊の濃度が低い、粘性の低いスライムが玄武岩質マグマに対応し、粘性の高いスライムが流紋岩質マグマに対応することがわかる。以上を踏まえ、上記②の実験をアレンジすることによって、マグマの粘性と噴火様式および火山形態についての考察が可能となる。

弾性波伝播速度

弾性波のうち地球科学で一般的に用いられる P 波（Primary Wave）および S 波（Secondary Wave）の伝播速度 V_p および V_s は、それぞれ次式で表される。

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

ここで、 ρ は密度、 K および μ は弾性定数（体積弾性率および剛性率）を示すが、このことはつまり、PVA スライムのこれら物性が求まれば PVA スライムを伝播する V_p および V_s がほぼ一義的に求まる、ということの意味する。密度は、アルキメデスの原理を用いて実測することは可能であるし、一般的な洗濯糊（PVA）の密度を仮定して、混ぜた水の量から概算することも

容易だろう。一方、弾性定数は、専用の測定器を使えば定量的に測定することが可能であるし、測定器を準備できない場合でも、上記②の実験から求まる相対的な弾性定数の差に基づき考察することが可能である。

この実験から PVA スライムの弾性波速度（特に S 波速度）が主に剛性率に依存していることを理解する事ができる。つまり、弾性波速度が遅いほど柔らかく、速いほど固いことが実感できる。

我々が持つ「固いものは重い」という直感的イメージから、密度と剛性率を混同もしくは比例関係にあるものと誤認していることがある。しかし、この実験を通じて、同じような密度（または重さ）でも固いものと柔らかいものがあることがあり、と認識することができる。

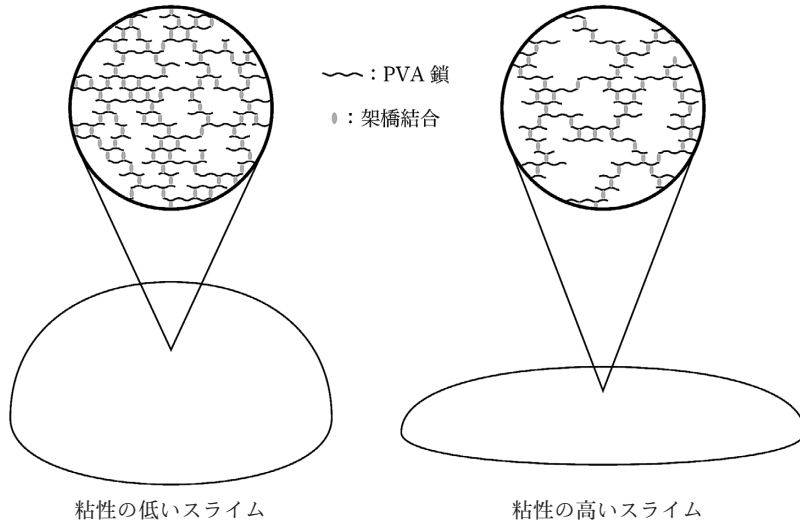
地学的分野からの解釈・考察

マグマの粘性・噴火様式・火山形態

マグマの粘性を支配する SiO_2 含有量は、PVA スライムの洗濯糊の濃度に対応する。このことは、PVA スライムの分子構造および分子の結合力が、マグマのそれに類似した対応関係にあると見ることができる。つまり、PVA 鎖が、マグマにおける共有結合により強固に結びついた Si-O-Si に対応し、架橋結合（水素結合）で PVA 鎖と結びつくホウ素、および、PVA スライムの骨格（PVA 鎖と架橋結合によって作られる）に取り込まれている水分子がマグマにおいて Si-O-Si と弱く結合（イオン結合や金属結合）しているその他のイオンに相当すると考えられる（図 4）。したがって、 SiO_2 含有量または洗濯糊が多く、結合力の強いマグマまたは PVA スライムは粘性が高いのである。さらに、前章の②の実験を応用すれば、玄武岩質マグマの噴出する火山の噴火様式（アイスランド式やハワイ式）と火山の形態（溶岩台地や楕状火山）と、流紋岩質マグマの噴出する火山のそれら（例えば、プリニー式や溶岩ドーム）との比較および考察は容易である。特に粘性の高い PVA スライムには、作成時に生じる気泡の多くが抜けずに残っているので、粘性の低い PVA スライムとの気泡の抜け方の違いを観察し、マグマの脱ガス効率に置き換えれば、高粘性の流紋岩質マグマの噴火が爆発的になることが理解できる。

褶曲および断層の形成

上記①や②の実験から導かれる様に、柔らかい PVA スライムは一定にかかり続ける力に対して速く変形することにより流動性を確認することができる。一方、固い PVA スライムも長時間一定の力がかかり続けば、やがて変形し、場合によっては柔らかい PVA スライムと見分けがつかなくなることが同様の実験から導かれる。このことは、岩石の流動性の背景を理解する上で極めて重要な概念である。ここで、①の実験で作成した色の付いた比較的粘性の高い PVA スライ



実際のスライムでは、PVA鎖と架橋結合によって作られる骨格の隙間に水分子が取り込まれているが、骨格の密度の差を強調するために、図中には水分子が描かれていない。

図4 粘性の異なるPVAスライムの構造の模式図

ムを複数用意し、それぞれを平に重ねて地層に見立てるとしよう。それにゆっくりと持続的に力を加えれば、我々が露頭で目にする様な褶曲構造が容易に再現される。一方、①㉗の固体の性質を示す実験のように一気に、つまり、短時間に強い力を加えれば地層は破壊され、断層が形成される。したがって、褶曲および断層の形成は、岩石の粘弾性、岩石にかかる力（応力）の大きさと時間に支配されていることが理解できる。

プレートの移動

③の実験から明らかな様に、PVAスライムの弾性波速度（特にS波速度）は剛性率に大きく依存している。この関係は、地震波低速度層にあたるアセノスフェアは柔らかく、伝播速度の速いリソスフェアは固いということに当てはめることができ、このことから、リソスフェアがアセノスフェアの上を滑るように運動するというプレート運動の概念を理解することができる。ここでも、柔らかい物質ほど速く流動するという岩石の流動性の背景が関連する。リソスフェアは剛体とみなされるので、実験では定規や下敷き等の身の回りにある固体（もしくは、極めて粘性の高いスライム）をリソスフェアとし、PVAスライム上に載せ、ゆっくりとそれら定規等を水平方向に移動させると、それがプレートの移動現象に近似できる。

固体のプレートが固体のマントル中を移動する（沈み込んだプレートのゆくえ）

海溝から沈み込んだ固体の海洋性プレートは、かんらん岩を主体とする固体のマントルの中を移動し地球深部へともたらされる。この流動を支配しているものは、沈み込んだプレートが高温

高圧変成作用を受けて周囲のマントルよりも高密度になったことによる密度差である。つまり継続的にプレートに働く引力によって、周囲のマントルは変形し、結果としてプレートは沈んでゆく。当然、沈み込んだプレートも変形するだろう。このとき、岩石の粘性は極めて高いため、変形のスピードは非常に遅い。従って人間が実際の地球内部の流動（または対流）を認識することは不可能である。しかし、複数の粘性の高い PVA スライムを用意し、「球状に丸めた PVA スライムを実験台に置く」実験（前記②参照）を行えば、粘性の高い PVA スライムほど一定の大きさまで広がるのに必要な時間が長くなることに気付く。このことから、岩石の変形や流動は極めて長い時間が要することが容易に理解できる。

さらに、粘性の高い複数の PVA スライムを混ぜ合わせることで、沈み込んだプレートがマントル対流に乗って長時間かけて混ぜ合わされるとどうなるかを予想することができる。例えば、比較的大きめで無色の PVA スライムを用意し、それをマントルに見立て、そこに色のついた PVA スライムの塊（プレート）を混ぜ込むとしよう。混ぜ始めた当初は大きさを維持していた塊も、時間がたつと徐々に引きちぎられ、やがて小さくなって行く（ただし、この実験はかなりの時間を要する）。PVA スライムの場合、高い粘性といっても岩石ほどではないので、2 種の PVA スライムは最終的に完全に混ざり合ってしまう。しかし、ここでも「完全に混ざり合うまでに要する時間」がポイントとなる。高い粘性の PVA スライムほど、長時間混ぜ続けなければ完全には混ざり合わない。近年の岩石学・地球化学の研究により、地球のマントルは過去のプレート物質（実際には海洋性プレートのみではなく大陸性プレートも含まれる）に由来する不均質が普遍的に存在することが明らかになってきた。特に、パンゲア超大陸が形成されるより前から海洋であり続ける現在の太平洋の下のマントルは、他の海域（例えばインド洋や大西洋）に比べ不均質性の規模が小さいことが分かっている（Machida *et al.*, 2009）。このことは、太平洋の下の過去のプレート物質が、パンゲア超大陸が形成されるより前からマントル対流により混ぜ続けられ引きちぎられていった結果を示すに他ならない。

このように、この実験の最大の利点は「深部のマグマ、マントル」という手に取り難い物質を、手のひらの中でモデル化して観察できること、および、地球上では変位・変形速度が著しく遅い岩石の流動変形を目で見えて感じ取れる短い時間スケールの現象として観察できる事である。

参考文献

- Casassa, E. Z., Sarquis, A. M., Van Dyke, C. H., 1986, The gelation of polyvinyl alcohol with borax: A novel class participation experiment involving the preparation and properties of a "slime", *Journal of Chemical Education*, Vol. 63, Issue 1, 57-60.
- 林信太郎 (2006) 「世界一おいしい火山の本 — チョコココアで噴火実験 —」 127 p 小峰書店
- Machida, S., N. Hirano, J.-I. Kimura, 2009, Evidence for recycled plate material in Pacific upper

mantle unrelated to plumes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 73, Issue 10, 3028-3037, doi: 10.1016/j.gca.2009.01.026.

理科年表 国立天文台編 丸善

篠原功治 (2009) 「学校では教えてくれないオモシロ科学実験」 246 p PHP 研究所