

「マグマの上昇と噴火」のアナログ実験： 地球がゼラチンにマグマが油に

高田 亮¹⁾

1. アナログ実験マジック

火山は見るだけで感動する。危険さえなければ噴火はなおさらである。こんな光景が1986年11月15日、伊豆大島の御神火茶屋で見られた。しかし、11月21日、一転して割れ目噴火が始まり島民が避難という結末になった。火山の仕組みや地下のマグマが見えていればこんなことはなかったかもしれない。そこで、一般普及向けに、火山の仕組みを理解して地下のイメージを膨らませるために、アナログ実験を薦めたい。見て楽しむだけでなく、恐ろしさを与えることだけで

もなく、もっと火山の仕組みを積極的に理解するツールが必要であった。ボタンを押せば火山噴火をシミュレートするのは違い、参加者に手足を動かして火山の仕組みを理解してほしいからであった。アナログ実験は理科教育の宝庫である(高田, 2005; 山梨県環境科学研究所・山梨県教育委員会, 2005)。

噴火などの地球の現象は、「天災は忘れた頃やってくる」という寺田寅彦の言葉にあるように、起こる頻度が低い。しかし、起こると規模が大きく危険である。台風は衛星からその位置と規模が分かるが、地下のマグマは直接見えない(高田, 1995)。ミステリアスだ。不思議なことがたくさんある。これらの疑問を解決するために発想の転換をしよう。実際の噴火ではなく、噴火のアナログ(模擬)実験を行う。これをアナログ実験マジックと呼んだ(高田, 2005)。ポスター(第1図)で、矢印が右に折れ曲がっているのはそのためである。材料は身のまわりのものを使う。地球で起こることは、規模の大小はあるものの、日常生活でも起こるという、サイエンスの普遍性も訴えられる。キッチン地球科学という言葉も使われる。台所や風呂場が実験室に早変わり。実験する人は火山シェフである。どんな噴火のレシピを用意しようか。

2. 噴火現象からアナログ実験へ

ショーとしてのパフォーマンスではない、本質的なところで火山や噴火現象を魅せる工夫とは何か。ここには、・・・レンジャーや・・・マンなどのキャラクターはいない。クイズやタレントさんの司会をたててのショーもない。それでも子供達は足を運んでくれた。1対1の対話もできた。しかし、火山のないつくばの子供達に、火山とは噴火とは何か分かってもらえたであろうか。どこかの火山が噴火し、その映像がテレビで報道



第1図 一般公開のポスター。

1) 産総研 地質調査情報センター

キーワード: アナログ実験, 岩脈, 割れ目噴火, マグマ, マグマ供給系

されているときなら、お茶の間にも火山の話題が登っているのだが、そこで、一般公開では、写真やビデオで噴火現象を見てもらって、モチベーションを高めてから実験を始めるスタイルが定着した。

私がアナログ実験に魅せられたのは、実際の噴火現象のすごさを体験した後、「地下のことは見えない」という決定的な問題を解くマジックがあることに気持ちが高揚したからである。1980年代にマグマの上昇の研究を始めた私は、東大地震研の中村一明さんの授業で、ハワイのリフトゾーンをゼラチンを使って説明しようとしたアナログ実験の論文 (Fiske and Jackson, 1972) を紹介されて、大変刺激を受けた。そのころ、1983年には、三宅島で割れ目噴火が起り、1986年には、伊豆大島の割れ目噴火が起り、自分でもマグマが板状に上昇することを確信した。その時、地下の見えないマグマの動きを定量的に再現できればと考えるようになり、アナログ実験をやろうという意志が固まった。1990年代のことである。地質調査所に入所してから、野外調査の合間に実験を繰り返し、マグマの上昇に役立つ基礎的なクラックの挙動をまとめた (Takada, 1990)、その後の発展した実験では、マグマの上昇機構に重要なクラックの相互作用などの新しい概念も生まれた (Takada, 1994a, b; Takada, 1999)。レビューは、高田 (1995) にまとめた。

3. “たけしさん” から学ぶこと

本アナログ実験はテレビにも出演したことがある。デモンストレーションのショーである。まだ、手軽に実験する技術が十分ではなかったが、岩手山の噴火のとき、NHK教育10minボックス「災害の科学」(1999.2放送)で、マグマの貫入実験に使われた。当時は、現場に行かずメールで実験方法を指示し、番組スタッフが実験を行った。映像は適当に編集され問題点はあらわにされなかったが、2000年の三宅島噴火のとき、アナログ実験は、割れ目噴火のイメージとして、ニュース番組やテレビ朝日・ABC系列「たけしの万物創世紀」(2000.9放送)で流れた。後者の番組では、たけしさんは本番前に注射器で試しに油を注入しようとしたとき、「穴も小さいし難しそう。誰かおれのかわりに注入してくれ」と言って、自分で実験することをあきらめた。本番では、若いタレントさんに実験をやらせた (第2図1)。たけしさんの本番中の感想は「液体を注



第2図 テレビ朝日・ABC系列「たけしの万物創世紀」(2000.9放送)のビデオから。1:若いタレントが実験に挑戦。2:実験の解説。3:待ちきれずトークが始まる。4:トークの間に噴出。まだ、気がつかないたけしさん。

入するのに力もいるなあ、なかなか噴出ししない。時間がかかる」であった(第2図2)。待ちきれず、たけしさんのトークが始まってしまった(第2図3)。彼が気づいたときには、液体はゼラチンの表面に噴出してしまっていた(第2図4)。「噴火は予知できないなあ」の一言で大爆笑であった。番組ではビデオで詳しく再現してくれたが、手軽にできない欠陥が暴露されてしまった。

4. ショーから学校・家庭に

ショーではなく、実際に学校や家庭で試して使ってもらわないと意味がない。2003年に地質標本館で、「富士山 現在過去未来」という特別展を行い、その中で、「アナログ実験で火山と遊ぼう」という実験コーナー(高田, 2003)を始めたのが、本格的なアウトリーチという切り口の発端であった。そこでも、噴出までに時間がかかり、子供が飽き始めた。大学の集中講義で、この実験を使ったことがあった。学生さんから多くのコメントももらった。それがもとで、荒牧重雄さんの山梨県環境科学研究所で、講義・アナログ実験・野外巡検がセットになった富士山のアウトリーチ研究が始まった。

まずは実験時間の短縮が急務であった。学校の授業時間内におさまらないといけない。議論・まとめや後片付けがあるので、数分以内に実験が終了することが必要である。子供達が実験を行うためには、危険な注射針や揮発性の高い液体は使わないことも重

要である。また、手軽に実験できることが普及のポイントでもある。実験時間を短縮するためには、液体とゼラチンとの密度差を大きくする工夫がいる。母体のゼラチンに砂糖を入れて密度差を大きくした。注入する液体の密度を小さくする方法もあるが、密度の小さいベンジン、ガソリン、トルエンなどの液体は揮発性が高くなり取り扱いが危険である。空気では、上昇時間が速すぎるし、噴出も見えない。

装置も手軽で安全にということで、危険な注射針のかわりにストローを使った。手軽な容器として、地震学会・火山学会の夏の学校では、神奈川県立西湘高校の相原延光さんらが、手軽なペットボトルを使って、アナログ実験を始めた(世界子どもサミット実行委員会, 2001; 高田, 2004b)。最近では100円ショップやホームセンターに実験材料を探しに行く。本実験では、100円ショップで販売している、直径が10-15cm程度のポリプロピレン容器を勧める。径が大きい方が、壁の影響が少ないからである。

2004年、2005年、2006年の夏、山梨県環境科学研究所で、理科教員の研修会に講師として参加し、「マグマの上昇と噴火」、「溶岩流」、「降下火砕物」の3本立てのアナログ実験を行った(山梨県環境科学研究所・山梨県教育委員会, 2005)。秋田大学の林信太郎さん、静岡大学の小山真人さん、神奈川県立西湘高校の相原延光さんと実験プログラムを作成した。実験の報告とアナログ実験のテキストは、山梨県環境科学研究所からダウンロードできる。NHK「山梨ニュース」(2004.8)、NHK「おはよう日本」(2004.9)や新聞(朝日新聞ほか)、NHK「まるごと山梨、ニュース845山梨」(2006.8)に、学校教員が楽しそうに実験している風景が報道された。実験後のアンケートでも、本報告の主題である「マグマの上昇と噴火」に関しては、大変面白い実験だという感想をもらった。しかし、一部の地学教員を除くと、学校教員が学校でやってみようということまでは行かなかった。手軽さには課題が残る。

5. 一般公開：対象は誰か

産総研の2005年7月23日の一般公開では「アナログ実験マジックで噴火の謎を考えよう」というタイトルで実験ショーを行った(高田, 2005)。「アナログ実験」マジックという言葉売り込んだ。直接見えないもの



第3図 2006年度の一般公開の様子。小さいゼラチン容器で1対1の対話ができ、撮影は及川輝樹氏。

をマジックで見ようというものである。産総研の2006年7月22日の一般公開では「つくばで火山を噴火させよう」というタイトルで実験ショーを行った(高田ほか, 2006)。若手中堅研究者が参加し実験数を増やした。つくばには火山がないので、過激なテーマを選んだ。五感に訴える噴火の実験には、多くの子供達が集まってくれた。

今回は、従来の径20cmのゼラチン容器3個以外に、径が10cm程度の小型容器9個を準備した。なるべく多くの子供達に、見るだけでなく実験してもらうためである。小さい容器だと1対1で対話できる利点がある(第3図)。実験者の年齢や階層によって、説明も変えた。当日配布した説明マニュアルは、ふりがなをつけたとはいえ中学生以上の内容である。割れ目噴火の写真を見せながら説明を行った。

小学生には、いかにアピールするかが課題である。付き添いの親が内容をフォローしてくれたりもした。クラックが上昇する間ずっと焦らせておくと、液体が噴出する瞬間は感動する。どのように上昇して噴火にいたるかは、小学生には難しい物理である。応力をかけてクラックの方向を変える実験では、狐につままれたような顔をした。アナログ実験マジックの面白さだけでも分かってくれればと思う。中学生以上の子供からは、「なぜこれが火山と同じ現象なのか」、「なぜゼラチンが地球になるのか?」、「マグマは熱いのに」などの質問が出た。簡単に答えられないことが多く寄せられた。

6. (付録) マニュアル

一般公開当日に配布したマニュアルをより簡単にし



第4図 1986年11月21日の伊豆大島の割れ目噴火。地質標本館のビデオから。

た。ふりがなは省略してある。

安全に噴火の謎解きに挑戦

「つくば」には火山はない。しかし、地球にはたくさん火山がある。そのなかで噴火している火山もある。火山が静かなときは温泉に入ったり、山に登ったりして楽しむことができる。火山は、怒ることもあるし、微笑むこともある。

ビデオで火山の噴火を見よう。みなさんはいろいろな疑問がわいてくと思う。じつは噴火に関して、まだまだわからないことがいろいろある。噴火の謎とみに挑戦しよう(第4図)。しかし、マグマは見えない

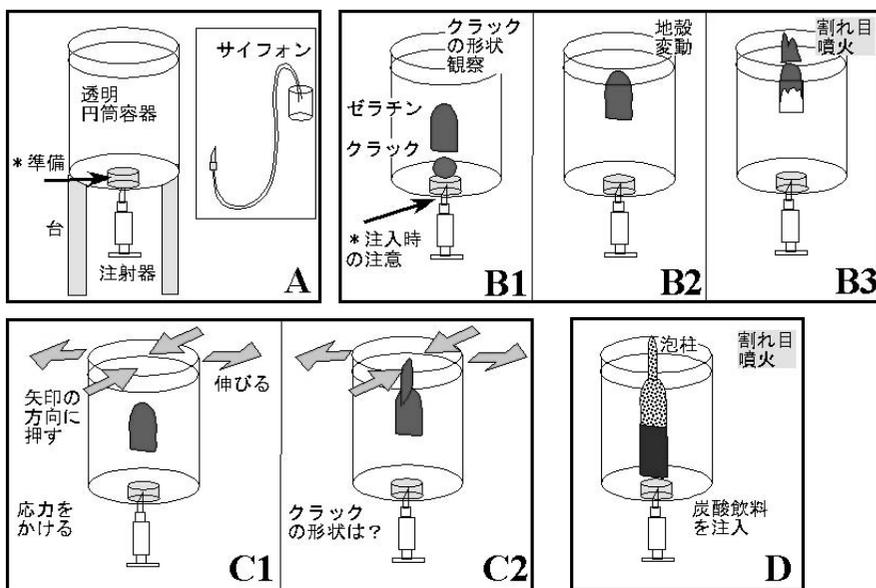
し、噴火は危険だし、その規模も大きい。そこで、アナログ実験と言われるマジックを使おう。身のまわりの材料で、全体を縮小して、つくばに火山を作ってみよう。固い地球を柔らかくして、粘りけのあるマグマをさらさらにする。キッチンや風呂が実験室だ。火山シェフに変身だ。

「マグマの上昇と噴火」のアナログ実験

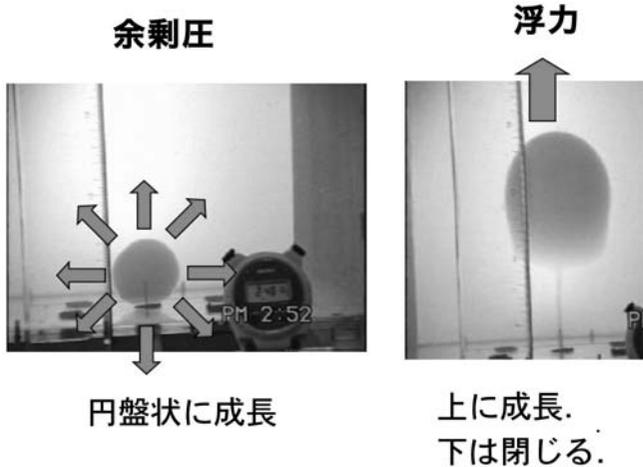
基本的なこと: 地下深い場所で溶けて上昇するマグマは噴火するまでは見えない。それをアナログ実験マジックで見よう。ゼラチンを伸び縮みして割れる地球に、油をマグマにする。透明容器にゼラチンを固め、底からゼラチンより軽い油を入れると(第5図A)、クラック(割れ目)ができる。油で満たされたクラックの上昇から割れ目噴出までを観察する。

準備の説明(第5図): 下線は準備する材料・器具である。

- (1) ゼラチン容器は、10cm程度の透明ポリプロピレン容器(100円ショップで販売)がよい。容器底に、下からストローをつぶして入れられる縦長の穴を、隙間があく程度にマイナスドライバーを熱してあける。チューインガムで穴をふさぐ。
- (2) 粉末ゼラチンを湯で溶かし、ゼラチン容器に入れ、冷えたら冷蔵庫で水平に置いて固める。実験時間を短くするには、ゼラチンを重くすればよい。



第5図 マグマの上昇から噴火へのアナログ実験レシピ。



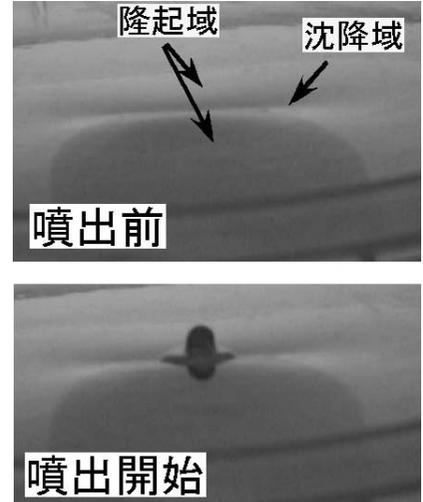
第6図 上昇するクラックの形の変化。左は液体の注入圧で広がっているクラック。右は浮力で上昇を始めたクラック。

砂糖を250g程度溶かして1リットルのゼラチン液を作ると、その密度は約 1.1g/cm^3 となる。浮力は2.5倍となる。ゼラチンは食べるぐらいのやわらかさが多い。

- (3) ストローとホームセンターで販売しているビニールチューブ1m (径はストローを差し込めるくらい) で連結管をつくる(第5図A)。ストローを10cmに切り、片端を斜めにカット。もう方端をビニールチューブに連結して、液がもれないようにビニールテープで巻く。
- (4) 固まったゼラチンを第5図Aのように、台に乗せる。底のふさいである穴にきりを一度通しておく。
- (5) 注入する油に、油絵の具で色を付けておくとよい。油の入った容器に連結管を入れ、第5図のサイフォンを組み立て、油をみちびき空気をぬく。油容器の位置を下げ、空気をぬき油を少し出しながら、ストローをゼラチン容器底の穴に差し込む。油容器の位置を高くして油を注入して、実験開始。

観察：見所を下線で示した。

- (1) 油を注入すると、「液体の入ったクラック」ができる。はじめに、この形の変化を見よう。注入時に上下左右に同じ力がかかると、クラックは「円盤」に広がる。クラックが大きくなるにつれ、浮く力(浮力)が強くなると、「シャモジ状」に変化し(第5図B1；6)、クラックは上昇を始める。
- (2) クラックの壁に見える羽状の模様を楽しもう。茶



第7図 噴出直前の表面での地殻変動。盛り上がる場所(隆起域)と沈む場所(沈降域)が、「液体を満たしたクラック」の上の表面に現れる。マグマが「近くまで来たかな」とわかる。

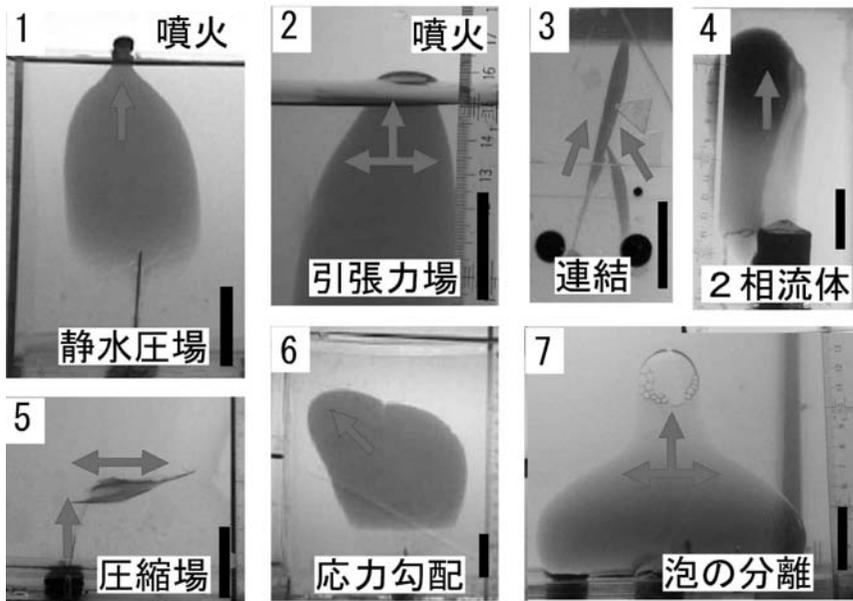
碗などが割れたときに現れる模様にも似ている。

- (3) クラックが表面に近づくとき、ゼラチン表面が変形して凹凸が見られる(地殻変動)(第5図B2, 第7図)。全体が盛り上がり、中心が溝状にへこむのがわかる。
- (4) 割れ目噴出(第5図B3, 第4図)。噴き出す「液体の柱」の高さはどう時間変化するの？ 一瞬間なので、ビデオに記録しておくとうい。

応用：第8図には、いろいろなクラックの実験例がある。下線は見所である。

- (1) 円筒容器に横から力をかけ歪ませる(第5図C；第8図5)。力(応力)の役割を調べる。クラックの面に垂直方向の力をかけると、クラックの方向は変わる？ 力の方向や大きさをえて、クラックの動きを観察しよう。
- (2) 液体の密度や粘りこさの違いを調べる(第5図D)。炭酸飲料を注入するとどうなる？

安全の注意：注射針を使うとき、ケガのないように。注入液体に揮発性の高い液体(ガソリン、ベンジン、トルエンなど)は毒性もあり、火もつきやすいので危険。



第8図
 いろいろな実験例 (高田, 2004a) : クラックのアナログ実験例. 3, 5はクラック側面. ほかはクラック正面. 矢印は液体の流れ. 黒のスケールは3cm.

7. 最後に

マグマの移動から噴火にいたる現象の理解に、ゼラチンに油を注入する実験は大変重要である。アナログ実験は、理科教育の宝庫である。特に地球科学への貢献は大きい。専門家はついつい細部のこと、実験の技術的なことの開発に深入りして、より本質的な未解決の問題、火山全体のこと、地球全体のことを忘れがちである。アウトリーチ研究は、自分の研究に大きなフィードバックが期待されることも強調しておきたい。

謝辞：一般公開では、マグマ活動グループの染谷さんほか、火山関係者の皆さんには準備などで大変お世話になった。この場を借りて御礼申し上げます。

引用文献

ABC・イースト制作 (2000) : 「たけしの万物創世紀」.
 Fiske, R.S. and Jackson, E. D. (1972) : Orientation and growth of Hawaiian volcanic rifts: Effects of regional structure and gravitational stress. Proc. R. Soc. London, Ser. A, vol. 329, 299-326.
 世界子どもサミット実行委員会 (2001) : 日本地震学会ニュースレター, vol. 13, no.3, 60-61.
 Takada, A. (1990) : Experimental study on propagation of liquid-filled crack in gelatin: Shape and velocity in hydrostatic condition. J. Geophys. Res., vol.95, 8471-8481.
 Takada, A. (1994a) : Development of a subvolcanic structure by the interaction of liquid-filled cracks. J. Volcanol. Geotherm. Res., vol.61, 207-224.

Takada, A. (1994b) : Accumulation of magma in space and time by crack interaction. In: M. P. Ryan (Editor), Magmatic Systems. Academic Press, San Diego, California, 241-257.
 高田 亮 (1995) : クラックによるマグマの上昇. みえないものをみようとするアナログ実験. 科学, vol.65, 673-685.
 Takada, A. (1999) : Variations in magma supply and magma partitioning: the role of tectonic settings. J. Volcanol. Geotherm. Res., vol.93, 93-110.
 高田 亮 (2003) : アナログ実験で火山と遊ぼう. 地質ニュース, 地質調査総合センター, vol. 591, 24-27.
 高田 亮 (2004a) : マグマの上昇から噴火へのメカニズム. AIST Today, vol.4, n12, 8-9.
 高田 亮 (2004b) : 身近な材料で体験するマグマの上昇, 理科教育ニュース, 少年写真新聞社, vol.609, 1.
 高田 亮 (2005) : チャレンジコーナー「アナログ実験マジックで噴火の謎を考えよう」報告. GSJ Newsletter, 地質調査総合センター, vol.11 (2005/8), 3.
 高田 亮・川邊禎久・古川竜太・七山 太・下司信夫・竹内晋吾・及川輝樹 (2006) : 産総研一般公開「つくばで火山を噴火させよう」報告. GSJ Newsletter, 地質調査総合センター, vol.23 (2006/8), 1-2.
 山梨県環境科学研究所・山梨県教育委員会 (2005) : 理科教員研修会 一体験で学ぶ火山- 実施報告書2005年度, 山梨県環境科学研究所発行. pp51-88. (実験マニュアルを下記からダウンロードして閲覧できます (4.9MB)).
<http://www.yies.pref.yamanashi.jp/kazan/index.html>
 先端研究内容と文献 :
<http://staff.aist.go.jp/a-takada/gelatinexp.html>
 普及活動内容と文献 :
<http://staff.aist.go.jp/a-takada/Analogfukyu.html>

TAKADA Akira (2006) : Analog experiment of oil-filled crack in gelatin on magma ascent and eruption.

<受付：2006年10月3日>