

## 物理化学的知識を統合した火山の学習

### Teaching on volcanisms, integrating physicochemical knowledges

藤 林 紀 枝<sup>1)</sup>・平 中 宏 典<sup>1)</sup>

Norie FUJIBAYASHI and Hironori HIRANAKA

**key words** ; 理科教育, 地学教育, 火山, 物理化学, 統合的学習, 火山噴火, 発泡現象, 飽和, 物質の三態, 体積変化

#### 1. はじめに

地学は複雑系の自然現象を扱い, しかもその時間的・空間的スケールが大きい. そのため実感をとまなう学習指導が難しく, 概念(知識)の説明となりやすい.

火山に関する領域では, その解決策として小麦粉, ココア, カルメ焼き, 炭酸飲料などを用いたアナログ実験が示され, 近年広く活用されるようになった(例えばwebページでは, 「早川由紀夫研究室」(<http://www.edu.gunma-u.ac.jp/~hayakawa/>); 「山口の火山」(<http://volcano.instr.yamaguchi-u.ac.jp/>); 「日本火山の会」(<http://www.kazan-net.jp/kitchen/index.html>) など, 本では林(2006)などを参照のこと). しかし, これらのアナログ実験の活用にあわせて, 基礎的事項を理解させることが, 理科の学習には欠かせないことは言うまでもない. ここでは, 高等学校[地学I](新学習指導要領の[地学基礎])の火山活動の学習に, 「飽和」と「物質の三態」, 「体積変化」といった物理化学的言語を用いて学習指導するための基礎的事項を紹介し, 物理化学的な知識や言語を取り入れた“統合的な学習指導”を提案したい.

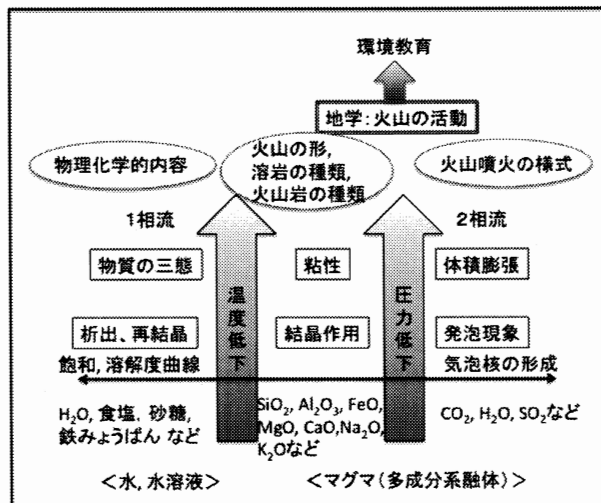
#### 2. 現行の高等学校教科書にみる火山噴火の学習内容

火山の学習では, 噴火様式, 噴出物の種類, 火山の形, 火山災害などについて学習する. これらの事象は密接に関係し, マグマの粘性と減圧発泡現象が本質的な要因となる. マグマの粘性は, 溶岩の形態や火山の形を決めるものとして古くから学習内容に含まれてきた. 近年は, 噴火の観測やアナログ実験によって, マグマ上昇や火道の開きに伴う減圧発泡現象が噴火の様式を大きく左右することがわかってきたところである.

高等学校の地学のいくつかの教科書を見ると, 火山活動の解説の中で, すでに圧力の低下による発泡現象が触れられている. 例えば, 数研出版「地学I 地球と宇宙」は, 「火山活動のしくみ」の項で「地表に近いマグマだまりでは圧力が低下するのでガス成分は溶融液から分離して気泡になる. 気泡が発生すると全体の体積は増大し, 圧力が高くなる. この圧力は火山爆発の原動力になる.」と説明している. また第一学習社「地学I」は, 玄武岩質マグマと流紋岩質～安山岩質マグマに分けて述べている. 前者については, 「粘性が低く流れやすい. このようなマグマは, 火口や割れ目から流れ出し溶岩流をつくる. 噴火は爆発的にならず, 比較的穏やかである.」と記述され, 後者については「粘性が高く流れにくい. このようなマグマが地表に出て圧力が下がると, とけ込んでいた気体成分が一気に発泡する. その結果マグマや火口付近の岩石を吹き飛ばす爆発的な激しい噴火が起こる.」と説明されている.

2010. 6.30 受理

<sup>1)</sup> 新潟大学教育学部



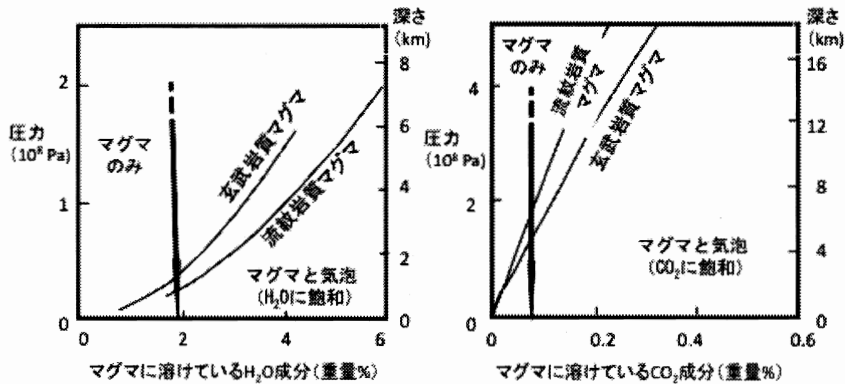
第1図 「火山噴火のしくみ」について物理・化学の知識を統合した学習の概念図。

両教科書ともに、(1) 圧力低下が気泡を発生させること、そして(2) その結果（マグマ全体の圧力が増加して）爆発的な噴火を起こすと述べている。しかし、基礎的説明が省かれているため、生徒に実感をともなった理解をさせることは難しいかもしれない。また、玄武岩質マグマとデイサイト～流紋岩質（珪長質）マグマの発泡から爆発的噴火までの過程は大きく異なるので、2つは分けて説明されるべきである。(1)を化学の「飽和」の知識と統合し、飽和現象が結晶（固体）や水滴（液体）だけでなく、ガス（気体）を作る場合もあることを指摘して、「物質の三態」の発展的な学習に結びつけることもできるであろう（第1図）。

### 3. 揮発性成分の飽和と気泡の成長

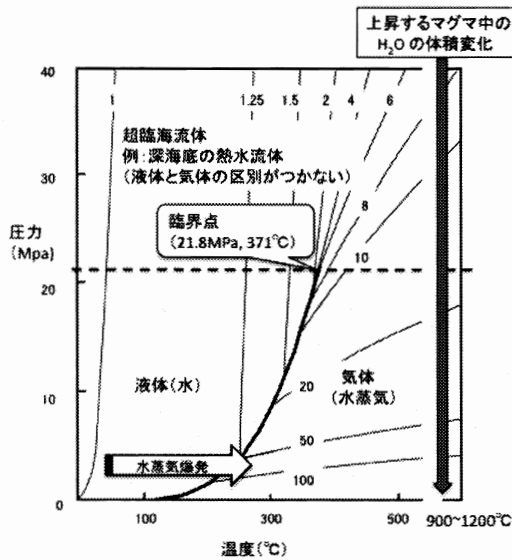
マグマ中の火山ガスは、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ を主な成分とし、玄武岩質マグマの $\text{H}_2\text{O}$ 含有量は多くても2（重量%）、安山岩質から流紋岩質のマグマの場合で2～6（重量%）である（Sparks *et al.*, 1994）。 $\text{CO}_2$ 成分は玄武岩質マグマで360～612（ppm）（Dixon *et al.*, 1988, 1991; Blank *et al.*, 1993）の値が報告されている。Cの重量に換算して98～167（ppm）である。特殊な例として、大西洋中央海嶺の“popping rock”（玄武岩質）は、4000（ppm）のC（ $\text{CO}_2$ に換算すると1.47重量%）を含むと見積もられている（Javoy and Pineau, 1991）。Sは900～1340（ppm）（Moore and Schilling, 1973; Dixon *et al.*, 1991）が報告されている。流紋岩質マグマには $\text{CO}_2$ も $\text{SO}_2$ もほとんど含まれていない。これらは、それぞれ異なる飽和点をもつ。例えば第2図は、 $\text{CO}_2$ と $\text{H}_2\text{O}$ の溶解度（飽和）曲線である。 $\text{CO}_2$ や $\text{H}_2\text{O}$ がマグマから分離して気泡になるのは、矢印で示したように、マグマが深所（高圧）から地表に向かって上昇し、飽和点に達するときである。同じ飽和現象でも、温度の低下にもなるマグマの「結晶作用」（化学領域の「析出」、「再結晶」に対応）と違って、圧力の低下にもなる飽和現象である。 $\text{CO}_2$ と $\text{H}_2\text{O}$ の飽和圧力曲線を比べると（第2図）、玄武岩質マグマでも流紋岩質マグマでも高い圧力条件で $\text{CO}_2$ が先に飽和することがわかる。つまり、玄武岩質マグマでは、深いところで $\text{CO}_2$ に飽和し、浅い場所で $\text{H}_2\text{O}$ に飽和するというような、少なくとも2段階の発泡現象が起こる。

結晶（固体）と違い、できた気泡（気泡核）はマグマの上昇（減圧）によって大きく体積膨張する（第3図）。粘性が低く、かつ高温の玄武岩質マグマ中では元素の拡散速度が大きい。したがって気泡の形成・成長がおりやすく、しかも体積膨張もおりやすい。また、気泡が容易に合体し、大きな気泡塊に成長しやすい。第4図は、約1500万年前の海底で起きたハワイ式噴火により形成された玄武岩質火山砕屑物

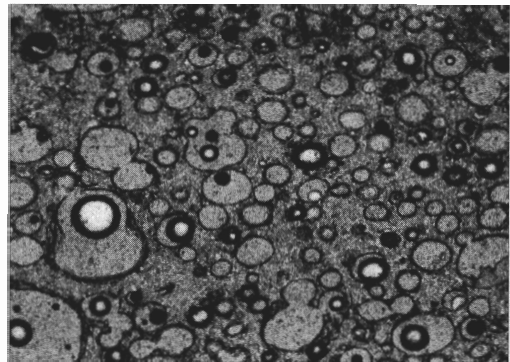


第2図 玄武岩質マグマと流紋岩質マグマのH<sub>2</sub>OとCO<sub>2</sub>の飽和曲線。(Best and Christiansen, 2001) の図4.7と図4.10を改変。元図は, Moore *et al.* (1998) とHolloway and Blank (1994) から作成された.)

(Fujibayashi and Sakai, 2003) の顕微鏡写真である。火山ガラスの中に小さな気泡がたくさん見られるが、小さな気泡が合体して大きな気泡になるのがわかる。



第3図 H<sub>2</sub>Oの体積変化。(Kokelaar (1982) の図を改変.)  
太線は、液体(水)と気体(水蒸気)の境界、つまり沸点曲線。細線は、質量1gのH<sub>2</sub>Oの体積(等体積線)。臨界点より高压の破線より上の条件では、液体と気体の区別ができない(超臨界流体)。マグマ中のH<sub>2</sub>O気泡核は、マグマの上昇にともなう減圧によって体積を指数関数的に大きくしていく。



第4図 海底で起きたハワイ式噴火の堆積物にみられる発泡組織。佐渡島小木半島に分布する中期中新世小木玄武岩層(部層)中の沢崎玄武岩(層)を構成する火山碎屑物(Fujibayashi and Sakai (2003))の顕微鏡写真(写真の横の長さは2mm.)。写真aは、楕円形の気泡がほぼ同じ方向の長軸をもって並び、マグマの流動を示している。写真bは、写真左上の大きな気泡に、小さな気泡が合体している。

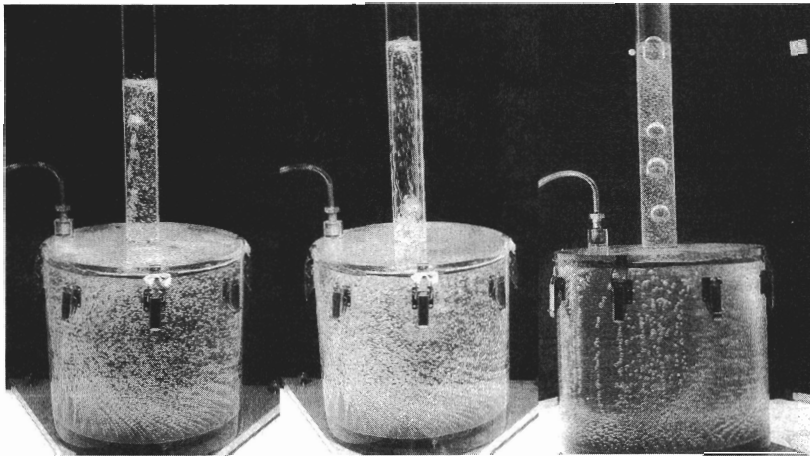
一方、粘性が大きく、かつ低温の珪長質マグマ中では元素の拡散速度が小さく、拡散による気泡成長速度と体積膨張率がともに小さい。また気泡の合体もおおりにくい。その結果、玄武岩質マグマとは、爆発的噴火の起こる仕組みが異なってくる。

#### 4. 火山噴火のしくみ

玄武岩質火山では、深所（高圧条件）で飽和するCO<sub>2</sub>ガスがマグマだまりや火道を上昇する過程で大きな気泡塊に成長する。速い速度で上昇する大きな気泡塊は、通り道にある気泡を取り込んでさらに成長し、同時に減圧膨張して体積を増していく。そのため気泡塊の上昇速度は次第に大きくなり、気泡塊がマグマから逸脱する場合もある（Plate I-a）。Plate I-aには、破裂する前と後の気泡塊が見られ、気泡が破裂してマグマが破碎する様子がよくわかる。このような破碎が火道内で起こり、火山ガスと火山砕屑物が火口から噴き出すと、ハワイ式噴火やストロンボリ式噴火となる。

第5図は、Vergnolle and Jaupart (1990) による玄武岩質マグマと類似した粘性の油に空気を流し入れた実験である。同じ粘性の油を用いても、空気の量が少ないと油（マグマ）中には大きなガスの塊はできず（A）、これは溶岩流を形成する噴火に近似できる。しかし、空気の量を増やすと、大きな気泡塊が形成される（B）。また油（マグマ）の粘性が高いと、形成される気泡塊は小さくなる（C）。Bはハワイ式噴火、Cはストロンボリ式噴火に近似できる。ハワイ式火山噴火の観測によって、噴火の直後に火口周辺の溶岩が火口中に引きずり戻される現象が観察され、これはまさに火道の中に空になった部分があることを示し、気泡塊が破裂してマグマを放出したことを支持する事実とみなされている（Vergnolle and Mangan 2000）。

一方、安山岩質～珪長質マグマの典型的な爆発的噴火様式は、ブルカノ式～プリニー式噴火である。これらは、粘性の高いマグマ中に溶存していた揮発性成分（主にH<sub>2</sub>O）、あるいはマグマ中にとじこめられていたH<sub>2</sub>O気泡が、比較的浅所でのマグマの減圧にともない、発泡および体積膨張して、その結果マグマを破碎するものである（Mader, *et al.*, 1994; Sparks, *et al.*, 1994; 下鶴ほか, 1995; Cioni, *et al.*, 2000）。例えば、Mader *et al.* (1994) の実験（第6図）は、CO<sub>2</sub>に飽和した水を0.7MPaから7kPaに急激に減圧させたものである。減圧によって大量の気泡が形成され、表層部では気泡の崩壊が起き、水が粉体のように細かく破碎、上昇した。ブルカノ式およびプリニー式の噴火で、細粒の火山灰が大量に放出されることと調和的である。また第7図は、Sparks *et al.* (1994) に示された、Hurwitz and Navon (1994) の流紋岩質溶岩



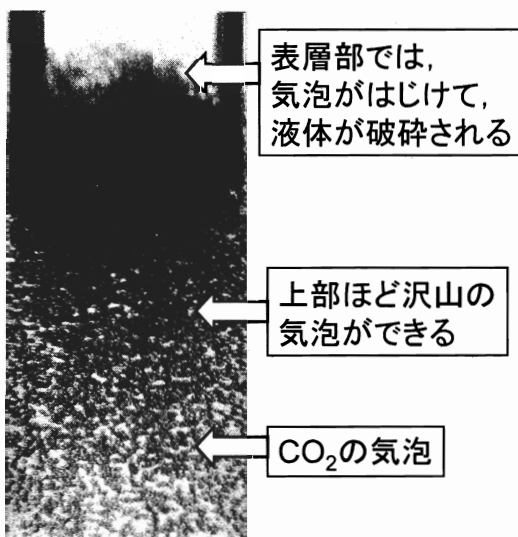
第5図 火山噴火のアナログ実験。（Vergnolle and Mangan (2000) の図12と13を改変。）

a. と b. は、粘性の低い油（0.1 Pa s）に異なる量の空気を流入。c. はやや粘性の高い油（1 Pa s）に b. と同じ量の空気を流入した場合。

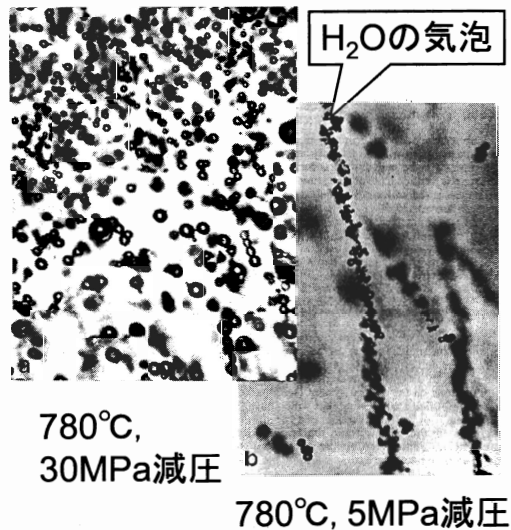
( $H_2O$ に飽和している)の実験写真である。780°Cで急激に30MPa(a)と5MPa(b)減圧し、その結果小さな気泡核が形成されているのがわかる。減圧量が大きい(a)で、より多くの気泡核が形成されている。ただし、プリニー式噴火あるいは噴煙柱崩壊型の火砕流の本質岩片の軽石の気泡核の数密度は $10^{10}$ (個/ $m^3$ )かそれ以上で(Whitham and Sparks, 1986)、これは第6図の実験の $CO_2$ に飽和した水の場合の $CO_2$ 気泡核の数密度( $10^9$ 個/ $m^3$ )を越えている。珪長質マグマの粘性は水より高く、実際には、もっと大きな減圧が起きる必要がある。また、珪長質マグマに $CO_2$ はほとんど含まれず、実際の揮発性成分は $H_2O$ であるといった違いはあるが、このような減圧によってブルカノ式〜プリニー式の噴火が引き起こされると考えられる(下鶴ほか, 1995; Mader *et al.*, 1996)。

実際に、珪長質マグマの噴火でできた火山灰を採取して顕微鏡で見ると、第8図のように、最密充填した気泡の壁が破碎した形の火山ガラスがみられる。第8図(a)には、数個の気泡の壁で取り囲まれた気泡の接合部の形を残す火山ガラス(三稜形)と、より大きな気泡の間の壁をなしていた平板形の火山ガラスが見られる。また気泡が引き伸ばされて筋状になったものもある。第8図(b)は、火山ガラスの形が気泡壁の形というよりも、脆性破壊された形のものが多い。このような火山ガラス中には、小さな気泡が多数含まれ(多孔型)、一定方向に伸張している。多孔型の火山ガラスは(a)にも少量見られる。多孔型の気泡が小さいことは、これらが火道を充填するマグマ柱のやや深部の組織を表している可能性をもつ(第6図)。減圧によって、マグマ柱上部に形成された気泡濃集部が破碎すると同時に、減圧発泡の波が深部に伝播すること(Mader *et al.*, 1996)によって、一部が脆性破壊された可能性がある。あるいは、火道壁近くのマグマ(小さな気泡を含む)が、噴火時に剪断されたのかもしれない。前者の場合は、気泡の形成や、マグマ自身あるいは気泡の体積膨張によってマグマの熱エネルギーが奪われるため、マグマが半固結〜固結状態となり、脆性的な破壊を受けると考えることができよう。これらの火山ガラスの形と発泡組織の関係については、今後の検討課題である。

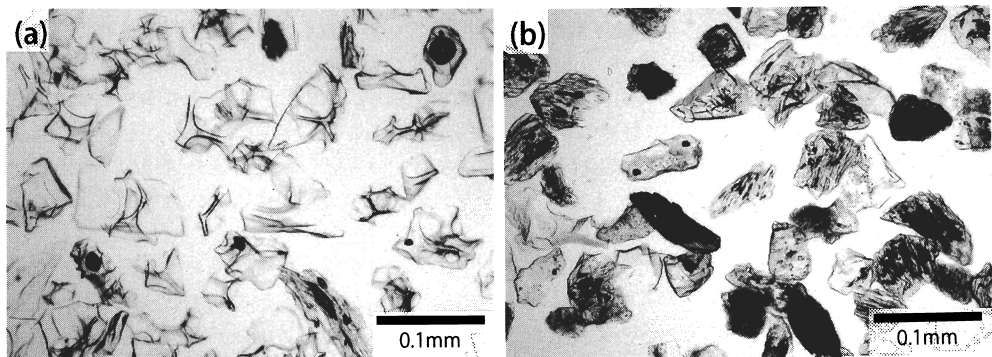
プリニー式噴火とブルカノ式噴火では、噴火の継続性に違いがある。プリニー式の噴火は大量の火山灰を放出し、定常的にマグマが供給される継続的な噴火で、一方ブルカノ式の噴火は、単発的な(短期間の)噴



第6図  $CO_2$ に飽和した水を一気に減圧したときの発泡現象。(Sparks *et al.* (1994)の図12を一部改変。)表層部では気泡が崩壊して水が細かく破碎されている。



第7図 天然の流紋岩メルトを用いた減圧実験。(Sparks *et al.* (1994)の図4を一部改変。)小さい気泡が形成され、その量は減圧の程度が大きいほど多くなっている。



**第8図** 火山灰中の火山ガラスの形と発泡組織。(a) 新潟市上荒沢周辺に露出する鮮新統Kwgテフラ層(黒川ほか, 1999)の構成粒子。Kwgテフラ層は中央日本の鮮新統に広く分布するZnp-Ohtaテフラ層(Kurokawa and Tomita, 1998)と対比される。(b) 栃木県那須烏山市周辺に露出する中新統上部Tn43テフラ層(酒井, 1986)の構成粒子。

火である。プリニー式の噴火で上述のようなマグマの破碎が連続的に起こるのは、マグマが継続的に上昇し、「発泡—気泡の体積膨張—気泡の崩壊とマグマの破碎」の一連の過程が続くからであろう(下鶴ほか, 1995)。Mader *et al.* (1996)は、揮発性成分に飽和したマグマの減圧発泡現象が起きると、それがマグマ柱の深部に向かって一定速度で伝播していくことを示しているが、臨界点(第3図)を越えるような深度ではマグマを破碎するには至らないと考えられる。おそらく、マグマの上昇による減圧発泡現象が主に働く必要がある。ブルカノ式では、火道中に溜まった火山ガスが、火口に栓をする溶岩ドームや山体の一部を吹き飛ばし、それによるマグマの急激な減圧が噴火の引き金になるのはよく知られている(下鶴ほか, 1995)。火山灰の放出量が小さく短期間の噴火で終息するのは、やはりマグマの供給量がプリニー式の場合にくらべて小さいからと考えられよう。

## 5. 発泡現象の身近な例

これまであまり教材として活用されていないが、実はパンの発泡組織は、スコリアや軽石の発泡組織と良く似た例である(Plate I-b)。パンの中のガス成分は、水蒸気、イースト菌が作り出すメタンガスが熱で分解されてできるCO<sub>2</sub>、重曹に含まれていたCO<sub>2</sub>である。成分的にも火山ガスと共通性がある。パンによって気泡の量や大きさはまちまちであるが、Plate I-bの写真のように、フランスパンの断面と軽石の断面は非常に良く似ている。ただし、パンの発泡は加熱、つまり温度の上昇による体積膨張である。マグマは周囲の岩石によって逆に冷却されるので、学習の場面では「ではなぜ発泡や体積膨張が起きるのか」という視点の転換が必要となる。

減圧発泡の身近な例は、良く知られているように炭酸飲料の栓を抜いたときの発泡である(Plate I-c)。減圧によって気泡核ができ、その後上昇しながら体積膨張していく様子がよくわかる。また泡だらけにして一気に圧力を下げると、炭酸飲料が細かくちぎれてガスと一緒に飛び散る。コーラにメントスや発泡剤を入れて噴火を実感させる方法があるが、筆者はまずもともと溶けていたCO<sub>2</sub>成分が減圧によって気泡を作ることを見せるのが重要だと思っている。他に、体積膨張の身近な例として、標高の高い場所でポテトチップスの袋が膨らむことなどを示せる。

これらの身近な例を用いて、発泡現象と火山噴火の密接な関係を理解させた後に、天然の例として、周辺地域の火山灰やスコリアを採取して実体顕微鏡観察や薄片観察などを行うと、学習効果が非常に高いであろう。

## 6. 統合的な知力を培う地学の授業

地学という教科は、長い間廃廃を問われる立場におかれ続けてきた。「高校では地学分野の学習は不要。高校では物理・化学・生物の基礎を学んで、地学は大学に入ってから学べば良い。」という高校地学不要論（廃止論）のためである。縣（1996）によると、それは1960年代から始まったらしい。しかし、にもかかわらず50年存続してきた理由があるはずである。それはおそらく、生活に密接に関わる自然現象を理解する分野であったからに他ならないと思う。

地震、火山噴火、地回り、土石流などの環境保全と防災に関わる事象は、物理探査による解析科学（地球物理学、地震学）と物質科学（構造地質学、火山学、堆積学、応用地質学など）の両面が必要である。さらに、我々の住む地球の将来を予測するためには地球の歴史（地質学）と惑星科学を知る必要がある。

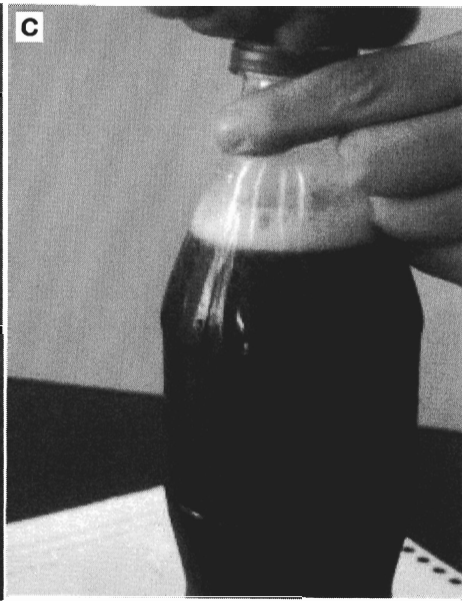
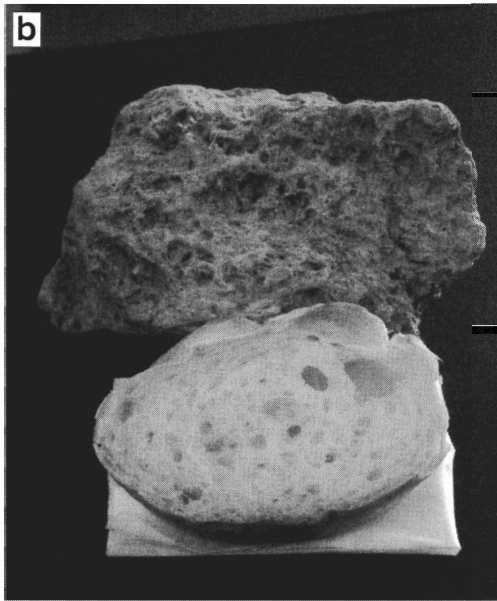
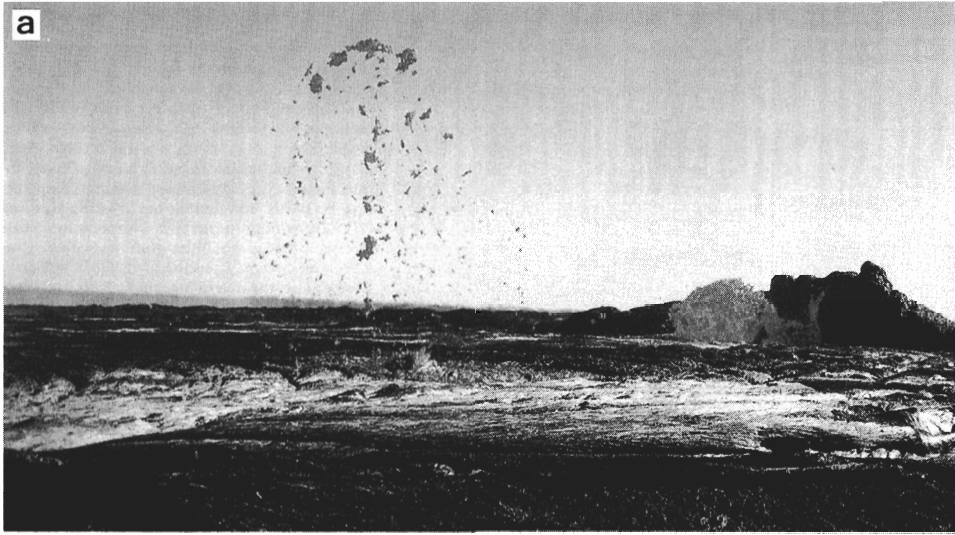
地球科学は、海洋底研究、古地磁気学的研究をきっかけに、この半世紀で飛躍的に学術研究が進展した。実証的な段階から次に実験的、理論的段階に移行している感がある。本稿で主張してきたように、今こそ物理化学、あるいは生物学の知識と統合して地質現象を教える時期にあると考える。

### 引用文献

- 縣秀彦（1996）：「第3章理科教育の内容」の「4. 地学教育」, 左巻健男ほか編「新理科教育法」, 東京書籍, p. 80-88.
- Best, M.G. and Christiansen, E.H. (2001): *Igneous Petrology*. Blackwell Science, Inc., Massachusetts, 458p.
- Blank, J.G., Delaney, J.R. and Marais, D.J. (1993): The concentration and isotopic composition of carbon in basaltic glasses from the Juan de Fuca Ridge Pacific Ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 875-887.
- Cioni, R., Marianelli, P., Santacroce, R., and Sbrana, A., (2000): Plinian and subplinian eruptions. In *Encyclopedia of Volcanoes*. eds. Sigurdsson, H., Houghton, B.F., McNutt, S.R., Rymer, H., and Stix, J., Academic Press, San Diego, 477-494.
- Dixon, J.E., Stolper, E. and Delaney, J.R. (1988): Infrared spectroscopic measurements of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in Juan de Fuca Ridge basaltic glasses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 90, 87-104.
- Dixon, J.E., Clague, D.A. and Stolper, E.M. (1991): Degassing history of water sulfur and carbon in submarine lavas from Kilauea Volcano Hawaii. *Jour. Geol.*, 99, 371-394.
- Fujibayashi, N. and Sakai, U. (2003): Vesiculation and eruption processes of submarine effusive and explosive rocks from the middle Miocene Ogi Basalt Sado Island Japan. In *Explosive Subaqueous Volcanism Geophys. Monograph 140*, eds. White, J.D.L., Smellie, J.L. and Clague, D.A., Amer. Geophys. Union, 259-272.
- 林信太郎（2006）：世界一おいしい火山の本ーチョコやココアで噴火実験ー, 小峰書店
- Holloway, J.R. and Blank, J.G. (1994): Application of experimental results to C-O-H species in natural melts. In *Volatiles in magmas*. eds. Carroll M.R. and Holloway J.R., Reviews in Mineralogy, 83, 36-42.
- Hurwitz, S. and Navon, O. (1994): Bubble nucleation in rhyolitic melts: Experiments at high pressure, temperature and water content. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 122, 267-280.
- Javoy, M. and Pineau, F. (1991): The volatiles record of a "popping" rock from the Mid-Atlantic Ridge at 14°N: Chemical and isotopic composition of gas trapped in the vesicles. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 107, 598-611.
- Kokelaar, B.P. (1982): Fluidisation of wet sediments during the emplacement and cooling of various igneous bodies. *J. Geol. Soc. London*, 139, 21-33.
- 黒川勝己, 永田亮, 吉田卓司 (1999) : 新発田市上荒沢～黒川村胎内川地域の内須川層・鍬江層の火山灰層

- ーとくに鍬江層中のZnp-Kwg相当火山灰層についてー, 新潟大学教育人間科学部紀要 自然科学編, 2, 1-32.
- Kurokawa, K. and Tomita, Y. (1998): The Znp-Ohta ash; An early Pliocene widespread subaqueous tephra deposit in central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 104, 558-561.
- Mader, M.T., Zhang, Y., Phillips, J.C., Spatks, R.S.J., Sturtevant, B. and Stolper, E. (1994): Experimental simulations of explosive degassing of magma. *Nature*, 37, 285-88.
- Mader, M.T., Phillips, J.C., Spatks, R.S.J. and Sturtevant, B. (1996): Dynamics of explosive degassing of magma: Observations of fragmenting two-phase flows. *Jour. Geophys. Res.* 101, B3, 5547-5560.
- Moore, J.G. and Schilling, J-G. (1973): Vesicles water and sulfur in Reykjanes Ridge Basalts. *Contr. Mineral. Petrol.*, 41, 105-118.
- Moore, G., Vennemann, T. and Carmichael, I.S.E. (1998): An empirical model for the solubility of H<sub>2</sub>O in magmas to 3 kilobars. *Am. Mineral.*, 83, 36-42.
- 酒井豊三郎 (1986): 中新統荒川層群 (栃木県) の模式地における層序. 宇都宮大学教養部研究報告, 19, Sec.2, 49-70.
- Schmincke, H-U. (2004): *Volcanism*, Springer Verlag, Berlin, 324p.
- 下鶴大輔, 荒牧重雄, 井田喜明 (1995): 火山の事典. 朝倉書店, 590p.
- Spatks, R.S.J., Barclay, J., Jaupart, C., Mader, H. M. and Phillips, J.C. (1994): Physical aspects of magma degassing I. Experimental and theoretical constraints on vesiculation. *Reviews in Mineralogy*, 30, 413-445.
- Vergnolle, S. and Jaupart, C. (1990): Dynamics of degassing at Kilauea Volcano Hawaii. *Jour. Geophys. Res.*, 95, B3, 2793-2809.
- Vergnolle, S. and Mangan, M. (2000): Hawaiian and Strombolian eruptions. *In Encyclopedia of Volcanoes*, eds. Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H. and Stix, J., Academic Press, 447-461.
- Whitham, L. and Sparks, R.S.J. (1986): Pumice. *Bull. Volcanol.*, 48, 209-223.
- 「早川由紀夫研究室」 <http://www.edu.gunma-u.ac.jp/~hayakawa/> (2010. 5. 1. アクセス)
- 「山口の火山」 <http://volcano.instr.yamaguchi-u.ac.jp/> (2010. 5. 1. アクセス)
- 「日本火山の会」 <http://www.kazan-net.jp/kitchen/index.html> (2010. 5. 1. アクセス)





**Plate I-a** キラウエア火山で観察された気泡塊とその破裂。(Schmincke (2004) のFig. 4.30.)

**Plate I-b** 軽石とパンの発泡組織の比較。

両者はよく似た組織を示すが、パンの発泡組織は温度上昇による沸騰と体積膨張であるのに対して、軽石の発泡組織は減圧によって発泡、体積膨張したものである。

**Plate I-c** 減圧にともなう発泡の身近な例。

炭酸飲料の栓を抜いたときの発泡。減圧によって気泡核ができ、その体積は上部ほど大きい。また、気泡は上昇しながら体積膨張していく。